

2007년 2월

석사학위 논문

이중 X-선 영상 획득용
검출기 모듈에 관한 연구

- A Study on Detector Module for Dual X-ray Imaging

조선대학교 대학원

원자력공학과

전인섭

이중 X-선 영상 획득용
검출기 모듈에 관한 연구

- A Study on Detector Module for Dual X-ray Imaging

2007년 2월 23일

조선대학교대학원

원자력공학과

전인섭

이중 X-선 영상 획득용 검출기 모듈에 관한 연구

- A Study on Detector Module for Dual X-ray Imaging

지도교수 김 송 평

이 논문을 원자력공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2006년 10월

조선대학교대학원

원 자 력 공 학 과

전 인 섭

전인섭의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조 선 대학교 교 수 나 만 균

위원 조 선 대학교 교 수 김 송 평

위원 조 선 대학교 조 교 수 김 진 원

2006년 11월 석사

조선대학교 대학원

목 차

그림목차	iii
표 목차	iv
Abstract	vi
제1장 개요	1
제1절 연구배경 및 목적	1
제2절 연구내용 및 범위	6
제2장 Dual X-ray Imaging System	7
제1절 방사선원	8
제2절 섬광체 (Scintillator)	9
제3절 PIN 접합 실리콘 반도체 센서	12
1. 개념 및 원리	12
2. 성능 및 특성 인자	13
제4절 신호처리회로	17
1. Integrator Amplifier의 동작	18
2. Invertor의 동작	18
3. ADC의 동작	19
4. MCU의 동작	19
제3장 검출기 모듈 설계 및 제작	20
제1절 X-ray 선원	20
제2절 섬광체 및 검출기 설계	22
1. 섬광체 선정 및 조합	23

2. 섬광체 및 LED/HED 설계	24
제3절 PIN Photodiode 설계	28
1. PIN Photodiode Simulation	28
2. PIN Photodiode Layout	32
제4절 PIN Photodiode 및 검출기 모듈 제작	35
1. Wafer 및 Fab 공정 선정	35
2. PIN Photodiode 제작	35
3. 검출기 모듈 제작	36
제4장 신호처리회로 실험용보드	38
제5장 성능 및 특성 실험	43
제1절 I-V 특성 실험	43
1. 실험 방법 및 조건	43
2. 실험 결과	45
제2절 광학적 특성 실험	47
1. 실험 방법 및 조건	47
2. 실험 결과	47
제3절 X-ray 특성 실험	50
1. 실험 방법 및 조건	50
2. 실험 결과	51
제6장 결론 및 고찰	59

참고문헌

표 목 차

표 2-1. 상용화되고 있는 주요 무기물 섬광체별 특성 -----	11
표 3-1. X-ray tube의 세부 사양 -----	21
표 3-2. 섬광체 조합 및 특성 -----	23
표 3-3. Simulation Parameters -----	28
표 3-4. PIN Photodiode layout data -----	32
표 3-5. PIN Photodiode 제작에 사용된 Wafer 사양 -----	35
표 5-1. Leakage current 측정 실험 장비 및 조건 -----	43
표 5-2. Xray Test 조건 -----	51

그림 목 차

그림 1-1. Digital Radiography의 기본 원리	1
그림 1-2. 간접변환방식과 직접변환방식의 X-ray 흡수 원리	2
그림 1-3. 조사방식에 따른 이중에너지 영상 획득 방법	4
그림 2-1. Dual X-ray Imaging System의 구성	7
그림 2-2. X-ray tube의 구조 및 발생원리	8
그림 2-3. Scintillation mechanism	9
그림 2-4. PIN photodiode 구조 및 원리	12
그림 2-5. Depletion Approximation과 Energy-band diagram at reverse bias	14
그림 2-6. Integration Mode 신호처리회로 Diagram	17
그림 2-7. Integrator 회로도	18
그림 2-8. Invertor 회로도	18
그림 2-9. ADC Block diagram 및 Digital 출력 형태	19
그림 2-10. MCU Block Diagram	19
그림 3-1. 실험에 사용된 산업용 X-ray tube	20
그림 3-2. Simulation에 사용된 X-ray 스펙트럼 @ 1 mAs	21
그림 3-3. 저에너지 검출기 (LED)와 고에너지 검출기 (HED)의 구조	22
그림 3-4. MCNP Simulation을 위한 검출기 모듈의 구조	24
그림 3-5. DT1의 Lanex Regular와 Lanex Fast B에 흡수되는 에너지	25
그림 3-6. DT2의 Lanex Regular와 Ceramic Scintillator에 흡수되는 에너지	25
그림 3-7. 섬광체 조합별 구리 필터 두께에 따른 Absorbed ratio	27
그림 3-8. Atlas Simulation Structure with Guardring	29
그림 3-9. Atlas Simulation Structure without Guardring	29
그림 3-10. Dark current with Guardring	30
그림 3-11. Dark current without Guardring	30
그림 3-12. Wave-length에 따른 Quantum Efficiency	31
그림 3-13. 16-Channel PIN Photodiode Layout	33

