

2009년 2월

박사학위 논문

단일 조사 이중 X-선 영상획득용  
새로운 검출기 모듈에 관한 연구

.

조선대학교 대학원

원자력공학과

여화연

단일 조사 이중 X-선 영상획득용  
새로운 검출기 모듈에 관한 연구

A Study on New Detector Module  
for Single Exposure Dual X-ray Imaging

2009년 2월 25일

조선대학교대학원

원자력공학과

여화연

# 단일 조사 이중 X-선 영상획득용 새로운 검출기 모듈에 관한 연구

A Study on New Detector Module  
for Single Exposure Dual X-ray Imaging

지도교수 정운관

이 논문을 원자력공학 박사학위신청 논문으로 제출함

2008년 10월

조선대학교대학원

원자력공학과

여화연

# 여화연의 박사학위 논문을 인준함

위원장    조 선 대 학교    교 수    이 경 진

위원        조 선 대 학교    교 수    김 택 현

위원        조 선 대 학교    교 수    송 종 순

위원        조 선 대 학교    교 수    나 만 균

위원        조 선 대 학교    교 수    정 운 관

2008년 12월

조선대학교 대학원

# 목 차

표목차	iii
그림목차	iv
Abstract	vi
제1장 개요	1
제1절 연구배경 및 목적	1
제2절 연구내용 및 범위	3
제2장 Dual Mode 검출기 모듈의 설계	4
제1절 X-ray 스펙트럼 (X-ray spectrum)	4
제2절 Dual Mode 검출기 및 방사선적 특성	7
제3절 Dual Mode 검출기 모듈의 최적화 설계	15
1. LED 및 HED 최적화 설계	15
2. PIN형 포토다이오드(Photodiode)의 설계	21
3. 신호처리 장치의 최적화 설계	28
제3장 Dual Mode 검출기 모듈의 제작 및 평가	31
제1절 Dual Mode 검출기 모듈의 제작	31
1. 포토다이오드 제작 및 실험	31

제2절 포토다이오드의 성능 평가	34
1. I-V 측정실험	34
2. Quantum Efficiency 측정	35
제3절 LED 및 HED 모듈 제작 및 실험	38
제4절 LED 및 HED 성능 평가	39
제4장 실험 환경 구축	41
제1절 X-ray 선원 및 검출기 모듈	41
1. X-ray 선원	41
2. X-ray scanner	43
제2절 Scan 구동 시스템 및 시스템 set-up 소프트웨어	45
1. Scan 구동 시스템	45
2. 시스템 set-up 소프트웨어	46
제5장 X-ray 반응 실험 및 X-ray 영상 실험	48
제1절 X-ray 반응 실험	48
1. 엑스레이 반응 실험 (X-ray respinse test)	48
2. LED 및 HED의 X-ray Uniformity 실험	49
3. LED 및 HED의 X-ray Linearity 및 Signal 실험	50
4. LED 및 HED의 X-ray Signal Ratio 실험	51
5. LED 및 HED의 X-ray Z-MAP 실험	53
제2절 X-ray 영상 실험	56
1. 실험 방법 및 조건	56
2. 실험 결과	58
제6장 결론 및 고찰	59

## 참고문헌

# 표 목 차

표 2-1. 사용된 X-ray tube 특성	5
표 2-2. 주요 무기물 섬광체 별 특성	8
표 2-3. 상용화된 DT와 ET의 검출기 모듈 특성	11
표 2-4. Lanex 계열의 스크린 타입의 섬광체에 대한 특성	15
표 2-5. Z-map 계산을 위한 Monte Carlo 모사에 필요한 조건 및 특징	18
표 2-6. Z-map 계산에 필요한 인자	19
표 4-1. X-ray 의 Generator 세부 사양	42
표 5-1 X-ray 반응실험 조사조건	48

# 그림 목 차

그림 1-1. BIS의 기본 원리 및 검출기 구조	2
그림 2-1. Monte Carlo Simulation에 사용된 X-ray tube의 기하학적 구조	5
그림 2-2. MCNPX 와 SRS 78 code를 이용한 스펙트럼 비교	6
그림 2-3. Scintillation mechanism	7
그림 2-4. 상용화된 검출기 모듈의 Dual 구조	10
그림 2-5. DT와 ET의 HED에 1mm 구리필터의 흡수에너지 스펙트럼	12
그림 2-6. Z-map Example	14
그림 2-7. New, LED, HED와 구리필터 두께와 흡수에너지	16
그림 2-8. New, DT와 ET의 구리필터 두께에 따른 에너지흡수율과 광발생비	17
그림 2-9. MCNP simulation을 위한 포토다이오드와 scintillator 구조	18
그림 2-10. 140keV, 0.8mAs 일 때 DT와 new PD, ET 의 Z-map 비교	20
그림 2-11. 160keV, 0.8mAs 일 때 DT와 new PD, ET 의 Z-map 비교	20
그림 2-12. PIN 포토다이오드 구조	22
그림 2-13. 전압과 전류에 대한 포토다이오드의 특성	22
그림 2-14. ATHENA Tool을 이용한 포토다이오드 공정 구조해석 흐름도 및 예시	26
그림 2-15. ATLAS Tool을 이용한 특성 분석 예시	26
그림 2-16. CADENCE Tool을 포토다이오드 Mask Layout 공정 예시	27
그림 2-17. IVC 102 를 이용한 Integration Mode 신호처리회로 Diagram	29
그림 2-18. DDC 102 를 이용한 Integration Mode 신호처리회로 Diagram	29
그림 3-1. V-C-R	32
그림 3-2. PD 평면 기하학적 구조	33
그림 3-3. 생산된 16 채널 선형 어레이 포토다이오드	33
그림 3-4. Dark Current를 측정하기 위한 블록 다이어그램	34
그림 3-5. 고저항(5k $\Omega$ )과 저저항(80-120 $\Omega$ ) 16ch 포토다이오드 I-V측정	35
그림 3-6. QE실험 블록다이어그램	36
그림 3-7. Quantum Efficiency	37



그림 3-8. 섬광체 Coupling 전, 후, 구리필터 16채널 포토다이오드	38
그림 3-9. SNR 측정 모듈이 장착된 IVC 102 모듈 기반 신호처리 보드	39
그림 3-10. SNR 측정 모듈이 장착된 DDC 118 모듈 기반 신호처리 보드	40
그림 4-1. 실험에 사용된 산업용 X-ray Generator	41
그림 4-2. X-ray Scanner	43
그림 4-3. 실험에 사용된 X-ray Scanner	44
그림 4-4. 모터에 의해 스캔 시 object의 움직임	45
그림 4-5. offset correction and gain correction output signal	46
그림 5-1. New Detector의 채널별 uniformity @ No filter & Phantom	49
그림 5-2. New Detector의 Integration time에 따른 출력 신호 @ No Phantom	50
그림 5-3. New Detector의 Filter 두께에 따른 출력신호비 (HED/LED)	51
그림 5-4. New Detector의 HED에서 Filter 두께에 따른 출력신호	52
그림 5-5. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map - DT社	53
그림 5-6. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 0.7 mm	54
그림 5-7. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 1.0 mm	55
그림 5-8. ASTM F792 step wedge	56
그림 5-9. X-ray Imaging 프로그램	57
그림 5-10. ASTM F792 step wedge의 X-ray 영상	58

# Abstract

## A Study on New Detector Module for Single Exposure Dual X-ray Imaging

Yeo Hwa Yeon

Advisor : Prof. Chung Woon-Kwan Ph.D

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Single exposure dual X-ray imaging can be used to separate soft and dense-material images for medical and industrial applications. This study keep focusing baggage inspection system(BIS) specifically.

New detector modules for single exposure dual X-ray imaging are consisted of low energy detector (LED) and high energy detector (HED).

So this study has carried out simulation and experiment for new detector modules that LED was coupled with Lanex Regular scintillator and HED were coupled with Lanex fast B scintillator considered in this study.

First, the optimized thickness of copper filter coupled HED to separate low energy and high energy was simulated by the given X-ray energy (140 kVp, 1 mA) using Monte Carlo simulation codes, MCNPX. So as a result of simulation, the copper filter thickness is 0.7 mm.

For the design of PIN photodiode, ATLAS device simulation tool was used. 16 channels PIN photodiode of 1.5 mm x 3.2 mm for Dual X-ray imaging detector was fabricated in the process of ETRI. And its dark current and quantum efficiency, terminal capacitance were measured.

It was proven that the Lanex Fast B coupled HED were a sufficient candidate to

replace the CsI(Tl) commerced in dual X-ray system, since these give a strong signal, overcoming system noise.

Finally dual X-ray image was acquired through correction of the LED X-ray Image and the HED X-ray Image.

# 제1장 개요

## 제1절 연구배경 및 목적

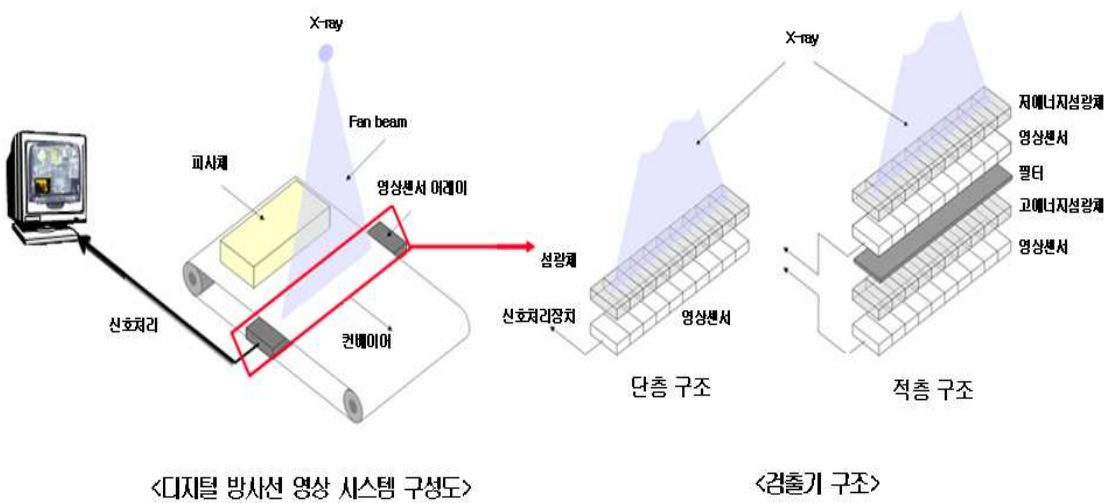
비파괴검사 방법 중의 하나인 X-ray투과영상법은 IT기술과 함께 기존의 필름영상을 이용하는 방식에서 디지털방식의 직접영상 획득 및 전송 등이 수행가능 한 Digital Radiography (이하 “DR”)로 바뀌고 있으며, 특히 의료, 산업 및 보안 분야에 널리 적용되고 있다. 본 연구는 DR이 적용되고 있는 대표적인 분야로서 공항 등에서 마약, 밀수, 폭탄 등을 검색하는 Baggage Inspection System (이하 “BIS”) 중 핵심 분야인 이중방식 선형배열 X-ray 검출기 모듈 (Dual mode linear array X-ray detector module)에 관한 연구이다.

BIS에서 적용되는 이중방식 선형배열 X-ray 검출기 모듈은 이층 적층 구조 (two layer stacked structure) 또는 샌드위치 (sandwich) 구조로 두 개의 선형배열 검출기 모듈을 사용하고 있으며,[1] 상위 검출기 모듈은 X-ray 스펙트럼 중 저에너지 영역을 검출하고 영상화 한다고 하여 저에너지 검출기 (Low Energy Detector : LED)라 하며, 하위 검출기 모듈은 X-ray 스펙트럼 중 고에너지 영역을 검출하고 영상화하기 때문에 고에너지 검출기 (High Energy Detector : HED )라 한다. 이때 각층의 검출기는 방사선을 광자 (photon)로 전환시켜주는 섬광체 (scintillator)와 섬광체로부터 발생된 광자를 받아들여 전기적 신호를 생성하는 광다이오드 (photodiode)로 구성되어 있으며, 생성된 전기는 amplifier 및 ADC 등을 통하여 양자화 된 디지털 값을 컴퓨터로 전송할 수 있도록 모듈화 되어 저에너지 검출기 모듈과 고에너지 검출기 모듈의 조합으로 dual mode (low & high) X-ray 영상을 생성한다.

일반적으로 <그림1-1>과 같이 상용화된 이중방식 선형배열 X-ray 검출기 모듈에서 적용되는 저에너지 검출기에서는 screen film형의 섬광체를 사용하고, 고에너지 검출기에서는 저에너지 영역의 X-ray 스펙트럼을 차단하고 고에너지 영역의 X-ray 스펙트럼만을 감지하기 위해 구리 (copper) 필터를 이용하며, 이때 사용 된 섬광체는 고에너지 영역의 X-ray 스펙트럼을 충분히 흡수하기 위해 screen film형의 섬광체 대신 crystal형 섬광체를 사용한다.[2][3]

그러나 screen film형의 섬광체는 저렴하고 구매하기 쉬운 반면에 crystal형 섬광체

는 고가이며 제작 주문을 해야 하는 문제점을 안고 있어, 고에너지 검출기 모듈의 제작단가를 높이는 주원인이 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 crystal형 섬광체를 채용하고 있는 고에너지 검출기 모듈에 대한 분석을 토대로 구리 (copper) 필터와 screen형 섬광체 조합만으로도 crystal형 섬광체를 대신한 고에너지 검출기 모듈 제작 가능성을 타진하고, 이 고에너지 검출기 모듈을 장착한 이중 적층 구조의 dual mode X-ray 검출기 모듈에 대한 최적화 및 특성 분석을 컴퓨터 모사와 실험을 통하여 수행하였다.



<그림 1-1. BIS의 기본 원리 및 검출기 구조>

이와 같은 dual mode 검출기 모듈에 관한 연구는 공항 및 항만의 X-ray 검색 시스템이 밀도가 낮은 마약이나 폭발물 등이 밀도가 높고 두께가 두꺼운 물질에 밀봉하여 들어올 경우 단일 에너지 조사에 의해서는 그 내용물을 확실하게 판단할 수 없는 단점을 극복하는 필수 영상 기술에 활용될 수 있다.[4] [5] 또한 dual mode imaging과 같은 동일 원리를 이용하여 인체 내 골밀도를 검사하는 의료용 골밀도 검사 장치 (dual energy X-ray absorptiometry)에서도 적용이 가능하며,[6] 이를 위해서는 의료용 X-ray에 대해 본 연구에서 적용하고 분석하는 방식을 그대로 활용하여 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈의 최적화가 수행되어야 한다.

## 제2절 연구내용 및 범위

본 연구는 Dual-Energy Digital Radiography 방식 중, 단일조사 X-ray (single shot X-ray exposure) 장치와 dual mode 검출기 모듈 (Low Energy Detector & High Energy Detector)을 이용한 dual X-ray imaging이 가능한 검출기 모듈의 설계, 제작 및 특성 분석에 관한 연구로서,

제2장은 Dual mode 검출기 모듈의 설계에 관한 내용으로, 상용 BIS에서 사용되고 있는 X-ray 발생장치의 스펙트럼과 dual mode 검출기에 대한 특징 및 방사선적 특성을 분석하여 새롭게 제안 할 검출기와 검출기 모듈의 최적 설계 방향을 기술하였으며, 이를 토대로 최적 검출기의 설계 및 검출기 모듈에 대한 최적 설계를 실시하였다.

제3장에서는 제2장에서 제시한 설계치를 기준으로 섬광체 및 포토다이오드로 구성된 LED 및 HED와의 검출기의 제작, LED 및 HED의 신호처리 장치의 제작에 관한 내용과 이에 대한 실험 준비과정을 기술하였다.

제4장에서는 상용화된 LED 및 HED 검출기와 새롭게 제안 한 검출기 모듈에 대해 전기적, 광학적, 방사선적 특성 실험을 실시하여, 새롭게 제안 된 검출기 모듈이 BIS 용도로 사용 가능함을 증명하였다.

제5장에서는 새롭게 제안 된 검출기 모듈이 적용된 BIS에 대해, 기본 특성 실험과 다양한 형태의 피검사체에 대한 X-ray 영상을 획득하여 실험 및 분석을 실시하였으며,

마지막으로 제6장에서는 본 연구내용을 요약하고 수행 중 문제점을 파악하여 개선사항을 도출하여 향후 수행계획을 수립하였다.

## 제2장 *Dual Mode* 검출기 모듈의 설계

### 제1절 *X-ray* 스펙트럼 (*X-ray spectrum*)

Dual energy X-ray radiography 방식에는 X-ray 발생 장치에서 초기에 low energy 영역의 X-ray spectrum과 high energy 영역의 X-ray spectrum을 독립적으로 발생시켜, 단일 영상 검출기에 입사시켜 영상화하는 double shot X-ray radiography 방식이 있으며,[7] X-ray spectrum을 초기에 분리하지 않고 두 개의 검출기 모듈 (low & high energy detector module)을 이용하여 저에너지 영역의 스펙트럼에서 획득한 영상과 고에너지 영역의 스펙트럼에서 반응하는 영상을 이용한 single shot X-ray radiography 방식이 있다.

Double energy shot 방식과는 달리 single shot 방식은 검출기 모듈의 물리적 구조에 의해 low energy 영역과 high energy 영역의 X-ray spectrum을 분리하여 영상화하기 때문에 두 검출기 모듈에 입사하는 초기 X-ray spectrum에 대한 고찰과 두 개의 영상 검출기 모듈에서 분리된 X-ray spectrum의 분석이 중요하다.

본 연구는 새롭게 제안하는 영상 검출기 모듈의 특성 분석과 실험을 통한 증명에 초점이 맞춰져 있기 때문에, BIS에서 활용되고 있는 X-ray tube를 대상으로 X-ray spectrum을 모사하며, 이 모사한 spectrum을 통하여 새롭게 제안하는 영상검출기 모듈의 방사선적 특성을 고찰하였다.

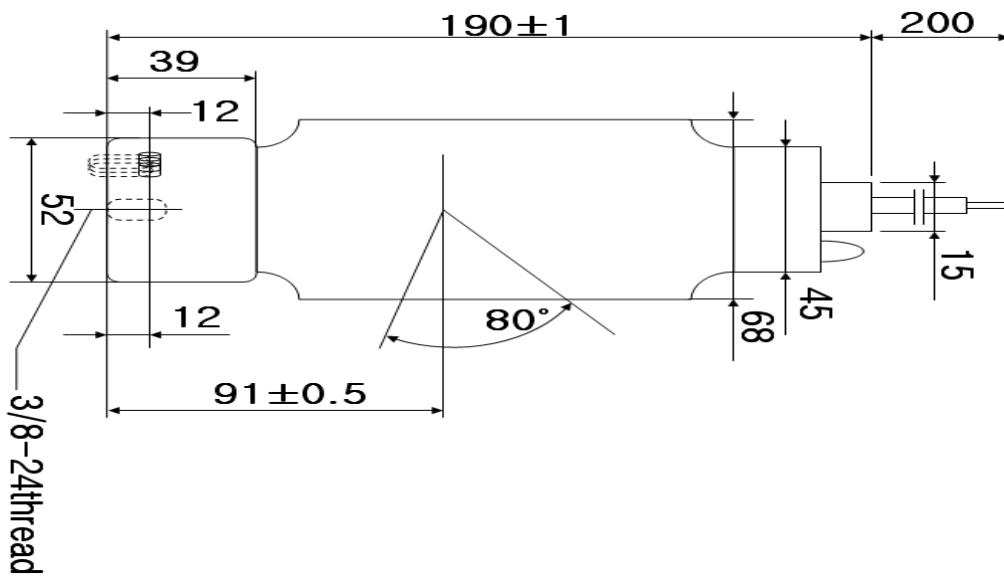
본 연구에서 X-ray spectrum은 Monte Carlo 모델링 code인 MCNPX[8]를 사용하였으며, X-ray tube의 Anode 각도는 22°, 선원과 검출기의 거리(SDD)는 750mm로 하여 X-ray spectrum의 각 에너지 beam에 따른 intensity를 구하였다.[7] 모델링한 X-ray spectrum을 검증하기 위하여 X-ray spectrum 생성 모사 code인 SRS 78[7]을 이용하여, X-ray 튜브내의 target material과 window material 등을 MCNPX code에서 사용된 값과 동일하게 적용하여 X-ray spectrum을 획득하였고 이에 대해 MCNPX code에서 생성된 spectrum과 비교하였다.

모델링한 X-ray tube의 주요 특성은 <표 2-1>에 나타냈으며, 이와 관련한 X-ray tube의 기하학적 구조는 <그림 2-1>에 나타내었다.

