

방사선 영상장비용 GEM (Gas Electron Multiplier) 검출기 개발

Development of Gas Electron Multiplier(GEM)
for Digital Radiographic System

KAERI

주관연구기관
한국원자력연구소

공동연구기관
마젤테크(주)

과 학 기 술 부

제 출 문

과학기술부장관 귀하

본 보고서를 “방사선 영상 장비용 GEM 검출기 개발” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2002. 2.

주관연구기관명	: 한국원자력연구소
과 제 명	: 방사선 영상장비용 GEM 검출기 개발
주관연구책임자	: 문 병 수
연 구 원	: 정종은, 이정운, 홍석봉 김용균, 김장열, 김정복 이우교, 한상호
공동연구기관명	: 마젤테크주식회사
과 제 명	: GEM 검출기 Readout 회로개발 및 성능검사
공동연구책임자	: 이 지 수
연 구 원	: 이원구, 천상호, 김경수 백정훈, 배 한, 강우식 정옥철, 김진숙
위탁연구기관명	: 연세대학교
과 제 명	: GEM 디지털 방사선 센서의 설계 및 특성분석
위탁연구책임자	: 조 효 성
연 구 원	: 강상묵, 홍대기

요 약 문

I. 제 목: 방사선 영상장비용 GEM검출기 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

X-선을 이용하여 물체의 내부구조를 2차원 디지털 영상으로 표현하는 방사선 영상(Digital Radiography) 기술은 산업적으로나 의학적으로 응용분야가 광범위하게 확산되기도 있고 기술집약적 고부가가치형 기술이다. 현재 Image Plate나 CMOS를 이용한 시스템, CCD와 섬광체를 결합한 FOS(Fiber Optic with Scintillator)/CCD 시스템 등 상용화 된 제품들이 나오고 있으나 가격, 기능면에서 범용화 되지는 못한 실정이다. 최근에 유럽과 미국을 중심으로 X-선 위치 센서인 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)가 개발된 이후 고분해능 고계수율 특성을 지닌 MDOT(Microdot Detector)등과 같은 기체 검출기들이 활발히 연구 개발되고 있는데 이들 검출기 개발은 저비용 고해상도 DR시스템 실용화에 크게 기여할 것으로 기대되고 있다. 본 과제에서는 반도체나 섬광체 검출기에 비하여 제작단가가 상대적으로 적은 GEM(Gas Electron Multiplier)검출기를 개발하여 기존의 DR시스템의 영상 검출센서로 적용코자한다.

III. 연구개발의 내용

1. 검출기 개발용 Simulaion 코드 개발

GEM검출기의 동작 특성을 분석하는데 필요한 전장 계산용 프로그램인 MAXWELL코드를 설치하였으며 전기력선을 추적하기 위하여 전장가시화 프로그램인 SHOWFIELD를 개발하였고 X-선 영상 평가에 필요한 Monte Carlo 모의실험코드인 IMAGEQUAL을 개발하였다.

2. GEM검출기 설계

첫째, 방사선 영상의 해상도 분석을 위하여 X-선이 물체를 투과할 때 Radial방향으로 Scattering되는 정도를 파악하기 위한 모의 실험을 수행하였다. 폭이 $2\ \mu m$ 인 홈들이 파여있는 두께 $350\ \mu m$ 의 알루미늄 판에 X-선이 투과

할 때 생성되는 영상을 EGS4를 이용하여 계산하였으며 이 경우 gray scale 영상으로부터 $2\ \mu\text{m}$ 홈들의 식별이 가능함을 확인하였다.

둘째, GEM검출기의 해상도 분석을 위하여 Ar, Xe기체와 CsI등 광-전자 변환체 내에서 Photon의 Radial 방향 이동거리를 추정하였다. EGS4를 사용하여 Simulation을 수행하였는데 $100\ \mu\text{m}$ 의 공간해상도에 적절한 X-선 에너지 및 GEM검출기 내 기체층의 두께를 조사하였다. Ar기체의 경우 두께를 3mm로 할 때 입사 X-선 에너지는 15keV이하를 사용해야 하며 Xe기체의 경우 같은 두께에 40keV까지 사용이 가능함을 확인하였다.

셋째, GEM판의 상단 코팅물질 또는 별도의 Micro Channel Plate를 사용할 경우 코팅 물질인 CsI로 부터 생성되는 전자의 수를 추정하였다. EGS4를 이용하여 생성된 전자의 위치 및 에너지를 추정한 후 CsI 표면으로 부터의 전자의 Escape Depth인 56nm와 Universal Yield Curve를 사용하여 MCP hole내부로 방출되는 전자의 수를 추정하였다.

넷째, Ar 및 Xe 기체에 대한 광-전자 변환 특성을 조사하였다. Photon의 이동 방향에 대한 생성 전자수의 분포, 생성된 전자들의 에너지 분포, 해당 기체와 코팅 물질인 CsI에서 생성된 전자들의 수 비교 등이다. 광-전자 변환 물질로 기체를 사용할 경우 CsI를 사용할 경우 보다 생성되는 전자의 수는 훨씬 많으나 공간해상도를 높이기 위해서는 Micro Channel Plate를 사용이 바람직 함을 확인하였다.

다섯째, 1024×1024 영상용 2048채널 Readout회로를 설계하였으며 1차년도 목표인 512 채널용 ASIC을 구입하였고 GEM검출기 Chamber에 이를 접속하는데 필요한 Interface Board를 설계하였다.

여섯째, GEM검출기의 동작 특성 분석과 관련하여 MAXWELL코드와 본 과제를 통하여 개발한 전장 가시화 코드인 SHOWFIELD를 이용하여 인가 유도 전장의 세기에 따른 전기장의 분포와 GEM검출기 각 전극에 도달하는 유도 전장의 비율을 분석하였다.

3. GEM 검출기 제작

GEM은 유럽소재 CERN에 위탁하여 당소 설계요건에 맞도록 주문 제작하였으며 광전자 변환체는 Proxitronic사 제품을 사용하였다. 또한, 검출기 Chamber는 스텐레스강과 Mylar를 사용하여 각1개씩 제작하였으며 광전자 변환체와 기체증폭기를 Chamber에 고정하여 결합시킨후 수집 전극을 설치하고 가스라인을 연결시킴으로써 GEM검출기 시제품을 완성하였다. 또한, X-선 영상의 확대 배율조정 및 투시 영상 획득의 편의를 위해서 피검사체

이송장치를 설계 제작하였다.

4. GEM 검출기 시제품 성능 평가

제작된 GEM 검출기로부터 신호를 취득하고 스펙트럼을 조사한 결과 에너지 분해능이 25%로 비교적 우수함을 확인하였다. 기체 증폭도 조사에서는 수집 전기장의 세기가 8kV/cm일 때 최고 전하 이득이 약 10,000에 달함을 확인하였다. 수집 전기장의 크기에 따른 전하 분할측정 실험과 표류전기장에 따른 전하분할 실험, 및 Transparency 대비 표류전기장 조사 실험등을 통하여 개발된 GEM검출기 시제품의 성능이 우수함을 확인하였다. 또한, CCD카메라를 이용하여 텅스텐 Wire의 영상을 획득하였다.

IV. 연구개발 결과

방사선 투과 영상획득용 GEM검출기 시제품을 설계, 제작하였으며 이의 특성평가를 완료하였음. 또한, 방사선 영상장비에 필요한 피검물 이송장치 시제품을 제작하였음.

V. 연구개발결과의 활용계획

반도체 웨이퍼, IC, 전자총상단 코일, 소형 PCB 등 소형 부품의 정밀 검사용 방사선 영상장비에 활용이 가능하며 진단의학용 X-선 영상장비에도 활용이 가능할 것으로 예상됨.

S U M M A R Y

I. Title: Development of a Gas Electron Multiplier Detector for Digital Radiographic Systems

II. Objective and Necessity of the Study

Digital radiography is a field of technologies used to generate two dimensional X-ray digital images. It is being used widely not only in medical applications but also in various industrial applications. The current products based on the technology include the image plates, CMOS systems, fiber optic scintillator plus CCD systems. For these products to be more widely used, the high cost must be reduced to a level of conventional equipments. Recently in United States and in Europe, they started to develop the microdot detectors which have better spatial resolution and better dynamic ranges than the micro strip gas chambers (MSGC). The development of these detectors will help reduce the cost for application of digital radiography technology in various application fields. The purpose of our project is to develop a gas electron multiplier(GEM) detector so that it can be used as a replacement of the other detectors currently being used in digital radiography systems.

III. Contents of the Study

1. Development of Simulation Programs for GEM Detector Design

The MAXWELL code which is commercially available, has been installed to study electromagnetic characteristics of GEM detectors. A program SHOWFIELD has been developed to draw field lines from the computed results of MAXWELL. A Monte Carlo simulation code IMAGEQUAL has been developed to study the spatial resolution of X-ray images.

2. Design of a GEM Detector

First, we made various simulation runs using EGS4 to study how far gamma particles move in radial direction while it penetrates a material vertically. When an aluminum plate $350\ \mu\text{m}$ thick with $2\ \mu\text{m}$ thick strips is used, the X-ray image is found to be readable in gray scale image form.

Second, we studied the spatial resolution for gas detectors using EGS4 simulation runs. Assuming our target spatial resolution is $100\ \mu\text{m}$, we determined the range of X-ray energies and the range of thickness for the Ar and Xe gases. We found that the energy must be below 15keV when the thickness is above 3mm for the Ar gas. Similarly, for the Xe gas, the energy must be below 40keV for the same thickness.

Third, we estimated the number of electrons generated by CsI which is the coating material for either the GEM plate or the Micro Channel Plate. EGS4 is used to transport the photons and electrons generated, and the escape depth $56\ \mu\text{m}$ for CsI material, and the universal yield curve are used for this study.

Fourth, we performed various calculations to study the characteristics of converting photons to electrons by the Ar and Xe gases. The number of electrons generated, energy spectrum of the generated electrons, and the comparison of electrons generated by different photo-converters. We found gases generate more electrons but MCP must be used to maintain a better spatial resolution.

Fifth, we designed a readout circuit for 2048 channels which will be used for 1024×1024 images. We purchased ASIC chips for 512 channels which is what was set for the target product of the first year, and designed and developed an interface board.

Sixth, we studied the electric field vs the voltage supplied and the ratio of electrons arriving at the bottom part of the detector relative to

the number of electrons generated using the MAXWELL code and the SHOWFIELD code we developed.

3. Fabrication of a GEM Detector

We designed the GEM plates and ordered CERN to fabricate the plates. The photo-converters were purchased from Proxitronic Co. We designed and fabricated two sets of detector chambers; one with stainless steel and the other with mylar. A pair of GEM plates and the photo converter were placed in the chamber, the readout circuits were connected, and the gas line was hooked up to complete a detector testing system.

4. Performance Evaluation of the Prototype GEM detector

We have obtained the signal from the GEM detector and demonstrated the relative good energy resolution of 25% from the spectrum measurements. The maximal gas gain of 10,000 has been attained at a fixed collection field of 8 kV/cm. The developed GEM detector has shown an excellent performance in the test of the charge sharing with respect to the collection and drift field strength, and the transparency versus drift field. The X-ray image of a tungsten wire was also acquired using a CCD camera.

IV. Results of the Study

A prototype GEM detector has been built and its performance has been evaluated to find that it works relatively well. A scanner system to move the object whose picture is to be taken has been designed and built.

V. Suggestions for Applications of the Results

The GEM detector developed can be used for a replacement of detectors in digital radiography systems currently being used for examining small parts such as solid state wafers, IC's, and small PCB's.

CONTENTS

Summary	i
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Current status of research and development	11
Section 1. Current status of research and development	11
Section 2. Weakness of Current Technology and Future Prospects	16
Section 3. Result of Analysis for Past R&D Works	17
Section 4. Result of Detailed Analysis	18
Section 5. Differences between Proposed and Existing Technologies	21
Section 6. Analysis on the Raw Materials	22
Chapter 3. Contents and results of the project	23
Section 1. Development of Simulation Codes	25
Section 2. Design of a GEM Detector	34
1. Analysis on Spatial Resolution of X-ray Images	34
2. Estimation of Radial Movement of Photons in Photo-Converters	40
3. Analysis on Photo-Conversion Characteristics of CsI	47
4. Analysis on Photo-Conversion Characteristics of Ar/Xe Gas	55
5. Design of Multi-Channel Read-out Circuits	59
6. Analysis on Electric Field Characteristics of GEM Detectors	67
Section 3. Fabrication of a GEM Detector	75
1. Design and Fabrication of Detector Chamber	75
2. Linkage of Photo-Converters and GEM Plates	78
3. Installation of Electrodes and Gas Lines	79
4. Manufacture of GEM Plates and Photo Converters	83
5. Design and Manufacture of Scanner	87
Section 4. Performance Evaluation of the Prototype GEM Detector	90
1. Signal Acquisition and Spectrum Measurement	90
2. Measurement of Gas Gain	92
3. Charge Sharing between Electrodes in Single GEM Detector	

as a Function of the Induction Field	93
4. Charge Sharing between Electrodes as a Function of Drift Field	95
5. Transparency vs Drift Electric Field Measurement	96
6. Ion Feedback Measurement	97
7. Acquisition of X-ray Image	98
 Chapter 4. Achievement of project objectives	 101
 Chapter 5. Plans for application of the results	 103
 Chapter 6. Reference	 105
 Appendixes A. List of Micro-Strip Computer Program	
Appendixes B. List of GEM-HOLE Computer Program	
Appendixes C. Analysis on Electron Generation by Micro-Channel Plates	
Appendixes D. Status of Readout Integrated Circuits for Radiation Detector	

목 차

요약문	i
제 1 장 서론	1
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	11
제 1 절 국내·외 기술개발 현황	11
제 2 절 현기술의 취약성 및 향후 기술개발 전망	16
제 3 절 연구개발 사례에 대한 자체분석 및 평가결과	17
제 4 절 세부기술사항의 검토 분석결과	18
제 5 절 기존의 특허 및 외국의 기술과의 차이점 비교	21
제 6 절 원자재에 대한 검토분석	22
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	23
제 1 절 검출기 개발용 시뮬레이션 코드 개발	25
제 2 절 GEM 검출기 설계	34
1. X선 영상 해상도 분석	34
2. 광전자 변환체내 photon 이동거리 추정	40
3. CsI의 광전자 변환 특성분석	47
4. Ar, Xe 기체의 광전자 변환 특성 분석	55
5. 다채널 Readout 회로 설계	59
6. GEM 검출기 동작특성 분석	67
제 3 절 GEM 검출기 제작	75
1. 검출기 Chamber 설계 및 제작	75
2. 광-전자 변환체 및 기체증폭기 결합	78
3. 수집전극 및 가스라인 설치	79
4. GEM 및 광-전자 변환체 제작	83
5. 피검사체 이송장치 제작	87
제 4 절 GEM 검출기 실험결과	90
1. 검출기 신호획득 및 스펙트럼 조사	90
2. 기체증폭도 조사	92
3. 수집전기장과 전하분할	93
4. 표류전기장과 전하분할	95

5. Transparency 대비 표류전기장 조사	96
6. Ion Feedback 조사	97
7. X-ray 이미지 획득	98
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도	101
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	103
제 6 장 참 고 문 헌	105
부록 A : 프로그래밍 Micro-Strip	
부록 B : 프로그래밍 GEM-HOLE	
부록 C : Micro Channel Plate 에 의해 생성되는 전자의 수 추정	
부록 D : 방사선 검출기용 전자회로 기술개발 현황	

표 목 차

표 3-2-1. Elctron Range의 계산값과 실험값 비교.	49
표 3-3-1. GEM 적층 전압 분배표	86

그 림 목 차

그림 1-0-1. GEM을 이용한 방사선 영상장비 개념도	3
그림 1-0-2. GEM 검출기 개발용 시스템 구성도	4
그림 1-0-3. GEM 검출기의 미소구멍 내에서의 전위 및 전장 분포	5
그림 1-0-4. 엑스선 센서가 제거된 순수한 readout 회로와 결합된 GEM 검출기의 구조	6
그림 1-0-5. 엑스선 센서가 제거된 순수한 readout 회로: (a) 직교 스트립형 구조 (b) 픽셀형 구조	7
그림 1-0-6. (a) GEM 검출기를 응용한 DR 시스템의 개략도 (b) CERN에서 GEM 검출기와 직교 스트립형 readout 회로를 결합한 시스템으로 얻은 박쥐 다리의 엑스선 영상	8
그림 1-0-7. GEM 검출기의 기체이득의 감소 및 증가: (a) 상위전극에 의한 일차전자 포획, (b) 하위전극에 의한 증폭전자 포획, (c) 전자증폭이 일어나는 길이의 증가로 인한 기체이득의 증가	9
그림 3-0-1. 기체검출기 MSGC와 결합된 GEM 검출기	24
그림 3-0-2. GEM 검출기의 구조	24
그림 3-0-3. GEM 검출기의 미소구멍에서 일어나는 기체증폭현상	24
그림 3-1-1. MAXWELL 시뮬레이터에서 제공되는 (a)전위분포 및 (b)grid에서의 전장벡터분포의 예	25
그림 3-1-2. 가상전기력선(pseudo electric field) 추적원리	26
그림 3-1-3. 물과 칼슘의 선형감쇠계수(linear attenuation coefficients)	29
그림 3-1-4. 신틸레이션 검출기를 기반으로 한 몬테칼로 모의실험의 흐름도	33
그림 3-1-5. 몬테칼로 모의실험에 사용된 신틸레이션 검출기를 기반으로 한 영상시스템의 구조	34
그림 3-2-1. GEM 검출기 해상도 분석결과-1	35
그림 3-2-2. GEM 검출기 해상도 분석결과-2	36
그림 3-2-3. 모의실험에 사용된 펜텀의 엑스선 영상 : 128x128 픽셀(좌측), 512x512 픽셀(우측)	37
그림 3-2-4. 점원의 엑스선 영상: 콜리메이터가 없을 경우(좌측), 콜리메이터가 있을 경우(우측)	37
그림 3-2-5. 섬광체 두께 변화에 따른 PSF(point spread function) 측정	38

그림 3-2-6. 섬광체 두께 변화에 따른 FWHM(full-width half-maximum) 측정	39
그림 3-2-7. 섬광체 두께 변화에 따른 MTF(modulation transfer function) 측정	40
그림 3-2-8. Au판 내에서 생성된 전자의 위치분포	41
그림 3-2-9. 입사 Photon의 에너지대비 생성된 전자의 수	42
그림 3-2-10. CsI 판 내에서 생성된 전자의 위치분포	42
그림 3-2-11. 입사 Photon의 에너지대비 생성된 전자의 수	43
그림 3-2-12. Ar기체(두께 20cm)내에서 Photon의 Radial방향 최대 이동거리	43
그림 3-2-13. 입사 Photon의 에너지 대비 Ar기체에서 생성된 전자의 수	44
그림 3-2-14. Ar기체(두께 3mm) 내에서 생성된 전자의 위치분포	44
그림 3-2-15. Ar기체(두께 6mm) 내에서 생성된 전자의 위치분포	45
그림 3-2-16. Xe 기체(두께 20Cm)내에서 Photon의 최대 이동거리	46
그림 3-2-17. Ar기체(두께 6mm)내에서 Photon의 최대 이동거리	46
그림 3-2-18. Xe 기체(두께 6mm)내에서 Photon의 최대 이동거리	47
그림 3-2-19. 알미늄 내에서 생성된 전자의 Flux분포	49
그림 3-2-20. CsI 내에서의 Detection Yield	50
그림 3-2-21. CsI에 대한 Conversion Efficiency 계산 결과	52
그림 3-2-22. 계산에 사용한 MCP의 구조	53
그림 3-2-23. 한 개의 MCP Hole 내부에 생성된 전자의 수	54
그림 3-2-24. 입사 Photon의 에너지 대비 MCP Hole내부에 생성된 전자의 수	55
그림 3-2-25. Ar 기체내에서 생성된 전자의 수	56
그림 3-2-26. Ar 기체내에서 생성된 전자의 에너지 분포	57
그림 3-2-27. Ar 기체내에서 생성된 전자의 축 방향 위치분포	57
그림 3-2-28. Xe 기체내에서 생성된 전자의 수	58
그림 3-2-29. Xe 기체내에서 생성된 전자의 에너지 분포	58
그림 3-2-30. Xe 기체내에서 생성된 전자의 축 방향 위치분포	59
그림 3-2-31. 256×256 Channel 신호처리 Block Diagram	61
그림 3-2-32. RENA 칩의 Block Diagram	61
그림 3-2-33. Analog 신호의 처리 경로 Block Diagram	63
그림 3-2-34. RENA 칩의 Pad Layout	65

그림 3-2-35. PCI-DIO-96 Connector Pin Assignments	66
그림 3-2-36. Data Acquisition Interface 회로 구성도	67
그림 3-2-37. Data Acquisition Interface 회로	67
그림 3-2-38. 설계된 GEM 검출기의 기하학적 크기 및 형태	68
그림 3-2-39. 설계된 GEM 검출기의 미소구멍 내에서의 전기장의 세기	69
그림 3-2-40. 설계된 GEM 검출기의 미소구멍의 표면의 따라 계산된 전기장의 세기	71
그림 3-2-41. 유도전장 세기 (a)3 kV/cm와 (b)15 kV/cm에서의 정전기장 분포	72
그림 3-2-42. 인가 유도전장의 세기(1,5,7,10,15,20 kV/cm)의 변화에 따른 전기장 분포	74
그림 3-2-43. 유도전장의 세기에 따른 GEM 검출기의 각 전극에 도달하는 유도전장의 비율	75
그림 3-3-1. GEM 검출기용 Chamber	76
그림 3-3-2. GEM 검출기 챔버 설계도	77
그림 3-3-3. Chamber 완성도 - Acryl 사용	77
그림 3-3-4. Chamber 완성도 - Stainless Steel 사용	78
그림 3-3-5. GEM 검출기 - 전자 생성 및 증폭 개괄도	79
그림 3-3-6. GEM의 Hole 배열	80
그림 3-3-7. GEM의 단면도	80
그림 3-3-8. Readout plate 개괄도	81
그림 3-3-9. Readout Plate와 검출기 연결 회로	81
그림 3-3-10. 가스라인 설계도 (World Gas Tech사에 발주 제작)	82
그림 3-3-11. Test shielding box 및 진공펌프	82
그림 3-3-12. Gas 혼합시스템	83
그림 3-3-13. CERN에서 제작된 GEM의 현미경 사진(위) 및 GEM hole의 형태(아래)	84
그림 3-3-14. 광-전자 변환체로 사용될 MCP hole의 단면	85
그림 3-3-15. GEM 적층 및 전압 배치도	87
그림 3-3-16. 피검사체 이송장치 정면도 및 측면도	88
그림 3-3-17. 이송장치 세부 설계도	89
그림 3-3-18. 완성된 피검물 이송장치 사진	90
그림 3-3-19. 검출기 신호특성조사 개략도	91
그림 3-3-20. Signal Pulse	91

그림 3-3-21. Fe-55 pulse height spectrum	92
그림 3-3-22. Effective gain as a function of GEM voltage.	93
그림 3-3-23. Charge sharing between electrodes in the single GEM detector as a Induction of the induction field	94
그림 3-3-24. Charge sharing between electrodes as a function of drift field	95
그림 3-3-25. Transparency as a function of drift field	97
그림 3-3-26. Ion feedback ratio as a function of drift field for two GEM Voltages	98
그림 3-3-27. CCD결합 X-ray imaging system	99
그림 3-3-28. X-ray image of tungsten wire	99

제 1 장 서 론

이 보고서는 원자력 단기 실용화 연구사업의 일환으로 2000년 11월 착수하여 1년동안 수행한 ‘방사선 영상장비용 GEM검출기 개발’ 과제의 연구 수행내용을 기술하고 있다. GEM(Gas Electron Multiplier)검출기는 알곤, 지논 등 기체를 광-전자 변환체로하여 입사된 X-선으로부터 전자들을 생성시킨 후 CERN에서 제작한 초소형 Hole들을 갖는 GEM Plate를 통과토록 하여 전자들을 증폭시킨후 이를 수집하는 영상검출기이다. 이 절에서는 GEM 검출기 개발의 필요성과 개발후 적용대상 장비, 그리고 GEM검출기의 특성에 대하여 차례로 기술한다.

기존의 필름/스크린을 매개로 하는 아날로그 방식의 영상장치는 아직까지도 전체 의료 및 산업용 영상기기의 약 70%를 차지할 만큼 여전히 주류를 이루고 있다. 그러나 필름/스크린 방식에 의한 영상촬영 방식은 매년 증가하는 필름의 보관 및 관리 그리고 기존 영상자료의 활용 등에 많은 문제점들이 제기되어 왔다. 이러한 제반의 문제점들을 해결하기 위해서 많은 양의 필름을 전산·정보장비를 이용하여 보관장소를 축소시키고, DB 프로그램을 사용하여 데이터의 관리와 검색 및 전달의 편리함을 도모하고자 필름의 디지털화를 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다.

기존의 엑스선 영상을 디지털화 하는 기술, 즉 엑스선에 의한 영상신호를 전기적인 신호로서 획득, 영상처리하여 화상을 구성하는 기술을 DR(digital radiography)이라 정의할 수 있는데, 이러한 DR 기술은 산업적(비파괴검사, 공항·항만의 보안장비), 의학적(의료진단)으로 광범위하게 응용될 수 있는 차세대 엑스선 영상시스템이다. 그런데 미래 고부가가치형 산업인 DR 시스템에서의 성공의 관건은 DR 시스템이 기존의 아날로그 방식의 엑스선 영상시스템에 비해 얼마나 우수한 화질의 영상을 제공하느냐에 달려 있으며, 영상의 화질에 직접적인 영향을 미치는 DR 검출기의 성능은 무엇보다도 중요하다고 하겠다. 본 연구와 관련하여 현재 국외에서는 우수한 DR 검출기의 개발 및 성능향상을 위해 오래 전부터 많은 연구와 투자를 해 오고 있는 반면, 국내에서는 방사선 검출기 제작의 어려움으로 인해 실질적인 연구 및 개발은 아직까지는 미비한 실정이다.

최근에 유럽과 미국을 중심으로 반도체 공정기술을 이용한 방사선 위치 센서인 MSGC(microstrip gas chamber)가 개발된 이후 고위치분해능, 고계수율 특성을 지닌 기체 마이크로 센서들(MDOT, GEM 등)의 개발이 활발히 이어지고 있는데[1-5], 이러한 첨단 엑스선 영상센서의 개발은 저비용, 고해상도 DR 시스템을 구현하는데 크게 기여할 것으로 기대된다. 특히 GEM(gas electron multiplier) 검출기는 최근에 유럽의 입자가속기 연구소인 CERN에서 고에너지 입자물리학 분야에서 소립자의 궤적을 추적하기 위한 센서로서 최초로 고안되었다. 이 검출기는 기존의 다른 기체검출기들에 비해 공간해상도(spatial resolution), 시간해상도(time resolution), 검출효율(detection efficiency) 등 여러 면에서 뛰어난 동작특성을 지니고 있는 것으로 알려지고 있다[6,7]. 또한 GEM 검출기의 신호증폭율이 충분히 높을 경우 readout 회로 위에 직접 결합되어 제작되던 기존의 반도체 검출기의 구조가 readout 회로로부터 완전히 분리될 수 있어, GEM 검출기 자신은 readout 회로와는 분리된 엑스선 검출기로서 동작하며 또한 readout 회로의 설계도 단순화 및 최적화 시킬 수 있다.

GEM 검출기는 반도체나 섬광체 검출기에 비하여 제작단가가 저렴하므로 기존의 DR 시스템의 영상센서로서 적용할 경우 현재까지는 고가인 DR 시스템의 대중화가 가능해 지고, 또한 기존의 아날로그 필름/스크린 시스템에 비해 조사선량을 낮출 수 있어서 방사선 방호에도 이점을 지니고 있다. 본 연구에서는 이러한 국내·외 DR 시스템 개발의 한계를 극복하고자, 제작이 용이하고 제작비용이 저렴하며 또한 동작특성이 우수한 새로운 개념의 방사선 센서인 GEM 검출기를 기존 DR 시스템에 적용하고자 한다.

GEM 방사선 영상시스템의 전체적인 구조는 X-ray 발생장치, 위치검출기인 GEM, 방사선을 전기신호로 변환시키는 신호 처리부, 방사선의 위치 및 강약정보를 컴퓨터로 입력하고, PC에서 이송장치를 제어하기 위한 DAQ 및 인터페이스, 그리고 방사선영상을 구현하고 잡음제거 등의 영상처리를 위한 이미지프로세싱 소프트웨어 등으로 구성된다.

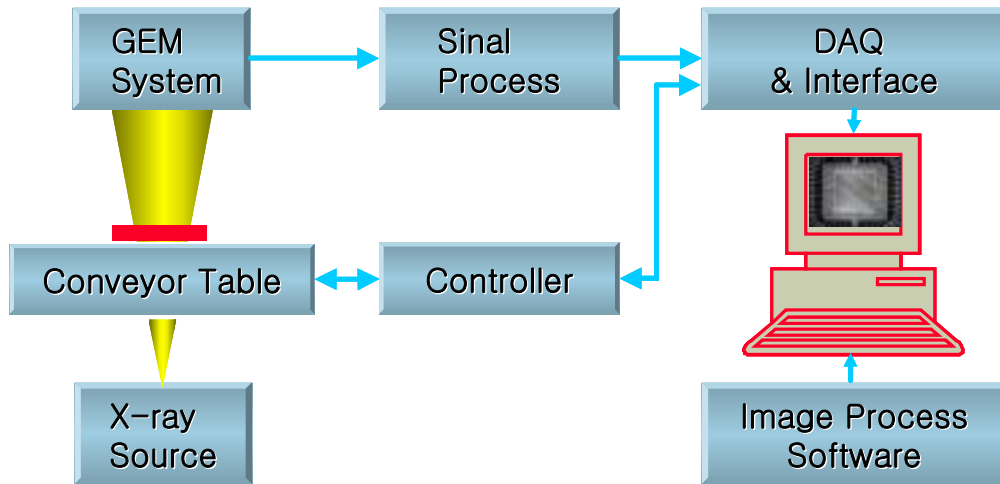


그림 1-0-1. GEM을 이용한 방사선 영상장비 개념도

GEM 검출기 적용 장비로는 소형 전자 부품, 반도체의 내부 검사 및 전자총 상단코일 검사 등을 주된 응용분야로 설정하여 제원을 결정하였다. 선정된 GEM의 제원은 아래와 같으며 고속 전자회로를 이용한 DAQ 및 Micro focusing X-ray 장치를 사용하여 100:1 이상의 배율을 가질 수 있도록 하였다.

1차년도 GEM system 제원설정

- Size : 5 cm × 5 cm
- Readout time : ~ 1 second
- Magnification : > 100 : 1
- Counter Gas : Ar, Xe, Methane, Nitrogen

GEM 검출기 적용분야 설정

- 소형 전자부품 내부 결함 검사
- ASIC 결함 검사
- 전자총 상단 코일 검사 등

방사선 영상장비용 GEM 검출기 개발에 필요한 실험장비를 아래와 같이 구성하였다. 주요 구성장비는 기체혼합 및 제어에 필요한 장비, 진공펌프, 피검물 이송장치, GEM 검출기, Readout 회로, 측정시스템 등이다.

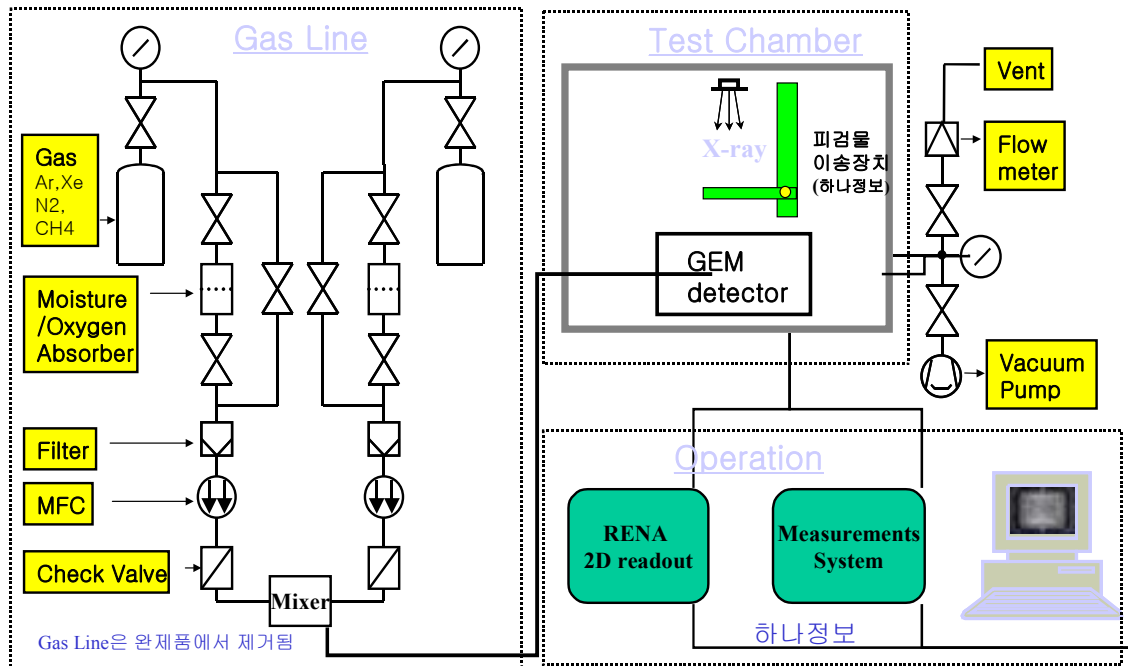


그림 1-0-2. GEM 검출기 개발용 시스템 구성도

DR 시스템의 방사선 센서로서 적용될 GEM 검출기는 양면이 금속(Cu)으로 얇게 코팅된 수십 μm 두께의 절연성 foil(Kapton)에 화학적 에칭이나 고출력 레이저빔 천공 방법을 이용하여 보통 직경 100 μm 이하의 수많은 미소구멍들을 100 - 200 μm 간격으로 균일하게 뚫은 평판으로서, 일반적으로 기존의 기체검출기(MWPC 또는 MSGC 등)의 유도공간 사이에 위치한다. GEM 검출기의 동작원리는 금속으로 코팅된 절연성 foil의 양면에 적당한 동작전압을 인가하면 미소구멍 안으로 기체증폭 현상이 일어나기에 충분한 쌍극전장(dipole electric field)이 형성된다. 이때 피사체의 특정 부위를 투과하여 나온 엑스선이 기체검출기 안으로 입사되면 검출기체와 상호작용하여 궤적을 따라 1차 전자-이온쌍(primary electron-ion pairs)이 생성된다.

형성된 1차 전자들은 유도 공간의 전기력선을 따라 미소구멍 안으로 유도되어 관통하게 되는데, 이때 미소구멍 내에서 형성된 강한 쌍극전장에 의해 기체증폭 현상이 발생하고 전자수는 증폭된다(그림 1-0-3). 이때 1차 전자 한 개당 증폭되는 전자 수를 기체이득(gas gain)이라 한다. 이렇게 증폭된 전자들은 미소구멍을 빠져 나와 양극으로 유도되고 양극 근처에서 다시 한번 2차 기체증폭 현상을 겪고 마침내 양극에 도달한다. 이때 총 기체이득

G_{tot} 는 다음과 같다.

$$G_{tot} = G_{GEM} \times G_{det} \quad (3-1-1)$$

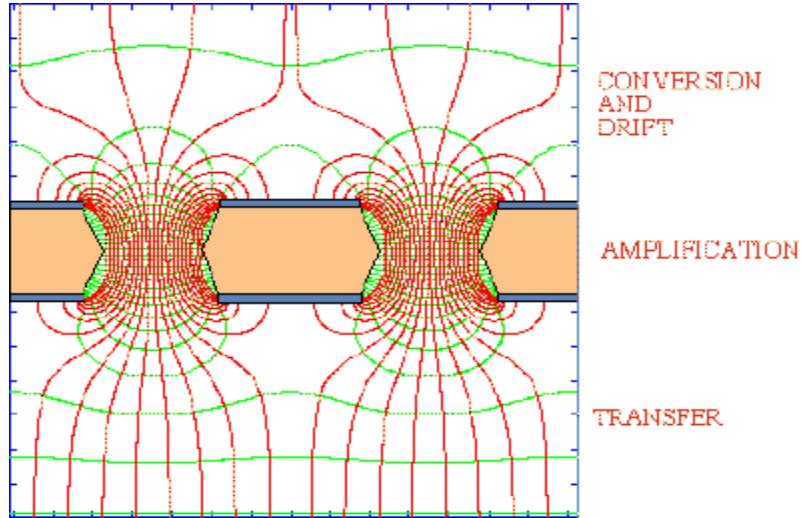


그림 1-0-3. GEM 검출기의 미소구멍 내에서의 전위 및 전장 분포

여기서 G_{det} 는 기체검출기의 이득이고 G_{GEM} 는 GEM 검출기에 의한 추가적인 이득을 나타낸다. 이와 같이 기존의 기체검출기의 유도공간에 설치되어 동작하는 GEM 검출기는 1차 전자가 미소구멍을 관통하는 동안 기체증폭 현상이 일어날 정도로 유도전장을 압축시킴으로써 기존의 기체검출기의 이득을 부가적으로 개선시키기 위해 고안된 개념적으로 간단한 장치이다. GEM 검출기의 추가적인 기체이득(G_{GEM})의 기여로 기존의 기체검출기의 동작전압을 낮출 수 있으며, 결과적으로 높은 동작전압으로 인한 불안정한 기체검출기의 특성 및 절연파괴에 의한 스파크 손상 등의 어려움을 극복할 수 있다. 나아가 GEM 검출기만으로 충분한 기체이득을 얻을 수 있도록 설계한다면 readout 회로 위에 직접 결합하여 제작하던 기존의 검출기 구조를 readout 회로로부터 완전히 제거시킬 수 있다. 이럴 경우 GEM 검출기 자신은 readout 회로로부터 독립된 방사선 센서로서, 그리고 readout 회로 또한 검출기로부터 완전히 독립된 구조를 가지므로 구조가 단순화되고 각각의 성능을 최적화시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 1-0-4는 엑스선 센서가 제거된 순수한 readout 회로와 결합된 기체검출기로서의 GEM의 구조를 보여

준다.

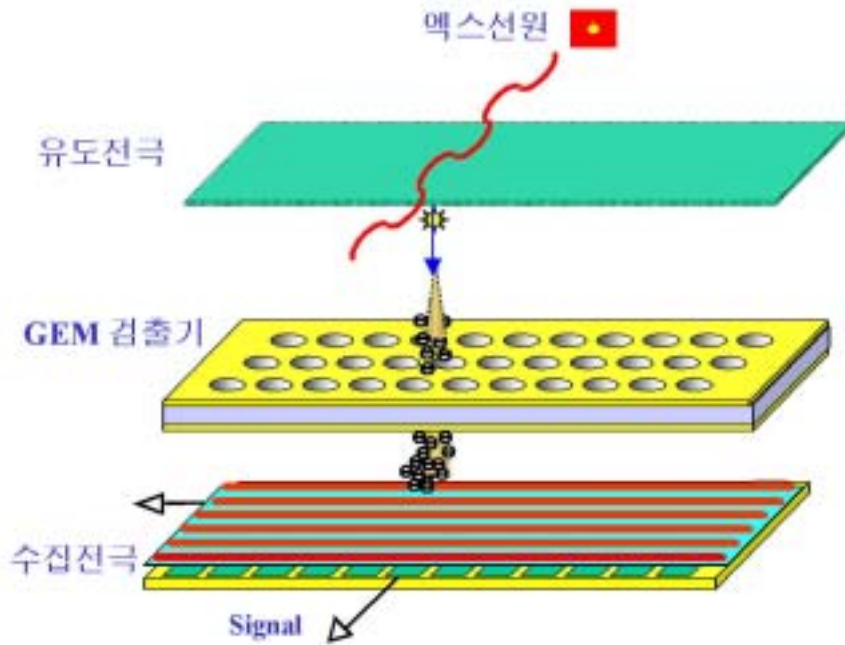
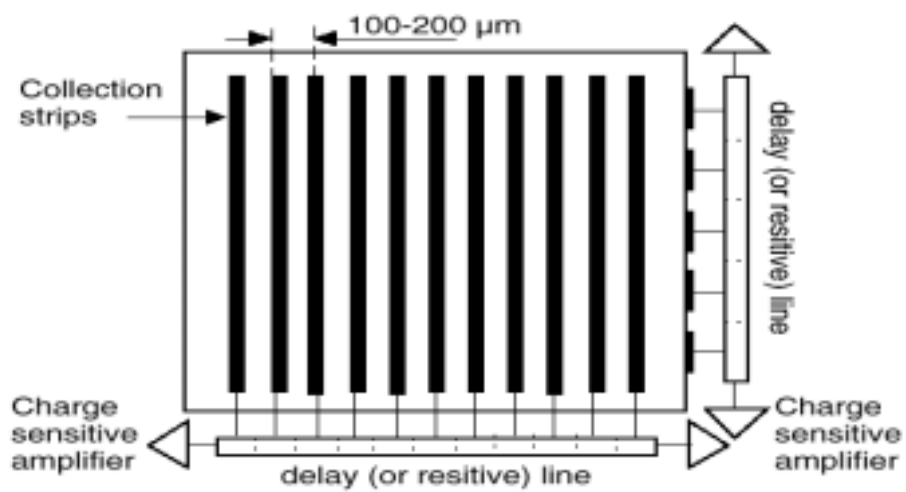
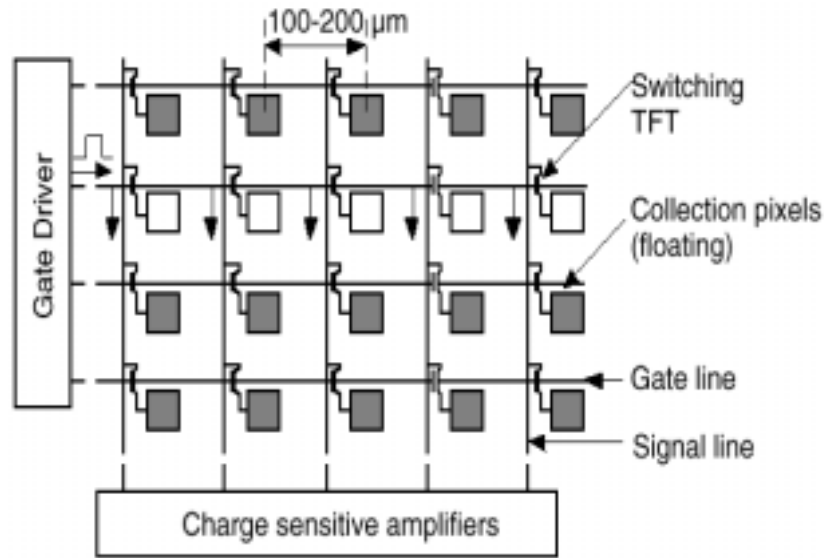


그림 1-0-4. 엑스선 센서가 제거된 순수한 readout 회로와 결합된 GEM 검출기의 구조



(a)

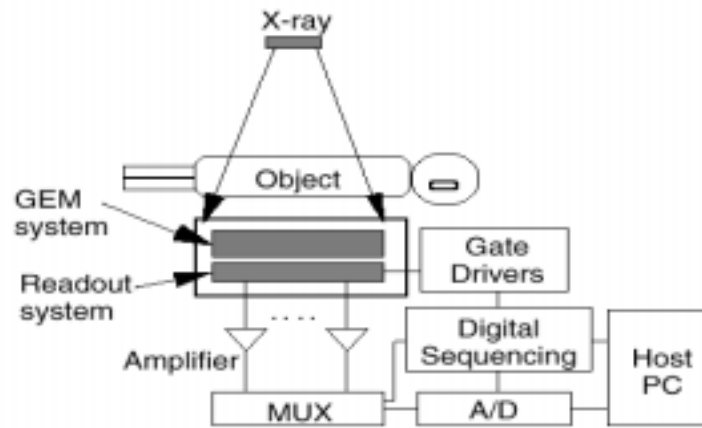


(b)

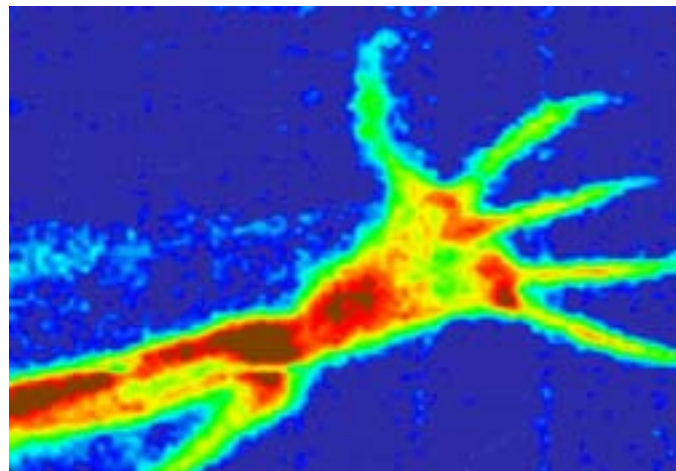
그림 1-0-5. 엑스선 센서가 제거된 순수한 readout 회로: (a) 직교 스트립형 구조 (b) 픽셀형 구조

그림 1-0-5는 엑스선 센서가 제거된 순수한 readout 회로의 예를 보여 준다. 그림 1-0-5(a)는 직교 스트립형 구조의 readout 회로로서 주로 다중선 비례계수관에서 많이 사용되는데, 각 스트립들은 리액턴스 및 커패시턴스 성분으로 구성된 지연선에 연결되어 엑스선 입사위치로부터 출력단까지 신호의 지연된 시간차를 구하여 입사위치를 결정하는 방법이다[10]. 여기서 스트립 pattern은 반도체 공정과정을 사용하여 100 μm 이하까지 스트립-스트립 간격(pitch)을 줄일 수 있으며 따라서 다중선 비례계수관의 단점인 낮은 공간해상도를 극복할 수 있다. 그림 1-0-5(b)는 픽셀형 구조의 readout 회로로서 각 픽셀은 gate driver에서 TFT를 ON 시키는 gate 신호를 기다리는 동안 수집된 전하를 일시적으로 저장하는 커패시턴스 성분을 가지고 있으며, 각 픽셀은 floating되어 있어 인가 전압선(bias line)이 따로 필요가 없다. 따라서 a-Si pixel array에서처럼 readout 회로기판 위에 직접 광다이오드를 위치시켜야 하는 제작상의 어려움도 극복할 수 있으며, 인가 전압선이 없으므로 readout 회로 자체도 간단해진다[11]. 그림 1-0-6(a)는 GEM 검출기를 DR 용 센서로서 적용할 때의 DR 시스템의 개략도이며, 그림 1-0-6(b)는 실

제 이 방법을 사용하여 CERN에서 얻은 박쥐다리의 영상이다. 이와 같이 GEM 검출기를 기존의 DR 시스템에 응용한다면 다중선 비례계수관의 단점인 낮은 공간해상도를 크게 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 제작상의 복잡성도 극복할 수 있을 것으로 기대된다.



(a)



(b)

그림 1-0-6 (a)GEM 검출기를 응용한 DR 시스템의 개략도 (b)CERN에서 GEM 검출기와 직교 스트립형 readout 회로를 결합한 시스템으로 얻은 박쥐 다리의 엑스선 영상

하지만 이러한 장점에도 불구하고 GEM 검출기는 고안된 지 얼마 되지 않아 아직도 이해하고 개선해야 할 동작특성들이 남아 있다. 예를 들면, 입사 엑스선이 검출기체와 상호작용하여 생성하는 일차 전자들 중 일부는 GEM

검출기의 미소구멍을 관통하지 못하고 GEM 상위전극에 포획되거나(그림 1-0-7의 (1)), 미소구멍을 관통하면서 증폭되는 전자들 중 일부가 readout 회로에 도달하지 못하고 GEM 하위전극에 포획됨으로써(그림 1-0-7의 (2)) 발생하는 신호손실이다. 또한 GEM 검출기 자신이 readout 회로로부터 분리되어 직접 방사선센서로서 역할을 하기 위해서는, GEM 검출기의 기체이득을 충분히 높여야 한다. 이론적으로, GEM 검출기의 기체이득은 주로 GEM의 기하학적 요소(예를 들면, 미소구멍의 두께, 크기, 모양, 간격) 및 동작요소(예를 들면, GEM의 전장방향 및 상대적 세기, 검출기체의 종류 및 압력 등)에 의해서 좌우된다. 그러므로 설계에 앞서 GEM 검출기의 동작특성을 기하학적 요소 및 동작요소들에 대해 분석하는 것이 필요하다.

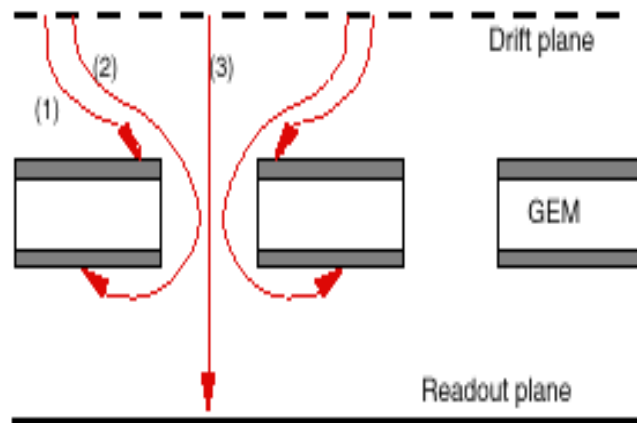


그림 1-0-7. GEM 검출기의 기체이득의 감소 및 증가: (a)상위전극에 의한 일차전자 포획, (b)하위전극에 의한 증폭전자 포획, (c)전자증폭이 일어나는 길이의 증가로 인한 기체이득의 증가.

빈

면

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

최근 디지털 관련 기술이 발전하면서 방사선 영상장치를 비롯한 첨단 영상장치들이 아날로그에서 디지털 장비로의 전환국면을 맞이하고 있다. 이러한 디지털 장비로의 전환은 디지털 영상장치가 가지는 우수한 영상이 가져다주는 진단능력의 향상이라는 이점으로 인한 것이라 할 수 있다. 이같은 기술개발 추세에 비추어 볼 때 국내의 디지털 방사선 영상장치의 개발에 대한 수준은 미비한 실정이며, 국내 첨단영상장치의 대부분은 국외 영상기기 개발업체로부터의 수입에 의존하고 있으며 장치의 가동 후에 따르는 유지 보수 또한 그 기술 종속을 극복하지 못하고 있는 상황이다.

제 1 절 국내·외 기술개발 현황

1. 국내 기술개발 현황

디지털 영상 장치의 연구개발은 국내의 전기, 전자, 의공학 등의 제반 학문 및 기술력으로 그 개발 가능성이 충분하며, 현재 국내 제반기술력을 통한 첨단 영상장치의 개발기술력은 선진업체와 비교해 볼 때 큰 편차가 없을 뿐 아니라, 국내 개발을 통한 시장 전망 또한 밝다. 현재 국내 디지털 영상장치의 연구개발 현황은 연구소의 경우 한국전기연구소, 한국과학기술연구원 등이 참여하고 있으며, 업체의 경우 LG. Philips LCD(주), 리시스템(주), 삼성전자, 메디슨, JMT 등이 산·학·연 컨소시엄을 통하여 연구 수행 중이다. 국내 타기관의 연구개발 실적을 요약하면 다음과 같다.

- 지연선을 이용한 2차원 다중선 비례계수관(MWPC)[8]를 개발하였다(1994년, 경북대).
- MWPC, MSGC를 이용한 1차원 의료진단용 방사선 센서를 개발하였으나 실용화된 상태는 아니다(1997년, 경북대).
- 의료용 디지털 영상장비로는 CCD 방식이 개발되어 판매 중에 있으며(2000년, 메디슨, 레이스스 공동개발), 또한 동강의료기(주)와 서울대 공동으로 미국 Sterling사의 TFT 방식의 DirectRay를 사용한 디지털 영상장비의 control console 및 software를 개발하고 있다.

2. 국외 기술개발 현황

미국의 Varian, 네덜란드의 Philips 등 선진국에서는 섬광체와 고체검출기를 결합한 형태의 X-선 검출기가 개발되어 시판 중에 있다. 섬광체로는 효율과 광출력이 우수한 CsI(Tl), GOS : (Gd₂O₂S:Tb) 등이 주로 이용되고 있으며, 바늘형상의 미세결정구조를 가진 CsI(Tl)은 광의 산란을 방지하여 해상도를 더욱 향상시켰는데, 최근에는 X-선 영상증배관에 phosphor screen으로도 이용되고 있다.

일본의 Fuji사 등은 기존의 screen/film 시스템 대신에 휘진성 형광체인 이미지 플레이트(Image Plate, IP)를 개발하였으며, IP를 사용하여 X-선을 촬영한 후, 레이저 빔을 조사하여 이미지플레이트에 축적된 X-선 정보를 빛에너지로 발산하도록 하여 방사선 정보를 읽어들이는 이미지 리더를 개발하였다. 현재 시판 중인 이미지플레이트는 10⁴mR의 X-선 dose 범위에서도 발광도의 직선성이 좋기 때문에 넓은 다이내믹레인지 얻을 수 있다.

섬광체의 광을 전기신호로 변환하기 위한 수광소자로 CCD, amorphous silicon 다이오드, MOS image sensor 등이 사용되며, 특히 프랑스의 Trixell 사 등에서 개발된 amorphous silicon 다이오드는 픽셀 크기가 143 μm이며, 검출영역이 43cm×43cm로 고분해능, 대면적의 센서제작이 가능하다. 위 검출기들의 사용에너지 영역은 30keV~300keV 이며 분해능은 50 μm~250μm 정도이다. 일본의 Hamamatsu는 직경 10μm내외의 광섬유 다발인 FOP(Fiber Optic Plate)를 CsI(Tl) 등의 섬광체와 결합한 FOS(Fiber Optic with Scintillator)를 개발하여 CCD나 , MOS image sensor에 직접 연결이 가능하게 하였다.

1996년 스위스의 CERN연구소에서는 스파크에 강한 기체전자증폭기인 GEM(Gas Electron Multiplier)을 개발하였고, 현재 CsI와 결합시켜 대면적이면서 방사선에 강한 UV 및 X-선 검출시스템을 개발하고 있다.

시 스템	구 조	제 조 회 사
X-선 영상증배관	CsI + SbCs + phosphor	Philips, Siemens
Computed Radiography(CR)	이미지플레이트 + 이미지 리더	Fuji, AGFA
Fiber-optic CCD system	CsI(Tl) 혹은 GOS + FOP + CCD	Hamamatsu
Digital flat-panel detector	CsI(Tl) + 아몰퍼스실리콘다이오드	Trixell, Varian, Heimann

3. 방사선 검출기용 전자회로 기술개발 현황

방사선 검출기가 원전 시설, 의료, 천문학, 고에너지 물리학, 인공위성 등에서 사용 범위와 응용분야가 늘어남에 따라 그 검출기의 신호를 받아 처리할 수 있는 readout 회로에 대한 요구도 다양하게 증가하고 있다. 기존의 방사선 검출기는 하나 혹은 수개의 채널을 갖는 readout 회로가 필요하며 NIM module 정도면 검출기의 신호를 충분히 처리할 수 있었다. 그러나, 일차원 혹은 2차원의 어레이(array) 형태의 검출기가 필요한 분야에서는 다채널의 readout 회로를 요구하게 되었다.

다채널의 readout 회로는 기존의 단 채널의 readout 회로를 여러 개 연결하여 쓰는 경우도 있었으나 이 경우 작은 크기의 검출기에 검출기보다 훨씬 크기와 공간을 많이 차지하는 readout 회로를 연결하게 되어 잡음이 크게되며 공간적인 측면에서 큰 단점을 갖게 된다. 따라서, 어레이 형태의 검출기 신호를 검출기의 특성과 응용분야 요건에 맞게 readout ASIC(Application Specific Integrated Circuit)을 제작하기 이르렀다. 전세계적으로 보면 검출기를 이용한 물리학 연구에 선두자리에 있는 Fermi Lab., BNL, LBL, NASA, CERN, Rutherford Lab. 등에서 단일 혹은 어레이 형태의 검출기에 필요한 readout ASIC chip을 자체 개발하여 사용하고 있다.

GEM 검출기용 다채널 readout ASIC chip과 관련하여 본 과제 수행에 직접적으로 연관되는 분야에 대한 외국의 기술개발 현황을 분석한 결과는 부록D에 수록하였다. 본 과제에서 필요한 Readout 회로는 1024 x 1024 의 다채널로서 GEM 검출기에서 나오는 극 미세신호를 처리할수 있어야 한다. GEM 검출기용 readout ASIC을 자체 개발하기 위해서는 반도체 공정에 대한 조사가 선행 되어야 하기 때문에 이에 대한 조사를 실시하였으며 그 결과를 부록3에 포함시켰다. 또한, 국내외의 방사선 검출기분야 readout 회로 개발 업체 및 이들의 readout 회로 개발 현황이 부록3에 포함되어 있다. 상기 조사 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 국내외 반도체 공정 기술 현황

반도체 공정을 이용하여 ASIC을 제작하는 과정은 크게 나누어 다음과 같이 분류할수 있다.

- 계측기 또는 센서 입력 변수 설정
- readout 회로의 사양 결정
- spice 시뮬레이션
- CAD 툴을 이용한 마스크 레이아웃 작성
- ASIC 공정에 투입

반도체 공정은 국내외에 여러 Foundry에서 제공하고 있으나 이들 Foundry의 이용은 설계자가 직접 Foundry와 공정 계약하는 것이 아니라 일반적으로 MPW(Multi-Project Wafer) 혹은 MPC(Multi-Project Chip)이라는 형태로 chip을 제작하게 된다. 이것은 한 wafer상에 여러 설계자의 chip을 함께 올림으로써 각각의 설계자가 부담해야 하는 mask 제작비용을 줄일 수 있다. 반도체 공정을 위해서는 mask라는 chip 설계 공정도면이 필요한데 이것을 한번 제작하는데 드는 비용이 미화로 약 10,000\$ 이상하기 때문에 한 wafer에 한 설계자의 chip을 올리는 경우는 그 chip을 대량으로 생산하는 경우를 제외하고는 보통 연구용으로 prototype의 chip을 제작할 때에는 MPW나 MPC같은 과정을 거치게 된다. 일반적인 MPW chip 제작을 단계별로 살펴보면,

- (1) MPW에서 제공하는 여러 공정 중에서 목적에 맞는 공정 선택
- (2) MPW 측과 계약 후 공정 data(spice parameter, CAD tool technology file, design rule file등)를 넘겨받음
- (3) Design rule에 맞게 chip 설계
- (4) 설계 data를GDSII format으로 변환 후MPW 측에 data를 넘김
- (5) MPW 측은 여러 설계자의 data를 취합해서 여러 설계자의 chip 설계 data가 담긴 하나의 mask를 제작
- (6) 공정 수행
- (7) 공정이 끝난 wafer를die 단위로 절단하여 package 과정에 들어감
- (8) Package가 끝난 chip을 각각의 설계자 들에게 전달

등이다. 공정에 소요되는 시간은 각각의 공정에 마다 또MPW마다 서로 다르지만 일반적으로 국내의 MPW 공정은 대략 6개월 단위로 진행된다.

나. 국내외 Readout Circuits 개발 현황

(1) 국내

국내에서 방사선 검출기용 readout 회로를 개발하고 있는 곳은 거의 찾아볼 수가 없는데, 최근 들어 한 두 군데 생겨나고 있다. 대표적인 곳으로는 (주)ULS 가 있다. 현재 (주)ULS에서는 MCA, TSCA, Amp, TAR, Counter, High Voltage, Power, NIM BIN 등 방사선 계측기에 관련된 모든 장비를 연구개발 하여 국산화 하고 있다(<http://www.uls.co.kr>). 이들 장비는 여러 시중에 나와있는 여러 단위 소자(트랜지스터, OP-amp 등)들을 PCB상에 조립하여 만든 것으로서 반도체 IC 설계를 통한 방사선 검출기의 readout 회로 분야에서는 아직 기술력이 없어 제품이 나오지 않고 있다.

(2) 국외

국외의 방사선 검출기용 readout 회로 개발 업체에는 EG&G ORTEC, EV Products, AMPTEK, Canberra, Hamamatsu, Lecroy, IDEAS, NOVA R&D 등이 있는데 이 중에서 EG&G ORTEC, EV Products, AMPTEK, Canberra 등의 회사는 방사선 검출기와 그에 필요한 preamplifier, shaping amplifier, MCA 등의 NIM module도 함께 개발하고 있으며 Hamamatsu는 photodiode와 photomultiplier tube등의 방사선 검출기를 주로 개발하며 부수적으로 이들 검출기에 적합한 preamplifier 정도를 직접 개발하고 있다. Lecroy, IDEAS, NOVA R&D 등에서는 방사선 검출기용 readout 회로를 ASIC으로 제작하여 공급하고 있으며 이중 IDEAS와 NOVA R&D는 다채널 방사선 검출기에서 요구되는 다채널 증폭기와 부수회로를 갖춘 ASIC을 전문으로 하고 있다.

제 2 절 현기술의 취약성 및 향후 기술개발 전망

1. 현기술의 취약성

최근의 방사선 센서 연구는 반도체 공정기술의 발전에 힘입어 flat-panel, CCD 등을 중심으로 고체형 검출기에 집중되고 있는데, 입사 방사선의 flux가 커질 경우 광변환체가 손상을 입게 되고, 수광소자의 경우 누설전류가 증가하여 잡음특성이 악화된다.

GEM 검출기의 경우 동작전압이 5 kV 내외로, 고전압이 센서에 인가되므로 센서의 절연체저항이 감소하거나 기체이득이 과다하게 높으면 스파크가 발생되어 센서의 수명을 단축하게 된다. 검출기동작 중에 발생될 수 있는 일시적인 누설전류 증가와 같은 동작조건외 이상 변화에 잘 견딜 수 있는 절연체와 금속선정이 요구되며, 주요 검출기체인 Ar에서 발생하는 UV 광을 기체이득을 저하시키지 않는 범위에서 효과적으로 소멸시킬 수 있는 quenching gas의 최적 배합조건을 결정해야 한다.

본 과제에서 개발하고자 하는 GEM 검출기는 최근에 개발되어 상용제품의 적용사례가 없으나 방사선영상 장비분야에 적용 시 내잡음 특성이 우수하고 대면적화가 가능한 장점을 지니고 있어 기존 검출기를 대체할 차세대 센서로서 기대된다.

2. 향후 기술개발 전망

디지털 방사선센서로서 CCD, a-Si 다이오드 등의 고체형 센서와 더불어 위치분해능이 우수하고 대면적화가 가능하며, 방사선에 강한 섬광체 결합형 GEM 검출기의 개발 연구가 더욱 활성화되어 기존 방사선 진단장비의 대부분을 대체할 것으로 예상된다.

현재 상업용으로 개발된 섬광체 중에서 가장 주목받고 있는 바늘형상의 미세결정 구조를 지닌 CsI(Tl)를 GEM 검출기와 결합하면 고속, 고분해능, 고효율의 특성을 지닌 디지털 방사선센서를 개발할 수 있어 의료진단영역을 포함한 차세대 산업용 방사선 진단장비 분야의 선두에 나설 것으로 예상된다[9].