그림 3-14. Packaging된 LED 및 HED 모듈 -----	36
그림 3-15. Lanex Regular (LED)-Ceramic Scintillator (HED) 조합 검출기 모듈 -	37
그림 3-16. Lanex Regular (LED)-Lanex Fast B (HED) 조합 검출기 모듈 -----	37
그림 4-1. 신호처리회로 실험용 보드 블록도 -----	38
그림 4-2. Integrator (IVC102U) 회로도 -----	39
그림 4-3. IVC102 타이밍도 -----	39
그림 4-4. OPA277 내부 블록도 -----	40
그림 4-5. ADS8345 내부 블록도 -----	40
그림 4-6. ADS8345 입/출력 데이터 타이밍도 -----	40
그림 4-7. MCU (ATmega128) 내부 블록도 -----	41
그림 4-8. 제작된 신호처리회로 테스트 보드 -----	42
그림 5-1. Probe Station System -----	44
그림 5-2. Semiconductor Parameter Analyzer-HP 4145A -----	44
그림 5-3. Ceramic substrate packaging 후 측정된 Leakage current -----	45
그림 5-4. 섬광체 Coupling 후 측정된 Leakage current -----	46
그림 5-5. 광량 Test block diagram -----	47
그림 5-6. 고에너지 검출기 모듈의 광량 Test 결과 -----	48
그림 5-7. 저에너지 검출기 모듈의 광량 Test 결과 -----	49
그림 5-8. X-ray 테스트 장비 및 Setup -----	50
그림 5-9. Detector 1의 채널별 Uniformity @ No Filter & Phantom -----	52
그림 5-10. Detector 2의 채널별 Uniformity @ No Filter & Phantom -----	52
그림 5-11. Detector 1의 Integration time에 따른 출력 신호 @ No Phantom --	53
그림 5-12. Detector 2의 Integration time에 따른 출력 신호 @ No Phantom --	53
그림 5-13. Detector 1, 2의 Filter 두께에 따른 출력신호비 (HED/LED) -----	54
그림 5-14. Detector 1, 2 HED에서의 Filter 두께에 따른 출력신호비 -----	55
그림 5-15. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map - ET社 -----	56
그림 5-16. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 0.7 mm -----	57
그림 5-17. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 1.0 mm -----	58

Abstract

A Study on Detector Module for Dual X-ray Imaging

Jun In-sub

Advisor : Prof. Kim Soong-pyung Ph.D.

Department of Nuclear Engineering

Graduate School of Chosun University

Dual X-ray imaging can be used to separate soft and dense-material images for medical and industrial applications. Detector Modules for 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 detector modules that LED was coupled with Lanex Regular scintillator and HED were coupled with the Eu-doped $(\text{Gd,Y})_2\text{O}_3$ ceramic scintillator new developed by KAIST and 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 the 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 were fabricated in the process of ETRI. Leakage current of this photodiode was measured to range of 0.2 ~ 10 pA.

Each component of the dual X-ray imaging detectors was fabricated and tested including Data Acquisition System (DAS).

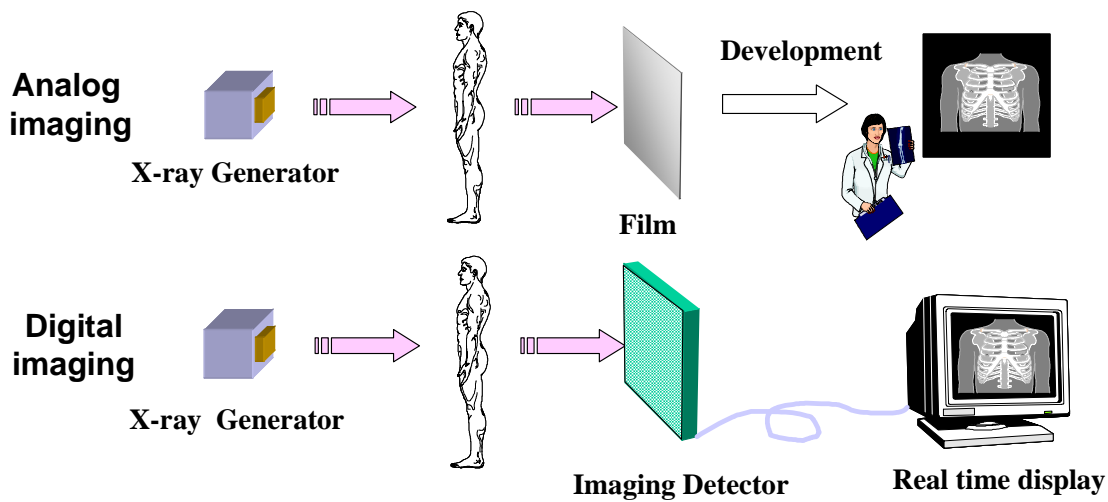
It was proven that the ceramic scintillator and Lanex Fast B coupled HED were a sufficient candidate to replace the CsI(Tl) commerced in dual X-ray system, since these give a strong signal, overcoming system noise. Comparing the Lanex Regular coupled photodiode for perpendicular imaging, the output signals of the ceramic scintillator and Lanex Fast B coupled photodiode were each 1/5, 1/2.5 at the same X-ray exposure condition at copper filter thickness 0.7 mm. This signal difference is enough to realize dual imaging in the dual X-ray scanner.