<표 2-1. 사용된 X-ray Generator 특성>

Willick Engineering Company <XP-ZSCAN GEN> : 140kV/1mA

tube voltage max	160kVp	nom. focal spot	0.8mm x 0.8mm
tube current max (depends on cooling)	1mA	inherent filtration	0.8Be,1.5glass(mm)
tube power max	480W	anode angle	22°
filament voltage co.	3.5V	beam angle	80°
filament current	3.2±0.2A	frequency	60Hz
		cooling	oil, gas

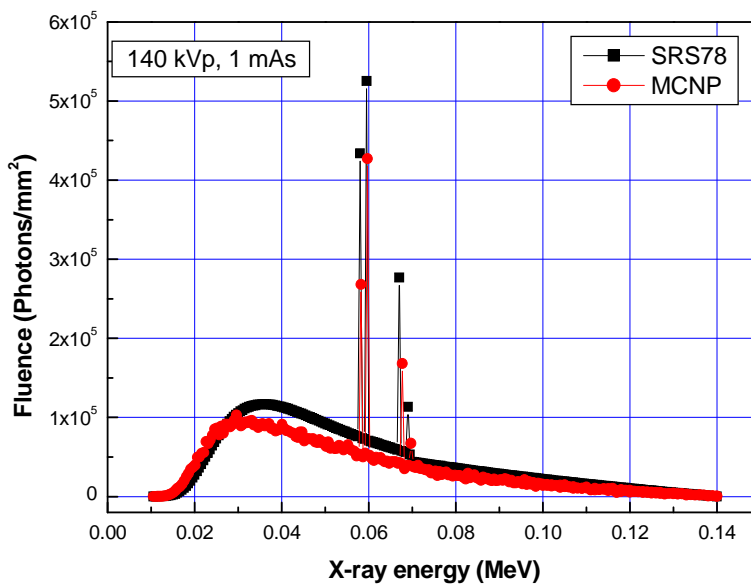


<그림 2-1. Monte Carlo simulation에 사용된 X-ray tube의 기하학적 구조>



MCNPX 및 SRS78 code 모사결과는 <그림 2-2>에서와 같이 각 X-ray 에너지에 대한 X-ray photons, 즉 intensity를 display하였다. 두 스펙트럼에서 보이는 바와 같이 0.07 MeV 이하에서는 SRS78 code의 결과보다 MCNPX code에서의 X-ray fluence가 다소 적게 나타났으나 0.07 MeV 이상에서의 spectrum intensity는 비슷하게 나왔으며, 특히 X-ray tube에서 사용되는 Al filter에 의해 저에너지 영역의 bremsstrahlung 엑스선이 제거가 되고 tungsten target에서 발생하는 두 개의 특성 엑스선이 거의 일치함을 알 수 있었다.

본 연구에서 X-ray spectrum 모사 code인 SRS 78대신에 Monte Carlo 모델링 code인 MCNPX를 이용한 이유는 첫째, SRS 78 code는 주로 의료용에 적합하도록 설계된 code로서 산업용에 적용하기 위해서는 비교 데이터가 필요하며, 두 번째는 dual mode 검출기 (low energy detector 및 high energy detector)에서의 X-ray spectrum 분리 및 흡수 정도, 그리고 예상되는 신호의 정도를 Monte Carlo 모델링하여야 하기 때문이다.



<그림 2-2. MCNP 와 SRS 78 code를 이용한 스펙트럼 비교>

## 제2절 Dual Mode 검출기 및 방사선적 특성

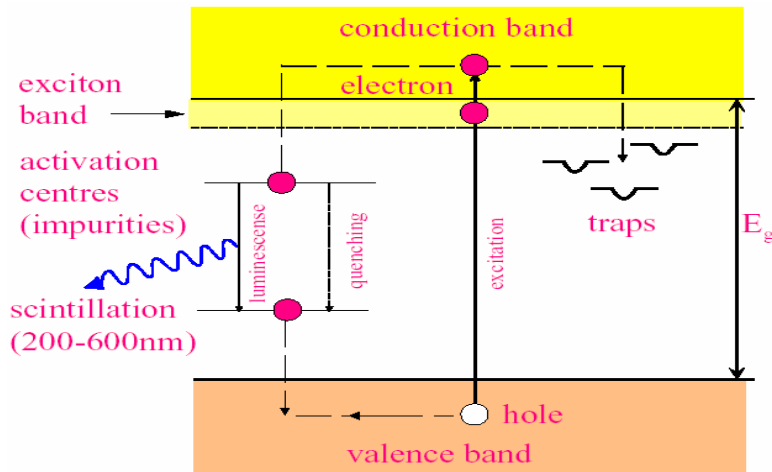
### 1. Dual mode 검출기

앞서 언급한 바와 같이 상용화된 dual mode 검출기 및 새롭게 제안된 dual mode 검출기의 조합은 섬광체 (scintillator) 및 광센서 (photosensor)로서, 일반적으로 광센서는 포토다이오드 (photodiode)를 기반으로 하며, 여러 형태의 dual mode 검출기 모듈에서의 방사선적 특성 및 신호특성은 주로 섬광체에 의해 결정됨으로 본 절에서는 섬광체의 기본 특성과 dual mode 검출기에서의 역할을 고찰하였다.

#### 가. 섬광체

섬광체 (Scintillator)는 입사하는 방사선과 반응하여 빛을 생성시키는 물질로써 이때 생성되는 발광스펙트럼은 일반적으로 가시광선영역 및 자외선영역에 있으며 감쇠시간은 nsec ~ msec 정도가 된다.

섬광체의 섬광 기본원리는 <그림 2-3>과 같이 방사선이 충만대 (Valance band)의 전자에 에너지를 전달하면 전자가 그 에너지를 얻어 전도대 (Conduction band)로 여기되고 여기된 그 전자는 자유전자로 떠돌다 에너지를 잃고 다시 천이 하는데 천이 도중 활성화제 (activator)로 첨가한 불순물 층에 포획되어 있다가 충만대로 천이 하면서 그 에너지 차에 해당하는 파장의 빛을 방출하게 된다.[9]



<그림 2-3. Scintillation mechanism>

섬광체는 고체, 액체, 기체 형태의 유기물 (Organic)과 무기물 (Inorganic) 섬광체로 구분된다. 유기물 섬광체의 주 구성 원소는 H, C로서 비교적 원자번호 및 밀도가 낮은 물질로 구성되어 있어 섬광체에 입사되는 광자와의 상호작용 시 광전효과 보다는 Compton 산란 효과가 주를 이루게 된다. 따라서 감마 에너지 스펙트럼 상의 총에너지 흡수 피크보다는 Compton 연속 스펙트럼이 나타나기 쉬워 유기 섬광체는 X-ray나 감마선 에너지 보다는 주로 저 에너지  $\beta$ 선 측정에 사용된다. 또한 감쇠시간이 nsec 정도로 짧아 보다 빠르게 신호를 검출할 수 있으며, 무기 섬광체와 비교할 때 상대적으로 값이 저렴한 특징을 가지고 있다.[10]

반면, 무기 섬광체는 <표 2-1>과 같이 주로 원자번호와 밀도가 높은 물질의 Crystal, Glasses, Ceramic 등의 형태를 갖추고 있으며, 감쇠시간은 nsec ~  $\mu$ sec로 유기 섬광체 보다 상대적으로 길지만, 높은 섬광효율 (Scintillation efficiency)과 섬광체에 흡수되는 방사선의 에너지에 따라 발생하는 빛의 양 또한 넓은 Range에 걸쳐서 선

<표 2-2. 주요 무기물 섬광체 별 특성> [11]

Scintillator	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Wavelength (nm)	Light yield (#/MeV)	Decay time (nsec)	Afterglow (%)	Refractive index
CsI:Tl	4.5	560	60,000	1	0.05~5.0 @ 6ms	1.8
CdWO <sub>4</sub>	7.9	475	20,000	20 50	0.1 @ 6ms	2.3
Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	7.3	545	70,000	600	<1 @ 3ms	2.2
ZnSe(Te)	5.4	610 (f) 640 (s)	80,000	1~3 (f) 30~70 (s)	<0.05 @ 6ms	2.58 (f) 2.61 (s)
Ceramic (Y,Gd) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :Eu	5.9	610	19,000	1000	3 @ 3ms	1.96

형적으로 비례하여 주로 Calorimetry나 X-ray, 감마 Spectroscopy 및 Imaging을 목적으로 사용하고 있다. 무기 섬광체의 방출 스펙트럼은 섬광물질 및 불순물의 농도에 따라 가시광선영역 및 자외선 영역에 위치하며 각 섬광체 별 고유의 방출 스펙트럼을 가지고 있다. 이러한 방출 스펙트럼은 실제적으로 신호를 검출하는 실리콘 포토다이오드의 Spectral Reponse-Curve와 어느 정도 일치해야 하며, 이러한 특성들은 섬광체에 흡수된 방사선의 에너지를 빛으로 생성시키는 섬광효율 (Scintillation Efficiency,  $\eta$ )과 섬광체에서 생성된 Photon이 실리콘 Photodiode에 입사하여 신호(Electron-Hole pairs)를 생성시키는 QE (Quantum Efficiency)에 영향을 미치는 인자(Parameter)가 된다. [12]

$$\text{섬광효율}(\eta) = \frac{\text{Energy of Scintillation Light}}{\text{Energy Deposition}} = \frac{h\nu}{W_{e-h}} T Q_e$$

$h\nu$  : 방출된 photon의 평균 에너지

$W_{e-h}$  : 1쌍의 e-h를 생성시키는데 필요한 에너지

T : 섬광체 내에서 발생한 빛이 실리콘 포토다이오드 표면까지 도달할 확률

$Q_e$  : Quantum Efficiency

$W_{e-h}$ 는 일반적으로 Band-gap 에너지( $E_g$ )의 3~7배 정도가 되는데 NaI, CsI, ZnS, GADOX 등은 일반적으로 3배 정도가 된다.

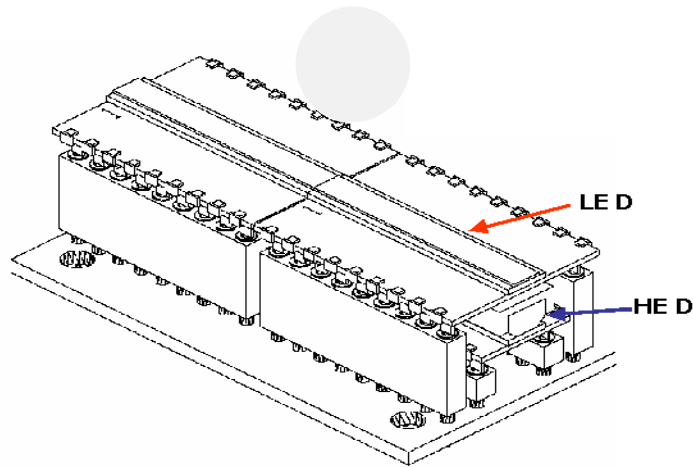
이와 같이 섬광물질과 불순물의 종류 및 농도에 따라 발광 스펙트럼이나 섬광효율 등의 특성이 다르기 때문에 방사선, 사용 환경 등을 고려하여 적용 분야에 알맞은 최적의 섬광체를 선정하여야 한다.

### 나. *Dual mode* 검출기의 특성

BIS에서 사용 중인 Dual mode 검출기 모듈은 핀란드의 Detection Technology사(이하 "DT") 제품과 미국의 Electron Tube사(이하 "ET") 제품 등이 있으며, 이 대표적인 두 검출기 모듈은 <그림 2-4>에 나와 있는 구조를 갖으며, 윗부분에는 저에너지 영역을 검출하는 역할을 하는 LED (Low Energy Detector)가 있고 아래 부분에는 고

에너지 영역을 검출하는 역할을 하는 HED (High Energy Detector)가 있는데,[13] 두 LED 및 HED는 각각의 섬광체가 포토다이오드와 광학 결합된 상태이다. DT 및 ET등의 LED에서 사용하고 있는 섬광체는 GADOX ( $Gd_2O_2S:Tb$ ) 기반의 screen형이며, X-ray 스펙트럼 중 LED에서 저에너지 영역을 최대한 흡수하고 또 이 흡수된 X-ray 에너지가 최대한의 광자 (photon)를 발생시켜 바로 아래에 놓여있는 포토다이오드에 입사할 수 있는 구조로 되어 있다.

그러나 LED와는 달리 HED의 경우 섬광체 위에 구리 필터 (Copper filter)가 위치하여 LED를 투과한 전체 X-ray 스펙트럼 중 저에너지 영역이 구리 필터에서 모두 필터링 되고 남은 상대적으로 높은 고에너지 영역의 스펙트럼만을 검출하고 구리 필터의 두께는 지속적인 여러 조건 하의 실험을 통해 최상의 Imaging이 나오는 두께를 가지고 실험을 한다. 이는 실험을 위한 구리 필터의 최적 두께를 구한다고 한다.



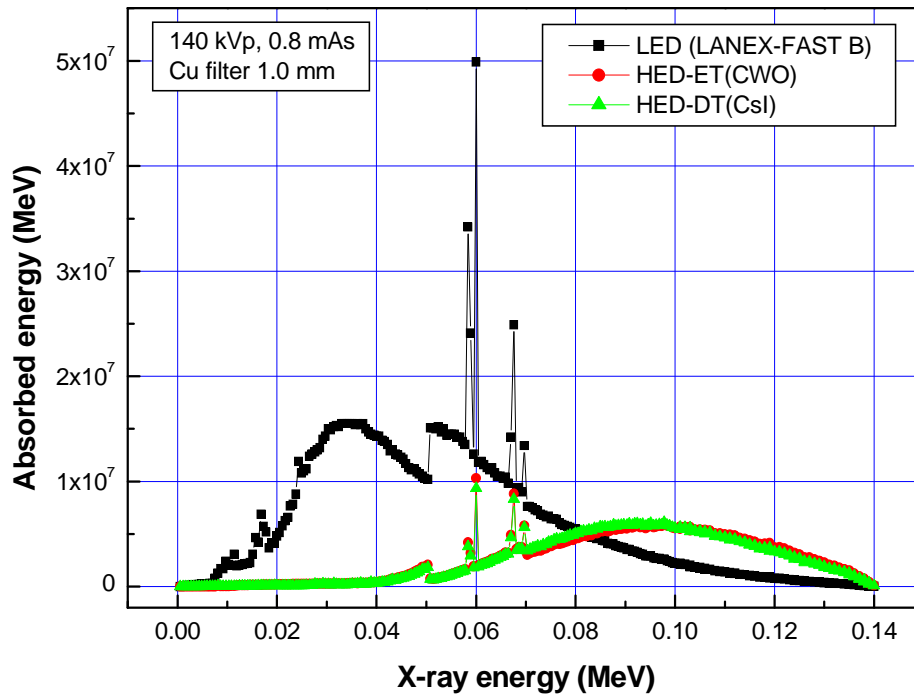
<그림 2-4. 상용화된 검출기 모듈의 Dual 구조>

DT 및 ET에서 사용되고 있는 LED 및 HED의 기본 특성과 섬광체의 종류 등을 <표 2-3>에 요약하였다.

<표 2-3. 상용화된 DT와 ET의 검출기 모듈 특성 >[14]

		Scintillator	Thickness (mm)	Wavelength (nm)	Cu filter (mm)	Light yield (#/MeV)
DT	LED	Lanex-Fast-B	0.1826	545		-
	HED	CsI(Tl)	3.0	560	1	55000-60000
ET	LED	Lanex-Fast-B	0.1826	545		-
	HED	CWO	2.0	475	1	15000-20000

<표 2-3>과 같이 상용화된 두 BIS용 검출기 모듈인 DT와 ET에 대해 <그림 2-2>에서 X-ray 스펙트럼의 입사 조건에서는 흡수에너지의 분포와 그 결과로 <그림 2-5>의 스펙트럼을 얻을 수 있다. LED에서는 X-ray 스펙트럼이 저에너지 영역서 고에너지 영역에 이르기까지 모두 고루 분포하였으나 DT 및 ET의 HED에서는 저에너지 영역 없이 고에너지 영역만을 흡수 한 것을 볼 수 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 1mm의 구리 필터가 HED에 흡수되는 에너지 영역에서 저에너지 영역을 잘 차단 시켜주고 있는 것을 알 수 있고, LED에 사용되는 screen형 섬광체인 GADOX(Lanex Fast-B)에 비교하여 HED에서 사용되는 crystal형 섬광체인 CsI(Tl) 3mm 이나 CWO 2mm가 상대적으로 두꺼워 고에너지 영역의 X-ray 스펙트럼을 잘 흡수하기 때문이다. Dual mode X-ray 검출기 모듈과 같이 LED와 HED의 조합의 필요조건으로 가장 우선시 되는 것은 위와 같이 필터를 사용하여 저에너지 영역과 고에너지 영역을 눈에 보이게 잘 분리 할 수 있어야 하며, 둘째는 LED 및 HED의 흡수에너지비가 높아야 하며, 셋째는 흡수된 에너지에 따른 광발생비가 커야한다. 이와 같은 흡수에너지비와 광발생비를 개선하기 위한 방법으로 HED 앞부분에 저에너지를 차단하는 두꺼운 구리필터를 적용 하면 가능 하지만 흡수에너지율과 광발생비에 대한 성능은 좋아지지만 필터의 역할로 HED에 들어오는 Signal이 상대적으로 줄어들어 결과적으로는 HED에서 발생하는 신호를 이용한 고에너지 영역대의 영상에서는 부정적으로 작용하여 영상의 질을 떨어뜨리는 커다란 부작용을 낳을 수 있다.



< 그림 2-5. DT와 ET의 HED에 1mm구리필터에서 얻은 흡수에너지 스펙트럼 >

주어진 DT와 ET의 LED 및 HED에서 흡수에너지비 (absorbed energy ratio) HED/LED를 계산한 결과 DT는 0.39과 ET는 0.40로 비슷한 값을 보였다.

그러나 DT와 ET의 LED 및 HED에서 광발생비 (light generation ratio) HED/LED는 각각 0.81과 0.24로 나타나서, LED 및 HED에서 사용되는 포토다이오드의 광학적, 전기적 특성이 동일하다고 가정할 경우 신호 생성비 (signal generation ratio) 측면에서는 DT가 월등함을 알 수 있었다.

상기의 흡수에너지비와 광발생비는 <그림 2-5>, <표 2-3>에 주어진 섬광체의 특성을 고려하였다.

### 다. Dual X-ray Imaging & Z-map

Dual mode 검출기 모듈을 이용하여 single X-ray shot 기법으로 dual X-ray imaging을 얻기 위해서는 LED 및 HED에서 얻은 신호를 바탕으로 가상 팬텀 (virtual phantom)내에 존재하는 다양한 두께의 유기물 및 무기물에 대한 분리도를 기준으로 BIS에서의 dual X-ray imaging의 성능을 예측하고 측정한다. 이와 같은 다양한 두께의 유기물 및 무기물에 대한 dual mode 검출기 모듈의 분리도는 Z-map을 이용하여 추정 및 측정할 수 있다.[15]

다음은 Z-map을 이용한 유기물 및 무기물 분리도를 계산하는 이론적 배경에 대한 설명이다.

두께  $t$  인 한 가지 물질  $\zeta$ 에서 두 개의 에너지, L과 H에 대해 다음과 같은 양을 측정할 수 있으며, 이 두 값의 비 R 값은 두께와 상관없이 일정한 값을 가짐

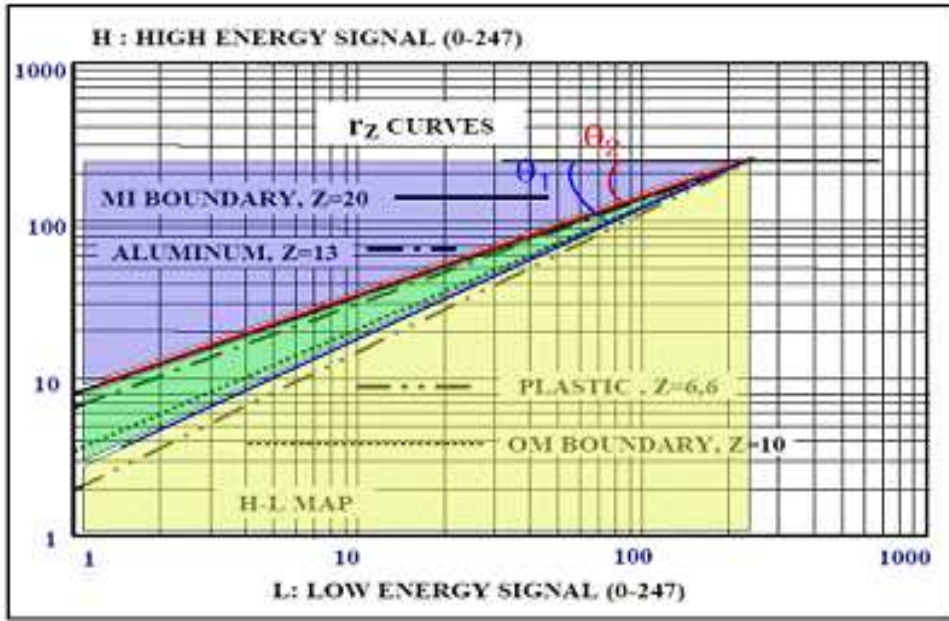
$$T_{\zeta}(L) = \ln \frac{I(L)}{I_0(L)} = \mu_{\zeta}(L)t_{\zeta} \quad T_{\zeta}(H) = -\ln \frac{I(H)}{I_0(H)} = \mu_{\zeta}(H)t_{\zeta} \quad \longrightarrow \quad R_{\zeta}(L) = \frac{T_{\zeta}(H)}{T_{\zeta}(L)} = \frac{\mu_{\zeta}(H)}{\mu_{\zeta}(L)}$$

R값을 다른 형태로 시각적으로 표현한 것을 Z-map이라 하며 가로축을 저에너지 검출기의 신호 값, 세로축을 고에너지 검출기의 신호 값을 나타내어 한 가지의 물질은 하나의 직선으로 표현되며, 이 직선의 기울기가 R값에 해당된다. 서로 다른 물질은 서로 다른 기울기를 가지는 직선으로 표현되며 원자번호가 낮을수록 아래쪽에 클수록 위쪽에 위치한다. 두 기울기의 차는 원자번호에 따른 R값의 변화량에 비례하며 기울기 차이가 많이 날수록 서로 다른 두 물질의 구별 능력이 우수하다.