제 3 절 연구개발사례에 대한 자체분석 및 평가결과

프랑스의 Trixell, 미국의 Varian사 등에서 시판되고 amorphous silicon, 혹은 amorphous selenium을 이용한 flat-panel X-선 검출기는 40cm×40cm정도의 대면적 센서제작이 가능하나 섬광체 하부에 직접 어레이형 다이오드가 연결되어 있어 장시간 방사선에 노출될 경우에 다이오드 누설전류 증가 등의 성능저하가 예상된다.

일본의 Hamamatsu에서 개발·판매 되고 있는 Fiber-optic CCD system의 경우 입사 X-선의 대부분이 fiber optic plate에 흡수되어 CCD를 보호할 수 있다. 상기 서술한 고체검출기들은 영상획득시간이 수십mS 정도로 실시간 영상구현이 가능하며, 수광소자들이 적산형이나 12~14bit의 뛰어난 다이내믹 레인지를 제공한다.

1996년 유럽 원자핵연구소인 CERN의 F. Sauli에 의해 GEM(Gas Electron Multiplier)이 개발된 이래 여러 선진국의 연구소에서는 의료용 및 산업용의 디지털 라디오그래피에 이용하기 위해 광전자변환체와 섬광체를 결합한 형태의 검출기를 개발하고 있다. 섬광체결합형 GEM system은 현재까지 개발된 첨단방사선센서들이 적산형임에 반해 광자의 개수를 기억할 수 있는 계수형이므로 다이내믹 레인지가 10^5 개 정도까지 얻을 수 있으며 이로 인해 보다 정확한 방사선 진단이 가능하다. 그리고 대면적의 센서 제작이 용이하여 비용이 적게 들고, 방사선에 의한 손상이 거의 없는 등 많은 장점으로 인해 차세대 첨단 방사선검출기로 주목받고 있다.

특성	Computed Radiography	CdTe Detector	FOS/CCD system	a:Si-H Flat Panel Detector	섬광체결합형 GEM system
Dimension	230×400mm	12.8×3.2mm	50×50mm	244×163mm	100×100mm
해상도(lp/mm)	4	8	2-4	2-4	2-4
내방사성	△	×	○	△	○
제작단가	High	High	Medium	High	Low
영상구현 시간	slow(indirect)	fast	fastest	fastest	fastest
Dynamic Range	10^3	10^5	.	10^4	10^5
digital radiography 적용 단계	산업용/의료용으로 판매중 (1990년대초)	산업용/의료용 소형센서로 판매중 (1990년대초)	산업용/의료용으로 판매중(1990년대말)	의료용으로 가장 최근개발(1998년)	산업용/의료용으로 아직 적용 개발 사례 없음

제 4 절 세부 기술사항의 검토 분석결과

1. 국내·외 세부기술 수준 비교표

세부 기술 항목	국외	국내
방사선 위치센서 개발기술	상	하
검출기 특성 평가 기술	상	중
다채널 신호처리회로의 설계 및 제작 기술	상	중
스캐닝 장치 구동 H/W 및 S/W 개발 기술	상	중상
DAS 시스템 개발 및 영상처리 기술	상	중

2. 공정단위별 주요 기술(技術)내용 및 그 기술수준의 분석 결과

가) 외국의 경우

디지털 X-선 진단장치의 가장 최근의 형태는 1998년 프랑스의 Trixell에서 개발한 flat-panel detector (Trixell Pixium 4600)이다. 이 flat-panel 검출기는 X-선영상을 디지털신호로 직접 기록할 수 있으며 광학적, 기계적 스캐닝장치가 필요없다. 검출기의 주요 부분은 섬광체와 수광검출부로 나누어 지는데, 수광소자로 143 μ m 폭의 간격으로 아몰퍼스 실리콘 반도체 다이오드를 배치하고, 그 상부에 섬광체로 CsI(Tl)을 코팅되어 있다. CsI(Tl)은 바늘형상의 미세결정구조를 지니고 있어 라이트 가이드 역할을 하여 광산란을 방지함으로써 해상도를 증가시켰다. X-선 영상의 픽셀크기는 센서의 크기에 의해 결정되므로 소자간격인 143 μ m이며 3 lp/mm이상의 해상도를 얻을 수 있다. Trixells의 flat-panel 검출기는 아몰퍼스실리콘의 이용으로 43cm×43cm의 대면적 검출기 제작이 가능해졌으며, 3000×3000 픽셀을 제공한다.

나) 국내의 경우

국내의 산업용 방사선 진단기기에는 여전히 필름촬영방식이 주류를 이루고 있으며 삼성전자, 동아X-선 등 일부 기업과 대학에서 디지털 영상센서에 대한 연구를 수행하고 있다. 최근에 삼성GE에서 의료장비로 CT를 개발하였으나, 센서 등 핵심부품은 여전히 선진기술에 종속되어 있어 첨단 센서 분야의 기술축적이 절실히 요구된다. 경북대학교에서는 지난 수년간 기체형 검출기를 중심으로 첨단 방사선위치센서를 연구 중에 있는데, 고에너지물리학 분야에서 널리 이용되고 있는 1차원 및 2차원 MWPC를 이용

하여 의료진단용 촬영장치를 개발한 바 있다. 방사선 계측기술은 국내에서도 어느 정도 기술축적이 이루어지고 있으나, 디지털 라디오그래피 분야는 물리, 전자뿐만이 아니라 재료, 의학, 기계, 전산 등 여러 분야의 첨단기술이 결집되어 있어 선진국에서 비해 기술수준이 낙후하고 기초 기술의 연구 단계에 머물러 있다.

3. 기존 공정방법·기술에 대한 현황 조사·분석

기체검출기는 오래 동안 유럽의 핵 및 입자물리 연구소에서 입자검출을 위한 대표적인 검출기로 사용되어 오면서 대규모의 실험과 이론 연구를 통해 광범위한 분야의 과학기술 축적이 이루어지고 있으나, 국내에서는 아직 일부 대학교와 연구소에서 기초적인 연구단계에 머물러 있는 실정이다.

디지털 X-선 영상장치 개발을 위해서는 위치센서, 신호처리회로, 영상처리 S/W 등의 핵심기술과 이러한 세부기술을 효과적으로 결합하고, 시스템의 신뢰성평가를 통한 성능개선을 유도할 수 있는 응용기술이 필요하다. 국내에서는 CT 등 의료진단 기기 개발에 일부 기업들이 참여한 경험이 있어 실시간 신호처리나 영상처리 S/W 분야는 기술확보가 유리할 것으로 판단되나 핵심기술인 센서분야의 기술수준은 아직 미진하여 전자, 물리, 재료의 복합적인 첨단 기술을 요하는 검출기연구에 지속적이며 집중적인 투자가 절실하다.

가. 기술적인 평가

최근 반도체공정 기술 발전에 힘입어 여러 가지 형태의 기체용 방사선 검출기 개발이 고 에너지 물리학 분야를 중심으로 활발히 진행중이며, 의료진단, 생명공학, 비파괴 등 응용과학 및 산업분야 발전에도 파급효과가 클 것으로 기대 된다. 특히 1987년 프랑스의 Laue-Langevin 연구소에서 검출기 제작에 광리소그래피 공정기술(photolithographic technique)을 제안한 이래로 Microstrip Gas Chamber (MSGC), Microgap Gas Chamber (MGC) 등 고 계수율, 고 위치분해능을 갖춘 미세전극형 검출기 개발이 이어졌으나, 이들은 기체 내에서 발생할 수 있는 스파크에 의해 쉽게 전극이 손상되는 단점을 지니고 있다. 반면 1996년 스위스의 국제핵물리 연구소인 CERN에서 개발되어 현재 미국, 유럽 등 선진국의 방사선 관련 연구소에서 널리 연구중인 Gas Electron Multiplier (GEM)는 얇은 절연체 판(대개 kapton) 양면에 금속박막이 입혀져 있고 매트릭스 배열의 구멍이 밀집한 형태로써 스파

크에 잘 견디면서, 고 계수율과 우수한 위치분해능을 가진 차세대 방사선 위치검출기로 연구되고 있다. 최근에 CsI박막의 광음극으로서 효율, 안정성 등에서 우수한 성능이 입증되어 기체전자증폭기의 표류전극면에 결합하여 UV, X-선 검출기로서 연구되고 있으며, 산업용으로 개발하기 위해 섬광체결합형 기체전자증폭기의 개발이 시도되고 있다.

나. 경제적인 평가

현재 국내에서 사용중인 방사선검출기의 주요부품인 섬광체와 수광소자인 PM Tube, array다이오드, CCD등은 전량 수입에 의존하고 있으며, 진단장비개발은 주로 조립하는 정도의 수준에 그치고 있다. 대부분의 핵심기술은 선진국의 일부 기업체와 연구소에 점유되어 있어 시장진입을 위해서는 많은 기술료를 지불해야 하는 형편으로 자체적인 첨단기술 확보가 시급하다.

다. 산업기술에 미치는 파급효과 분석

디지털 영상진단기는 여러 분야의 기술이 복합적으로 결합된 종합기술로 국산화가 이루어질 경우 관련산업의 연쇄발전을 가져올 수 있고, 영상진단 관련기기 산업의 수입대체를 기대할 수 있다. 또한, 국내의 산업체 시설 현장에서 외국의 비파괴 검사장비를 교체할 경우 유지 및 보수에 들어가는 시간과 비용을 절감하여 공정관리의 생산성이 증가함으로써 국제경쟁력을 확보할 수 있다.

4. 본연구와 관련된 주요기술 현황

최근에 개발중인 디지털 방사선 촬영장비에 사용되는 검출기는 아몰퍼스실리콘(혹은 아몰퍼스셀레늄) flat-panel detector, CCD 등을 중심으로 한 고체센서가 주류를 이루고 있으며, 선진 각국에서는 이미 의료진단장비에 이들 센서를 적용하여 상용화를 시도하고 있다. 프랑스의 Trixell사가 네덜란드 필립스와 공동으로 연구하여 의료진단장비에 채용한 amorphous silicon 다이오드 어레이는 픽셀 크기가 143 μ m이며, 검출영역은 43cm \times 43cm로 대면적의 센서이다.

그 외 독일의 Siemens, 일본의 Hamamatsu사 등은 CsI(Tl)을 이용한 고효율, 대면적의 X-선 영상증배관을 개발 중이며, Fuji사에서는 Computed Radiography(CR)를 위해 이미지 플레이트(Image Plate, IP)와 IP에 저장된 X-선 정보를 읽어 들이는 reader를 개발하여 시판하고 있다.

제 5 절 기존의 특허 및 외국의 기술과의 차이점 비교

1. 기존 특허내용과의 차이점

기존의 기체형 방사선 진단용 검출기와 관련한 미국 및 유럽의 특허의 경우 적용센서로서 주로 MWPC(Multiwire Proportional Chamber)나 MSGC, CsI을 이용한 X-ray/gamma-ray검출기에 관한 내용(Pat. no. 5192861, 4999500, 4376892, 5848116, 5635706, WO94/025878)이 대부분이나 GEM(GasElectron Multiplier)와 CsI 그리고 섬광체를 결합한 산업용 검출기에 관한 기술개발 부분은 발견하기 어렵다.

2. 기개발된 외국의 기술과의 차이점

GEM을 개발한 스위스의 CERN연구소를 중심으로 유럽과 미국의 연구 및 기업체에서는 이미 검출기에 대한 연구단계를 지나 X-선 진단 장비에 응용하기 위한 기술개발에 나서고 있으나 국내에서는 기초실험 수준에 머물러 있는 실정이다.

3. 비교분석 결과

방사선검출 분야에 GEM을 이용할 경우 활용범위가 매우 넓어 의료장비, 비파괴검사, 결정구조 분석, 고에너지 분야, 중성자 검출기 등 많은 응용성을 갖고 있어 일부 선진국 연구소 및 기업에 점유되어 있는 첨단기술을 자체적으로 확보함으로써 기술기반이 취약한 국내의 방사선진단 관련기술의 수준향상을 기대할 수 있다.

제 6 절 원자재에 대한 검토 분석

1. 원자재의 국내·외 수급현황 및 그 전망

디지털영상 검출기의 핵심부품인 섬광체 및 GEM은 국내에서는 생산이 되지 않고 있으며, 방사선 계측분야에 널리 사용되고 있는 섬광체의 경우 전량 수입에 의존하고 있다. 일부 연구소에서 상용화를 시도하고 있다. 기체방사성동위원소 응용 계측장비에는 방사선 검출기가 필수적으로 사용되나 국내에서는 현재 생산이 되지 않으며, 거의 전량 수입에 의존하고 있다. 현재 국내 산업에서는 약 2500여 개의 방사선 응용 계측장비가 도입 사용되고 있으며 장비의 노후화에 따른 교체, 대량생산을 위한 공정의 자동화 및 품질향상으로 생산품의 국제 경쟁력을 확보하기 위한 공정 개선 등을 위해서는 필연적으로 수요가 증가할 것으로 전망된다.

2. 원자재에 관련된 국내·외 기술의 현황분석 및 전망

CERN연구소에서 개발된 GEM은 세계 각국의 연구소와 미국의 TECH-ETCH사에서 주로 에칭 혹은 레이저 드릴링의 두 가지 제조공정 방식으로 제작하고 있으며, 공정에 따른 GEM의 기하학적 구조와 노화특성에 관한 연구가 진행 중에 있다. 또한 미국의 LBL 등의 연구소에서는 최근에 두꺼운 GEM을 제작하기 위해 방사선 빔을 이용한 LIGA공정을 도입하는 등 다양한 시도가 이루어지고 있으나 국내의 방사선검출기 제작기술은 기초연구단계에 머물러 있어, 전문가 확보, 해외선진기술 도입, 전략산업으로 육성 등을 통해 차세대 진단장비의 핵심부품인 첨단 센서 개발에 주력하여 기술선진화를 도모하여야 할 것이다.

제 3 장 연구 개발 수행 내용 및 결과

1987년 위치민감형 기체검출기인 MSGC(microstrip gas chamber)가 개발된 이후, 기체검출기의 새로운 모델인 마이크로검출기의 개발에 많은 노력을 기울여 왔다. MSGC 검출기의 개발과 성능향상에 관한 많은 연구들은 기존의 기체검출기의 성능을 혁신적으로 개선 시켰으며, 나아가 MDOT(microdot detector)나 GEM(gas electron multiplier) 등과 같은 성능이 뛰어난 새로운 구조의 기체검출기들을 탄생시키는 계기가 되었다. 특히 GEM 검출기는 개념적으로 기존의 기체검출기와 결합하여 매우 높은 기체이득(gas gain)을 보여주는 구조적으로 간단한 신호 증폭기로서 기존 기체검출기의 유도전극(drift electrode)과 수집전극(collection electrode) 사이에 위치한다(그림 3-0-1).

GEM 검출기는 양면이 얇은($\sim 1\text{-}5\mu\text{m}$) 금속 층으로 덮여있고 직경이 매우 작은($< 100\mu\text{m}$) 수많은 미소구멍이 뚫려 있는 절연체 foil(Kapton)로 구성되어 있는데(그림 3-0-2), 절연체 양면의 GEM 전극에 적당한 전압을 인가하면 미소구멍 안으로 유도전장(drift field)이 압축되어 기체증폭(gas avalanche) 현상이 가능한 매우 높은 전기장이 유도되어 기체이득을 증폭시킨다(그림 3-0-3). 따라서 GEM 검출기는 기존의 기체검출기의 이득을 향상시켜 방사선에 대한 민감도를 높이고, 결과적으로 기체검출기의 동작전압을 줄일 수 있어 절연파괴(breakdown)에 의한 스파크 손상을 막을 수 있는 장점을 지니고 있다. 하지만 GEM 검출기는 개발된 지 얼마 되지 않아 아직도 초기 연구단계에 있으며 또한 DR 시스템에 적용되기에 앞서 이해되고 개선되어야 할 동작특성들이 아직 남아 있다.

본 연구에서는 GEM 검출기 설계에 필요한 전장 가시화 코드 및 X-선 영상 평가용 코드등 필요한 전산코드들을 개발하였으며, EGS4를 이용하여 적정 기체 층의 두께, 100micron 해상도를 얻기위해 필요한 적정에너지등 설계변수들의 값 산출을 포함하여 기체검출기의 각종 특성에 관한 모의 실험을 수행하였고, 다량의 미세신호 취득을 위한 Readout 회로를 설계하였다. 또한, 이들 설계값들을 이용하여 GEM검출기 시제품을 설계, 제작하였으며 이들 시제품에 대한 검출기 특성을 실험을 통하여 조사, 분석하였다.

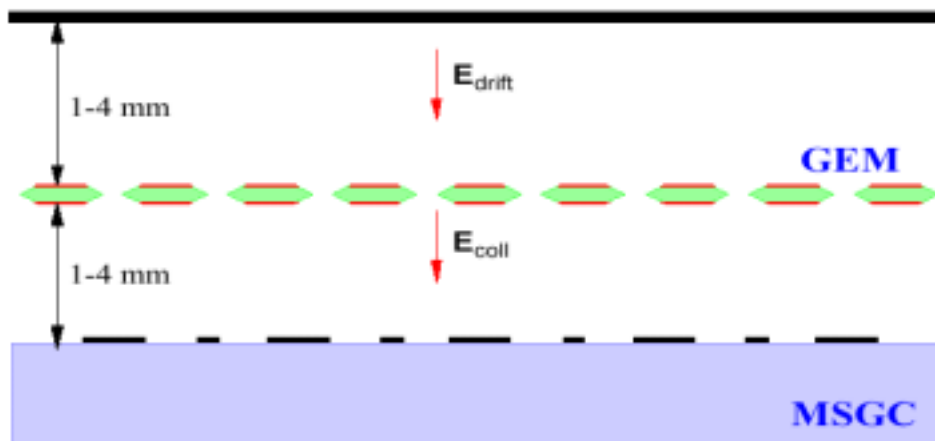


그림 3-0-1. 기체검출기 MSGC와 결합된 GEM 검출기

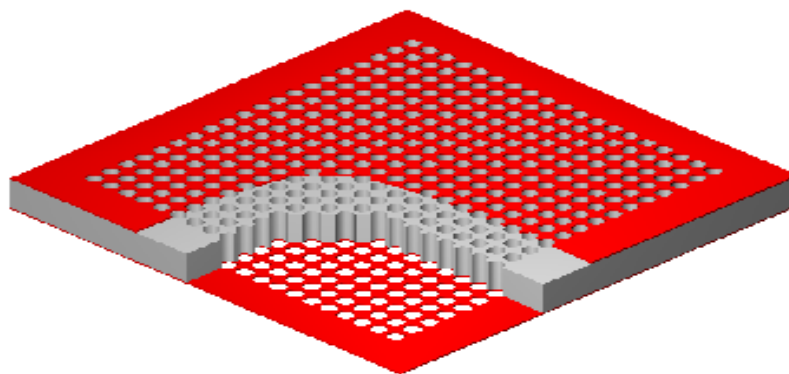


그림 3-0-2. GEM 검출기의 구조

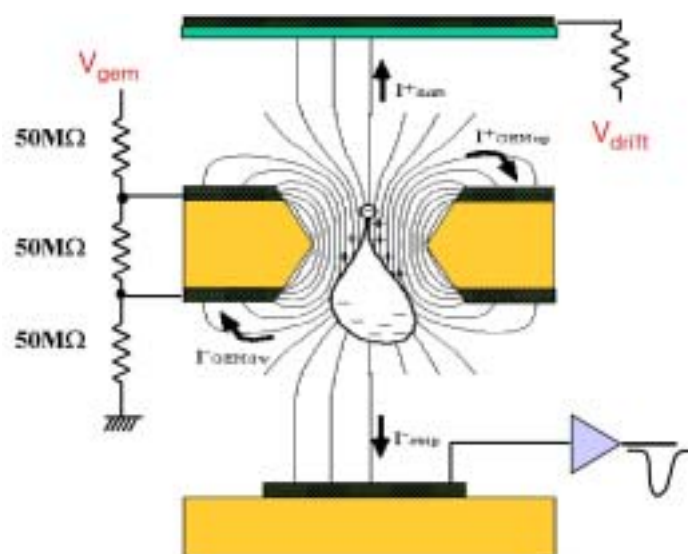


그림 3-0-3. GEM 검출기의 미소구멍에서 일어나는 기체증폭현상

제 1 절 검출기 개발용 시뮬레이션 코드 개발

1. 전장계산 시뮬레이터(MAXWELL) 설치

GEM 검출기의 동작특성은 특히 GEM 검출기 자체의 기하학적인 요소와 동작조건에 의해 크게 좌우되는데, GEM 검출기의 제작에 앞서 그 동작특성을 분석하고 나아가 최적화 설계를 하기 위해서 상업용 전장계산 시뮬레이터(MAXWELL Electric Field Simulator, Ansoft Corporation)를 설치하였다(그림 3-1-1).

MAXWELL 시뮬레이션 코드는 주어진 조건에서 전장벡터를 계산하는 상업용 S/W로서 다른 상업용 S/W(COULOMB, ELECTRO, ELFI 등)보다 사용하기가 상대적으로 쉬우나 전기력선을 그려 주는 기능이 없는 단점이 있다(다른 S/W도 마찬가지임). 따라서 MAXWELL의 각 grid에서 계산된 전기장 벡터를 이용하여 전기력선을 추적하는 코드(SHOWFIELD)를 작성하였다.

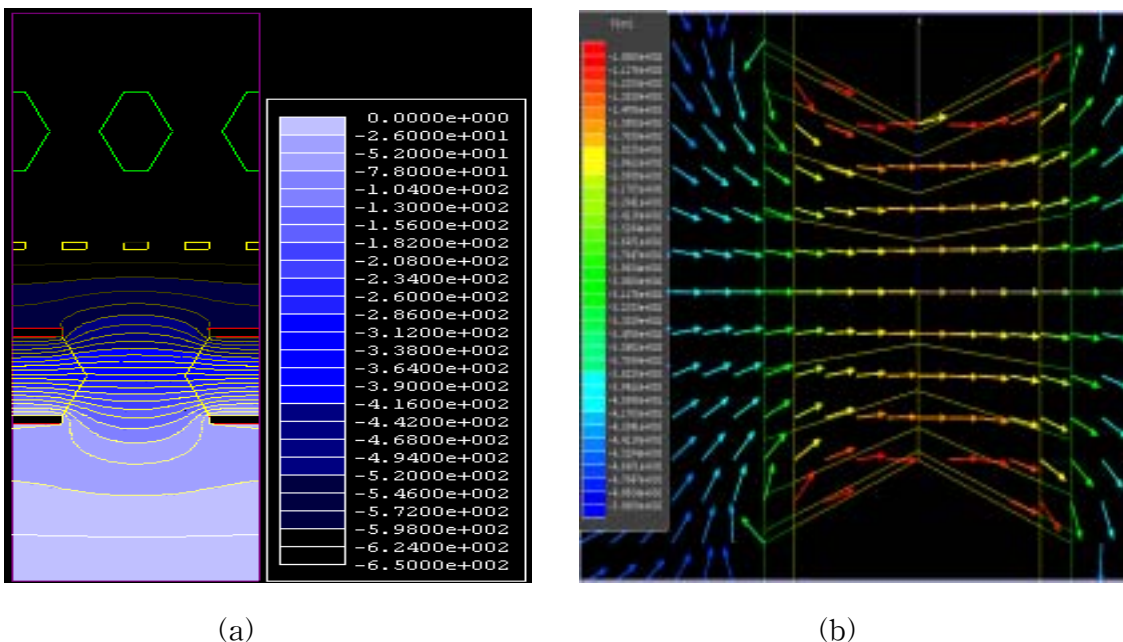


그림 3-1-1. MAXWELL 시뮬레이터에서 제공되는 (a)전위분포 및 (b)grid에서의 전장벡터분포의 예

2. 전장가시화 코드(SHOWFIELD) 개발

MAXWELL 시뮬레이터에서 계산된 전장벡터 값을 이용하여 전기장을 자동적으로 그려주는 코드를 C++ 프로그래밍 언어와 MathCAD 응용프로그램을 사용하여 작성하였다. SHOWFIELD는 MAXWELL 코드를 사용하여 주어진 조건에서 각 grid의 전장벡터를 계산한 다음, 그 결과를 MathCAD의 입력데이터로 사용하여 전자의 궤적을 추적하는 프로그램이다. 전자의 궤적을 추적하는 방법은 그림 3-1-2에서 나타낸 바와 같이 임의의 점(x_i, y_i)를 둘러싼 4개의 grid에서 계산된 전장벡터값($E_{i,j}, E_{i,j+1}, E_{i+1,j}, E_{i+1,j+1}$)을 사용하여 우선 점(x_i, y_i)에서 x방향과 y방향의 합벡터를 떨어진 거리에 대한 가중치를 적용하여 구하여 전장 벡터의 방향을 결정한 다음, 적절한 길이로 정규화(normalized)하여 다음 궤적점(x_{i+1}, y_{j+1})을 구한다. 마찬가지로 그 다음 궤적점(x_{i+2}, y_{j+2})도 같은 방법으로 구해서 최종적으로 연결하면 가상 전기력선(pseudo-electric field)이 된다. 여기서 ‘적절한 길이’는 조절될 수 있는데 가능한 한 긴 길이로 정규화하면 할수록 보다 정확한 전기력선을 얻을 수 있으나 대신 계산시간이 길어진다.

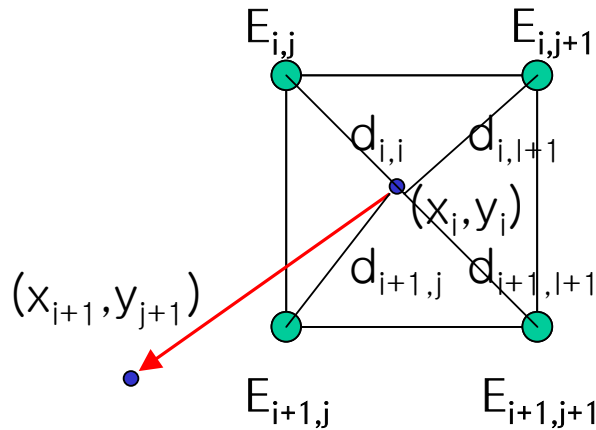


그림 3-1-2. 가상전기력선(pseudo electric field) 추적원리

$$[E(x_{i+1}, y_{i+1})]_x = \frac{\sum_i^{i+1} \sum_j^{j+1} [(E_{i,j})_x \times d_{i,j}]}{\sum_i^{i+1} \sum_j^{j+1} d_{i,j}} \quad (3-1)$$

$$[E(x_{i+1}, y_{i+1})]_y = \frac{\sum_i^{i+1} \sum_j^{j+1} [(E_{i,j})_y \times d_{i,j}]}{\sum_i^{i+1} \sum_j^{j+1} d_{i,j}}$$

이상과 같은 방법으로 작성된 SHOWFIELD 코드는 다음과 같은 주요 함수로 구성되어 있다:

- ReadEField(): to read the electric-vector data file from MAXWELL to the MathCAD
- CalcStopZone(): to calculate the stop zones
- FieldLineCalc(): to calculate the pseudo-field lines
- Display(): to display the pseudo-field lines easily

3. 영상평가를 위한 몬테칼로 모의실험 코드(IMAGEQUAL) 개발

영상시스템의 설계 및 제작에 앞서 영상시스템의 성능을 사전에 평가하기 위해서 C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 몬테칼로 컴퓨터 모의실험 코드를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 몬테칼로 모의실험 코드(IMAGEQUAL)는 우선 신틸레이션 검출기를 기반으로 한 영상시스템을 기초로 하였으며 추후 GEM과 신틸레이터를 결합한 형태의 DR 시스템의 영상평가에 적용할 것이다.

가. 엑스선의 상호작용

입사 엑스선은 그 에너지와 피사체의 성질에 따라 크게 세 가지 과정으로 매질과 상호작용한다: 광전흡수(photoelectric absorption), 콤프턴산란

(Compton scattering), 및 쌍생성(pair production). 입사 엑스선의 에너지가 대략 50 ~ 150 keV 범위일 때 쌍생성 작용이 일어날 확률은 영이므로, 본 시뮬레이션에서 사용된 펜텀과 신틸레이터에서의 엑스선의 상호작용은 광전 흡수와 콤프톤산란으로 제한하였다: 기타 coherent scattering, fluorescence radiation, Bremsstrahlung 등과 같은 사소한 상호작용은 무시하였다[12,13]. 산란된 엑스선의 방향과 다음 상호작용 위치는 그림 3-1-3에 나타난 반응단면적 데이터(cross sectional data)를 사용하여 구하였으며, 자세한 계산과정은 다음과 같다.

나. 반응위치 계산

엑스선원이나 콤프톤산란으로부터 나온 엑스선은 매질 내에서 상호작용 하거나 또는 외부로 빠져 나간다. 이러한 과정을 모사하기 위해서 엑스선원 또는 이전의 산란된 위치에서 다음 반응위치까지의 거리를 계산하여야 한다. 엑스선이 거리 s 를 이동할 때, s 와 $s+ds$ 사이에서 임의의 반응이 일어날 확률, $p(s)ds$ 는 다음과 같다.

$$p(s)ds = \sum_t (E) e^{-\sum_t (E)s} ds \quad (3-2)$$

여기서 $\sum_t(E)$ 는 에너지 E 를 가진 엑스선의 총 선형감쇠계수(total linear attenuation coefficient)이다. $s = 0$ 에서 ∞ 까지 $p(s)$ 의 적분값은 1이므로 $p(s)$ 는 확률밀도함수(probability density function, PDF)가 되며, 이 함수의 누적분포함수(cumulative distribution function, CDF)는 다음과 같이 계산된다

$$P(s) = \int_0^s p(s')ds' = 1 - e^{-\sum_t (E)s} \quad (3-3)$$

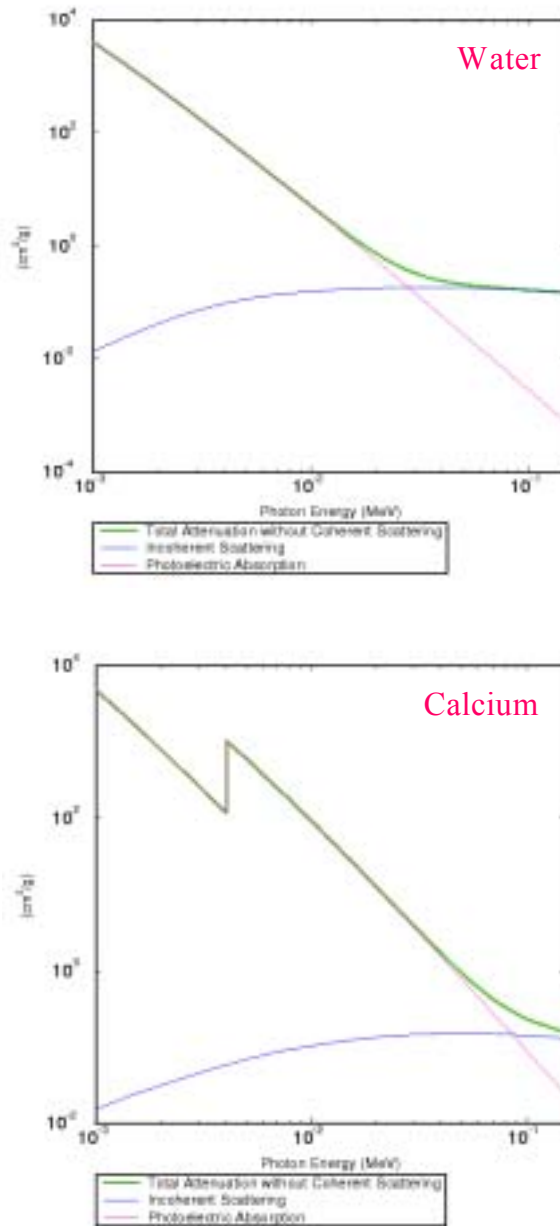


그림 3-1-3. 물과 칼슘의 선형감쇠계수(linear attenuation coefficients)

역함수 방법[14]을 사용하면, 반응지점에서 다음 반응지점까지 엑스선이 이동한 거리 s 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s = P^{-1}(\xi) = -\frac{1}{\sum_i} \ln \xi \quad (3-4)$$

여기서 ξ 는 0과 1사이에서 균일하게 값을 갖는 난수(random number) 값이다. 만약 반응위치 $r_1(x_1, y_1, z_1)$ 에 있는 엑스선이 $\omega(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 방향을 향해 나아간다면, 그 엑스선이 매질 내에서 반응할 다음 위치 $r_2(x_2, y_2, z_2)$ 는 다음과 같이 계산 된다.

$$\begin{aligned}x_2 &= x_1 + s\omega_x \\y_2 &= y_1 + s\omega_y \\z_2 &= z_1 + s\omega_z\end{aligned}\tag{3-5}$$

여기서 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 는 방향 단위벡터 ω 의 x, y, z 성분이다. 만약에 r_2 가 매질의 외부에 있으면 엑스선은 더 이상 상호작용하지 않는다.

다. 상호작용의 종류선택

엑스선의 상호작용 위치가 펜텀이나 신틸레이터 내에 주어질 때 상호작용의 종류를 다음과 같이 단순거절법(simple rejection technique)을 사용하여 결정할 수 있다. 우선 0과 1사이에서 균일한 값을 갖는 난수 ξ 를 선택한다. 만약 난수 ξ 가 $\Sigma_p(E)/\Sigma_t(E)$ 보다 작거나 같으면 이 엑스선은 그 지점에서 광전흡수 반응을 일으키고, 그렇지 않으면 그 지점에서 콤프턴산란 반응을 일으킨다고 가정하였다.

라. 산란된 엑스선의 방향

엑스선이 광전흡수 반응을 일으키면 그 엑스선은 매질에 완전히 흡수되어 사라지게 된다. 반면에 콤프턴산란을 일으키면 엑스선 에너지의 일부를 잃고 입사방향과 다른 방향으로 산란하게 된다. 그러므로 산란된 엑스선의 새로운 방향과 에너지를 계산해야 하는데 이 과정은 Klein-Nishina 공식[15]을 사용하여 계산하였다.

$$\frac{d\sigma_c(\alpha, \vartheta)}{d\Omega} = r_0^2 \left[\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \vartheta)} \right]^3 \left(\frac{1 + \cos^2 \vartheta}{2} \right) \left\{ 1 + \frac{\alpha^2 (1 - \cos \vartheta)^2}{(1 + \cos^2 \vartheta)[1 + \alpha(1 - \cos \vartheta)]} \right\} \quad (3-6)$$

여기서 Ω 는 solid angle를, α 는 전자의 정지질량 단위로 표현한 입사 엑스선의 에너지를, r_0 는 전자의 고전적 반경을, ϑ 는 산란된 엑스선의 산란각을 나타낸다. 콤프톤산란의 총반응단면적 $\sigma_c(\alpha)$ 는 위 식을 $\cos \vartheta = -1$ 에서 1까지 적분함으로써 구할 수 있는데 그 결과는 다음과 같다.

$$\sigma_c(\alpha) = 2\pi r_0^2 \left\{ \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[\frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right\} \quad (3-7)$$

따라서 임의의 매질에서 산란각은 앞에서 설명한 방법과 동일하게 계산되는데, 이 때의 PDF는 다음과 같이 계산된다:

$$p(\alpha, \vartheta) = \frac{1}{\sigma_c(\alpha)} \frac{d\sigma_c(\alpha, \vartheta)}{d\Omega} \quad (3-8)$$

PDF가 구해 졌으므로 산란각 ϑ 는 선택될 수 있다. 위 식으로부터 ϑ 를 선택하는 방법은 rejection technique, inverse CDF method, direct sampling 등 여러 가지가 있으나, 이 중에서 엑스선 에너지가 낮은 (<1.5 MeV) 영역에서는 Kahn이 제안한 거절법(rejection method)[16]이 가장 효율적이므로 본 시뮬레이션에서 사용하였다.

일단 산란각 ϑ 가 선택되면, 산란 엑스선의 방향 단위벡터 $\omega'(\omega'_x, \omega'_y, \omega'_z)$ 는 다음과 같이 계산된다.

For $-1 < \omega_z < 1$,

$$\begin{aligned} \omega'_x &= \sqrt{\frac{1 - \mu^2}{1 - \omega_z^2}} [\omega_y \cos \varphi + \omega_x \omega_z \sin \varphi] + \omega_x \mu \\ \omega'_y &= \sqrt{\frac{1 - \mu^2}{1 - \omega_z^2}} [-\omega_x \cos \varphi + \omega_y \omega_z \sin \varphi] + \omega_y \mu \\ \omega'_z &= -\sqrt{(1 - \omega_z^2)(1 - \mu^2)} \sin \varphi + \omega_z \mu \end{aligned} \quad (3-9)$$

For $\omega_z = \pm 1$,

$$\omega'_x = \sqrt{(1 - \mu^2)} \cos \varphi$$

$$\omega_y' = \sqrt{(1-\mu^2)} \sin \varphi$$

$$\omega_z' = \omega_z \mu \quad (3-10)$$

여기서 μ 는 $\cos\theta$ 이다. 방위각(azimuthal angle) φ 에 대한 산란 엑스선의 분포는 균일하기 때문에 $\varphi=2\pi\zeta$ 로 나타낼 수 있으며, 여기서 ζ 는 난수값이다. 또한 산란 엑스선의 에너지 E' 은 다음과 같이 계산된다:

$$E' = \frac{m_0 c^2}{1-\mu+1/\alpha} \quad (3-11)$$

여기서 $m_0 c^2$ 는 전자의 정지질량이다.

마. 콜리메이터에서 산란선의 제거

평형구조(parallel-hole) 콜리메이터는 수 많은(보통 20,000개 이상) 작은(1 ~ 3mm) 정사각형 구멍으로 구성되어 있는데, 본 시뮬레이션에서는 구멍크기가 1.4 mm, septal 두께가 0.254 mm, 콜리메이터 두께가 25.2 mm인 상용 콜리메이터를 사용하였다.

바. CsI(Tl)에서의 가시광선 생성

계산을 간단히 하기 위해 엑스선이 CsI(Tl)에서 상호작용을 할 때마다 일정한 파장을 갖는 가시광선이 등방향으로 생성된다고 가정하였다. 이 때 생성되는 가시광선의 수는 평균이 $5.2 \times 10^4 \cdot E_x$ 인 정규분포를 가진다고 가정하였으며[12], 여기서 E_x 는 CsI(Tl)에 흡수된 엑스선의 에너지를 MeV 단위로 표현한 값이다.

이상과 같은 몬테칼로 시뮬레이션 과정의 흐름도와 사용된 시스템 구조를 각각 그림 3-1-4, 3-1-5에서 나타내었다. 개발된 코드는 제2절 1항에 기술한 X-선 영상 해상도 분석부분과 제2절 6항에 기술한 GEM검출기의 동작 특성분석에 사용하였다.

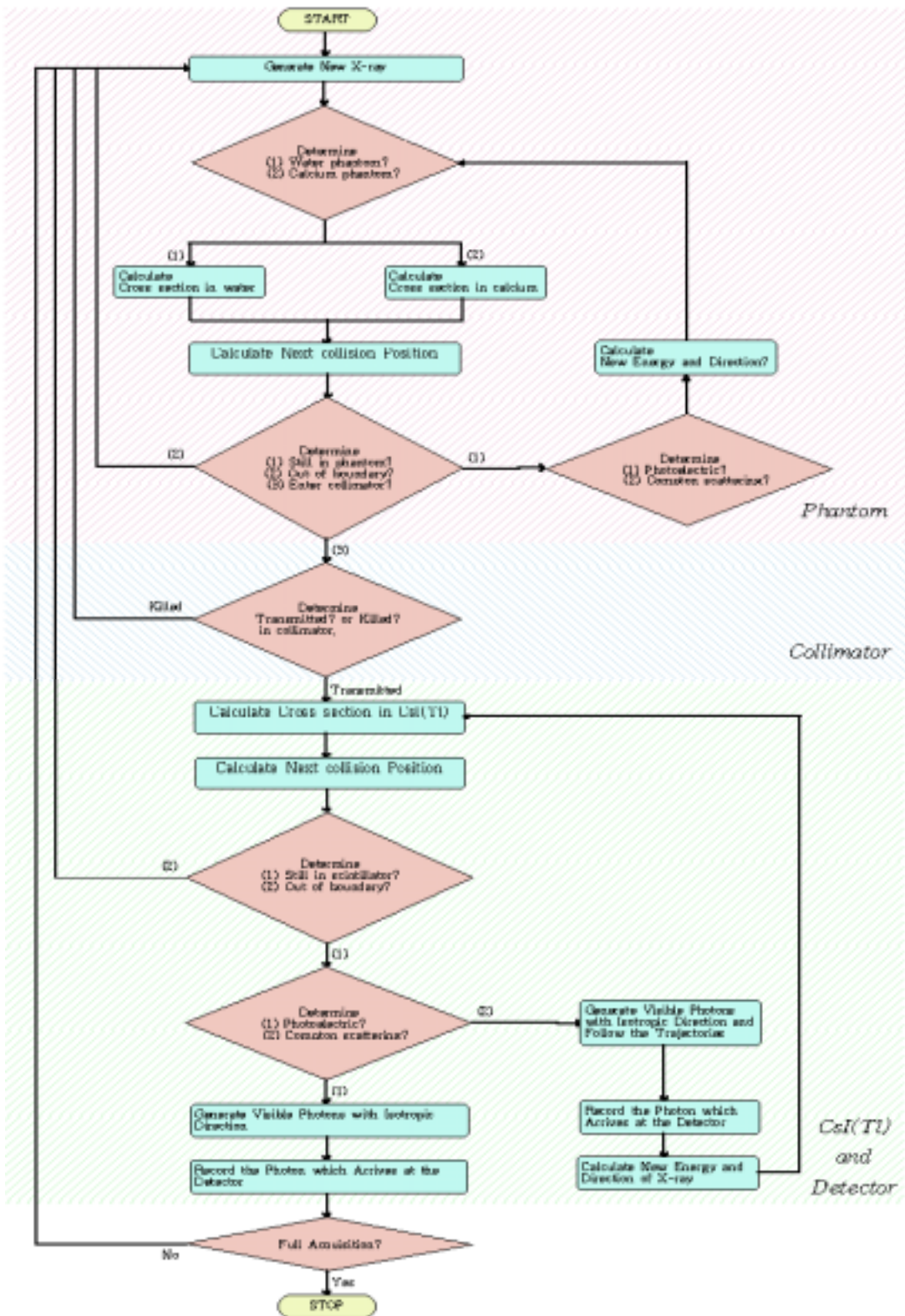


그림 3-1-4. 신타레이션 검출기를 기반으로 한 몬테칼로 모의실험의 흐름도

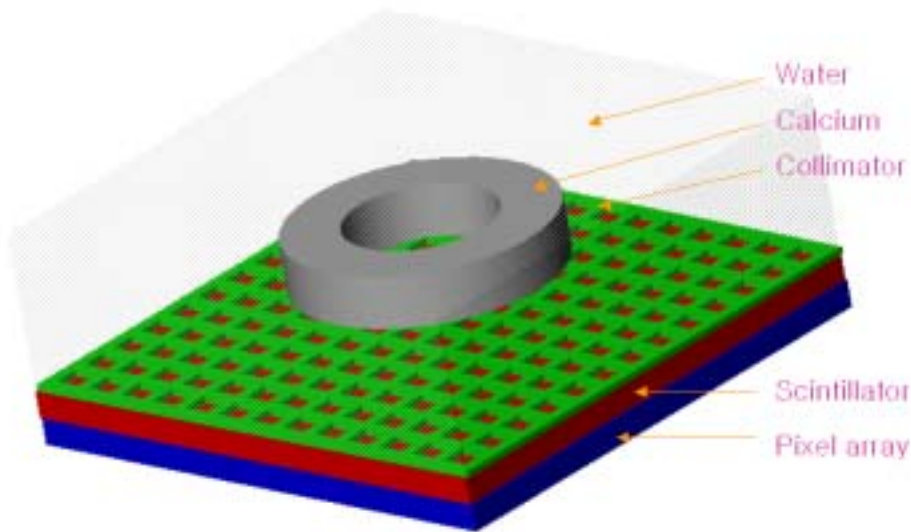


그림 3-1-5. 몬테칼로 모의실험에 사용된 신틸레이션 검출기를 기반으로 한 영상시스템의 구조

제 2 절 GEM 검출기 설계

1. X-선 영상 해상도 분석

이절에서는 X-선 영상의 해상도를 분석하기 위하여 EGS4를 사용하여 계산한 결과와 본과제를 통하여 개발한 IMAGEQUAL을 사용하여 분석한 결과에 대하여 기술한다. 먼저 EGS4를 사용하여 수행한 일련의 Monte Carlo simulation 결과에 대하여 기술한다. 그림 3-2-1은 두께가 $350\mu\text{m}$ 인 알루미늄 판에 폭이 $2\mu\text{m}$ 인 홈이 3개 파여 있을 때 1cm 높이에서 60keV X-선을 입사시켜 알루미늄 판 하단 1m 거리에 위치한 CsI plate converter에서 생성된 전자의 분포를 그린 것이다. 그림 3-2-1의 영상은 생성된 영상을 간단한 전처리를 거쳐 영상처리한 결과이다. 단일 에너지의 X-선을 CsI plate에 입사시켰을 때 생성된 전자분포를 계산한 simulation의 결과로부터 얻은 영상의 해상도는 $2\mu\text{m}$ 이하임을 확인하였다.

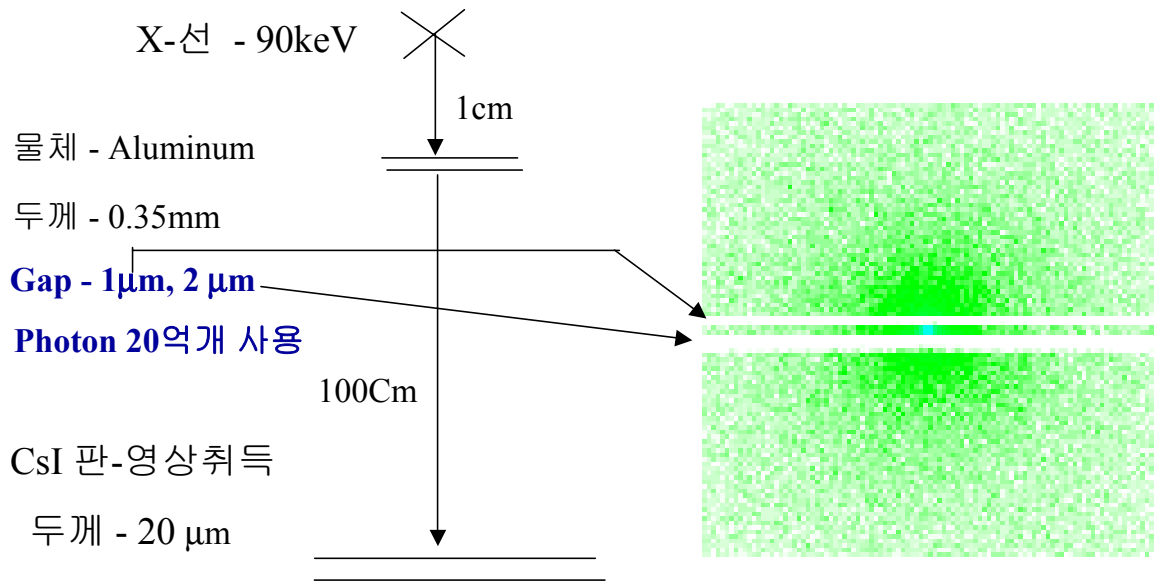
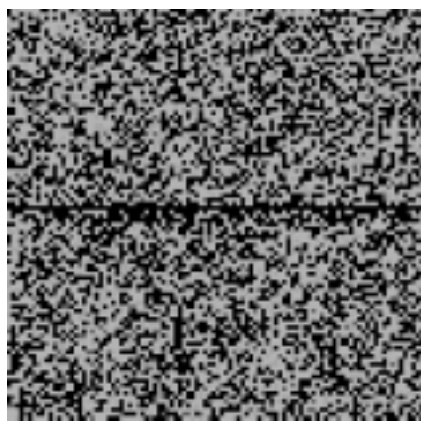


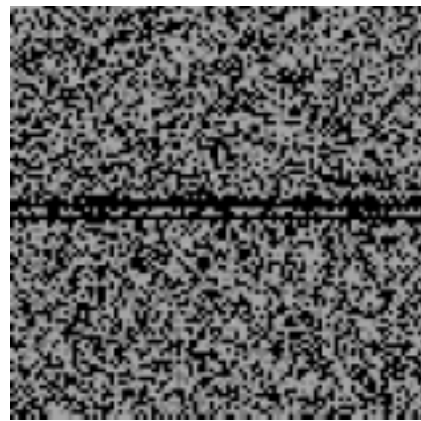
그림 3-2-1. GEM 검출기 해상도 분석결과-1

그림 3-2-2는 X-선 입자 5억개 사용시 그림 3-2-1과 같은 기하학적 구조에서 pitch size가 100 μ m인 strip 검출기를 통해서 본 X-선 영상 해상도에 관한 EGS4 simulation 결과를 보이고 있다.

이들 그림에서 보는 바와 같이 폭이 2 μ m 이상인 물체는 식별이 가능함을 알 수 있다. 뿐만 아니라, smoothing이나 gradient operation 등을 사용하여 영상처리 알고리즘을 적용할 경우 보다 선명한 영상 획득이 가능함을 확인할 수 있다.



1 μ m, 2 μ m



1.5 μ m, 3 μ m

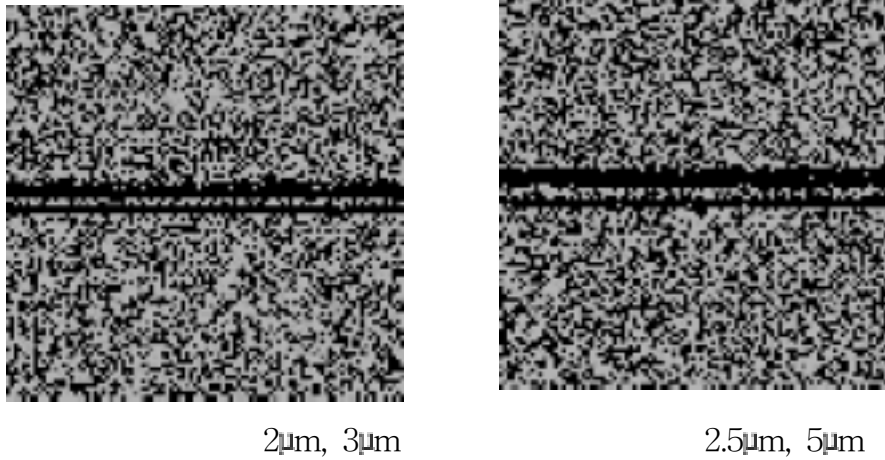


그림 3-2-2. GEM 검출기 해상도 분석결과-2

다음은 본 과제를 통하여 개발한 몬테칼로 모의실험 코드인 IMAGEQUAL을 사용한 X-선 영상의 해상도 분석 결과에 대하여 기술한다. 본 모의실험에 사용된 영상시스템의 구조는, 인체를 대표하기 위해서 크기가 40cm×40cm×10cm인 물 내부에 외부 반지름이 6cm, 내부 반지름이 4cm인 원통형 칼슘 펜텀, 펜텀 내에서 산란된 엑스선을 제거하기 위한 평행형 콜리메이터, 엑스선을 가시광으로 전환시켜 주는 CsI(Tl) 섬광체, 가시광을 전기적 신호로 바꾸어 주는 픽셀화된 검출기로 구성하였다. 이 때 펜텀에 조사된 엑스선의 에너지범위는 50~150 keV 이며, 펜텀과 CsI(Tl) 섬광체에서 일어나는 엑스선과의 상호작용은 광전흡수와 콤프톤산란 현상으로 제한하였다. 또한 섬광효율은 1 MeV 엑스선 에너지 흡수당 약 52,000개의 가시광이 등방향으로 방출되며 이 때 양자효율(quantum efficiency)은 70%로 가정하였다. 검출기에 도달하는 가시광은 32×32, 64×64, 128×128, 256×256, 512×512 픽셀크기에 대해 디지털화 시킨 후 8 bit grayscale로 영상화하였다. 또한 몬테칼로 모의실험을 통하여 얻어진 엑스선 영상의 MTF(modulation transfer function)를 측정하여 사용된 영상시스템의 해상도를 평가하였다.

그림 3-2-3은 주어진 펜텀에 대한 엑스선영상의 한 예로써, 사용된 픽셀수는 각각 128x128, 512x512이며, 사용된 픽셀수가 많을수록 해상도는 향상됨을 알 수 있다.

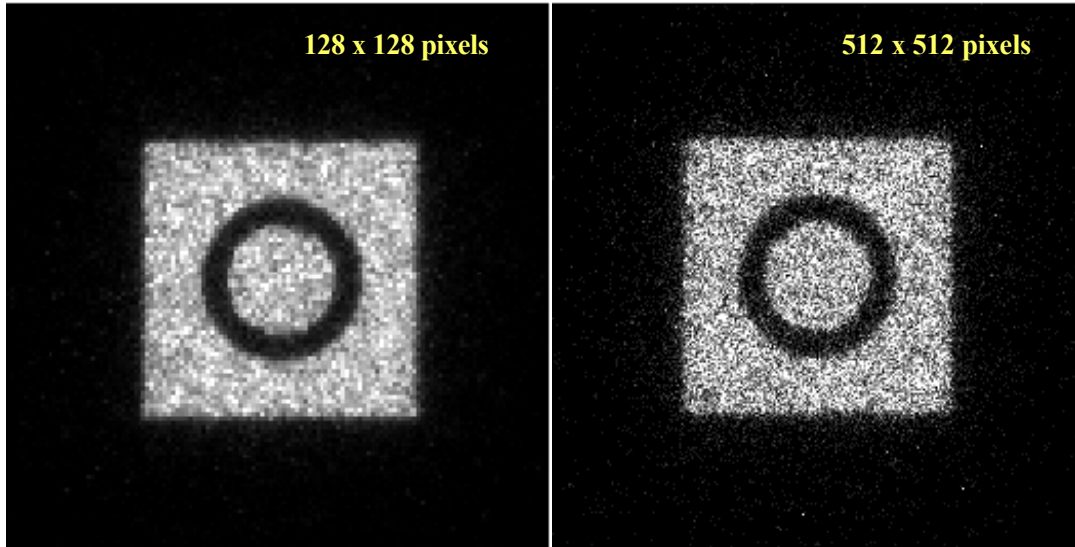


그림 3-2-3. 모의실험에 사용된 팬텀의 엑스선 영상: 128x128 픽셀(좌측), 512x512 픽셀(우측)

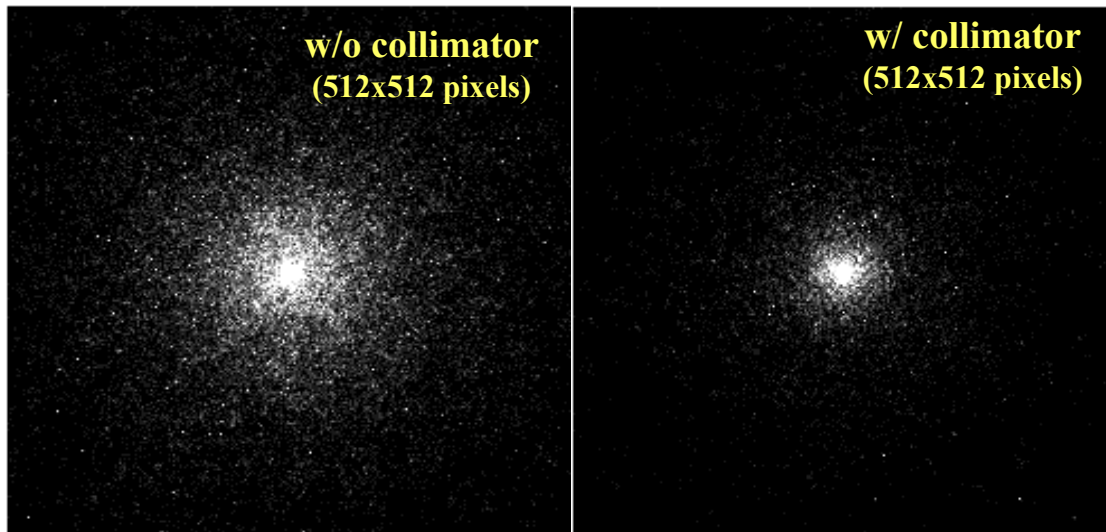


그림 3-2-4. 점원의 엑스선 영상: 콜리메이터가 없을 경우(좌측), 콜리메이터가 있을 경우(우측)

그림 3-2-4는 원점에 위치한 점원(point source)에서 엑스선이 수직으로 팬텀에 입사할 때 (a)콜리메이터를 설치하지 않은 경우 (b)콜리메이터를 설치한 경우에 대하여 얻은 엑스선 영상이다. 이 때 사용된 검출기의 픽셀크기는 128x128이다. 그림 3-2-4에서 나타난 바와 같이 산란선이 콜리메이터에

의해서 효과적으로 제거됨을 볼 수 있으며, 결과적으로 영상의 대조도 (contrast)는 향상된다. 영상의 해상도는 주로 섬광체 내에서 발생하는 가시광의 확산 정도와 검출기에서 사용되는 픽셀수에 좌우된다. 본 연구에서는 이러한 요소들의 연관성을 정량화하기 위해 CsI(Tl) 섬광체의 두께를 5, 7, 8 mm로 변화해 가면서 점원에 대한 엑스선영상을 얻은 후, PSF(point spread function)을 측정하여(그림 3-2-5) FWHM(full-width half-maximum)을 계산하였다(그림 3-2-6). 계산된 공간해상도의 값은 각각의 섬광체 두께에 대해 약 0.02, 0.06, 0.10 mm FWHM으로 측정되었으며, 섬광체의 두께가 얇아질수록 영상의 해상도는 향상됨을 알 수 있다. 이 때 계산된 MTF는 그림 3-2-7에 나타내었다. 5 mm 두께의 CsI(Tl) 섬광체에 대한 영상의 해상도는 약 0.85 lp/mm로 계산되었다.

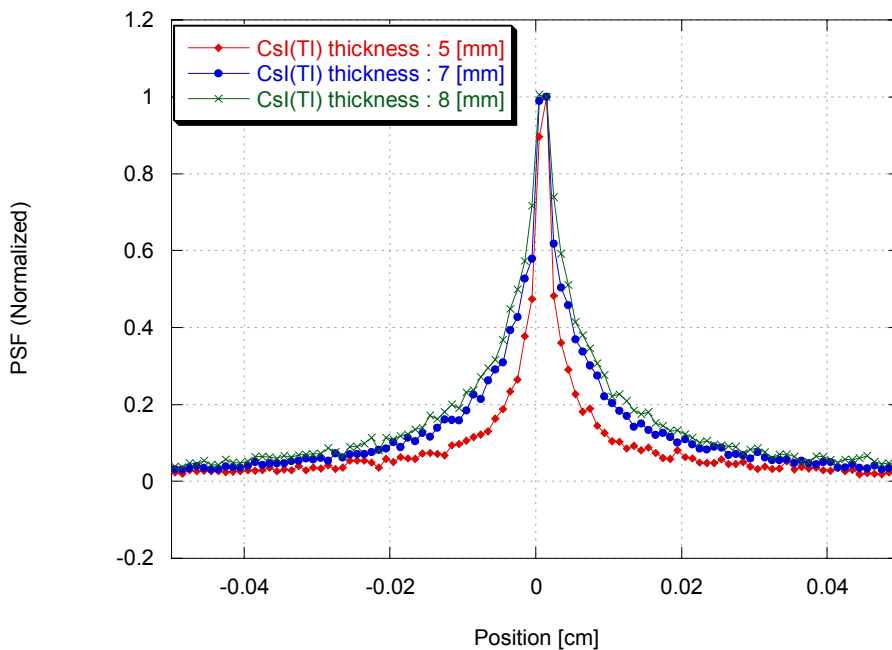


그림 3-2-5. 섬광체 두께 변화에 따른 PSF(point spread function) 측정

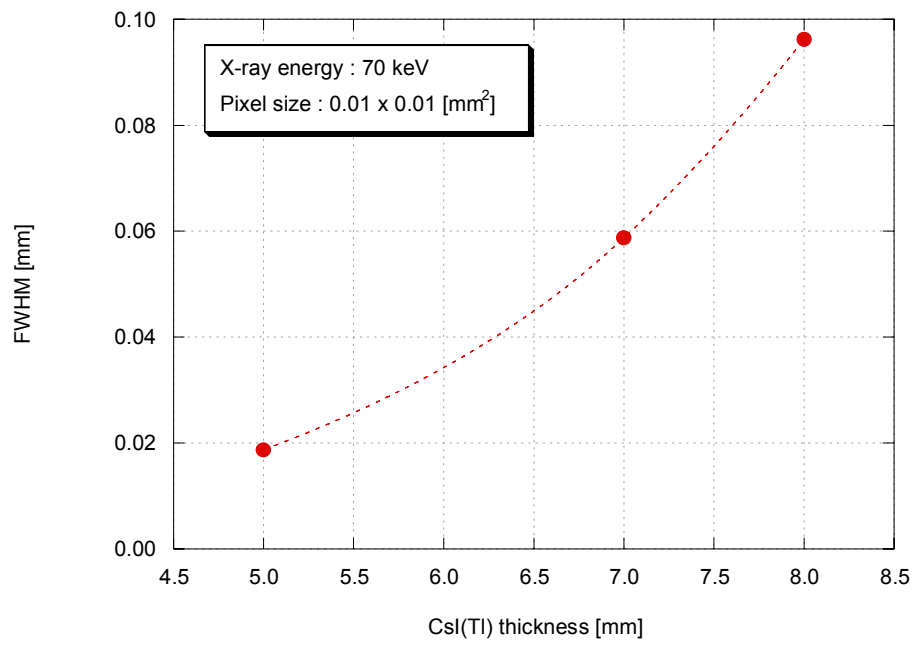


그림 3-2-6. 섬광체 두께 변화에 따른 FWHM(full-width half-maximum) 측정

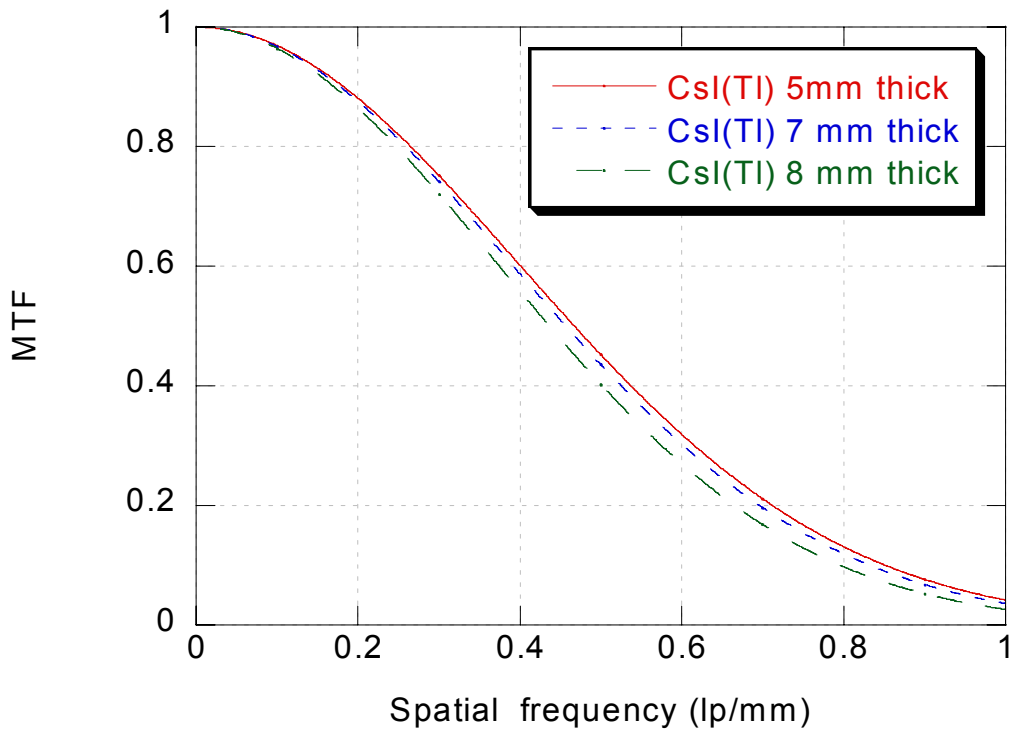


그림 3-2-7. 섬광체 두께 변화에 따른 MTF(modulation transfer function) 측정

2. 광-전자 변환체내 Photon의 이동거리 추정

이 절에서는 Photon들에 의하여 생성된 전자들이 입사위치로부터 얼마나 먼 위치까지 이동하여 반응하는지를 확인하고자 EGS4를 사용하여 계산한 결과에 대하여 기술한다. Photon의 Radial 방향 이동거리는 영상검출기의 해상도를 결정하기 때문에 본 Simulation을 통하여 GEM검출기 기체층의 두께와 적정 X-선 에너지 및 MCP 코팅두께 등을 산출하였다. 대상물질은 Au, CsI 및 Ar기체이며 Au 및 CsI의 경우 두께가 1cm인 판에 Photon을 수직 입사하였다. Photon의 초기 위치는 판의 상부 10cm 거리에 두었으며 모든 Photon은 판에 수직으로 입사하는 것으로 가정하였다. 이들 실험에 사용한 Photon의 개수는 10,000개이다. Ar 기체의 경우 두께를 10cm로 두었으며 입사 Photon의 수는 500,000개이다.