In the near future, after improvements of the DAS, the acquired image will be analyzed.

제1장 개요

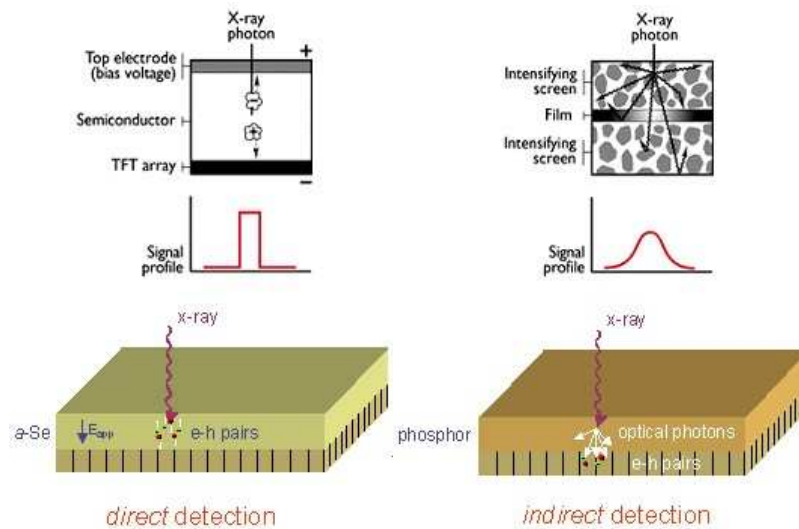
제1절 연구 배경 및 목적

X-ray를 이용한 Digital Radiography(DR) 기술은 투과 방사선에 대해 검출기를 이용하여 디지털 영상을 획득하는 것으로써, 기존의 아날로그 필름을 이용한 방사선사진 기법과 같은 방법으로 피사체에 조사된 X-ray가 피사체를 투과하면서 피사체의 두께나 밀도차에 의해 X-ray의 에너지와 양의 변화가 생기는데 아날로그 필름을 이용한 경우는 밝고 어둠의 차이로 피사체의 내부를 영상화하지만 DR 기술은 피사체를 투과한 X-ray가 검출기에 흡수되어 전기적 신호를 발생시키고 위치정보와 함께 읽어 들여 디지털화하여 최종적으로 영상처리 알고리즘을 이용하여 완성된 하나의 방사선 영상을 구성하는 역할을 수행하는 것을 말한다.



<그림 1-1. Digital Radiography의 기본 원리>

이 때 DR 기술에 사용되는 방사선 영상검출기들은 기체형과 고체형으로 나눌 수 있으며, 최근 소형화와 신호처리 기술의 동시 구현을 위해 반도체 기반의 검출소자를 주로 사용하였으며, X-ray가 최종적으로 전기적 신호로 전환되는 방식에 따라 <그림 1-2>와 같이 직접변환방식 (Direct Conversion Method)과 간접전환방식 (Indirect Conversion Method)으로 분류할 수 있다.



<그림 1-2. 간접변환방식과 직접변환방식의 X-ray 흡수 원리>

직접변환방식은 X-ray와 광전물질 (Photoconductors)이 직접 반응하여 광전물질 내에서 전자-정공쌍이 생성되고 이들은 물질 양단에 인가되어 있는 전장에 의해 전자는 (+)양극으로, 정공은 (-)음극으로 이동한다. 이 중 아래에 위치한 Active matrix array에서 검출되는 것은 정공이며, 이러한 과정은 신호를 100% 검출할 수 있다는 장점이 있으나 입사된 X-ray가 광전물질에 흡수되는 비율이 상대적으로 낮다. 이 직접변환방식의 방사선영상검출소자로는 a-Se, CdTe, CdZnTe, HgI₂등이 있으나, 현재 상용화된 방사선영상검출소자로는 a-Se, CdTe 및 CdZnTe가 있다.