Z-map example은

$$\Delta \theta = \theta_1 - \theta_2 = \tan^{-1} R_1 - \tan^{-1} R_2 \propto \Delta R = \frac{\partial R_{\zeta}}{\partial \zeta}$$





< 그림 2-6. Z-map example >

DT 및 ET의 상용 LED 및 HED의 방사선적 특성에서 알 수 있듯이, LED는 screen형 섬광체를 사용하고 있으며, HED는 구리필터와 crystal형 섬광체를 사용함으로써 dual mode 검출기 조합을 구성할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 HED에서 사용되고 있는 crystal형 섬광체 대신에 screen형 섬광체와 구리필터의 최적 조건만을 이용하여 새로운 형태의 HED 설계가 가능할 것으로 기대되어 이에 관련한 최적 기준치를 도출하고 분석하였다.

### 제3절 Dual Mode 검출기 모듈의 최적화 설계

#### 1. LED 및 HED 최적화 설계

제2절 “Dual Mode 검출기 및 방사선적 특성”에서 언급한 바와 같이 두 LED 및 HED의 조합으로 구성된 dual mode 검출기 모듈은 입사된 X-ray 스펙트럼 중 “첫째, 저에너지 영역과 고에너지 영역을 잘 분리할 수 있어야 하며, 둘째, 흡수 정도를 나타내는 LED 및 HED의 흡수에너지비 (absorbed energy ratio)가 커야하며, 셋째, 이 흡수된 에너지에 비례한 광발생비 (light generation ratio)가 커야한다”.는 전제하에 screen형 섬광체 중 이를 만족할 만한 후보 섬광체를 선정하여야 한다.

이번 연구에서는 <표2-4>에 나타난 Kodak사 Lanex계열의 스크린 타입의 섬광체를 이용하였는데 이는 주변에서 쉽게 구할 수 있고 포토다이오드의 크기에 맞게 제단 하는데 용이 하며 가격이 싸기 때문이다. 다른 크리스탈형 섬광체를 이용 할 경우는 가격이 비싸고 구매하는데 시간이 오래 걸리며 최적 두께에 맞게 제단, 연마하여야 하며 이에 사용되는 기술이 필요하기 때문이다.

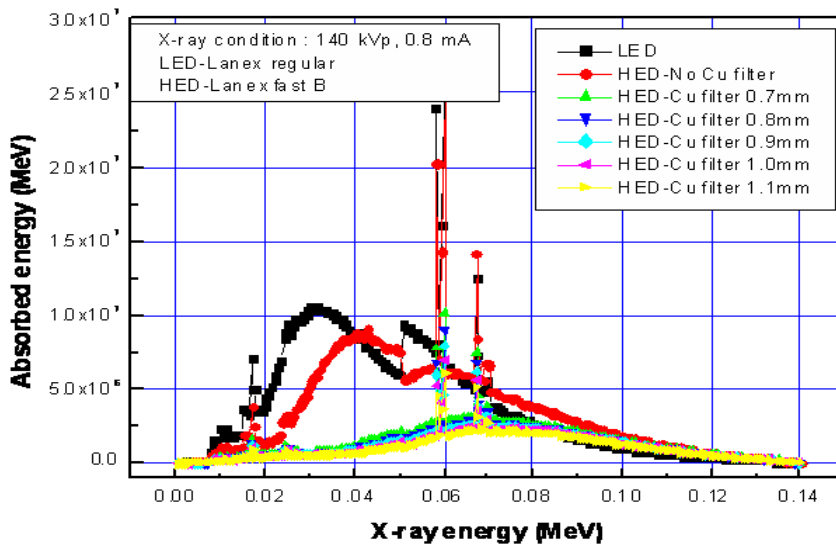
<표 2-4. Lanex 계열의 스크린 타입의 섬광체에 대한 특성 >[16]

Type	Composition	Coverage (mg/cm <sup>2</sup> )	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Peak Emission (nm)	Conversion Efficiency	thickness (μm)
Fine	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	34	7.34	545	15%	46.32
Regular	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	70	7.34	545	15%	95.37
Fast-B	Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	133	7.34	545	15%	181.2

Lanex 계열의 섬광체는 <표 2-4 >에서 알 수 있듯이 밀도는 동일하나 두께가 달라 입사된 X-ray 에너지의 흡수율이 다르며, 이 흡수된 에너지에 비례하여 광 발생량도 달라진다. Lanex 계열의 섬광체 후보 중 LED 및 HED의 에너지 흡수에너지비 및 광 발생비를 최대화 할 조합으로 LED에는 Lanex Fine을 HED에는 Lanex Fast-B가 우

선된다. 그러나 Lanex Fine은 그 두께가 가장 얇아 BIS의 엑스레이 영역인 140 ~ 160 keV에 대해 입사 X-ray 투과율이 높아 오히려 LED 및 HED의 흡수 에너지비 및 광 발생비가 낮다. 따라서 Lanex Regular 및 Fast-B의 조합과 이때 구리필터의 두께를 이용하여 LED 및 HED에 대한 방사선적 특성 분석과 최적 구조를 도출하였다.

앞서 DT 및 ET사의 LED 및 HED에 대한 X-ray 스펙트럼의 흡수에너지 분포를 관찰한 방법과 동일하게 새로 제안된 LED는 Lanex Regular, HED는 Lanex Fast-B의 조합 (이하 “new LEDHED”)에서 구리필터의 두께를 변화시켜가면서 흡수에너지의 분포를 고찰하였다. 이에 대한 결과는 <그림 2-7>에 나타냈다.

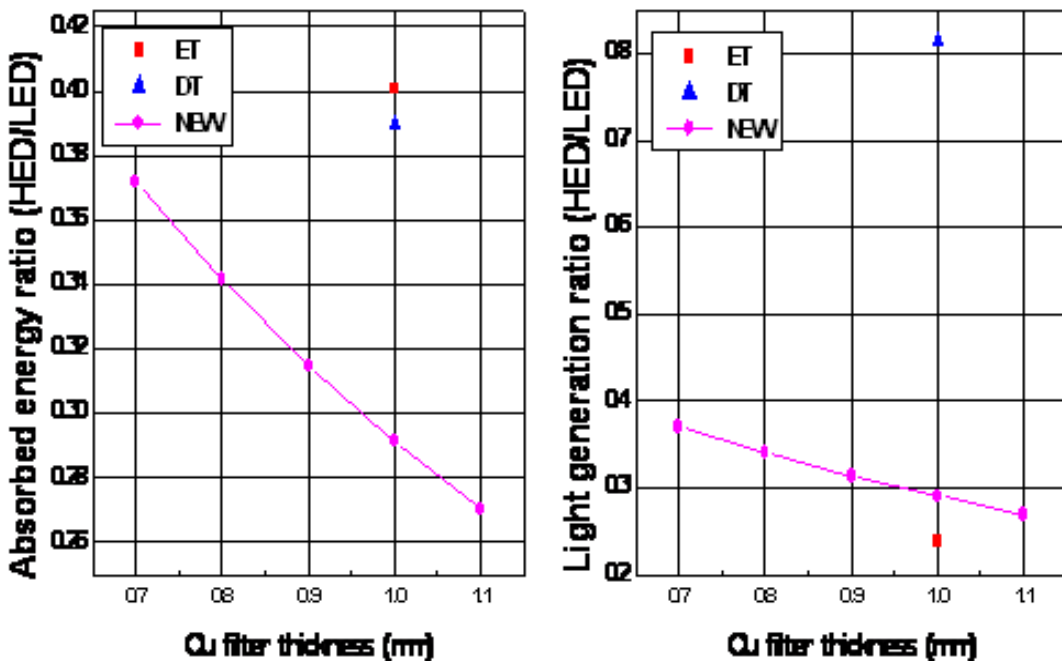


<그림 2-7. New, LED, HED 구리필터 두께와 흡수에너지>

<그림 2-7>에서와 같이 LED에서 흡수된 X-ray 스펙트럼을 비교분석 한 결과 HED에서 구리필터의 두께 증가에 따라 저에너지 X-ray 스펙트럼이 감소함을 알 수 있었고, 기존 DT 및 ET의 HED에서 흡수에너지 스펙트럼 분포가 약 90 keV에서 최대치를 나타내는 경향을 보였으나, new LEDHED 조합에서는 약 70 keV에서 최대치를 보였으며 입사 스펙트럼이 분리됨을 알 수 있었다.

또한, 흡수에너지비 및 광발생비를 모사하여 기존 DT 및 ET와 new LEDHED 조합에 대해 비교 데이터를 <그림 2-8>에 나타내었다.[17] 먼저 흡수에너지 비에 대해서는 new LEDHED 조합의 경우 구리필터 0.7 mm에서 0.37로서 기존 DT 0.39 및 ET 0.4

의 흡수에너지 비와 유사한 값을 보였으며,[18] 광발생비에 대해서는 구리필터 0.7 mm에서 0.37로서 ET 0.24보다 높은 값을 보였으나, DT 0.81보다는 낮게 나타났다. 상기의 결과는 new LEDHED 조합에서 HED에서 채용하고 있는 GADOX 기반의 Lanex Fast-B 섬광체가 상대적으로 두껍고 밀도가 높아 고에너지 영역의 X-ray 스펙트럼에 용이하나, DT 및 ET에서 채용하고 있는 crystal 섬광체인 CsI(Tl) 및 CWO의 에너지 흡수율 보다는 낮으며, 광발생비는 ET HED의 CWO가 광생성량 (light generation yield)이 GADOX보다 낮아 결과적으로 광발생비만을 고려할 때는 ET 보다 더 좋은 결과를 얻었다. 따라서 기존 상용화 dual mode LED/HED 조합 중의 하나인 ET dual mode 검출기 보다 좋은 성능이 보장될 가능성이 높음을 알 수 있다.

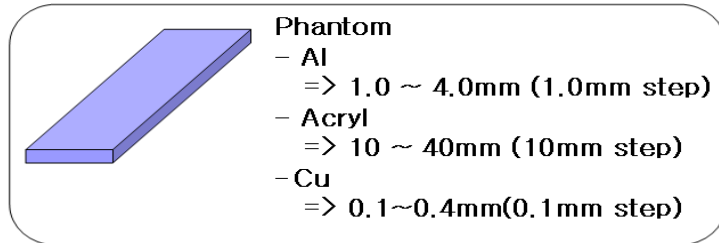
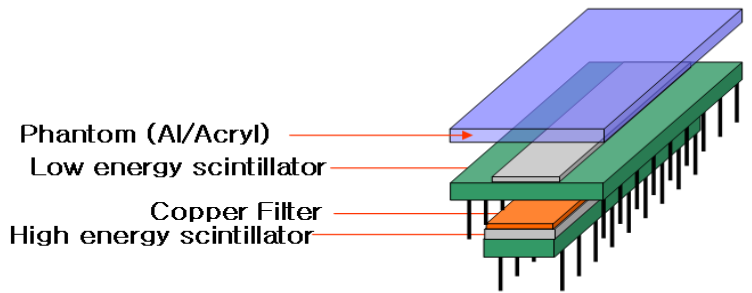


< 그림 2-8. New, DT와 ET의 구리필터 두께에 따른 에너지흡수율과 광발생비 >

이와 같은 가능성에 대한 정량적 평가를 위해 앞서 서술한 Z-map을 이용하여 DT, ET, new LED, HED에 대하여 분석하였다. Z-map 계산을 위한 Monte Carlo 모사에 필요한 조건 및 특징은 <표 2-5>에 요약하였고 그에 따른 MCNP simulation을 위한 scintillator와 Al/Acryl 그리고 copper filter의 구조를 <그림 2-9>에 나타내었다.

<표 2-5. Z-map 계산을 위한 Monte Carlo 모사에 필요한 조건 및 특징>

구분	조 건		구 분
X-ray	140 kVp, 1 mA		산업용
SID	60 cm		
DT	LED(Lanex Fast-B) + HED(CsI Scintillator)		
ET	LED(Lanex Fast-B) + HED(CWO Scintillator)		
new LED HED	LED(Lanex Regular) + HED(Lanex Fast B)		
Cu Filter (mm)	Detector 1	0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7	
	Detector 2	0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0	
Test Phantom	알루미늄	1, 2, 3, 4 mm	Step edge
	구리	0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm	
	아크릴	10, 20, 40 mm	



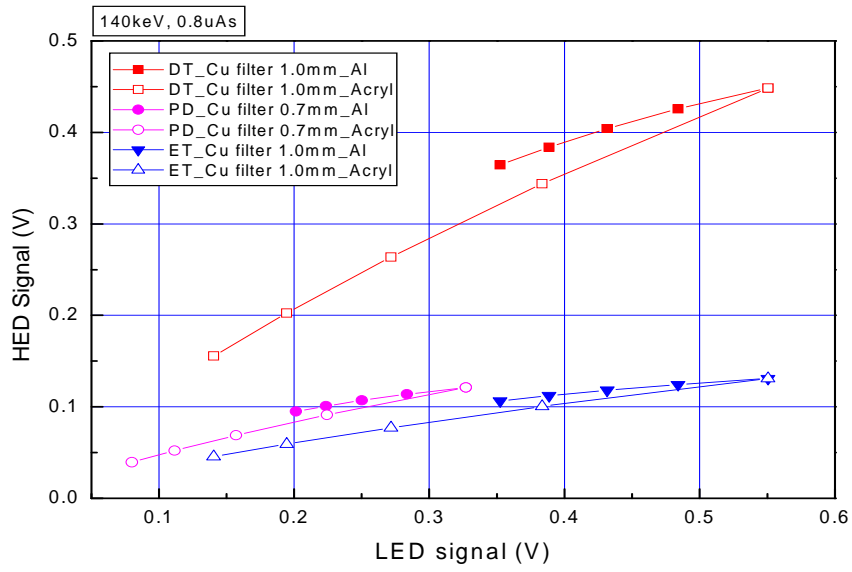
<그림 2-9. MCNP simulation을 위한 포토다이오드와 scintillator 구조>

<표 2-6. Z-map 계산에 필요한 인자>

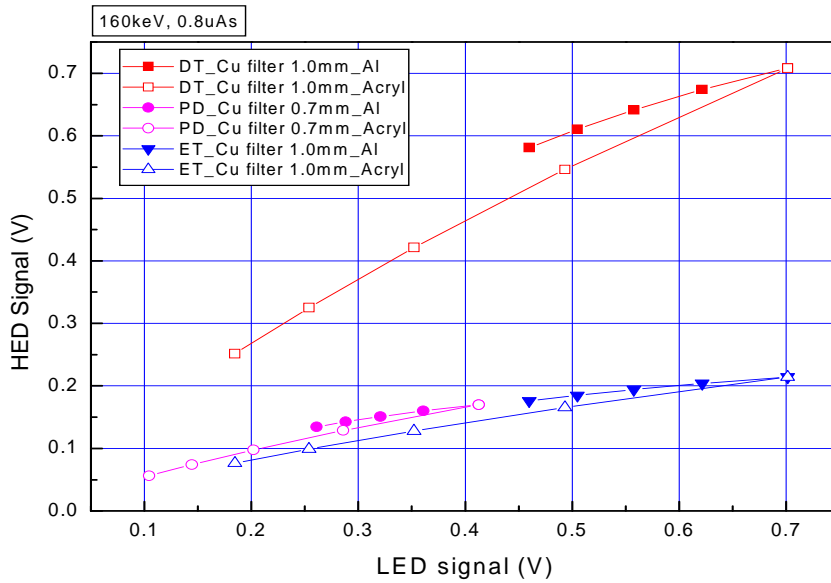
	DT		ET		NEW	
	LED	HED	LED	HED	LED	HED
Light yield	22400	55000	22400	15000	22400	22400
QE	0.95	0.952	0.95	0.931	0.95	0.95
LTE	0.9743	0.8435	0.9743	0.8821	0.9781	0.975

여기서 Light yield [#MeV]는 1MeV가 입사되었을 때 나오는 빛의 양, LTE (Light Transmission Efficiency)는 섬광체에서 생성된 빛이 센서의 표면까지 도달하는 양, QE (Quantum Efficiency)는 센서에 입사된 Photon의 수와 생성되는 전자-정공수의 비를 의미한다. Z-map을 통한 비교를 위한 시뮬레이션으로 MCNP code에서 <그림 2-9>의 구조를 가지고 MeV 단위의 결과 값들을 얻어내고 각 섬광체마다 가지고 있는 Light yield를 곱하여 주면 에너지 단위의 결과 값들이 Photon의 수로 나오게 된다. 그 다음에 Photon 수로 나온 결과 값을 Light Transmission Efficiency (LTE) 곱하여 주고 또 그 값에 Quantum Efficiency (QE)를 곱하여 주면 최종 포토다이오드에서 X-ray에 의해 생성된 전자-정공의 수가 나오게 된다. 그 값이 결과값으로 나오는 signal이 된다. 각 포토다이오드에서 쓰이는 섬광체의 Light yield와 LTE, 그리고 QE의 값들은 <표 2-6>에 나타났다.

아래의 <그림 2-10>,<그림 2-11>은 시뮬레이션을 통해 나온 signal을 이용하여 세 가지 포토다이오드의 Z-map을 그래프로 나타낸 것이다. <그림 2-10>은 140keV 0.8 $\mu$  As 조건하에 Z-map을 나타낸 것이고 <그림 2-11>은 같은 조건하에 에너지만 160keV로 바꾸어 Z-map을 나타내었다. 두 그래프의 차이는 에너지가 높아짐에 따라 나오는 signal 또한 높게 나오는 것으로 에너지의 변화에 따라 각도의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 다른 회사의 포토다이오드와 비교해 보면 결과로 얻어지는 signal이 LED/HED 모두 상대적으로 낮게 나왔다. 하지만 유기물과 무기물을 분리해내는 Al과 Acryl사이의 각도는 ET사와 거의 동일하게 나오는 것으로 보인다.



<그림 2-10. 140KeV, 0.8 $\mu$ As 일때 DT와 new PD, ET 의 Z-map 비교 >



<그림 2-11. 160keV, 0.8uAs 일때 DT와 new PD, ET 의 Z-map 비교 >

## 2. PIN형 포토다이오드 (Photodiode)의 설계

일반적으로 BIS에서 사용되는 광센서로는 포토다이오드가 있다, 포토다이오드의 구조에 따라 PN 접합 또는 PIN 접합 등이 있으며, PIN 접합 포토다이오드가 광학적, 전기적 특성이 우수한 것으로 알려져 있고, 특히 역전압시 응답특성이 우수하고, 잡음이 적은 것으로 알려져 있다.[19]

본 연구에서는 PIN 접합형 포토다이오드에 관한 설계 및 제작을 중점적으로 고찰하였으며, 상용화된 PIN 접합형 포토다이오드를 이용한 실험을 통해 분석을 수행하였다.

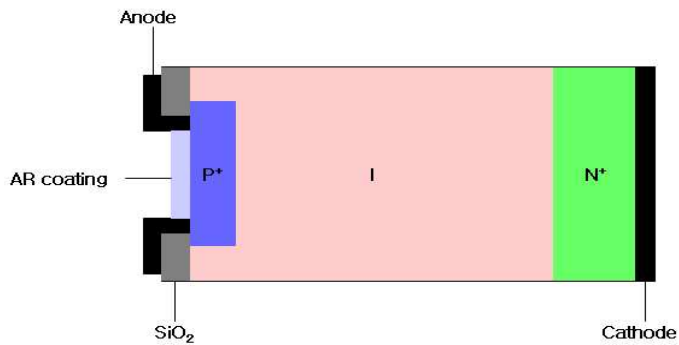
### 가. PIN형 포토다이오드

입사된 X-ray 스펙트럼이 섬광체에 흡수되어 특정 Wavelength를 갖는 광자(Photon)가 생성되며, 이 광자는 섬광체 하단에 위치한 광센서에 입사하게 된다.

이때 광센서도 PIN 구조의 포토다이오드가 일반적으로 사용되며, 이 포토다이오드의 특성에 따라 LED 및 HED의 신호대 잡음비(signal to noise ratio)가 결정된다. 따라서 포토다이오드의 최적 설계는 dual energy X-ray radiography 시스템에서 필수 과정이라 하겠다. 그러나 본 연구는 이미 상용화된 PIN형 포토다이오드를 이용하여 연구를 진행하였기에 구체적인 설계에 대해 언급하기 보다는 PIN형 포토다이오드의 성능을 결정하는 몇가지 인자에 대한 설명과 설계상의 흐름에 국한하였다.