그림 3-2-8은 Au내에서 생성된 전자의 위치가 수직입사 지점으로부터 Au판에 동심원을 그렸을 때 어느 위치에 얼마나 많은 전자가 생성되는지를 보이고 있다. EGS4는 에너지가 10keV이내인 전자들을 수송할 수 없다는 점을 고려하면 실제 전자들의 위치는 그림 3-2-8에 나타난 위치보다 약간 더 멀리 이동해야 할 것이다. 그림 3-2-9는 입사 Photon의 에너지에 따라 생성된 전자의 총 수가 어떻게 달라지는지를 보이고 있다. 이 경우 역시 EGS4의 계산 한계 때문에 10keV 이하의 저 에너지 Photo Electron에 의하여 생성된 2차 전자들은 고려되지 않은 것으로 보아야 할 것이다.

그림 3-2-8로부터 입사 Photon의 에너지가 100keV이하일 경우 Radial 방향의 이동거리는 0.2~0.3 micron 수준임을 알 수 있다. 또한, 생성된 전자의 수는 입사 Photon의 에너지가 90keV이상일 때 급격히 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, Au를 Photo-converter로 사용코자 할 경우 입사에너지는 90keV이상 사용이 바람직하며 영상 검출기에 Au를 Photo-converter로 사용한다면 해상도 1 micron 유지에 큰 어려움이 없음을 알 수 있다.

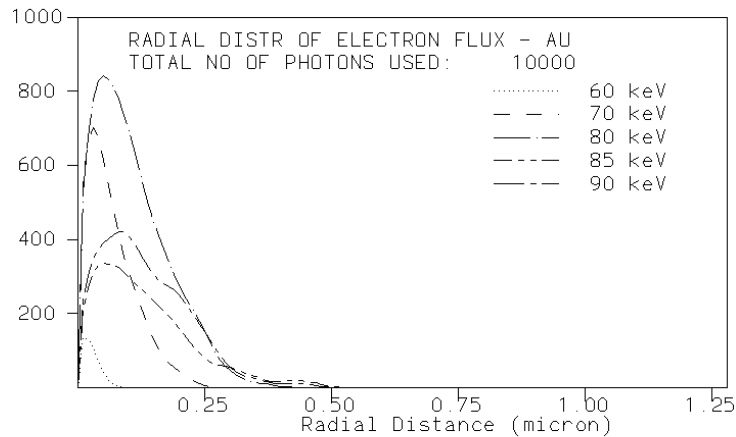


그림 3-2-8. Au판 내에서 생성된 전자의 위치분포

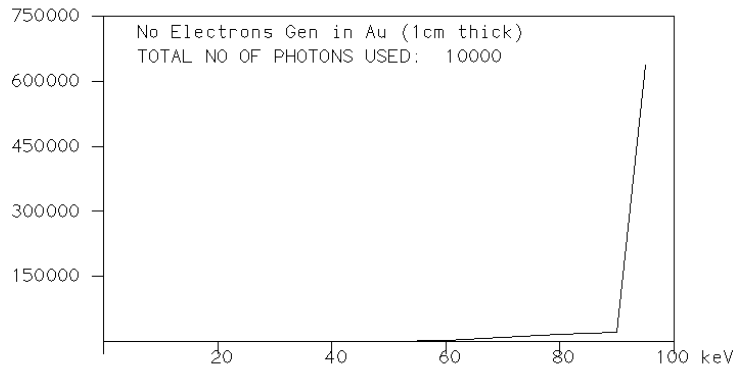


그림 3-2-9. 입사 Photon의 에너지대비 생성된 전자의 수

그림 3-2-10과 그림 3-2-11은 Au대신 CsI를 사용했을 때 생성된 전자들의 위치와 입사 Photon의 에너지 대비 생성 전자의 수를 나타내고 있다. 이 경우역시 CsI의 두께는 1Cm로 두었으며 그림1-10에서 보는바와 같이 Radial방향 최대 이동거리는 입사 Photon의 에너지가 클수록 커지며 70keV 이하일 경우 3 micron 이내임을 확인할 수 있다. 또한, 그림1-11에서 보는바와 같이 생성된 전자의 수는 입사 Photon의 에너지가 60keV 이상일 때 입사 입자의 수 대비 생성된 전자의 수의 비율이 5,000배 이상임을 알수 있다.

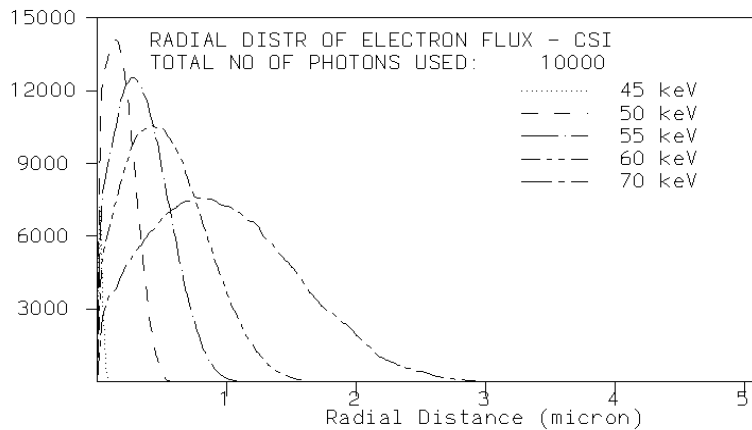


그림 3-2-10. CsI 판 내에서 생성된 전자의 위치분포

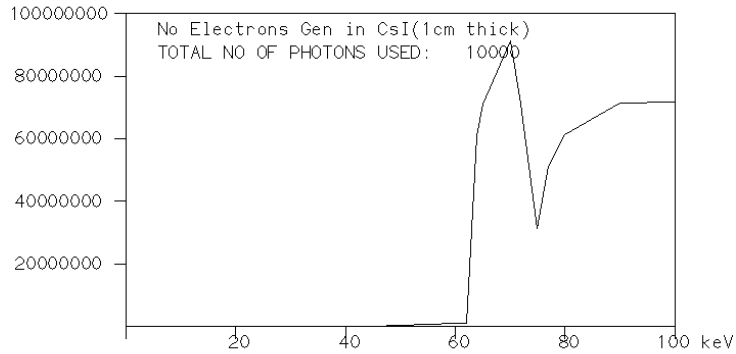


그림 3-2-11. 입사 Photon의 에너지대비 생성된 전자의 수

다음은 Ar기체 내에서 생성된 전자들의 위치와 입사 Photon의 에너지 대비 생성전자의 수를 산출한 결과에 대하여 기술한다. Ar기체의 경우 두께는 20cm로 두었으며 사용한 입사 Photon의 개수는 200만개이다. 그림 3-2-12는 Ar 기체 내에서 생성된 전자들의 위치로부터 입사 Photon의 Radial 방향 최대 이동 거리를 산출한 것이다. 그림 3-2-12에서 알 수 있는바와 같이 Ar 기체의 경우에도 Photon의 Radial방향 이동거리는 에너지가 클수록 커지며 15keV의 경우 1mm 이내이나 35keV의 경우에는 5mm에 달함을 알 수 있다.

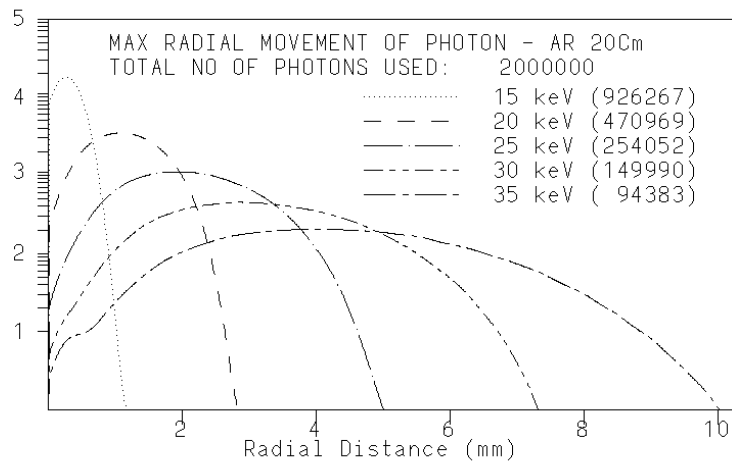


그림 3-2-12. Ar기체(두께 20cm)내에서 Photon의 Radial방향 최대 이동거리

그림 3-2-13은 입사 Photon의 에너지에 따라 생성된 전자의 수를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 Ar기체를 Photo-Converter로 사용할 경우 입사 Photon의 에너지는 20 keV이내라야 함을 알 수 있다. 또한 그림 3-2-14에서 확인한 바와 같이 Ar기체의 두께를 가능한 수mm 수준의 얇은 두께를 사용해야 함을 알 수 있다.

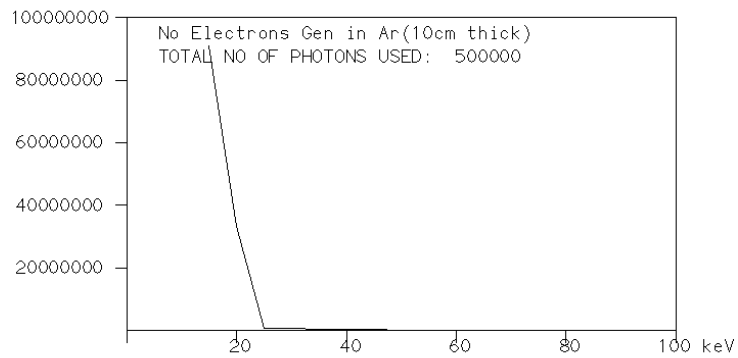


그림 3-2-13. 입사 Photon의 에너지 대비 Ar기체에서 생성된 전자의 수

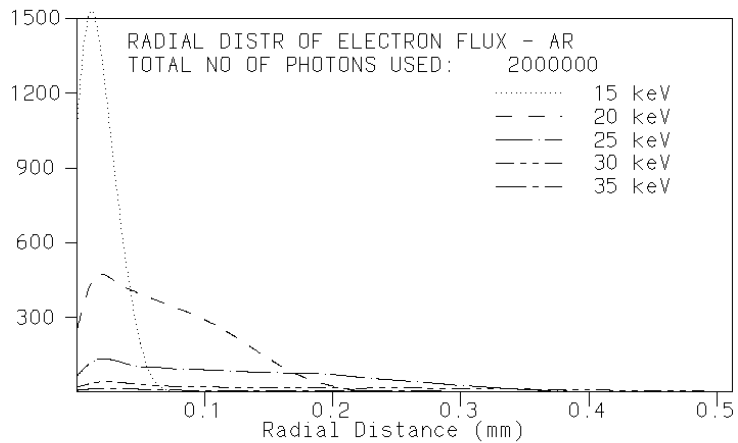


그림 3-2-14. Ar기체(두께 3mm) 내에서 생성된 전자의 위치분포

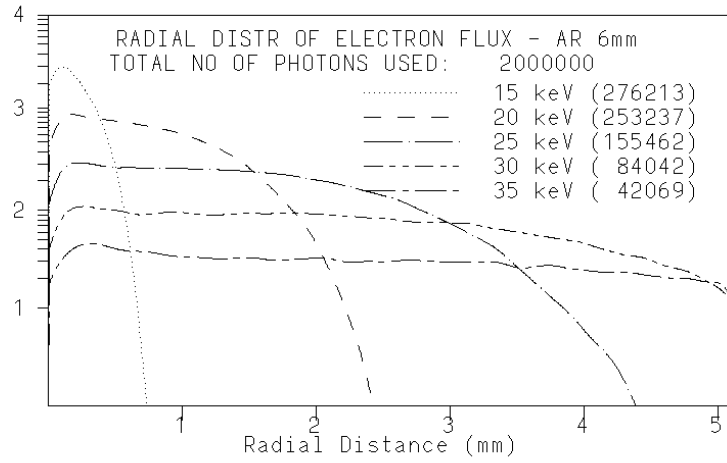


그림 3-2-15. Ar기체(두께 6mm) 내에서 생성된 전자의 위치분포

다음은 이들 기체 내에서 입사 Photon이 Radial 방향으로 얼마나 먼 위치까지 이동하는지를 보기 위하여 가장 먼 위치에 생성된 전자들의 Radial방향 이동거리를 산출한 결과이다. 입사 Photon의 에너지 별로 각각 5,000,000개의 Photon을 사용하였으며 기체층의 두께는 6mm로 두었다. 입사 Photon이 기체 내에서 소멸될 경우에는 최종으로 생성된 전자의 에너지가 10 keV에 근접한 입자로서 EGS4가 더 이상 수송할 수 없는 경우이기 때문에 실험치와는 약간의 차이가 있을 수 있다. 입사된 Photon들 중 실제 1회 이상 반응한 Photon의 개수는 그림에 나타나 있다. 그림 3-2-16은 Xe 기체내에서 Photon의 최대 이동거리를 보이고 있다. 괄호 안의 수는 두께가 20cm인 Xe 기체층에 200만개의 Photon이 입사했을 때 반응한 Photon의 개수를 나타낸다.

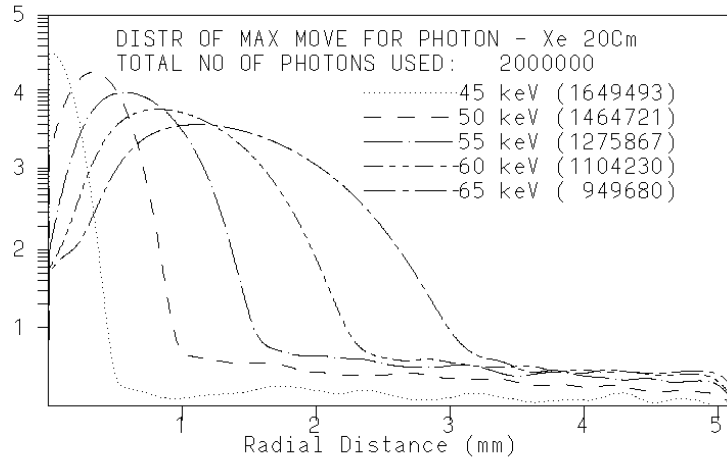


그림 3-2-16. Xe 기체(두께 20Cm)내에서 Photon의 최대 이동거리

그림 3-2-17과 3-2-18은 각각 두께가 6mm인 Ar과 Xe기체내에 수직으로 입사한 Photon의 에너지 대비 최대 Radial방향 이동거리를 나타내고 있다. 이들 그림의 괄호 안 숫자는 각각 500만개와 200만개의 Photon이 입사했을 때 생성된 전자의 수를 나타내고 있다. 여기서 두께 6mm는 GEM검출기에서 사용코자 하는 기체 층의 두께이다. 이들 그림으로부터 확인된 결과는 Ar기체의 경우 입사 Photon의 에너지가 20keV 이하가 적합한 에너지 범위이며 Xe기체의 경우 45keV수준이 가장 적합한 에너지 범위이라는 사실이다.

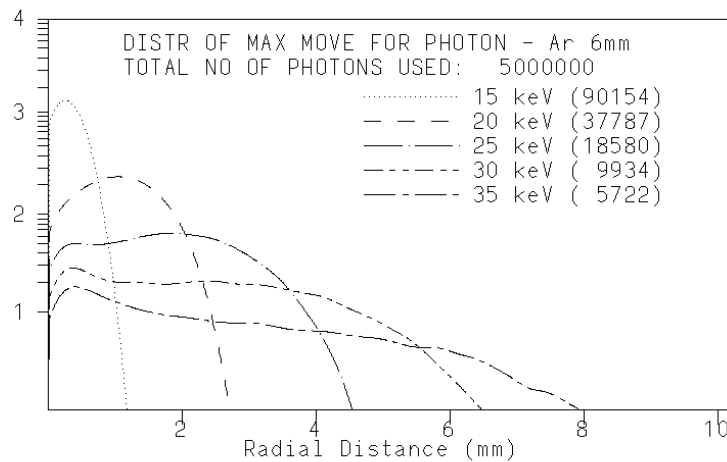


그림 3-2-17. Ar기체(두께 6mm)내에서 Photon의 최대 이동거리

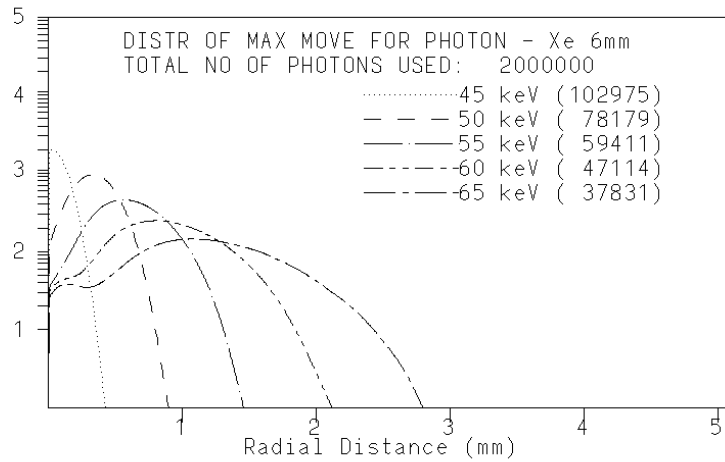


그림 3-2-18. Xe 기체(두께 6mm)내에서 Photon의 최대 이동거리

3. CsI의 광-전자 변환 특성분석

이 절에서는 CsI로 코팅된 Micro-channel Plate(MCP)의 광-전자 변환 효율에 대하여 EGS4, Universal Yield Curve 및 Escape Depth 등을 이용하여 분석한 결과에 대하여 기술한다. 우선 입사 Photon을 EGS4를 사용하여 에너지가 1keV이하가 될 때까지, 그리고 생성된 전자의 에너지가 10keV이하가 될 때까지 수송하였다. 다음에는 CsI 코팅 내에서 생성된 전자들 중 실험 결과로부터 알려져 있는 56nm의 Escape Depth이내에 위치한 전자들 중 진행 방향을 고려하여 MCP의 Hole내부 또는 표면으로 탈수 가능한 수를 추정하였다. 끝으로 CsI코팅 내에서 생성된 전자들 중 EGS4의 수송 능력 한계로 인하여 에너지가 10keV수준임에도 수송이 중단된 전자들에 의하여 생성이 가능한 이차 전자들의 수를 Universal Yield curve를 사용하여 산출하였다. 이들 전자의 수를 더함으로써 MCP에 입사한 Photon에 의하여 생성된 전자의 수를 추정하였다.

문헌 조사에 의하면 광-전자 변환체의 변환 효율에 관한 많은 연구 결과가 발표되어 있다. Martin등[17]은 실험을 통하여 CsI, CsBr 및 이 두 물질의 혼합물에 대한 변환 효율을 조사한바 있다. 실험 결과 이들은 입사 Photon의 에너지가 10keV이하일 때 CsI는 CsBr에 비하여 효율이 크며 이

두 물질을 혼합할 경우에는 변환 효율이 CsBr보다 더 작아짐을 확인하였다. Burginyon [18]등은 입사 입자의 에너지가 100keV 까지 고에너지인 X-선을 사용하여 광-전자 변환체로 Gold를 사용할 경우와 플라스틱 신질레이터 물질인 BC422의 변환 효율을 비교한바 있다. 또한, Tremsin[19]등은 코팅 물질로 Gold를 사용할때와 니크롬을 사용할때에 대한 비교 실험을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 MCP의 기하학적 구조는 두께가 0.5mm, Hole의 직경이 25micron, 그리고 Hole간의 Pitch는 37micron으로 두었다. MCP표면과 Hole들의 내부는 두께가 0.3~5.0 micron의 CsI로 균일하게 코팅된 것으로 가정하였다. MCP자체의 재질은 PbO로 가정하였다. EGS4의 입자 수송 한계 때문에 Frumkin[20]등이 실험 결과로부터 산출한 Escape Depth를 사용해야 했다.

먼저, EGS4의 계산능력 한계로 인한 영향을 파악하기 위하여 Al, CsI, CsBr, Au등 물질내에서의 Electron Range값을 계산한 후 알려져 있는 실험 결과[21]와 비교하였다. 다음에는 본 연구에서 MCP의 코팅 물질로 사용코자 하는 CsI에 Photon을 수직으로 입사시켰을 때 얼마나 많은 량의 전자가 생성되는지를 계산하였다. 계산 결과는 알려져 있는 실험 결과와 비교하였다. MCP로부터 방출되는 이차 전자들의 수는 두 부분으로 나누어 추정하였는데, 첫째 부분은 코팅 외벽으로부터 Escape Depth 이내에 있는 전자들로부터의 추정이고 둘째 부분은 생성된 전자들 중 에너지가 100 eV이상 10 keV 미만의 고 에너지 전자들에 의해 생성되는 이차 전자들의 수를 추정한 값이다.

가. 광-전자 변환 효율 계산 결과

앞서 기술한 바와 같이 광-전자 변환 효율 계산에 앞서 EGS4계산 능력의 한계가 미치는 영향을 분석하기 위해서 물질 내에서 전자의 이동거리 (Electron Range)의 값을 계산한 다음 알려져 있는 실험 결과와 비교하였다. 입사 Photon의 에너지는 15keV에서 700keV까지 이며 수직 입사한 입자들에 의해 생성된 전자들의 Flux분포를 그림 3-2-19와 같이 도시화하여 Electron Range의 값을 추정하였다. 즉, 그림 3-2-19와 같은 Electron Flux Curve들로부터 Al, CsI, CsBr, Au등 물질내에서 입사 Photon의 에너지에 따른

Electron Range의 값을 산출하였으며 그 결과는 표 3-2-1과 같다.

표3-2-1. Electron Range의 계산값과 실험값비

Energy(keV)	15	20	30	40	50	75	100	300	500	700
Known-Al(μm)	1.2	2.4	5.3	9.0	14	32	48	260	610	970
EGS4-Al(μm)	1.5	2.5	5.0	9.0	13	30	45	250	600	950
EGS4-CsI(μm)	0.6	1.5	2.0	4.0	5.5	12	20	110	250	350
EGS4-CsBr(μm)	0.9	1.5	3.0	5.5	8.0	20	30	170	350	500
EGS4-Au(μm)	0.3	0.6	1.0	1.5	2.2	6	12	45	60	85

표3-2-1에서 EGS4로 Label된 4개 행은 각각 Al, CsI, CsBr 및 Au에 대하여 EGS4를 이용하여 계산한 결과이며 맨 첫 행은 Al에 대한 알려져 있는 실험 결과이다. 첫 두 행을 비교했을 때 실험 값과 계산 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 EGS4가 수송해 주지 못한 10keV전자들의 이동거리가 0.6 micron수준이라는 사실을 감안할 때 EGS4를 사용한 계산 값으로 전자의 이동거리 산출이 가능함을 확인시켜 준 결과라 할 수 있다. 따라서, 셋째 줄 이하에 있는 CsI, CsBr 및 Au에 대한 Electron Range 의 값은 해당물질 내에서 10keV 전자가 이동할 수 있는 거리를 오차 범위 이내에서 사용 가능한 값이라 할 수 있다.

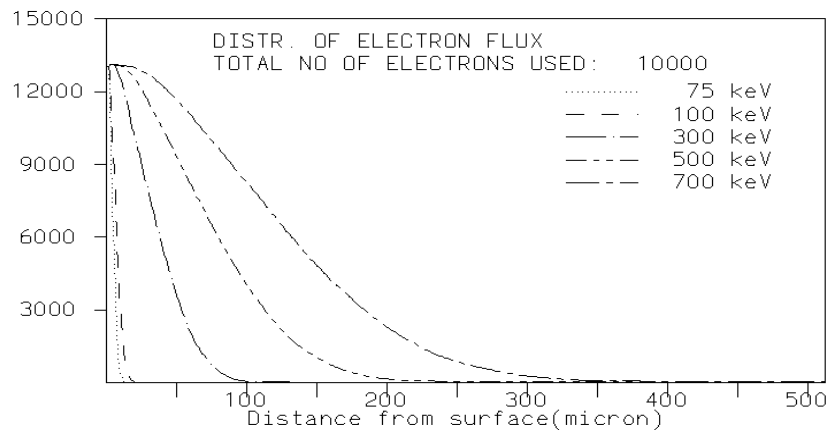


그림 3-2-19. 알루미늄 내에서 생성된 전자의 Flux분포

EGS4계산 결과의 검증을 위한 두 번째 실험으로 “Detection Yield”[20]의 값을 산출하여 실험결과와 비교하였다. Detection Yield는 검출된 전자의 수의 광-전자 변환 체에 흡수된 Photon의 수에 대한 비율로 정의된다. 그림 3-2-20은 CsI에 에너지가 60keV인 Photon 10만개를 수직으로 입사시켰을 때 산출된 Detection Yield 곡선이다. 사용한 CsI 판의 두께는 그림의 X-축에서 보는 바와 같이 10nm에서 10 micron까지 범위내의 여러 값을 사용하여 계산하였다. 입사한 Photon중에서 CsI물질 내에서 한번이상 반응을 한 입자 즉, 투과 후 에너지 손실이 있는 입자는 CsI에서 흡수된 Photon으로 간주하였다. 방출된 전자의 수를 산출하기 위하여 Verma[23]의 실험 결과를 사용하였는데 그의 추정에 의하면 CsI 내에서 에너지가 100eV이하인 이차 전자의 Escape Depth 는 56 nm이라는 것이다.

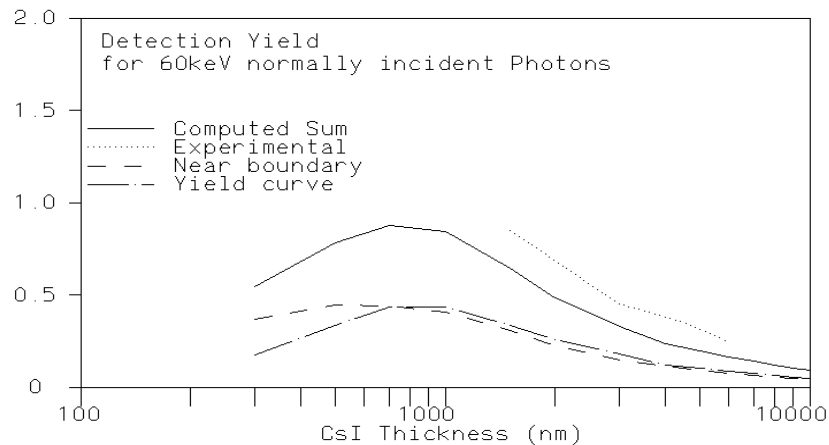


그림 3-2-20. CsI 내에서의 Detection Yield

CsI 코팅 표면으로부터 Escape Depth 이내에 있는 전자들 중 표면 밖으로 이탈이 가능한 전자의 수를 산출하기 위하여 r 을 해당 전자의 위치로부터 가장 가까운 표면까지의 거리라 하고 p 를 표면 밖으로 탈출할 확률이라 한다. Escape Depth를 D 라하고 전자의 위치에서 반경이 D 인 구면을 그린 다음 거리 r 이 D 보다 작을 경우 이 구면과 CsI의 표면이 만나는 원에 의하여 잘린 구면의 면적을 A 라 하면 확률 p 는 $\frac{A}{4\pi D^2}$ 가 된다. 여기서 면적 A 의

값을 구한 다음 위 식에 대입하면

$$p(r) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r}{D}\right) \quad (3-2-1)$$

가 된다.

위 식에서 $D=56nm$ 이며 계산의 편의상 이 길이를 7개의 구간으로 나누어 한 구간이 $8nm$ 가 되도록 하고, 모든 전자들은 항상 해당 구간의 중심점에 위치한다고 가정하여 위의 식을 적용하면 표면으로 탈출한 전자의 수를 추정할 수 있다. 즉, 탈출한 전자의 수를 δ_0 라 하면

$$\delta_0 = \int_0^D q(r)p(r)dr = \sum_{i=1}^7 q_i p_i \quad (3-2-2)$$

가 된다. 여기서 $q(r)$ 은 표면으로부터의 거리 r 에 위치한 전자들의 수이며 q_i 는 i 번째 구간에 있는 전자들의 수이다. 이상의 방법으로 계산한 결과는 그림3-2-21과 같으며 점선으로 표시된 Frumkin[20]등이 실험을 통하여 산출한 결과와 20~30% 이내에서 일치함을 확인 할 수 있다.

한편, CsI 내에서 생성된 전자들 중 에너지가 10keV의 높은 값임에도 불구하고 EGS4가 Cross Section값의 한계로 인하여 수송을 중단한 입자들에 의해 생성된 이차 전자들은 다음 식으로 주어지는 “Universal Yield Curve[22]”을 사용하여 추정하였다.

$$\delta = \delta_m \exp \left\{ - \frac{\left[\ln \frac{E_p}{E_m} \right]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (3-2-3)$$

위 식에서 δ 는 전자 생성량(Electron Emission Yield)이며 δ_m 은 δ 의 최대값이고, E_m 은 전자 생성량이 최대일 때의 에너지 값이며 E_p 는 Primary 전자의 에너지 값이다. 본 연구에서는 Scholtz[22]등이 실험결과로부터 얻은 값을 사용하였는데 CsI의 경우 $\delta_m=12$, $E_m=3.3keV$, $\sigma=1.6$ 이며 MgO의 경우 $\delta_m=12$, $E_m=0.95keV$ 를 사용하고 Au등 금속의 경우에는 $\delta_m=1.5$, $E_m=1.4keV$ 를 사용하였다.

에너지 값이 10keV미만이 되어 EGS4가 수송을 중단한 전자의 경우 식(3-2-3)을 사용 δ_m 을 계산한 후 식(3-2-1)에 의하여 주어진 확률 값을 곱하

여 누적하면 이 전자로부터 생성된 이차 전자의 총 수를 산출할수 있게 된다. 이때, 식(3-2-12)에서 Electron Range D 의 값은 참고문헌 [23]의 추정값인 식(3-2-15)를 사용하였다.

$$R=fE^{1.35}, f=\frac{11.5 \times 10^{-6}}{4.51} \quad (3-2-4)$$

위 관계식에서 E 는 전자의 에너지로서 단위는 keV이며 R 은 Electron Range의 추정값인데 단위는 Cm 이다.

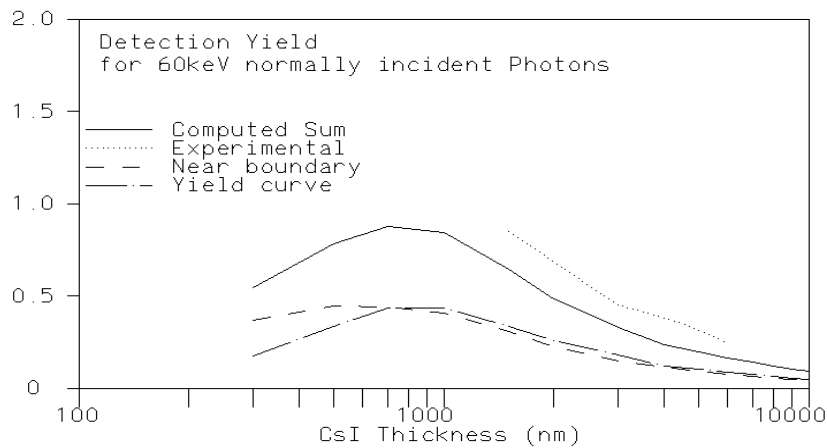


그림 3-2-21. CsI에 대한 Conversion Efficiency 계산 결과

이상 기술한 방법에 따라 CsI에 대한 Detection Yield의 값을 산출한 결과는 그림 3-2-20과 같다. 이 그림에는 Frumkin[20]등의 실험 결과도 점선 곡선으로 함께 표시되어 있는데 계산 값은 실험을 통한 측정값의 약 2배로 나타나 있다. 본 연구에서 필요한 사실은 Yield의 절대값 보다는 CsI두께에 따른 경향과 입사에너지에 따른 변화량이기 때문에 이러한 목적으로는 앞서 기술한 추정 방법 사용이 가능함을 알 수 있다.

CsI 판으로부터 방출되는 이차 전자들의 수를 앞서 기술한 방법을 사용하여 추정함으로써 광-전자 변환체 (CsI)의 Conversion Efficiency 또는 Quantum efficiency를 계산할 수 있다. 여기서 사용한 “Conversion Efficiency”는 입사된 Photon의 수 대비 생성된 전자의 수의 비율이다. 그림 3-2-21는 산출된 Conversion Efficiency 곡선을 입사 Photon의 에너지가 35,

37, 38, 40, 45, 50keV등일 때의 계산 결과를 보이고 있다. 계산 결과의 정확성 확인을 위하여 입사 에너지가 60keV일 경우에 대한 실험 결과(Frumkin[20])와 계산결과를 비교한 결과 계산값이 실험값에 비하여 약 20% 높게 나타났다.

나. MCP 한개의 Hole 주변에서 생성된 전자의 수 추정

이 절에서는 EGS4를 사용하여 계산한 Micro-channel plate(MCP) Hole 한 개 주변에서 생성된 전자의 수에 대하여 기술한다. 사용한 MCP의 기하학적 구조는 그림 3-2-22와 같으며 Hole간의 Pitch는 37 micron으로 Photon의 입사 영역은 Hole의 중심으로부터 반경이 18.5 micron인 원반으로 하였다. Hole의 크기는 반경이 12.5 micron이고 깊이가 0.5mm인 원주이며 표면과 Hole의 내부는 CsI에 의하여 코팅된 것으로 가정하였다. 코팅의 두께는 가변이며 MCP의 재질은 PbO로 가정하였다.

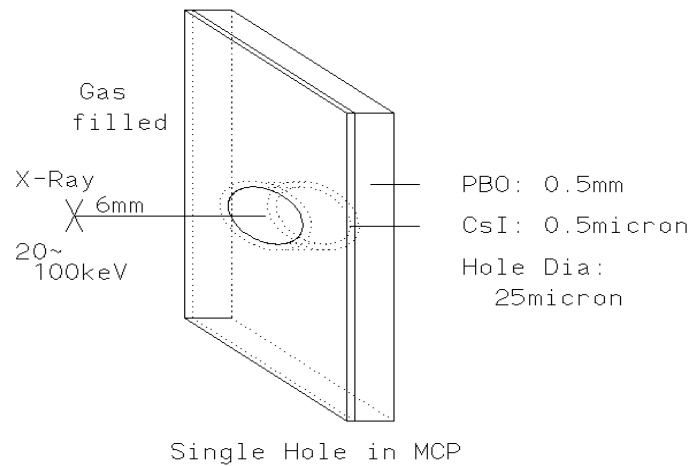


그림 3-2-22. 계산에 사용한 MCP의 구조

계산시간 단축을 위하여 MCP Hole 하나에 대해서만 계산을 수행하였으며 각각의 Simulation에서는 10만개의 Photon을 사용하였다. 입사 방향은 Azimuthal angle의 경우 $[0, 2\pi]$ 구간에서 무작위로, Polar angle은 구간 $[0, \alpha]$ 에서 무작위로 선정하여 입사방향을 결정하였다. 여기서, 각 α 는 입자가 MCP 표면에 닿는 영역의 반경인 $18.5 \mu m$ 과 입자의 시작점으로부터 표면

까지의 거리의 비율로 결정하였다. 임의의 난수로부터 Polar angle을 결정하는데는 제곱근을 취한 후 사용하였는데 이는 표면의 모든 영역에 입사가 수신될 확률이 같도록 하기 위해서이다. MCP Hole의 중심 축 방향이 입사 Photon의 수직 방향과 동일하게 되도록 입사 Photon의 초기위치를 정했으며 입사 Photon의 위치를 조절함으로써 MCP 내의 여러 Hole들의 위치에 따른 생성 전자수의 차이를 분석하였다.

그림 3-2-23은 입사 Photon의 에너지가 37, 38, 40, 41, 42keV일 때의 계산 결과를 보이고 있다. 각각의 곡선은 CsI의 코팅두께가 0.5 μm 에서 5 μm 까지 10개의 두께 값에 대하여 계산한 결과를 나타내고 있다. 이 그림에는 PbO내에서 생성된 고 에너지 전자(10keV 미만)에 의하여 생성 가능한 이차 전자들은 고려되지 않았다. 이는 이들로부터 생성된 이차전자들이 Hole내부까지 방출 될 확률이 매우 낮기 때문에 계산 결과에 거의 영향을 미치지 않기 때문이다.

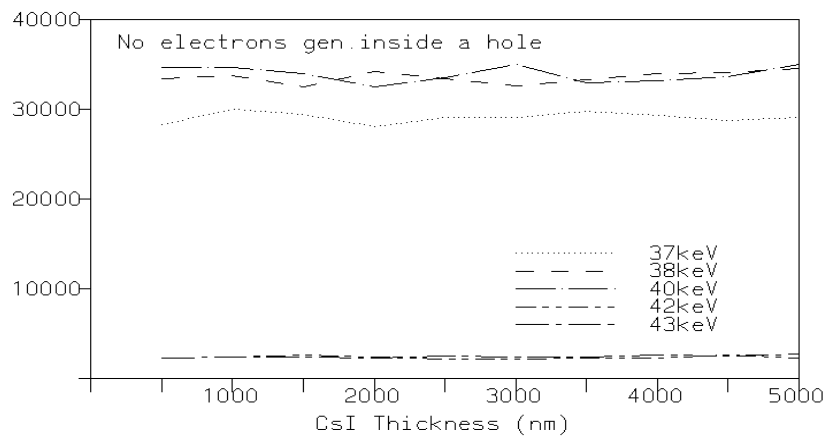


그림 3-2-23. 한 개의 MCP Hole 내부에 생성된 전자의 수

위 그림에서 확인할 수 있는 사실은 코팅 두께에 따라 생성된 전자의 수가 많아지지 않는다는 점이다. 물론, 두께가 0.2 μm 등 위 그림에 나타난 최소값인 0.5 μm 미만일 경우에는 생성된 전자의 수가 더 작아짐을 확인할 수 있다. 이처럼 일정 두께 이상에서 생성된 전자의 수가 증가하지 않은 이유는 적정 두께 이상일 경우 CsI 내부에서 흡수되는 양이 증가하기 때문이다. CsI

코팅 두께를 $0.5\ \mu\text{m}$ 로 고정하고 입사 에너지에 따른 생성 전자의 수를 그려 보면 그림 3-2-24가 된다.

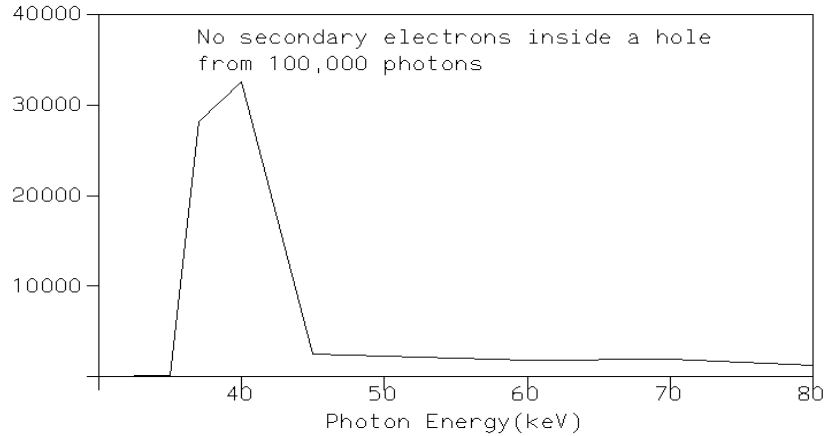


그림 3-2-24. 입사Photon의 에너지 대비 MCP Hole내부에 생성된 전자의 수

그림 3-2-24로부터 CsI를 코팅물질로 사용할 경우 적정의 Photon의 에너지는 37~45 keV임을 확인할 수 있다. 이상의 계산은 CsI로 코팅된 MCP가 진공 속에 있을 때 CsI코팅에 의하여 생성되는 전자의 수만을 계산한 것이다. 기체검출기의 기체부분에 의하여 생성되는 전자의 수에 대한 계산 결과는 다음절에 기술한다.

4. Ar 및 Xe 기체의 광-전자 변환 특성분석

이 절에서는 입사한 Photon이 Ar과 Xe기체를 통과하면서 생성한 전자의 수를 EGS4를 사용하여 추정된 결과에 대하여 기술한다. 기체 내에 그림 3-2-22와 같은 기하학적 구조를 갖는 MCP가 놓이게 되며 기체는 MCP Hole의 내부와 X-선으로부터 MCP까지의 공간을 채우고 있는 것으로 가정하였다. 이공간의 두께는 6mm로 가정하였다. 이 절에서 기술한 내용은 MCP에서 생성되는 전자들은 고려하지 않았으며 두께 6mm의 기체 내에서 생성되는 전자들만을 고려토록 하였다.

그림 3-2-25는 입사 Photon의 에너지가 20keV~100keV일 때 500,000개

의 Photon에 의해서 Ar 가스 내에서 생성되는 전자의 갯수를 도시화한 것이다. 이 그림으로부터 입사 에너지가 40keV이하일 경우 입사 Photon의 에너지가 작을수록 더 많은 전자를 생성함을 확인할 수 있다. EGS4의 계산 한계 때문에 15keV 미만에서는 계산할 수 없었다. 생성된 전자의 수는 6mm 두께 기체의 내부, CsI표면 및 CsI로 코팅된 MCP Hole의 내부 표면에서 생성된 전자의 수를 합산한 것이다.

그림 3-2-25에서 점선 곡선은 두께 6mm인 Ar기체내에서 생성된 전자의 수이며 실선 곡선은 MCP의 코팅인 CsI에 의하여 생성된 전자의 수를 포함한 것이다. 차이 부분은 CsI코팅으로부터 생성된 전자의 수(EGS4 계산)와 CsI 코팅 외벽 근처에서 생성된 전자들 중 밖으로 방출 가능한 전자의 수를 추정하여 합산한 결과이다.

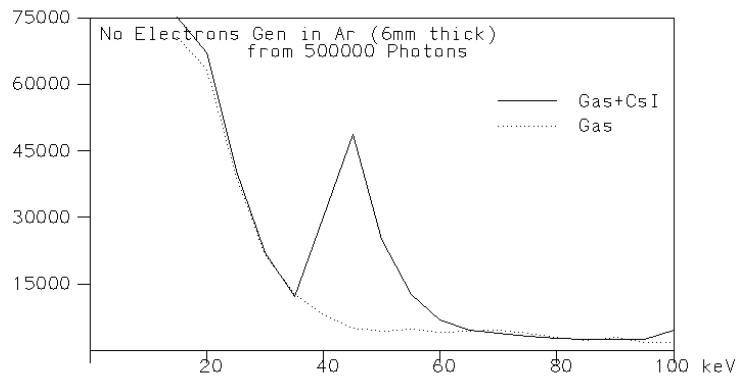


그림 3-2-25. Ar 기체내에서 생성된 전자의 수

그림 3-2-26은 Ar기체내에서 생성된 전자의 에너지 분포를 도시화한 것이며 그림 3-2-27은 Photon의 이동방향에(Hole의 축방향) 대한 생성된 전자들의 위치 분포를 나타낸 것이다. 그림으로부터 입사 Photon의 에너지가 커질수록 생성된 전자의 에너지 또한 커짐을 알수 있다. 그러나, Ar기체 사용시 Conversion Efficiency를 고려할 때 적정 입사 Photon의 에너지는 20keV 이하이고 이 경우 생성된 전자의 평균 에너지는 30 eV수준이라 할수 있다. 한편, 그림 3-2-27로부터 전자의 생성위치 분포는 축 방향으로 거의 균등함

을 확인할 수 있다. 물론, 입사 에너지가 25 keV 이상일 경우 에너지가 커짐에 따라 하단에 더 많은 전자가 생성되며 이는 Photon의 에너지가 클수록 Ar 내에서 투과 거리가 더 크기 때문으로 해석된다.

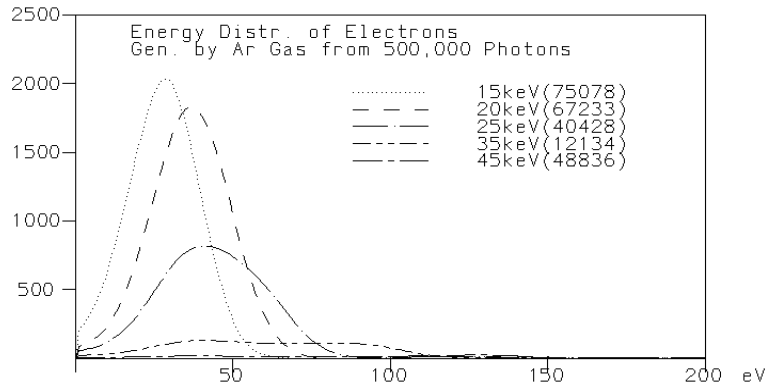


그림 3-2-26. Ar 기체내에서 생성된 전자의 에너지 분포

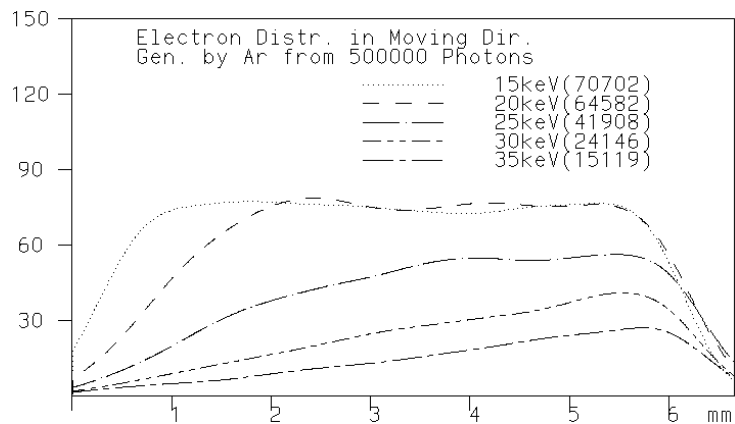


그림 3-2-27. Ar 기체내에서 생성된 전자의 축 방향 위치분포

Ar기체 대신 Xe을 사용할 경우 생성되는 전자의 수, 전자의 에너지 분포, X-선 이동 축 방향의 전자분포 등은 각각 그림 3-2-28, 3-2-29, 3-2-30과 같다. 그림 3-2-28로부터 6 mm두께의 Xe 기체내에서 생성된 전자의 수는 입사 Photon의 에너지가 60 keV일 때 가장 많이 생성되며 생성된 전자의

에너지는 대부분 50 eV 이내임을 알 수 있다. 또한, Photon의 이동방향에 대한 생성전자들의 위치 분포는 그림3-2-30에서 보는 바와 같이 거의 균등한 방향 분포를 이룸을 알 수 있다.

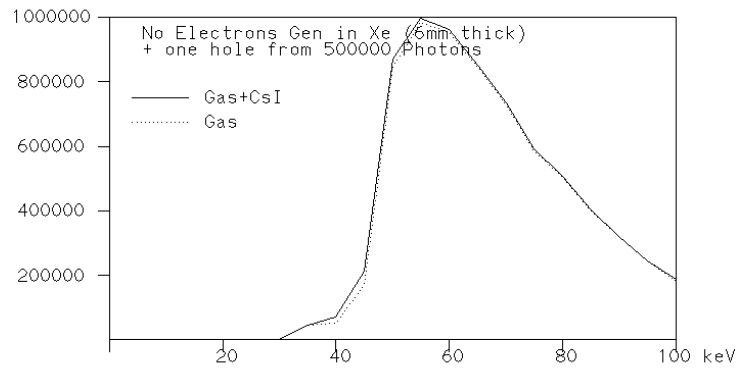


그림 3-2-28. Xe 기체내에서 생성된 전자의 수

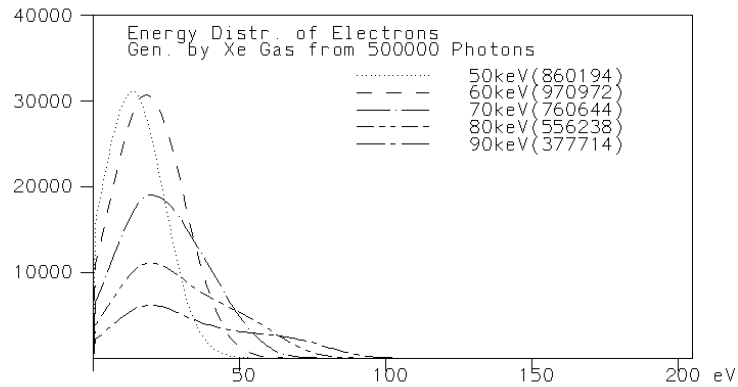


그림 3-2-29. Xe 기체내에서 생성된 전자의 에너지 분포

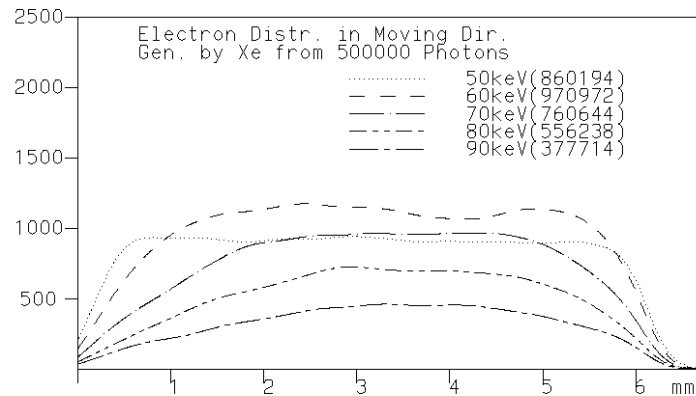


그림 3-2-30. Xe 기체내에서 생성된 전자의 축 방향 위치분포

5. 다채널 Readout회로 설계

GEM 검출기를 위한 전자회로는 크게 아날로그 신호 처리부, 디지털 신호 처리부, 데이터 획득 시스템으로 구성하였다. 아날로그 신호 처리부에서는 GEM 검출기의 출력단(readout)으로부터 미소펄스신호를 입력받아 증폭과 성형을 거쳐 아날로그 신호를 내보내게 되며 이와 동시에 출력채널의 어드레스를 나타낼 수 있는 어드레스버스를 갖도록 하였다. GEM 검출기에서는 각 pixel 별로 들어온 펄스의 수를 기본 데이터로 사용하기 때문에 펄스가 발생한 pixel의 해당채널에 대한 어드레스를 데이터메모리에 매핑하는 방법으로 채널별 펄스를 계수하게 된다. 디지털 신호 처리부에서는 아날로그 신호 처리부에서 출력되는 어드레스 버스를 데이터메모리에 실시간으로 직접 매핑시키는 역할을 하며 제어신호를 통하여 데이터획득시스템과 인터페이스역할을 수행토록 하였다. 데이터획득시스템에서는 데이터메모리에 축적된 데이터를 가져와 화상처리에 필요한 데이터로 가공하도록 하였다.

신호처리회로의 블록 다이어그램을 그림 3-2-31에 나타내었다. 설계검증을 위하여 64 x 64 화소의 아날로그 신호를 X와 Y축에 각각 2개씩의 32ch signal processor IC를 사용하여 처리토록 하였으며 채널어드레스를 위한 디지털신호처리는 National Instruments사의 DIO96 Board를 통하여 수행하고

데이터 획득은 800MHz의 Intel Pentium III 컴퓨터가 내부 PCI버스를 이용하여 얻을 수 있도록 구성하였다.

가. 다채널 Readout 설계 및 증폭기/판별기 제작

본 과제에서는 다채널 Readout으로 256 x 256 채널의 방사선검출을 위하여 개발된 RENA chip을 사용토록 하였다. 이 chip은 32-channel signal processor IC이며 블록 다이어그램은 그림 3-2-32와 같다. 32개의 각 채널은 아날로그와 디지털부분으로 구성되며 2개의 격리(isolation)된 아날로그채널이 아날로그 채널단의 양끝에 1개씩 있는 구조로 되어있다. RENA chip은 다양한 동작을 가능하게 해주는 여러 가지 자기트리거모드(self-trigger mode)를 갖고 있으며 shaper peaking time을 8가지로 디지털 제어 할 수 있는 기능이 있다. 이 기능은 다양한 검출기의 다른 전하수집시간(charge collection time)을 조정할 수 있도록 해준다. RENA chip은 표준 CMOS 인터페이스를 가진 직렬 shift register로 구성되었는데 간섭을 줄이기 위하여 많은 부분의 디지털 입출력을 저전압 differential signal로 사용하며, 아날로그 출력과 디지털 어드레스 출력 그리고 여러 제어신호 공용하는 버스에 의해 16개까지의 chip을 데이지 체인(daisy-chain)으로 연결할 수 있다. 이러한 구성으로 연결한 chip들은 하나의 ASIC처럼 동작하게 되며 모두 512개의 채널까지 확장할 수 있다.

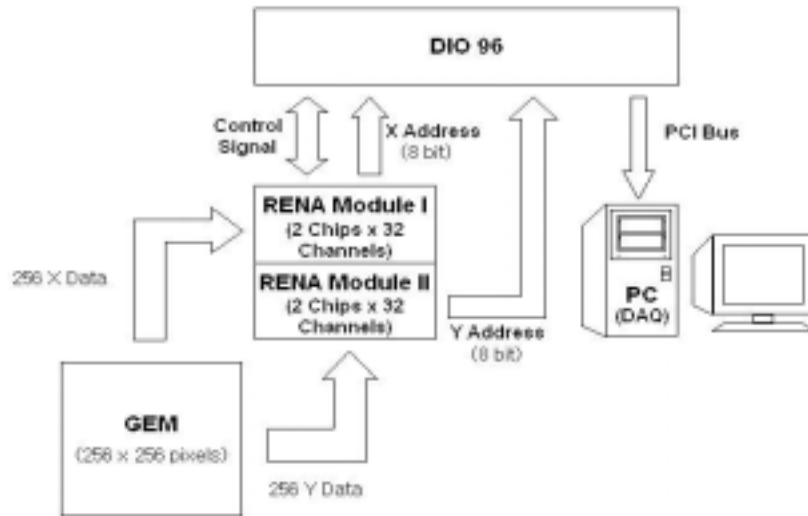


그림 3-2-31. 256×256 Channel 신호처리 Block Diagram

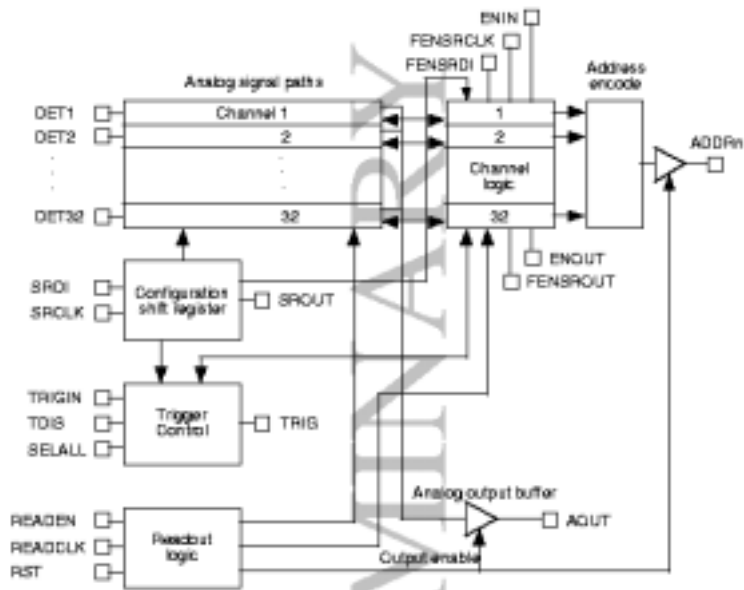


Figure 1. Block diagram of the RENA chip

그림 3-2-32. RENA 칩의 Block Diagram

그림 3-2-33은 입력된 아날로그 신호의 처리 경로를 블록 다이어그램으로 나타내고 있다. RENA chip은 하나의 출력으로 선택될(multiplexed) 수 있는 32개의 병렬 신호채널로 구성되어 있다. 신호처리의 첫 번째 단계는

AMP1로서 switched reset integrator이다. AMP1에 캐피시터로 연결되어 있는 calibration 입력은 아날로그 채널에 대해 외부 신호원을 사용하여 간단한 시험을 할 수 있도록 해준다. 두 번째 단계는 극성증폭기 (Polarity Amplifier)인데 첫 번째 단계에서 넘어 온 신호를 증폭하고 양(+)이나 부(-) 이득을 선택한다. 극성증폭기 다음의 정형기(shaper)는 프로그램가능 대역폭을 갖는 1차 transconductance-C bandpass filter 이다. 이 대역폭들은 configuration shift register 내의 3비트를 통하여 선택된다.

여과된 신호는 다음 단계에서 펄스 피크가 검출된다. 피크검출기는 일반적인 동작이나 진단 또는 시험목적을 위한 전압폴로워로서 구성된다. 피크가 검출된 신호를 독출(readout)하는 동안에는 피크검출기의 앞 단에 있는 스위치에 의해 입력으로부터 격리되는데 이 스위치는 독출가능신호(READEN)에 의해 제어된다. 2 개의 비교기는 피크검출기의 출력전압에 대한 크기를 감지하는데 임계값비교기(threshold comparator)는 채널 논리회로에 사용되는 trigger 신호를 생성한다. 예를 들어 고준위 비교기는 고에너지 펄스 발생을 감지하는데 사용된다. 각 비교기로부터 나오는 채널 출력은 TRIG와 OL단에 각각 ORed 되어 있다.

이 두 개의 비교기에 대한 문턱치는 THS와 THO 단자를 통하여 제공되는 외부 전압준위에 의해 제어된다. 32개의 채널로부터 입력된 피크검출 신호는 아날로그 버스에서 선택된 1채널의 신호를 출력 증폭기의 입력으로 사용하며 여기에 출력단 AOUT이 연결되어 있다. 이 출력 증폭기는 RENA chip이 access되지 않을 때에는 출력 임피던스가 무한대인 tri-state 상태로 있게 되며 따라서 여러개의 daisy-chain으로 연결된 chip들이 아날로그 버스를 공유할 수 있도록 하여 준다.

또한, Force Enable Mode에서는 테스트를 위하여 어떤 한 채널을 AOUT에 연속적으로 연결할 수 있다. 32채널이외에 2개의 격리된 아날로그 채널이 있는데 위의 아날로그 채널단 양끝에 각각 있으며 channel 0 와 channel 33으로 불린다. Channel 33은 펄스가 발생하는 동안 관련 잡음을 측정하기 위하여 사용된다. 이를 위하여 아날로그 출력버퍼가 출력단 TOUT에 연결되어 있으며 신호 출력이 enable 될 때 항상 enable된다. 또한 이 채널의 피크검출기 앞에 있는 격리 스위치는 입력단 S33을 통하여 독립적으로

제어된다.

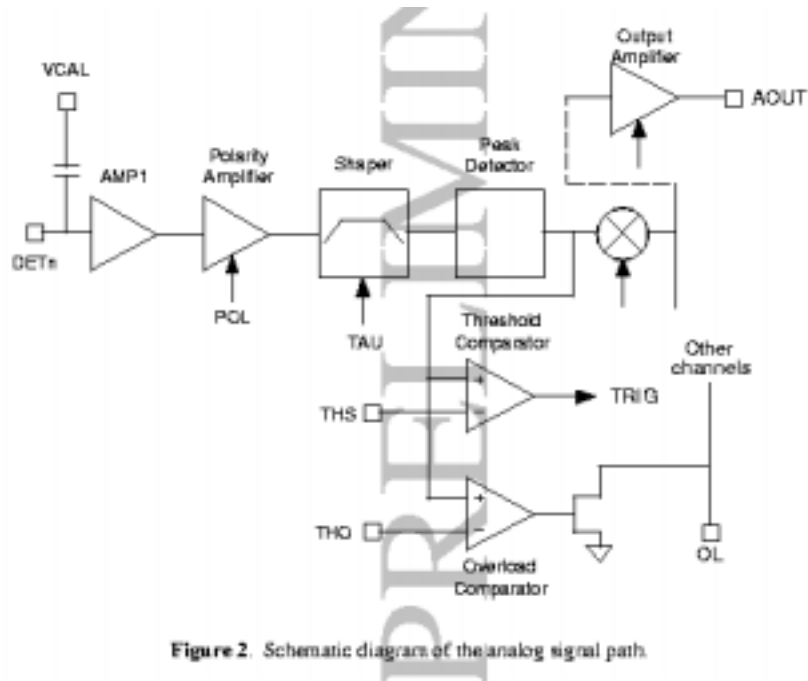


Figure 2. Schematic diagrams of the analog signal path.

그림 3-2-33. Analog 신호의 처리 경로 Block Diagram

나. 신호 획득로직 설계 및 계수기 제작

Readout 모드에서는 트리거에 대한 응답으로 READEN이 활성화되는데 선택된 트리거에 따라 Readout 순서대로 다음채널의 아날로그신호와 주소가 해당출력에 나타나게 된다. Readout을 위한 순서는 토큰 패싱(Token Passing) 구조를 사용한다. 토큰패싱 프로토콜을 데이터체인으로 연결하기 위하여 ENOUT을 다음 칩의 ENIN 입력으로 연결하여야 한다. 첫 번째 칩에서는 ENIN이 high-level logic에 연결되어야 한다.

선정된 RENA chip의 사양

- 32 신호 채널+2 시험채널
- 사용자 선택가능 입력극성
- 4개의 사용자 선택가능 트리거 모드
- 16개의 칩까지 데이터체인으로 연결하여 하나의 칩처럼 동작
- Readout 데이터 : 채널주소, overload bit, 외부 ADC변환을 위한 pulse height

- Readout 시간 : 800 ns per channel.
- 소비 전력 : \gg 6.5 mW per channel.
- 2 아날로그 출력 모드
 - Peak detect.
 - Follower mode (시험용).
- 아날로그 시험모드(Force Enable): Connect any one channel to the analog output.
- 8개의 사용자 선택가능 펄스정형시간 : from 0.4 to 6s.
- 입력범위 : 1 ke to 50 ke for 2 V full-scale output swing.
- 저잡음 : \gg 150 erms.
- 크기 : 4.9 ´ 6.9 mm².