간접변환방식이란 피사체를 투과한 X-ray가 섬광체 (Scintillator)와 반응하여 일부의 에너지가 흡수되는데, 이 흡수된 X-ray 에너지가 섬광체의 섬광 발생 메커니즘에 의해 가시광영역의 파장을 갖는 광자 (Photon)로 전환하고, 이를 광소자가 전기적 신호로 변환하여 방사선을 검출하는 방식을 말한다. 직접변환방식과는 달리 X-ray를 가시광으로 전환하는 이유는 직접변환방식의 경우 X-ray의 흡수량이 상대적으로 적어 일정 두께의 섬광체를 이용하여 이 흡수량을 높여 전기적신호 (Signal) 성능을 향상 시키려는데 있다. 간접변환방식의 Digital Radiography System(DRS)에 응용되는 방사선 영상검출소자로는 CCD, CMOS, a-Si등이 있으며, 이때 사용되는 섬광체는 Film형태의 GADOX, CsI(Tl), ZnSe(Te), CdWO₄, LSO 등이 있다. [1] [2]

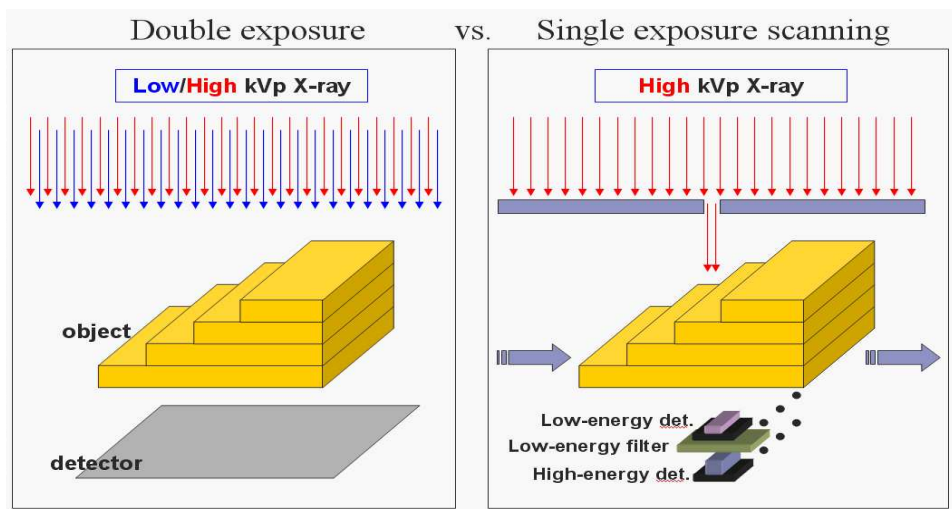
이러한 Digital Radiography 기술은 치과의 Intra oral Radiography, Panoramic Radiography와 흉부 엑스레이 촬영, 유방암 진단 등 의료분에서 적용되고 있으며, 산업분야에서도 반도체 및 전자부품소재 불량률 검사, 용접부위 검사, 화재 감식, 배관 검사 등의 비파괴검사 및 안전진단 분야와 공항 및 항만에서의 수화물 검사에 활발히 적용되고 있다.

하지만 적용되고 있는 대부분의 Digital Radiography Imaging은 단일 X-ray를 조사하여 검사체의 두께나 밀도차에 의해 출력되는 신호를 단일 방사선 센서를 통해 디지털 영상으로 획득하기 때문에 밀도차가 작은 피사체를 식별하는데 어려움이 있다. 특히, 공항 및 항만의 검색 시스템의 경우 밀도가 낮은 마약이나 폭발물 등을 밀도가 높고 두께가 두꺼운 물질에 밀봉하여 들여올 경우 단일 에너지 조사에 의해서는 그 내용을 확실하게 판단할 수 없게 된다.

따라서 근래에는 이러한 단일 에너지 조사에 의한 Digital Radiography의 문제점을 극복하기 위해 Dual-Energy Digital Radiography에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Dual-Energy Digital Radiography는 하나의 X-ray 스펙트럼을 이용하는 기존의 일반 Digital Radiography와는 달리 이중 에너지를 이용하여 검사체의 방사선 감쇠계수에 따른 밀도 영상뿐만 아니라, 검사체의 구성성분을 고밀도 물질 부분과 저밀도 물질 부분으로 구분해서 분리된 영상을 얻을 수 있는 기술이다. [3]

이러한 Dual-Energy Digital Radiography는 <그림 1-3>와 같이 크게 이중조사방식과 단일조사방식으로 구분되는데, 이중조사방식은 하나의 2차원 방사선 영상센서와 두 번의 서로 다른 에너지의 X-ray를 조사하게 된다. 하나의 검출기를 이용해 이중에너지 영상을 얻기 위해 시간차를 두고 두 번의 X-ray가 조사 되므로 그 피폭이 크고 피사체의 움직임이 있을 경우 영상의 흔들림이나 두 영상의 조준에 어려움이 있다는 단점이 있으나, 두 에너지 차이를 극대화할 수 있고 고에너지의 신호가 커 이중 에너지를 이용하는 효과가 큰 장점이 있어 일반적으로 골 다공증 및 골 밀도 진단 등의 의료 분야에 많이 적용되고 있다.