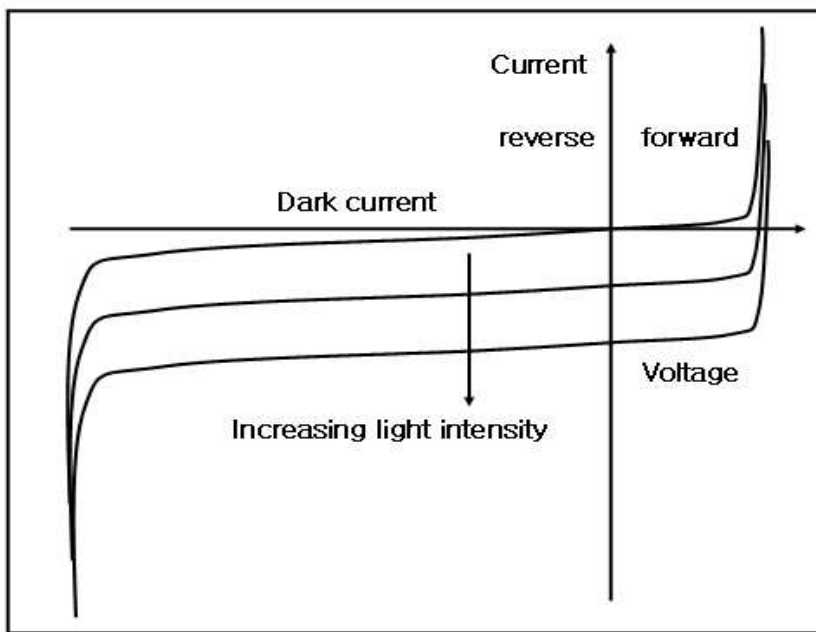
먼저 PIN형 포토다이오드의 구조를 보면 PN 포토다이오드와 비슷하지만 P층과 N층 사이에 저항이 높은 I층이 자리를 잡고 있다. 여기서 I는 Intrinsic을 나타내는데 이것은 진성체(저불순물 농도층) 나타낸 것이다. 이를 물성적 구조의 차이로 보면 PIN형 포토다이오드는 PN 포토다이오드 보다 공핍층이 크다는 것이다.[20] 여기서 공핍층이란 P층과 N층의 사이에 존재하는 층으로 공핍층이 넓으면 접합용량이 작게 된다. 그렇게 되면 포토다이오드가 가지고 있는 Capacitance 용량(접합 용량)이 작아지므로 신호에 대한 응답성이 좋아진다. 응답성이 좋다는 말은 QE(Quantum Efficiency)가 좋다는 말로 해석 할 수 있는데 QE는 포토다이오드에 들어오는 빛이 전자와 전자홀을 생성하여 계측되는 확률을 나타낸다.[21] 아래의 그림은 PIN 포토다이오드의 구조에 대해 간단히 설명한 것이다. <그림2-12>는 일반적인 PIN 형 포토다이오드의 구조를 도식화 한 것이다.





< 그림 2-12. PIN 포토다이오드 구조 >

그리고 포토다이오드는 일반적으로 역전압 (reverse bias)을 사용한다. 그 이유는 본래 포토다이오드는 각자 조금씩의 전압을 가지고 있어 외부 전원이 없이도 사용이 가능하다. 그러나 응답성이나 직선성을 향상시킬 목적으로 역전압을 사용한다. 일반적으로 포토다이오드에 흐르는 전류는 전자와 전자홀의 수로써 결정된다. 역전압은 흐르는 전류에 아무런 영향을 미치지 않으므로 전류를 통해 나오는 신호는 일정하게 된다. <그림 2-13>은 reverse bias와 forward bias일 때 Current의 변화에 대해 나타낸 것이다.



< 그림 2-13. 전압과 전류에 대한 포토다이오드의 특성 >

<그림 2-13>에서 보듯이 포토다이오드에서는 빛의 세기가 커질수록 높은 광전류를 얻게 된다. 역전압을 사용할 때 주의 할 점으로는 역전압의 사용으로 인해 응답성이나 직선성이 좋아지는 장점이 있는 반면에 포토다이오드가 가지고 있는 Dark current로 인하여 noise도 함께 증가 한다는 것을 고려하여야 한다. 그리고 역전압을 너무 높이면 포토다이오드에 손상이 생길 수 있는 것을 명심하여야 한다.

## 나. 실리콘 웨이퍼

포토다이오드의 모재인 실리콘(Si)은 반도체 물질로서 실리콘 웨이퍼 내에 불순물(Impurity)의 농도(Concentration)가 낮으면 resistivity는 높아지며 이로 인한 Capacitance는 낮아지게 되어 이러한 high resistivity 실리콘 웨이퍼를 이용한 광센서를 제작할 경우, 입사광에 대한 전하의 수용도가 낮아 결국 출력 신호가 낮아진다. [22] 또한 광센서 중 PN접합 포토다이오드나 PIN형 포토다이오드의 경우 depletion layer가 상대적으로 두꺼워 역전압 bias를 인가하기 전에는 포토다이오드에서 생성된 전하의 수집 시간이 긴 특성을 갖는다. 일반적으로 resistivity가 100 $\Omega$  이상이면 고저항 웨이퍼이고 그렇지 않으면 저저항 웨이퍼로 분류한다. 그러나 불순물의 농도가 상대적으로 높은 저저항 웨이퍼에 비하여 고저항 웨이퍼는 암전류가 낮아 소신호용 센서에 주로 사용되며, 특히 역전압을 걸어주는 광센서에서 우수한 성능을 보여준다. 따라서 포토다이오드의 설계 및 제작시 소신호의 정의 및 역전압 인가 여부, 그리고 웨이퍼 구매 비용을 고려하여 선정하는 것이 관례이다.

## 다. 암전류 (Dark Current)

포토다이오드에서 입사물리량에 따른 신호대 잡음비를 결정하는 가장 중요한 요소중의 하나가 암전류이다. 암전류란 광센서 또는 포토다이오드가 외부의 물리량 즉, 빛 등이 입사되지 않은 조건인 dark 상태에서도 미약한 전류를 자체적으로 발생하며 이는 센서의 신호양에 기여하기 보다는 오히려 바닥 잡음 (offset noise)으로 작용한다. 최적의 실리콘 웨이퍼를 사용목적에 따라 선정하고 PIN형 포토다이오드를 설계 및 제작하였을 경우 이 암전류의 크기에 따라 포토다이오드의 dynamic range가 결정되며, digital radiography 검출기 모듈로 활용되어 영상을 얻었을 경우, 영상 시스템의 contrast에 영향을 주기 때문에 가능한 한 암전류를 최소화하는 설계 및 제작 공정이

중요하다. PIN형 포토다이오드에서는 이러한 암전류를 최소화하기 위해 N<sup>+</sup> 또는 P<sup>+</sup>의 가드링 (guardring)을 포토다이오드의 수광부를 감싸듯이 설계하며, 특히 역전압이 인가되는 상황에서는 암전류의 감소와 센서의 failure가 일어나는 breakdown을 방지해주는 역할을 한다.

**라. Quantum Efficiency (QE)**

QE는 포토다이오드와 같은 광센서에서 입사된 광자에 비례한 전하 생성 정도를 입사 광자의 파장 (wavelength)에 따른 효율로 나타내며,[23] 유사한 정의로서 Spectral Responsivity (SR)가 있으며, SR과 QE의 관계는 식(2-1)과 같다.( $\eta=QE$ )

$$SR = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \quad \text{----- (식 2-1)}$$

상기 식(1)에서 알 수 있듯이 광센서에 입사된 파장에 따라 효율 및 photocurrent 값이 달라지며, 같은 구조의 PIN형 포토다이오드라 하더라도 그 값이 달라질 수 있으며, 일반적으로 입사된 광자의 파장 영역에서 최대 QE 또는 SR을 얻어야한다. 이와 같이 최대 QE 또는 SR을 얻기 위해서는 PIN형 포토다이오드의 경우 P영역 위에 Anti-Reflective (AR) Coating의 물질 및 두께로 조정하며, 이때 AR물질로는 실리콘 나이트라이드나 실리콘 옥사이드가 주로 사용되며, AR coating의 두께는 입사광자의 반사를 최소화하기 위해 다음 식을 이용하여 설계한다.

$$Tar = \frac{\lambda}{4n} \quad \text{----- (식 2-2)}$$

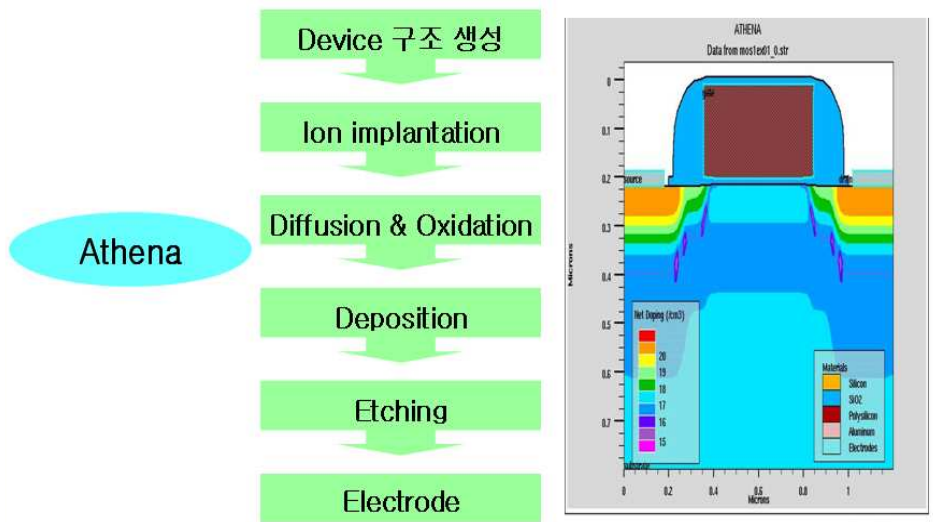
상기 식(2-2)에서  $\lambda$ 는 입사광자의 파장이며, n은 AR coating의 refractive index를 말한다. 본 연구에서 적용되는 입사광자는 방사선이 입사하여 광자로 바뀌주는 섬광체에서 발생하는 광자의 파장을 고려해야 하며, 주로 가시광 영역의 파장을 갖는다. 포토다이오드의 설계과정에서는 이 AR coating의 선정과 두께를 조절할 수 있지만, 제작과정에서는 포토다이오드를 제작 지원하는 반도체 fab의 processing parameter에 종속되며, 상용화된 PIN형 포토다이오드를 이용할 경우에는 암전류의 정도와 함께 QE 또는 SR을 고려하여 선정해야한다.

## 마. 포토다이오드 설계 과정

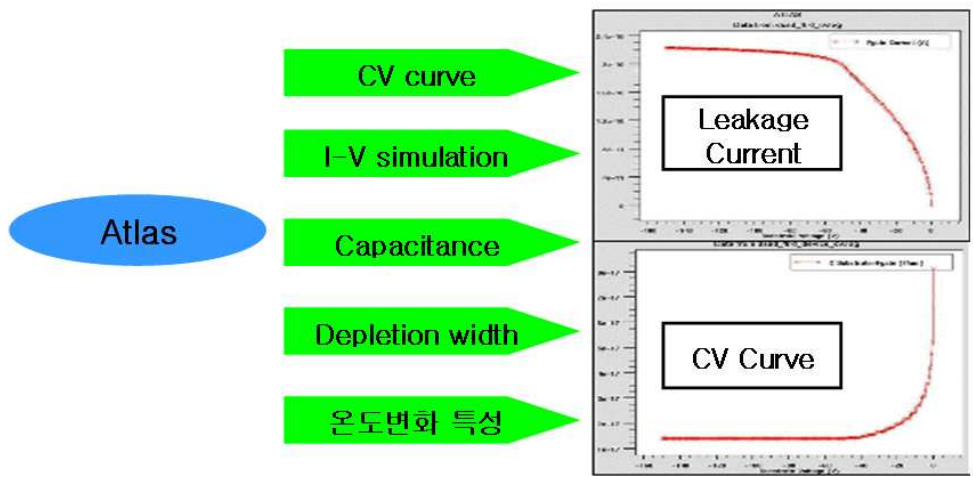
포토다이오드의 설계과정을 요약하면 다음과 같다.

상기에서 언급한 PIN 포토다이오드의 구조, 실리콘웨이퍼의 선정, 암전류 최소화 방안, 그리고 QE를 고려하여, 먼저 제작을 진행할 반도체 Fab의 공정 parameter가 적용된 기하학적 구조를 결정하고, P영역의 불순물의 농도, N영역의 불순물의 농도를 정의하며, 적당한 반도체 모사 코드를 이용하여 구조해석을 수행한다. 이때 일반적으로 사용되는 모사 코드는 Silvaco 사의 ATHENA[24]와 ATLAS[25] Tool을 이용한다. 이 ATHENA Tool은 주로 공정엔지니어들이 반도체소자의 구조해석을 목적으로 제공되며 해당 반도체 공정의 제작 공정의 수정에 사용되며, 설계 엔지니어는 제공 반도체 parameter를 이용할 뿐이다. 다음 단계로는 ATLAS를 이용하여 해당 포토다이오드 구조에서 전기적, 광학적 성능을 정량적인 값으로 출력하여 목적하는 포토다이오드의 성능을 검증하는 절차를 거친다. 상기의 ATHENA 및 ATLAS Tool은 항상 연동되도록 하며, 주로 ATHENA Tool을 이용하여 제작 방향을 결정 한다. 이때 결정할 수 있는 사항으로는 주로 가드링의 위치, 가드링의 종류, 가드링의 P 또는 N의 선택, 그리고 P 또는 N의 농도들이며, 이들의 변화에 따른 인가전압에 대한 암전류 (I-V), QE, 그리고 포토다이오드의 capacitance를 유추할 수 있다.

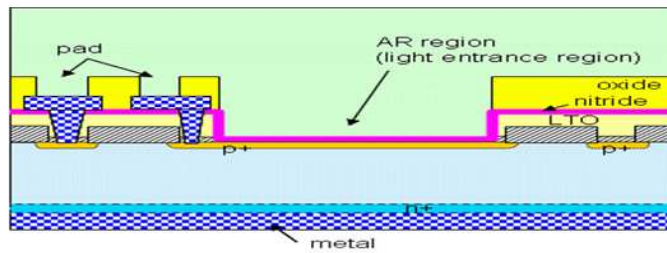
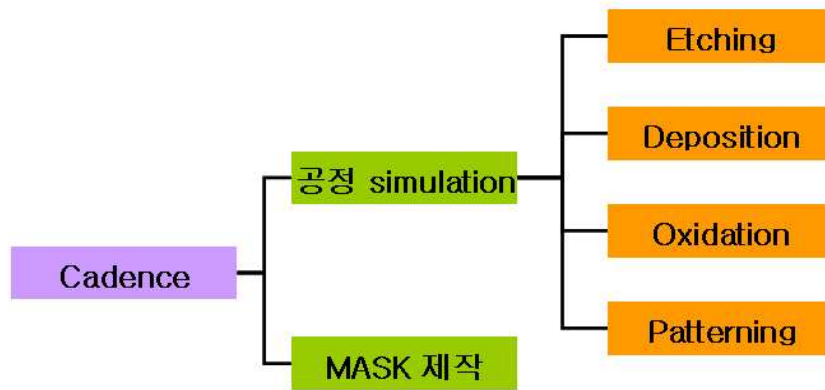
상기의 절차가 완료되면 CAD Tool을 이용하여 PIN 포토다이오드의 적층구조에 따라 mask 작업이 진행되며, 이 mask 작업은 PIN 포토다이오드의 각층에서 어떤 물질이 요구되는가 즉, P영역, N영역, Metal영역, 실리콘 옥사이드 영역, AR영역 등에서 필요한 물질이 기하학적으로 형성되어 photo-lithography가 가능하도록 한다. 이때 일반적으로 사용되는 CAD Tool은 Silvaco 사의 Cadence[26] Tool을 사용하며, 상기의 ATLAS, ATHENA Tool과 연동되도록 고안되어 있다. 이와 같은 포토다이오드의 구조 해석, 모사, 그리고 설계과정에 필요한 절차를 다음과 같이 도식화 하였다.



<그림 2-14. ATHENA Tool을 이용한 포토다이오드 공정 구조해석 흐름도 및 예시>



<그림 2-15. ATLAS Tool을 이용한 특성 분석 예시>



<그림 2-16. CADENCE Tool을 포토다이오드 Mask Layout 공정 예시>

### 3. 신호처리 장치의 최적화 설계

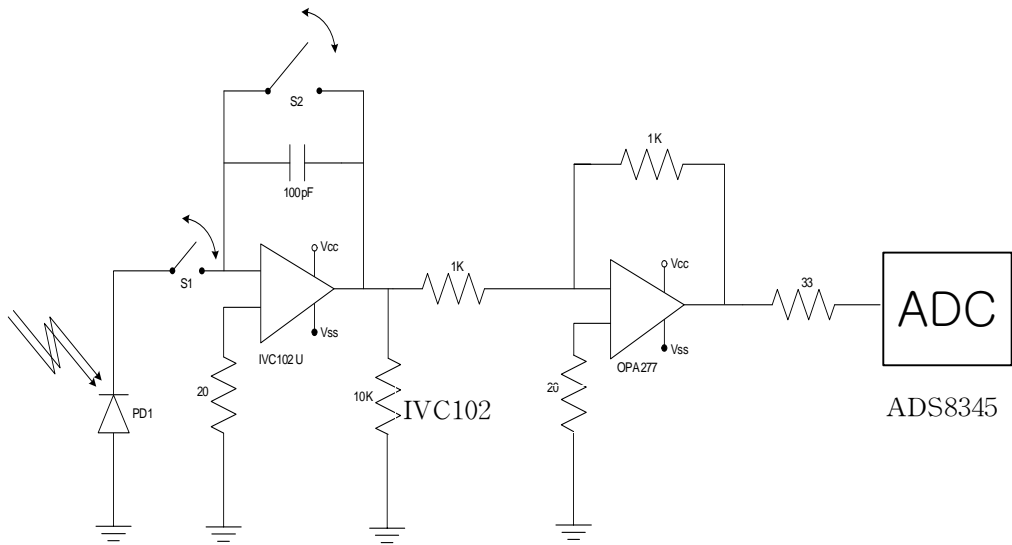
신호처리회로는 X-ray에 의해 검출기 (Scintillator + Photodiode)에서 출력되는 전류 신호를 검출하기 위한 회로로써 일반적으로 신호를 측정하는 방법에는 크게 Integration Mode와 Count Mode 두 가지로 구분된다. Integration Mode는 일정한 시간동안 입력되는 X-ray에 의해 발생된 전류를 Capacitor에 충전 후 충전된 그 값을 출력 전압으로 검출하는 방법이고 Count Mode는 입자 하나에 의해 Photodiode가 출력하는 전류를 전압신호로 변경하여 그 세기를 검출하는 방법이다.

Integration Mode는 센서의 gain이 낮아 출력신호자체가 미약할 경우 센서 외부 Capacitor의 센서에서 생성된 전하를 연속 충전하여 Switching 소자를 통해 아날로그 출력하는 방식이며, Counting Mode는 센서의 gain이 충분하여 적은양의 입사물리량으로도 충분한 전하를 생성하여 Capacitor에 충전하지 않고 바로 아날로그 출력을 수행하는 방식이어서 입사된 물리량을 계수할 수 있으며, 일반적으로 핵계측 또는 방사선 계측에서 주로 사용되며 입사된 방사선에 대한 에너지 판별까지 가능한 방식이다.

BIS에서 사용되는 포토다이오드의 gain은 약 “1”로서 gain이 낮아 Counting Mode 방식의 신호처리 방식은 적용하기 어려우며, 대부분의 상용화 BIS에서도 Integration Mode 방식을 사용하고 있다.

따라서 본 연구에서도 Integration Mode 방식의 신호처리에 국한하여, 개념설계를 하였으며, 특히 16 채널 포토다이오드를 단위 모듈로 하며 이 단위 모듈이 여러개 모인 Multi Module의 Linear Array Detector 형태임으로 다채널 모듈에서 발생한 아날로그 신호를 순차적으로 처리 가능한 Switching 소자와 증폭회로, 그리고 아날로그를 디지털화하는 ADC를 한 Block으로 하는 아날로그 디지털 인터페이스 보드에 국한 하였다.

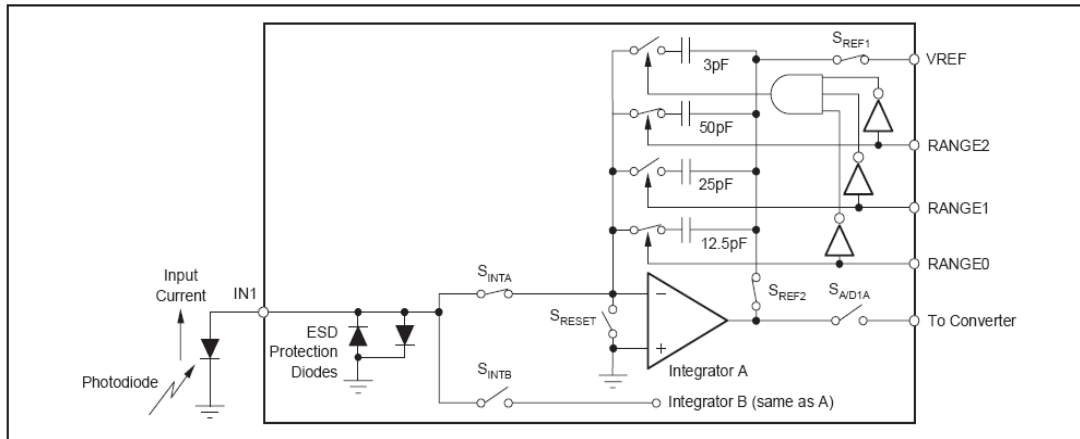
손쉽게 구할 수 있는 IC형의 Switching 및 Integrator소자로서는 16채널 모듈을 단위 처리할 수 있는 IVC 102 소자와 DDC 118 소자를 선정하였고, 각 Switching 소자에 적합한 ADC를 선정하였으며, 두 소자의 개념 설계는 <그림2-17> 및 <그림2-18>에 도식화 하였다.



<그림 2-17. IVC 102를 이용한 Integration Mode 신호처리회로 Diagram>

Integration Mode의 신호처리 회로는 <그림 2-17>과 같이 Photodiode에서 출력 되는 신호인 전류를 전압으로 변환시켜주는 Integrator와 입력된 신호를 반전하여 출력하는 기능을 가지는 Inverter의 기능을 하는 IVC102와 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC (Analog to Digital Converter) ADS8345, 그리고 각 채널의 신호, 데이터를 처리 및 통신하는 기능을 수행하는 MCU (Main Control Unit) ATmega128로 구성된다. Integration Mode의 검출기를 구성하기 위해서는 Integrator와 HOLD/RESET 스위치가 필요로 하게 된다. 현재 상용화 된 스위치가 내장된 Integrator 칩을 이용하여 설계하였다.