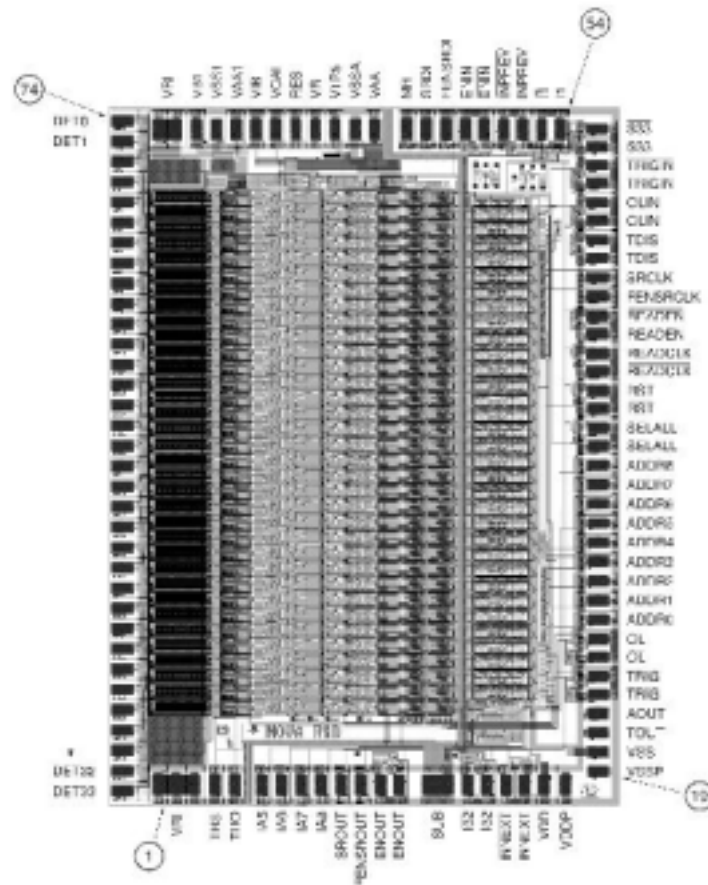


Figure 3. Pad layout of the RENA die. The pitch of the detector input pads is 200 μ m.

그림 3-2-34. RENA 칩의 Pad Layout

다. 판별기-DAC 연결 및 I/O 컨트롤러 개발

RENA 모듈에서 출력된 채널별 데이터를 메모리에 전송시키기 위해서 National Instruments 사의 PCI-DIO96 board를 사용하였다. 이 보드는 GEM검출기로부터 신호를 받기 위한 테스트용으로서 검출신호를 정상적으로 받기 위한 각종 조건들을 시험하여 이후에 사용할 고속 데이터입출력 보드의 파라미터 선정에 활용하고 있다. 그림 3-2-36과 그림 3-2-37은 data acquisition 회로를 나타내고 있다.

Specification: Digital I/O

- 채널수 : 96

- 호환성 : 5 V/TTL
- 전송률 : ISA 50 kbytes/s(Max) 1-10 kbytes/s(Typ)
- Handshaking : 2-wire
- 데이터 전송 : Interrupts, programmed I/O
- Bus interface (PCI) : Slave

핀 배열(Pin Assignments)

AP07	1	81	CP07
AP07	2	82	CP07
AP06	3	83	CP06
AP06	4	84	CP06
AP05	5	85	CP05
AP05	6	86	CP05
AP04	7	87	CP04
AP04	8	88	CP04
AP03	9	89	CP03
AP03	10	90	CP03
AP02	11	91	CP02
AP02	12	92	CP02
AP01	13	93	CP01
AP01	14	94	CP01
AP00	15	95	CP00
AP00	16	96	CP00
AP07	17	97	CP07
AP07	18	98	CP07
AP06	19	99	CP06
AP06	20	100	CP06
AP05	21	71	CP05
AP05	22	72	CP05
AP04	23	73	CP04
AP04	24	74	CP04
AP03	25	75	CP03
AP03	26	76	CP03
AP02	27	77	CP02
AP02	28	78	CP02
AP01	29	79	CP01
AP01	30	80	CP01
AP00	31	81	CP00
AP00	32	82	CP00
AP07	33	83	CP07
AP07	34	84	CP07
AP06	35	85	CP06
AP06	36	86	CP06
AP05	37	87	CP05
AP05	38	88	CP05
AP04	39	89	CP04
AP04	40	90	CP04
AP03	41	91	CP03
AP03	42	92	CP03
AP02	43	93	CP02
AP02	44	94	CP02
AP01	45	95	CP01
AP01	46	96	CP01
AP00	47	97	CP00
AP00	48	98	CP00
+5V	49	99	+5V
GND	50	100	GND

그림 3-2-35. PCI-DIO-96 Connector Pin Assignments

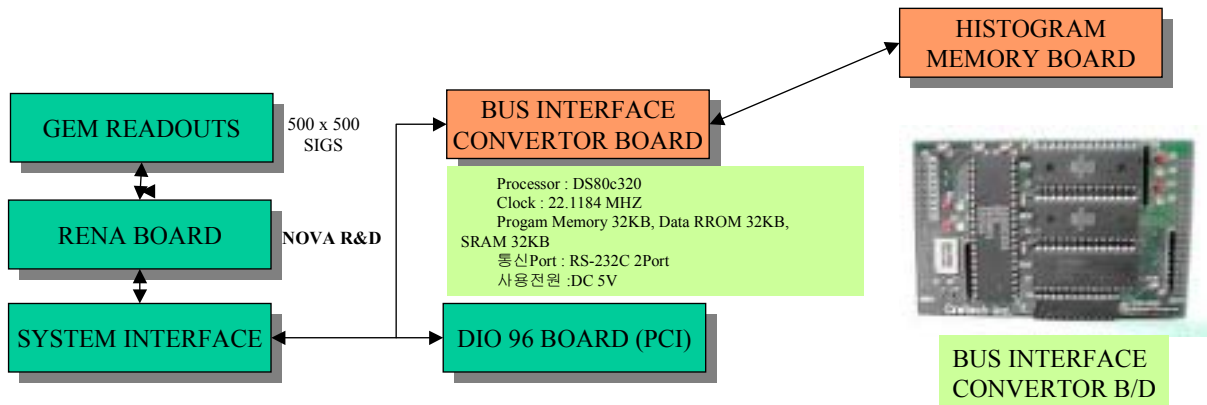


그림 3-2-36. Data Acquisition Interface 회로 구성도

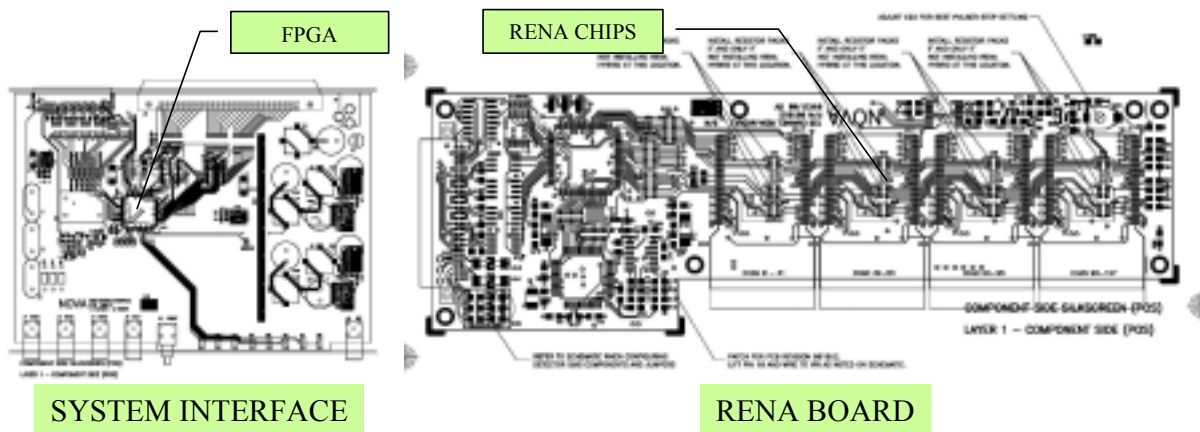


그림 3-2-37. Data Acquisition Interface 회로

6. GEM검출기 동작 특성분석

GEM 검출기의 설계에서 가장 중요한 요인은 GEM 상·하 전극의 전위차에 의한 미소구멍 내부의 전기장 분포 및 강도이다. 따라서 GEM 인가전압, 미소구멍의 기하학적 구조, 유도전극 및 수집전극의 전위차에 따른 동작특성을 시뮬레이션 하기 위하여 전장 시뮬레이터 MAXWELL과 전기장가시화 프로그램 SHOWFILED를 사용하여 GEM 검출기의 전기장 분포 및 검출효율을 계산하였다. 본 연구에서 사용된 GEM 검출기는 $50\mu\text{m}$ 두께의 Kapton 절연체 양면에 $1\mu\text{m}$ 두께의 구리박막이 코팅되어 있고 습식에칭에 의해 매트릭스 배열로 미소구멍이 밀집된 구조로 되어 있다. GEM 검출기의 양쪽 전극에 적절한 전압을 인가하면 미소구멍 내부에 강한 쌍극전장이 형성되고, 유도영역

내에서 입사 엑스선에 의해 이온화된 1차 전자는 이 곳을 통과하면서 전자 사태에 의해 증폭되어 최종적으로 수집전극에 도달한다.

이 때 GEM 검출기의 기체이득은 미소구멍의 직경과 절연체의 두께에 의존하는데, 직경이 작을수록 미소구멍 내의 전기장의 크기가 세지고, 절연체의 두께를 증가시킬수록 미소구멍 내에서의 전자사태가 전개되는 경로가 길어져, 보다 큰 기체이득을 얻을 수 있다. 기체검출기에서 전자사태를 유발할 수 있는 전장의 세기는 10^6 V/m 이상이므로 MAXWELL 코드 계산 결과에 따르면 현실적인 절연체의 두께는 50-100 μm 이며, 또한 미소구멍의 직경이 40 μm 이하에서는 전하의 축적현상에 의해 기체이득이 포화상태에 이르게 됨을 알 수 있다. 따라서 GEM 검출기가 높은 기체이득을 유지하면서 동시에 높은 위치분해능을 얻기 위하여 미소구멍의 직경을 60 μm , 절연체의 두께를 50 μm , 미소구멍 간격을 100 μm 로 설계하였다.

그림 3-2-38은 본 연구에서 설계된 GEM 검출기의 기하학적 크기 및 형태를 도식적으로 나타낸 것이다.

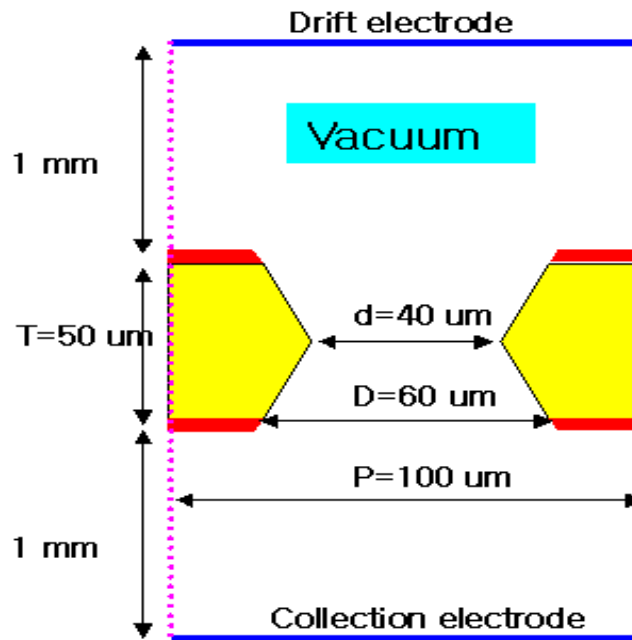


그림 3-2-38. 설계된 GEM 검출기의 기하학적 크기 및 형태

GEM 검출기의 기체이득을 향상시키기 위해서, 절연성 foil 양단에 걸여 주는 GEM 전압을 높여 주어야 하는데 이 때 절연파괴(breakdown)을 유발시키는 최대 국소전장은 가능한 한 줄이도록 설계되어야 한다. 본 시뮬레이션 계산결과에 의하면 GEM 검출기에서 최대 국소전장은 미소구멍 표면 근처에서 형성되며, 또한 미소구멍의 기하학적 요소에 좌우됨을 알 수 있었다. 그림 3-2-39는 설계된 GEM 검출기에 대해 미소구멍의 중심선을 따라서 두 종류의 유도전장 값 3과 15 kV/cm에 대한 전기장의 세기를 계산한 것이다. 이때 사용된 시뮬레이션 조건은 GEM 전압 500 V, 수집전장의 세기 5 kV/cm이다. 그림 3-2-39에서 보는 바와 같이, 미소구멍의 중심 전기장의 세기는 전자증폭이 가능한 값보다 훨씬 높은 5×10^6 V/cm 이상이였으며, 특히 인가한 유도전압에 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.

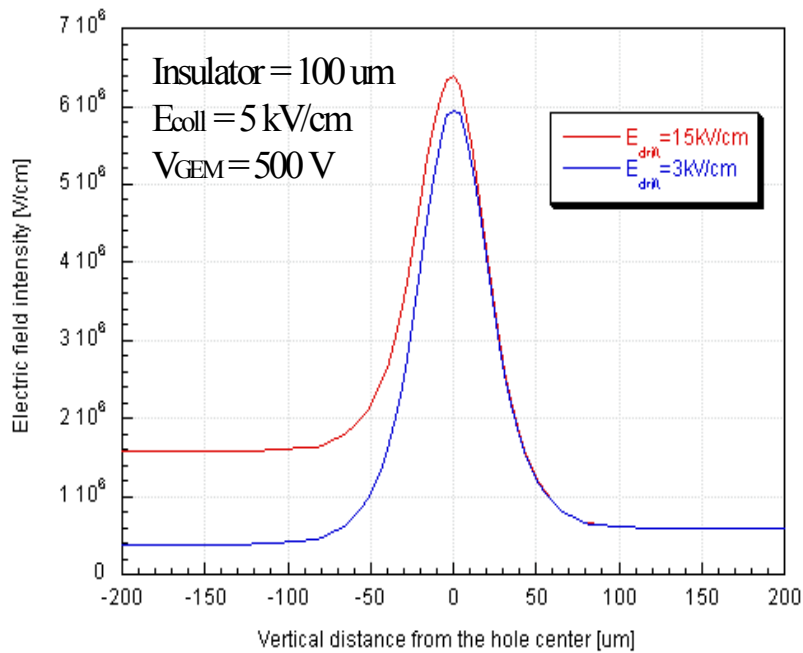
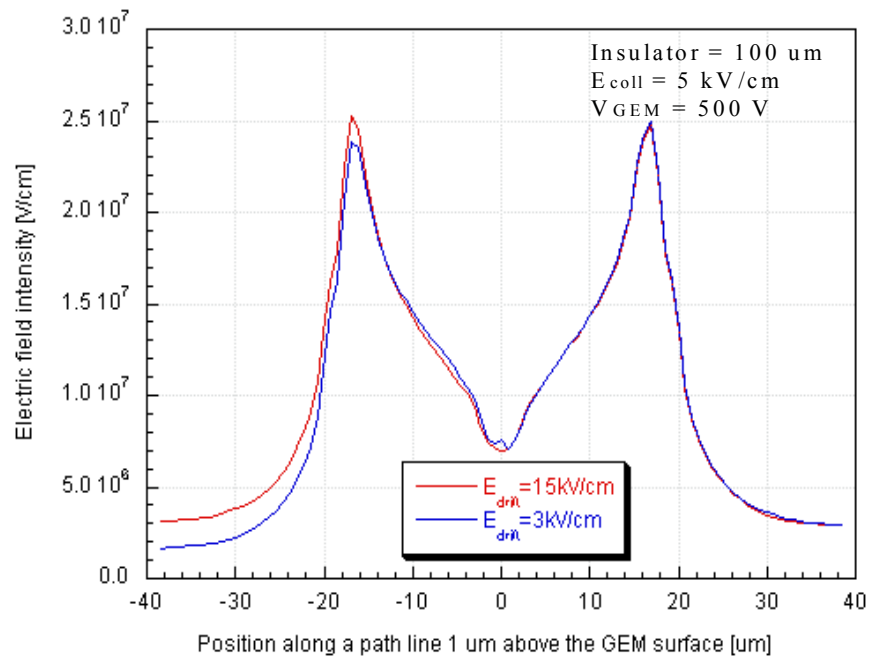


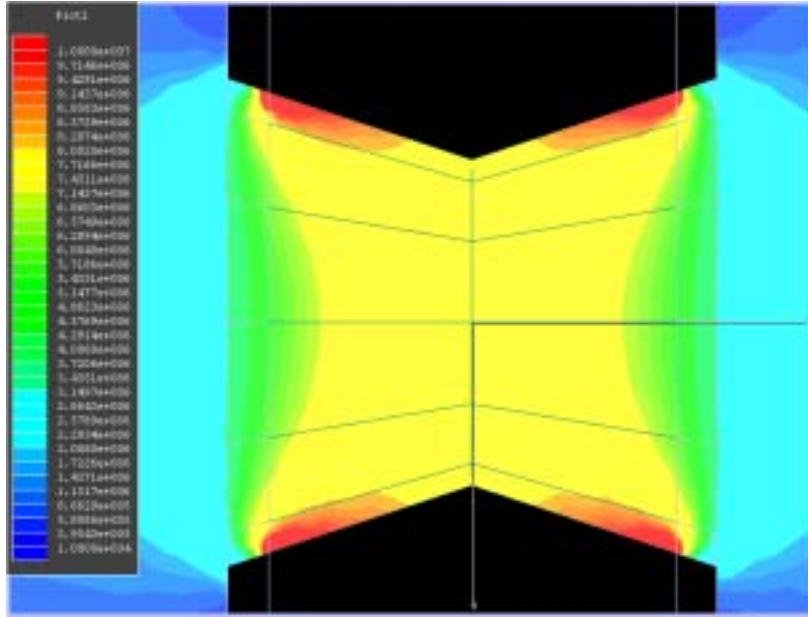
그림 3-2-39. 설계된 GEM 검출기의 미소구멍 내에서의 전기장의 세기

그림 3-2-48은 설계된 GEM 검출기의 미소구멍 표면의 따라 계산된 전기장의 세기를 보여준다. 절연파괴를 야기시키는 최대 국소전장은 그림 3-2-40(b)에서 알 수 있듯이 미소구멍 입구 바로 아래 전극 끝에서 발생되었으며 그 크기는 2×10^7 V/cm 이상이였다. 절연파괴를 막기 위해서는 가능한

한 최대 국소전장의 크기를 줄이도록 설계해야 하는데, 그 방법으로서 GEM 검출기 표면 위에 약간의 전도성을 띤 물질로 코팅하는 기술이 제안되고 있다. 또 하나의 문제점은 GEM 검출기의 미소구멍에서 생성된 증폭전자의 일부가 GEM 하위전극에 포획되어 수집전극에 도달하지 못하여 신호형성에 기여를 못하게 되는 것이다. 그림 3-2-41은 GEM 전압이 500 V, 수집 전장의 세기가 5 kV/cm일 때 크기가 다른 두 유도전장세기 (a)3 kV/cm와 (b)15 kV/cm에서의 미소구멍 근처의 전기장 분포를 보여주고 있다. 미소구멍 근처에서 전기장 분포는 크게 압축유도전장과 GEM 내부전장으로 구성되며, 유도전장세기가 강할수록 미소구멍 내부의 압축유도전장이 세어져 기체이득이 향상되나, 그 대신 유도전장이 GEM 아래 전극에 포획되는 빈도가 늘어남으로써 신호손실을 유발시킴을 알 수 있었다. 같은 실험조건에서 인가 유도전장의 세기를 변화해 가면서(1,5,7,10,15,20 kV/cm) 유도전기장의 투과와 포획 빈도를 계산하여 신호손실율을 계산하였다(그림 3-2-42, 3-2-43).

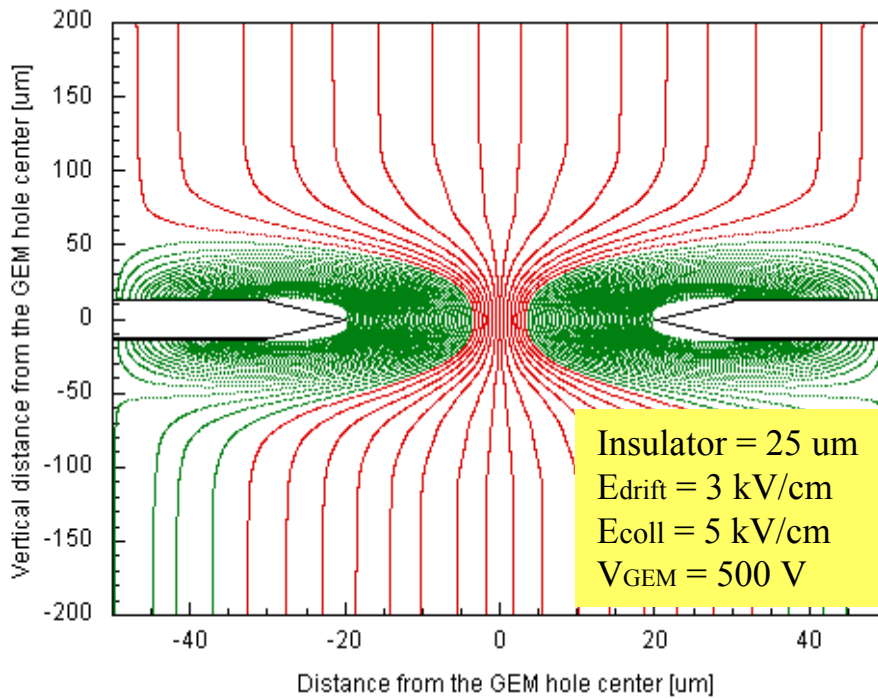


(a)

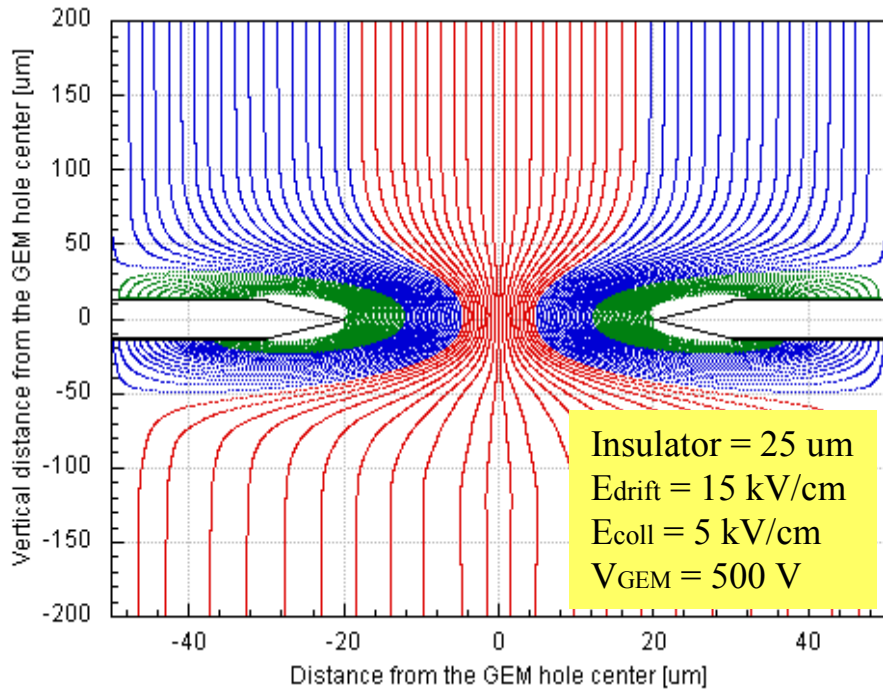


(b)

그림 3-2-40. 설계된 GEM 검출기의 미소구멍의 표면의 따라 계산된 전기장의 세기

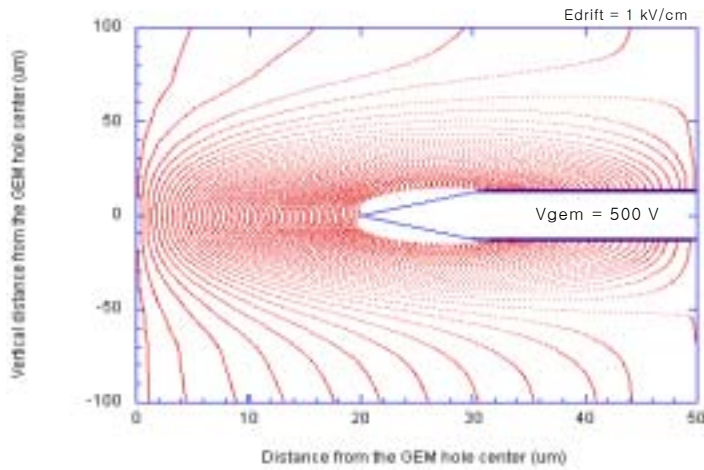


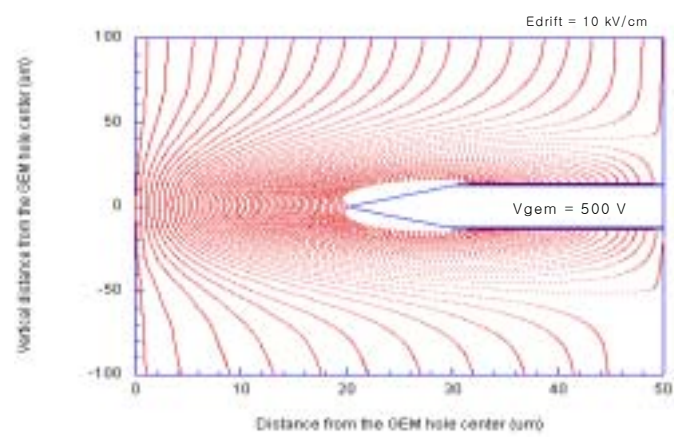
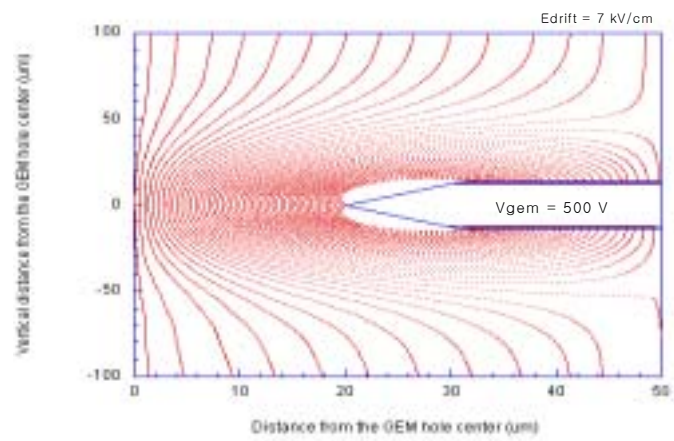
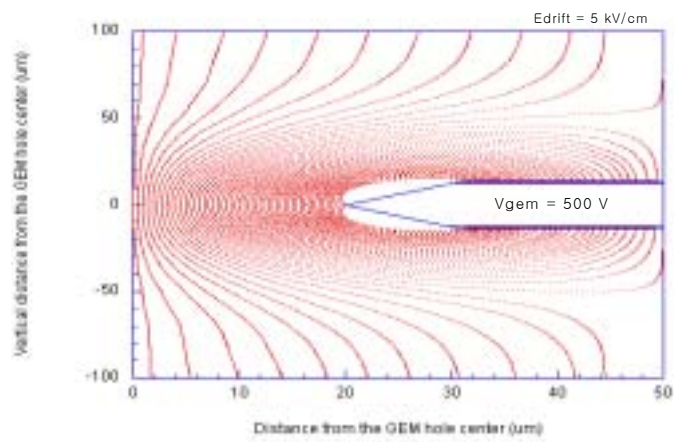
(a)



(b)

그림 3-2-41. 유도전장 세기 (a)3 kV/cm와 (b)15 kV/cm에서의 정전기장 분포





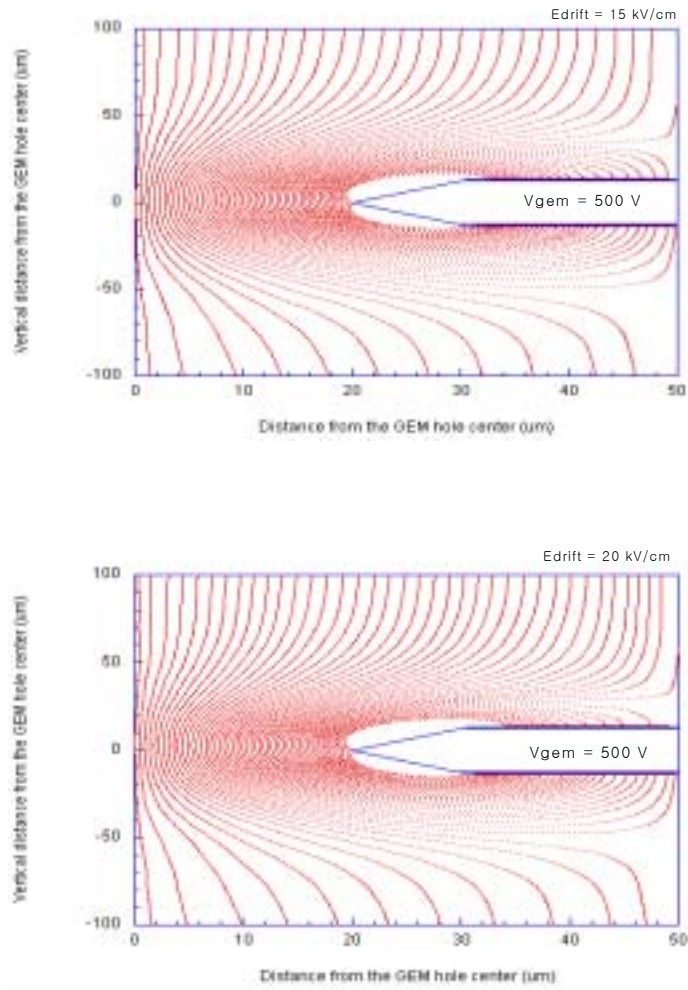


그림 3-2-42. 인가 유도전장의 세기(1,5,7,10,15,20 kV/cm)의 변화에 따른 전기장 분포

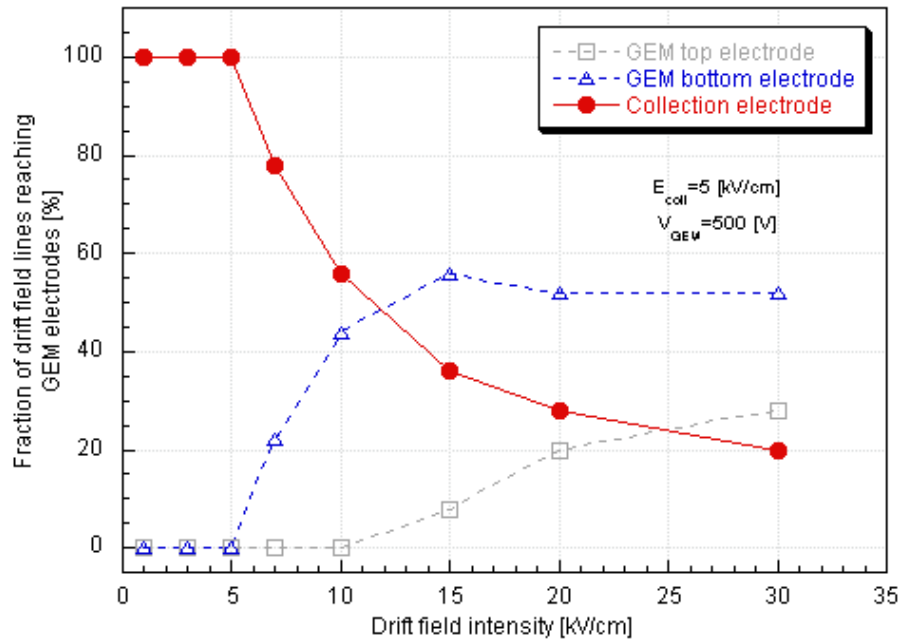


그림 3-2-43. 유도전장의 세기에 따른 GEM 검출기의 각 전극에 도달하는 유도전장의 비율

그림 3-2-43은 유도전극의 전압을 변화시켰을 때 미소구멍 내에서의 유도전기장의 투과와 포획 빈도를 나타낸 것이다. 그림 3-2-43에서 알 수 있듯이 신호손실율은 유도전장과 수집전장의 상대적 크기에 매우 민감하였으며, 신호손실 없이 최대기체이득을 획득하려면 유도전장의 세기가 수집전장의 세기보다 작아야 함을 알 수 있었다. 그러나 절연체의 두께 및 GEM 전압의 변화에 따른 신호손실율의 변화는 거의 없었다.

제 3 절 GEM검출기 제작

1. 검출기 Chamber 설계 및 제작

입사방사선을 효율적으로 검출하기 위한 입사창(window)으로 100 μ m 두께의 mylar를 이용하였는데 이 재료는 X-ray에 대해 흡수가 적고 내부압력에 잘 견디며 특히 수분 흡수가 거의 없어 기체형 검출기에 널리 사용된다. 검출기의 방사선에 의한 전하신호를 외부 앰프로 전송할 feed through는 torr seal로서 챔버와 접착시켰다.

챔버는 진공에 견딜 수 있고 가스에 반응이 없는 스테인레스(SUS304)를 사용하며 챔버의 씰링은 고온에 강하고 out-gassing이 적은 Viton o-ring을 사용하였다. 그림 3-3-1은 설계가 완료되어 제작 중인 chamber이며 그림 3-3-2 및 그림 3-3-3은 chamber의 완성도이다. Chamber 제작에 필요한 모든 부품은 외주하여 사용하였으며 조립할 때 필요한 clean room 환경을 위하여 clean bench를 구입 설치하였다.

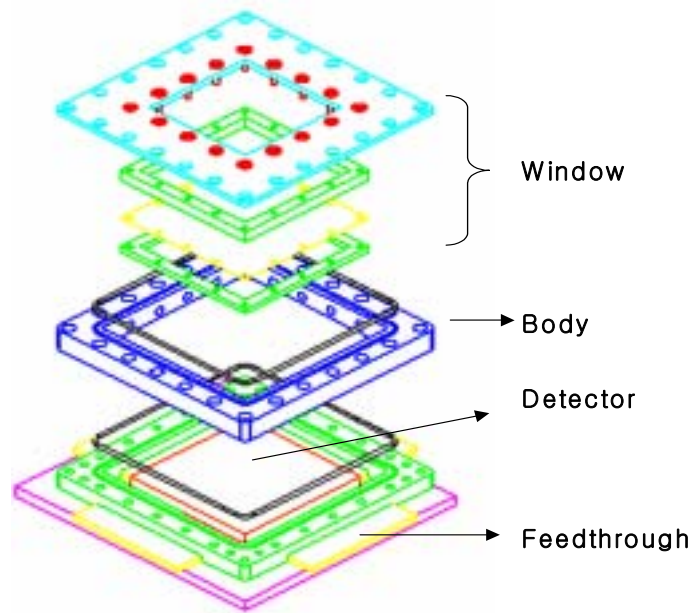


그림 3-3-1. GEM 검출기용 Chamber

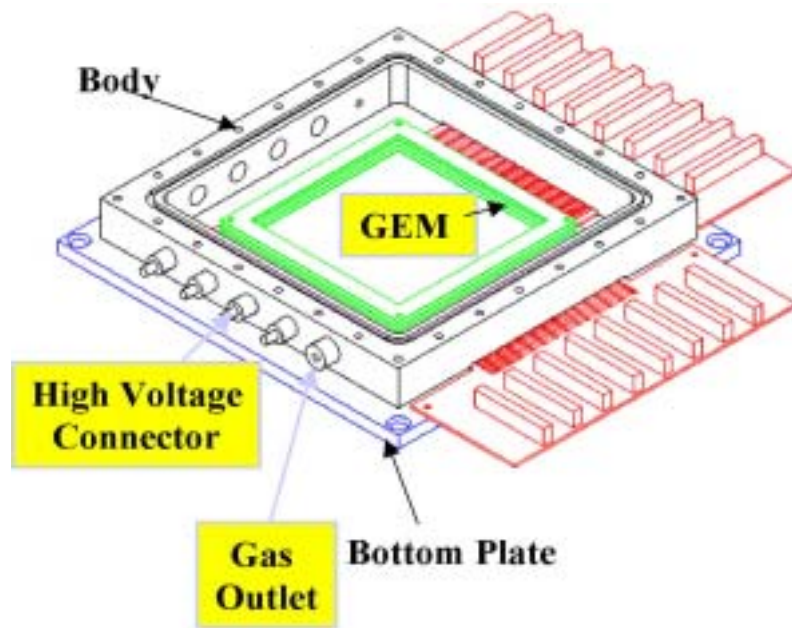


그림 3-3-2. GEM 검출기 챔버 설계도

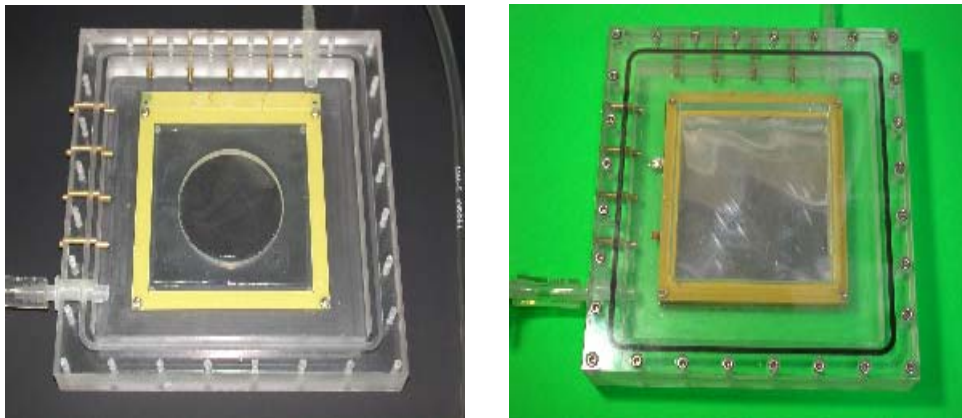


그림 3-3-3. Chamber 완성도 - Acryl 사용

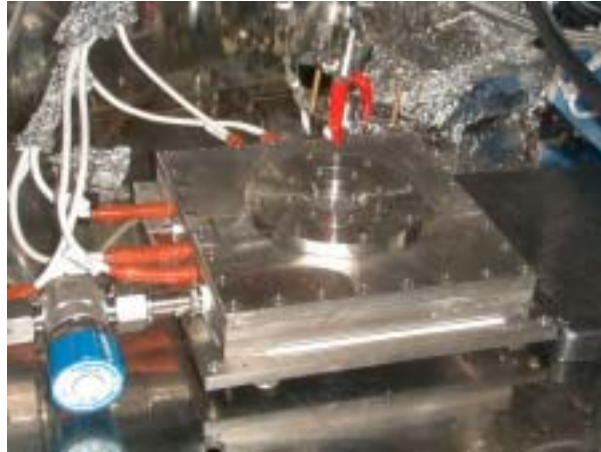


그림 3-3-4. Chamber 완성도 - Stainless Steel 사용

2. 광전자 변환체(CsI 섬광체) 및 기체증폭기 결합

입사방사선에 의해 생성된 전자는 표류전극에서 출발한 전기장을 따라 수집전극으로 향하고 GEM을 통과하며 전하증폭을 하게 된다. GEM과 수집전극사이, GEM간의 간격, GEM과 광전자 변환체 사이 간격을 모두 1mm로 하여 GEM과 광전자변환체를 프레임에 고정시킨 후 그 프레임을 적층하고 각 전극을 연결하였다.

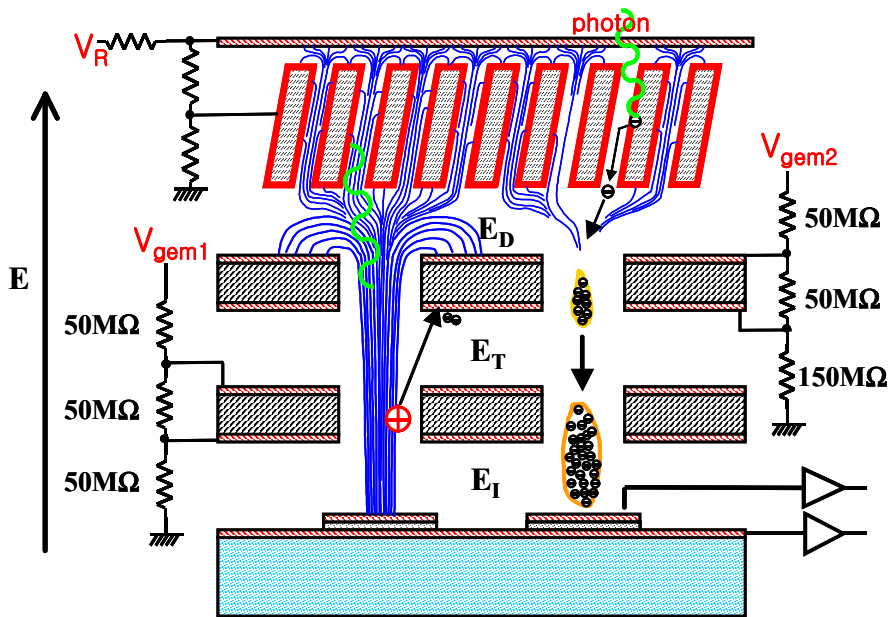


그림 3-3-5. GEM 검출기 - 전자 생성 및 증폭 개괄도

3. 수집전극 제작 및 Gas Line설치

본 연구에서 방사선검출기에 사용한 Gas Electron Multiplier(GEM)는 $50\mu\text{m}$ 정도 두께의 Kapton(polyimide) 절연체 양면에 $5\mu\text{m}$ 두께의 구리박막이 코팅되어 있고 습식에칭에 의해 매트릭스 배열로 구멍이 밀집된 구조로 되어있다.

GEM의 양쪽 전극에 적절한 전압을 인가하면 구멍 내부에 강한 쌍극자 마당(Dipole Field)이 형성되며, 표류영역(Drift Region)내에서 입사 방사선에 의해 이온화된 전자는 이 곳을 통과하면서 전자사태에 의해 증폭되어 수집전극(Collection Electrode)에서 수집된다. 이 때, GEM의 증폭도는 홀의 직경과 절연체의 두께에 의존하는데, 직경이 작을수록 홀 내의 전장이 세어지고, 절연체의 두께를 증가시킬수록 구멍 내에서의 전자사태가 전개되는 경로가 길어져 보다 큰 전하이득을 얻을 수 있다. 기체검출기에서 전자사태를 유발할 수 있는 전장의 세기는 106V/m 이상이므로 MAXWELL 코드 계산 결과에 따르면 현실적인 절연체의 두께는 $40\text{--}200\mu\text{m}$ 이며, 또한 홀의 직경이 $40\mu\text{m}$ 이하에서는 전하의 축적 현상에 의해 증폭도가 포화상태에 이르게 된다. 따라서 본 검출기가 높은 기체 증폭도를 지니면서 동시에 높은 위치분해능을 얻기 위하여 홀의 직경을 $60\mu\text{m}$, 절연체의 두께를 $50\mu\text{m}$, 홀간의 간격을 $100\mu\text{m}$ 로 설계하였다. 다음 표 3-3-1과 그림 3-3-6, 3-3-7은 본 연구에서 제작할 GEM의 기하학적 크기 및 형태를 도식

적으로 나타낸 것이다.

표 3-3-1. GEM의 기하학적 크기

P (μm)	D (μm)	d (μm)	T (μm)	t (μm)
100	60	40	50	5

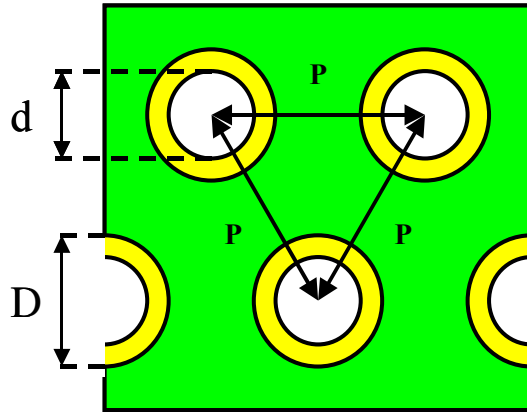


그림 3-3-6. GEM의 Hole 배열

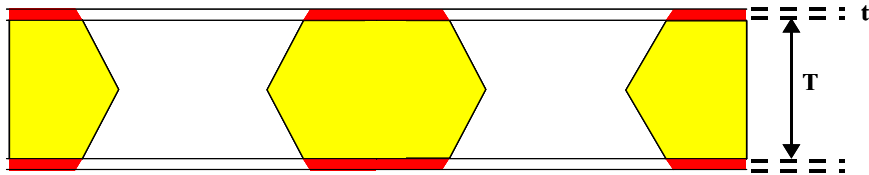


그림 3-3-7. GEM의 단면도

수직으로 교차된 두 층의 수집전극은 전하분할을 균등히 하기 위해 그 폭을 각각 $85\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ 으로 하였으며 두 층 사이는 $50\mu\text{m}$ 두께의 kapton으로 제작하였다. GEM과 수집 전극은 CERN에 의뢰하여 제작하였으며 기본적인 시험을 거친 후 검출기에 조립하여 사용중에 있다.

그림 3-3-8은 Readout plate의 개발도이며 그림 3-3-9는 GEM 검출기 chamber와 readout electronics 연결을 위하여 제작한 회로이다.

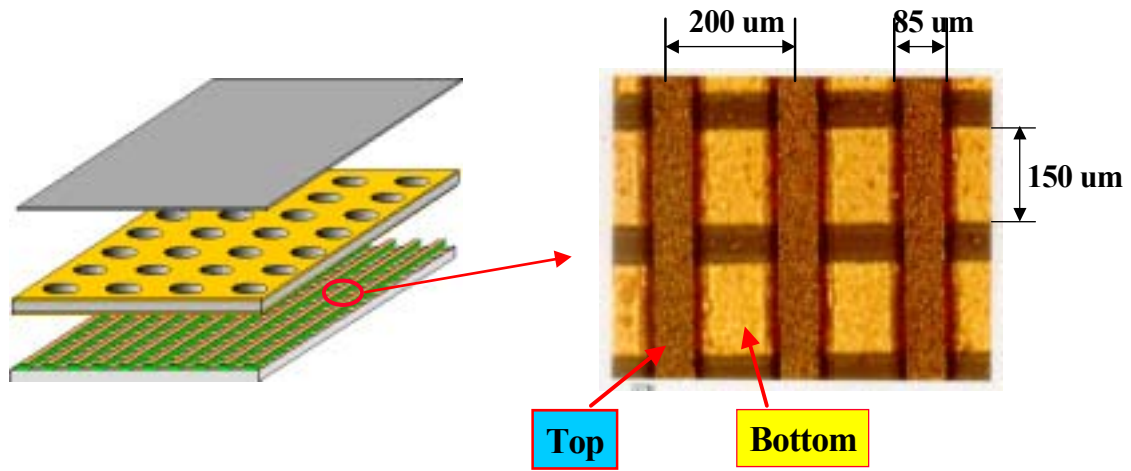


그림 3-3-8. Readout plate 개괄도

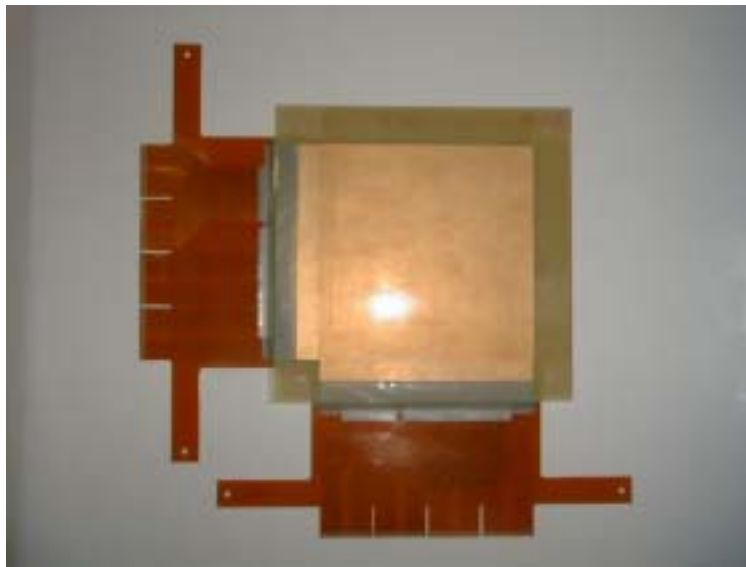


그림 3-3-9. Readout Plate와 검출기 연결 회로

검출기체의 종류와 순도는 전하증폭도, 노화현상, 에너지분해능 등에 영향을 주게되므로 챔버로 기체가 유입되기 전에 oxygen absorbing purifier와 particle filter를 통과시켜 산소, 습기, 불순물 등을 제거하도록 설계하였다. 검출기체와 quenching 기체의 혼합비는 Mass Flow Controller(MFC)를 통해 제어되도록 한 후 mixer에서 정확한 혼합기체를 생성하게 된다.

사용 가스 및 관련 부품 구매와 가스라인을 설치하기 위하여 그림

3-3-10과 같은 설계를 거쳐 그림 3-3-11 및 3-3-12와 같이 가스 혼합 콘트롤러를 제작 설치하였다.

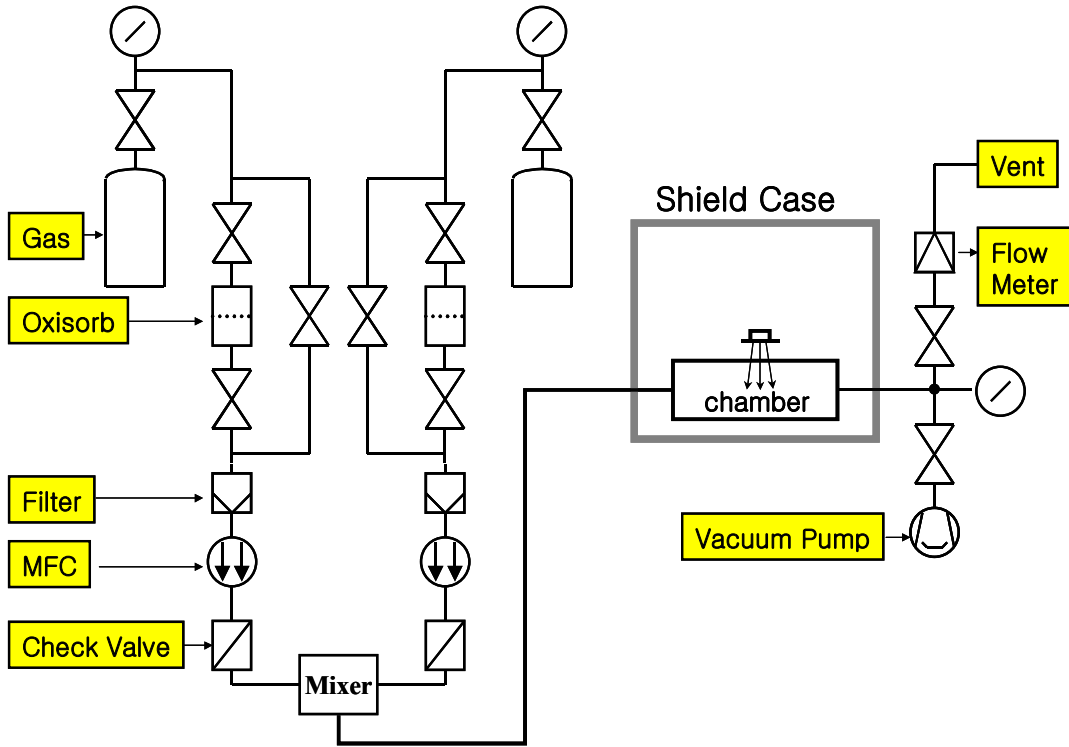


그림 3-3-10. 가스라인 설계도 (World Gas Tech사에 발주 제작)



그림 3-3-11. Test shielding box 및 진공펌프

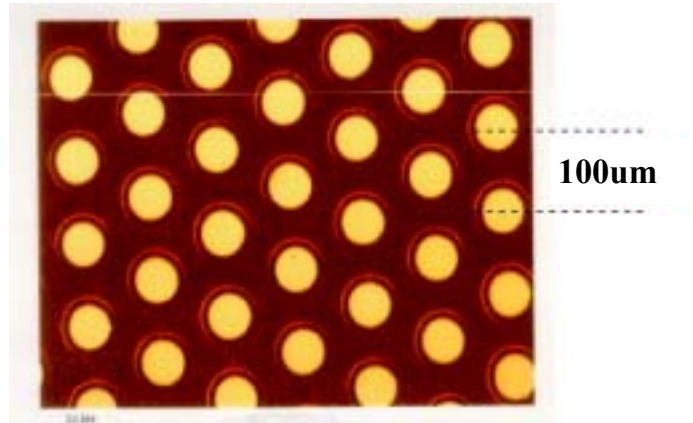


그림 3-3-12. Gas 혼합시스템

4. GEM 및 광전자변환체 제작

가. GEM의 제작(CERN 제작)

GEM의 전체 면적은 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 이며 금속면의 홀 직경이 $60\mu\text{m}$, 홀간 간격은 $100\mu\text{m}$, 절연체(kapton)의 두께는 $50\mu\text{m}$ 이다. 홀 제작공정에서 습식 에칭법을 사용하여 홀의 단면이 이중원뿔상을 하고 있는데, 이로 인해 전자사태 중의 전자들이 홀 내부의 경사진 절연층에 쌓여서 전자증폭도를 변화시키게 된다. 설계된 GEM은 CERN에 의뢰하여 제작을 완료하였으며(그림 3-3-13), 검출기에 조립되어 성능평가가 실시되었다.



Double conical GEM

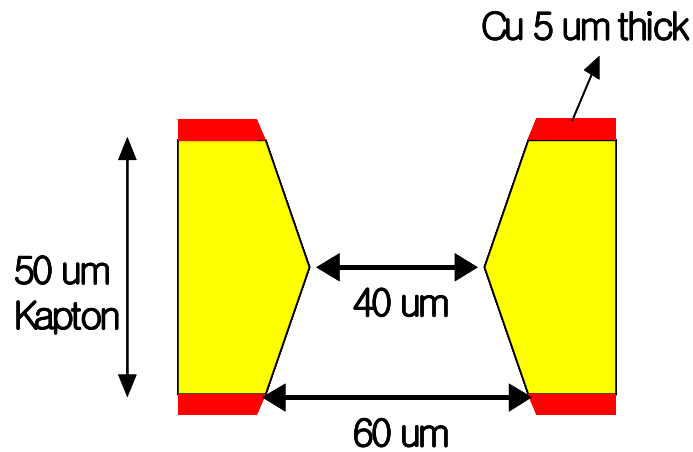


그림 3-3-13. CERN에서 제작된 GEM의 현미경 사진(위) 및 GEM hole의 형태(아래)

나. 광-전자 변환체 제작

100keV 이내의 입사 X-ray에 대하여 검출효율과 위치분해능을 동시에 만족시키기 위하여 고원자번호의 방사선흡수체(Au)를 밀집된 홀구조의 안벽에 코팅함으로써 표면에 수직으로 입사된 X-ray에 대해 효율적인 검출을 가능하게 하였다. 입사방사선에 의해 생성된 광전자는 이차전자방출을 유도하기 위하여 5 μm 두께의 CsI를 코팅하였다. 광전자변환체의 경우 자체 설계를 거쳐 Proxitronic 사로부터 구입하여 사용하였다. 광전자 변환체의 코팅은 TECH-ETCH, LUXEL, SURMET 등 insulator etching 및 코팅전문회사에

위탁할 예정이다.

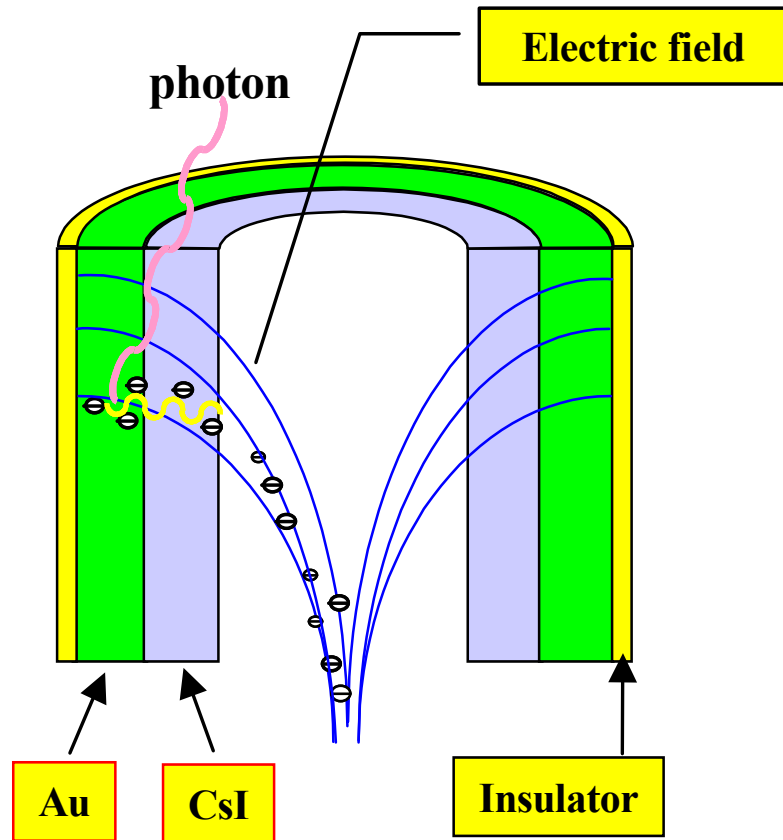


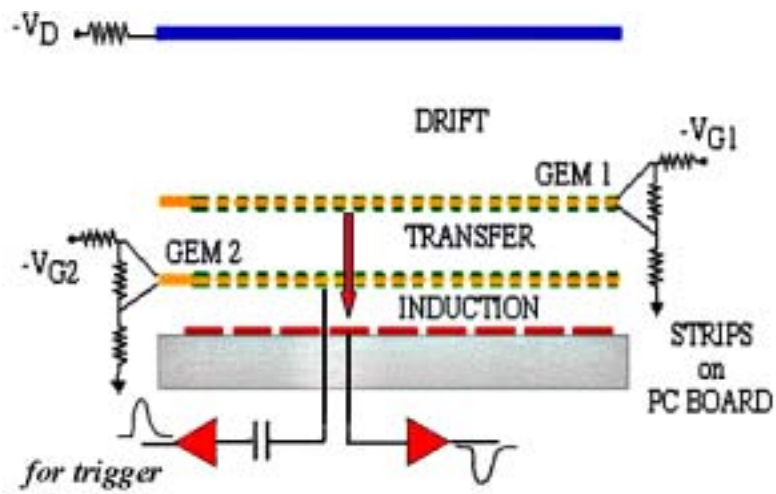
그림 3-3-14. 광-전자 변환체로 사용될 MCP hole의 단면

다. GEM 적층 및 고전압 회로 제작

기체증폭도를 증가시키기 위하여 2장의 GEM을 1mm의 간격으로 적층하였을 때 두 GEM의 상하부 전극에 인가될 고전압전원장치의 수를 줄이고, 검출 동작 중에 발생할 수 있는 방전으로부터 GEM을 안전하게 보호하기 위해서 전압분배표를 작성하고(표 3-3-2) 이에 따른 회로망을 구성하였다(그림 3-3-15).

표 3-3-1. GEM 적층 전압 분배표

H.V. p wsp	HV GEM 1 up	HV GEM 1 dw	GEM 1 voltage	HV GEM 2 up	HV GEM 2 dw	GEM 2 voltage
[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
1000	800	600	200	666	333	333
1100	880	660	220	733	366	366
1200	960	720	240	800	400	400
1300	1040	780	260	866	466	466
1400	1120	840	280	933	500	500
1500	1200	900	300	1000	533	533
1600	1280	960	320	1066	566	566
1700	1360	1020	340	1133	600	600



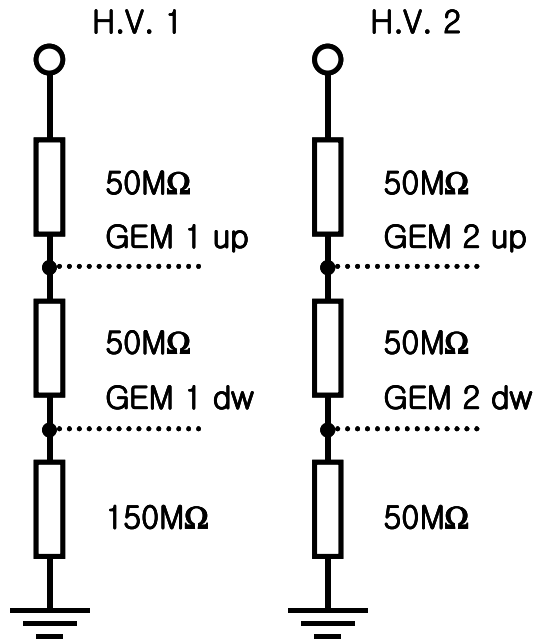


그림 3-3-15. GEM 적층 및 전압 배치도

5. 피 검사체 이송장치 제작

방사 원추선 형태로 퍼져나가는 X-ray 영상은 피사체와 초점거리, 피사체와 검출기간의 거리에 의해 실물보다 확대되어 나타난다. 본 과제에서 선정한 Hamamatsu사의 L7901-01 X-ray 발생장치의 초점거리는 9.5 mm이며 피검사체의 수직이동거리는 최대 1000mm로서 최대 확대비는 105:1까지 가능하다. X-ray의 beam angle은 39°로 검출기의 전체 검출영역을 포함하고, 샘플을 전후 좌우로 PC 정밀위치제어가 가능하도록 하여 특정검사영역을 기억하고 반복 복귀할 수 있게 설계하였다.

1차년도 과제수행에 필요한 X,Y,Z의 3축 이송장치에 대한 설계를 완료한 상태로 검출기를 이동시키기 위한 구조설계를 진행 중이다. 현재의 전자부품 검사용 이송장치들의 구조와 동작특성은 유사한 면이 많으나, 모터의 종류 및 트레이의 형상은 장비마다 차이가 있어 검사대상에 적합한 최적설계를 위해서 검사장비들에 대한 보다 광범위한 연구조사가 요구된다. 그림 3-3-16 과 3-3-17은 1차년도 시험장비로 설계한 피검사체 이송장치의 정면도, 측면

도 및 세부설계도를 나타내고 있다. 또한 그림 3-3-18은 이 설계에 따라 제작된 피검물 이송장치 사진이다.