단일조사방식은 단일에너지 X-ray를 조사할 때 한 쌍의 검출기 모듈을 Sandwich 구조로 구성하여 저에너지 신호와 고에너지 신호를 동시에 획득하는 방법이다. 검출기는 위쪽의 저에너지 검출기 (Low Energy Detector-LED)와 아래쪽의 고에너지 검출기 (High Energy Detector-HED)로 구성되어 있으며, LED의 경우 저에너지를 잘 흡수하는 섬광체가 사용되고, HED는 고에너지를 잘 흡수하는 섬광체와 입사되는 저에너지를 차단하기 위하여 필터를 사용하기도 한다.



<그림 1-3. 조사방식에 따른 이중에너지 영상 획득 방법>

단일조사방식에 의한 Dual-Energy Radiography는 한 번의 조사로 동시에 두 신호를 획득할 수 있기 때문에 피사체의 피폭이 적고, 피사체의 흔들림에 의한 영상왜곡, 저에너지와 고에너지 영상의 조준이 필요 없다는 장점이 있으나 이중조사방식에 비해 고에너지 신호가 작다는 단점이 있어 일반적으로 공항이나 항만 등의 수화물 검색과 같이 상대적으로 높은 X-ray 에너지와 고선량의 조사 방식의 Digital Radiography에 많이 이용되고 있다.

하지만 단일조사방식에 의한 Dual-Energy Radiography는 입사되는 단일 에너지에 대해 최종적으로 저에너지 신호와 고에너지 신호의 형태로써 출력해야 하기 때문에 저에너지와 고에너지를 분리할 수 있는 최적의 섬광체와 검출기를 설계해야 한다. 현재 상용화되고 있는 Dual X-ray Imaging System에서는 저에너지와 고에너지를 분리하기 위한 방법으로써 각 섬광체에서 흡수되는 저에너지 및 고에너지 스펙트럼을 고려하여 섬광체 및 검출기 설계에 반영하고 있다. [4]

따라서 본 연구에서는 현재 상용화 되어 있는 섬광체 조합보다 고에너지와 저에너지 분리 측면에서 우수하고, 제작비용 면에서도 저렴한 섬광체의 조합을 찾기 위하여 현재 산업용으로 많이 사용되고 비용이 저렴한 Lanex 시리즈 및 국내에서 연구·개발중인 Ceramic Scintillator (KAIST) [5] 등의 섬광체 조합을 제안하였고, 기존의 상용화된 섬광체 조합과 제안된 조합에 대하여 Monte carlo code인 MCNP를 이용하여 방사선학적 특성을 비교 평가하였다. 또한 섬광체에서 생성되는 Light의 수광부인 Photodiode를 설계, 제작하였으며 제작된 센서와 신틸레이터를 Coupling하여 실증 실험을 수행하였다.

이를 바탕으로 공항 및 항만의 수화물 검색 시스템 적용을 위한 단일 조사방식의 Dual X-ray Imaging에 적용 가능한 섬광체 및 Sandwich 구조의 저에너지 검출기(LED) 및 고에너지 검출기(HED) 최적화 설계를 수행하였다.

제2절 연구 내용 및 범위

제2장에서는 Dual X-ray Imaging System을 구성하고 있는 방사선원, 방사선검출센서부, 신호처리회로부 등 세부항목에 관한 개념 및 원리 등의 이론적 배경을 서술하였다.

제3장에서는 제2장의 이론적 배경을 바탕으로 Dual X-ray Imaging용 X-ray Source를 선정하고, 저에너지 및 고에너지 검출기 최적화를 위해 현재 상용화 되어 있는 섬광체 조합과 본 연구에서 제안하는 섬광체 조합에 대하여 Monte Carlo Code인 MCNPX [6]를 이용하여 섬광체 조합별 흡수 에너지 등의 방사선학적 특성을 비교 평가하고, 고에너지 검출기 모듈의 필터 두께를 최적화하였으며, Silvaco사의 Device Simulation Tool인 ATLAS [7] 등을 이용하여 Quantum Efficiency 등의 광학적 특성을 분석하여 섬광체에서 생성되는 Light의 수광부인 Photodiode를 설계, 제작하였다.