<그림 2-18. DDC 118을 이용한 Integration Mode 신호처리회로 Diagram>

DDC118은 IVC102와 같은 기능을 수행하지만 IVC102와 다른점은 Chip 하나에 8개의 IVC102가 있다는 점이다. IVC102를 보면 포토다이오드 하나에 하나의 앰프가 연결되어있는 모양이다. 반면 DDC118은 포토다이오드 하나에 하나의 앰프가 연결되어 있는데 이것들이 8개가 한 번에 있는 것이다. IVC102와 같이 Integration mode의 검출기로 PCB Board의 간결함을 얻을 수 있고 Chip 하나로 8개의 포토다이오드에서 나오는 signal을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있고 +5V의 아날로그와 +2.7V에서 +5.25V의 디지털 공급에 사용되어 진다.

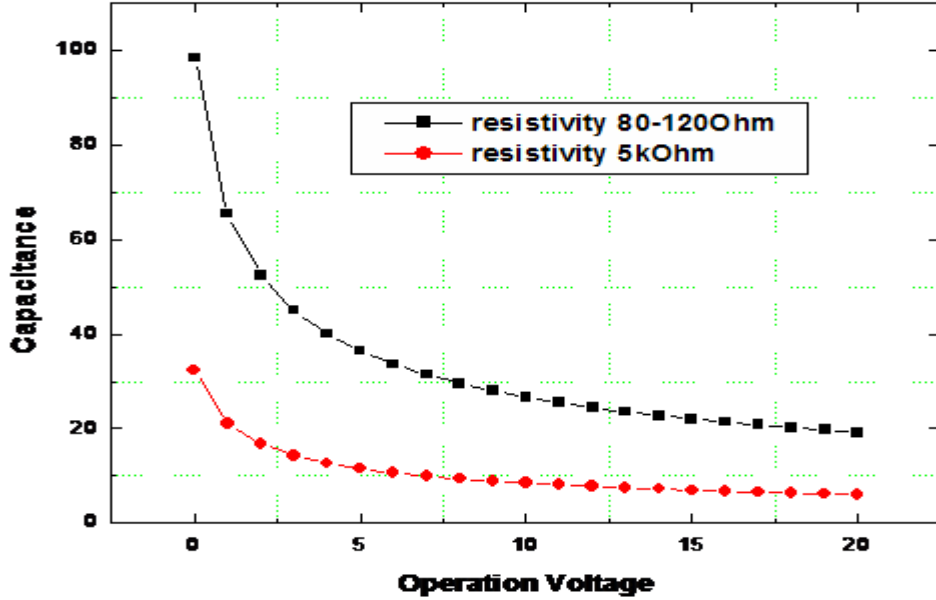
## 제3장 *Dual Mode* 검출기 모듈의 제작 및 평가

### 제1절 *Dual Mode* 검출기 모듈의 제작

#### 1. 포토다이오드 제작

위에서 나온 포토다이오드의 설계 과정이 끝나고 시뮬레이션의 결과가 만족스러우면 이제 포토다이오드를 제작하여야 한다. 포토다이오드를 제작 공정에는 MASK를 제작하는 공정과 Fab-in 과정이 있고 Fab-out 되면 나오는 Wafer를 설계에 따라 자르는 Sawing 과정과 마지막으로 packaging 과정이 있다. MASK 제작 공정에는 alignment 공정과 Stepper 공정이 있으며 alignment 공정은 설계 크기에 제한이 없어 한 번에 많은 포토다이오드를 제작 할 수 있지만 stepper공정은 설계 크기에 제한이 있어 웨이퍼 한 장에 만들 수 있는 포토다이오드가 제한된다. 하지만 alignment 공정은 포토다이오드의 각 layer를 따로따로 만들어 합하는 공정이고 stepper 공정은 alignment 공정과 달리 한 번에 만드는 공정이기 때문에 alignment 공정에 비해 오차율이 낮다. 이번 연구에 쓰인 포토다이오드는 stepper공정을 이용한 포토다이오드를 사용하였다. MASK 공정에서 한 장의 샘플이 나오면 설계가 제대로 되었는지 설계에 맞게 만들어 졌는지 공정을 맞긴 회사와 MASK 공정을 실행한 회사의 확인 후 Fab-in에 들어간다. 여기서 Fab-in은 물건을 공장에 맞기고 대량으로 생산한다는 뜻이고 Fab-out은 물건이 완성 되어 공장에서 나온 것으로 이해하면 된다. 포토다이오드의 제작 과정에서 Fab-out 이 되면 포토다이오드는 실리콘 웨이퍼의 형태로 나오게 된다. 실리콘웨이퍼는 단결정의 결정방향을 가지고 있으며 이 과정을 지나 웨이퍼의 형태를 갖추게 된다. 이번 연구에 쓰인 Si wafer의 결정 방향은  $\langle 100 \rangle$  이다. 그리고 웨이퍼의 크기는 50mm - 300mm 까지 다양한 종류가 있는데 5인치를 사용하였고 두께는 380um(365~395um) 이다. 그리고 웨이퍼 불순물의 농도에 따라 저항을 조절 할 수 있다. 불순물의 농도에 따른 저항의 조절은 위에서 설명 하였다. 이번 연구에서 쓰인 포토다이오드의 resistivity는 Low와 High로 나누어지는데 이번 연구에서는 Low resistivity는 80-120  $\Omega$  그리고 High resistivity는 5k $\Omega$ 을 사용하였다. 이번 연구에서 사용할 포토다이오드의 resistivity는 Capacitance의 시뮬레이션에 의해 저항을 결정하였다. 아래의 <그림 3-1>은 80-120 $\Omega$ 과 5k $\Omega$ 를 전압에 따른 Capacitance에 대해 나타낸 것이다.

Capacitance 가 높으면 나오는 Signal 값은 커지고 반대로 낮으면 나오는 Signal 값은 작아진다. 영상을 얻기 위한 연구의 특징상 Signal이 많이 나오는 80-120Ω 웨이퍼에서 나온 포토다이오드를 사용하였다.

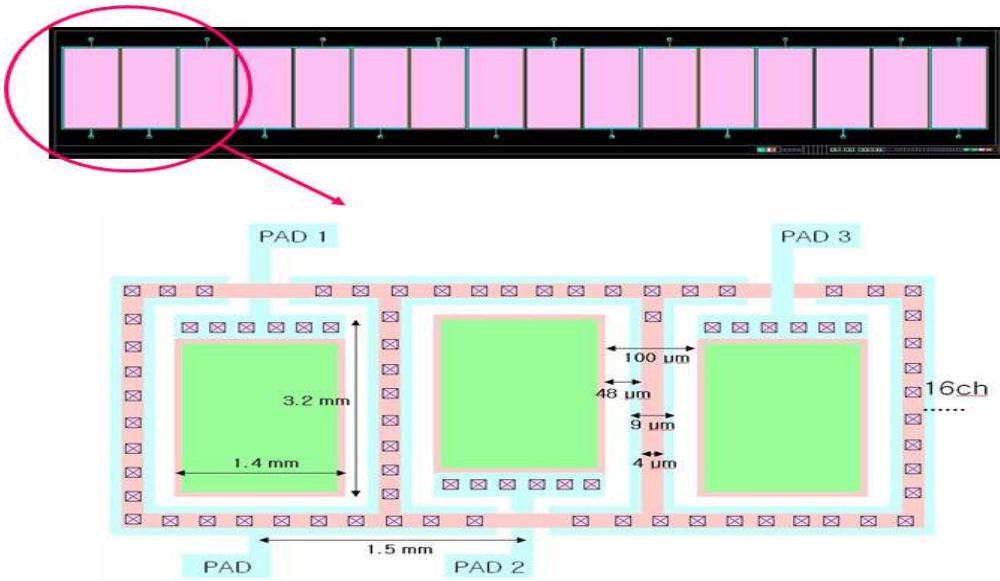


<그림 3-1. V-C-R >

본 연구에서 사용한 포토다이오드의 평면 기하학적 구조는 <그림3-2>에서 보여주고 있다. 한 모듈의 검출기는 16개의 채널로 구성되며, 한 채널의 pixel pitch는 1.5 mm이며, 광이 입사하는 Active layer 주변에 흐르는 Dark Current를 방지하기 위해 P+ Guardring을 사용하였다.

16채널 포토다이오드 제작의 최종단계로 웨이퍼형의 센서들의 assembly를 위하여 Packaging 및 Sawing을 거친다. 마친 개개의 photodiode를 chip 형태로 제작하기 위하여 ceramic substrate 위에 bonding 및 Wiring을 실시하는 단계로 전극을 형성시키기 위해 제작된 Substrate 위에 Bonding한 다음 Photodiode Metal Pad와 Substrate를 Gold로 Wiring하였다. 또한 각 Wiring 접점에는 납땜 시 열전도에 의한 Cutting을 방지하기 위해 Silver epoxy로 Coating한 후 실험용 보드와의 전극 연결을 위해 Substrate에 별도의 Wiring을 하였다.

이와 같은 공정을 통해 국내에서 생산 상용화된 포토다이오드 모듈을 <그림3-2>에 보여주고 있다.



<그림 3-2. PD 평면 기하학적 구조 >

<그림 3-3>은 설계 및 제작 과정을 통하여 생산된 16 채널 선형 어레이 포토다이오드로서, 본 연구는 16 채널 선형 어레이 포토다이오드의 설계 및 제작과정에 간접 참여함과 동시에 상용화된 포토다이오드를 이용한 실험 및 분석에 집중하였다.

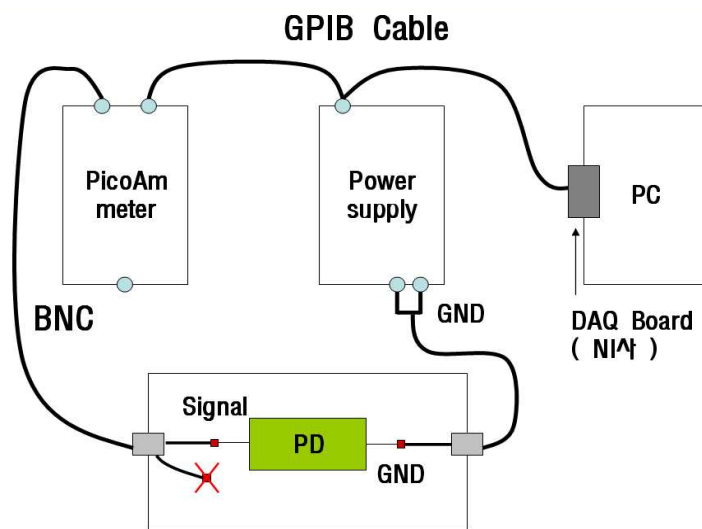


<그림 3-3. 생산된 16 채널 선형 어레이 포토다이오드>

## 제2절 포토다이오드의 성능 평가

### 1. I-V 측정 실험

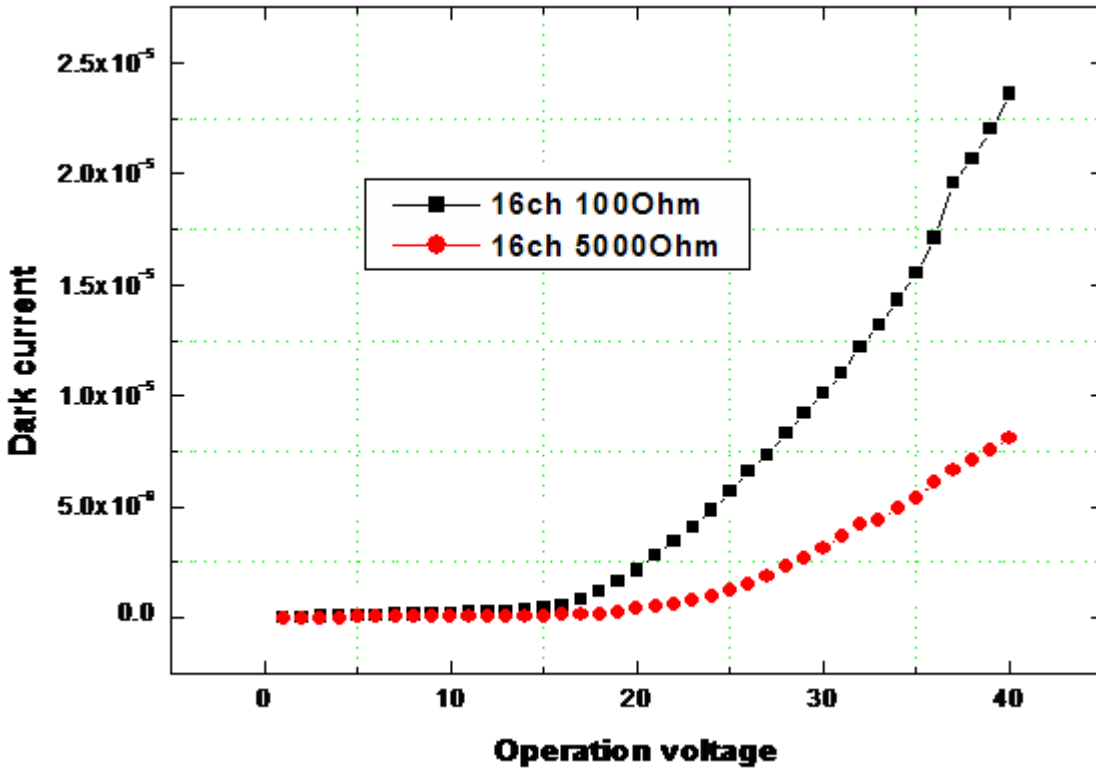
제1절에서 설명한 바와 같이 포토다이오드는 입사광 에너지에 의해서 발생하는 광전류 외에 입사광에 의하지 않는 소위 암전류 (Dark current)가 존재한다. 이것은 신호에 대해 잡음으로서 다루어짐을 알 수 있는데 그 값이 매우 중요한 것으로서, 이것은 신호 S에 대한 잡음(noise:잡음) N이며, 일반적으로는 S/N비로 생각할 수 있다. 또 이 영향은 미약한 입사광일수록 현저하게 나타나며 그 패해도 크게 된다. 그래서 이번 연구에서는 Wafer 상태의 photodiode를 Sawing, Wiring 및 Packaging 상태가 완료된 포토다이오드를 임의로 4개를 선택해서 Dark Current를 측정하였다. 광센서로써 사용되는 포토다이오드의 물리적 특성을 파악하고 암전류에 의한 노이즈 레벨을 예측하기 위해 Agilent E3631A과 Pico AM Meter와 DAQ Board를 통해서 센서에 걸어주는 전압 대비 흐르는 전류를 측정한다. <그림 3-4> I-V측정에 이용되는 장치들의 연결 다이어그램이다. 그리고 < 그림 3-5 >는 실험을 통한 signal을 그래프로 나타낸 것이다.



< 그림 3-4. Dark Current를 측정하기 위한 블록 다이어그램

고저항(5kΩ)과 저저항(80-120Ω) 16채널 포토다이오드의 암전류 측정결과는 < 그림 3-5 >에 나타내었다. 고저항과 저저항에 따른 센서별 암전류 차이를 보여주고 있다. Zero 영역의 역전압에서 pico amper 정도의 암전류가 발생하였으며, 역전압을 증가시킴에

따라 암전류는 증가하여 약 40 volt에서 micro amper 수준에 이르는 전형적인 I-V curve 특성을 보였다. 그러나, 본 연구에서는 Zero 영역의 역전압에서 기동하는 방식을 취하기 때문에 역전압에 따른 암전류 증가는 고려하지 않아도 된다.

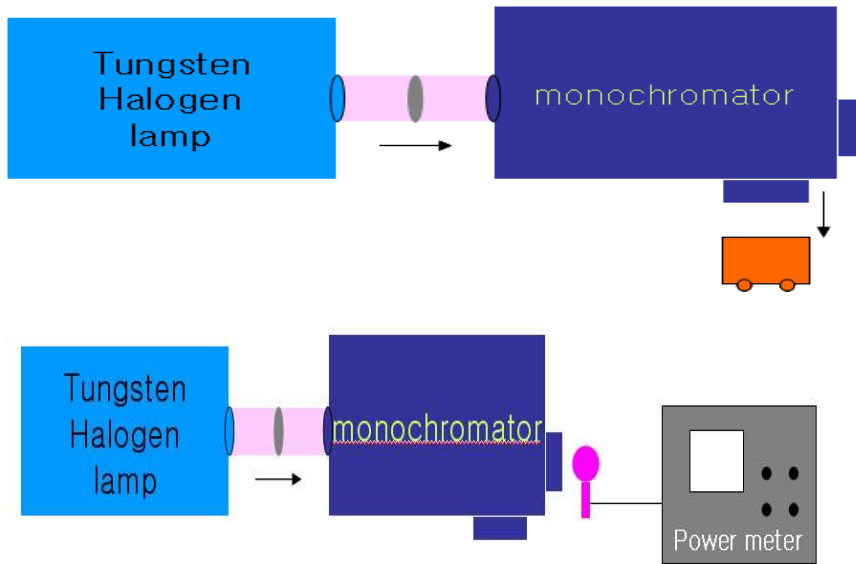


<그림 3-5. 고저항(5kΩ)과 저저항(80-120Ω) 16채널 포토다이오드의 I-V 측정 >

## 2. Quantum Efficiency 측정

QE(Quantum Efficiency)는 들어오는 빛의 파장에 따라 실제 포토다이오드에 계측되는 확률을 나타내는 것이다. 물질의 성분이 다른 섬광체들은 모두 나오는 빛의 파장이 다르다. 그렇기 때문에 빛의 수가 많이 나오더라도 포토다이오드의 특성(QE)에 따라 실제 계측되는 수는 많은 차이가 생길 수 있다. 이번 연구에서는 QE측정은 우선 모든 파장대에서 거의 95%에 가까운 QE를 나타내는 Tungsten Halogen lamp에서 빛이 나

오면 monochromator에 빛이 들어가게 된다. 두 장치를 연결하는 관에는 렌즈가 있는데 빛을 집속시켜주는 역할을 한다. 빛을 받은 monochromator의 역할은 들어오는 여러 종류의 파장에서 측정을 위해 원하는 파장만이 나오도록 컨트롤 해주는 역할을 한다. 그리고 monochromator에서 원하는 파장의 빛이 나오면 그 빛을 포토다이오드를 통해 측정하면 된다. 여기서 포토다이오드로 빛을 측정하는 것은 위의 I-V 측정과 같은 메카니즘으로 하면 된다. 여기서의 결과 값은 전류(mA)단위가 나온다. 그리고 Optical power meter에서 각 파장에 대한 측정 값을 전력(W)단위로 나타낸다. Optical power meter은 PC없이 자체적으로 측정결과 값을 나타낼 수 있으며 신뢰성을 갖기 위해 변환 수 있는 mA가 아닌 W 단위로 나타내는 것이다. 이러한 블록다이어그램을 아래의 <그림 3-6 >으로 나타내었다.



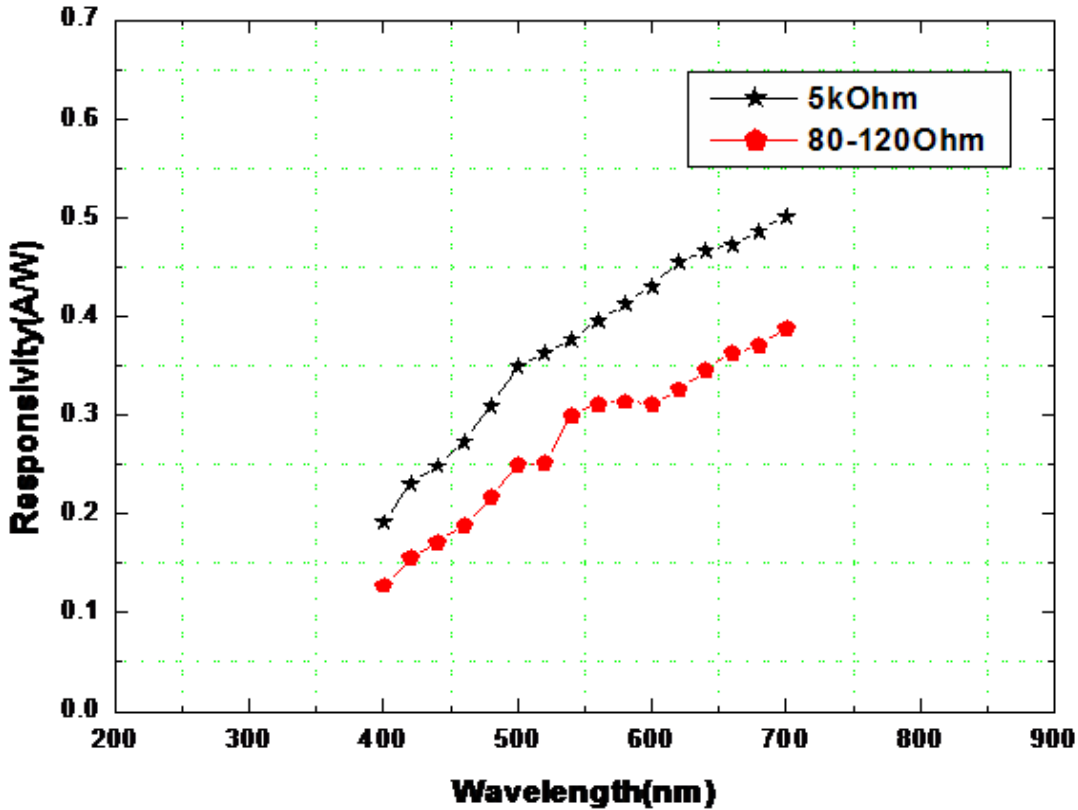
<그림 3-6. QE실험 블록다이어그램>

이렇게 나온 결과 값을 가지고 QE를 구하려면 먼저 responsivity를 구해야 한다. 아래는 responsivity를 구하는 식(3-1)이다.

$$R = \frac{I_p}{P_{\epsilon}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} = \frac{\eta \lambda}{1.24} \quad \text{----- (식 3-1)}$$

위의 수식에서 나온 결과값 R을 가지고 QE를 구한다. QE를 구하는 식(3-2)은 아래와 같다. 이렇게 파장대별로 Q.E를 구한 후 스펙트럼으로 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{I_P/q}{P_{\in}/h\nu} = \frac{R \times 1.24}{\lambda} = 100\% = QE(QuantumEfficiency) \text{ ---- (식 3-2)}$$



<그림 3-5. 고저항과 저저항 Responsivity 실험 데이터>

<그림3-5>는 고저항과 저저항에 대한 포토다이오드의 Responsivity를 나타낸 것이다. QE는 위의 식을 이용하여 계산하면 된다. 실험의 결과로 보면 고저항일수록 Responsivity가 높다는 것을 알 수 있는데 Responsivity가 높다는 것은 QE가 높다는 것으로 해석할 수 있다. QE가 높다는 것은 섬광체에서 나온 빛의 계측율을 나타낸 것이다. 고저항에서 Capacitance가 낮아서 신호를 받는 양이 적어도 계측율이 높아 상대적으로 저저항보다 많은 신호를 나타낼 수도 있다.