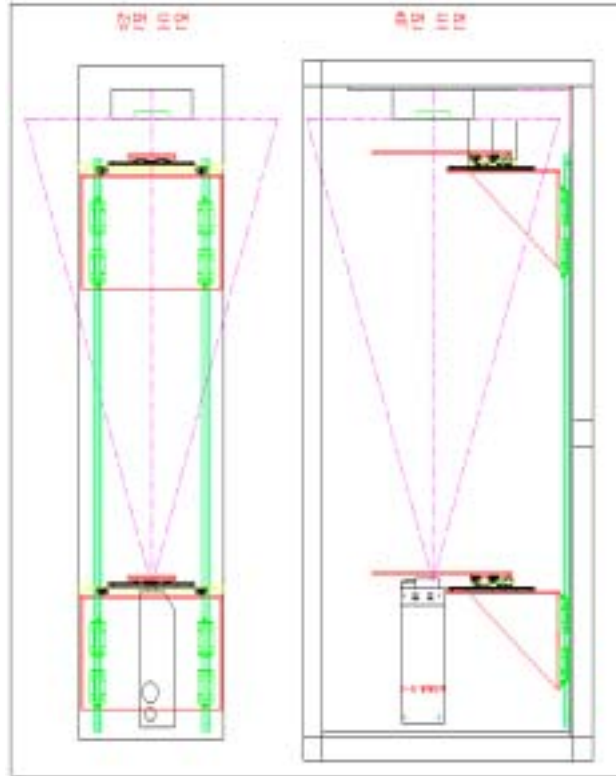


그림 3-3-16. 피검사체 이송장치 정면도 및 측면도

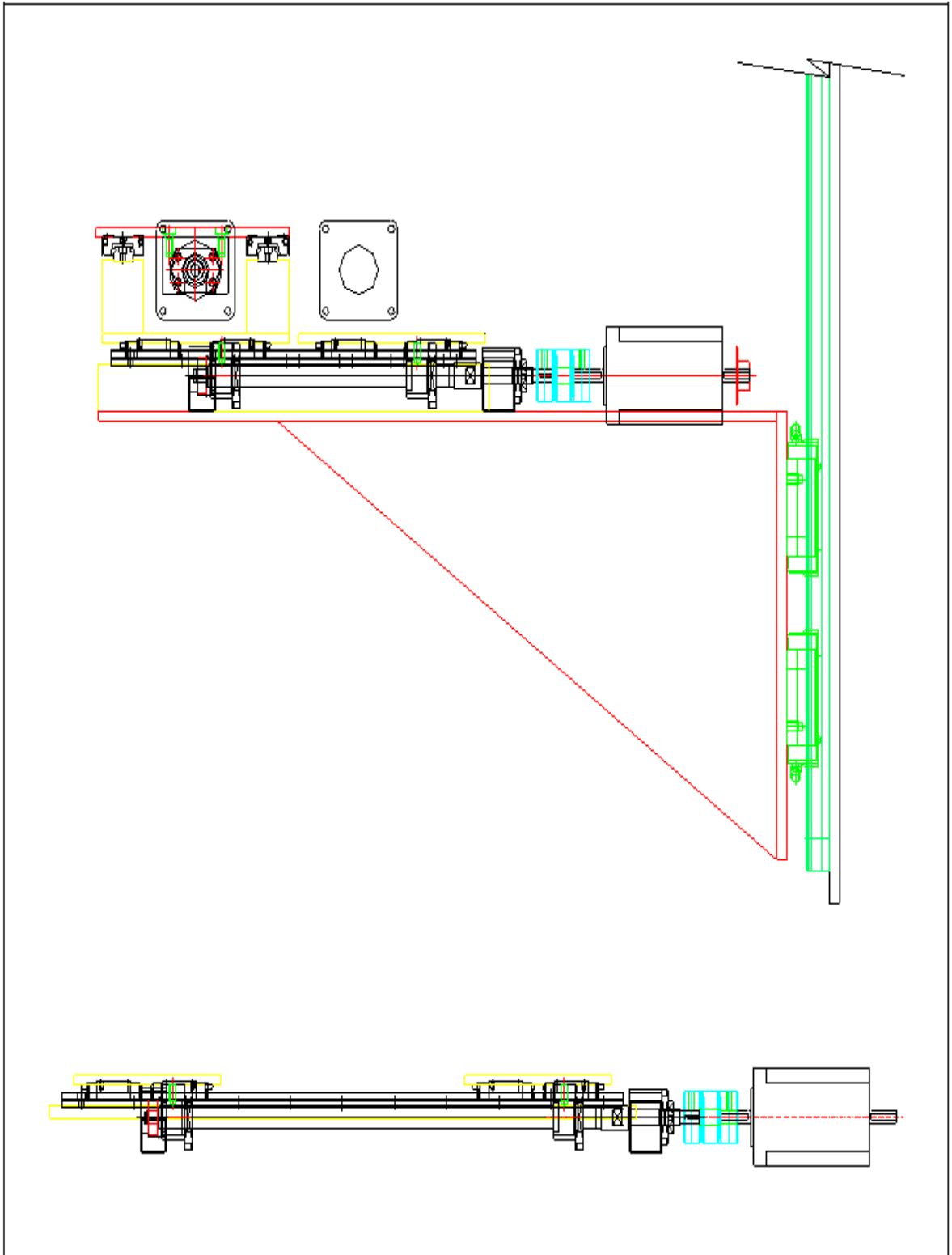


그림 3-3-17. 이송장치 세부 설계도

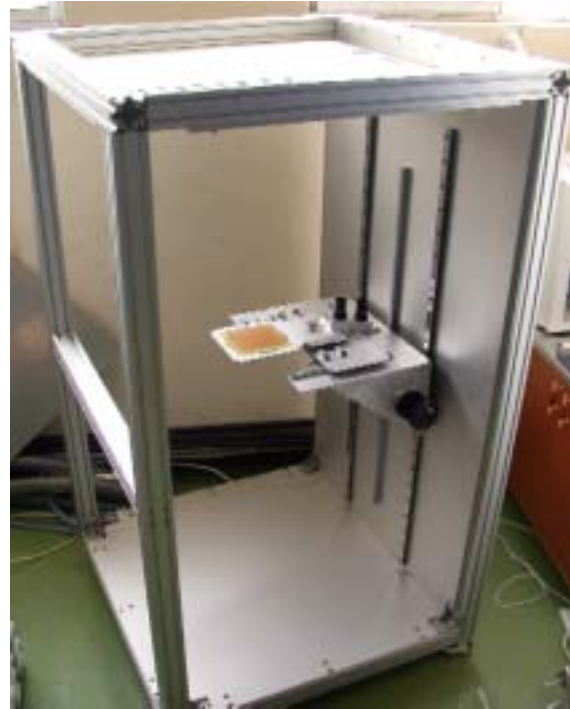


그림 3-3-18. 완성된 피검물 이송장치 사진

제 4 절 GEM검출기 시제품 특성 평가

1. 검출기 신호획득 및 스펙트럼 조사

검출기의 전반적인 특성을 측정하기 위한 개략도가 그림 3-3-19에 나타나 있다. GEM은 표류전극(drift electrode)과 수집전극(collection electrode)으로부터 각각 3, 2mm 간격으로 띄워져 있다. 검출기체로 불연성 기체인 Ar/Isobutane(90%/10%)를 사용하였으며, 기체에 1차 이온화를 유도할 방사선 선원으로 Fe-55를 이용하였다. GEM에서 증폭된 전하신호는 수집전극으로 출력되고 전하민감형 Ortec 113 pre amplifier에 의해 전압펄스신호로 변환된다. Pre amp의 출력신호는 매우 작기 때문에 이를 증폭하고 노이즈를 제거하기 위해 Ortec 572 spectroscopy amplifier를 연결하고 컴퓨터에 결합된 Multichannel analyzer와 Oscilloscope를 통해 파형을 관찰하도록 되어 있다. 그림 3-3-20은 GEM검출기에서 수집된 신호를 Ortec 572 spectroscopy amplifier를 통하여 관찰한 그림인데 main pulse와 중간 높이의 escape pulse를 동시에 관측할 수 있다. 테스트를 위한 방사선소스는 Fe-55이며 이는

5.9keV의 X-ray를 방출한다. 그림 3-3-21에서 보는 바와 같이 5.9keV main peak와 검출기를 빠져나간 X-ray에 의한 escape peak를 관찰할 수 있으며 main peak의 에너지분해능은 25%로서 비교적 우수한 성능을 나타내었다.

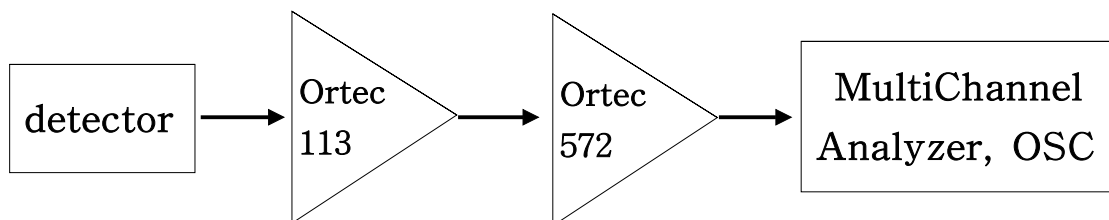


그림 3-3-19. 검출기 신호특성조사 개략도

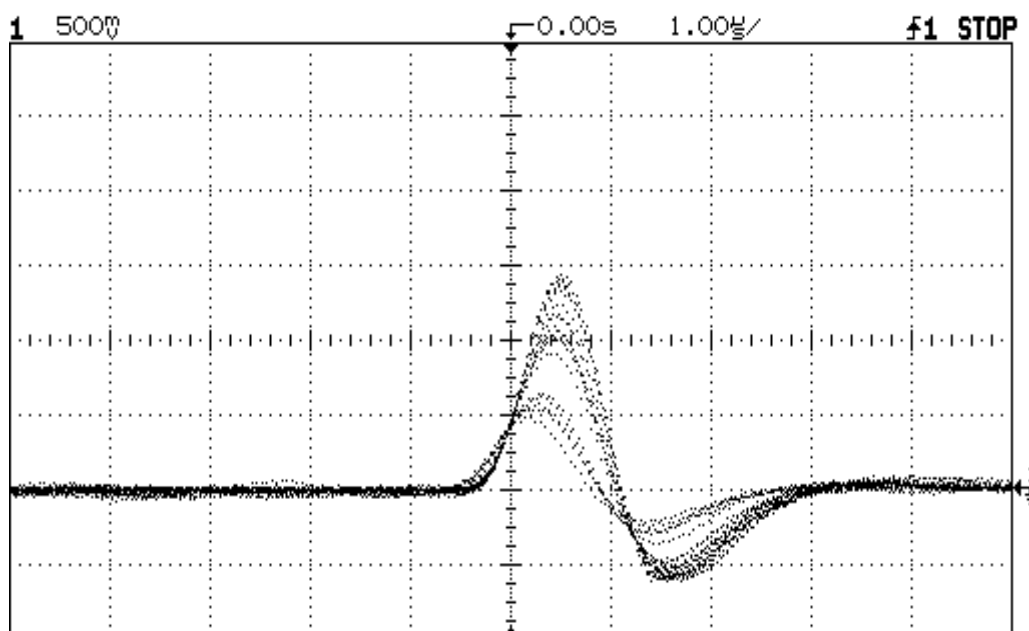


그림 3-3-20. Signal Pulse

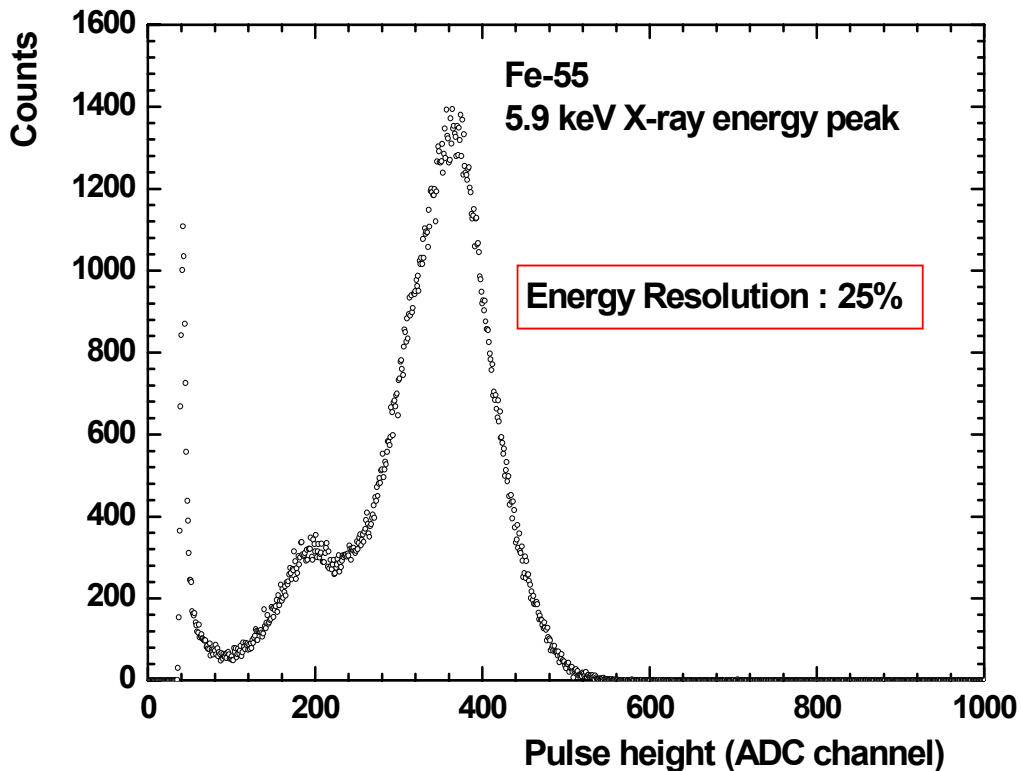


그림 3-3-21. Fe-55 pulse height spectrum

2. 기체증폭도 조사

그림 3-3-22는 GEM의 인가전압에 따른 검출기체의 유효전하이득을 보여 준다. 전기장의 구성에 따라 표류전기력선의 일부는 수집전극에 도달하지 못하고 GEM bottom으로 향하며 이는 이득손실을 초래한다. 이 때 수집전극으로 향하는 표류전기력선의 비율은 수집전기장의 세기에 비례하며 수집전극에서 얻어진 이득은 유효전하이득이라 한다. 본 실험에 이용된 GEM의 표류 전기장의 세기는 1 kV/cm로 고정하였으며 수집전기장의 세기는 2, 6, 8 kV/cm로 변화시켜 가며 전하이득 차이를 관찰하였다. 수집전기장의 세기가 강해질 수록 GEM인가 전압에 대한 전하증폭도가 증가함을 알 수 있고, 수집전기장의 세기가 8kV/cm에서 최고 전하이득은 거의 10,000에 이르고 있음을 알 수 있다. 이는 기존 CERN 등에서 발표된 전하이득의 약 2배정도로서 대단히 높은 증폭도를 보여주고 있는데 본 GEM의 홀 직경이 40 μ m로 기존

GEM의 절반 정도이므로 홀 내부의 전기장 세기가 증가한데 기인한 결과이다. 수집전기장의 세기가 강해지면 표류전기력선이 GEM Bottom대신 수집전기장으로 향하게 되므로 유효증폭도가 증가함을 실험을 통해 관찰할 수 있었다. 본 연구에 이용된 GEM의 전하이득의 특징으로 GEM동작전압 400V에서 1000내외의 안정된 증폭도를 얻을 수 있었고 전하증폭도가 대단히 높으며 수집전기장에 따른 최대 GEM인가전압의 차이가 거의 없었다.

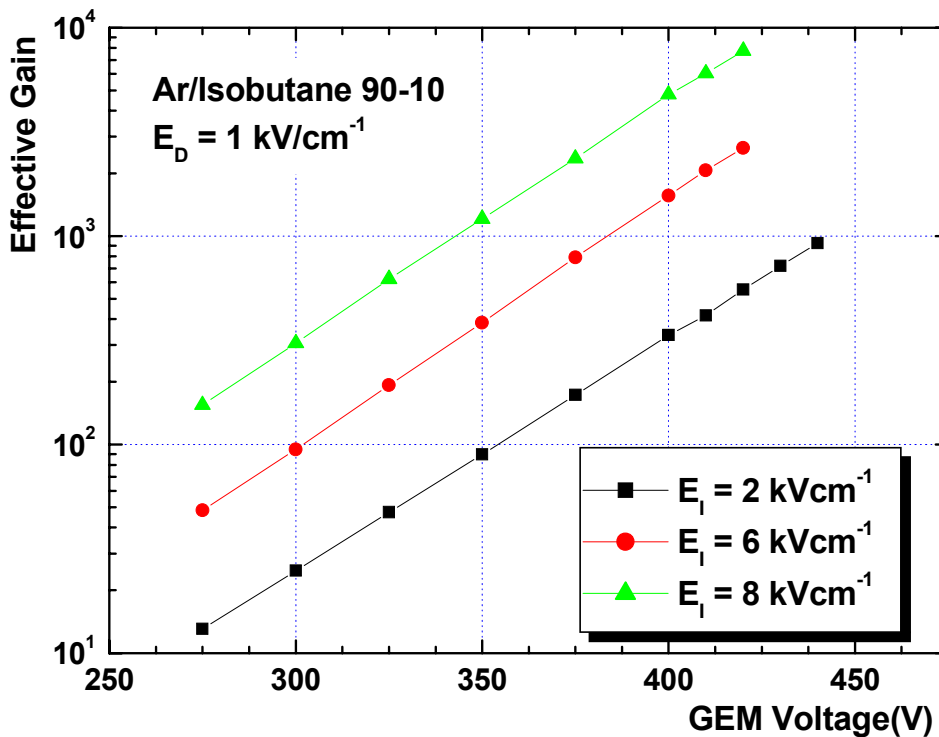


그림 3-3-22. Effective gain as a function of GEM voltage.

3. 수집전기장과 전하분할

표류영역에서 생성된 1차 이온-전자쌍은 표류전기력선을 따라 GEM hole을 통과하며 증폭되고 증폭된 전하는 각각 Drift, GEM top, GEM bottom, Collection electrode로 분산된다. 그림 3-3-23은 수집전기장(E_I)의 세기에 따른 전하분할을 측정된 결과이다. 이미 언급한 대로 수집전기장의 세기에 따

라 수집전극의 전류가 증가함을 관찰할 수 있으며 그 증가량은 GEM bottom전류감소분에 해당한다. GEM bottom 전류(I_{bot}) 와 GEM top전류 (I_{top})의 전체합(ITOT)은 GEM의 총전하이득을 의미한다. 그림 3-3-23에서 ITOT 이 수집전기장의 세기가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 수집전기장이 GEM hole내부에서 전장증가를 유도하기 때문이다. Ar/Isobutane(90-10)혼합가스에서 8kV/cm이상의 수집전기장을 인가하면 parallel plate multiplication이 일어나고 이로 인해 전하이득이 급격히 증가하며 GEM bottom전극에 양이온전류가 생성됨을 관찰할 수 있다. 수집전기장의 세기를 증가시키면 높은 전하이득을 얻을 수 있으나 GEM동작이 불안정해지며 GEM내부의 방전이 수집전극으로 전파될 수 있다. 표류전기장이 약하면 대부분의 이온전하는 GEM top전극에 머물지만, 표류전기장이 세어질수록 표류전극으로 향하는 이온전하의 수가 증가한다.

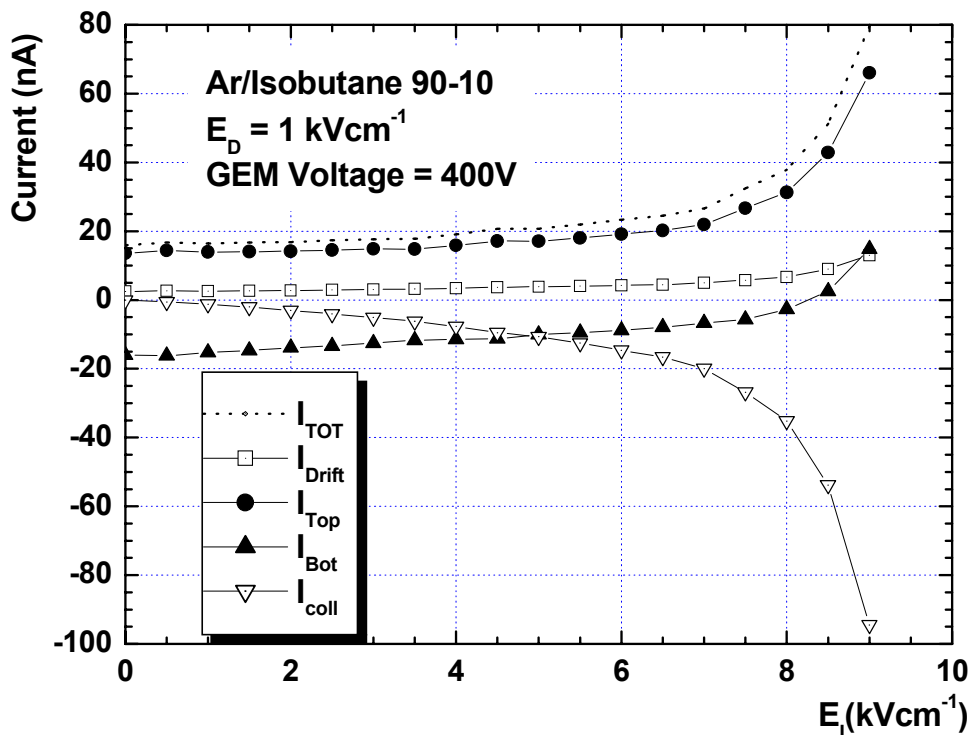


그림 3-3-23. Charge sharing between electrodes in the single GEM detector as a function of the induction field

4. 표류전기장과 전하분할

그림 3-3-24는 표류전기장의 세기에 따른 전하분할을 관찰한 결과이다. ITOT은 표류전극과 GEM top전극에서 관측된 양이온 전류의 총합이다. 표류전기장의 세기가 증가함에 따라 GEM top의 양이온은 점차 표류전극으로 향하고 있음을 관찰할 수 있으며 collection current는 고표류전기장에서 약간의 증가를 보여준다. 그리고 6kV/cm이상의 표류전기장에서는 GEM bottom으로 향하는 전기력선이 증가함으로써 그 전류가 증가하고 있음을 관찰할 수 있다.

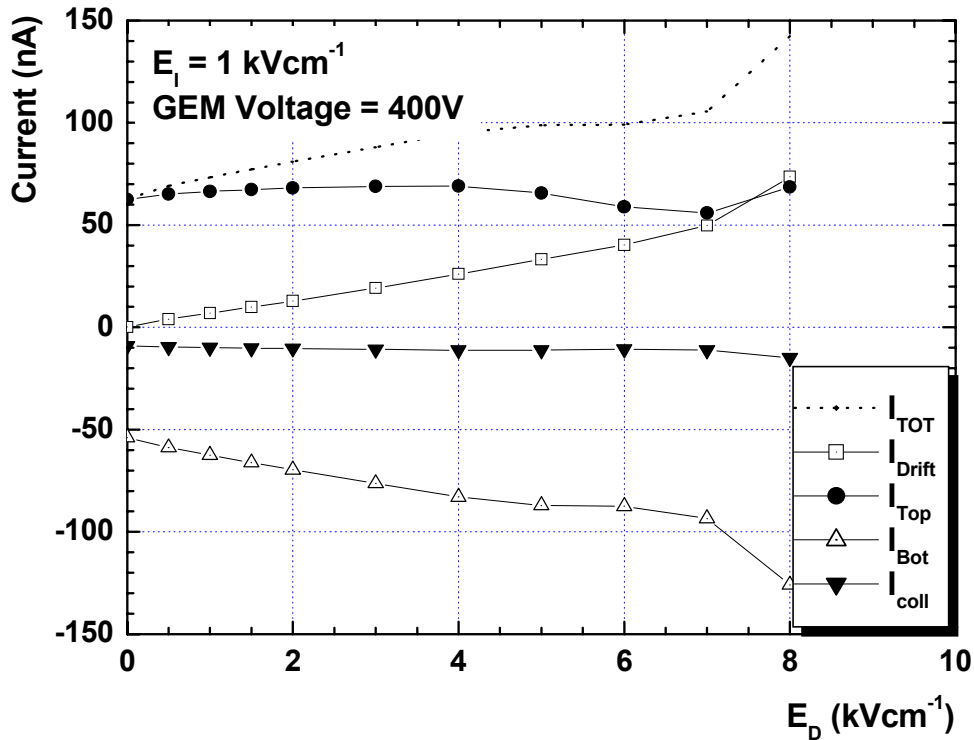


그림 3-3-24. Charge sharing between electrodes as a function of drift field

5. Transparency 대비 표류전기장 조사

출력신호의 크기에 영향을 미치는 또 다른 요인은 투명도(transparency)인 데, 이것은 초기 이온화 전자가 GEM 구멍을 투과할 확률을 일컫는 용어이다. 투명도는 전체 GEM의 면적 당 차지하는 구멍의 면적 비와 표류영역의 전기장 세기에 의존한다. 그림 3-3-25에서는 수집전류의 최고 치에 대해서 정상화된(normalized) 수집전류($I_{coll}/I_{coll,max}$)를 표류전기장의 세기에 따라 나타내었다. 표류전기장 세기가 약하면 초기 이온화에 의한 전자-이온쌍들의 운동에너지가 작아서 재결합(recombination)되는 비율이 증가하는 반면, 전기장이 너무 세어지면 표류전기력선은 GEM top 및 GEM bottom전극으로 향하기 때문에 출력신호는 감소하게 된다. 본 실험의 결과에 의하면 GEM voltage 250V 일 때 표류전기장의 세기 2 kV/cm, 그리고 GEM voltage 400V에서는 표류전기장의 세기가 5 kV/cm 부근에서 최고 값을 나타내었다. 표류전기장의 세기가 7 kV/cm이상이면 표류영역에서 전하증폭이 발생하며 이로 인해 수집전극전류가 증가함을 관찰할 수 있었다.

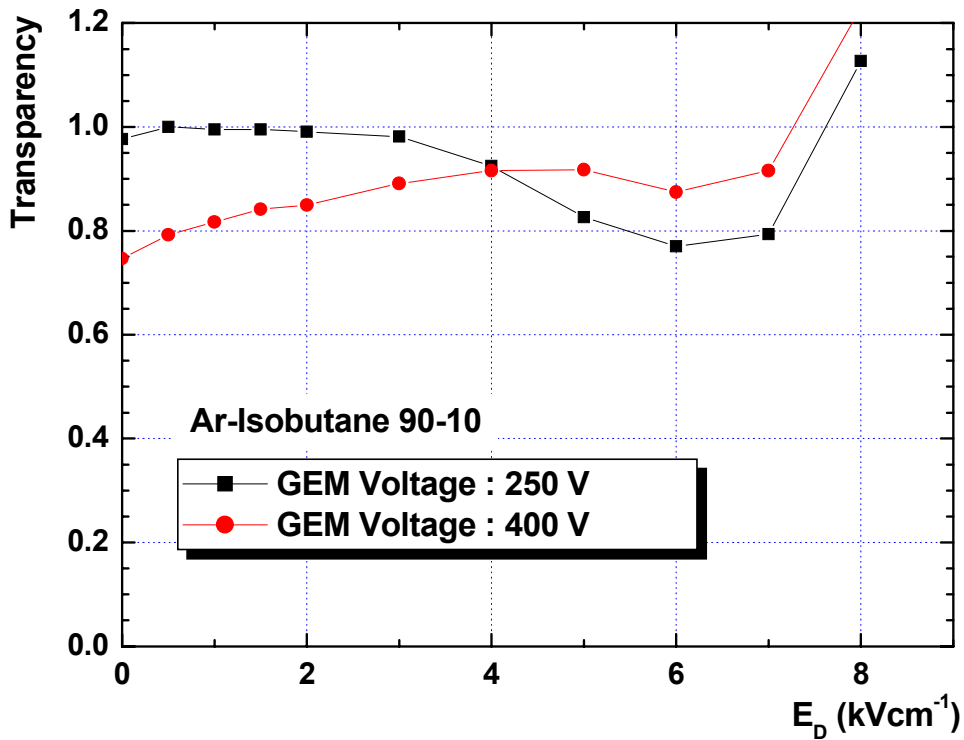


그림 3-3-25. Transparency as a function of drift field

6. Ion feedback 조사

전하증폭과정에서 생성된 양이온은 표류전극 및 GEM top 전극을 향하는데 표류전기장의 세기가 커지면 표류전극에서 더욱 많은 양이온이 수집된다. 또한 그림 3-3-26에서 보는 바와 같이 GEM 인가전압이 낮을수록 그 비율이 증가함을 알 수 있다.

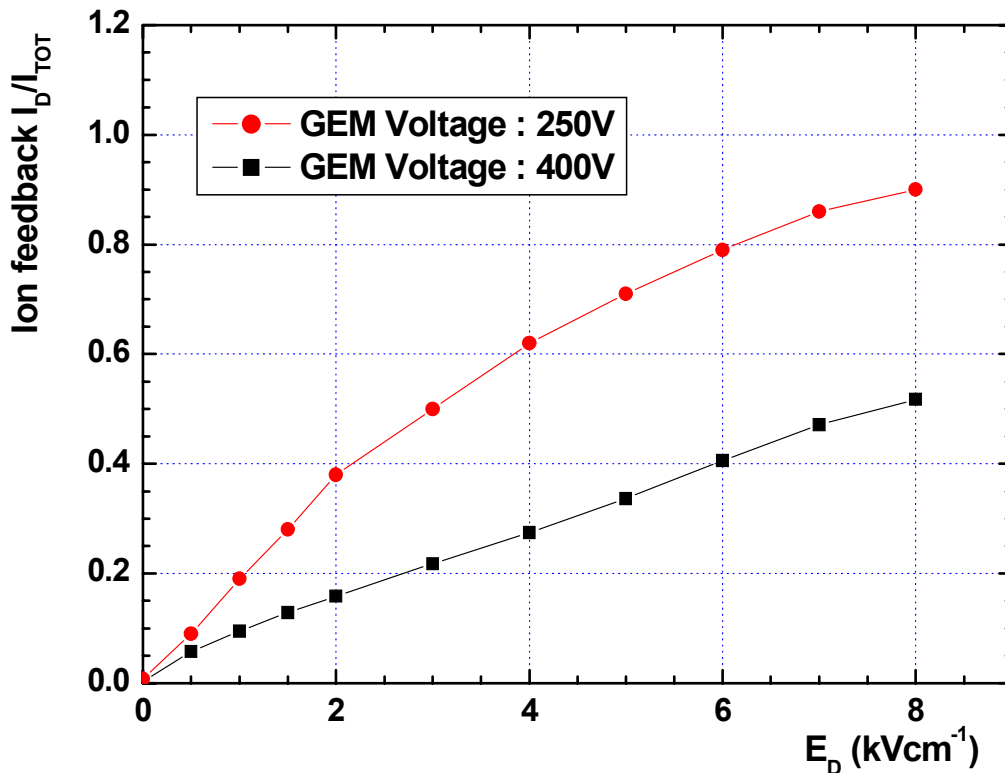


그림 3-3-26. Ion feedback ratio as a function of drift field for two GEM voltages

7. X-ray 이미지 획득

GEM검출기를 이용하여 방사선 영상을 구현하기 위하여 CCD결합형 이미지 시스템을 그림 3-3-27과 같이 제작하였다. 검출기의 혼합가스로서 CF₄를 이용하면 GEM hole 내부에서 전자사태가 일어날 때 여기된 기체분자에 의해 가시광이 생성되는데 이를 고감도 CCD로 영상을 획득하도록 하였다. 검출채임버의 출력원도우는 광이 투과될 수 있도록 마일러로 제작되었고 CCD에 상을 맺히도록 50mm 렌즈를 결합하였다. 그림 3-3-28은 본 연구실에서 제작한 영상시스템을 이용하여 직경 50 μ m의 tungsten wire의 X-ray영상을 구현한 것이다. 이 실험에서 방사선선원은 Fe-55를 사용하였고 CCD노출시간은 10초로 하였다.

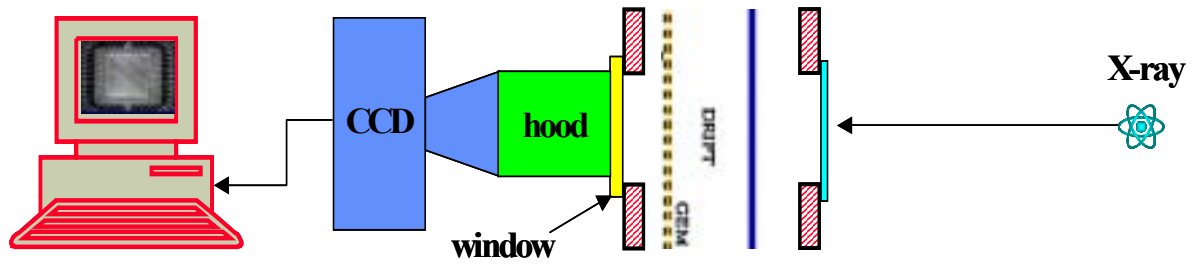


그림 3-3-27. CCD결합 X-ray imaging system

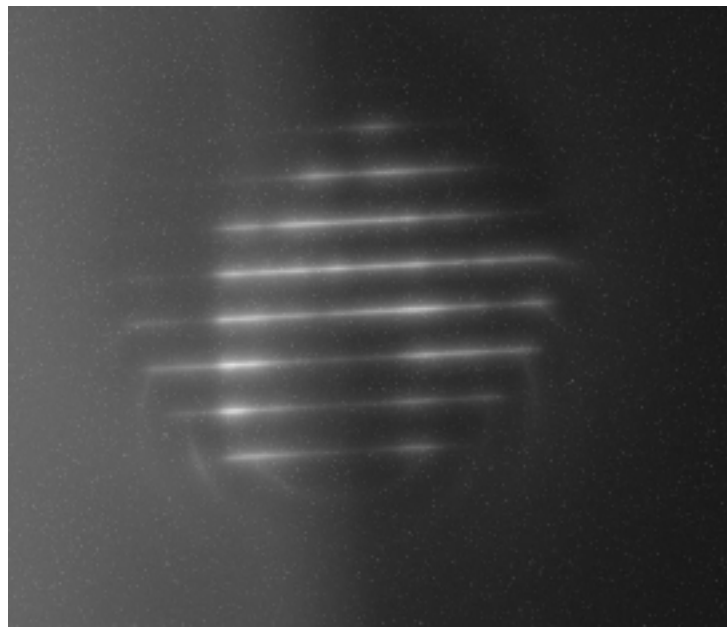


그림 3-3-28. X-ray image of tungsten wire

검출가스로 Ar/CF₄ (250/15)를 이용하였으며 GEM의 인가전압은 350V로 유지하였다. 광의 밝기는 기체의 압력에 민감하게 반응하였는데 50 torr 정도의 매우 낮은 압력에서 최대 광출력을 얻을 수 있었다.

SPECIFICATIONS	DATA	UNITS
GAS (Ar / CF ₄)	(250 / 15)	SCCM
DRIFT	2200	VDC
2 GEM TOP	1350	VDC
2 GEM BOTTOM	1000	VDC
1 GEM TOP	335	VDC
COLLECTION	1100	VDC
PRESSURE	50	Torr
ABSORPTION DEPTH	4	mm
GEM GAP	2	mm
COLLECTION GAP	2	mm
SOURCE	Fe ⁵⁵	NA
EXPOSURE	10	Sec
GAIN	10	NA
BLACK LEVEL	200	NA
GEM BOTTOM CURRENT(N/S)	Noise : 0.4 Signal: 50	nA nA
COLLECTION CURRENT	10	nA

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

제1절 연구 개발 목표 달성도

당해연도의 연구개발 목표는, 본 과제에서 DR 시스템의 방사선 센서로서 개발하려는 GEM 검출기의 시제품 개발 및 성능검사이다. 당초 목표는 크기 5cmx5cm, pitch 200 μ m의 GEM 검출기 시제품 제작이었으나 당해연도 연구수행 결과로 10cmx10cm, 100 μ m인 검출기를 제작하였다. Readout은 200 μ m, 400 μ m 두 가지 조건에서 성능 검사를 수행하고 있다. X-선 발생장치와 검출기를 고정하고 피검사체를 이동시켜 영상을 얻도록 하는 피검체 이동장치는 설계/제작을 완료하였다.

GEM 검출기 개발용 S/W는 상용 MAXWELL 코드와 자체 개발한 SHOWFIELD 코드를 결합하여 구현하였으며, 엑스선 영상평가 프로그램 IMAGEQUAL도 자체 개발하였다. 또한 개발된 프로그램을 사용하여 GEM 검출기의 특성분석을 통하여 설계를 완료하였다. 본 연구에서 개발된 프로그램들은 향후 새로운 개념의 방사선 검출기 개발에 유용하게 활용할 수 있다.

당해년도 연구개발 목표	달성도
<ul style="list-style-type: none"> - 소형 GEM검출기 시제품 개발 및 성능검사 . 고분해능(검출기 분해능 200μm) 위치센서 제작을 위한 공정 확립 . 5cmx5cm 고분해능 비파괴검사 위치검출기 개발 . 피검체 이송장치 개발 . 고속 다채널 신호처리 회로설계 및 제작 	<ul style="list-style-type: none"> . 제작 완료 (100%) . 10cmx10cm 위치검출기 제작완료 (초과달성) . 제작 및 성능검사 완료 (100%) . 제작 완료 (100%)

제2절 대외 기여도

기술적 측면에서의 연구 개발 기대 성과는 다음과 같다. GEM 검출기를 사용하면 기존 방식 대비 저선량 방사선으로 비파괴검사가 가능하기 때문에 방사선 장비 사용상의 안전성 향상에 기여한다. 또한 연구 개발의 결과로서 확보되는 첨단 반도체 검출기 개발 기술 및 고분해능(검출기 분해능 100 μ m)

m, 배율 100배) 방사선 위치 검출 센서 제작의 반도체 공정기술을 이용하여 대면적 방사선 영상 촬영용 검출기 개발이 가능하게 된다. 원전 시설내 배관, 부품 등의 결함검사, 산업체 비파괴검사 등 방사선 계측 응용에 활용함으로써 관련산업발전에 기여할 수 있으며, 교량, 건물 등 대형 구조물의 안전 검사 기술 및 공항 및 세관의 검색 시설, 부품 생산라인의 품질 전수 검사(On-line)에 활용된다. 첨단 방사선 장비의 선진화로 산업기술 경쟁력을 확보하며, 공업용 CT 개발에 응용기술을 적용한다.

경제·산업적 측면에서는 활용범위가 넓은 디지털 방사선영상장치의 개발로 중국, 미국 등으로 수출증대에 기여하며, 고분해능 디지털 방사선영상 획득을 통하여 비파괴검사 시간 단축 및 비용절감이 가능하고, 부가가치가 높은 비파괴검사장비 등의 국산화로 수입대체효과를 낼 수 있다. 방사선계측기의 안정적 공급과 유지/보수에 필요한 시간, 비용 절감으로 방사선관련산업의 효율성 증대에 기여하며, 반도체, 항공, 군수산업에 사용되는 부품의 결함검사장치로 활용될 수 있다. 이러한 첨단 방사선 장비 활용의 활성화로, 산업기술 경쟁력 확보에 기여할 수 있다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

기존의 상용화된 방사선영상 장비들은 거의 대부분 적산형 영상판독방식이나 GEM검출기는 입사광자의 수를 직접 측정할 수 있는 계수형 위치검출기로써 동적범위(contrast)가 대단히 우수하고 저조사량의 X-ray를 효율적으로 검출할 수 있다. 따라서 인체를 대상으로 하는 진단의학 분야 중 유방암(mammography), 임신부 태아진단 등과 같이 정확성과 고감도 방사선촬영이 요구되는 분야에 활용함으로써 의료 영상전산화(PACS: Picture Archiving and Communications System) 및 원격 방사선 진단(teleradiography) 등의 발전과 더불어 의료서비스 증진에 이바지 할 수 있을 것으로 기대된다. 한편 스파크 등의 damage에 강한 특성을 지닌 GEM 검출기는 최근 특정 검출가스 및 광캐소드를 이용, 결합하여 α 입자, fast charged particles, γ -ray, 중성자, U.V. 검출기로도 우수한 성능을 나타냄으로써 각종 방사선의 조사선량계 및 flux meter의 개발에도 활용이 가능하리라고 예상된다.

GEM의 검출기체로서 CF_4 를 이용하면 GEM의 hole에서 가시광이 방출되는데 수광소자로 CCD를 이용하면 고해상도의 방사선영상을 얻을 수 있다. 본 연구에서도 고해상도 CCD를 GEM검출기 후단에 결합하여 텅스텐와이어 영상을 얻은 바 있는데, 영상획득 시간을 줄이고 보다 정확한 영상구현을 위해서는 tapered fiber optic plate결합형 CCD영상시스템 개발이 요구되며, 상기 시스템이 개발되면 반도체웨이퍼 검사, X-ray diffraction검사 등의 고정밀 방사선검사에 활용이 가능하다. 또한 최근 CT의 검출기로써 Xe등을 밀봉한 가스검출기가 이용되고 있는데 GEM구조를 적용한다면 기존 장비와 비교하여 우수한 해상도와 고속영상획득을 실현할 수 있다.

빈

면

제 6 장 참고문헌

- [1] A. Oed, "Position-Sensitive Detector with Microstrip Anode for Electron Multiplication with Gases," Nucl. Instr. Meth., A 263 (1988) 351.
- [2] S. F. Biagi et al, "The Microdot gas avalanche chamber: An Investigation of New Geometries," Nucl. Instr. Meth., A 361 (1995) 72.
- [3] F. Sauli, "GEM: a New Concept for Electron Amplification in Gas Detectors," Nucl. Instr. Meth., A 386 (1997) 531.
- [4] D. Mattern et al, "A New Approach for Constructing Sensitive Surfaces: the Gaseous Pixel Chamber," Nucl. Instr. Meth., A 300 (1991) 275.
- [5] R. Bellazzini et al, "What is the Real Gain of a Standard GEM?," Nucl. Instr. Meth., A 419 (1998) 429.
- [6] J. Benlloch et al, "Development of the Gas Electron Multiplier(GEM)," IEEE Tran. Nucl. Sci. 45 (1999) 234.
- [7] W. Beaumont et al., "Studies of an MSGC Equipped with a GEM Grid as a Tracking Device," Nucl. Instr. Meth., A 419 (1998) 394.
- [8] G. Charpak et al., "The Use of Multiwire Proportional Counters to Select and Localize Charged Particles," Nucl. Instr. Meth., 62 (1968) 262.
- [9] I. Frumkin et al, "Properties of CsI-Based Gaseous Secondary Emission X-ray Imaging Detectors," Nucl. Instr. Meth., A 329 (1993) 337.
- [10] A. Barbosa et al, "A Microstrip Detector with Delay Line Readout," Rev. Sci. Instr. 63 (1) (1992), 667.
- [11] R. Street et al, "Amorphous Silicon Sensor Arrays for Radiating Imaging," MRS Symp. Proc., 192 (1990) 441.
- [12] I. Holl et al, "A Measurement of the Light Yield of Common Inorganic Scintillators," IEEE Trans. Nuc. Sci., 35 (1988) 105.

- [13] J. Fitzgerald et al., *Mathematical Theory of Radiation Dosimetry*, Gordon and Breach Science Pub., Inc., New York (1967).
- [14] I. Lux et al, *Monte Carlo Particle Transport Methods: Neutron and Photon Calculations*, CRC Press (1990).
- [15] R. Evans, *The Atomic Nucleus*, McGraw-Hill Book Comp., Inc., New York (1995).
- [16] H. Kahn, "Applications of Monte Carlo," AECU-3259 Report, Rand Corp. (1954).
- [17] R.K. Martin, J.H. Chappel and S.S. Murray, "Relative Quantum Efficiency Measurements of CsI, CsBr and CsI/CsBr Coated Micro-channel Plates", SPIE Vol. 1344 (1990).
- [18] G.A. Burginyon, B.A. Jacoby, J.K.Wobster, R.D. Ernst, D.S. Ancheta, K.G. Tirsell, "Absolute Detection Efficiency of a Micro-channel Plate Detector to X-rays in the 1-100keV Energy Range", SPIE Vol. 1736 (1992).
- [19] A.S. Tremsin, J.F. Pearson, G.W. Fraser, W.B. Feller, P. White, "Micro-channel Plate Operation at High Count Rate; New Results", Nuc. Inst. and Meth. in Physics Research A379 (1996).
- [20] I. Frumkin, et al., "Properties of CsI based Gaseous Secondary Emission X-ray imaging Detectors", Nuc. Inst. and Meth. in Physics Research, A329 (1993).
- [21] J.B. Marion and F.C. Young, "Nuclear Reaction analysis - Graphs and Tables", North Holland Pub. Co. (1968).
- [22] J.J. Scholtz, D. Dijkkamp and R.W.A. Schmitz, "Secondary Electron Emission Properties", Phillips J. Res. 50 (1996).
- [23] R.J. Verma, "Secondary Electron emission of Caesium Iodide", J. Phys. D: Applied Phys., 6(1973).

부 록 목 차

부록 A : 프로그래밍 Micro-Strip

부록 B : 프로그래밍 GEM-HOLE

부록 C : Micro Channel Plate 에 의해 생성되는
전자의 수 추정

부록 D : 방사선 검출기용 전자회로 기술개발 현황

부록 A : 프로그램명 Micro-Strip

산업재산권번호 : 프로그램01-045

등 록 번 호 : 2001-01-12-1993

프 로 그 램 요 약 서

1. 프로그램명 : **Micro-Strip**

2. 저 작 자 : 문병수, 김용균, 김장열, 한상호, 홍석봉

3. 등록 기관 : 한국소프트웨어진흥원

4. 프로그램의 개요 :

이 프로그램은 X-선을 방사선원으로 사용하는 방사선 영상 검출기를 설계할 때 사용하는 EGS4코드의 Geometry부분 프로그램이다. 영상 측정 대상은 박막의 알미늄 Plate로서 그 내부를 $1\mu m$ 수준의 Strip들로 잘라낸 다음 X-선을 조사하여 반대편에 놓인 Strip형 CsI 검출기에서 생성되는 Electron의 수를 산출하도록 하는 프로그램이다. 또한, 장애물인 알미늄 Plate내 Strip들의 경계면 상에서 발생 가능한 Overshoot 와 Undershoot문제를 해결하도록 경계면 취급 Subroutine을 포함하고 있다.

검출기인 CsI Single Crystal의 격자 크기는 $98\mu m \times 98\mu m$ 이며 격자들 간의 간격은 $2\mu m$ 로 두었다. 물체로부터 검출기까지의 거리와 방사선원으로 부터 물체까지 거리의 비율을 100등 큰 값으로 둬으로써 Micro Strip형 방사선 영상 검출기의 분해능 분석 및 Contrast분석에 대한 모의 실험이 가능토록 작성되었다.

```

%L
%E
!INDENT M4;                "INDENT MORTRAN LISTING BY 4 PER
LEVEL"
!INDENT F2;                "INDENT FORTRAN OUTPUT BY 2 PER
LEVEL"
"=====
"PROGRAM FOR X-RAY IMAGE SIMULATION"
"PROGRAMMED BY BYUNG SOO MOON -FEB.6,2001 "
"=====
"STEP 1 : ADDITIONAL MACRO"
"=====
"RANDOM GENERATER @ 32-BIT MACHINE"
REPLACE {;COMIN/RANDOM/;} WITH
    {;COMMON/RANDOM/IXX;}
REPLACE {$RANDOMSET#;} WITH
    {IXX=IXX*663608941; {P1}=0.5+IXX*0.23283064E-9;}
REPLACE {$RANDOMNO#;} WITH
    {JXX=JXX*663608941; {P1}=0.5+JXX*0.23283064E-9;}
REPLACE {;COMIN/EBIN/;} WITH
    {;COMMON/EBIN/NCH,ESUM,CHANEL(1024);}
"SINES AND COSINES"
REPLACE {$EVALUATE#USING SIN(#);} WITH
    {{P1}=SIN({P2});}
REPLACE {$EVALUATE SINTHE USING SIN(THETA);} WITH
    {SINTHE=SIN(THETA);}
REPLACE {$EVALUATE COSTHE USING SIN(CTHET);} WITH
    {COSTHE=COS(THETA);}
REPLACE {$EVALUATE SINPHI USING SIN(PHI);} WITH
    {SINPHI=SIN(PHI);}
REPLACE {$EVALUATE COSPHI USING SIN(CPHI);} WITH
    {COSPHI=COS(PHI);}
REPLACE {C#=PI5D2-#;} WITH {}
REPLACE {$SET INTERVAL#,SINC;} WITH {}
"USER INPUT UNIT DEFINE MACRO"
REPLACE {$INIT_IN;} WITH
    {;OPEN(UNIT=5,FILE='user.egs4inp',STATUS='OLD');}
REPLACE {;INPUT#;#;} WITH
    {{SETR A =@LG}READ(5,{COPY A}){P1};{COPY A}FORMAT{P2};}
REPLACE {$INIT_OUT;} WITH
    {;OPEN(UNIT=1,FILE='USER.OUT');}

```

```

REPLACE {;OUTPUT1#:#;} WITH
      {;{SETR A =@LG}WRITE(1,{COPY A}){P1};{COPY A}FORMAT{P2};}
"=====
"STEP 2 : USER OVER RIDE OF EGS MACROS & ARRAY ARGUMENT SETTING"
"=====
REPLACE {$MXMED} WITH {2}                "DEFAULT 10 MATERIAL"
REPLACE {$MXREG} WITH {4}                "DEFAULT 2000 REGION"
REPLACE {$MXSTACK} WITH {100}           "STACK SIZE"
REPLACE {$MXPLNS} WITH {16}             "MAX NUMBER OF PLANES"
REPLACE {$MXCYLS} WITH {1}              "MAX NUMBER OF CYLINDERS"
;COMIN/BOUNDS,MEDIA,MISC,PLADTA,CYLDTA,RANDOM,STACK,THRESH,UPHIOT
,USEFUL/;
;COMIN/EBIN/;
CHARACTER*4 TEMP(24,5);
COMMON/TROUBLE/NCASE;
COMMON/RESULT/ NPARTIC,IMAGE(110,110);
"=====
":STEP 3 : READ TRANSPORT PROPERTIES"
"=====
$INIT_IN;                "USER INPUT UNIT = 5(@MACHINE.MAC)"
DO J=1,$MXMED [INPUT (TEMP(I,J),I=1,24);(24A1);]  "READ MATERIAL NAME"
INPUT NCASE;(I8);        "READ NUMBER OF HISTORY"
INPUT DISTN;(F15.8);    "DISTANCE TO THE OBJECT(Cm)"
INPUT THICK;(F15.8);    "THICKNESS OF THE OBJECT"
INPUT TOCSI;(F15.8);    "DISTANCE FROM OBJECT TO CSI"
INPUT TKCSI;(F15.8);    "THICKNESS OF CSI"
INPUT WIDTH;(F15.8);    "WIDTH OF THE CRACK ON THE SURFACE"
INPUT GAP;(F15.8);     "GAP BETWEEN OBJECTS"
INPUT ERGIN;(F15.8);    "INITIAL ENERGY OF THE INPUT X-RAY"
"=====
"STEP 4 : INITIALIZATION FOR HATCH"
"=====
NREG=$MXREG;
NMED=$MXMED;            "VARIABLE FOR MATERIAL
NUMBER"
NPLNS=$MXPLNS;
NDIM=100;NPARTIC=0;
DO J=1,NMED[DO I=1,24 [MEDIA(I,J) = TEMP(I,J);]] "MATERIAL NAME SETTING"
"SET MEDIUM NUMBER"
DO I=1,NREG [MED(I)=0;]
MED( 2)=1;MED(3)=2;    "MATERIAL"

```



```

"=====
"STE
"=====
CALL HATCH;                                "PICK UP CROSS SECTION DATA"
$INIT_OUT;
OUTPUT1;(' QUANTITIES ASSOCIATED WITH EACH MEDIA ');
DO J=1,NMED [
  OUTPUT1 (MEDIA(I,J),I=1,24); (1X,24A1);
  OUTPUT1 RHO(J),RLC(J);
    (' RHO =',1P,E15.7,' G/CM**3',5X,'RLC =',1P,E15.7,' CM');
  OUTPUT1 AE(J),UE(J);
    (' AE =',1P,E15.7,' MeV    ',5X,'UE =',1P,E15.7,' MeV');
  OUTPUT1 TE(J);
    (' TE =',1P,E15.7,' MeV    ');
  OUTPUT1 AP(J),UP(J);
    (' AP =',1P,E15.7,' MeV    ',5X,'UP =',1P,E15.7,' MeV');
  ]
"COMPTON EVENTS CAN CREATE ELECTRONS AND PHOTONS BELOW THESE
CUTOFFS"
"=====
"STEP 6 : INITIALIZATION FOR SUBROUTINE HOWFAR"
"=====
"SET PLANE'S NORMAL VECTOR & ORIGIN"
DO I=1,4 [PNORM(1,I),PNORM(2,I)/=0.0; PNORM(3,I)=1.0;]
DO I=1,4 [PCOORD(1,I),PCOORD(2,I),PCOORD(3,I)/=0.0;]
PCOORD(3,1)=DISTN;
PCOORD(3,2)=DISTN+THICK;
PCOORD(3,3)=DISTN+THICK+TOCSI;
PCOORD(3,4)=PCOORD(3,3)+TKCSI;
PCOORD(1,5)=-WIDTH/2.;PCOORD(3,5)=0.;
PCOORD(1,6)=WIDTH/2.;PCOORD(3,6)=0.;
PNORM(2,5)=0.;PNORM(2,6)=0.;
PNORM(1,5)=-1.;PNORM(3,5)=0.;
PNORM(1,6)=-1.;PNORM(3,6)=0.;
PCOORD(1,7)=PCOORD(1,5)-GAP-WIDTH;
PCOORD(1,8)=PCOORD(1,5)-GAP;
PCOORD(1,9)=PCOORD(1,6)+GAP;
PCOORD(1,10)=PCOORD(1,6)+GAP+WIDTH;
PNORM(1,7)=-1.;PNORM(1,8)=-1.;PNORM(1,9)=-1.;PNORM(1,10)=-1.;
PCOORD(2,11)=WIDTH*3.75;
PCOORD(2,12)=WIDTH*2.25;

```

```

PCOORD(2,13)=WIDTH*0.75;
PCOORD(2,14)=-WIDTH*0.75;
PCOORD(2,15)=-2.25*WIDTH;
PCOORD(2,16)=-3.75*WIDTH;
PNORM(2,11)=1;PNORM(2,12)=1;PNORM(2,13)=1;PNORM(2,14)=1;
PNORM(2,15)=1;PNORM(2,16)=1;
"=====
"STEP 7 : DETERMINATION OF INCIDENT PARTICLE PROPERTIES"
"=====
/XI,YI/=0.;ZI=0;                "COORDINATES OF INCIDENT PARTICLE"
IQI= 0;IRI=1;                    "INCIDENT PARTICLE STARTS OUT IN REGION 1"
WTI=1.0;                          "WEIGHT FACTOR"
IXX=87654321;JXX=IXX;            "RANDOM NUMBER SEED"
"=====
"STEP 8 : INITIALIZATION FOR SUBROUTINE AUSGAB"
"=====
DO I=1, NREG [ECUT(I)=0.012+RM;PCUT(I)=0.001;]      "SET CUT OFF ENERGY"
DO I=1, NDIM [DO J=1,NDIM [IMAGE(I,J)=0;] ]
"=====
"STEP 9 : CALL SHOWER"
"=====
"CALL CHKTIM;"                    "INITIATE THE SHOWER NCASE
TIMES"
  WDEX=0.008;WINSUL=0.002;WTOT=WDEX+WINSUL;
  ANGLE=ATAN(WIDTH*9./(DISTN+0.5*THICK));
DO LOOP=1, 5 [
DO I=1,NCASE [                      "should be NCASE"
  IF(MOD(I,1000)=0) [OUTPUT LOOP,I,NCASE;(1X,'HISTORY = ',3I12);]
  ESUM=0.0;

  EI=ERGIN;
  $RANDOMNO RANWI;RANWI=RANWI*ANGLE;WI=COS(RANWD);
  $RANDOMNO RANPHI;PHI=RANPHI*PI*2.;
  UI=SIN(RANWI)*SIN(PHI);VI=SIN(RANWD)*COS(PHI);
  CALL SHOWER(IQI,EI,XI,YI,ZI,UI,VI,WI,IRI,WTI);

  ]          "end of NCASE"
]          "end of loop"
"=====
"STEP 10 : OUTPUT OF RESULT"
"=====

```

```

"PRINT TRANSPORT PARAMETER"
OUTPUT1 NCASE,DISTN;
(1X,'NUMBER OF HISTORY : ',I8,' DISTANCE TO OBJECT',F8.3,' cm');
OUTPUT1 THICK,TOCSI,WIDTH;
(1X,'THICKNESS OF OBJECT',F8.5,' cm, TO CSI',F8.2,' cm, WIDTH',F8.5,' cm');
OUTPUT1 TKCSI,GAP;
(1X,'THICKNESS OF CSI DETECTOR',F8.6,' cm GAP IS',F11.7);
OUTPUT1 ERGIN,NPARTIC;
(1X,'ENERGY',F8.2,' kev, NO OF PARTICLE HIT PLATE',I10);
DO I=1,100 [
  DO J=1, 100 [
    IF (IMAGE(I,J) .GT. 999) IMAGE(I,J)=999;
      ]
  ]
DO I = 1,100 [
  OUTPUT1 (IMAGE(I,J),J=1,100);
  (1X,25I3);
  ]
STOP;END;
"=====
SUBROUTINE AUSGAB(IARG);
"=====
;COMIN/BOUNDS,EBIN,STACK,EPCONT,MEDIA,THRESH,UPHIOT,USEFUL/;
COMMON/RESULT/ NPARTIC,IMAGE(110,110);
IRL=IR(NP); "LOCAL VARIABLE"
EDEPWT=EDEP*WT(NP);
IF(IRL=4) [ "DETECTOR LOCATION"
  XE=X(NP)+0.5; YE=Y(NP)+0.5;

  IF (IQ(NP) .EQ. -1 ) [

    WDEX=0.008;WINSUL=0.002;WTOT=WDEX+WINSUL;
    IROW=XE/WTOT+1; ICOL=YE/WTOT+1;
    IF (IROW .GE. 1 .AND. ICOL .GE. 1) [
      IF (IROW .LE. 100 .AND. ICOL.LE.100) [
        NPARTIC=NPARTIC+1;
        IF (XE-(IROW-1)*WTOT .LE. WDEX ) [
          IF (YE-(ICOL-1)*WTOT .LE. WDEX ) [
            IMAGE(IROW,ICOL)=IMAGE(IROW,ICOL)+1;
          ]
        ]
      ]
    ]
  ]
]

```

```

]
]
] "end of IQ(NP)=-1"
] "end of irl=4"
RETURN;END;
%E
"=====
SUBROUTINE HOWFAR;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA;
COMMON/RESULT/ NPARTIC,IMAGE(110,110);
IRL=IR(NP); "SET LOCAL VARIABLE"
XYRAD = X(NP)**2 + Y(NP)**2;
CALL BDRY;
IRL=IRNEW;

"OUTPUT1 IR(NP),IRL,X(NP),Y(NP),Z(NP),XYRAD;"
"(1X,2I3,5E14.5);"
IF(Z(NP).GE.1000.|XYRAD>200.|Z(NP).LT.0.)[IDISC=1;RETURN;]
IF (USTEP.LE.1.E-6) [IDISC=1;RETURN;]
ELSEIF(IRL=1) [
CALL HOWFAR1;
]
ELSEIF(IRL=2) [
IF (X(NP)>PCOORD(1,7)&X(NP)<PCOORD(1,8)) [
IF (U(NP).LE.0 .AND. V(NP).GE.0) [
CALL CORNER(7,1,11,1,1);
] "end of u(np)>0 & w(np)>0"
IF (U(NP).LE.0 .AND. V(NP).LT.0) [
CALL CORNER(7,1,16,-1,1);
] "end of u(np)>0 & w(np)<0"
IF (U(NP).GT.0 .AND. V(NP).GE.0) [
$PLANE1(8,-1,JHIT,TPLN1);
IF (JHIT.NE.1) [
$PLANE1(11,1,KHIT,TPLN2);
IF (KHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(3,1,LHIT,TPLN3);

```

```

        IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,3);]
            ]
                ] "end of khit=1"
    IF (KHIT.NE.1) [
        $PLANE1(3,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,3);]
            ] "end of khit.ne.1"
        ] "end of jhit.ne.1"
IF (JHIT.EQ.1) [
    $PLANE1(11,1,KHIT,TPLN2);
    IF (KHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
        IF (YF.GE.PCOORD(2,12)) [
            $CHGTR(TPLN1,1);
            ]
        IF (YF.LT.PCOORD(2,12)&YF.GE.PCOORD(2,13)) [
            $CHGTR(TPLN2,1);
            ]
        IF (YF.LT.PCOORD(2,13)&YF.GE.PCOORD(2,14)) [
            $PLANE1(13,1,LHIT,TPLN3);
            IF (LHIT.EQ.1) [
                $FINVAL(TPLN3,XF,YF,ZF);
                IF (XF.GT.PCOORD(1,8)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
                ]
            ]
        IF (YF.LT.PCOORD(2,14)&YF.GE.PCOORD(2,15)) [
            $CHGTR(TPLN2,1);
            ]
        IF (YF.LT.PCOORD(2,15)) [
            $PLANE1(15,1,LHIT,TPLN3);
            IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
            ]
        ] "end of khit=1"
    ] "end of jhit=1"
    ] "end of u(np)>0 & v(np)>0"
IF (U(NP).GT.0 .AND. V(NP).LT.0) [
    $PLANE1(8,-1,JHIT,TPLN1);
    IF (JHIT.NE.1) [
        $PLANE1(16,-1,KHIT,TPLN2);
        IF (KHIT.EQ.1) [
            $FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);

```

```

IF (ZF2.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
  $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
  ]
  ] "end of khit=1"
IF (KHIT.NE.1) [
  $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
  ] "end of khit.ne.1"
] "end of jhit.ne.1"
IF (JHIT.EQ.1) [
  $PLANE1(16,-1,KHIT,TPLN2);
  IF (KHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);
    IF (YF1.LE.PCOORD(2,15)) [
      $CHGTR(TPLN2,1);
    ]

    IF (YF.LT.PCOORD(2,12)&YF.GE.PCOORD(2,13)) [
      $CHGTR(TPLN1,1);
    ]

    IF (YF.LT.PCOORD(2,13)&YF.GE.PCOORD(2,14)) [
      $PLANE1(14,-1,LHIT,TPLN3);
      IF (LHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN3,XF,YF,ZF);
        IF (XF.GT.PCOORD(1,8)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]

    IF (YF.LT.PCOORD(2,14)&YF.GE.PCOORD(2,15)) [
      $CHGTR(TPLN1,1);
    ]

    IF (YF.GT.PCOORD(2,12)) [
      $PLANE1(12,-1,LHIT,TPLN3);
      IF (LHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
        IF (XF2>PCOORD(1,8)) [
          IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
          ELSE [
            $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
            IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
          ]
        ]
      ]
    ]
  ]
]

```

```

]
]
]
] "end of khit=1"
] "end of jhit=1"
] "end of u(np)>0 & v(np)<0"
] "END OF (1,7)<X(NP)<(1,8)"
ELSEIF (X(NP)>PCOORD(1,9)&X(NP)<PCOORD(1,10)) [
IF (U(NP).GE.0 .AND. V(NP).GE.0) [
CALL CORNER(10,-1,11,1,1);
] "end of u(np)>0 & w(np)>0"
IF (U(NP).GE.0 .AND. V(NP).LT.0) [
CALL CORNER(10,-1,16,-1,1);
] "end of u(np)>0 & w(np)<0"
IF (U(NP).LT.0 .AND. V(NP).GE.0) [
$PLANE1(9,1,JHIT,TPLN1);
IF (JHIT.NE.1) [
$PLANE1(11,1,KHIT,TPLN2);
IF (KHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
]
] "end of khit=1"
IF (KHIT.NE.1) [
$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
] "end of khit.ne.1"
] "end of jhit.ne.1"
IF (JHIT.EQ.1) [
$PLANE1(11,1,KHIT,TPLN2);
IF (KHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);
IF (YF.GE.PCOORD(2,12)) [
$FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]