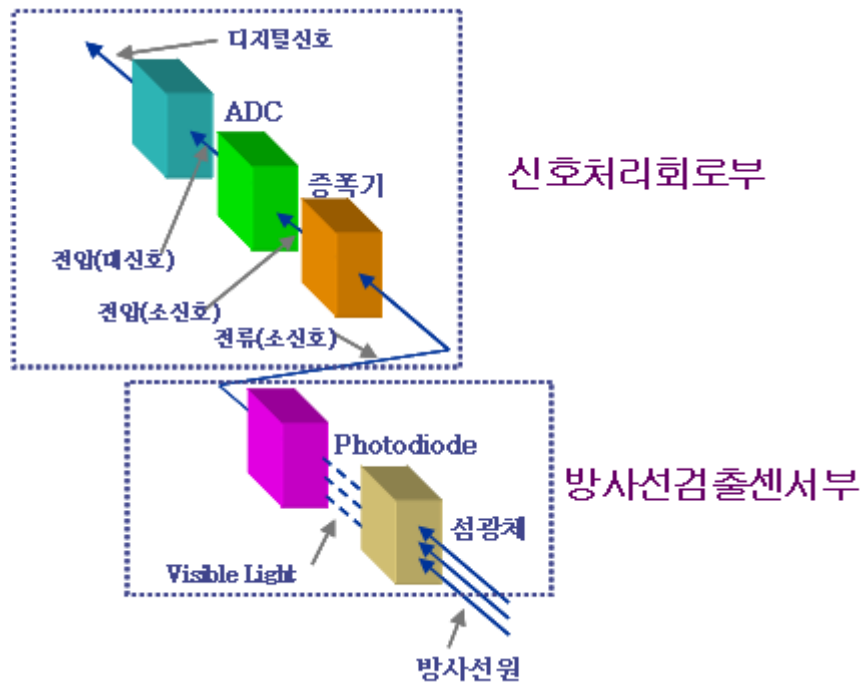
제4장에서는 제3장에서 설계, 제작된 Dual X-ray Imaging용 검출기 모듈의 성능 및 특성을 테스트하기 위해 사용된 신호처리회로 실험용 보드의 각 구성품별 특성을 서술하였다.

제5장에서는 제작된 PIN Photodiode의 가공단계에 따른 I-V 특성 실험과 광량에 따른 광학적 특성 실험을 수행하였으며, 제3장에서 설계된 Lanex Regular-Fast B 조합과 Lanex Regular-Ceramic Scintillator 조합의 검출기 모듈을 산업용 X-ray 장비를 이용하여 X-ray 특성 및 성능 실험을 수행하였다.

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

제2장 Dual X-ray Imaging System

Dual X-ray Imaging System은 <그림 2-1>과 같이 검사체에 조사되는 방사선원과 검사체를 통과한 방사선을 신호로써 검출하는 섬광체와 Photodiode가 결합된 방사선검출센서부, 센서부에서 출력되는 신호를 처리하기 위한 신호처리부로 구성된다.

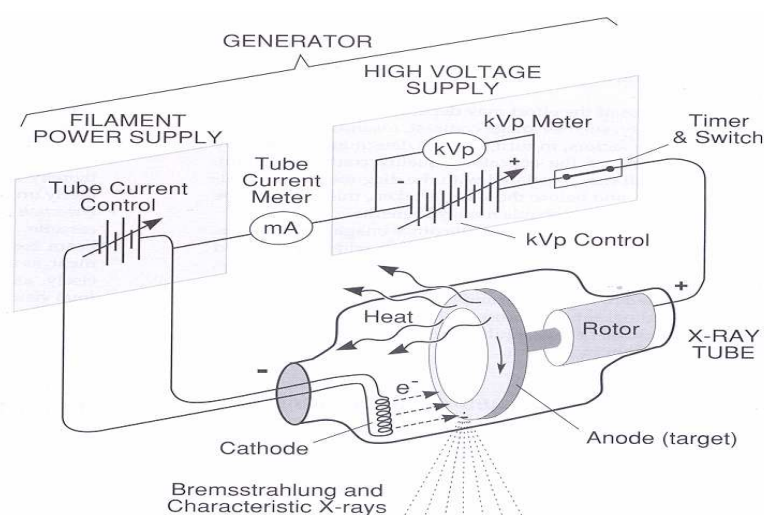


<그림 2-1. Dual X-ray Imaging System의 구성>

제1절 방사선원

현재 Dual X-ray Imaging System에 사용되는 방사선원은 X-ray, 감마선, 중성자 등 세 가지이며, 그 중에서도 X-ray가 가장 많이 사용된다. 보통 X-ray는 X선관(X-ray tube)이라고 하는 일종의 진공방전관을 사용해서 고전압 하에서 가속한 전자를 표적(Target)의 금속판에 충돌시켜 발생시킨다. [8]

X-ray의 발생원리는 <그림 2-2>처럼 음극부(Cathode)의 필라멘트에 전류를 흘려 음극을 가열시키면 음극에서 열전자가 튀어 나오는데 이 전자를 양극(Anode)과 음극(Cathode) 사이에 고전압을 걸어 가속시켜주고, X-ray는 이 고속전자가 금속체인 양극에 충돌하였을 때 발생한다. 양극을 표적(Target)이라 부르며 양극에 걸어주는 고전압을 관전압, 음극에서 양극으로 향하는 고속전자의 흐름을 관전류라 한다.