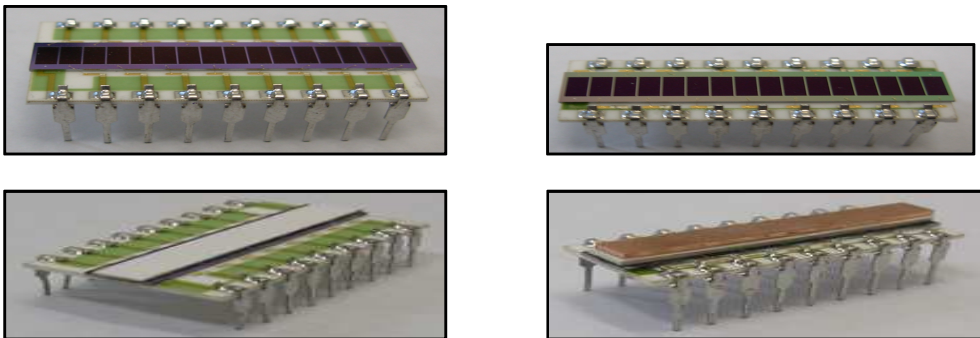
### 제3절. *Low Energy Detector* 및 *High Energy Detector* 제작

#### 1. *LED*의 제작

16채널 포토다이오드에서 Film 형태인 Lanex Regular를 16 채널 포토다이오드의 Active Layer 크기 (24 mm × 3.2 mm)로 절단한 후 Epoxy (DEVCON-5minute fast drying epoxy)를 이용하여 포토다이오드에 광학 Coupling하였다. LED 맞는 섬광체를 Coupling 하여야 하고 Coupling은 에폭시와 에폭시 하드너를 1:1의 비율로 섞고 기포가 나지 않게 잘 섞어야 한다. 하드너의 비율이 많을 경우 접착물이 색깔이 노랗게 변하므로 비율에 주의 하여야 한다.

#### 2. *HED*의 제작

HED는 LED와 달리 Lanex Fast-B를 사용하고 LED와 같은 방법으로 섬광체와 포토다이오드를 Coupling한다. 그런데 HED는 LED와 다르게 섬광체 위에 구리 필터를 올린다. 그 이유는 LED와 HED에서 측정하는 에너지 영역을 구분하기 위해서이다. 그렇게 때문에 HED위의 구리필터를 이용하여 LED를 통과한 X-ray스펙트럼에서 저에너지 영역을 차단하여 HED에는 저에너지영역대의 X-ray스펙트럼은 측정되지 않게 하는 것이다. 만약 구리필터와 같이 필터의 역할을 하는게 없다면 LED와 HED에서 나오는 signal이나 영상은 차이를 느낄 수 없다. 그리고 필터물질로 구리를 선택한 것은 저에너지를 차단하는데 탁월하고 주변에서 구하기 쉽고 값이 싸기 때문이다.



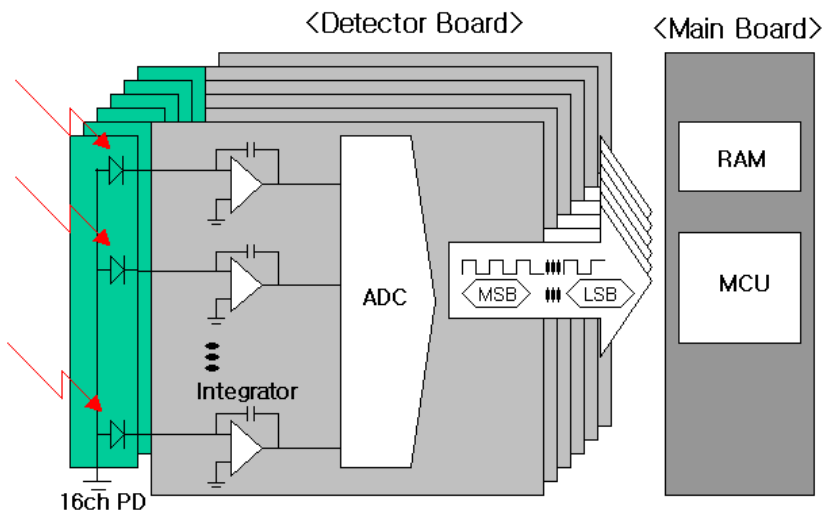
<그림 3-8. 섬광체 coupling 전, 후, 구리필터 16채널 포토다이오드 >

## 제4절. LED 및 HED 성능평가

본 연구에서 LED 및 HED의 전기적, 방사선적 성능평가를 위해 앞서 언급한 두 가지 형태의 Integration Mode의 Integrator인 IVC 102와 DDC 118을 이용하여 각각 신호장치 모듈을 제작하였다. 전기적 성능평가는 각각의 검출기 및 Integrator가 연결된 상태에서 SNR을 측정하였으며 세부 실험 과정 및 결과는 다음과 같다.

### 1. LED 및 HED + IVC 102 모듈

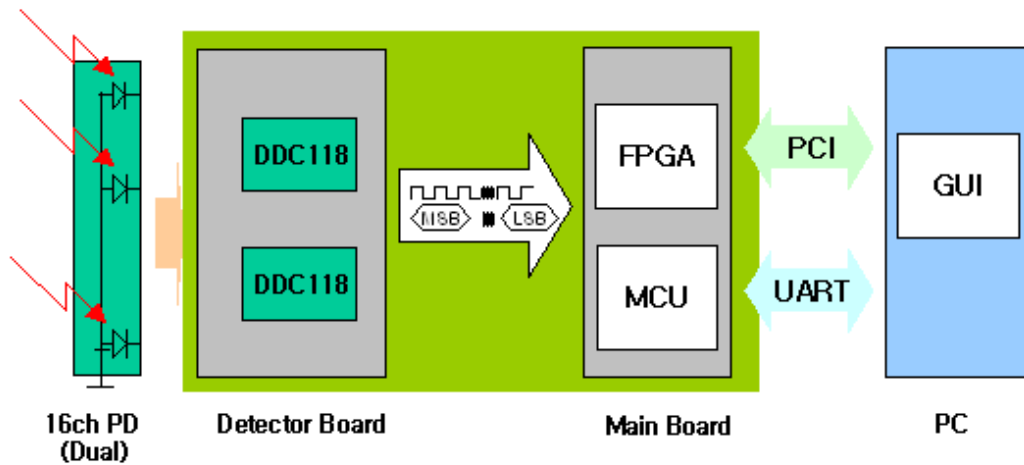
아래의 <그림 3-9>는 IVC 102 모듈을 이용한 전기적 성능평가를 위한 신호처리 보드의 개략도이다. 이 보드는 검출기가 장착된 상태에서 IVC102 integrator, OPA277 inverter, 그리고 두 개의 스위치로 구성되어 있으며, ADC를 통해 출력되는 신호를 오실로스코프를 통해서 관찰하였다. 이 시스템에서 일반 광에 대한 검출기 모듈에서의 포화신호(Saturation Signal)와 무광 상태에서의 암신호 (Dark Signal)를 구했다. 먼저 포화신호는 3.076 Volt 이고 표준편차는 약 3.092 mV를 나타냈다. 반면, 암신호는 7.8 mV이고 표준편차는 3.56 mV를 보였다. 따라서 본 시스템은 SNR의 정의에 의해 약 51.9 dB의 특성을 갖는 것으로 분석되었다.



<그림3-9. SNR을 측정하기 모듈이 장착된 IVC 102 모듈 기반 신호처리 보드>

## 2. LED 및 HED + DDC 118 모듈

아래의 <그림 3-10>은 DDC 118 모듈을 이용한 전기적 성능평가를 위한 신호처리 보드의 개략도이다. 이 보드는 검출기가 장착된 상태에서 DDC118 integrator를 통해 출력되는 신호를 오실로스코프를 통해서 관찰하였다. 이 시스템에서 일반 광에 대한 검출기 모듈에서의 포화신호(Saturation Signal)와 무광 상태에서의 암신호 (Dark Signal)를 구했다. 먼저 포화신호는 3.076 Volt 이고 표준편차는 약 3.092 mV를 나타냈다. 반면, 암신호는 7.8 mV이고 표준편차는 3.56 mV를 보였다. 따라서 본 시스템은 SNR의 정의에 의해 약 51.9 dB의 특성을 갖는 것으로 분석되었다.



<그림3-10. SNR을 측정하기 모듈이 장착된 DDC 118 모듈 기반 신호처리 보드>

$$\begin{aligned}
 \text{SNR} &= 20 \cdot \log(\text{DR}/\text{RMS})[\text{dB}] = 20 \cdot \log(65217/196.58) = 50.42 [\text{dB}] \\
 - \text{DR} &= S_{\text{sat}} - S_{\text{offset}} = 65535 - 318 = 65217 \\
 - \text{RMS} &= (\text{Offset Noise}_{\text{max}} - \text{Offset Noise}_{\text{min}})/(2 \cdot 1.4142) \\
 &= (702 - 146)/(2 \cdot 1.4142) = 196.58
 \end{aligned}$$

## 제4장 실험 환경 구축

### 제1절 X-ray 선원 및 X-ray Scanner

#### 1. X-ray 선원

일반적으로 X-ray Generator는 산업용과 의료용으로 나누어진다. 그 기준은 선량과 에너지에 따라 고선량에 고에너지이면 산업용, 반대로 저선량에 저에너지이면 의료용으로 나누어진다. 이유는 의료용 X-ray Generator는 투과하는 물질이 상대적으로 밀도나 두께가 얇아서 저선량에 저에너지로도 충분하지만 컨테이너, metal box, 가방 등 고밀도에 두꺼운 물질을 통과하기 위해서는 고선량에 고에너지를 사용해야한다.



<그림 4-1. 실험에 사용된 산업용 X-ray Generator >

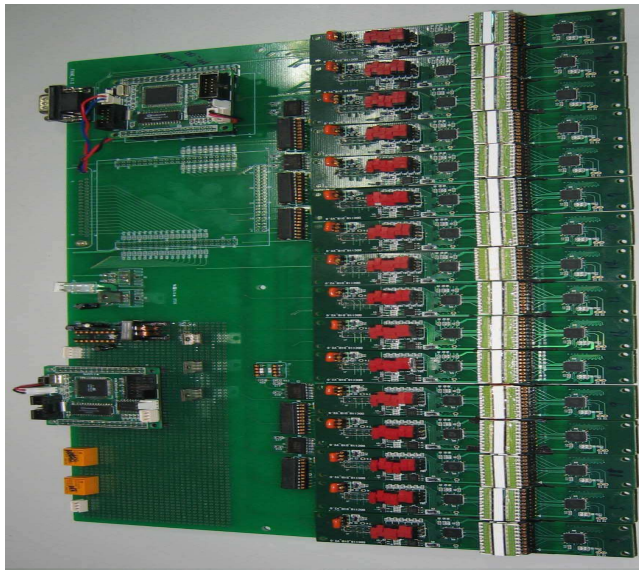
따라서 본 연구에서는 공항 및 항만의 Baggage Inspection System (BIS)에 적용되고 있는 산업용 X-ray (140 kVp, 1mA) 사양과 동일한 조건을 설정하기 위해 산업용 XP-ZSCAN GEN(Willick Engineering Company) X-ray Generator의 X-ray tube 및 스펙트럼을 이용하여 실험 및 Simulation을 수행하였으며, 실험에 사용된 산업용 그 구조와 세부적인 사양은 <그림 4-1>, <표 4-1>과 같다.

<표 4-1. X-ray 의 Generator 세부 사양>

<b>Technical Features</b>	
<b>Tube Max Voltage</b>	<b>160kVp</b>
<b>Tube Max Current</b>	<b>1mA @ 160kVp</b>
<b>Tube Max Power</b>	<b>Peak : 800 watts</b>
	<b>Continuous : 480 watts</b>
<b>Operating Temperature</b>	<b>10 - 40°C</b>
<b>Focal Spot</b>	<b>0.8 x 0.8 mm</b>
<b>Total Filtration</b>	<b>0.8 mm &amp; 1.5 mm Fiber Glass</b>
<b>Tube Type</b>	<b>Sealed Metal Box</b>
	<b>Recommended Shielding(Lead 4.5mm)</b>
<b>Leakage Radiation</b>	<b>&lt;7.85mR/h @1m at 90kV</b>
	<b>&lt;13.9mR/h @1m at 160kV</b>
<b>Dose Rate per exam</b>	<b>0.1mR/h typical</b>
<b>KV rise time</b>	<b>0.6kV/sec</b>
<b>Duty Cycle</b>	<b>100%</b>
<b>Repeatability</b>	<b>1%</b>
<b>High Frequency</b>	<b>20.83kHz</b>
<b>Cooling</b>	<b>Diala Oil (Sealed Oil bath)</b>
<b>Power Supply</b>	<b>118 VAC, 50/60Hz</b>
<b>Dimensions (w x h x l)</b>	<b>HF Generator : 500 x 198 x 345 (mm)</b>
	<b>Controller : 325 x 96 x 208 (mm)</b>
<b>Weight</b>	<b>HF Generator : 67.3kg</b>
	<b>Controller : 3.55kg</b>

## 2. X-ray Scanner

이번 연구의 목적인 이중 방사선 에너지에 의한 영상을 얻기 위해 X-ray Scanner를 이용하여한다. <그림 4-2>는 실제 이번 연구에서 사용된 X-ray Scanner의 실제 사진이다. 사진에 대해 설명하면 X-ray가 조사되어 피사체를 투과하여 <그림 4-2>의 아래에 하얀색의 Screen type의 섬광체에 입사되면 Detector에 신호가 들어오고 보드에서 신호를 받아 PC에 연결된 프로그램에서 영상이 보여진다. 섬광체 바로 위에 빨간색의 스위치들은 Capacitance로 스위치의 위치 조절로 신호의 크기를 조절 할 수 있어 영상을 정확하게 보기 위해서는 없어서는 안 되는 장치이다. 그리고 사진의 X-ray Scanner는 16개 채널에 대해 각각의 보드들이 1개씩 연결되어 신호처리의 과정을 복잡하지 않게 하였다. 신호처리의 과정은 단순하게 하였지만 전체적으로 Scanner의 크기가 커지는 단점을 가지고 있다.



< 그림 4-2. X-ray scanner >

X-ray 영상을 얻기 위해서는 PCB와 Photodiode Sensor를 연결하고 컨베이어와 X-ray Source, 그리고 피사체가 있어야 한다. 이번 연구에서 사용하게 될 검출기의 구조는 <그림 4-2>,<그림 4-3>과 같이 적층 구조로 저에너지 섬광체 아래에 LED(Low Energy Detector)가 있고 LED와 HED 사이에 에너지를 고에너지와 저에너지로 나누어 주는 구리필터가 들어가고 구리필터 아래에 고에너지 섬광체와 그 아래에 HED(High Energy Detector)가 들어간다. 검출기 구조는 적층구조로 하고 영상 시스템 구성도 보면 X-ray Source에서 방사선이 나오면 컨베이어 벨트가 작동하면 피사체를 움직인다. 그러면 X-ray Source와 마주보며 고정되어 있는 Detector Module 위를 피사체가 지나가면서 피사체를 뚫고 나온 X-ray가 Detector의 섬광체가 빛을 생성하고 그 빛이 Detector에 들어가면서 그 Signal이 영상으로 변하는 것이다.

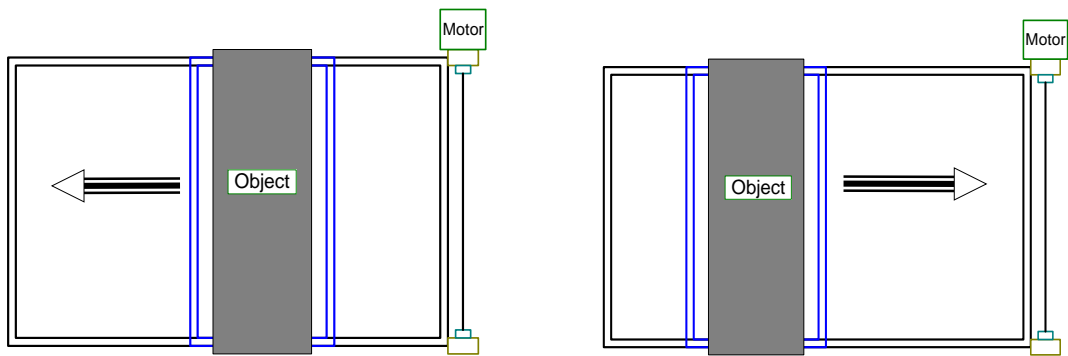


<그림 4-3. 실험에 사용된 X-ray Scanner >

## 제2절 Scan 구동 시스템 및 시스템 set-up 소프트웨어

### 1. Scan 구동 시스템 (x-y Zig control)

스캔 시에 <그림 4-4>와 같이 Object를 실어 컨베이어 벨트를 작동하려면 모터가 있어야 한다. 모터의 성능은 X-ray로 얻는 영상이나 signal에 많은 영향을 미친다. 모터가 가동(3000rpm)할 때 생기는 진동으로 인해 영상에 줄이 생길 수도 있고 모터의 속도 (5cm/sec)에 의해 영상이 늘어지거나 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 그렇기 때문에 프로그램을 만들 때 모터의 속도를 항상 염두 해 두어야 한다. 모터의 속도가 느리면 Object에는 더욱 많은 방사선의 피폭이 일어 날 것이다. 그렇다고 모터의 속도를 빠르게 하면 Object에 충분한 방사선의 피폭이 없어 영상이 흐리거나 늘어져서 보고자 하는 것을 볼 수 없게 된다. 아래의 그림은 스캔 시 모터에 의해 움직이는 Object를 나타낸 것이다.



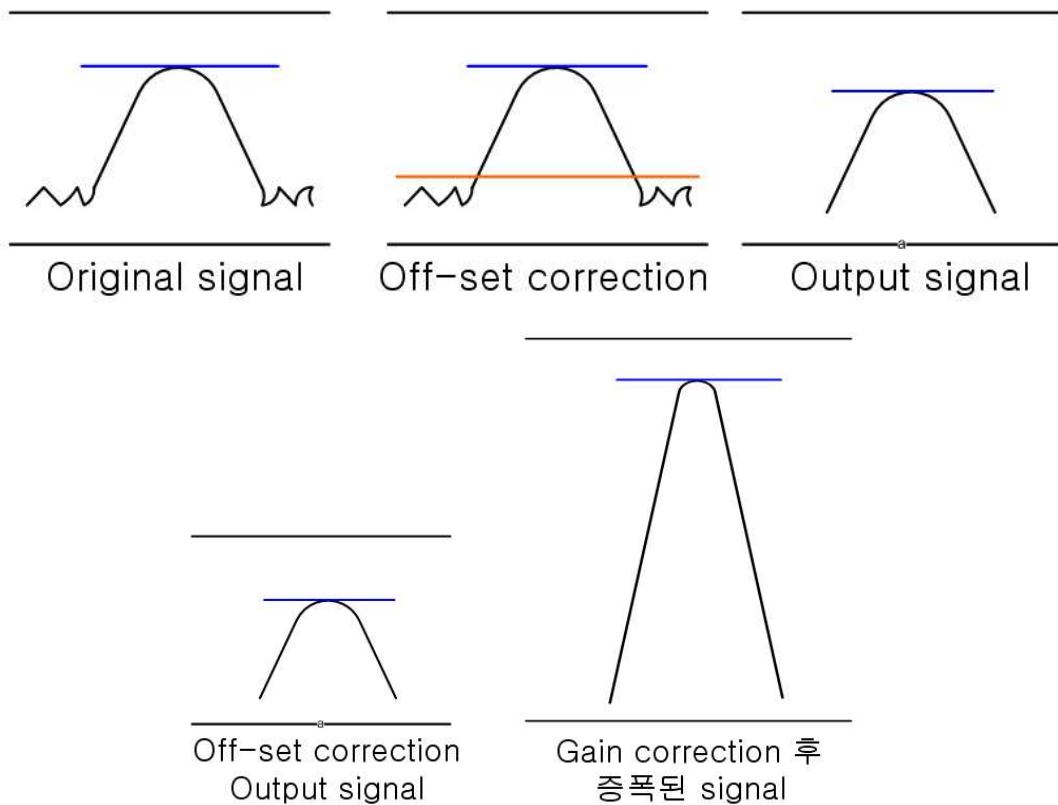
<그림 4-4. 모터에 의해 스캔 시 object의 움직임 >

이번 연구에서는 실험 시에 사용했던 모터는 Panasonic<MINAS A4 SERIES> 으로 MINAS A4A 시리즈로 RS485통신 307.2 / 38.4 kbps을 사용한다. 특징으로는 반 2중 통신으로 PTP제어에 적합하고 NC기능내장으로 목표위치를 지정하거나 실제 이동하는 양을 프로그램에 명령할 수 있다. 그리고 흔히 쓰이는 LAN 케이블을 사용하고 높은 노이즈내성을 가지고 있다.