```

```

]
]
IF (YF.LT.PCOORD(2,12)&YF.GE.PCOORD(2,13)) [
    $CHGTR(TPLN1,1);
]
IF (YF.LT.PCOORD(2,13)&YF.GE.PCOORD(2,14)) [
    $PLANE1(13,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
        IF (XF2.LT.PCOORD(1,9)) [
            IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
            ELSE [
                $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
                IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
            ]
        ]
    ]
]
IF (YF.LT.PCOORD(2,14)&YF.GE.PCOORD(2,15)) [
    IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
    ELSE [
        $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
        IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
]
IF (YF.LT.PCOORD(2,15)) [
    $PLANE1(15,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
        IF (XF2<PCOORD(1,9)) [
            IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
            ELSE [
                $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN5);
                IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN5,1);]
            ]
        ]
    ]
]
]
]
] "end of khit=1"
] "end of jhit=1"
] "end of u(np)<0 & v(np)>0"

```



```

IF (U(NP).LT.0 .AND. V(NP).LT.0) [
  $PLANE1(9,1,JHIT,TPLN1);
  IF (JHIT.NE.1) [
    $PLANE1(16,-1,KHIT,TPLN2);
    IF (KHIT.EQ.1) [
      $FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
      IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ] "end of khit=1"
  IF (KHIT.NE.1) [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
  ] "end of khit.ne.1"
] "end of jhit.ne.1"
IF (JHIT.EQ.1) [
  $PLANE1(16,-1,KHIT,TPLN2);
  IF (KHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);
    IF (YF.LE.PCOORD(2,15)) [
      IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [
        $CHGTR(TPLN2,1); ]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ]
  IF (YF.LT.PCOORD(2,12)&YF.GE.PCOORD(2,13)) [
    IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [
      $CHGTR(TPLN1,1); ]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
      IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ]
  ]
  IF (YF.LT.PCOORD(2,13)&YF.GE.PCOORD(2,14)) [
    $PLANE1(14,-1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [
      $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);

```

```

IF (XF2.LT.PCOORD(1,9)) [
  IF (ZF2.LE.PCOORD(3,2)) [
    $CHGTR(TPLN3,1); ]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
  ]
]

IF (YF.LT.PCOORD(2,14)&YF.GE.PCOORD(2,15)) [
  IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
  ]
]

IF (YF.GT.PCOORD(2,12)) [
  $PLANE1(12,-1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
    IF (XF2<PCOORD(1,9)) [
      IF (ZF2.LE.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
        IF (MHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
      ]
    ]
  ]
]

ELSEIF (Y(NP)>PCOORD(2,12)&Y(NP)<PCOORD(2,11)) [
  CALL HOWFAR2;
]

ELSEIF (Y(NP)>PCOORD(2,16)&Y(NP)<PCOORD(2,15)) [
  CALL HOWFAR3;
]

ELSEIF (X(NP)>PCOORD(1,5)&X(NP)<PCOORD(1,6)) [

```

```

CALL HOWFAR4;
]
ELSEIF (Y(NP)>PCOORD(2,14)&Y(NP)<PCOORD(2,13)) [
CALL HOWFAR5;
]
]

ELSEIF( IRL=3) [
$PLANE1(3,-1,IHIT,TPLN);
IF (IHIT.EQ.1) [SCHGTR(TPLN,1);]
ELSE [
$PLANE1(4,1,JHIT,TPLN2);
IF (JHIT.EQ.1) [SCHGTR(TPLN2,4);]
] "END OF ELSE"
] "end of IRL=3"

ELSEIF( IRL=4) [IDISC=1;]
RETURN;
END;
"=====
SUBROUTINE HOWFAR1;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
XYRAD = X(NP)**2 + Y(NP)**2;

IF (Z(NP).LT.PCOORD(3,1)) [
$PLANE1(1,1,IHIT,TPLN);
$FINVAL(TPLN,XF,YF,ZF);
IF (IHIT.NE.1 .OR. ZF .LE. 0) [IDISC=1;RETURN;]
IF (IHIT.EQ.1) [
IF (YF.GE.PCOORD(2,11).OR.YF.LE.PCOORD(2,16)) [
$PLANE1(3,1,JHIT,TPLN2);
IF (JHIT .EQ. 1) [SCHGTR(TPLN2,3);]
IF (JHIT .NE. 1) [IDISC=1;RETURN;]
] "end of pcoord(2,11)<yf.or.<(2,16)"
ELSEIF (XF.GE.PCOORD(1,10).OR.XF.LE.PCOORD(1,7)) [
$PLANE1(3,1,JHIT,TPLN2);
IF (JHIT .EQ. 1) [SCHGTR(TPLN2,3);]
IF (JHIT .NE. 1) [IDISC=1;RETURN;]
] "end of (1,10)<xf.or.xf<pcoord(1,7)"
ELSEIF (XF.GE.PCOORD(1,8).AND.XF.LE.PCOORD(1,5)) [

```

```

IF (YF.GE.PCOORD(2,13).AND.YF.LE.PCOORD(2,12)) [
  IF (U(NP).LE.0.AND.V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(8,1,12,1,2);  ]
  IF (U(NP).LE.0.AND.V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(8,1,13,-1,2);  ]
  IF (U(NP).GT.0.AND.V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(5,-1,12,1,2);  ]
  IF (U(NP).GT.0.AND.V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(5,-1,13,-1,2);  ]
  ] "end of (2,13)<=yf<=(2,12)"
IF (YF.GE.PCOORD(2,15).AND.YF.LE.PCOORD(2,14)) [
  IF (U(NP).LE.0 .AND.V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(8,1,14,1,2);    ]
  IF (U(NP).LE.0 .AND.V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(8,1,15,-1,2);    ]
  IF (U(NP).GT.0 .AND.V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(5,-1,14,1,2);    ]
  IF (U(NP).GT.0 .AND.V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(5,-1,15,-1,2);    ]
  ] "end of (2,15)<=yf<=(2,14)"
  ] "end of pcoord(1,8)<xf<pcoord(1,5)"
ELSEIF (XF.GE.PCOORD(1,6).AND.XF.LE.PCOORD(1,9)) [
  IF (YF.GE.PCOORD(2,13).AND.YF.LE.PCOORD(2,12)) [
    IF (U(NP).LE.0&V(NP).GE.0) [
      CALL CORNER(6,1,12,1,2);  ]
    IF (U(NP).LE.0&V(NP).LT.0) [
      CALL CORNER(6,1,13,-1,2);  ]
    IF (U(NP).GT.0&V(NP).GE.0) [
      CALL CORNER(9,-1,12,1,2);  ]
    IF (U(NP).GT.0&V(NP).LT.0) [
      CALL CORNER(9,-1,13,-1,2);  ]
    ] "end of (2,13)<=yf<=(2,12)"
  ]
IF (YF.GE.PCOORD(2,15).AND.YF.LE.PCOORD(2,14)) [
  IF (U(NP).LE.0 .AND.V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(6,1,14,1,2);    ]
  IF (U(NP).LE.0 .AND.V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(6,1,15,-1,2);    ]
  IF (U(NP).GT.0 .AND.V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(9,-1,14,1,2);    ]
  IF (U(NP).GT.0 .AND.V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(9,-1,15,-1,2);    ]

```

```

] "end of (2,15)<=yf<=(2,14)"
] "end of pcoord(1,6)<xf<pcoord(1,9)"
] "end of IHIT=1"
] "end of z(np)<pcoord(3,1)"
IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,2)) [
  IF (W(NP).LE.0.OR.Z(NP).GE.PCOORD(3,3)) [IDISC=1;RETURN;]
  ELSE [
    $PLANE1(3,1,JHIT,TPLN2);
    IF (JHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN2,3);]
    ] "end of else"
  ] "end of z(np)>pcoord(3,2)"
IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,1).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,2)) [
  IF (X(NP).LT.PCOORD(1,7)) [ "NORTH BOUNDARY"
    IF (Y(NP).GT.PCOORD(1,16)&Y(NP).LT.PCOORD(1,11)) [
      IF (U(NP).GT.0) [CALL OUTBND(7,-1);]
      IF (U(NP).LE.0) [IDISC=1;RETURN;]
    ]
  ELSE [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of (1,7)>x(np)"
IF (Y(NP).LE.PCOORD(2,16)) [ "EAST BOUNDARY"
  IF (X(NP).GT.PCOORD(1,7).AND.X(NP).LE.PCOORD(1,10)) [
    IF (V(NP).GT.0) [CALL OUTBND(16,1);]
    IF (V(NP).LE.0) [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of "
  ELSE [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of (2,16)>=y(np)"
IF (X(NP).GE.PCOORD(1,10)) [ "SOUTH BOUNDARY"
  IF (Y(NP).GE.PCOORD(1,16)&Y(NP).LE.PCOORD(1,11)) [
    IF (U(NP).LT.0) [CALL OUTBND(10,1);]
    IF (U(NP).GE.0) [IDISC=1;RETURN;]
  ]
  ELSE [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of (1,10)<x(np)"
IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,11)) [ "WEST BOUNDARY"
  IF (X(NP).GE.PCOORD(1,7).AND.X(NP).LE.PCOORD(1,10)) [
    IF (V(NP).LT.0) [CALL OUTBND(11,-1);]
    IF (V(NP).GE.0) [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of "
  ELSE [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of (2,11)<y(np)"
ELSEIF (X(NP).GE.PCOORD(1,8)&X(NP).LE.PCOORD(1,5)) [

```

```

IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,13)&Y(NP).LE.PCOORD(2,12)) [
  IF (U(NP).GE.0&V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(5,-1,12,1,2); ]
  IF (U(NP).GE.0&V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(5,-1,13,-1,2); ]
  IF (U(NP).LT.0&V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(8,1,12,-1,2); ]
  IF (U(NP).LT.0&V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(8,1,13,-1,2); ]
  ]
IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,15)&Y(NP).LE.PCOORD(2,14)) [
  IF (U(NP).GE.0&V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(5,-1,14,1,2); ]
  IF (U(NP).GE.0&V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(5,-1,15,-1,2); ]
  IF (U(NP).LT.0&V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(8,1,14,-1,2); ]
  IF (U(NP).LT.0&V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(8,1,15,-1,2); ]
  ]
]
ELSEIF (X(NP).GE.PCOORD(1,6)&X(NP).LE.PCOORD(1,9)) [
  IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,13)&Y(NP).LE.PCOORD(2,12)) [
    IF (U(NP).GE.0&V(NP).GE.0) [
      CALL CORNER(9,-1,12,1,2); ]
    IF (U(NP).GE.0&V(NP).LT.0) [
      CALL CORNER(9,-1,13,-1,2); ]
    IF (U(NP).LT.0&V(NP).GE.0) [
      CALL CORNER(6,1,12,-1,2); ]
    IF (U(NP).LT.0&V(NP).LT.0) [
      CALL CORNER(6,1,13,-1,2); ]
    ]
  ]
IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,15)&Y(NP).LE.PCOORD(2,14)) [
  IF (U(NP).GE.0&V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(9,-1,14,1,2); ]
  IF (U(NP).GE.0&V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(9,-1,15,-1,2); ]
  IF (U(NP).LT.0&V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(6,1,14,-1,2); ]
  IF (U(NP).LT.0&V(NP).LT.0) [
    CALL CORNER(6,1,15,-1,2); ]
  ]
]

```

```

]
]

] "end of (3,1)<z(np)<(3,2)"
RETURN;
END;
"=====
SUBROUTINE HOWFAR2;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
  IF (U(NP).LE.0 .AND. V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(7,1,11,1,1);
] "end of u(np)>0 & w(np)>0"
  IF (U(NP).GE.0 .AND. V(NP).GE.0) [
    CALL CORNER(11,1,10,-1,1);
] "end of u(np)>0 & w(np)<0"
  IF (U(NP).GE.0 .AND. V(NP).LT.0) [
    $PLANE1(12,-1,JHIT,TPLN1);
    IF (JHIT.NE.1) [
      $PLANE1(10,-1,KHIT,TPLN2);
      IF (KHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
        IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
        ELSE [
          $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
          IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
        ]
      ] "end of khit=1"
    ]
  ]
  IF (KHIT.NE.1) [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
  ] "end of khit.ne.1"
] "end of jhit.ne.1"
  IF (JHIT.EQ.1) [
    $PLANE1(10,-1,KHIT,TPLN2);
    IF (KHIT.EQ.1) [
      $FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);
      IF (XF.GE.PCOORD(1,9)) [
        IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
        ELSE [

```

```

$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ]
      ]
IF (XF.LT.PCOORD(1,9)&XF.GE.PCOORD(1,6)) [
  IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ]
      ]
IF (XF.LT.PCOORD(1,6)&XF.GE.PCOORD(2,5)) [
  $PLANE1(6,-1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
    IF (YF2.LT.PCOORD(2,12)) [
      IF (ZF2.LE.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
        IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
        ]
          ] "end of yf<(2,12)"
        ] "end of lh=1"
      ]
    ]
IF (XF.LT.PCOORD(1,5)&XF.GE.PCOORD(1,8)) [
  IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
      ]
IF (XF.LT.PCOORD(1,8)) [
  $PLANE1(8,-1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
    IF (YF2<PCOORD(2,12)) [
      IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
        IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
        ]
      ]
    ]
  ]

```



```

]
]
] "end of khit=1"
] "end of jhit=1"
] "end of u(np)>0 & v(np)<0"
IF (U(NP).LE.0 .AND. V(NP).LT.0) [
$PLANE1(12,-1,JHIT,TPLN1);
IF (JHIT.NE.1) [
$PLANE1(7,1,KHIT,TPLN2);
IF (KHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
]
] "end of khit=1"
IF (KHIT.NE.1) [
$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
] "end of khit.ne.1"
] "end of jhit.ne.1"
IF (JHIT.EQ.1) [
$PLANE1(7,1,KHIT,TPLN2);
IF (KHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);
IF (XF.LE.PCOORD(1,8)) [
IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
]
]
IF (XF.LT.PCOORD(2,5)&YF.GE.PCOORD(2,8)) [
IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
]
]
]
]

```

```

IF (XF.LT.PCOORD(1,6)&XF.GE.PCOORD(1,5)) [
  $PLANE1(5,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
    IF (YF2.LT.PCOORD(1,12)) [
      IF (ZF2.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
      IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
  ]
]

]

]

IF (XF.LT.PCOORD(1,9)&XF.GE.PCOORD(1,6)) [
  IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
    IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
  ]
]

IF (XF.GT.PCOORD(1,9)) [
  $PLANE1(9,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN3,XF,YF,ZF);
    IF (YF.LT.PCOORD(2,12)) [
      IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
      IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
  ]
]

]

]

] "end of khit=1"
] "end of jhit=1"
] "end of u(np)>0 & v(np)<0"

```

RETURN;

END;

"=====

SUBROUTINE HOWFAR3;

"=====

"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"

;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;

IF (U(NP).LE.0 .AND. V(NP).LE.0) [

CALL CORNER(7,1,16,-1,1);

] "end of u(np)>0 & w(np)>0"

IF (U(NP).GE.0 .AND. V(NP).LE.0) [

CALL CORNER(10,-1,16,-1,1);

] "end of u(np)>0 & w(np)<0"

IF (U(NP).LE.0 .AND. V(NP).GE.0) [

\$PLANE1(15,1,JHIT,TPLN1);

IF (JHIT.NE.1) [

\$PLANE1(7,1,KHIT,TPLN2);

IF (KHIT.EQ.1) [

\$FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);

IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [\$CHGTR(TPLN2,1);]

ELSE [

\$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);

IF (LHIT.EQ.1) [\$CHGTR(TPLN3,1);]

]

] "end of khit=1"

IF (KHIT.NE.1) [

\$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);

IF (LHIT.EQ.1) [\$CHGTR(TPLN3,1);]

]

"end of khit.ne.1"

]

"end of jhit.ne.1"

IF (JHIT.EQ.1) [

\$PLANE1(7,1,KHIT,TPLN2);

IF (KHIT.EQ.1) [

\$FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);

IF (XF.LE.PCOORD(1,8)) [

IF (ZF<PCOORD(3,2)) [\$CHGTR(TPLN2,1);]

ELSE [

\$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);

IF (MHIT=1) [\$CHGTR(TPLN4,1);]

]

]

IF (XF.LT.PCOORD(1,5)&XF.GE.PCOORD(1,8)) [

IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [\$CHGTR(TPLN1,1);]

ELSE [

\$PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);

```

IF (LHIT.EQ.1) [SCHGTR(TPLN3,1);
]
]
IF (XF.LT.PCOORD(1,6)&XF.GE.PCOORD(1,5)) [
$PLANE1(5,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
IF (YF2.GT.PCOORD(2,15)) [
IF (ZF2.LE.PCOORD(3,2)) [SCHGTR(TPLN3,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT.EQ.1) [SCHGTR(TPLN4,1);]
]
] ] "end of yf<(2,15)"
] ] "end of lhit=1"
]
IF (XF.LT.PCOORD(1,9)&XF.GE.PCOORD(1,6)) [
IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [SCHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT.EQ.1) [SCHGTR(TPLN4,1);]
]
]
IF (XF.LT.PCOORD(1,9)) [
$PLANE1(9,1,LHIT,TPLN3);
IF (LHIT.EQ.1) [
$FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
IF (YF2>PCOORD(2,15)) [
IF (ZF.LE.PCOORD(3,2)) [SCHGTR(TPLN3,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT.EQ.1) [SCHGTR(TPLN4,1);]
]
] ] "END OF YF2>(2,15)"
]
] ] "end of khit=1"
] ] "end of jhit=1"
] ] "end of u(np)>0 & v(np)<0"
IF (U(NP).GT.0 .AND. V(NP).GT.0) [
$PLANE1(15,1,JHIT,TPLN1);

```

```

IF (JHIT.NE.1) [
  $PLANE1(10,-1,KHIT,TPLN2);
  IF (KHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
    IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
      IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ]
  ]
] "end of khit=1"
IF (KHIT.NE.1) [
  $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
] "end of khit.ne.1"
] "end of jhit.ne.1"
IF (JHIT.EQ.1) [
  $PLANE1(10,-1,KHIT,TPLN2);
  IF (KHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);
    IF (XF.GE.PCOORD(1,9)) [
      IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
      IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
  ]
]
IF (XF.LT.PCOORD(1,9)&XF.GE.PCOORD(1,6)) [
  IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
  ]
]
IF (XF.LT.PCOORD(1,6)&XF.GE.PCOORD(1,5)) [
  $PLANE1(6,-1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
    IF (YF2.GT.PCOORD(2,15)) [
      IF (ZF2.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN4);
    ]
  ]
]

```

```

    ]
        ]
    ]
] IF (XF.LT.PCOORD(1,5)&XF.GE.PCOORD(1,8)) [
    IF(ZF.LE.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
    ELSE [
        $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
        IF (MHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
]
IF (XF.LT.PCOORD(1,8)) [
    $PLANE1(8,-1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT.EQ.1) [
        $FINVAL(TPLN3,XF2,YF2,ZF2);
        IF (YF2.GT.PCOORD(2,15)) [
            IF (ZF2.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN3,1);]
            ELSE [
                $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
                IF (MHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
            ]
        ]
    ]
]
]
]
]
] "end of khit=1"
] "end of jhit=1"
] "end of u(np)>0 & v(np)<0"

```

RETURN;

END;

"=====

SUBROUTINE HOWFAR4;

"=====

"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"

;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;

IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,15).AND.Y(NP).LE.PCOORD(2,14)) [

\$PLANE1(5,1,IHIT,TPLN1);

IF (IHIT.EQ.1) [

\$FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);

IF (YF1>PCOORD(2,15)&YF1<PCOORD(2,14)) [

```

IF (ZF1<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
ELSE [
  $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
]
]
]
] "END OF IHIT=1"
IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(6,-1,JHIT,TPLN2);
  IF (JHIT=1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
    IF (YF2>PCOORD(2,15)&YF2<PCOORD(2,14)) [
      IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ]
] "end of jhit=1"
] "END OF IHIT.NE.1"
]
IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,13).AND.Y(NP).LE.PCOORD(2,12)) [
  $PLANE1(5,1,IHIT,TPLN1);
  IF (IHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);
    IF (YF1>PCOORD(2,13)&YF1<PCOORD(2,12)) [
      IF (ZF1<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ]
] "END OF IHIT=1"
IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(6,-1,JHIT,TPLN2);
  IF (JHIT=1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
    IF (YF2>PCOORD(2,13)&YF2<PCOORD(2,12)) [
      IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);

```

```

        IF (LHIT=1) [SCHGTR(TPLN3,1);]
        ]
        ]
        ] "end of jhit=1"
        ] "END OF IHIT.NE.1"
        ]
IF (Y(NP)>PCOORD(2,14)&Y(NP)<PCOORD(2,13)) [
$PLANE1(5,1,IHIT,TPLN1);
IF (IHIT=1) [
$FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);
IF (YF1<PCOORD(2,14).OR.YF1>PCOORD(2,13)) [
IF (ZF1<PCOORD(3,2)) [SCHGTR(TPLN1,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT=1) [SCHGTR(TPLN1,1);]
]
]
] "END OF IHIT=1"
IF (IHIT.NE.1) [
$PLANE1(6,-1,JHIT,TPLN2);
IF (JHIT=1) [
$FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
IF (YF2<PCOORD(2,14).OR.YF2>PCOORD(2,13)) [
IF (ZF2<PCOORD(3,1)) [SCHGTR(TPLN2,1);]
ELSEIF (ZF2<PCOORD(3,2)) [SCHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT=1) [SCHGTR(TPLN4,1);]
]
]
] "END OF JHIT=1"
] "END OF IHIT.NE.1"
$PLANE1(14,-1,IHIT,TPLN1);
IF (IHIT=1) [
$FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);
IF (XF1<PCOORD(1,5).OR.XF1>PCOORD(2,6)) [
IF (ZF1<PCOORD(3,2)) [SCHGTR(TPLN1,1);]
ELSE [
$PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
IF (MHIT=1) [SCHGTR(TPLN1,1);]
]
]
]

```



```

]
] "END OF IHIT=1"
IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(13,1,JHIT,TPLN2);
  IF (JHIT=1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
    IF (XF2<PCOORD(1,5).OR.XF2>PCOORD(1,6)) [
      IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
    ELSE [
      $PLANE1(2,1,MHIT,TPLN4);
      IF (MHIT=1) [$CHGTR(TPLN4,1);]
    ]
  ]
] "END OF JHIT=1"
] "END OF IHIT.NE.1"
] "end of (2,14)<(2,13)"

RETURN;
END;
"=====
SUBROUTINE HOWFAR5;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
IF (Y(NP).GE.PCOORD(2,14).AND.Y(NP).LT.PCOORD(2,13)) [
  IF (X(NP).GE.PCOORD(1,8).AND.X(NP).LE.PCOORD(1,5)) [
    $PLANE1(14,-1,IHIT,TPLN1);
    IF (IHIT.EQ.1) [
      $FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);
      IF (XF1>PCOORD(1,8)&XF1<PCOORD(1,5)) [
        IF (ZF1<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ]
] "END OF IHIT=1"
IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(13,1,JHIT,TPLN2);
  IF (JHIT=1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
    IF (XF2>PCOORD(1,8)&XF2<PCOORD(1,5)) [

```

```

IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
ELSE [
  $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
]
]
] "end of jhit=1"
] "END OF IHIT.NE.1"
]

IF (X(NP).GE.PCOORD(1,6).AND.X(NP).LE.PCOORD(1,9)) [
  $PLANE1(14,-1,IHIT,TPLN1);
  IF (IHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TPLN1,XF1,YF1,ZF1);
    IF (XF1>PCOORD(1,6)&XF1<PCOORD(1,9)) [
      IF (ZF1<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ]
] "END OF IHIT=1"

IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(13,1,JHIT,TPLN2);
  IF (JHIT=1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF2,YF2,ZF2);
    IF (XF2>PCOORD(1,6)&XF2<PCOORD(1,9)) [
      IF (ZF2<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,1);]
      ELSE [
        $PLANE1(2,1,LHIT,TPLN3);
        IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,1);]
      ]
    ]
  ]
] "end of jhit=1"
] "END OF IHIT.NE.1"
] "END (1,5)<X<(1,6)"

RETURN;
END;
" = = = = = S U B R O U T I N E
OUTBND=====
SUBROUTINE OUTBND(IPLN,IFLAG);

```

```

;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
$PLANE1(IPLN,IFLAG,IHIT,TPLN);
IF (IHIT=1) [
  $FINVAL(TPLN,XF,YF,ZF);
  IF (ZF.GE.PCOORD(3,1).AND.ZF.LE.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN,2);]
  ELSEIF (ZF.LT.PCOORD(3,1)) [IDISC=1;RETURN;]
  ELSEIF (ZF.GT.PCOORD(3,2)) [
    $PLANE1(3,1,JHIT,TPLN2);
    IF (JHIT=1) [$CHGTR(TPLN2,3);]
  ]
]
] "END OF IHIT=1"
IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(3,1,JHIT,TPLN2);
  IF (JHIT=1) [$CHGTR(TPLN2,3);]
  ELSE [IDISC=1;RETURN;]
]
] "END OF IHIT.NE.1"
RETURN;
END;
" = = = = = S U B R O U T I N E
CORNER===== "
SUBROUTINE CORNER(IPLN1,IFLG1,IPLN2,IFLG2,IREGN);
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
$PLANE1(IPLN1,IFLG1,IHIT,TPLN1);
$PLANE1(IPLN2,IFLG2,IHIT,TPLN2);
TOGO=AMIN1(TPLN1,TPLN2);
IF (IHIT=1) [
  IF (KHIT=1) [
    $FINVAL(TOGO,XF,YF,ZF);
    IF (ZF.LT.PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TOGO,IREGN);]
    ELSE [
      $PLANE1(3,1,LHIT,TPLN3);
      IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,3);]
    ]
]
] "END OF ELSE"
] "END OF KHIT=1"
IF (KHIT.NE.1) [
  $FINVAL(TPLN1,XF,YF,ZF);
  IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN1,IREGN);]
  ELSE [
    $PLANE1(3,1,LHIT,TPLN3);
    IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,3);]
  ]
] "END OF ELSE"

```

```

] "END OF KHIT.NE.1"
] "END OF JHIT=1"
IF (JHIT.NE.1) [
  IF (KHIT=1) [
    $FINVAL(TPLN2,XF,YF,ZF);
    IF (ZF<PCOORD(3,2)) [$CHGTR(TPLN2,IREGN);]
    ELSE [
      $PLANE1(3,1,LHIT,TPLN3);
      IF (LHIT=1) [$CHGTR(TPLN3,3);]
    ] "END OF ELSE"
  ] "end of khit=1"
IF (KHIT.NE.1) [
  $PLANE1(3,1,LHIT,TPLN3);
  IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN3,3);]
] "END OF KHIT.NE.1"
] "END OF JHIT.NE.1"
RETURN;
END;
"=====
SUBROUTINE BDRY;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
  IRL=IR(NP); "SET LOCAL VARIABLE"
  XYRAD = X(NP)**2 + Y(NP)**2;
  EPS = 1.0E-6;

IF(ABS(Z(NP)-PCOORD(3,1)).LT.EPS) [
  IF(W(NP) .GE. 0) [
    IF(X(NP)<PCOORD(1,7).OR.X(NP)>PCOORD(1,10)) [
      Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=1; ]
    ELSEIF(Y(NP)<PCOORD(1,16).OR.Y(NP)>PCOORD(1,11)) [
      Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=1; ]
    ELSEIF(X(NP)<PCOORD(1,5)&X(NP)>PCOORD(1,8)) [
      IF (Y(NP)>PCOORD(2,13)&Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
        Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=1; ]
      IF (Y(NP)>PCOORD(2,15)&Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
        Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=1; ]
    ]
    ELSEIF(X(NP)<PCOORD(1,9)&X(NP)>PCOORD(1,6)) [
      IF (Y(NP)>PCOORD(2,13)&Y(NP)<PCOORD(2,12)) [

```

```

        Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=1;          ]
    IF (Y(NP)>PCOORD(2,15)&Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
        Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=1;          ]
    ]
ELSE [
    Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS;IRNEW=2;
    ]
    ]
IF (W(NP) .LT. 0) [
    Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;
    ]
    ]
ELSEIF (ABS(Z(NP)-PCOORD(3,2)).LT.EPS)[
    IF(W(NP) .LT. 0) [
        IF(X(NP)<PCOORD(1,7).OR.X(NP)>PCOORD(1,10)) [
            Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;      ]
        ELSEIF(Y(NP)<PCOORD(1,16).OR.Y(NP)>PCOORD(1,11)) [
            Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;      ]
        ELSEIF(X(NP)<PCOORD(1,5)&X(NP)>PCOORD(1,8)) [
            IF (Y(NP)>PCOORD(2,13)&Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
                Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;    ]
            IF (Y(NP)>PCOORD(2,15)&Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
                Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;    ]
            ]
        ELSEIF(X(NP)<PCOORD(1,9)&X(NP)>PCOORD(1,6)) [
            IF (Y(NP)>PCOORD(2,13)&Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
                Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;    ]
            IF (Y(NP)>PCOORD(2,15)&Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
                Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=1;    ]
            ]
        ]
    ELSE [
        Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS;IRNEW=2;
        ]
    ]
    ]
IF (W(NP) .GT. 0) [
    Z(NP)=PCOORD(3,2)+EPS;IRNEW=1;
    ]
    ]
ELSEIF (ABS(Z(NP)-PCOORD(3,3)).LT.EPS) [
    IF (W(NP).GE. 0.) [
        Z(NP)=PCOORD(3,3)+EPS;
    ]

```

```

        IRNEW=3;          ]
    IF (W(NP).LT. 0.)    [
        Z(NP)=PCOORD(3,3)-EPS;IRNEW=1;
        ]
    ]
ELSEIF (ABS(Z(NP)-PCOORD(3,4)).LT.EPS) [
    IF (W(NP).GE. 0.)   [
        Z(NP)=PCOORD(3,4)+EPS;
        IRNEW=4;        ]
    IF (W(NP).LT. 0.)   [
        Z(NP)=PCOORD(3,4)-EPS;IRNEW=3;
        ]
    ]
ELSEIF (ABS(X(NP)-PCOORD(1,7)).LT.EPS) [
    IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,1).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,2)) [
    IF (U(NP) .GE. 0)           [
        X(NP)=PCOORD(1,7)+EPS;IRNEW=2;]
    IF (U(NP) .LT. 0)          [
        X(NP)=PCOORD(1,7)-EPS;IRNEW=1;]           ]
    ]
ELSEIF (ABS(X(NP)-PCOORD(1,10)).LT.EPS) [
    IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,1).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,2)) [
    IF (U(NP) .GE. 0)           [
        X(NP)=PCOORD(1,10)+EPS;IRNEW=1;]
    IF (U(NP) .LT. 0)          [
        X(NP)=PCOORD(1,10)-EPS;IRNEW=2;]           ]
    ]
ELSEIF (ABS(Y(NP)-PCOORD(2,11)).LT.EPS) [
    IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,1).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,2)) [
    IF (V(NP) .GE. 0)           [
        Y(NP)=PCOORD(2,11)+EPS;IRNEW=1;]
    IF (V(NP) .LT. 0)          [
        Y(NP)=PCOORD(2,11)-EPS;IRNEW=2;]           ]
    ]
ELSEIF (ABS(Y(NP)-PCOORD(2,16)).LT.EPS) [
    IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,1).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,2)) [
    IF (V(NP) .GE. 0)           [
        Y(NP)=PCOORD(2,16)+EPS;IRNEW=2;]
    IF (V(NP) .LT. 0)          [
        Y(NP)=PCOORD(2,16)-EPS;IRNEW=1;]           ]
    ]

```

```

ELSEIF (ABS(X(NP)-PCOORD(1,8))<EPS) [
  IF (Y(NP)>PCOORD(2,13) & Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
    IF (U(NP).GE.0) [
      X(NP)=PCOORD(1,8)+EPS;IRNEW=1;
      ]
    IF (U(NP)<0) [
      X(NP)=PCOORD(1,8)-EPS;IRNEW=2;
      ]
    ]
  IF (Y(NP)>PCOORD(2,15) & Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
    IF (U(NP).GE.0) [
      X(NP)=PCOORD(1,8)+EPS;IRNEW=1;
      ]
    IF (U(NP)<0) [
      X(NP)=PCOORD(1,8)-EPS;IRNEW=2;
      ]
    ]
  ] "END OF |X-(1,8)|"
ELSEIF (ABS(X(NP)-PCOORD(1,5))<EPS) [
  IF (Y(NP)>PCOORD(2,13) & Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
    IF (U(NP).GE.0) [
      X(NP)=PCOORD(1,5)+EPS;IRNEW=2;
      ]
    IF (U(NP)<0) [
      X(NP)=PCOORD(1,5)-EPS;IRNEW=1;
      ]
    ]
  IF (Y(NP)>PCOORD(2,15) & Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
    IF (U(NP).GE.0) [
      X(NP)=PCOORD(1,5)+EPS;IRNEW=2;
      ]
    IF (U(NP)<0) [
      X(NP)=PCOORD(1,5)-EPS;IRNEW=1;
      ]
    ]
  ] "END OF |X-(1,5)|"
ELSEIF (ABS(X(NP)-PCOORD(1,6))<EPS) [
  IF (Y(NP)>PCOORD(2,13) & Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
    IF (U(NP).GE.0) [
      X(NP)=PCOORD(1,6)+EPS;IRNEW=1;
      ]

```

```

IF (U(NP)<0) [
  X(NP)=PCOORD(1,6)-EPS;IRNEW=2;
]
]
IF (Y(NP)>PCOORD(2,15) & Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
  IF (U(NP).GE.0) [
    X(NP)=PCOORD(1,6)+EPS;IRNEW=1;
  ]
  IF (U(NP)<0) [
    X(NP)=PCOORD(1,6)-EPS;IRNEW=2;
  ]
]
] "END OF |X-(1,6)|"
ELSEIF (ABS(X(NP)-PCOORD(1,9))<EPS) [
  IF (Y(NP)>PCOORD(2,13) & Y(NP)<PCOORD(2,12)) [
    IF (U(NP).GE.0) [
      X(NP)=PCOORD(1,9)+EPS;IRNEW=2;
    ]
    IF (U(NP)<0) [
      X(NP)=PCOORD(1,9)-EPS;IRNEW=1;
    ]
  ]
]
IF (Y(NP)>PCOORD(2,15) & Y(NP)<PCOORD(2,14)) [
  IF (U(NP).GE.0) [
    X(NP)=PCOORD(1,9)+EPS;IRNEW=2;
  ]
  IF (U(NP)<0) [
    X(NP)=PCOORD(1,9)-EPS;IRNEW=1;
  ]
]
] "END OF |X-(1,9)|"
ELSEIF (ABS(Y(NP)-PCOORD(2,12))<EPS) [
  IF (X(NP)>PCOORD(1,8) & X(NP)<PCOORD(1,5)) [
    IF (V(NP).GE.0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,12)+EPS;IRNEW=2;
    ]
    IF (V(NP)<0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,12)-EPS;IRNEW=1;
    ]
  ]
]
IF (X(NP)>PCOORD(1,6) & X(NP)<PCOORD(1,9)) [

```



```

IF (V(NP).GE.0) [
  Y(NP)=PCOORD(2,12)+EPS;IRNEW=2;
  ]
IF (V(NP)<0) [
  Y(NP)=PCOORD(2,12)-EPS;IRNEW=1;
  ]
]
] "END OF |Y-(1,12)|"
ELSEIF (ABS(Y(NP)-PCOORD(2,13))<EPS) [
  IF (X(NP)>PCOORD(1,8) & X(NP)<PCOORD(1,5)) [
    IF (V(NP).GE.0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,13)+EPS;IRNEW=1;
      ]
    IF (V(NP)<0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,13)-EPS;IRNEW=2;
      ]
    ]
  ]
IF (X(NP)>PCOORD(1,6) & X(NP)<PCOORD(1,9)) [
  IF (V(NP).GE.0) [
    Y(NP)=PCOORD(2,13)+EPS;IRNEW=1;
    ]
  IF (V(NP)<0) [
    Y(NP)=PCOORD(2,13)-EPS;IRNEW=2;
    ]
  ]
] "END OF |Y-(1,13)|"
ELSEIF (ABS(Y(NP)-PCOORD(2,14))<EPS) [
  IF (X(NP)>PCOORD(1,8) & X(NP)<PCOORD(1,5)) [
    IF (V(NP).GE.0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,14)+EPS;IRNEW=2;
      ]
    IF (V(NP)<0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,14)-EPS;IRNEW=1;
      ]
    ]
  ]
IF (X(NP)>PCOORD(1,6) & X(NP)<PCOORD(1,9)) [
  IF (V(NP).GE.0) [
    Y(NP)=PCOORD(2,14)+EPS;IRNEW=2;
    ]
  IF (V(NP)<0) [
    Y(NP)=PCOORD(2,14)-EPS;IRNEW=1;
    ]
  ]

```

```

]
]
] "END OF |Y-(1,14)|"
ELSEIF (ABS(Y(NP)-PCOORD(2,15))<EPS) [
  IF (X(NP)>PCOORD(1,8) & X(NP)<PCOORD(1,5)) [
    IF (V(NP).GE.0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,15)+EPS;IRNEW=1;
    ]
    IF (V(NP)<0) [
      Y(NP)=PCOORD(2,15)-EPS;IRNEW=2;
    ]
  ]
]
IF (X(NP)>PCOORD(1,6) & X(NP)<PCOORD(1,9)) [
  IF (V(NP).GE.0) [
    Y(NP)=PCOORD(2,15)+EPS;IRNEW=1;
  ]
  IF (V(NP)<0) [
    Y(NP)=PCOORD(2,15)-EPS;IRNEW=2;
  ]
]
] "END OF |Y-(1,15)|"
RETURN;
END;
" THIS SUBROUTINE IS ESSENTIALLY A COPY OF $CYLNDR"
" MODIFIED TO BE USED FOR VERTICAL(//TO X-AXIS) OR HORIZONTAL"
" (// TO Y-AXIS ) WRITTEN ON AUG. 9, 1999 BY B.S.MOON"
"
SUBROUTINE GCYLNDR
(XC,YC,GCYX,GCY,Y,GCYRAD2,GCYLU,GCYLV,INCY,IHIT,TCYL)
"
" GCYLY, GCYLY ARE THE (X,Y) COORDINATES OF THE PARTICLE WHEN
//Z-AXIS"
" GCYLY, GCYLY ARE THE (Y,Z) COORDINATES OF THE PARTICLE WHEN
//X-AXIS"
" GCYLY, GCYLY ARE THE (Z,X) COORDINATES OF THE PARTICLE WHEN
//Y-AXIS"
" GCYLU, GCYLV ARE THE (U,V) COMPONENTS OF PARTICLE VELOC WHEN
//Z-AXIS"
" GCYLU, GCYLV ARE THE (V,W) COMPONENTS OF PARTICLE VELOC WHEN
//X-AXIS"
" GCYLU, GCYLV ARE THE (W,U) COMPONENTS OF PARTICLE VELOC WHEN

```

```

//Y-AXIS"
"          "
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
  DELCYL = 1./(32.*1024.);          "used to be 1.e-3 1999.8.26 bsm"
  IF (GCYRAD2 .LT. 1. ) [DELCYL=1./2.**24;]
  ELSEIF (GCYRAD2 .LT. 4. ) [DELCYL=1./(2.**22);]

  GCYLX = GCYX - XC;
  GCYLY = GCYY - YC;
  IHIT=1;
  TCYL=0.0;
  ACYL=SQRT(GCYLU*GCYLU+GCYLV*GCYLV);
  IF ((ACYL.EQ.0.0)) THEN;
    IHIT=0;
  ELSE;
    BCYL=(GCYLX*GCYLU+GCYLY*GCYLV)/ACYL;
    CCYL=GCYLX*GCYLX+GCYLY*GCYLY -GCYRAD2;
    ARGCY=BCYL*BCYL-CCYL;
    IF ((ARGCY.LT.0.0)) THEN;
      IHIT=0;
    ELSE;
      IF ((ABS(CCYL).LT.DELCYL.AND.INCY.EQ.0.AND.BCYL.GE.0.0)) THEN;
        IHIT=0;
        E                L                S                E
IF((ABS(CCYL).LT.DELCYL.AND.INCY.EQ.1.AND.BCYL.LT.0.0))THEN;
        TCYL=-2.0*BCYL/ACYL;
      ELSE;
        IF ((INCY.EQ.1.AND.CCYL.GE.0.0)) THEN;
          IHIT=1;
          TCYL=DELCYL;
        ELSE IF((INCY.EQ.0.AND.CCYL.LE.0.0)) THEN;
          IHIT=1;
          TCYL=DELCYL;
        ELSE;
          ROOTCY=SQRT(ARGCY);
          IF ((CCYL.LT.0.0)) THEN;
            TCYL=(-BCYL+ROOTCY)/ACYL;
          ELSE IF((BCYL.LT.0.0)) THEN;
            TCYL=(-BCYL-ROOTCY)/ACYL;
          ELSE;
            IHIT=0;

```

```
        END IF;  
    END IF;  
    END IF;  
    END IF;  
    END IF;
```

```
RETURN;  
END;
```

부록 B : 프로그램명 GEM-HOLE

산업재산권번호 : 프로그램01-046

등록번호 : 2001-01-12-1992

프 로 그 램 요 약 서

1. 프로그램명 : GEM-HOLE

2. 저 작 자 : 문병수, 김장열, 김용균, 한상호, 정종은

3. 등록 기관 : 한국소프트웨어진흥원

4. 프로그램의 개요 :

이 프로그램은 기체전자증폭기(Gas Electron Multiplier - GEM)를 사용하는 X-선 영상검출기를 설계코자할 때 사용하는 EGS4코드의 Geometry부분 프로그램이다. GEM의 한 개 Hole을 모의한 것으로 Hole의 반경이 수십 μm 이고 코팅의 두께가 수백 nm 까지 입자 수송이 가능토록 일부 변수들에 Double Precision을 사용하였다. 또한, 원주형 Hole의 경계면 상에서 발생 가능한 Overshoot 와 Undershoot문제를 해결하도록 경계면 취급 Subroutine을 포함하고 있다. GEM Plate의 재질은 PBO를 사용하였으며 박막의 코팅 재질은 CsI를 사용하였다.

코팅의 외벽으로부터 20 nm 이내에서 생성되는 에너지가 500eV 이내의 Secondary Electron에 대한 에너지 Spectrum과 Hole내부의 상하 위치에 따른 입자 분포를 계산한다. 따라서, EGS4를 사용하여 Hole내부로 들어오는 Secondary Electron을 직접 산출할 수 없는 반면 이 프로그램 계산 결과는 이들 입자에 대한 에너지 정보를 유추할 수 있도록 해 준다. 이 프로그램은 최적의 X-선 입자 에너지 산출, 코팅 두께에 따른 입자 수의 변화 등 영상 검출기 설계 변수 값들을 산출하는데 사용할 수 있다.

```

%L
%E
!INDENT M4;                "INDENT MORTRAN LISTING BY 4 PER
LEVEL"
!INDENT F2;                "INDENT FORTRAN OUTPUT BY 2 PER
LEVEL"
"=====
"PROGRAM FOR THICKNESS SIMULATION"
"PROGRAMMED BY BYUNG SOO MOON -NOV.28, 2000 "
"=====
"STEP 1 : ADDITIONAL MACRO"
"=====
"RANDOM GENERATER @ 32-BIT MACHINE"
REPLACE {;COMIN/RANDOM/;} WITH
    {;COMMON/RANDOM/IXX;}
REPLACE {$RANDOMSET#;} WITH
    {IXX=IXX*663608941; {P1}=0.5+IXX*0.23283064E-9;}
REPLACE {$RANDOMNO#;} WITH
    {JXX=JXX*663608941; {P1}=0.5+JXX*0.23283064E-9;}
REPLACE {;COMIN/EBIN/;} WITH
    {;COMMON/EBIN/NCH,ESUM,CHANEL(1024);}
REPLACE {DOUBLE PRECISION E;} WITH
    {DOUBLE PRECISION E,X,Y,Z,U,V,W;}
REPLACE {DOUBLE PRECISION EDEP;} WITH
    {DOUBLE PRECISION EDEP,TSTEP,TUSTEP,USTEP,TVSTEP,VSTEP;}
REPLACE {$EVALUATE#USING SIN(#);} WITH
    {{P1}=SIN({P2});}
REPLACE {$EVALUATE SINTHE USING SIN(THETA);} WITH
    {SINTHE=SIN(THETA);}
REPLACE {$EVALUATE COSTHE USING SIN(CTHET);} WITH
    {COSTHE=COS(THETA);}
REPLACE {$EVALUATE SINPHI USING SIN(PHI);} WITH
    {SINPHI=SIN(PHI);}
REPLACE {$EVALUATE COSPHI USING SIN(CPHI);} WITH
    {COSPHI=COS(PHI);}
REPLACE {C#=PI5D2-#;} WITH {}
REPLACE {$SET INTERVAL#,SINC;} WITH {}
"USER INPUT UNIT DEFINE MACRO"
REPLACE {$INIT_IN;} WITH
    {;OPEN(UNIT=5,FILE='user.egs4inp',STATUS='OLD');}
REPLACE {;INPUT#;#;} WITH

```

```

      {;{SETR A =@LG}READ(5,{COPY A}){P1};{COPY A}FORMAT{P2};}
REPLACE {$INIT_OUT;} WITH
      {;OPEN(UNIT=1,FILE='USER.OUT');}
REPLACE {;OUTPUT1#;#;} WITH
      {;{SETR A =@LG}WRITE(1,{COPY A}){P1};{COPY A}FORMAT{P2};}
"=====
"STEP 2 : USER OVER RIDE OF EGS MACROS & ARRAY ARGUMENT SETTING"
"=====
REPLACE {$MXMED} WITH {2}                                "DEFAULT 10 MATERIAL"
REPLACE {$MXREG} WITH {5}                                "DEFAULT 2000 REGION"
REPLACE {$MXSTACK} WITH {100}                            "STACK SIZE"
REPLACE {$MXPLNS} WITH {3}                               "MAX NUMBER OF PLANES"
REPLACE {$MXCYLS} WITH {2}                               "MAX NUMBER OF
CYLINDERS"
;COMIN/BOUNDS,MEDIA,MISC,PLADTA,CYLDTA,RANDOM,STACK,THRESH,UPHIOT
,USEFUL/;
;COMIN/EBIN/;
CHARACTER*4 TEMP(24,5);
COMMON/TROUBLE/NCASE;
COMMON/RESULT/ ERGIN,NPARTIC,NZDSTR(1024),NEDSTR(1024);
"=====
":STEP 3 : READ TRANSPORT PROPERTIES"
"=====
$INIT_IN;                                "USER INPUT UNIT = 5(@MACHINE.MAC)"
DO J=1,$MXMED [INPUT (TEMP(I,J),I=1,24);(24A1);]    "READ MATERIAL NAME"
INPUT NCASE;(I8);                            "READ NUMBER OF HISTORY"
INPUT TCSI1;(F15.8);                          "THICKNESS OF CSI COATING(Cm)"
INPUT TCSI2;(F15.8);                          "RADIAL THICKNESS OF CSI CYLINDER"
INPUT HEIGHT;(F15.8);                         "DEPTH OF CSI CYLINDER"
INPUT DIST1;(F15.8);                          "DISTANCE FROM SOURCE TO CSI PLATE"
INPUT RADIUS;(F15.8);                         "RADIUS OF THE HOLE"
INPUT ERGIN;(F15.8);                          "INITIAL ENERGY OF THE INPUT X-RAY"
"=====
"STEP 4 : INITIALIZATION FOR HATCH"
"=====
NREG=$MXREG;
NMED=$MXMED;                                    "VARIABLE FOR MATERIAL
NUMBER"
NPLNS=$MXPLNS;
NDIM=100;NPARTIC=0;
DO J=1,NMED[DO I=1,24 [MEDIA(I,J) = TEMP(I,J);]] "MATERIAL NAME SETTING"

```



```

"SET MEDIUM NUMBER"
DO I=1,NREG [MED(I)=0;]
MED( 2)=1;MED(3)=2;                                "MATERIAL"
"=====
"STE
"=====
CALL HATCH;                                         "PICK UP CROSS SECTION DATA"
$INIT_OUT;
OUTPUT1;(' QUANTITIES ASSOCIATED WITH EACH MEDIA :');
DO J=1,NMED [
  OUTPUT1 (MEDIA(I,J),I=1,24); (1X,24A1);
  OUTPUT1 RHO(J),RLC(J);
    (' RHO =',1P,E15.7,' G/CM**3',5X,'RLC =',1P,E15.7,' CM');
  OUTPUT1 AE(J),UE(J);
    (' AE =',1P,E15.7,' MeV   ',5X,'UE =',1P,E15.7,' MeV');
  OUTPUT1 TE(J);
    (' TE =',1P,E15.7,' MeV   ');
  OUTPUT1 AP(J),UP(J);
    (' AP =',1P,E15.7,' MeV   ',5X,'UP =',1P,E15.7,' MeV');
  ]
"COMPTON EVENTS CAN CREATE ELECTRONS AND PHOTONS BELOW THESE
CUTOFFS"
"=====
"STEP 6 : INITIALIZATION FOR SUBROUTINE HOWFAR"
"=====
"SET PLANE'S NORMAL VECTOR & ORIGIN"
DO I=1,3 [PNORM(1,I),PNORM(2,I)/=0.0; PNORM(3,I)=1.0;]
DO I=1,3 [/PCOORD(1,I),PCOORD(2,I),PCOORD(3,I)/=0.0;]
PCOORD(3,1)=DIST1;
PCOORD(3,2)=DIST1+TCSI1;
PCOORD(3,3)=DIST1+HEIGHT;
CYRAD2(1)=RADIUS**2;
CYRAD2(2)=(RADIUS+TCSI2)**2;
"=====
"STEP 7 : DETERMINATION OF INCIDENT PARTICLE PROPERTIES"
"=====
/XI,YI/=0.;ZI=0;                                "COORDINATES OF INCIDENT PARTICLE"
IQI= 0;IRI=1;                                "INCIDENT PARTICLE STARTS OUT IN REGION 1"
WTI=1.0;                                       "WEIGHT FACTOR"
IXX=87654321;JXX=IXX;                          "RANDOM NUMBER SEED"
"=====

```

```

"STEP 8 : INITIALIZATION FOR SUBROUTINE AUSGAB"
"=====
DO I=1, NREG [ECUT(I)=0.512000;PCUT(I)=0.001;]          "SET CUT OFF ENERGY"
"=====
"STEP 9 : CALL SHOWER"
"=====
"CALL CHKTIM;"          "INITIATE THE SHOWER NCASE
TIMES"
  ANGLE=ATAN(1.5*RADIUS/DIST1);
DO LOOP=1, 5 [
DO I=1,NCASE [          "should be NCASE"
  IF(MOD(I,1000)=0) [OUTPUT LOOP,I,NCASE;(1X,'HISTORY = ',3I12);]
  ESUM=0.0;

  EI=ERGIN;
  $RANDOMNO RANWI;RANWI=RANWI*ANGLE;WI=COS(RANWD);
  $RANDOMNO RANPHI;PHI=RANPHI*PI*2.;
  UI=SIN(RANWI)*SIN(PHI);VI=SIN(RANWI)*COS(PHI);
  CALL SHOWER(IQI,EI,XI,YI,ZI,UI,VI,WI,IRI,WTI);
    ]          "end of NCASE"
  ]          "end of loop"
"=====
"STEP 10 : OUTPUT OF RESULT"
"=====
"PRINT TRANSPORT PARAMETER"
OUTPUT1 NCASE,DIST1;
(1X,'NUMBER OF HISTORY : ',I8,' DISTANCE TO OBJECT',F8.3,' cm');
OUTPUT1 HEIGHT,TCSI1,TCSI2;
(1X,'HEIGHT OF HOLE',F9.6,' cm, THICK of CSI COATING',F9.6,
' cm, RADIAL Thick of CSI',F9.6,' cm');
OUTPUT1 RADIUS;
(1X,'RADIUS OF THE HOLE',F9.6);
OUTPUT1 ERGIN,NPARTIC;
(1X,'ENERGY',F8.3,' keV, NO OF PARTICLE HIT PLATE',I10);
OUTPUT1 (I,NZDSTR(I),I=1,1024);(6(1X,I5,I6));
OUTPUT1 (I,NEDSTR(I),I=1,1024);(6(1X,I5,I6));
STOP;END;
"=====
SUBROUTINE AUSGAB(IARG);
"=====
;COMIN/BOUNDS,EBIN,STACK,EPCONT,PLADTA,MEDIA,THRESH,UPHIOT,USEFUL/;

```

```

COMMON/RESULT/ ERGIN,NPARTIC,NZDSTR(1024),NEDSTR(1024);
ENER=0.04048/1024.;ZHITE=(PCOORD(3,3)-PCOORD(3,1))/1024.;
ZNP=Z(NP)-PCOORD(3,1);
IRL=IR(NP);                                "LOCAL VARIABLE"
EDEPWT=EDEP*WT(NP);
IF(IRL=5) [
  IF (IQ(NP) .EQ. -1 ) [
    ESUM=ESUM+EDEPWT;
    NPARTIC=NPARTIC+1;
    "OUTPUT1 IQ(NP),EDEPWT,ESUM,ZNP;"
    "(' AUSGAB',I5,3E15.8);"
    DO KK=1,1024 [
      IF ((ESUM=>(KK-1)*ENER)&(ESUM<KK*ENER)) [
        NEDSTR(KK)=NEDSTR(KK)+1;          ]
      IF ((ZNP =>(KK-1)*ZHITE)&(ZNP<KK*ZHITE))[
        NZDSTR(KK)=NZDSTR(KK)+1;          ]
      ]
    ]                                     "end of IQ(NP)=-1"
  ]
RETURN;END;
%E
"=====
SUBROUTINE HOWFAR;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
COMMON/RESULT/ ERGIN,NPARTIC,NZDSTR(1024),NEDSTR(1024);
DOUBLE PRECISION XF,YF,ZF,TCYL,TPLN,EPS,XYRAD,TCYL2;
IRL=IR(NP);
ENER=0.001/1024.;ZHITE=(PCOORD(3,3)-PCOORD(3,1))/1024.;
ZNP=Z(NP)-PCOORD(3,1);

  IF (IRL.EQ.2 .OR. IRL.EQ.3) CALL BDRY;
EPS=0.5E-7;
XYRAD = X(NP)**2 + Y(NP)**2;
  IRL=IRNEW;
  IF (USTEP.LT.0.5E-7.AND.IRL.EQ.2) [IDISC=1;RETURN;]
  IF (USTEP.LT.0.5E-7.AND.IRL.EQ.3) [IDISC=1;RETURN;]
  "OUTPUT1 IR(NP),IRNEW,Z(NP),XYRAD,USTEP;"
  "(1X,2I5,4E15.8);"

```

```

IF(XYRAD.GE.100.[IRL.GE.4|Z(NP).LT.0.)
  [IDISC=1;RETURN;]
ELSEIF(IRL=1) [
  INCY=1;
  CALL GCYLNDR(X(NP),Y(NP),CYRAD2(1),U(NP),V(NP),INCY,JHIT,TCYL);
  IF (JHIT.NE.1) [IDISC=1;RETURN;]
  IF (JHIT.EQ.1) [
    IF (TCYL .LE. USTEP) [
      $FINVAL(TCYL,XF,YF,ZF);
      IF (ZF.LT.PCOORD(3,1)) [
        $PLANE1(1,1,KHIT,TPLN);
        IF (KHIT.NE.1) [IDISC=1;RETURN;]
        IF (KHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN,2);]
      ]
      IF (ZF.GE.PCOORD(3,1).AND.ZF.LT.PCOORD(3,3)) [
        $CHGTR(TCYL,2); ]
      IF (ZF.GE.PCOORD(3,3)) [IDISC=1;RETURN;]
    ] "end of TCYL .le.USTEP"
  ]
  IF (TCYL.GT.USTEP) [
    $PLANE1(1,1,KHIT,TPLN);
    IF (KHIT.EQ.1) [
      $FINVAL(TPLN,XF,YF,ZF);
      XYRADF=XF**2+YF**2;
      IF (XYRADF.GT.CYRAD2(1)) [$CHGTR(TPLN,2);]
      ELSE [IDISC=1;RETURN;]
    ]
  ] "END OF TCYL>USTEP"
] "END OF JHIT=1"
ELSEIF(IRL=2) [
  IF (Z(NP).LT.PCOORD(3,1)) [IDISC=1;RETURN;]
  ELSEIF (Z(NP).LE.PCOORD(3,2)) [
    INCY=0;
    CALL GCYLNDR(X(NP),Y(NP),CYRAD2(1),U(NP),V(NP),INCY,IHIT,TCYL);
    IF (IHIT.EQ.1) [
      IF (TCYL.GT.USTEP) [
        $PLANE1(1,-1,JHIT,TPLN);
        IF (JHIT.EQ.1) [IF (TPLN.LT.USTEP) [IDISC=1;RETURN;]]
        IF (JHIT.NE.1) [
          $PLANE1(2,1,KHIT,TPLN);
          IF (KHIT.EQ.1 .AND. TPLN.LE.USTEP) [

```

```

$FINVAL(TPLN,XF,YF,ZF);
XYRADF=XF**2+YF**2;
IF (XYRADF.GE.CYRAD2(2)) [
  IF (TPLN.LE.USTEP) [
    IRNEW=3;USTEP=TPLN;
  ] ]
] "end of khit=1 & .."
] "END OF JHIT.NE.1"
] "end of tcyl>ustep"
IF (TCYL.LE.USTEP) [
  $PLANE1(1,-1,JHIT,TPLN);
  IF (JHIT.EQ.1) [
    IF (TCYL.LT.TPLN) [USTEP=TCYL;IRNEW=5;]
    ELSE [IDISC=1;RETURN;]
  ] "end of jhit=1"
  IF (JHIT.NE.1) [

    $PLANE1(2,1,KHIT,TPLN);
    IF (KHIT.NE.1) [$CHGTR(TCYL,5);]
    IF (KHIT.EQ.1 .AND. TPLN.LT.TCYL) [
      $FINVAL(TPLN,XF,YF,ZF);
      XYRADF=XF**2+YF**2;
      IF (XYRADF.GT.CYRAD2(2)) [$CHGTR(TPLN,3);]
      ELSE [$CHGTR(TCYL,5);]
    ]
    IF (KHIT.EQ.1 .AND. TPLN.GE.TCYL) [
      $CHGTR(TCYL,5);
    ] "end of jhit.ne.1"
  ] "end of tcyl<=ustep"
] "end of ihit=1"
IF (IHIT.NE.1) [
  $PLANE1(1,-1,JHIT,TPLN);
  IF (JHIT.EQ.1) [IF (TPLN.LE.USTEP)[IDISC=1;RETURN;]]
  ELSE [
    $PLANE1(2,1,KHIT,TPLN);
    IF (KHIT.EQ.1) [
      $FINVAL(TPLN,XF,YF,ZF);
      XYRADF=XF**2+YF**2;
      IF (TPLN.LE.USTEP) [
        IF (XYRADF.GE.CYRAD2(2)) [
          IRNEW=3;USTEP=TPLN;

```

```

]
ELSE [
    INCY=1;
CALL GCYLNDR(X(NP),Y(NP),CYRAD2(2),U(NP),V(NP),INCY,LHIT,TCYL2);
    IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TCYL2,3);]
    ]
]
] "END OF KHIT=1"
IF (KHIT.NE.1) [IDISC=1;RETURN;]
] "end of else"
] "end of IHIT.ne.1"
] "end of z(np)<(3,2)"
ELSEIF (Z(NP).GT.PCOORD(3,2).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,3)) [
INCY=0;
CALL GCYLNDR(X(NP),Y(NP),CYRAD2(1),U(NP),V(NP),INCY,IHIT,TCYL);
IF (IHIT.EQ.1) [
    $PLANE1(3,1,JHIT,TPLN);
    IF (JHIT.EQ.1) [
        IF (TPLN.LE.TCYL) [$CHGTR(TPLN,4);]
        IF (TPLN.GT.TCYL) [
            IF (TCYL.LE.USTEP) [IRNEW=5;IDISC=1;]
            ]
        ]
    ]
    IF (JHIT.NE.1.AND.TCYL.LE.USTEP) [IRNEW=5;IDISC=1;]
    ]
IF (IHIT.NE.1) [
    INCY=1;
CALL GCYLNDR(X(NP),Y(NP),CYRAD2(2),U(NP),V(NP),INCY,JHIT,TCYL);

IF (JHIT.EQ.1) [
    $FINVAL(TCYL,XF,YF,ZF);
    IF (ZF.LE.PCOORD(3,1)) [
        $PLANE1(1,-1,LHIT,TPLN);
        IF (LHIT.EQ.1 .AND. TPLN.LE.USTEP) [
            IDISC=1;RETURN;
        ]
    ]
    IF (ZF.GT.PCOORD(3,1).AND.ZF.LT.PCOORD(3,3)) [
        IF (TCYL.LE.USTEP) [IRNEW=3;USTEP=TCYL;RETURN;]
        IF (TCYL.GT.USTEP) [IRNEW=2;RETURN;]
    ]
    IF (ZF.GE.PCOORD(3,3)) [
        $PLANE1(3,1,KHIT,TPLN);

```

```

        IF (KHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN,4);]
        IF (KHIT.NE.1) [IDISC=1;RETURN;]
            ]
    ]
ELSE [
    $PLANE1(1,-1,KHIT,TPLN);
    IF (KHIT.EQ.1) [
        IF (TPLN.LE.USTEP) [IDISC=1;RETURN;]
            ]
    IF (KHIT.NE.1) [
        $PLANE1(3,1,LHIT,TPLN);
        IF (LHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN,4);]
        IF (LHIT.NE.1) [IDISC=1;RETURN;]
            ]
    ]
    ]
    ]
    ]"END OF IHIT.NE.1"
] "END OF Z(NP)>(3,2)"

ELSEIF (Z(NP).GE.PCOORD(3,3)) [
    IRNEW=4;IDISC=1;RETURN;    ]
    ]

ELSEIF( IRL=3) [
    INCY=0;
    IF (XYRAD.LT.CYRAD2(2)) INCY=1;
    CALL GCYLNDR(X(NP),Y(NP),CYRAD2(2),U(NP),V(NP),INCY,IHIT,TCYL);
    IF (IHIT.EQ.1) [
        IF (TCYL.GT.USTEP) [
            $PLANE1(2,-1,JHIT,TPLN);
            IF (JHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN,2);]
            IF (JHIT.NE.1) [
                $PLANE1(3,1,KHIT,TPLN);
                IF (KHIT.EQ.1) [
                    IF (TPLN.LE.USTEP) [IDISC=1;RETURN;]
                ]
            ]
        ]
    ]
    ] "end of khit=1"
    ] "END OF JHIT.NE.1"
    ] "END OF TCYL>USTEP"

IF (TCYL.LE.USTEP) [
    $PLANE1(2,-1,JHIT,TPLN);
    IF (JHIT.EQ.1) [
        IF (TCYL.LE.TPLN) [
            IF (TCYL.LE.USTEP) [