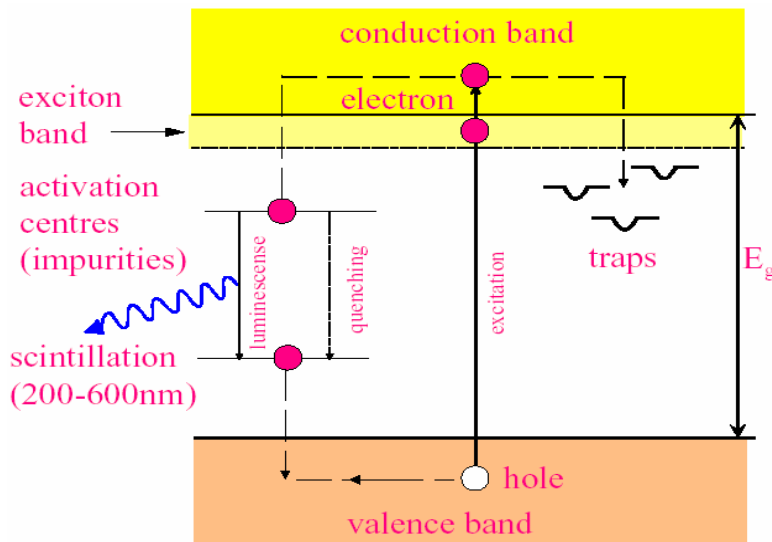
<그림 2-2. X-ray tube의 구조 및 발생원리>

이런 X-ray tube에서 발생하는 X-ray를 검사체에 조사시켜 방사선 영상센서를 이용하여 Digital 영상을 획득하는데, 그 응용분야에 따라 사용되는 X-ray tube의 관전압 및 관전류가 다르게 적용된다. 의료분야에 적용하는 경우 검사 대상체가 주로 인체이기 때문에 사람의 피폭선량과 인체의 밀도 등을 고려해 비교적 저에너지, 저선량의 X-ray가 사용된다. 하지만 산업분야에 적용하는 경우 검사체의 두께가 비교적 두껍고, 밀도 또한 높기 때문에 투과력과 해상도를 높이기 위해 고에너지, 고선량의 X-ray를 사용한다.

제2절 섬광체 (Scintillator)

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>와 같이 방사선이 충만대 (Valance band)의 전자에 에너지를 전달하게 되면 전자가 에너지를 얻어 전도대 (Conduction band)로 여기되어 전도대로 올라가게 되고 여기된 전자는 전도대에서 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 총 에너지 흡수 피크보다는 Compton 연속 스펙트럼이 나타나기 쉬워 유기 섬광체는 감마 에너지 보다는 주로 저 에너지 β 측정에 사용된다. 또한 감쇠시간이 nsec 정도로 짧아 보다 빠르게 신호를 검출할 수 있으며, 무기 섬광체와 비교할 때 상대적으로 값이 저렴한 특징을 가지고 있다.

반면, 무기 섬광체는 주로 원자번호와 밀도가 높은 물질의 Crystal, Ceramic, Glasses, Noble liquid, Noble gasses 등의 형태를 갖추고 있으며, 감쇠시간은 nsec ~ μ sec로 유기 섬광체 보다 상대적으로 길지만, 높은 섬광 효율 (Scintillation efficiency) 과 섬광체에 흡수되는 방사선의 에너지에 따라 발생하는 빛의 양 또한 넓은 Range에 걸쳐서 선형적으로 비례하여 주로 Calorimetry나 X-ray, 감마 Spectroscopy 및 Imaging을 목적으로 사용하도 있다.

무기 섬광체의 방출 스펙트럼은 섬광물질 및 불순물의 농도에 따라 상이하나 대체로 가시광선영역 및 자외선 영역에 위치하며 각 섬광체별 고유의 방출 스펙트럼을 가지고 있다. 이러한 방출 스펙트럼은 실제적으로 신호를 검출하는 실리콘 포토다이오드의 Spectral Repose-Curve와 어느 정도 일치해야 하며 이러한 특성들은 섬광체에 흡수되는 방사선의 에너지를 빛으로 생성시키는 효율 (Scintillation Efficiency, η)과 섬광체에서 생성된 Photon이 실리콘 Photodiode에 입사하여 신호(e-h pairs)를 생성시키는 효율 (Quantum Efficiency-QE)에 영향을 미치는 중요한 인자가 된다. [10]

$$\text{섬광효율}(\eta) = \frac{\text{Energy of Scintillation Light}}{\text{Energy Deposition}} = \frac{h\nu_e}{w_{e-h}} Tq_A$$

$h\nu_e$: 방출된 포톤의 평균 에너지

w_{e-h} : 1쌍의 e-h를 생성시키는데 필요한 에너지

T : 섬광체 내에서 발생한 빛이 실리콘 포토다이오드 표면까지 도달할 확률

q_A : 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.

이처럼 <표 2-1>과 같이 섬광물질과 불순물의 종류 및 농도에 따라 방광 스펙트럼

이나 섬광효율 등의 섬광체적 특성이 각각 상이하기 때문에 섬광체 선정시 방사선질이 나 사용 환경 등을 고려하여 적용 분야에 알맞은 최적의 섬광체를 선정하여야 한다.