## 2. 시스템 *set-up* 소프트웨어

X-ray를 조사 하고 그에 대한 X-ray 영상을 얻기 위해서는 소프트웨어적으로 이를 보정해 주어야한다. 이를 위한 요소로 Off-set correction과 Gain correction이 있다. Off-set correction과 Gain correction을 통한 보정후의 값으로 영상을 얻어 낼 수 있다. Off-set correction은 신호를 측정 했을 때 signal과 noise가 같이 나오는데 noise가 나오는 signal만큼을 빼주는 것이다. Off-set correction에서는 signal을 더하거나 빼줄 수 있다. Off-set correction을 지난 signal은 매우 낮다. 그러므로 signal을 Analog/Digital Conversion 에 맞게 충분히 높여 주어야 하는데 여기서 쓰이는 보정이 Gain correction이다. Gain correction은 Off-set correction을 지난 signal을 곱하는 형식으로 signal을 증폭시키는 것이다.



<그림 4-5. Offset correction and Gain correction Output signal >

Signal 보정이 끝나면 이제 X-ray 이미지 보정을 해야 한다. X-ray의 이미지를 얻기 위해서는 X-ray 조사 없이 센서에서 나오는 신호를 이용한 offset 영상과 X-ray 조사 후에 나오는 신호를 이용한 flat 영상 그리고 Object를 투과한 X-ray의 영상을 signal로 측정된 Measurement 영상이 필요하다. 이미지 보정은 Measurement signal과 flat signal에서 Offset signal을 빼주고 Measurement signal을 Flat signal로 나누어 비율을 분다. 나오는 비율을 가지고 최종 correction 영상을 얻어 낼 수 있다.

## 제5장 X-ray 반응 실험 및 X-ray 영상 실험

### 제1절 X-ray 반응 실험

#### 1. X-ray 반응 실험 (X-ray response test) 조건

산업용 X-ray 조사에 따라 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈에서 출력되는 신호를 측정하기 위해 <그림 2-4>과 같이 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈 New Detector의 각 LED와 HED를 Sandwich 구조로 배치하고, Test board를 함께 구성하여 <표 5-1>과 같이 동일 조사조건 (140 kVp, 1 mA)에서 Integration time, 구리 필터 두께, Test Phantom의 종류를 가변 시키면서 LED와 HED에서 출력되는 ADC 값을 측정하였다.

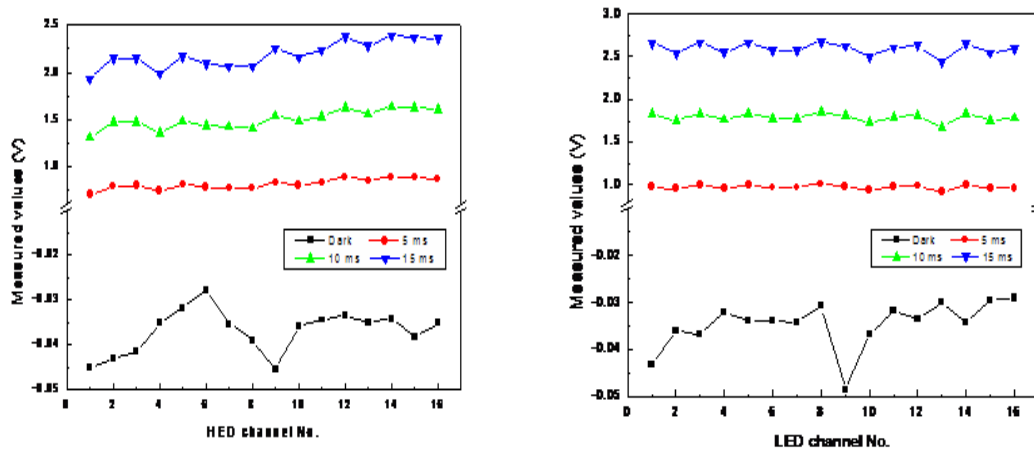
<표 5-1. X-ray 반응실험 조사조건>

구분	조 건		구 분
X-ray	140 kVp, 1 mA		산업용
SID	60 cm		
Integration time	5 ~ 20 ms		5 ms step
New Detector	LED(Lanex Regular) + HED(Lanex Fast B)		
Cu Filter (mm)	0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0		
Test Phantom	알루미늄	1, 2, 3, 4 mm	Step edge
	구리	0.1, 0.2, 0.3, 0.4 mm	
	아크릴	10, 20, 40 mm	

## 2. LED 및 HED의 X-ray Uniformity 실험

New Detector에 대하여 16채널 Photodiode의 각 채널에서 출력되는 신호의 Uniformity와 Dark 상태에서의 각 채널간의 Non-uniformity가 X-ray 조사 시 출력신호에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Test Phantom 없이 X-ray를 조사하지 않는 상태를 기준으로 Integration time을 증가시키면서 각 채널에서의 출력신호를 측정하였다.

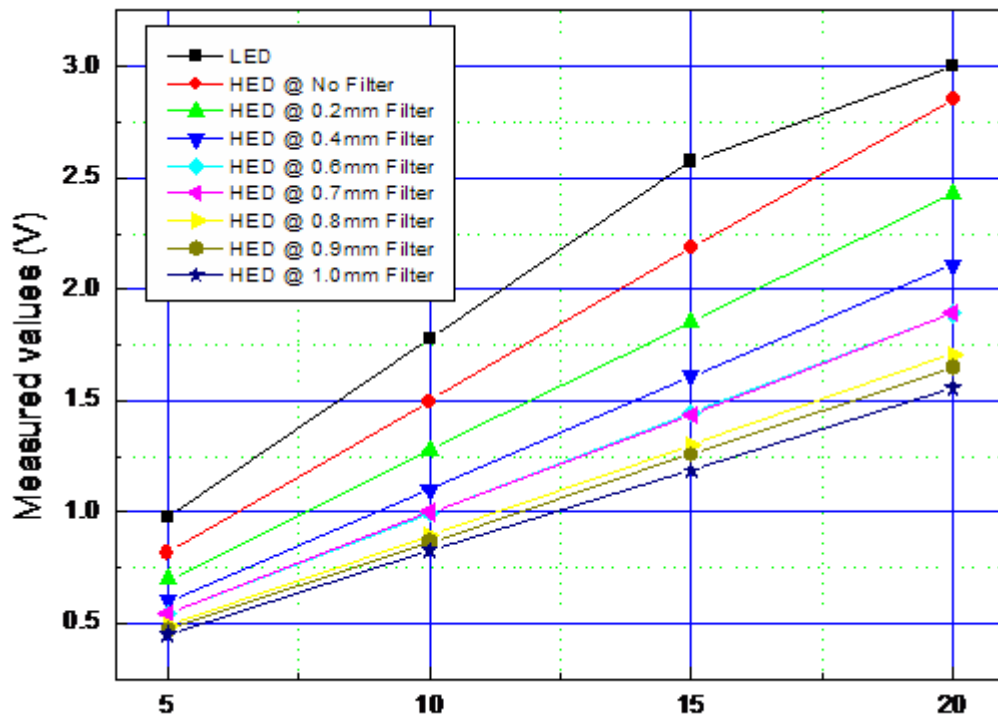
실험 결과, New Detector의 경우에 <그림 5-1>과 같이 입사 X-ray의 양이 증가 할수록 출력신호가 커지는 현상을 관찰할 수 있었고, Dark 상태의 각 채널 간의 Non-uniformity가 X-ray 조사량 증가에 따른 Response signal에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 위의 실험결과에서 알 수 있듯이 LED, HED의 출력신호는 Dark 상태에서의 각 채널별 Non-uniformity 보다 Scintillator 및 Optical coupling 등에 더 민감한 Non-uniformity가 존재하여 LED, HED에서 출력되는 신호에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



<그림 5-1. New Detector의 채널별 Uniformity @ No Filter & Phantom>

### 3. LED 및 HED의 X-ray Linearity 및 Signal 실험

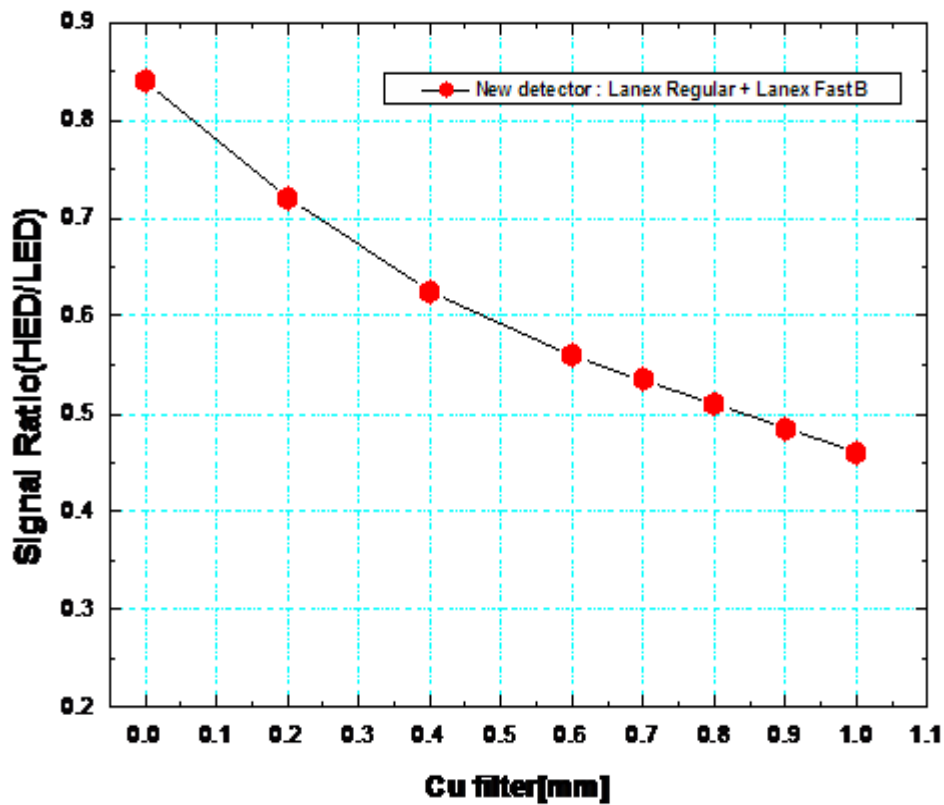
두께별 구리 필터가 HED에 Coupling된 New Detector에 대하여 Test Phantom이 없는 상태에서의 X-ray 조사시간 즉, Integration time 증가에 따른 출력신호를 측정 한 결과, <그림 5-2>와 같이 LED 및 HED에서 출력되는 신호는 Integration time이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있었고, 동일조건에서의 출력신호는 HED에서 출력되는 신호 보다 LED에서 출력되는 신호가 더 큼을 알 수 있었다.



<그림 5-2. New Detector의 Integration time에 따른 출력 신호 @ No Phantom>

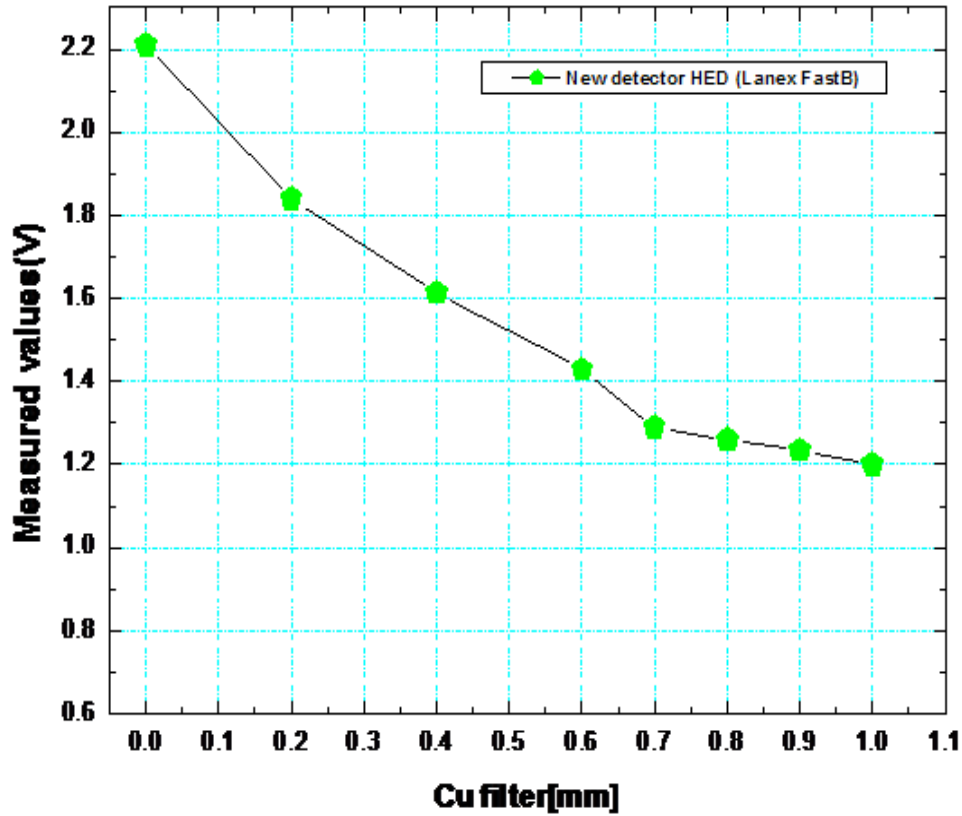
#### 4. LED 및 HED의 X-ray Signal Ratio 실험

동일 Integration time 조건에서 New Detector의 LED 및 HED에서 출력되는 신호의 비 (HED/LED)는 <그림 5-3>과 같이 구리필터 두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었는데 이는 구리 필터의 두께가 증가할수록 LED와 HED의 출력신호 차가 커짐을 의미한다.



<그림 5-3. New Detector의 Filter 두께에 따른 출력신호비 (HED/LED)>

또한 동일 조건 및 구조 (2층 구조, No Phantom)에서 New Detector의 HED에서 출력되는 신호를 볼 때 Lanex Fast B에 의한 출력신호는 <그림 5-4>와 같이 구리필터 두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었고 Test Phantom (Al : 2mm + Acryl : 20mm + Cu : 0.2mm)에 대한 출력신호는 1.87 V임을 알 수 있었다.

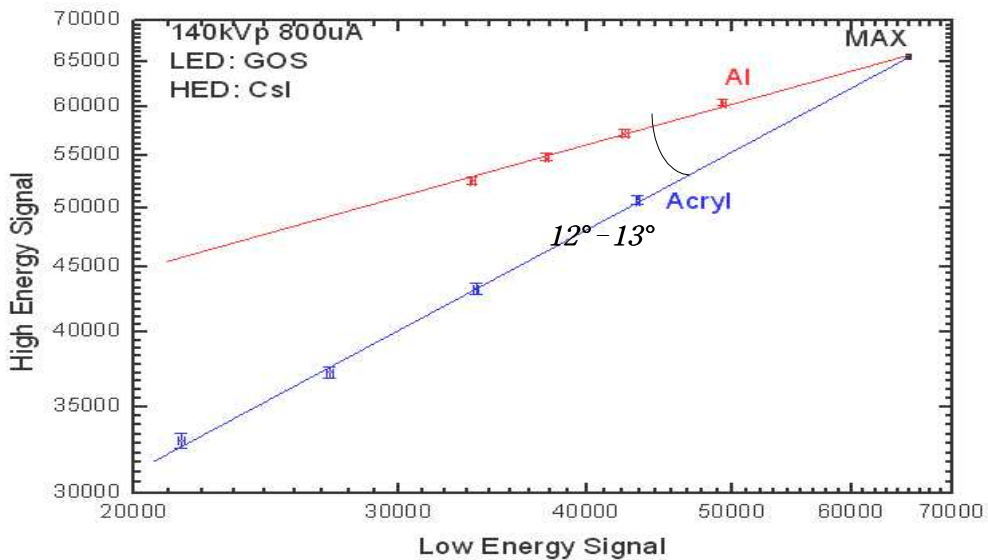


<그림 5-4. New Detector HED에서의 Filter 두께에 따른 출력신호>

## 5. LED 및 HED의 X-ray Z-Map 실험

Z-Map은 이중 에너지를 이용해 유기물과 무기물을 구분하는데 사용되는 지표로써 가로축을 저에너지 검출기의 신호 값, 세로축을 고에너지 검출기의 신호 값으로 한 로그 비율의 그래프로써 나타낼 수 있다. <그림 5-5>는 현재 상용화되고 있는 DT (Electron Tube) 社의 LED (GOS), HED (CsI)에서 구리필터 1.0 mm와 알루미늄, 아크릴에 대해 획득된 Z-Map으로써, 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 약  $12^\circ - 13^\circ$ 이다.

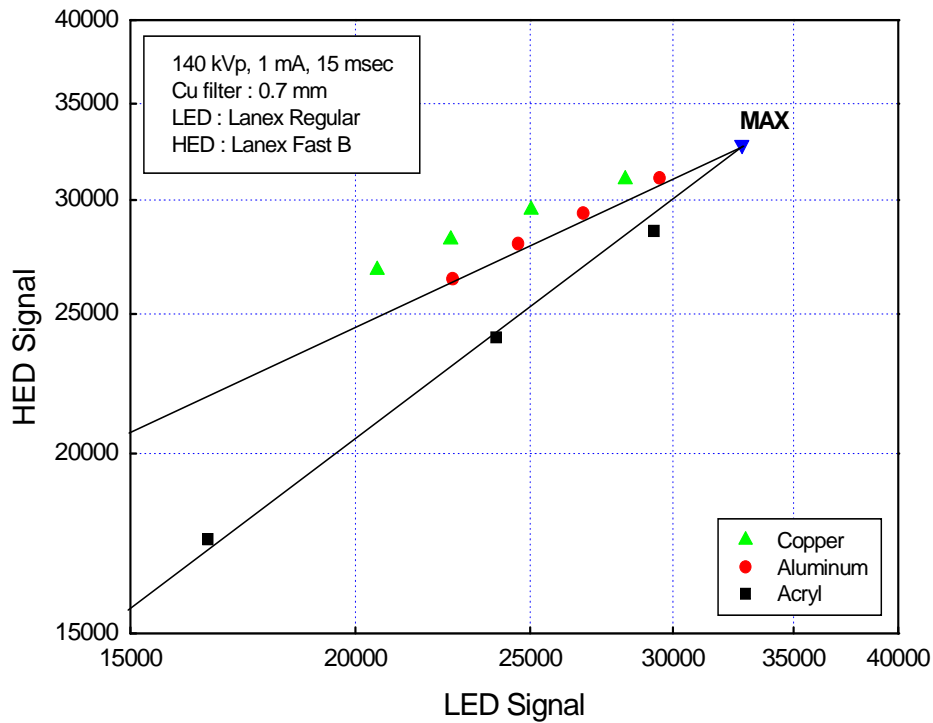
이처럼 Z-Map에서 한 가지의 물질은 하나의 직선으로 표현되고, 서로 다른 물질은 서로 다른 기울기를 가지는 직선으로 표현된다. 또한 원자번호가 낮을수록 아래쪽에, 클수록 위쪽에 위치하게 되며, 그래프 상에서 기울기 차이가 많이 날수록 서로 다른 두 물질의 구별능력이 뛰어나게 된다.[27]



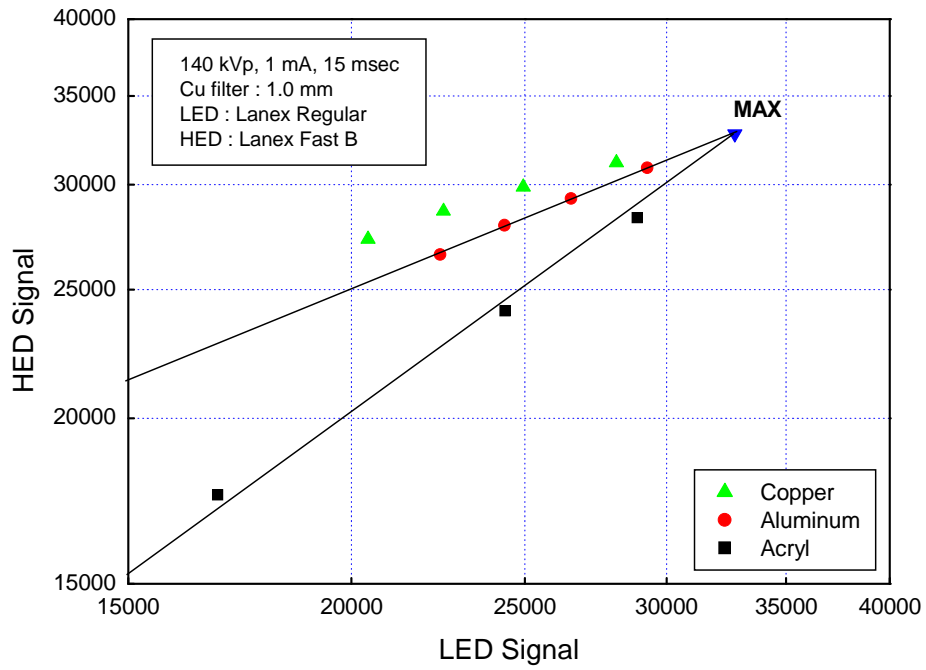
<그림 5-5. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map - DT社>



따라서 본 연구에서 제안하는 섬광체 조합의 검출기 모듈과 여러 가지 다른 물질의 Test Phantom을 이용하여 Z-map을 구성하였다. <그림 5-6>, <그림 5-7>은 구리 필터 0.7 mm와 1.0 mm에서의 Test Phantom (알루미늄 : 1 - 4 mm, 아크릴 : 10, 20, 40 mm, 구리 : 0.1 - 0.4 mm)에 대한 저에너지, 고에너지 신호를 바탕으로 구성된 Z-Map이며, 이 두께 영역에서는 아주 우수한 선형성을 보였다. 이는 Test Phantom의 두께와 유효원자번호가 작기 때문에 X-ray의 Beam hardening과 같은 다른 영향을 받지 않기 때문이다. 분리도 측면에서의 구리필터 두께에 따른 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 0.7 mm일 때 약 11°, 1.0 mm일 때 약 13°로 구리 필터 1.0 mm일 때 더 우수한 결과를 보였으며, 이는 DT 社의 12° - 13°와 유사한 결과를 얻었다.