```

```

        IRNEW=2;USTEP=TCYL;
        ]
    ]
ELSE [$CHGTR(TPLN,2);
    ] "END OF JHIT=1"
IF (JHIT.NE.1) [
    $PLANE1(3,1,KHIT,TPLN);
    IF (KHIT.EQ.1) [
        IF (TPLN.LE.TCYL) [
            IF (TPLN.LE.USTEP) [IRNEW=4;USTEP=TPLN;IDISC=1;RETURN;]
        ]
        ELSE [
            IF (TCYL.LE.USTEP) [
                IRNEW=2;USTEP=TCYL;
            ]
        ]
    ] "END OF KHIT=1"
    IF (KHIT.NE.1) [$CHGTR(TCYL,2);
        ] "END OF JHIT.NE.1"
    ] "end of tcyl <= ustep"
    ] "end of ihit=1"
IF (IHIT.NE.1) [
    $PLANE1(2,-1,JHIT,TPLN);
    IF (JHIT.EQ.1) [$CHGTR(TPLN,2);
    IF (JHIT.NE.1) [
        $PLANE1(3,1,KHIT,TPLN);
        IF (KHIT.EQ.1) [
            IF (TPLN.LE.USTEP) [IRNEW=4;USTEP=TPLN;IDISC=1;RETURN;]
        ]
        ] "END OF JHIT.NE.1"
    ] "END OF IHIT.NE.1"
    ] "end of IRL=3"
ELSEIF(IRL=4) [IDISC=1;RETURN;]
ELSEIF(IRL=5) [
    "EDEPWT=EDEP*WT(NP);"
    "IF (IQ(NP).EQ.-1) ["
        "NPARTIC=NPARTIC+1;"
        "ESUM=ESUM+EDEPWT;"
        "ZNP=Z(NP)-PCOORD(3,1);"
    "OUTPUT1 IQ(NP),NPARTIC,Z(NP),ZNP,ZHITE,EDEPWT;"
    "(' IRL5',2I5,4E15.8);"

```



```

"DO KK=1,1024 ["
  "IF ((EDEPWT=>(KK-1)*ENER)&(EDEPWT<KK*ENER)) ["
    "NEDSTR(KK)=NEDSTR(KK)+1;          ]"
  "IF ((ZNP =>(KK-1)*ZHYTE)&(ZNP<KK*ZHYTE))["
    "NZDSTR(KK)=NZDSTR(KK)+1;          ]"
    "]"
    "end of do kk=1,1024"
  "]"
  "end of iq(np)=-1"
IDISC=1;RETURN;
]
RETURN;
END;
"=====
SUBROUTINE BDRY;
"=====
"SUBROUTINE FOR CHECK THE MULTIPLANE GEOMETRY"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
DOUBLE PRECISION EPS,EPS2,XYRAD,XYRADF,XF,YF,ZF;
  IRL=IR(NP);          "SET LOCAL VARIABLE"
  XYRAD = X(NP)**2 + Y(NP)**2;
$FINVAL(0.0001,XF,YF,ZF);
  XYRADF=XF**2+YF**2;
  EPS = 0.5E-10;
  EPS2 = 1.0E-06;

IF(DABS(Z(NP)-PCOORD(3,1)).LT.EPS) [
  IF(W(NP).GE.0|XYRAD>CYRAD2(1)) [
    Z(NP)=PCOORD(3,1)+EPS2;
    IRNEW=2;
    ]
  ELSE [
    Z(NP)=PCOORD(3,1)-EPS2;IRNEW=1;
    ]
    ]
    "end of |z(np)-(3,1)|<eps"
IF(DABS(Z(NP)-PCOORD(3,2)).LT.EPS) [
  IF(XYRADF.GE.CYRAD2(2)) [
    Z(NP)=PCOORD(3,2)+EPS2;
    IRNEW=3;
    ]
  ELSEIF (XYRADF.LT.CYRAD2(2)) [
    IRNEW=2;
    ]
    ]
    "end of |z(np)-(3,2)|<eps"

```

```

IF (DABS(Z(NP)-PCOORD(3,3)).LT.EPS)[
  IF (W(NP).GE.0) [
    Z(NP)=PCOORD(3,3)+EPS;IRNEW=4;
    ]
  IF (W(NP).LT.0) [
    IF (XYRAD.GT.CYRAD2(2)) [
      Z(NP)=PCOORD(3,3)-EPS;
      IRNEW=3;          ]
    ELSEIF (XYRAD.GT.CYRAD2(1)) [
      Z(NP)=PCOORD(3,3)-EPS;
      IRNEW=2;          ]
    ELSEIF (XYRAD.LE.CYRAD2(1)) [
      IDISC=1;RETURN;   ]
    ]
  ]
IF (Z(NP).GE.PCOORD(3,1).AND.Z(NP).LT.PCOORD(3,3))[
  DIFFRAD=DABS(XYRAD-CYRAD2(2));
  IF (DABS(XYRAD-CYRAD2(1)).LT.EPS) [
    IF (XYRADF.LT.XYRAD) [
      X(NP)=X(NP)*(1-20*EPS2);
      Y(NP)=Y(NP)*(1-20*EPS2);
      IRNEW=5;IDISC=1;]
    ELSE          [
      X(NP)=X(NP)*(1+10*EPS2);
      Y(NP)=Y(NP)*(1+10*EPS2);
      IRNEW=2;
      ]
    ]
  IF (DABS(XYRAD-CYRAD2(2)).LT.EPS) [
    IF (XYRADF.LT.XYRAD) [
      X(NP)=X(NP)*(1- 2*EPS2);
      Y(NP)=Y(NP)*(1- 2*EPS2);
      IRNEW=2;          ]
    ELSEIF (Z(NP).GE.PCOORD(3,2)) [
      X(NP)=X(NP)*(1+ 2*EPS2);
      Y(NP)=Y(NP)*(1+ 2*EPS2);
      IRNEW=3;
      IDISC=1;          ]
    XYRADS=X(NP)**2+Y(NP)**2;
    ]
  ]
]

```

```

ELSEIF (Z(NP)>PCOORD(3,2).AND.Z(NP)<PCOORD(3,3))[
  IF (DABS(XYRAD-CYRAD2(2)).LT.EPS) [
    IF (XYRADF.LT.XYRAD) [
      X(NP)=X(NP)*(1-EPS2);
      Y(NP)=Y(NP)*(1-EPS2);
      IRNEW=2;          ]
    IF (XYRADF.GE.XYRAD) [
      X(NP)=X(NP)*(1+EPS2);
      Y(NP)=Y(NP)*(1+EPS2);
      IRNEW=3;          ]
    ]
  ELSEIF (XYRADF.GT.CYRAD2(2)) [
    IRNEW=3;          ]
  ]

XYRAD=X(NP)**2 + Y(NP)**2;
RETURN;
END;
"
  SUBROUTINE                                GCYLNDR
(GCYX,GCYY,GCYRAD2,GCYLU,GCYLV,INCY,IHIT,TCYL)
"
"  GCYLX, GCYLY ARE THE (X,Y) COORDINATES OF THE PARTICLE WHEN
//Z-AXIS"
"  GCYLX, GCYLY ARE THE (Y,Z) COORDINATES OF THE PARTICLE WHEN
//X-AXIS"
"  GCYLX, GCYLY ARE THE (Z,X) COORDINATES OF THE PARTICLE WHEN
//Y-AXIS"
"  GCYLU, GCYLV ARE THE (U,V) COMPONENTS OF PARTICLE VELOC WHEN
//Z-AXIS"
"  GCYLU, GCYLV ARE THE (V,W) COMPONENTS OF PARTICLE VELOC WHEN
//X-AXIS"
"  GCYLU, GCYLV ARE THE (W,U) COMPONENTS OF PARTICLE VELOC WHEN
//Y-AXIS"
"
"
;COMIN/STACK,EPCONT,PLADTA,CYLDTA/;
DOUBLE PRECISION TCYL,DELACYL,GCYLX,GCYLY,ACYL,BCYL,CCYL;
DOUBLE PRECISION ARGCY,ROOTCY,GCYX,GCYY,GCYLU,GCYLV;
  DELACYL = 1./(32.*1024.);                "used to be 1.e-3 1999.8.26 bsm"
  IF (GCYRAD2 .LT. 1. ) [DELACYL=1./2.**36;]
  ELSEIF (GCYRAD2 .LT. 4. ) [DELACYL=1./(2.**22);]
  GCYLX = GCYX;

```

```

GCYLY = GCYY;
IHIT=1;
TCYL=0.0;
ACYL=DSQRT(GCYLU*GCYLU+GCYLV*GCYLV);
IF ((ACYL.EQ.0.0)) THEN;
  IHIT=0;
ELSE;
  BCYL=(GCYLX*GCYLU+GCYLY*GCYLV)/ACYL;
  CCYL=GCYLX*GCYLX+GCYLY*GCYLY -GCYRAD2;
  ARGCY=BCYL*BCYL-CCYL;
  IF ((ARGCY.LT.0.0)) THEN;
    IHIT=0;
  ELSE;
    IF ((DABS(CCYL).LT.DELCYL.AND.INCY.EQ.0.AND.BCYL.GE.0.0)) THEN;
      IHIT=0;
      E                L                S                E
IF((DABS(CCYL).LT.DELCYL.AND.INCY.EQ.1.AND.BCYL.LT.0.0))THEN;
      TCYL=-2.0*BCYL/ACYL;
    ELSE;
      IF ((INCY.EQ.1.AND.CCYL.GE.0.0)) THEN;
        IHIT=1;
        TCYL=DELCYL;
      ELSE IF((INCY.EQ.0.AND.CCYL.LE.0.0)) THEN;
        IHIT=1;
        TCYL=DELCYL;
      ELSE;
        ROOTCY=DSQRT(ARGCY);
        IF ((CCYL.LT.0.0)) THEN;
          TCYL=(-BCYL+ROOTCY)/ACYL;
        ELSE IF((BCYL.LT.0.0)) THEN;
          TCYL=(-BCYL-ROOTCY)/ACYL;
        ELSE;
          IHIT=0;
        END IF;
      END IF;
    END IF;
  END IF;
END IF;

RETURN;
END;

```

부록 C : Micro Channel Plate 에 의해
생성되는 전자의 수 추정

요 약 문

이보고서는 X-선 영상장비용 GEM(gas Electron Multplier)검출기 설계와 관련하여 수행한 내용을 기술하고 있다. GEM검출기는 Micro-channel plate (MCP)를 사용하는데 입사한 X-선 입자 대비 MCP로부터 생성되는 전자의 수를 계산 또는 추정한 결과에 대하여 기술하고 있다. 계산에 사용한 Micro-channel plate는 직경이 $25\ \mu\text{m}$ 이고 pitch가 $37\ \mu\text{m}$ 인 Hole들로 구성되어 있으며 MCP의 표면과 Hole의 내부는 두께가 $0.3\ \mu\text{m}\sim 1.0\ \mu\text{m}$ 인 CsI로 코팅되어 있다. Hole의 내부로 방출되는 Primary electron의 수는 EGS4를 사용하여 직접 계산하였으며 CsI물질내에 생성된 2차 전자들 중 Hole의 내부나 MCP 표면으로 방출되는 2차전자는 Escape Depth를 사용하여 산출하였다. 또한, CsI코팅 내에 생성된 10keV 미만의 Primary 전자들로부터 생성되는 2차 전자들 중 표면이나 Hole내부로 방출되는 2차 전자들은 Universal Yield Curve를 사용하여 추정하였다.

- 목 차 -

제 1 장 서론	C-6
제 2 장 CsI 판에 의해 생성된 전자의 수	C-10
1. CsI의 Conversion Efficiency 및 Detection Yield	C-11
제 3 장 Micro-channel Plate의 Hole에서 생성된 2차 전자의 수	C-15
1. CsI판 반대편에서 생성되는 전자의 수	C-15
2. CsI판 표면에서 생성되는 전자의 수	C-16
3. MCP hole의 내부와 표면에서 생성된 전자수의 비교	C-18
4. Hole의 위치에 따른 생성된 전자수의 변화	C-19
제 4 장 MCP Hole내부로 방출되는 Primary Electron의 수	C-22
제 5 장 결 론	C-25
참 고 문 헌	C-26

표 목 차

표-1. Electron Range - 계산값과 실험값 비교	C-11
표-2. 입사면과 반대면에서 생성된 전자의 수	C-16
표-3. MCP Hole의 크기에 따른 생성 전자수	C-19
표-4. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자 수 (Photon 5000만개 사용)	C-19
표-5. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자 수 (Photon 2억개 사용)	C-20

그림 목 차

그림 1. GEM검출기와 Micro-Channel Plate	C-6
그림 2. Universal Yield Curve의 예	C-8
그림 3. Simulation에 사용된 MCP의 기하 구조	C-9
그림 4. 알미늄내에서 Electron Flux 분포	C-10
그림 5. EGS4를 사용하여 산출한 CsI의 Detection Yield	C-12
그림 6. CsI판이 Photon의 입사각과 이루는 각도에 따른 생성 전자수의 변화	C-15
그림 7. 입사각에 따른 생성 전자수의 변화	C-16
그림 8. CsI판 상하단에서 생성된 전자수의 비교	C-17
그림 9. MCP Hole의 내부와 상단에서 생성된 전자 수의 비교	C-18
그림 10. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자수 (Photon 5000만개 사용)	C-20
그림 11. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자수 (Photon 2억개 사용)	C-21
그림 12. MCP Hole내부로 방출된 Photo Electron의 에너지 Spectrum	C-22
그림 13. MCP Hole로 방출된 Photo Electron의 축 방향 분포	C-23
그림 14. CsI코팅 두께 및 입사 에너지에 따른 생성 전자 수	C-24

제 1 장 서론

이 보고서는 원자력 실용화 연구사업의 일환으로 2000년 11월에 착수하여 수행중인 ‘방사선 영상장비용 GEM 검출기 개발’ 과제와 관련하여 작성한 것이다. 개발 중인 GEM(Gas Electron Multiplier) 검출기는 그림 1과 같이 상단에 Micro-Channel Plate를 사용하여 X-선을 전자로 변환한 후 고전압에 의해 GEM판을 통과토록 전자들을 증폭한 후 이를 검출하여 사용한다. 이 때 Micro-Channel Plate에 의해 생성되는 저 에너지 전자의 수는 X-선의 에너지나 CsI 코팅 두께 등에 따라 달라지게 될 것이다. 이들 인자에 따라 입사한 Photon의 개수 대비 생성되는 전자의 수를 예측하는 일은 GEM검출기 설계의 일부이며 이 보고서에서는 이들에 대한 계산 결과를 기술하고 있다.

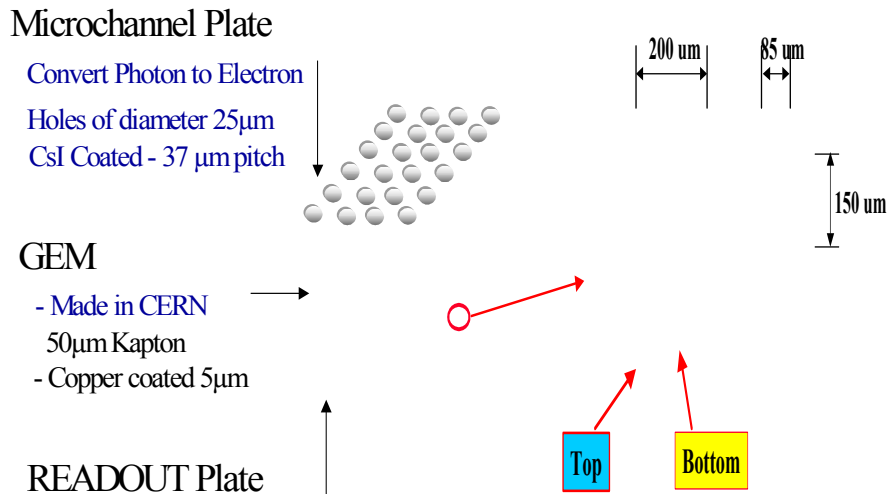


그림 1. GEM검출기와 Micro-Channel Plate

이 보고서에서 사용한 Micro-Channel Plate의 기하학적 구조는 Hole의 직경이 $25\mu\text{m}$ 이고 Hole들간의 Pitch가 $37\mu\text{m}$ 인 것으로 한정하였으며 Hole의 내부와 Micro-Channel Plate상단 표면은 CsI에 의하여 코팅된 것으로 가정하였다. 편의상 코팅은 표면 및 Hole의 내부에서 두께가 같은 것으로 가정하였다. 주요 계산 내용은 여러 가지 X-선 에너지 값에 따라 생성된 저 에너지 전자의 수가 어떻게 변하는지, X-선 수직입사 지점으로부터 Hole의 위치가 멀어질 때 생성된 전자의 수가 어떻게 달라지는지, 그리고, 코팅 물질인 CsI의 두께에 따라 생성되는 전자의 수가 어떻게 달라지는지 등이다.

계산 방법은 먼저 EGS4를 사용하여 입사한 Photon의 에너지가 1keV 미만이 될 때까지 수송하고 생성된 전자들의 경우 역시 에너지가 10keV 미만이 될 때까지 수

송하였으며 그 후 문헌에 밝혀진 관련 실험 데이터를 사용하여 생성되는 저 에너지 전자의 수를 추산하였다. EGS4에 의하여 Micro-Channel Plate Hole 내부 까지 수송되는 전자는 에너지가 10keV를 초과하는 Primary Electron들 뿐이며 이는 실제 생성되는 저 에너지의 수에 비하여 훨씬 적은 수이다. (MCP의 두께가 500 μm 인 경우 약 25% 수준) CsI 코팅내부에 생성된 전자들 중 Hole의 표면에 가까이 위치한 저 에너지 전자들은 표면 밖으로 탈출할 가능성이 있으며 실험결과로부터 확인된 'Escape Depth'[1]를 사용하면 이들로부터 Hole내부로 탈출하는 저 에너지 전자의 수를 추정할 수 있다. CsI코팅 내부에 생성된 고 에너지(1keV 이상 10keV 미만) 전자들로서 EGS4의 계산 한계 때문에 수송이 중단된 전자들에 의해 생성 가능한 이차 전자들의 수는 'Universal Yield Curve'로 알려져 있는 실험 결과를 이용하여 추정하였다.

먼저, CsI에 대한 전자의 Escape Depth관련 실험 결과들은 Verma[7]의 논문에 잘 기술되어 있다. 그 내용을 요약해 보면, CsI박막에 대한 Electron Yield Ratio를 δ 라 할 때 δ 는

$$\delta = f(0) \frac{E_p L}{E_c R_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{R_p}{L}\right) \right] \quad \text{-----} \quad (1)$$

에 의하여 산출할 수 있다. 여기서, $f(0)$ 은 표면 가까이 있는 이차 전자가 표면으로부터 탈출 할 확률이며 E_c 는 2차 전자 하나를 Excite시키는데 필요한 에너지이고, R_p 는 에너지가 E_p 인 Primary전자의 Electron Range이며 이 관계식은 실험 결과로부터 얻은 것이라 할 수 있다. 한편, CsI 내에서 Primary 전자의 에너지와 Range 사이에는 역시 실험결과로부터

$$R_p = b E_p^{1.35} \quad \text{-----} \quad (2)$$

에 의하여 주어진다. 여기서, 상수 b 의 값은(CsI의 경우) $b=11.5$ 로 주어지며 R_p 와 E_p 의 단위는 각각 μgcm^{-2} 와 keV 이다. 또 다른 실험 결과로부터 Primary Electron의 최대 Yield는 에너지 값이 $E_p=3.3\text{keV}$ 일 때 이며 식(2)로부터 이 경우

Electron Range값은 $57.62\mu\text{gCm}^{-2}$ 가 된다. 식(1)로부터 $\frac{R_p}{L}$ 의 값을 산출하면 2.28이 된다. 따라서, L 의 값은 $25.27\mu\text{gCm}^{-2}$ 가 되며 CsI의 밀도가 $\rho=4.51\text{gCm}^{-3}$ 이므로 Linear Thickness값 56nm가 산출된다. 이 값을 이용하여 Micro-Channel Plate의 Hole내부나 표면으로 방출되는 전자의 수를 추정할 수 있다.

다음으로, CsI코팅 내에서 생성된 Primary 전자중 에너지가 10keV미만이 되어 EGS4가 더 이상 수송하지 못한 전자들에 의하여 생성될 것으로 예상되는 2차 전자의 수는 Scholtz등[6]에 의하여 도출된 'Universal Yield Curve'를 사용하여 추정하

였다. 이들의 정의에 의하면 Secondary Electron Yield를 δ 라 할 때 δ 는

$$\delta = \frac{i_s}{i_p} \quad \text{-----} \quad (3)$$

에 의하여 정의하고 있다. 여기서, i_p 는 입사되는 전자들의 Primary Current이고 i_s 는 표면으로 방출되는 전자들의 전류이다. 이때 i_s 는 모든 전자들을 포함하는 것으로 흔히 말하는 50eV 이하의 에너지를 갖는 2차 전자들을 포함한다. 이들은 Au, FeCrNi, MGO, LeadGlass, Si등 물질에 대한 Electron Emission Yield의 값을 측정하여 분석한 결과 다음과 같은 근사 분포를 얻었으며 이를 Universal Yield Curve라 부르고 있다.

$$\frac{\delta}{\delta_m} = \exp \left\{ - \frac{[\ln(\frac{E_p}{E_m})]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad \text{-----} \quad (4)$$

여기서, δ_m 은 방출된 전자 수의 최대 값이며 E_m 은 최대의 전자를 생성하는 Primary전자의 에너지의 값이다. 물론, E_p 는 Primary 전자의 에너지이며 σ 의 값은 물질에 따라 결정되는 값이다. 식(4)를 이용하여 EGS4가 수송을 중단한 Primary Electron들에 의해 생성된 2차 전자의 수를 산출하였다.

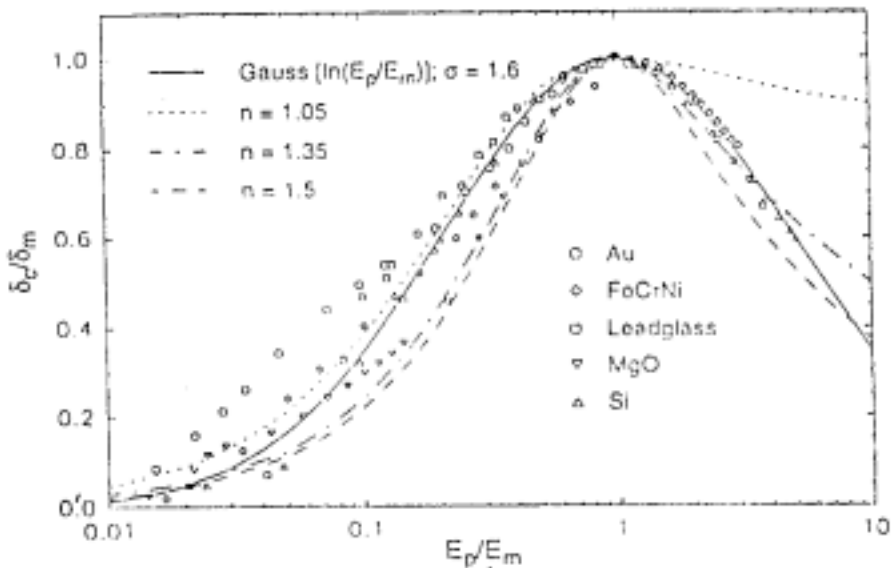


그림 2. Universal Yield Curve의 예

그림3은 본 Simulation에서 사용한 X-선과 Micro-Channel Plate의 기하학적 형상을 나타내고 있다. 편의상 선원과 MCP사이의 거리는 1Cm로 고정하였으며 Hole의 직경은 25 μm , 그리고 MCP의 두께는 0.5mm로 고정하였다. MCP의 표면과 Hole의 내부에는 같은 두께의 CsI로 코팅된 것으로 가정하였으며 코팅의 두께는

0.1 μm ~ 10 μm 범위 이내이다.

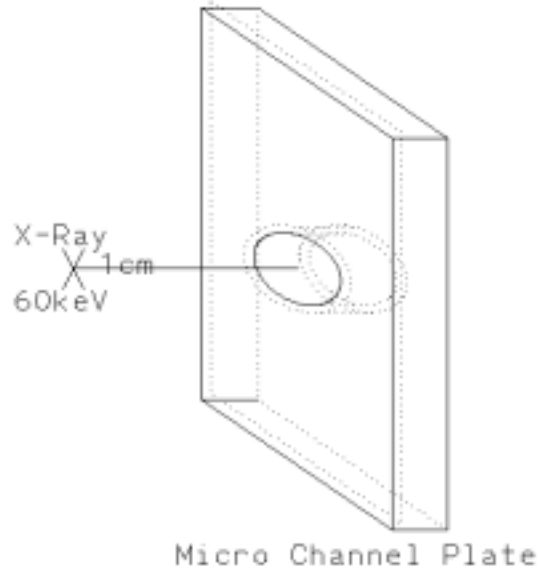


그림 3. Simulation에 사용된 MCP의 기하 구조

다음은 본 Simulation에서 사용한 난수의 생성에 대하여 기술한다. 방사선원으로 부터 방출된 Photon의 초기 진행방향을 설정하기 위해 난수를 사용하여 단위 벡터를 지정해야 한다. 그림3에서 입자의 진행방향을 z-축으로 간주할 때 Azimuthal 방향의 대칭성을 고려하여 극 좌표계를 사용하면 $u = \sin\theta\cos\phi$, $v = \sin\theta\sin\phi$, $w = \cos\theta$ 가 된다. 이때 $\theta \in [0, \theta_0]$, $\phi \in [0, 2\pi)$ 이며 θ_0 는 아주 작은 값이다. 구간 $[0, 1]$ 에 속하는 두 개의 난수를 생성하여 ξ 와 η 라 할 때 $\theta = \theta_0\xi$, $\phi = 2\pi\eta$ 라 두면 된다. 그러나, 이상의 방법으로 생성한 입자의 초기 진행 방향은 Polar Angle의 값이 작은 영역에 비해 큰 영역에 더 작은 수의 입자를 할당하게 된다.

실제 예를 들어보면 $\theta_0 = 0.01$ 일 때 위의 방법으로 입자가 방출될 수 있는 영역에 대한 구면의 면적은 $A = \int_0^{2\pi} \int_0^{\theta_0} \sin\theta d\theta d\phi = 2\pi(1 - \cos\theta_0)$ 로 부터 약 $\frac{\pi}{10000}$ 이 된다. 반면에, $\theta_0 = 0.02$ 일 때는 $A = \frac{4\pi}{10000}$ 가 되어 되니 전자의 4배가 된다. 일반적으로 $0 \leq \theta_0 \ll 1$ 일 경우 $2\pi(1 - \cos(\theta + \Delta\theta)) - 2\pi(1 - \cos\theta) \approx \pi(\Delta\theta)^2$ 으로 $\Delta\theta$ 의 제곱에 비례함을 알수 있다. 따라서, 본 연구에서는 난수 ξ 를 산출한 후 $\theta = \theta_0\sqrt{\xi}$ 를 사용하여 초기 진행방향을 산출하였다.

제 2 장 CsI 판에 의해 생성된 전자의 수

이 절에서는 Photon이 CsI판을 통과할 때 생성되는 전자들 중 반대편으로 방출되는 전자의 수를 추정하는 방법에 대하여 기술한다. EGS4를 사용하여 에너지가 1keV이하가 될 때까지 Photon을 수송하며 이때 생성된 전자들 중 저 에너지 전자의 경우 경계 면으로부터 Escape Depth거리 이내에 있는 전자의 수와 진행방향에 대한 기하학적 확률을 곱해서 탈출된 전자의 수를 추정하였다. 또한, 생성된 전자의 경우 에너지가 10keV이상일 때만 EGS4에 의해 할 수 있기 때문에 에너지가 10 keV 미만인 전자들에 의해 생성 될 것으로 예상되는 이차 전자들은 Frumkin[1] 등에 의해 도입된 Universal Yield Curve를 사용하여 추정하였다. 이상의 방법으로 산출된 전자의 수가 실험 결과와 얼마나 잘 일치하는지 확인하기 위하여 실험 결과가 알려져 있는 'Detection Yield'의 값을 계산하여 비교하였다.

이 절에서 기술한 계산 결과들은 모두 두께가 $0.1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 인 CsI판 상단 10Cm 위치에서 에너지가 15keV ~100keV인 X-선을 CsI판에 수직으로 입사시켰을 때 CsI판을 기준으로 X-선 입자의 초기 위치와 반대인 CsI판 하단에서 생성되는 전자의 수를 계산한 것이다. CsI판의 두께 변화에 따른 생성된 전자 수의 변화, 입사 Photon의 에너지 변화에 따른 생성 전자수의 변화, CsI물질의 두께에 따른 Conversion Efficiency, Detection Yield 등의 값을 계산하였다.

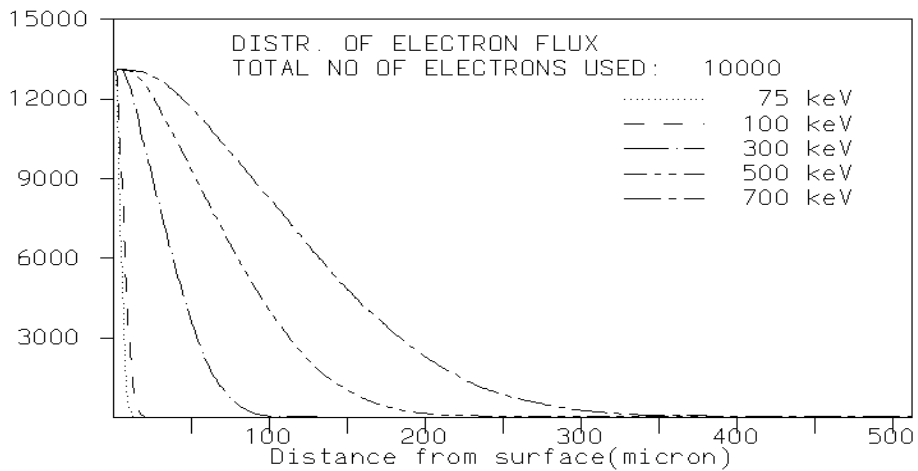


그림 4. 알루미늄내에서 Electron Flux 분포

1. CsI의 Conversion Efficiency 및 Detection Yield

먼저 EGS4가 수송할 수 있는 전자 및 Photon의 에너지에 한계가 있다는 점 때문에 본 연구에서 계산코자 하는 Micro-channel plate hole내부에서 생성되는 전자의 수를 추정하는데 어느정도 영향을 미치는 지를 파악하기 위하여 Electron Range의 값을 산출하고 그 결과를 실험 측정 결과와 비교하였다. 입사 Photon의 에너지를 15keV이상으로 제한하였고 EGS4를 사용하여 입사한 Photon의 위치와 생성된 전자(Secondary electrons)들의 위치를 추적하였다. 실험결과가 알려져 있는 알미늄의 경우 10,000개의 입자를 사용하여 표면으로부터의 침투 거리에 따른 생성전자들의 분포를 그리면 그림4와 같다.

그림 4는 EGS4를 사용하여 전자의 에너지가 10keV 가 될 때 까지 수송하여 얻은 결과이기 때문에 알미늄의 경우 10keV 입자의 이동거리(Electron Range)인 0.6 μm 만큼 실험치 보다 작을 수 있다. 표-1의 두 번째 행은 참고문헌[4]로부터 발췌한 값들이며 3번째 행은 EGS4를 이용하여 계산한 값들이다. 전자의 에너지가 20keV이상인 경우 두 행의 해당 값들을 비교해 보면 EGS4에 의한 산출 값과 측정 값들이 대등함을 확인할 수 있다.

표-1에는 EGS4를 사용하여 산출한 CsI, CsBr, Au등에 대한 Electron Range값들을 나타내고 있다. 알미늄의 경우에 대한 계산 값과 측정값의 비교 결과로부터 이들 물질에 대한 계산 값 역시 실험치와 큰 차이가 없음을 예측할 수 있다. 뿐만 아니라, 에너지가 100keV 이하인 Photon을 입사시켰을 때 생성된 저 에너지 전자의 수 역시 10keV전자 1개(Photon의 초기 에너지가 40keV 미만인 경우) 또는 소수에 불과하며 따라서 이들에 의해 생성된 이차 전자의 경우 그 수가 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다.

표-1. Electron Range - 계산값과 실험값 비교

Energy(keV)	15	20	30	40	50	75	100	300	500	700
Al(Exper.)	1.2	2.4	5.3	9.0	14	32	48	260	610	970
Al(EGS4)	1.5	2.5	5.0	9.0	13	30	45	250	600	950
CsI(EGS4)	0.6	1.5	2.0	4.0	5.5	12	20	110	250	350
CsBr(EGS4)	0.9	1.5	3.0	5.5	8.0	20	30	170	350	500
Au(EGS4)	0.3	0.6	1.0	1.5	2.2	6.0	12	45	60	85

다음은 Micro-channel plate의 hole에서 생성된 전자 수를 EGS4에 의해 산출할 수 있는지에 대한 두 번째 확인이다. 즉, CsI판에서의 Detection Yield값은 실험

결과가 알려져 있으며 EGS4를 이용하여 이를 계산해 보았다. 여기서 Detection Yield[4]는 Photocathode물질인 CsI에 흡수된 Photon의 수에 대한 검출된 전자의 수의 비율로 정의된다. EGS4를 사용하여 계산할 경우 Photon이 CsI에 흡수되었는지는 CsI 내부에서 1번 이상 반응을 하였는지 즉, 1개 이상의 전자를 생성했는지에 의하여 정의하였다.

그림 5는 두께가 $0.3 \mu m \sim 10 \mu m$ 인 CsI판에 에너지가 60keV인 X-선 입자들을 수직으로 입사시킨 다음 Detection Yield의 값을 산출하여 도시화 한 것이다. CsI판을 뚫고 반대편으로 방출된 저 에너지 전자의 수는 EGS4에 의하여 계산할 수 없기 때문에 실험적으로 알려져 있는 CsI물질에 대한 전자의 Escape Depth를 사용해야 했다. 또한, CsI판 내부에서 생성된 고 에너지 전자(100eV ~ 10keV)들에 의하여 생성될 수 있는 Secondary Electron들의 수는 'Universal Yield Curve'를 사용하여 산출하였다.

Verma[7]의 실험결과에 의하면 에너지가 100eV이하인 전자들(이차전자 -Secondary Electrons)이 CsI로부터 이탈할 수 있는 최대 거리(Escape Depth)는 56nm이다. 한편, EGS4를 사용하여 CsI판의 깊이 방향으로 생성된 이차전자의 분포를 구할 수 있으며 지정된 깊이에서 CsI판의 한 면을 통하여 전자가 밖으로 이탈할 수 있는 기하학적인 확률을 계산할 수 있기 때문에 이들의 곱으로부터 방출된 전자의 수를 추정할 수 있다.

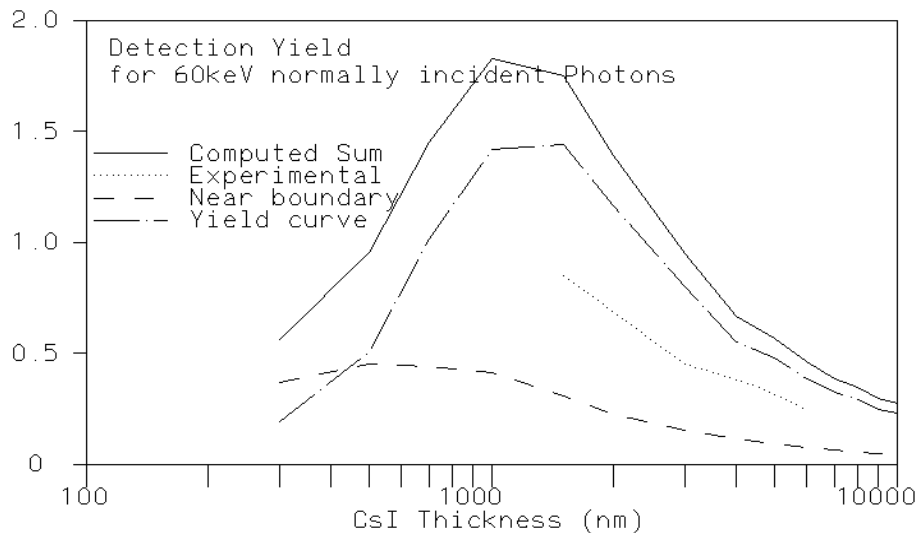


그림 5. EGS4를 사용하여 산출한 CsI의 Detection Yield

CsI판의 경계 면에 가까운 위치에 있는 즉, Escape Depth이내에 있는 Secondary Electron들의 이탈 확률을 구하기 위하여 r 을 전자의 위치로부터 경계

면(X-선원과 반대편)까지의 거리라 하고 p 를 이 전자가 밖으로 방출될 확률이라 하자. 이 전자의 위치로부터 반경이 D 인 구(Sphere)를 그렸을 때 구면의 넓이는 $4\pi D^2$ 이며 CsI판의 경계면에 의하여 이 구의 잘린 부분의 넓이는 $2\pi(D^2 - rD)$ 이므로 방출 확률은

$$p(r) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r}{D}\right) \quad \text{-----} \quad (5)$$

가 된다. 여기서 $D=56nm$ 이며 r 은 경계면 까지 거리이다. 물론, r 의 값이 D 보다 클 경우 $p(r)=0$ 이 된다. 따라서, 에너지가 100eV 이내인 저 에너지 전자들 중 CsI 판 밖으로 방출될 전자의 수는

$$\delta_1 = \int_0^D q(r)p(r)dr \approx \sum_{i=1}^7 q_i p_i \quad \text{-----} \quad (6)$$

에 의하여 추정할 수 있다. 여기서, $q(r)$ 은 경계 면으로부터 거리가 r 인 위치에 생성된 전자들의 수이고 우변의 합은 $56nm$ 구간을 $8nm$ 간격으로 나누어 계산할 때의 근사 값 산출을 위한 것이다.

에너지가 100eV ~ 10keV인 Primary 전자들의 EGS4에 의해 수송이 불가능 하기 때문에 이들에 의해 생성된 Secondary Electron의 수는 Universal Yield Curve[6]을 사용하여 추정하였다. 즉, E_p 를 Primary Electron의 에너지라 하고 δ 를 생성된 Secondary Electron의 수 라 하면

$$\delta = \delta_m \exp \left\{ - \frac{\ln \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^2}{2\sigma^2} \right\} \quad \text{-----} \quad (7)$$

이 성립한다. 여기서 δ_m 의 δ 의 최대 값으로 Primary 전자의 에너지가 E_m 일 때 Electron emission yield의 값이다. CsI의 경우 실험 결과로부터 산출된 값은 $\delta_m=20$, $E_m=3.3keV$, $\sigma=1.6$ 이다. 한편, MgO의 경우에는 $\delta_m=12$, $E_m=0.95keV$ 로 추정되어 있으며 Au등 금속의 경우에는 $\delta_m=1.5$, $E_m=0.4keV$ 로 추정되어 있다.

식 (7)을 사용하면, 입사된 X-선 입자를 EGS4에 의하여 수송하는 과정에서 전장의 10keV 미만이 되어 더 이상 수송할 수 없을 때 이로부터 생성될 Secondary Electron의 수를 추정할 수 있다. 산출된 전자의 수에 식(6)의 확률을 곱하여 적분 하면 구하고자 이차전자의 수가 산출된다. 이 때 식(6)의 Escape Depth D 위치에는 해당 에너지를 갖는 전자의 이동거리(Range)를 사용해야 한다. Verma[7]에 의하면 CsI내에서 전자의 이동거리 R 은

$$R = f \times E^{1.35}, \quad f = \frac{11.5 \times 10^{-6}}{4.51} \quad \text{-----} \quad (8)$$

에 의하여 추정할 수 있다. 이상의 방법으로 산출한 Secondary electron의 수를 앞

서 산출한 Escape Depth 이내로부터 방출된 전자의 수와 합하여 CsI관의 반대편으로 방출된 총 전자의 수가 추정된다.

그림 5는 이상의 방법에 의하여 산출한 Detection Yield 값들과 Frumkin[4]에 의한 실험 값들을 나타내고 있다. 그림 5에서 'Near Boundary'로 표기된 곡선은 Escape Depth 이내의 저 에너지 전자들로부터 산출된 전자의 수이며 'Yield Curve'로 표기된 곡선은 Primary Electron들로부터 universal Yield Curve를 사용하여 추정한 전자의 수이다. 이 두 곡선의 합과 실측 데이터 값을 비교해 보면 추정값이 측정값의 두배 이내임을 확인할 수 있다.

제 3 장 Micro-channel Plate의 Hole에서 생성된 2차 전자의 수

1. CsI판 반대편에서 생성되는 전자의 수

두께가 $2\ \mu\text{m}$ 인 CsI 판 상단 $10\ \text{cm}$ 위치에서 수직으로 200만개의 Photon을 입사시켰을 때 CsI판의 하단에 생성된 전자의 수는 아래 그림과 같이 나타났다. 이들 전자의 수는 EGS4를 사용하여 Photon의 에너지가 $1\ \text{keV}$ 이하가 될 때까지, 그리고 생성된 전자들의 경우 에너지가 $10\ \text{keV}$ 이하가 될 때까지 수송한 후 $100\ \text{eV}$ 이하의 전자는 CsI의 Escape Depth를 사용하여 방출되는 수량을 산출하였으며 $100\ \text{eV}$ 이상인 경우 Frumkin이 제안한 universal yield curve를 사용하여 산출하였다.

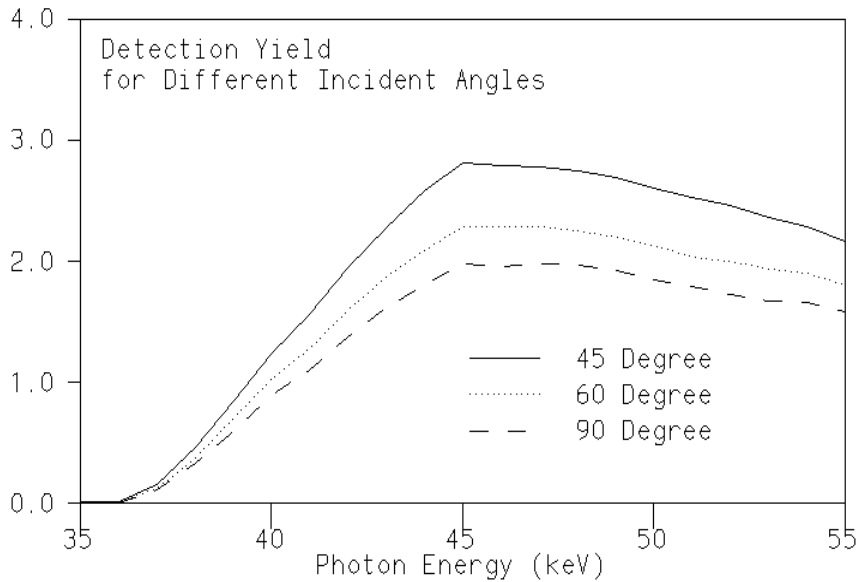


그림 6. CsI판이 Photon의 입사각과 이루는 각도에 따른 생성 전자수의 변화

위 그림은 앞 절에서 기술한 방법에 따라 CsI판의 반대편에 생성되는 전자의 수를 추정한 것이다. 입사한 X-선은 200만개의 입사 모두 일정 각도를 유지하며 90° 일 경우가 CsI 판 표면에 수직으로 입사한 경우이다. 입사 각도가 작아질수록 Detection Yield 값이 커지며 입사 X-선의 에너지가 $45\ \text{keV}$ 일 때 최대임을 확인할 수 있다. 그림 7은 입사 각도에 따라 생성되는 전자의 수를 나타내고 있다. 즉, 입사 X-선의 에너지를 $45\ \text{keV}$ 로 고정하고 CsI의 두께를 $2\ \mu\text{m}$ 으로 고정한 다음 입사 각도만을 변화시키면서 생성되는 전자의 수가 어떻게 변화하는지를 조사한 것이다. 그림 7에서 점선으로 표시된 곡선은 수직 입사시 생성된 전자의 수(각도가 90°

인 점)를 $\text{Sin}(\theta)$ [Frumkin et al.]로 나누었을 때 생성되는 곡선이다. 따라서, 생성되는 전자의 수는 X-선의 통과 거리(Path)에 정비례함을 확인 할 수 있다.

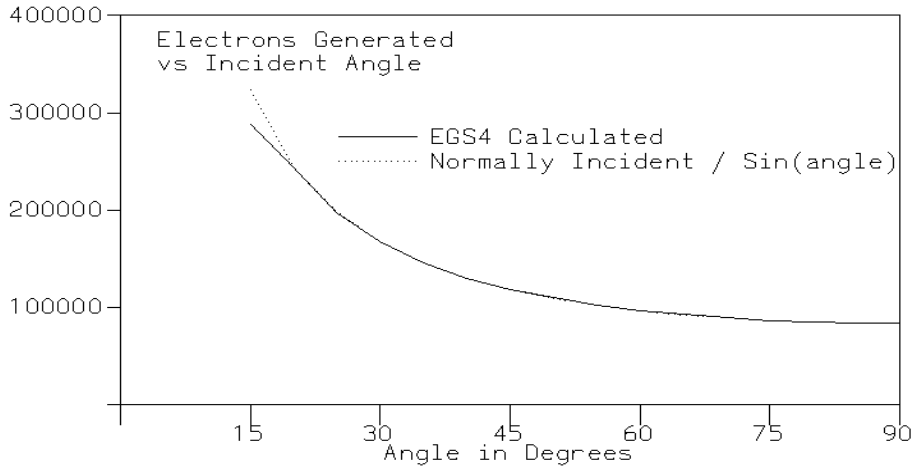


그림 7. 입사각에 따른 생성 전자수의 변화

2. CsI판 표면에서 생성되는 전자의 수

이 절에서는 CsI판에 수직으로 입사한 X-선 입자에 의하여 입사 표면에서 생성되는 전자의 수를 추정 한 결과에 대하여 기술한다. 판의 두께는 $0.2 \mu\text{m}$ 에서 $6 \mu\text{m}$ 까지 구간의 여러 값에 대하여 계산하였으며 X-선 선원으로부터 CsI판까지의 거리는 10cm로 고정하였다. 매회 에너지가 40keV인 입자 50만개를 EGS4를 사용하여 수송하였으며 그후 앞에서 기술한 'Universal yield curve'와 CsI물질의 'Escape depth' 값을 사용하여 계산하였다. 다음 표는 수직 입사 시와 60° 입사 시 및 30° 입사 시 등에 대한 계산 결과이다.

표-2. 입사면과 반대면에서 생성된 전자의 수

CsI판의 두께	표면에서 생성된 전자 수			투과 후 생성된 전자 수		
	90°	60°	30°	90°	60°	30°
$0.2 \mu\text{m}$	10152	9528	6141	9925	9350	5578
0.3	13319	15435	12686	13247	15181	12224

0.5	13318	15435	26632	13677	15661	25950
0.7	13310	15435	26614	12815	14907	26930
1.0	13329	15454	26568	12570	14548	25035
1.5	13318	15435	26522	12353	14296	25365
2.0	13273	15407	26560	12773	14524	25711
2.5	13328	15443	26651	12611	14712	25770
3.0	13263	15369	26585	12776	14749	24805
3.5	13309	15388	26548	12157	13858	24240
4.0	13318	15388	26594	12359	13970	24934
4.5	13272	15342	26520	12519	14497	25140
5.0	13299	15350	26537	11939	13708	24218
5.5	13271	15359	26537	12335	14058	24115
6.0	13299	15387	26648	11722	13675	24180

위 표로부터 입사각에 따른 전자 수의 변화는 앞절에서 기술한 바와 같이 입사각이 θ 일 때 $1/\sin\theta$ 에 근접한 비율임을 확인할 수 있다 (단, CsI판의 두께가 $0.3\ \mu\text{m}$ 미만일 때는 예외임). 또한, 표면으로 방출되는 전자의 수와 투과 후 방출되는 전자의 수가 거의 비슷함을 확인할 수 있는데 이는 두께가 $6\ \mu\text{m}$ 이내일 경우 CsI판 내부에 생성되는 전자의 수가 거의 균일하게 분포되기 때문이다.

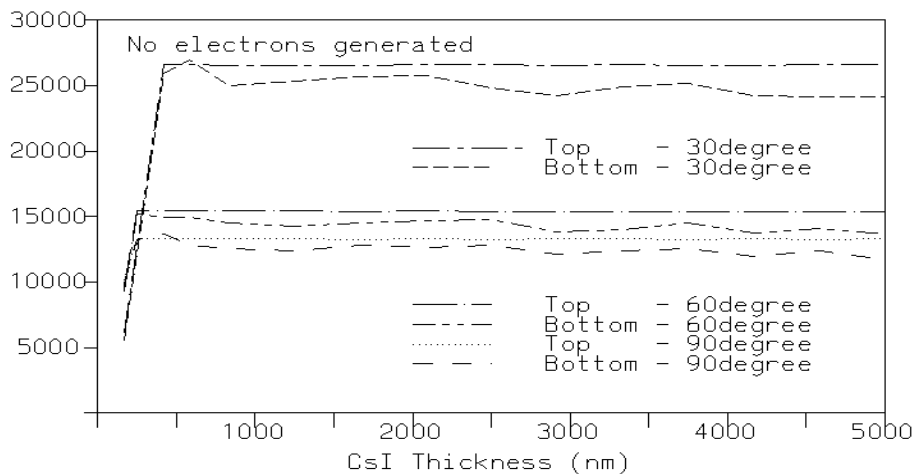


그림 8. CsI판 상하단에서 생성된 전자수의 비교

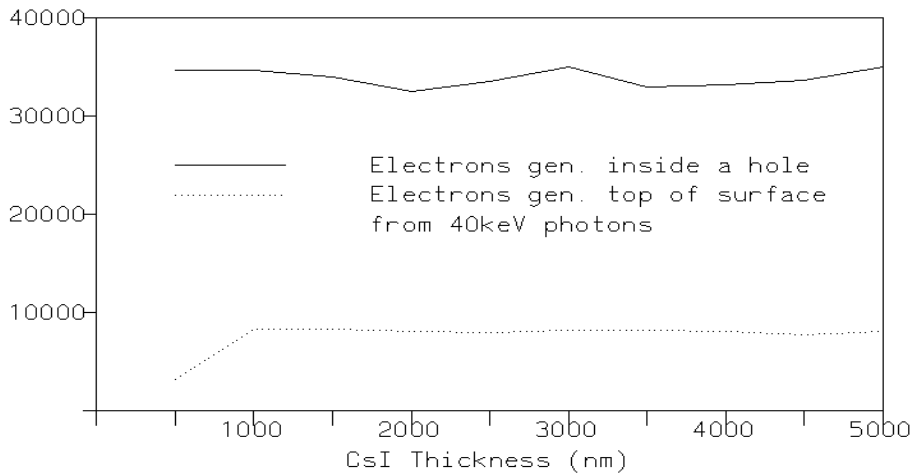


그림 9. MCP Hole의 내부와 상단에서 생성된 전자 수의 비교

3. MCP hole의 내부와 표면에서 생성된 전자수의 비교

그림9는 두께가 0.5mm인 PbO판에 직경이 $25\ \mu\text{m}$ 인 구멍을 뚫고 구멍 내부와 PbO판 상단을 두께가 $0.5\sim 5\ \mu\text{m}$ 인 CsI로 코팅한 다음 구멍의 축 상 10Cm 거리에 위치한 선원으로부터 수직으로 Photon을 입사했을 때 생성되는 전자의 수를 산출한 것이다. 점선으로 표시된 곡선은 PbO판 상단으로 방출된 전자의 수를 나타내며 실선으로 표시된 곡선은 구멍의 내부에서 발생한 전자의 수를 나타내고 있다.

그림9로 부터 확인할 수 있는바와 같이 상단에서 생성되는 전자의 수는 구멍의 내부에서 생성된 전자의 수에 비해 약 4배 정도로 나타났다. 만약 구멍간의 거리 (Pitch)를 $37\ \mu\text{m}$ 으로 두면 상단의 CsI가 코팅된 면적 중 한 개의 구멍에 할당되는 면적은 반경이 $31\ \mu\text{m}$ 인 원 보다 약간 큰 면적이 되며 이 경우 구멍의 상단에서 생성되는 전자의 수는 약 4분의 1로 줄게된다. 따라서, 구멍 내부에서 생성되는 전자의 수와 상단에서 생성되는 전자의 수의 비율은 16:1이 된다. 이로부터 구멍의 수를 증가할수록 보다 많은 전자가 생성됨을 확인할수 있다.

표-3은 CsI코팅의 두께를 $1\ \mu\text{m}$ 으로 고정하고 구멍들의 직경을 $25\ \mu\text{m}$, $35.35\ \mu\text{m}$, $43.3\ \mu\text{m}$, $50.0\ \mu\text{m}$, $55.9\ \mu\text{m}$, $61.23\ \mu\text{m}$, $66.13\ \mu\text{m}$, $70.7\ \mu\text{m}$, $75\ \mu\text{m}$, $79.05\ \mu\text{m}$ 등으로 바

꾸였을 때 생성되는 전자의 수를 나타내고 있다. 이들 직경의 크기는 $25\sqrt{n}$, $n=1,2,3,\dots,10$ 에 해당한다. 입사 X-선의 에너지는 37keV로 고정하였으며 구멍의 반경의 1.5배에 해당하는 구역에 10만개의 Photon을 입사시켰다. 따라서, 실제 실험에서는 반경이 커지면 입사하는 입자의 수는 면적에 비례하여 많아져야 할 것이다. 난수 생성 시 초기 입자의 진행방향에 대한 균일성 유지를 위하여 제1장에서 기술한바와 같이 Polar Angle에 해당하는 난수 산출 후 제곱근을 취한 다음 허용코자하는 Polar Angle의 최대값을 곱하여 사용하였다.

표-3. MCP Hole의 크기에 따른 생성 전자수

반경	12.5	17.68	21.65	25.00	27.95	30.61	33.06	35.35	37.50	39.58
전자수	58042	48024	48475	43768	42293	40147	43363	39643	40068	39378
\sqrt{n} *전자수	58042	67916	83961	87536	94570	98339	114727	112127	120204	124524

4. Hole의 위치에 따른 생성된 전자수의 변화

이절에서는 Micro-channel plate 상의 Hole의 위치에 따라서 생성되는 전자의 수에 어떤 변화가 있는지에 대하여 조사한 결과를 기술한다. X-선원은 Micro-channel plate상단으로부터 100cm거리에 위치하고 있으며 Micro-channel plate는 무한 평면으로 간주하였다. Hole의 직경은 $25\mu m$ 이며 pitch 간격은 $37\mu m$ 로 설정하였다. Micro-channel plate의 두께는 0.5mm로 두었으며 입사각은 일직선상에 놓인 여러 개의 Hole에 동일한 개수의 Photon이 입사하도록 하였다. 즉, Photon의 최대 입사각은 $Tan^{-1}(0.125mm/100cm) = Tan^{-1}(0.000125)$ 로 두었다. 사용한 입자의 수는 5000만개이다.

표-4. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자 수 (Photon 5000만개 사용)

Hole의 위치(μm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
전자의 수	2515	1826	3461	3459	3532	4385	4358	5290	4859	5845

Hole 위치	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
전자 수	6240	5393	6613	5472	7378	6545	5220	6987	7096	7968	7175

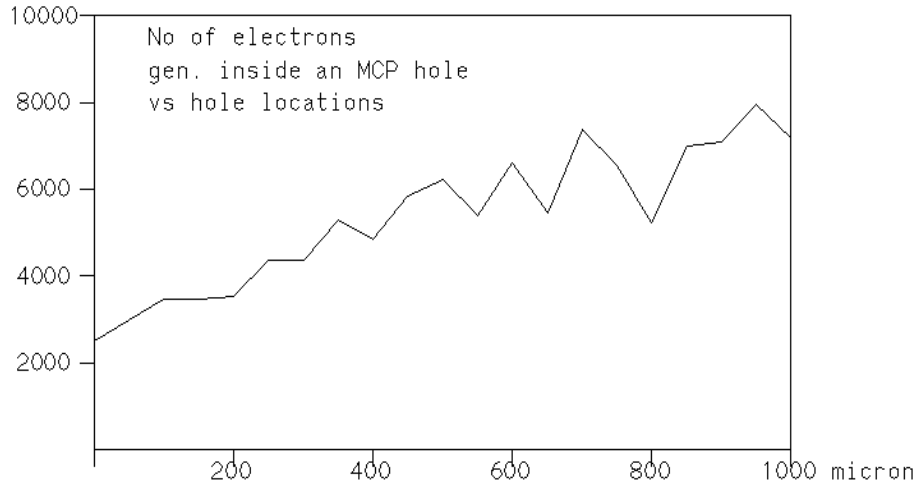


그림 10. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자수 (Photon 5000만개 사용)

표-5에서 보는바와 같이 생성된 전자 중 Hole의 내부로 방출 되는 전자의 수에 대한 추정 값은 사용된 입자의 수는 수직인 점에서부터 거리가 멀어질수록 더 많아짐을 나타낸다. 이 같은 경향을 보다 확실히 점검하기 위하여 입사 Photon의 수를 2억 개로 늘렸을 때의 계산결과는 표-6과 같다. 한 개의 Hole에 대한 계산에 소요된 시간은 HP-715 Workstation 사용 시 약 50시간이었다.

표-5. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자 수 (Photon 2억개 사용)

Hole의 위치(μm)	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	
전자의 수	13999	10363	13516	14504	16421	17454	16999	21401	21179	23335	
Hole 위치	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0
전자 수	22800	22432	25363	24876	28591	27408	25107	27152	30585	25713	30675

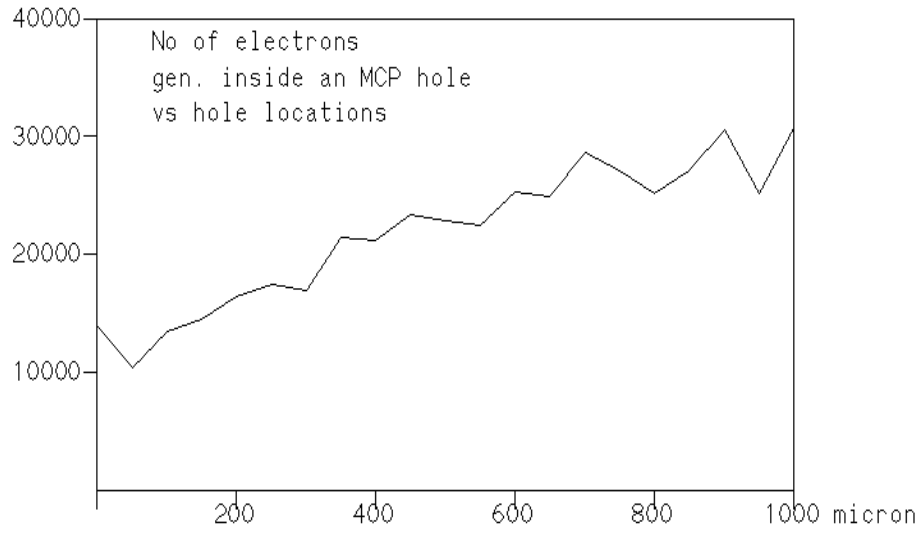


그림 11. MCP Hole의 위치에 따른 생성 전자수 (Photon 2억개 사용)

제 4 장 MCP Hole내부로 방출되는 Primary Electron의 수

이 장에서는 EGS4를 사용하여 제1장에서 기술한 기하학적 구조를 갖는 MCP Hole내부로 방출되는 Photo Electron (primary electron)의 개수를 계산한 결과에 대하여 기술한다. 이들 전자는 MCP Hole내부에 있는 기체와 반응하여 Secondary Electron들을 생성하는 것으로 알려져 있으나 EGS4사용만으로는 이들을 추정할 수 없었다. 따라서, Hole내부로 방출되는 에너지가 10keV 이상인 Photo Electron들의 개수와 에너지 Spectrum만을 기술한다. 이 절에 기술한 모든 계산은 10억개의 Photon을 입사시켰을 때 생성된 Primary Electron의 개수이다. 그림12에 따르면 입사 Photon의 에너지가 75keV일 때 생성된 Primary 전자의 수가 가장 많으며 이 경우 에너지가 약 38keV인 전자가 가장 많이 발생됨을 알수 있다.

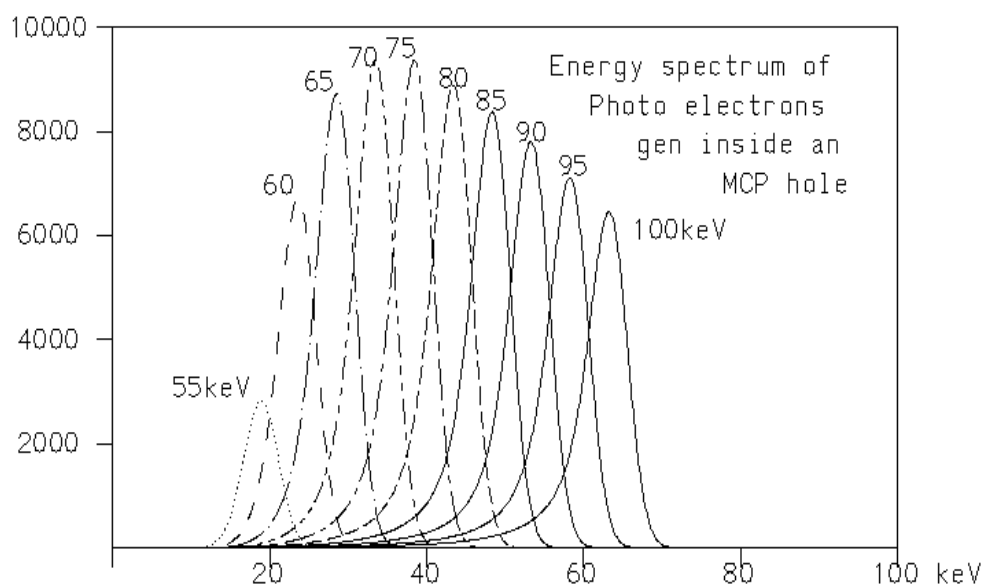


그림 12. MCP Hole내부로 방출된 Photo Electron의 에너지 Spectrum

위 그림은 CsI코팅 두께가 $0.3 \mu m$ 일 때 Photo Cathode 물질인 CsI에 의하여 생성된 전자들 중 MCP Hole 내부로 방출되는 Photo Electron의 에너지 Spectrum을 나타내고 있다. 입사 입자의 에너지를 55keV~100keV구간에서 5keV간격으로 10개

의 값에 대한 생성전자의 에너지 Spectrum을 EGS4를 이용하여 계산한 다음 표준 편차가 2keV인 Gauss분포함수를 사용하여 Smoothing한 결과이다.

그림13은 생성된 Photo Electron들이 Hole의 축 방향으로 어떻게 분포되어 있는지를 보이고 있다. Micro Channel Plate의 두께는 0.5mm로 두었으며 Hole의 내부 벽과 MCP표면은 $0.3\ \mu\text{m}$ 두께로 균일하게 코팅된 것으로 가정하였다. 그림13의 곡선은 Hole의 축이 X-선 수직입사 방향과 일치할 경우에 대한 것으로 Hole이 이동함에 따라 곡선의 최대값은 이동하게 된다.

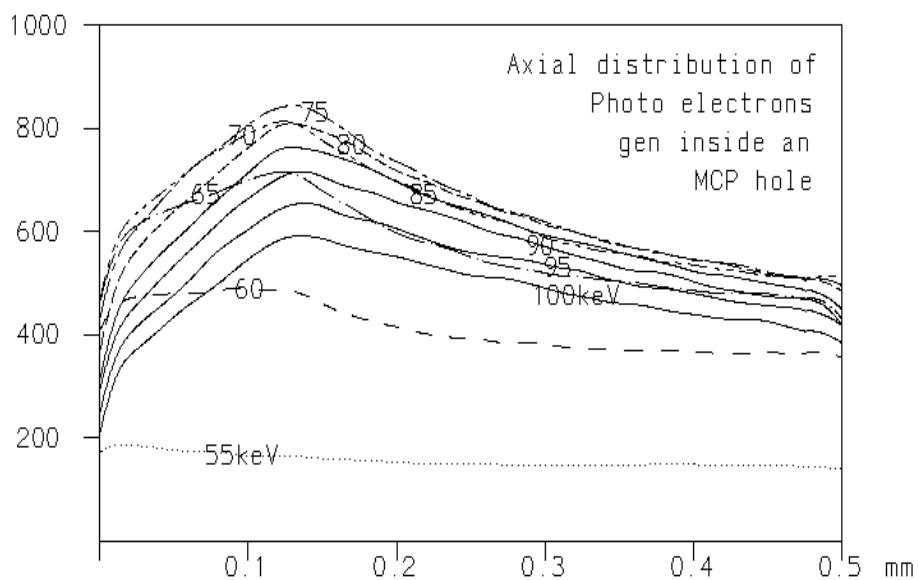


그림 13. MCP Hole로 방출된 Photo Electron의 축 방향 분포

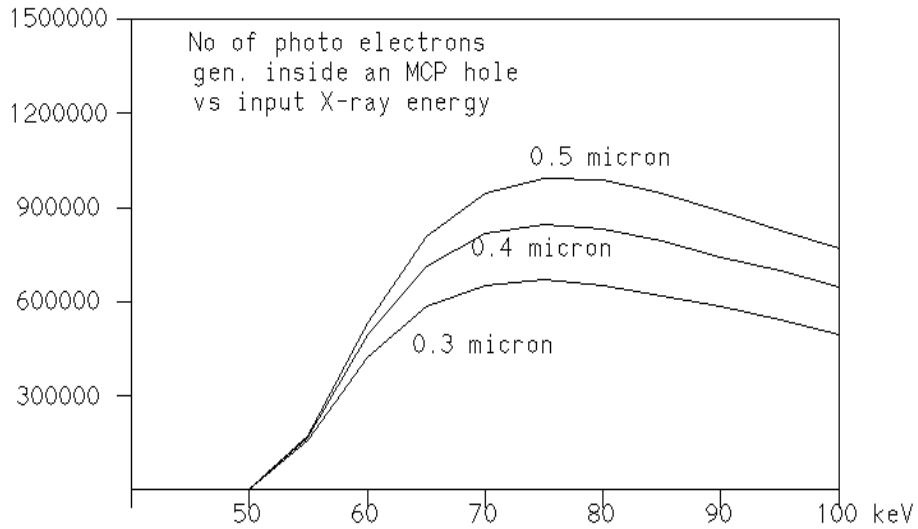


그림 14. CsI코팅 두께 및 입사 에너지에 따른 생성 전자 수

그림 14는 CsI코팅 두께에 따라 생성되는 Photo Electron의 개수에 어떤 변화가 있는지를 보이고 있다. 이들 곡선은 에너지가 50keV~100keV 범위내 있는 입자를 각각 10억 개 씩 입사시켰을 때 한 개의 Hole내부로 방출되는 전자의 수를 나타내고 있다. 이때 CsI의 코팅 두께는 0.3 μm , 0.4 μm , 0.5 μm 등 세가지 경우에 대한 것으로 입사 에너지가 75keV 근처일 때 가장 많은 Photo Electron이 생성됨을 확인할 수 있다. 또한, 10억개의 Photon으로부터 최대 100만개의 전자가 생성되며 비율은 약 0.1%임을 알수 있다.

제 5 장 결 론

본 연구에서는 CsI로 코팅된 Micro Channel Plate로부터 생성되는 전자의 수를 추정하였다. 에너지가 10keV이상인 Primary Electron의 경우 EGS4를 이용하여 MCP Hole내부로 방출되는 전자의 수를 직접 계산할 수 있었다. 그러나, 2차 전자의 경우 EGS4 계산에 의해서는 생성된 수를 직접 추정할 수 없었다. EGS4가 수송할 수 있는 전자의 에너지 범위가 10keV 이상인 점 뿐 아니라 2차 전자는 CsI 코팅 또는 PBO내에서만 생성되기 때문에 Hole내부로 방출되는 수량의 직접적인 계산은 불가능하였다.

따라서, 이미 발표된 실험결과들을 이용하여 CsI 코팅 내에 생성된 Secondary Electron중 외부로 방출이 가능한 수량을 추정하였으며 CsI내에서 수송이 중단된 Primary Electron들에 의해 생성 가능한 2차전자중 표면 밖으로 탈출이 가능한 전자의 수는 'Universal Yield Curve'를 사용하여 추정하였다. 계산 결과에 의하면 후자의 전자 수는 전자에 비해 10%미만임을 확인하였다.

이상의 계산 결과들은 여러 가지 간접적인 실험결과들을 이용하여 추정하였지만 직접적인 실험을 통한 검증이 필수적이며 이는 2차 년도에 수행할 예정이다. 생성된 전자들이 전장내의 GEM판을 통과하면서 몇 배로 증폭될 것인지, 어떤 경로를 따라 Readout판 까지 이동할 것인지 등에 대한 연구 또한 향후 추진되어야 할 연구 분야이다.

참 고 문 헌

- [1] R.K. Martin, J.H. Chappell and S.S. Murray, "Relative quantum efficiency measurements of CsI, CsBr and CsI/CsBr coated micro-channel plates", SPIE Vol. 1344(1990) 340-345.
- [2] G.A. Burginyon, B.A. Jacoby, J.K. Wobster, R.D. Ernst, D.S. Ancheta, K.G. Tirsell, "Absolute detection efficiency of a micro-channel plate detector to X-rays in the 1-100keV energy range", SPIE Vol. 1736(1992) 36-42.
- [3] A.S. Tremsin, J.F. Pearson, G.W. Fraser, W.B. Feller, P. White, "Micro-channel plate operation at high count rates: new results", Nuc. Inst. and Methods in Physics Research A 379(1996) 139-151.
- [4] I. Frumkin, et al., "Properties of CsI based gaseous secondary emission X-ray imaging detectors", Nuc. Ins. and Meth. in Physics Research, A329 (1993) 337-347.
- [5] J.B. Marion and F.C. Young, *Nuclear Reaction Analysis - Graphs and Tables*, North Holland Pub. Co. (1968).
- [6] J.J. Scholtz, D. Dijkamp and R.W.A. Schmitz, "Secondary electron emission properties", Philips J. Res. 50 (1996) 375-389.
- [7] R.J. Verma, "Secondary electron emission of caesium iodide", J. Phys. D: Applied Phys., 6(1973) 2137-2141.

부록 D : 방사선검출기용 Readout 회로
기술개발 현황

요 약

이 보고서는 방사선 검출기용 Readout 회로의 기술개발 현황을 이용 현황 및 신기술 내용과 함께 기술하고 있다. 또한, Readout 회로의 ASIC chip 제작과 관련하여 이용되고 있는 반도체 공정기술 시설 현황을 포함하고 있다. 주요 내용은 관련 제품의 카탈로그, web site 등을 근거로 작성한 것이다. 반도체 공정기술 현황에 대해서는 국내의 경우 IDEC의 MPW, ISCR의 MPC 등 반도체 공정, 설계 지원 기관과 주요 반도체 공정 회사들의 기술 현황과 국외의 경우 미국의 MOSIS MPW와 유럽의 EURO PRACTICE MPW 등의 공정, 설계 지원 기관에 대한 기술 현황을 포함하고 있다. 방사선 검출기용 readout 회로 기술 개발에 대해서는 국외 위주로 여러 기업들의 readout 회로 제품들과 기술 개발 현황에 대한 내용을 포함하고 있다.

목 차

I. 서 론.....	D - 6
II. 국내외 반도체 공정기술 현황	D - 7
1. 국내 기술 현황	D - 8
(1) IDEC의 MPW	D - 8
(2) ISRC의 MPC	D - 9
(3) 삼성, 현대 하이닉스, 아남, ETRI 광전자 반도체 공정	D-10
2. 국외 기술 현황.....	D-11
(1) MOSIS의 Multi-project wafer	D-11
(2) EURO PRACTICE의 Multi-project chip.....	D-13
III. 국내외 Readout 회로 개발 현황	D-17
1. 국내 기술개발현황	D-17
2. 국외 기술개발현황	D-17
(1) EG&G ORTEC.....	D-17
(2) EV Products.....	D-18
(3) AMPTEK	D-18
(4) Canberra	D-19
(5) Hamamatsu	D-20
(6) Lecroy	D-20
(7) IDEAS	D-20
(8) NOVA R&D	D-24
참 고 문 헌	D-28

표 목 차

표 1. IDEC MPW 공정내역	D-9
표 2. MOSIS에서 제공하는 공정내역.....	D-12
표 3. EUROPRACTICE에서 제공하는 공정 내역	D-14
표 4. EG&G ORTEC에서 공급하는 제품군	D-17
표 5. AMPTEK에서 공급하는 제품군.....	D-18
표 6. IDEAS의 readout ASIC 제품군.....	D-20

그림 목 차

그림 1. IDEC MPW의 진행 flow	D-9
그림 2. MOSIS MPW에서의 칩 제작 원리	D-11
그림 3. IDEAS의 VA1 chip의 layout	D-23
그림 4. VA1의 block diagram.....	D-24
그림 5. RENA chip의 layout.....	D-26
그림 6. RENA chip의 block diagram.....	D-27

I. 서론

방사선 검출기가 원전 시설, 의료, 천문학, 고에너지 물리학, 인공위성 등에서 사용 범위와 응용분야가 늘어남에 따라 그 검출기의 신호를 받아 처리할 수 있는 readout 회로에 대한 요구도 다양하게 증가하고 있다. 기존의 방사선 검출기는 하나 혹은 수개의 채널을 갖는 readout 회로가 필요하며 NIM module 정도면 검출기의 신호를 충분히 처리할 수 있었다. 그러나, 일차원 혹은 2차원의 어레이(array) 형태의 검출기가 필요한 분야에서는 다채널의 readout 회로를 요구하게 되었다.

다채널의 readout 회로는 기존의 단 채널의 readout 회로를 여러 개 연결하여 쓰는 경우도 있었으나 이 경우 작은 크기의 검출기에 검출기보다 훨씬 크기와 공간을 많이 차지하는 readout 회로를 연결하게 되어 잡음이 크게되며 공간적인 측면에서 큰 단점을 갖게 된다. 따라서, 어레이 형태의 검출기 신호를 검출기의 특성과 응용분야 요건에 맞게 readout ASIC(Application Specific Integrated Circuit)을 제작하기 이르렀다. 전세계적으로 보면 검출기를 이용한 물리학 연구에 선두자리에 있는 Fermi Lab., BNL, LBL, NASA, CERN, Rutherford Lab. 등에서 단일 혹은 어레이 형태의 검출기에 필요한 readout ASIC chip을 자체 개발하여 사용하고 있다.

이 보고서는 2000년도 원자력 실용화 연구사업으로 수행중인 “방사선 영상 장비용 GEM 검출기 개발” 과제에서 요구되는 readout 회로에 대한 전 세계적인 기술개발 현황을 분석하여 향후 본 과제에서 개발해야 할 GEM 검출기용 다채널 readout ASIC chip의 설계 자료로 활용코자 한다. 본 과제에서 필요한 Readout 회로는 1024 x 1024 의 다채널로서 GEM 검출기에서 나오는 신호를 처리할수 있어야 한다. 먼저, 제 2장에서는 국내외 반도체 공정기술 현황에 대해서 기술 하였는데 GEM 검출기용 readout ASIC을 자체 개발하기 위해서는 반도체 공정에 대한 조사가 선행 되어야 하기 때문이다. 다음으로, 제 3장에서는 국내외의 방사선 검출기에 사용되는 readout 회로를 개발하는 업체와 이들 readout 회로의 개발 현황에 대하여 기술하였다.

II. 국내외 반도체 공정 기술 현황

반도체 공정을 이용하여 ASIC을 제작하는 과정은 크게 나누어 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 계측기 또는 센서 입력 변수 설정
- readout 회로의 사야 결정
- spice 시뮬레이션
- CAD 툴을 이용한 마스크 레이아웃 작성
- ASIC 공정에 투입

반도체 공정은 국내외에 여러 Foundry에서 제공하고 있으나 이들 Foundry의 이용은 설계자가 직접 Foundry와 공정 계약하는 것이 아니라 일반적으로 MPW(Multi-Project Wafer) 혹은 MPC(Multi-Project Chip)이라는 형태로 chip을 제작하게 된다. 이것은 한 wafer상에 여러 설계자의 chip을 함께 올림으로써 각각의 설계자가 부담해야 하는 mask 제작 비용을 줄일 수 있다. 반도체 공정을 위해서는 mask라는 chip 설계 공정도면이 필요한데 이것을 한번 제작하는데 드는 비용이 미화로 약10,000\$ 이상 하기 때문에 한wafer에 한 설계자의 chip을 올리는 경우는 그chip을 대량으로 생산하는 경우를 제외하고는 보통 연구용으로 prototype의 chip을 제작할 때에는 MPW나 MPC같은 과정을 거치게 된다. 일반적인 MPW chip 제작을 단계별로 살펴보면,

1. MPW에서 제공하는 여러 공정 중에서 목적에 맞는 공정 선택
2. MPW 측과 계약 후 공정 data(spice parameter, CAD tool technology file, design rule file등)를 넘겨받음
3. design rule에 맞게 chip 설계
4. 설계 data를GDSII format으로 변환 후MPW 측에 data를 넘김
5. MPW 측은 여러 설계자의 data를 취합해서 여러 설계자의 chip 설계 data가 담긴 하나의 mask를 제작
6. 공정 수행
7. 공정이 끝난 wafer를die 단위로 절단하여 package 과정에 들어감
8. package가 끝난 chip을 각각의 설계자 들에게 전달

공정에 소요되는 시간은 각각의 공정에 마다 또MPW마다 서로 다르지만 일반적으로 국내의 MPW 공정은 대략 6개월 단위로 진행된다.

1. 국내

국내의 반도체 공정은 크게 교육용으로 학생들에게 ASIC을 설계 제작할 수 있는 기회를 주는 IDEC(IC Design Education Center)의 MPW[1]와 서울대의 반도체공동연구소에서 주관하는 MPC[2]등의 공정과 삼성, 현대, 아남, 광전자, ETRI 등과의 한mask에 한 개의 chip설계만을 올리는 공정으로 나눌 수 있다. 앞서도 언급했듯이 연구용 prototype chip은 MPW나 MPC 공정을 이용하게 되는데 각각의 특징을 한번 살펴보겠다.

(1) IDEC의 MPW

IDEC은 국가의 핵심 기반 산업인 비메모리 반도체부문의 설계인력양성을 목적으로 1995년 출범하여 비메모리 반도체 설계인력 양성의 기반을 마련하고 있다. 비메모리 반도체 설계기술은 통신, 컴퓨터, 가전, 자동차 등 거의 모든 산업분야에서 핵심적으로 요구되는 고 부가가치의 중요한 기반기술이지만 비메모리 반도체 개발에 요구되는 국내 반도체 산업의 종합적인 설계 기술은 매우 취약하다는 것이다. 더구나 비메모리 반도체 산업은 장기간에 걸쳐 꾸준히 양성된 인력이 확보되어야 하는 노하우 중심산업으로 학제적 능력을 갖춘 고급 설계인력 양성이 절실히 요구돼 왔다.

IDEC는 이 같은 요구에 부응해 소자, 회로설계, 컴퓨터지원설계, 응용시스템설계 등 시스템 설계 전과정을 총체적으로 다룰 수 있는 수직형 엔지니어이자 체계적이고 논리적 사고능력을 갖춘 최고 수준의 고급 설계 인력을 양성하기 위해 설립되었다. IDEC는 기존 대학의 반도체 설계 관련 교육프로그램 질의 향상을 돕고 새로운 교육기회를 통해 졸업생의 실력, 의욕, 창의력, 협동능력 과 지식의 폭을 향상시키며 우리 기업의 반도체 산업 경쟁력을 강화시키는 등 3 단계 목표를 갖고 있다. IDEC는 산업자원부와 삼성전자, 현대전자(구 LG 반도체), 아남 반도체의 지원을 받아 체계적인 교육장차 개설, 양질의 교보재 개발, CAD Tool의 저가 무상공급, 하드웨어 지원, MPW를 통한 칩 제작 기회부여 등의 사업을 추진해 왔다.

IDEC의 MPW 사업의 목표는 실제적인 IC 설계 및 시스템 설계 능력을 배양하기 위해 IC 설계·제작 기회를 제공하며 설계에서 얻은 지식을 교류할 수 있는 장을 제공하고, 우수한 설계를 기업과 연결시켜주는 창구 역할을 수행하는 것이다. 참가 대상은 교육과 연구를 목적으로 칩 제작을 희망하는 국내 대학의 대학생 또는 대학원생 (단, 영리를 목적으로 하는 칩 제작은 본 공모전에 참여할 수 없음.)은 누구나 가능하다. 공모전 진행절차는 아래 표와 같다. 칩 제작 기간은 설계DB검토 및 제작팀 선정에 1개월, DB전달 후 칩 제작까지 약 4개월이 소요되므로 칩 제작 기간은 총 5-6개월의 소요된다고 볼 수 있다.

IDEC MPW에서 제공되는 공정내역은 아래 표 1과 같다.

표 1. IDEC MPW 공정내역

구분	공정	Chip Size	PAD 또는 gate 수	Package	제작 가능 칩 수
현대	0.6 μm CMOS 2-poly 3-metal full custom	4mm x 4mm	80개	100pin	50
	0.35 μm CMOS 2-poly 4-metal full custom	4mm x 4mm	100개	100pin	32
삼성	0.5 μm SOG	5mm x 5mm	140,000	208pin	6
아남	0.25 μm CMOS 1-poly 5-metal full custom	4mm x 4mm	120개	120pin	4
ETRI	GaAs 0.5 μm E/D MESFET MMIC 공정	1.5mm x 2.0mm	NA	NA	4

IDEC에서의 MPW 진행 과정은 아래 그림 1과 같다.

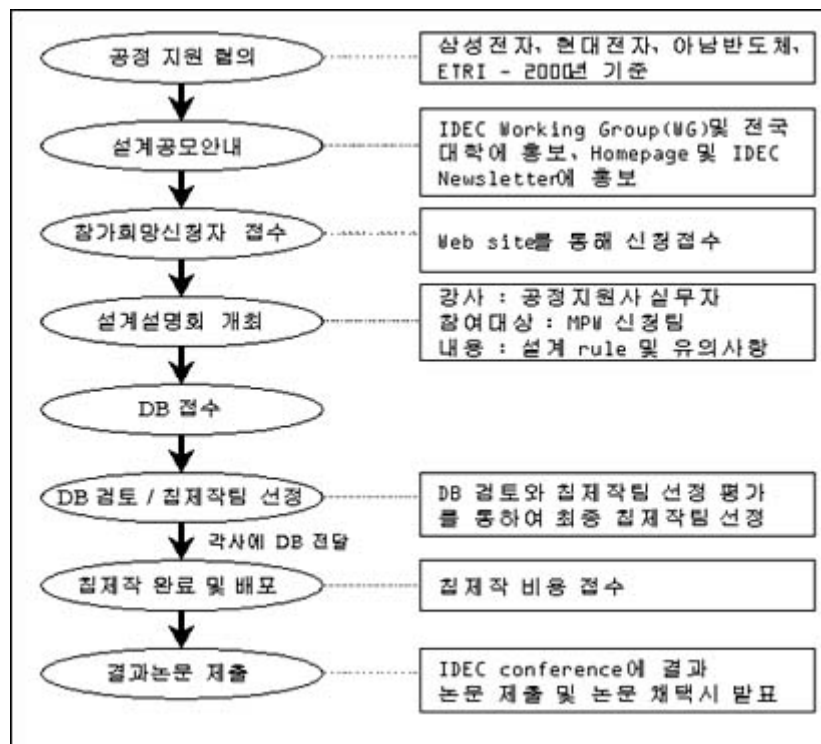


그림 1. IDEC MPW의 진행 flow

(2) ISRC의 MPC

ISRC(Inter-university Semiconductor Research Center)는 1988년에 서울대내에 설립되어 전국대학의 학사 및 석.박사 과정 학생들의 실습교육으로 고급 두뇌를 배출함은 물론, 관련 대학 및 관련 산업체와의 공동연구를 통해서 새롭게 개발, 창출된 기술을 함께 공유함으로써 반도체 산업의 질적 향상을 도모하고 있다. 또한 ISRC는 미세가공기술을 다양한 학문분야에 적용시킴으로써 새로운 과학 기술이 창조되는 기반을 제공하고 있다. 미세 기술을 중심으로 한 첨단기술의 진행방향은 생명광학, 정밀기계공학, 센서 및 액츄에이터 기술에 응용하여 신 시스템을 창조하는 것이다. ISRC에서는 1991년부터 1.5um CMOS 공정을 국내 대학생들에게 제공하고 있으며 공정비는 전액 무료이다. MPC의 운영 방법은 다음과 같다.

- 참가자 결정
먼저 MPC에 참가하고자 하는 대상자는 ISRC(반도체 공동연구소)에 설계 지원서를 제출하고, ISRC는 제출된 지원서를 취합, MPC위원들의 설계 제안서 심사 후 참여 대상자를 확정 통보한다.
- 수행 횟수
ISRC는 선정된 참가자의 설계 데이터를 취합하여 매년 2회 MPC를 수행하며 각 회마다 10개의 project를 선정하여 공정을 수행한다.
- 공정 수행 후의 운영방법
ISRC는 공정이 완료된 chip을 package하여 참여자에게 배포하고 참여자는 배포된 chip을 기한 내에 test하고 이의 결과를 ISRC에 측정보고서를 제출할 의무를 가진다. ISRC는 보고된 결과를 바탕으로 이를 심사하여 우수한 설계를 한 교육부 MPC 참가자에 한하여 50만원 이내의 설계 지원금을 지급할 수 있다.
- 참가 비용
교육부 MPC 참가자의 고정 수행비 및 package비용은 무료이다.
- 운영 절차의 수행 순서
설계제안서 제출 -> MPC 위원회에서 심사 후 참가 여부의 결정 -> 결과 통보 -> 설계 database제출 -> mask제작 및 공정 -> chip배포 -> test -> test보고서 작성 -> 설계 지원금 지원 심의 -> 설계지원금지원

(3) 삼성, 현대 하이닉스, 아남, ETRI, 광전자 반도체 공정

위에서 언급한 IDEC의 MPW와 ISRC의 MPC를 이용하지않고 삼성, 현대 하이닉스, 아남, ETRI, 광전자 반도체 공정 등을 이용할 수 있는 방법도 있다. 이는 설계자가 직접 이들 반도체 공정회사와 계약을 체결하여 설계자는 wafer 전체에 대한 설계를 수행하고 공정회사는 그 설계자만을 위한 mask를 제작하게 된다. 따라서 단순한 칩을 제작하기 위한 단가가 MPW나 MPC에 비해 상당한 비용이 소요되게 되며 학교에서 연구용 칩을 제작하기에는

큰 부담이 된다. 위의 공정업체에서 prototype 칩을 제작하는데 드는 평균 비용은 대략 20,000\$ 가량이 된다.

2. 국외

(1) MOSIS의 MPW

미국의 MOSIS[3]는 저 비용의 prototype 칩을 소량 제작하는 일을 1981년부터 해오고 있으며, 지금까지 40,000개 이상의 상업용, 정부 연구소용, 그리고 전세계의 대학 연구소들의 설계회로를 칩으로 제작해 왔다. MOSIS는 빠르게 변하고 있는 반도체 산업체의 기술에 대해 설계자들에게 하나의 창구를 제공하는 역할을 하고 있다. Mask 제작, wafer 공정, 그리고 칩의 packaging까지 반도체 산업체와 MOSIS가 칩 설계자를 위해 계약을 수행하고 있는 것이다. MOSIS는 여러 설계자들의 회로설계를 하나의 mask 셋에 함으로써 prototype 칩을 제작하는데 드는 비용을 최소화 하고 있다. 이것은 설계자들로 하여금, mask 제작, wafer 공정, package등에 드는 비용을 함께 나눌 수 있게 함으로써 가능한 것이다. 그림 2는 왜 MPW에 드는 비용이 저렴한지 잘 설명해 준다.

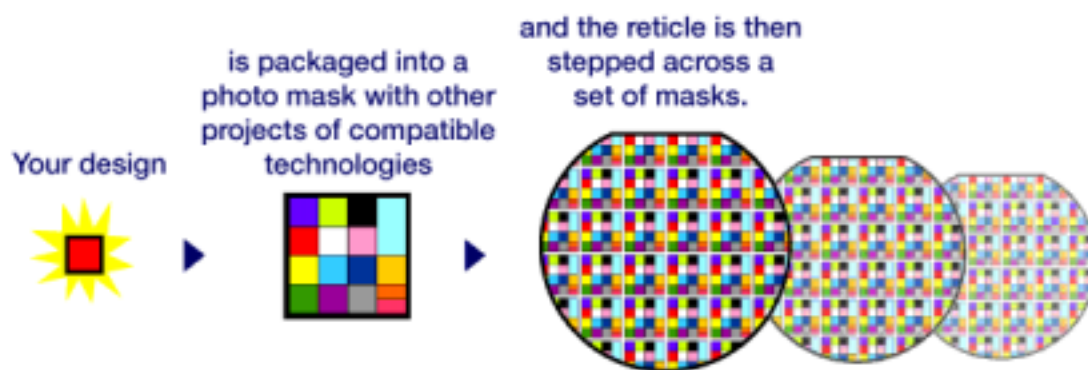


그림 2. MOSIS MPW에서의 칩 제작 원리

MOSIS는 공정별로 보통 한 달에 한번의 공정 run을 제공하고 있으며 한번 제작시에 한 설계 당 최소 25 die 이상의 칩 제작을 계약하고 있다. MOSIS는 몇 가지의 0.18um에서부터 1.50um까지의 CMOS 공정을 제공하고 있으며 설계자는 몇 가지의 공정 중에서 자신의 목적에 맞는 공정을 선택하여 최대 6개의 metal층과 저항, 커패시터, NPN 트랜지스터, 그리고 MEMS(MicroElectroMechanical) 칩을 제작할 수 있다. MOSIS에서 제공하는 공정은 TSMC, AMI, IBM, Agilent, Peregrine, AMS, OMMIC/PML 등에서 제공하고 있으며 이들 공정의 특징을 아래 표 2에 정리하였다.

표 2. MOSIS에서 제공하는 공정내역

Vendor	Process	특징	공정 run	가격
AMI	C5N 0.50um 3 metal, 2 poly, 5 V, no silicide, allows stacked vias	Resistor 가능	월 1 회	\$5,000/5 mm ²
	CWL 0.80um 2 metal, 1 poly, 5 V, no silicide, does not allow stacked vias		현재 계획 없음	NA
	ABN 1.50um 2 metal, 2 poly, 5 V, no silicide, does not allow stacked vias	NPN 가능	월 1 회	\$1,080/4.84mm ²
Agilent	GMOS10QA 0.35um 4 metal, 1 poly, 3.3 V, silicide, allows stacked vias			NA
	AMOS14TB 0.50um 3 metal, 1 poly, 3.3 V, silicide, blockable, does not allow stacked vias	Linear capacitor	월 1 회	\$5,000/5 mm ²
IBM	SiGe BiCMOS 5HP 0.50um 3 metal, 1 poly	Metal top capacitor	3개월에 한번	\$20,000/10mm ²
Peregri ne	CMOS_SOI/SOS 0.50um 3 metal, 1 poly, 3.3 V, polycide on P1, allows stacked vias.	Metal top capacitor	4개월에 한번	\$10,000/5 mm ²
TSMC	TSMC_018 0.18um 6 metal, 1 poly, 1.8/3.3 V, silicide, blockable, allows stacked vias		2개월에 한번	\$24,500/7 mm ²
	TSMC_025SPPM 0.25um 5 metal, 1 poly, 2.5/3.3 V, silicide, blockable, allows stacked vias. 25E (enhanced) available for dedicated runs		대략 월 1 회	\$15,500/10mm ²
	TSMC35_P2 0.35um 4 metal, 2 poly, 3.3/5 V, polycide on P1, allows stacked vias		월 1 회	\$10,000/7 mm ²

	TSMC35_SIL 0.35um 4 metal, 1 poly, 3.3/5 V, source-drain (active) silicide blockable; poly not blockable, allows stacked vias		월 1 회	\$10,000/7 mm ²
AMS	BYR BiCMOS SiGe 0.80um 2 metal, 3 poly, 5 V, does not allow stacked vias		2개월에 한번	\$10,360/6 mm ²
OMMIC /PML	GaAs (ED02AH) 0.20 2 metal, 0 poly, no silicide		현재 계획 없음	\$5,400/6 mm ²

MOSIS에서는 ceramic과 plastic의 다양한 package를 제공하고 있으며 설계자가 원할 경우 design rule checking 서비스도 해주고 있다. MOSIS를 통해서 설계자가 chip을 제작하기 위해서는 아래와 같은 과정을 거치게 된다. 대략 하나의 칩을 만드는 데에는 3-4개월의 기간이 소요된다.

- MOSIS의 공정 schedule과 price list 공표
- 설계자의 MOSIS account 셋업
- 설계자가 MOSIS로 purchase order를 보냄
- 설계자가 MOSIS로 회로 설계를 보냄
- MOSIS의 design syntax 체크
- MOSIS의 design rule check (optional service)
- MOSIS의 모든 설계자들의 설계를 하나의 mask set으로 취합
- MOSIS가 tape을 mask maker에게 보냄
- MOSIS가 mask set을 wafer fabricator에게 보냄
- MOSIS가 공정이 끝난 wafer를 테스트하고 SPICE parameters를 추출
- MOSIS가 가장 좋은 wafer를 packaging vendor에게 보냄
- MOSIS가 고객에게 chip을 선적

(2) EURORACTICE의 MPW

유럽의 EURORACTICE [4]는 ASIC, Multi-Chip Module(MCM), 마이크로 시스템

등의 진보된 전자 공학 기술을 채택함으로써 유럽 산업의 경쟁력을 향상시키기 위하여 European Commission에 의하여 1995에 설립되었다. 이 프로그램을 통하여 유럽의 회로 설계자들에게 저렴한 가격에 안전하고 확실한 방법으로 여러 반도체 공정들을 제공하고 있다. EUROPRACTICE는 모든 기업과, 연구소, 학교 등에 기회를 주고 있는데, 기본적인 idea부터 실제 제품까지 여러 부분에서 다음과 같은 여러 서비스를 하고 있다.

- 개념 연구의 실현 가능성과 증명
- 소량의 prototype 제작
- 큰 규모의 기업 생산 시설로의 접근을 가능케 함
- Custom 설계
- 소프트웨어
- 훈련

EUROPRACTICE는 낮은 위험성과 저렴한 비용으로 최선의 경쟁력 있는 다음과 같은 기술들을 이용 가능케 하고 있다.

- IC Services (ASICs)
- 고밀도 Packaging (HDP)
- Microsystems (MST/MEMS)

EUROPRACTICE에서는 MOSIS의 MPW와 유사한 MPW를 제공하고 있으며 MPW에 참가하는 비용을 한 설계자가 한 wafer 전체 run을 했을 때에 비해 5-10% 정도로 유지하고 있다. 한 설계 당 보통 10-20개의 prototype이 제공되며 bare chip형태와 packaged 된 형태 모두를 제공한다. EUROPRACTICE에서는 한해에 약 90개의 MPW run을 여러 공정에서 제공하고 있다. EUROPRACTICE에서 제공하고 있는 공정들을 아래 표 3에 정리하였다.

표 3. EUROPRACTICE에서 제공하는 공정 내역

Vendor	Process	공정 run	가격 (EURO/mm ²)
Alcatel Microelectronics	2 μm CMOS (2M/2P)	NA	200
	0.7 μm CMOS C07M-D (2M/1P)	2개월에 한번	240

	0.7 μm CMOS C07M-A (2M/1PPdiffC/HR)	2개월에 한번	295
	0.7 μm I ² T100 100V	2개월에 한번	450
	0.5 μm CMOS C05M-D (3M)	2개월에 한번	360
	0.5 μm CMOS C05M-A (3M/2P/HR)	2개월에 한번	450
	2 μm HBIMOS HV 80V (2M/1P/HR)	6개월에 한번	295
	1.2 μm HBIMOS-F HV 80V (2M/1P/HR)	2개월에 한번	360
Austria Mikro Systeme	0.8 μm CMOS (CYE [2P/2M])	2개월에 한번	290
	0.8 μm CMOS (CXQ [2P/2M/HRES])	2개월에 한번	320
	0.8 μm CMOS (CXZ [2P/2M/HRES/HV] 50V)	4개월에 한번	550
	0.8 μm BiCMOS (BYQ [2P/2M/HRES])	1.5개월 에 한번	560
	0.8 μm SiGe (BYR [2P/2M/HRES])	1.5개월 에 한번	890
	0.6 μm CMOS (CUP [2P/3M/HRES])	1.2개월 에 한번	360
	0.6 μm CMOS (CUQ [2P/2M/HRES])	1.2개월 에 한번	340
	0.35 μm CMOS (CSI [2P/3M/5V IO])	2개월에 한번	590

ESM	0.5 μ CMOS D 3M	2개월에 한번	360
	0.5 μ CMOS A 3M	2개월에 한번	450
	0.5 μ BiCMOS 3M	2개월에 한번	750
ATMEL	Wireless & μ C D-MILL 0.8 μ BiCMOS	3개월에 한번	690
UMC	0.25 μ CMOS-D (1P/5M)	3개월에 한번	1700
	0.25 μ CMOS-A (1P/5M MMC/RFCMOS)	2개월에 한번	1700
	0.18 μ CMOS-D (1P/6M)	2개월에 한번	2600
	0.18 μ CMOS-A (1P/6M MMC/RFCMOS)	2개월에 한번	2600
	0.13 μ CMOS-D (1P/8M)	2개월에 한번	15,000
	0.13 μ CMOS-A (1P/8M MMC/RFCMOS)	4개월에 한번	16,500

III. 국내외 Readout Circuits 개발 현황

1. 국내

국내에서 방사선 검출기용 readout 회로를 개발하고 있는 곳은 거의 찾아 볼 수가 없는 데, 최근 들어 한 두 군데 생겨나고 있다. 대표적인 곳으로는 (주)ULS 가 있다. 현재 (주)ULS에서는 MCA, TSCA, Amp, TAR, Counter, HIGHVOLTAGE, POWER, NIM BIN 등 방사선 계측기에 관련된 모든 장비를 연구개발 하여 국산화 하고 있다[5]. 이들 장비는 여러 시중에 나와있는 여러 단위 소자(트랜지스터, OP-amp 등)들을 PCB상에 조립하여 만든 것으로 반도체 IC 설계를 통한 방사선 검출기의 readout 회로 분야에서는 아직 기술력이 없어 제품이 나오지 않고 있다.

2. 국외

국외의 방사선 검출기용 readout 회로 개발 업체에는 EG&G ORTEC, EV Products, AMPTEK, Canberra, Hamamatsu, Lecroy, IDEAS, NOVA R&D 등이 있는데 이 중에서 EG&G ORTEC, EV Products, AMPTEK, Canberra 등의 회사는 방사선 검출기와 그에 필요한 preamplifier, shaping amplifier, MCA 등의 NIM module도 함께 개발하고 있으며 Hamamatsu는 photodiode와 photomultiplier tube등의 방사선 검출기를 주로 개발하며 부수적으로 이들 검출기에 적합한 preamplifier 정도를 직접 개발하고 있다. Lecroy, IDEAS, NOVA R&D 등에서는 방사선 검출기용 readout 회로를 ASIC으로 제작하여 공급하고 있으며 이중 IDEAS와 NOVA R&D는 다채널 방사선 검출기에서 요구되는 다채널 증폭기와 부수회로를 갖춘 ASIC을 전문으로 하고있다.

(1) EG&G ORTEC

미국의 EG&G ORTEC사는 가시광선, 엑스레이, 감마레이, 전하 입자 등을 검출할 수 있는 여러 검출기들을 공급하고 있으며, 이들 검출기에 필요한 preamplifier, shaping amplifier등 각종 amp와 NIM Module을 제작 공급하고 있다. EG&G ORTEC에서 공급하고 있는 제품들을 아래 표 4에 정리하였다.

표 4. EG&G ORTEC에서 공급하는 제품군 [6]

Amplifiers	Fast-Timing Discriminators	Radioactive Sources
Cables and Accessories	Gross Alpha/Beta Counters	Radon Monitors

CAMAC ADC's, Memories, and Associated Software	HV Bias/NIM Power Supplies and Bins	Safeguards
Chemical Weapons Assay	Non-Destructive Assay Systems	Sample Changer
Collection Systems	Monitoring Systems	Single-Channel Pulse-Height Analyzers
Counters, Timers, Ratemeters	MCAs, MCBs, and Associated Software	Software
Delays, Gate and Delay Generators, Logic Modules, and Linear Gates	Multichannel Scalers and Multiple-Stop Time Spectrometer	Spectroscopy Systems
Detectors	Photomultiplier Tube Bases	Time-to-Amplitude Converters and Time Calibrator
Digital Current Integrator	Preamplifiers	Whole-Body Counter
Digital Signal Averager	Pulse Generators	

(2) EV Products

미국의 EV Products사에서는 CdZnTe 검출기 및 어레이와 여기에 필요한 preamplifier와 다채널 readout 회로를 ASIC으로 개발 공급하고 있다[7].

(3) AMPTEK

미국의 AMPTEK사는 인공위성과 엑스레이, 감마레이 검출을 위한 검출기와 엑스레이 tube, MCA, preamplifier와 전반부 회로, 전자/이온 검출기 등을 개발 공급하고 있으며 이를 아래 표 5에 정리하였다.

표 5. AMPTEK에서 공급하는 제품군 [8]

구분	Model No.	Application
X-Ray & Gamma Ray Detectors	XR-100CR	X-Ray Detector with 186 eV Resolution

	XR-100T-CZT	X-Ray and Gamma Ray Detector ay Detector
	XR-100T-CZT1	Medical X-Ray Detector
	ROVER	Portable Gamma Ray and X-Ray Detector System
	GAMMA-X	Scintillation Detector (NaI) & MCA
X-RAY Tube	LASER-X	X-Ray Tube System for Portable XRF
Multichannel Analyzer (MCA)	MCA-8000A	Multichannel Analyzer with 16k Channels
Charge Sensitive Preamplifier & Front End Electronics	A250 A225 A203	Charge Sensitive Preamplifiers
	A121 A111 A101	Preamplifier/Discriminators
	A275 A206	Pulse Shaping Amplifiers
	A150	Low Level Discriminator
	BLR1	Baseline Restorer
	PH300	Peak Hold Detector
Electron & Ion Detectors	MD-501	Electron & Ion Detector
	MD-502	Ultra-High Vacuum Electron & Ion Detector
Spaceflight Instrumentation	CEASE	Space Radiation Alarm
	DIDM	Digital Ion Drift Meter
	ESA	Spacecraft Charging Instrumentation

(4) Canberra

미국의 Canberra는 방사선 검출기, MCA 장비, NIM 모듈, 방사선 동위원소 등을 개발하여 원자력 발전소, 환경 모니터링, 핵연료 제조 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다[9].

(5) Hamamatsu

일본의 Hamamatsu는 주로 다양한 종류의 photodiode, 영상 센서, 다채널의 위치검출기, APD(Avalanche Photodiode), 적외선 센서, phototransistor, CdS, PM tube 등을 제작 공급하고 있으며 readout 회로 부분에서는 자사에서 개발한 photodiode에 연결하여 쓸 수 있도록 preamplifier정도를 개발 공급하고 있다[10].

(6) Lecroy

미국의 Lecroy는 방사선 검출기에 쓰이는 NIM 모듈 및 CAMAC 모듈 개발 뿐만 아니라 여러 분야에서 쓰이는 계측기도 제작 공급하고 있다. Lecroy에서 공급하는 다채널 readout 회로 중 ASIC으로 제작된 것들 중 다채널을 위한 것으로는 TRA402가 있는데 이는 4개의 채널을 갖는 transresistance amplifier로서 MWPC(Multi-Wire Proportional Counter)용으로 개발된 것이다[11]. 따라서 GEM 검출기의 readout으로서 쓰일 수 있는 가능성은 있으나 채널 수의 제한으로 GEM 검출기의 readout으로 쓰일 경우 부피와 공간이 검출기에 비해 너무 비대해지는 문제가 있다.

(7) IDEAS

노르웨이의 IDEAS는 1992년에 CERN출신 연구자들이 설립하여 방사선 검출기용 다채널 readout ASIC과 DAQ(data acquisition system)를 전문적으로 개발 제작하고 있다. 현재 IDEAS에서 개발 공급하고 있는 전반부 amplifier들을 아래 표 6에 정리하였다.

표 6. IDEAS의 readout ASIC 제품군 [12]

Chip	Det. Load	Readout	Dyna mic Range (fC)	채 널 수	Gain uA/fC	잡음 (rms. e ⁻)	Tp (CR - RC)
VA1	High	Serial Analog	72	128	10	165+6.1/pF	2us
VA2	Medium	Serial Analog	28	128	25	60+11/pF	2us
VA3	Low	Serial Analog	18	12	50	40+12/pF	2us

				8			
VA_HDR1	High	Serial Analog	320	12 8	2	660+4.2/pF	1.5u s
VA64_HDR 1	High	Serial Analog	320	64	2	660+4.2/pF	1.8u s
VA64_HDR 4	High	Serial Analog	720	64	0.56	350+4/pF	6us
VA_RICH	Medium	Serial/Parallel Analog	144	64	10-12	100+15/pF	2us
VA_1CH	High		500	1	2mV/f C		
VA1_8CH	High	Parallel Analog	50	8			
VA1	High	Serial Analog	72	12 8	10		1us
VA32_HDR 2	High	Serial Analog Parallel Preamplifier Output	1650	32	0.4	2000+3.3/p F	2us
VA32C	Low	Serial Analog Parallel Preamplifier Output	18	32	50	40+12/pF	2us
VAS	Medium	Serial Stretched Analog Parallel Preamplifier Output				400+25/pF	2us
VA32-75	Medium	Serial/Parallel	72	32	10	140+26/pF	75ns

		Analog					
VA32-500	Medium	Serial/Parallel Analog	28	32	25		500ns

위의 표에서 정리한 readout 회로들을 살펴보면 VA1, VA2, VA3, VA_HDR1의 model 들은 채널 수가 128개로서 충분한 다채널을 제공하고 잡음의 크기도 매우 작다. 하지만 shaping amplifier의 peaking time이 1.5-2us로서 10ns 미만의 peaking time을 요구하는 GEM 검출기에는 적합하지 않다. IDEAS에서 제공하는 amplifier들 중 peaking time이 가장 작은 모델인 VA32-75도 peaking time이 75ns로서 GEM 검출기에서 나오는 신호들 중 많은 부분이 손실되게 된다. 또 GEM 검출기의 readout 회로는 발생한 신호가 어느 문턱 에너지 이상이면 모두 일정한 output을 내주는 counting 모드로 동작하여야 하는데 이 또한 지원이 안된다. VA1 chip의 layout과 회로 block diagram은 각각 그림 3, 4와 같다.

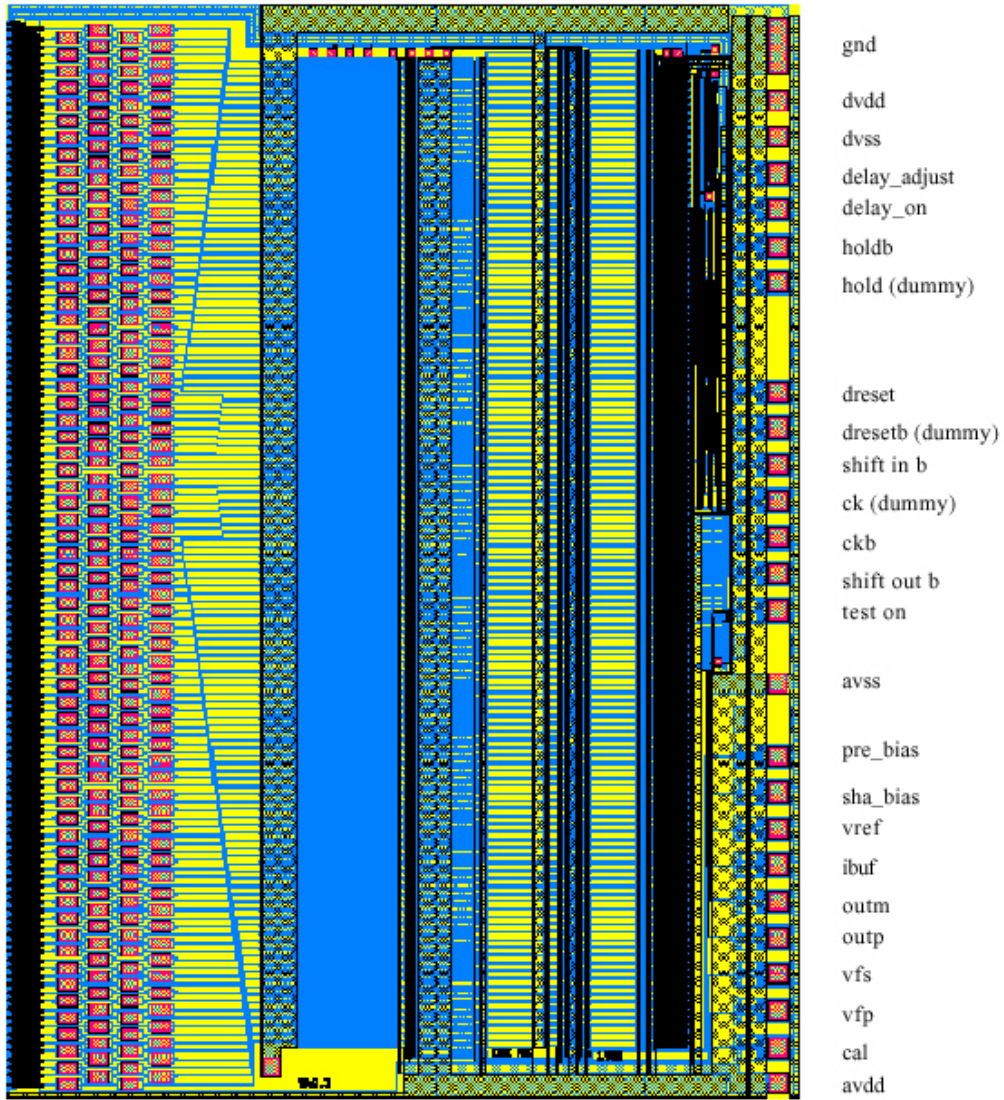


그림 3. IDEAS의 VA1 chip의 layout

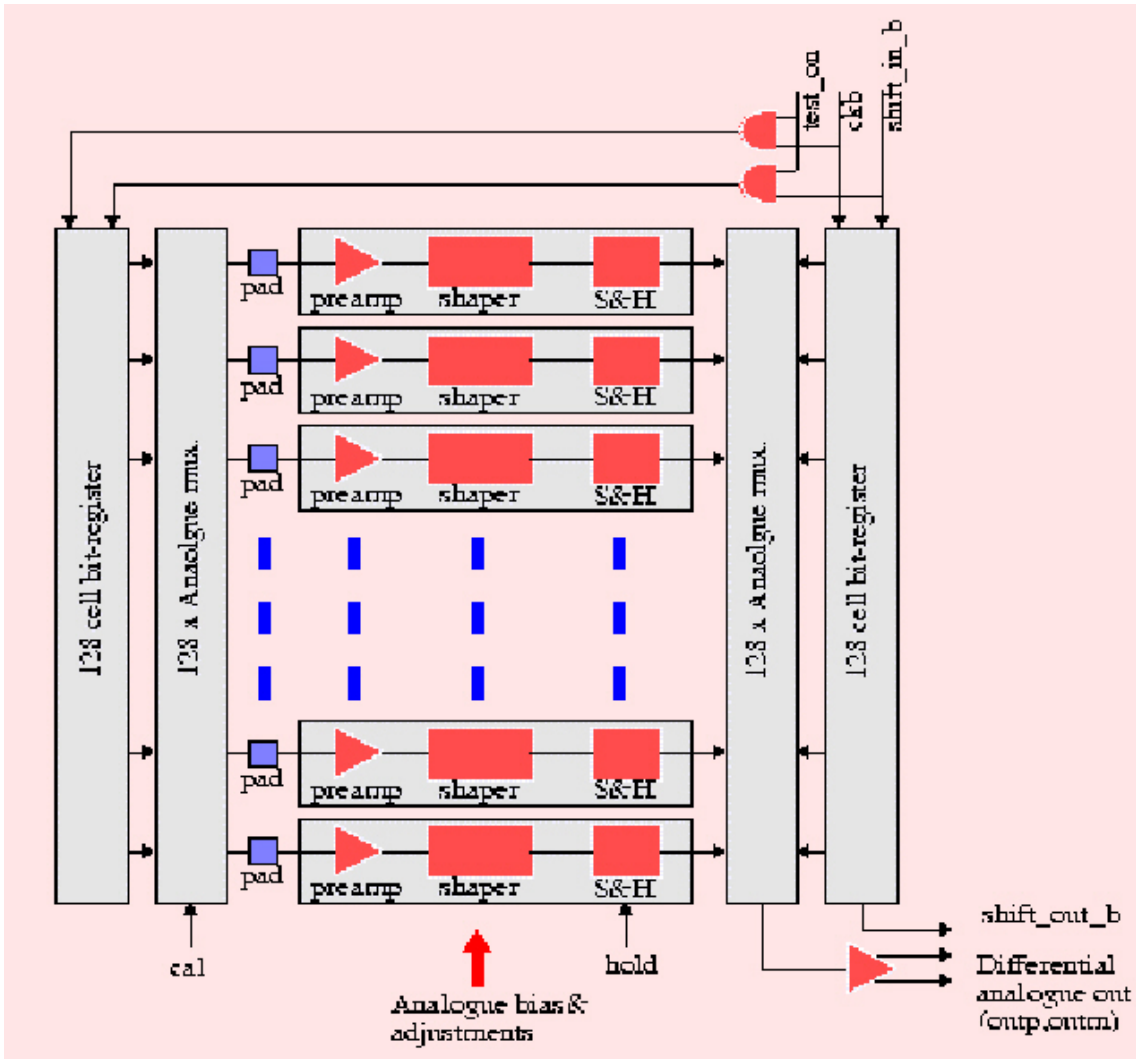


그림 4. VA1의 block diagram

IDEAS의 readout ASIC들은 모두 1.2um N-well CMOS double-poly, double-metal 공정을 사용했으며 power는 $V_{dd} = +2.0V$, $V_{ss} = -2.0V$ 이다. VA1 chip의 1개의 채널은 charge-sensitive preamplifier, shaper, sample/hold로 되어 있으며 128개의 채널은 128채널의 analog MUX로 들어가서 최종적으로 한 개의 output pad에서 serial analog output을 내보내게 된다.

(8) NOVA R&D

미국의 NOVA R&D는 1984년에 설립되어 산업, 의료, 천문학 분야에서 쓰이는 영상 검출기, 센서 등의 개발과 이들에 사용되는 혼성 신호 다채널 ASIC readout chip을 개발하는 일을 주로 하고 있다[13]. 자사가 개발해 놓은 다채널 chip뿐만 아니라 고객이 원하는

spec의 chip도 개발 공급하고 있다. 현재 NOVA R&D에서 공급하고 있는 chip은 RENA와 ACE 두 가지 인데, 본 과제에서는 RENA chip을 구매하여 GEM 검출기의 readout으로 test 중이다. RENA chip은 32채널의 입력을 받아 하나의 serial analog output과 각 채널의 encoded된 address 정보를 내보낸다. Shaper의 peaking time은 0.4-6us까지 총 8가지를 선택할 수 있게 되어 있으며 관심 있는 채널의 정보만을 읽을 수 있는 sparse readout 모드의 기능도 제공하고 있다. RENA chip의 잡음은 $100 + 6 \text{ rms. e}^-/\text{pF}$ 이다. RENA chip의 최소 shaping time이 400ns로서 GEM 검출기에서 요구하는 10ns의 shaping time에는 턱없이 모자라는 성능이다. RENA chip의 layout과 block diagram은 각각 그림 5, 6과 같다.

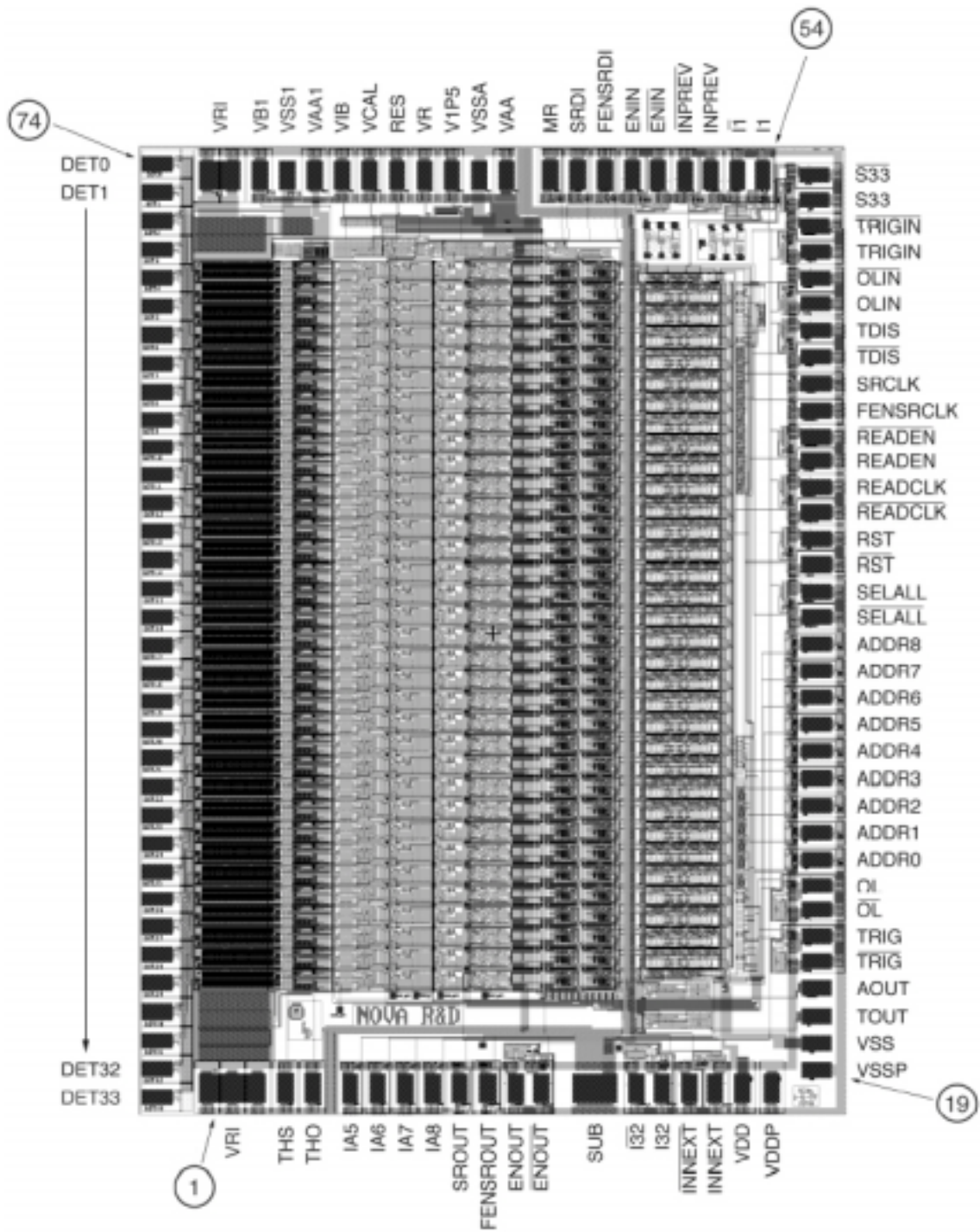


그림 5. RENA chip의 layout

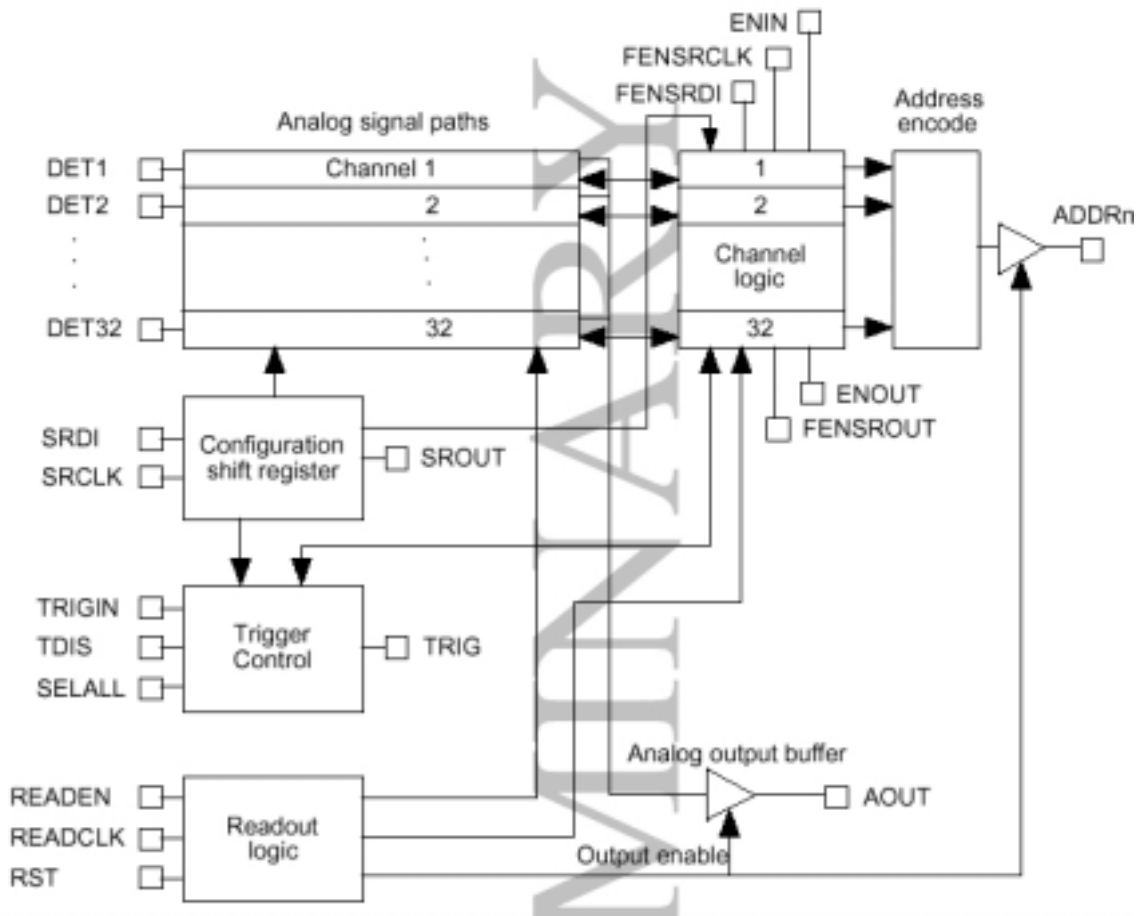


그림 6. RENA chip의 block diagram

참 고 문 헌

- [1] <http://idec.kaist.ac.kr> IC제작지 월/MPW
- [2] <http://www.isrc.snu.ac.kr/B-service1FRAME.htm> 공정 및 장비/MPC
- [3] <http://www.mosis.org>
- [4] <http://www.europpractice.com>
- [5] <http://www.uls.co.kr>
- [6] <http://www.ortec-online.com> Products
- [7] <http://www.evproducts.com>
- [8] <http://www.amptek.com> Products
- [9] <http://www.canberra.com>
- [10] <http://www.hamamatsu.com>
- [11] <http://www.lecroy.com>
- [12] <http://www.ideas.no>
- [13] <http://www.novarad.com>

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET						
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code
KAERI/RR-2183/2001		KAERI/CM-477/2001				
Title / Subtitle						
Development of Gas Electron Multiplier(GEM) for Digital Radiographic System						
Project Manager and Department		B.S. Moon (MMIS Team, Korea Atomic Energy Research Institute)				
Researcher and Department		KAERI : B.S.Moon, C.E.Chung, J.W.Lee, S.B.Hong, Y.K.Kim, J.Y.Kim, W.K.Lee, S.H.Han, Mazel Tech. : J.S.Lee, W.K.Lee, S.H.Cheon, K.S.Kim, J.H.Back, H.Bae, W.S.Kang, Y.C.Jung, J.S.Kim Yonsei Univ. : H.S.Cho, S.M.Kang, D.K.Hong				
Publication Place	Taejon	Publisher	Korea Atomic Energy Research Institute	Publication Date	2000. 4.	
Page	222 p.	Ill. & Tab.	Yes(0), No ()	Size	21×29.6 cm.	
Note						
Classified	Open(0), Restricted(), ___ Class Document		Report Type	Research Report		
Sponsoring Org.	Yonsei University		Contract No.			
Abstract (15-20 Lines)						
<p>Two computer programs SHOWFIELD and IMAGEQUAL have been developed. SHOWFIELD is used to draw electric field lines for GEM detectors and IMAGEQUAL is used to study the spatial resolution of X-ray images. Various simulation runs have been carried out using EGS4 to study the characteristics of electrons generated by Micro-Channel plates and Ar, Xe gases. A prototype GEM detector was developed through this project. The GEM detector is composed of a pair of GEM plates, a Micro-Channel plate, readout circuit in a gas filled chamber. GEM plate were made in CERN to meet KAERI's design specification and the Micro-Channel plates were purchased from Proxitronic company</p>						
Subject Keywords (About 10 words)		GEM, Gas Detector, Micro Channel Plate, Photo Converter, EGS4, Maxwell, CCD, CsI				

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/RR-2183/2001	KAERI/CM-477/2001				
제목 / 부제	방사선 영상 장비용 GEM 검출기 개발				
연구책임자 및 부서명	한국원자력연구소 미래원자력기술개발단 MMIS팀 문병수				
연구자 및 부서명	한국원자력연구소 : 문병수, 정종은, 이정운, 홍석봉, 김용균, 김장열, 김정복, 이우교, 한상효 마젤테크 : 이지수, 이원구, 천상호, 김경수, 백정훈, 배한, 강우식, 정옥철, 김진숙 연세대학교 : 조효성, 강상목, 홍대기				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2000년
페이지	222 p.	도표	있음(0), 없음()	크기	21×29.6 cm.
참고사항					
비밀여부	공개(0), 대외비(), __ 급비밀	보고서종류	연구보고서		
연구위탁기관	연세대학교	계약번호			
초록 (15-20줄내외)	<p>디지털 방사선 영상장비용 GEM 검출기 개발을 위하여 전장가시화 프로그램인 SHOWFIELD와 X-선 영상 평가에 필요한 IMAGEQUAL 등 코드를 개발하였으며 EGS4을 사용하여 Gas 검출기의 해상도 분석, Micro-Channel Plate 및 Ar, Xe 기체에 의하여 생성되는 전자의 수 및 에너지 특성분석을 하였다.</p> <p>본과제 설계사양 요건에 맞는 GEM Plate를 CERN에 위탁 제작하였으며 Proxitronic사로 부터 광전자 변환체를 구입하여 GEM 검출기 시제품을 설계, 제작 및 특성평가를 완료하였다. 또한, 피검물 이송장치를 제작하였다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	GEM, Gas Detector, Micro Channel Plate, Photo Converter, EGS4, Maxwell, CCD, CsI				

주 의

1. 이 보고서는 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가 과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개 하여서는 아니됩니다.