<그림 5-6. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 0.7 mm>



<그림 5-7. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 1.0 mm>

## 제2절 X-ray 영상 실험

### 1. 실험 방법 및 조건

마지막으로 X-ray를 조사하여 X-ray Scanner를 이용하여 X-ray영상을 얻고자 한다. X-ray를 이용하여 영상을 얻고자 하면 고려해야 할 사항들이 많은데, 가장 적절한 X-ray의 조건을 아는 것이 중요하다. X-ray의 특성상 X-ray가 강하면 피사체를 그냥 투과해버리기 때문에 영상을 얻을 수 없게 되고 반대로 X-ray가 약하면 영상이 희미하게 나올 수 있다. 이번 실험에서는 여러 실험들의 결과로 X-ray장치에 85kV, 3.5mA를 입력하였다.

다음으로 고려한 것은 X-ray와 Detector와의 거리이다. 역시 방사선의 특성상 거리가 가까우면 많은 양의 에너지를 받게 되고 반대로 거리가 멀면 적은 양의 에너지를 받게 된다. 거리 역시 X-ray의 세기를 조절하는 요소 중에 하나인 것을 알 수 있다. 본 연구에서 거리 조건은 60cm이다.

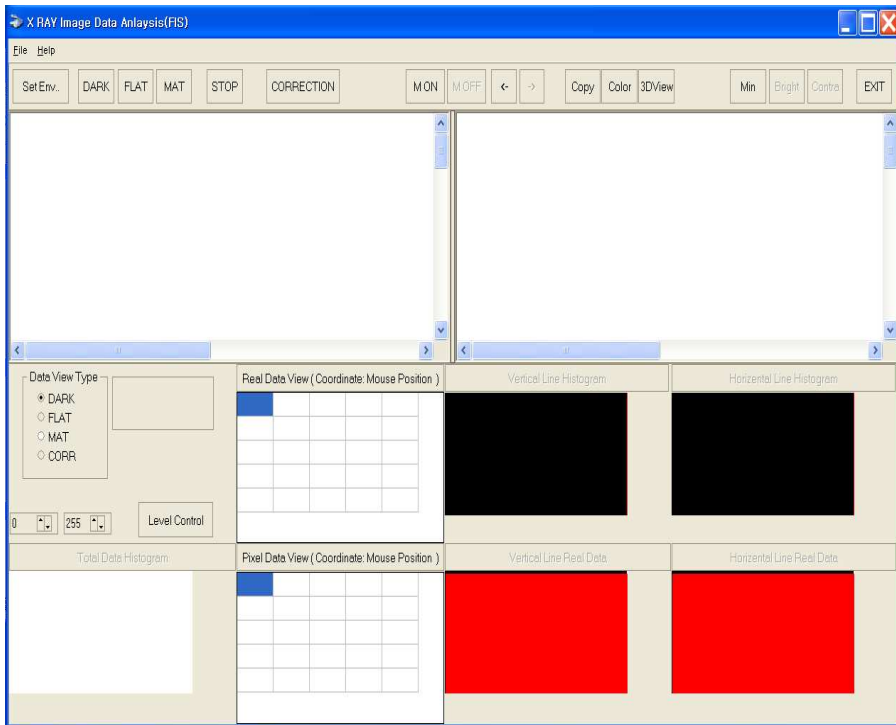
그리고 다음으로 고려한 것은 X-ray Scanner의 Scan speed이다. 본 연구에서 X-ray로 영상을 얻기 위한 시스템에는 피사체가 컨테이너 벨트를 이용하여 이동한다. 이번 연구에서는 피사체의 이동 속도를 계산하여야한다. 피사체의 이동속도가 너무 빠르면 X-ray Scanner의 정해진 Scan speed가 이를 따라갈 수가 없어 피사체가 늘어나는 영상을 얻게 되고 반대로 피사체의 이동속도가 X-ray Scanner의 Scan speed에 비해 느리면 피사체가 눌린 듯 한 영상을 얻게 될 것이다.



<그림 5-8. ASTM F792 Step wedge>

그리고 피사체로는 Highcom security Inc와 Larry copello Inc에서 만든 ASTM F792 Step wedge를 사용하였다. X-ray 영상의 질을 판단하기 위해서 만들어 진 이 피사체를 통해 얻은 영상으로 X-ray영상의 질을 측정할 수 있다. 위의 <그림 5-8>는 ASTM F792 step wedge의 내부 사진이다.

그리고 X-ray 영상을 얻기 위해서는 앞에서 설명 했듯이 offset signal과 flat signal, measurement signal을 얻어 Correction 하여야하고 피사체를 움직일 모터를 구동하여야 한다. 그런 것들을 간편하게 하기 위해 아래의 <그림 5-9>에서 나온 것과 같이 프로그래밍 하였다. 그리고 Correction 영상을 다른 측면에서 보기 위해 영상에 색을 넣는 프로그램과 3D로 볼 수 있는 프로그램도 되어 있다.

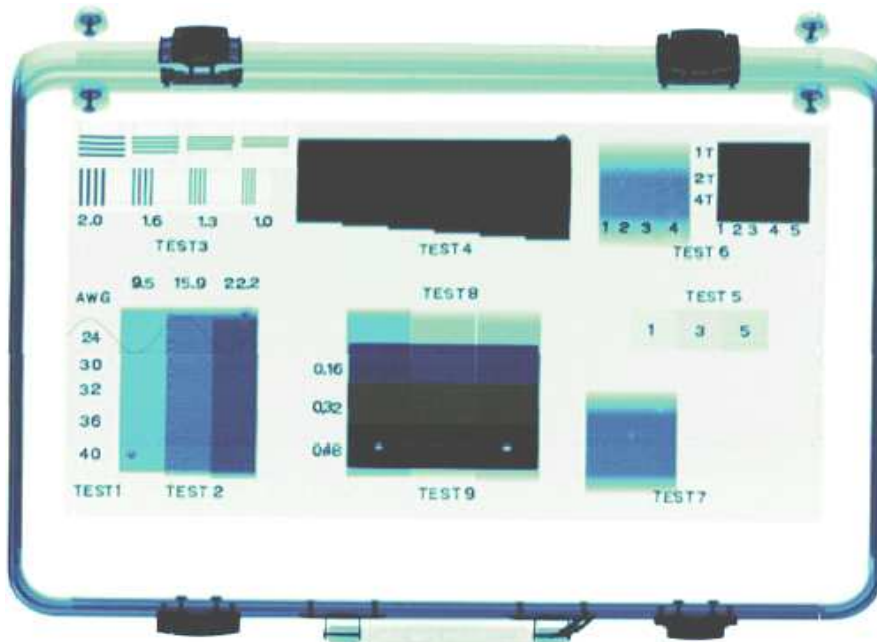


<그림 5-9. X-ray Imaging 프로그램>

## 2. 실험 결과

아래의 <그림 5-10>은 이번 연구에서 X-ray 영상 획득 시스템을 통해 나온 ASTM F792 Step wedge의 X-ray 영상이다. 실제 사진과 비교하면 숫자가 보이지 않거나 두께의 차이를 볼 수 없거나 와이어가 보이지 않는다. 이런 것들이 X-ray 영상의 질을 측정하는 것이다.

결과적으로 실제 사진과 비교하여 모든 것이 뚜렷하게 보이지는 않았지만 상용화되어 있는 제품과 비교하여 낮은 비용으로 거의 대등한 성능을 보였다. 하지만 상용화되어 있는 제품의 성능을 능가 하지는 못했다. 더욱 좋은 Detector의 개발과 X-ray 영상 획득 환경이 주어진다면 실제 사진에 가까운 영상을 얻을 수 있을 거라 생각한다.



<그림 5-10. ASTM F792 Step wedge의 X-ray 영상>

## 제6장 결론 및 고찰

본 연구는 BIS(Baggage Inspection System)에서 사용되고 있는 Dual Energy X-ray 방식으로 상용화되어 있는 제품들에 비해 낮은 비용으로 더 좋은 영상을 획득하기 위해 현재 상용화 되어 있는 DT (Detection Technology)社와 ET (Electron Tube)社의 섬광체 조합과 새로운 포토다이오드에 비용이 적게 드는 Screen type의 섬광체 중에서 Lanex시리즈 섬광체 조합을 구성하여 기존의 검출기 모듈을 바탕으로 앞의 조합에 대해 Monte carlo code인 MCNPX Simulation과 Z-map을 수행하여 고에너지와 저에너지의 분리 가능성 및 고에너지 검출기의 필터 두께에 대해 예측하였으며 그 결과로 저에너지 검출기 영역에는 Lanex-Regular, 고에너지 검출기 영역에는 Lanex-Fast B의 조합을 얻어냈다. 그리고 그때의 구리필터의 두께는 고에너지 영역과 저에너지 영역의 차이가 분명하게 나타나는 0.7mm 이상을 예측하였다.

그리고 섬광체에서 나오는 빛을 받아들여서 신호를 내보내는 Photodiode는 센서의 설계 및 구조에 대한 특성을 나타내고 시뮬레이션 할 수 있는 Silvaco社의 ATHENA Tool과 ATLAS Tool, CADENCE를 이용하였다. 그리고 설계가 끝나고 KETRI (한국 전자정보통신연구원)의 Fab 공정을 이용하여 최종적으로 1.5 mm × 3.2 mm의 16채널 PIN Photodiode를 제작하였다. 그 16채널 중에서도 저저항인 80-120Ω과 고저항인 5k Ω의 Capacitance와 I-V Curve 그리고 Quantum Efficiency에 대한 실험과 시뮬레이션을 하여 결과적으로 영상 획득을 위해 Capacitance가 높은 저저항인 80-120Ω을 사용하였다.

또한 실제와 거의 흡사한 환경을 조성하기 위해 X-ray Generator는 실제 산업용에서 쓰이는 140kV, 1mA를 사용하였고 포토다이오드에 섬광체를 Coupling하기 위해 Screen Type의 Lanex 섬광체를 16채널 포토다이오드의 Active Layer의 사이즈(24 mm × 3.2 mm)에 맞게 제작하였다. 그리고 고에너지 영역의 검출기인 HED에는 저에너지 영역의 검출기와의 에너지 흡수 영역의 차이를 위해 구리 필터를 섬광체 위에 Coupling 하였다.

그리고 동일한 X-ray 실험 조건에서 구리 필터의 두께 증가에 따라 저에너지 검출기(LED)와 고에너지 검출기(HED)의 출력신호의 차이는 같이 증가하였다. 특히 HED

에서의 출력신호의 크기는 구리 필터 두께가 증가 할수록 감소함을 알 수 있었다.

또한 본 연구에서 제안하는 Lanex Regular - Lanex Fast B 섬광체 조합의 검출기 모듈과 여러 가지 다른 물질의 Test Phantom (알루미늄 : 1 - 4 mm, 아크릴 : 10, 20, 40 mm, 구리 : 0.1 - 0.4 mm)을 이용하여 유기물과 무기물을 구분하는데 사용되는 지표인 Z-map 실험을 구성한 결과, 아주 우수한 선형성을 보였으며, 분리도 측면에서의 구리필터 두께에 따른 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 0.7 mm 일 때 약 11°, 1.0 mm일 때 약 13°로써 현재 상용화되고 있는 DT 社의 검출기 모듈에서의 기울기 차인 12° - 13°와 유사한 결과를 얻어 본 연구에서 제안하는 섬광체 조합의 검출기 모듈로의 유기물 및 무기물 구분이 가능할 것으로 판단된다.

Dual X-ray 영상 획득 실험을 수행하는데 시험편으로는 Highcom security Inc와 Larry copello Inc에서 만든 ASTM F792 step wedge를 사용하였으며, 프로그램을 통해 LED영상과 HED영상을 correction하여 ASTM F792 step wedge의 X-ray영상을 획득하였다. 영상의 질은 실제 사진과 비교하여 측정할 수 있었다.

본 연구에서는 포토다이오드를 제작하여 섬광체 조합을 시뮬레이션과 실험을 통해 구했고 마지막으로 X-ray 영상을 얻어 냈다. 결과적으로 상용화되어 있는 제품과 비교하여 낮은 비용으로 거의 대등한 성능을 보였다. 하지만 상용화되어 있는 제품의 성능을 능가 하지는 못했다. 상용화되어 있는 제품의 성능을 뛰어 넘기 위해서는 포토다이오드나 correction 프로그램, 신호처리 회로 등에 최고의 성능과 최적의 조합을 찾고 만드는데 노력해야 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] V, Rebuffel, J.M. Dinten, "Dual-Energy X-Ray Imaging: Benefits and Limits", ECNDT-Th.1.3.1 pp. 1-12, 2006.
- [2] 한국과학기술원, "디지털 X선 촬영장치의 성능평가 기준 개발", 식품의약품안전청, 3장, 2004.
- [3] S. BACCARO, A. CECILIA, et.al., "Scintillator and phosphor material : latest developments and applications", ENEA FIS-ION, 2006.
- [4] Hartman, T.E., "Dual-energy radiography", Seminars in Roentgenology, 1997.
- [5] S. Singh, M. Singh, " Review Explosives Detection System for Aviation Security," Signal Processing, vol. 83, pp. 31-55, 2003.
- [6] 울산대학교 의과대학, "X선 골밀도 측정기의 성능 평가 기준 개발 Instrument Evaluation and Quality Control for X-ray Bone Densitometer", 울산대학교병원
- [7] K Cranley et al, " Catalogue of Diagnostic X-ray Spectra and Other Data," Report No. 78, September, 1997.
- [8] MCNPX<sup>TM</sup> User's Manual, Version 2.5.0, Denise B, Pelowitz, Ed., Los Alamos Nat. Lab. Rep., Los Alamos, NM, 2005.
- [9] C. D'Ambrosio, et.al., " Particle Detector - Principles and Techniques", CERN Academic Training Programme, 2004/2005.
- [10] Young Kwan Kim, and et.al., NIM, B. 225, pp 392-396, 2004.
- [11] Marketech International, Inc., "Scintillator Crystals"
- [12] M. Kobayashi (KEK), " Introduction to scintillators," 2003.
- [13] Ahn, Seong Kyu, "A study on a scatter correction method based on thickness estimation in dual-energy radiography", KAIST, Doctoral Thesis, 2006.
- [14] Precision linear and two-dimensional scintillation crystal arrays for x-ray and gamma ray Imaging applications David J. Krus\*, William P. Novak and lou Perna
- [15] R. D. Macdonald, "Design and Implementation of a Dual-Energy X-ray Imaging System for Organic Material Detection in an Airport Security



- Application,” Proc. SPIE, Vol. 4301, pp. 31-41, 2001.
- [16] S. L. Issler and C. C. Torardi, "Solid state chemistry and luminescence of x-ray phosphors," *J. All. Comp.* 229 pp. 54-65, 1995.
- [17] H. S. Cho, et al " Development of a Portable Digital Radiographic System Based on FOP-Coupled CMOS Image Sensor and Its Performance Evaluation," *IEEE TNS*, Vol. 52, No. 5, pp. 1776-1772, 2005.
- [18] L. E. Antonuk, et al, " Development of Hydrogenated Amorphous Silicon Sensors for Diagnostic X-ray Imaging," *IEEE TNS*, Vol. 38, No. 2, pp. 636-640, 1991.
- [19] Robert F. Pierret, " Semiconductor Device Fundamentals", Addison Wesley, Ch. 9, 14, 1997.
- [20] G. F Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 2nd Ed., John Wiley & Son, 1989.
- [21] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., John Wiley & Son, 2004.
- [22] T. S. Curry III. J. E Dowdey, and R. C. Murry, " Christensen's Physics of Diagnostic Radiology ", Chapters 9 and 12 (Lea&Febiger, Philadelphia, 1990.
- [23] HAMAMATSU Inc., "Photodiode Technical Information"
- [24] ATHENA User's Manual, Silvaco Int., SantaClara,CA,1998.
- [25] ATLAS User's Manual, Silvaco Int., Santa Clara, CA, 1998.
- [26] CADENCE DESIGN ENVIRONMENT Antonio J. Lopez Martin  
alopmart@gauss.nmsu.edu
- [27] 이비테크(주), 한국과학기술원, "유기물과 무기물 구분 가능한 이중에너지 검색시스템 개발", 과학기술부, 3장, 2006.

## 감사의 글

오늘 부족함 많은 제가 이렇게 자그마한 결실을 맺을 수 있도록 애써주시고 격려해 주신 분들께 다 전해지지는 않겠지만 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

먼저 저를 제자로 받아주시고 올바른 학문의 길로 갈 수 있게 지도해 주시고 배려해 주신 정운관 교수님께 진심으로 감사드립니다. 아울러 바쁘신 와중에 논문을 심사해 주시고 많은 조언을 주신 이경진 교수님, 나만균 교수님과 아낌없는 격려와 열정적인 가르침을 주신 송종순 교수님 등 원자력공학과 모든 교수님과 김택현 교수님께도 감사를 드립니다.

여러모로 부족한 저를 학문적이나 인격적으로 성숙할 수 있도록 이끌어 주시고, 이 논문을 쓰기까지 실험환경을 마련해 주신 라드텍 대표이사인 김광현 교수님께 감사함을 전하고, 여러모로 조언을 주신 김영수박사님, 실험실과 연구실을 항상 같이하면서 묵묵히 물심양면으로 도움을 주신 전재용소장님과 언제나 친형처럼 격려와 관심을 가지고 지켜봐 준 전인섭 팀장님, 이용희 부장님께 고마움을 전하며, 지난 1년간 많은 밤을 지세우고 동거동락하며 항상 곁에서 많은 조언과 도움으로 힘이 되어준 김덕기 연구원과 항상 웃음으로 대해줬던 김기연씨께 진심으로 감사드립니다.

박사과정 동안 매번 신세만을 졌던 대학원 동기인 염유선, 김성영과 경희대 박사과정인 배진영씨에게 미안함과 고마움을 전하고, 같은 과 후배로 석사를 잘 마무리한 동혁, 학부선배 이상으로 잘 대해주고 많은 도움을 주었던 신항국, 양준영과 언제나 밝고 명랑한 모습으로 응원해 준 친여동생 같은 꼬맹이 학부생들에게 고마움을 전합니다. 그리고 시시때때로 챙겨주고 변치 않는 우정으로 감싸준 운선, 병상, 정혁, 진수, 맹수, 영수의 고교친구들, 인철, 정중, 성중, 덕모를 비롯한 중학친구들 모두에게 고마움을 전하고, 언제나 힘이 들 때 휴식처와 위안을 주었던 죽마고우 친구 홍민, 인근, 승민, 인환에게도 진심으로 고마움을 전합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 헌신적인 사랑과 믿음으로 묵묵히 지켜봐 주신 사랑하는 어머니와 장인, 장모님께 진심으로 감사드립니다. 그리고 바쁜 와중에도 학업에 열중할 수 있도록 격려와 염려를 다해주신 큰형, 작은형, 큰누나부터 다섯째인 막내누나와 매형, 형수님들께 바쁘다는 핑계로 제 노릇도 제대로 못해 죄송함과 그 동안의 고마움을 전합니다. 또한 항상 내 편에 서서 응원과 삶의 활력소를 제공해주신 여유 있는 딸 유미와 아내에게 지면을 빌어 사랑한다는 말과 함께 이 작은 결실의 기쁨을 드립니다.

## 저작물 이용 허락서

학 과	원자력공학과	학 번	10341075	과 정	박사
성 명	한글: 여 화 연    한문 : 呂化連    영문 : Yeon Hwa Yeon				
주 소	전라남도 장성군 남면 녹진리 105-3번지				
연락처	017-620-4612	E-MAIL	milalyhy@hanmail.net		
논문제목	한글 : 단일 조사 이중 X-선 영상획득용 새로운 검출기 모듈에 관한 연구				
	영어 : A Study on New Detector Module for Single Exposure Dual X-ray Imaging				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다            음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집·형식상의 변경을 허락함.  
다만, 저작물의 내용변경은 금지함.
3. 배포·전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함.
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함.
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 또는 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함.
6. 조선대학교는 저작물의 이용허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송·출력을 허락함.

**동의여부 : 동의( ○ )    반대(    )**

2009년    2월    일

저작자 : 여    화    연

(서명 또는 인)

**조선대학교 총장 귀하**