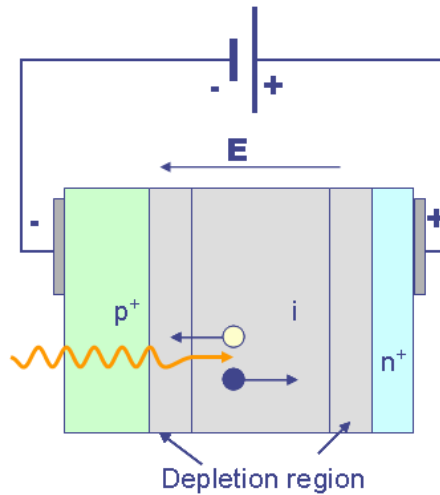
<표 2-1. 상용화되고 있는 주요 무기물 섬광체별 특성> [11]

Scintillator	Density (g/cm ³)	Wavelength (nm)	Light yield (#/MeV)	Decay time (nsec)	Afterglow (%)	Refractive index
CsI:Tl	4.5	560	60,000	1us	0.05~5.0 @ 6ms	1.8
CdWO ₄	7.9	475	20,000	20ns 50ms	0.1 @ 6ms	2.3
Gd ₂ O ₂ S:Tb	7.3	545	70,000	600us	<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) ₂ O ₃ :Eu	5.9	610	19,000	1000us	3 @ 3ms	1.96

제3절 PIN 접합 실리콘 반도체 센서

1. 개념 및 원리

포토다이오드 (Photodiode)는 빛의 유무를 감지하여 광 강도에 비례하는 전류로 변환하는 소자로써 가장 대표적인 광센서라고 할 수 있다. 포토다이오드는 물성적 구조에 따라 PN Photodiode, PIN Photodiode, Schottky Photodiode, APD (Avalanche Photodiode) 등이 있으며, 이러한 포토다이오드는 1) 입사광에 대한 직선성이 좋고 2) 응답속도가 빠르고 3) 출력편차가 작고 4) 감도파장의 범위가 넓고 잡음이 적으며 5) 외부전원을 사용하지 않고 사용 가능하다. 또한, 7) 장수명, 고신뢰성을 갖고 8) 온도에 의한 출력변동이 작은 특성을 가지고 있다. 하지만 입사하는 신호에 비해 출력되는 신호의 감도 (Sensitivity)가 낮아 일반적으로 증폭기 (Amplifier)를 이용하여 신호를 증폭한다. [12]



<그림 2-4. PIN photodiode 구조 및 원리>

PN Photodiode는 P형 반도체 (Diffusing Boron)와 N형 반도체 (Diffusing Phosphorous)를 접합시킨 형태로써, 접합면 (Junction)에는 공간 전하 영역 (Depletion Layer)이 형성되어 역전압 (Reverse Bias)을 인가하면 공간 전하 영역이 넓어지게 되고 빛 또는 방사선이 이 영역에 입사하여 전자-정공쌍 (Electron-Hole Pairs)을 생성하게 된다. PN 접합 반도체는 공간 전하 영역이 클수록 빛 또는 방사선의 흡수 영역이

커서 입사량에 따른 전기적 신호량이 크게 되는데, <그림 2-4>처럼 고순도 반도체 (Intrinsic Semiconductor)를 웨이퍼로 사용하여 PN 접합을 할 경우 Reverse Bias를 가하지 않아도 물리적으로 공간전하영역을 크게 만들 수 있는 형태를 PIN Photodiode라고 한다. [13]

PIN Photodiode의 공간 전하 영역에서 생성된 전자는 양극으로 이끌려 이동하고 양공은 음극에 이끌려 이동함으로써 미세한 전류를 형성하게 되고 이때 생성된 전류는 입사된 빛 또는 방사선의 양에 비례하며, 이 전류는 미세 신호 처리 전자 회로에서 펄스 형태의 전압 신호로 변환되어 최종적으로 펄스의 숫자를 계수하게 된다. [14]

2. 성능 및 특성 인자

가. Quantum Efficiency (η)

Quantum Efficiency는 Photodiode에 Photon이 입사하여 e-h pairs를 생성시키는 효율으로써 다음과 같이 표현된다. [15]

$$\eta = \frac{n_{el}}{n_{ph}} = \frac{I_p / q}{P_0 / h\nu} = \frac{I_p}{P_0} \frac{hc}{q\lambda}$$

나. Responsivity (R)

Responsivity는 Quantum Efficiency와 비슷한 개념으로써 Photodiode에 입사되는 에너지 (W)가 Photocurrent 신호 (A)로 출력되는 효율을 나타내는 척도로 Peak Wavelength에서의 상대적인 Sensitivity를 나타내며, 일반적으로 다음과 같이 표현된다. [15]

$$R = \frac{I_p}{P_0} = \eta \frac{q\lambda}{hc} = \eta \frac{\lambda}{1.24} \quad [A/W]$$

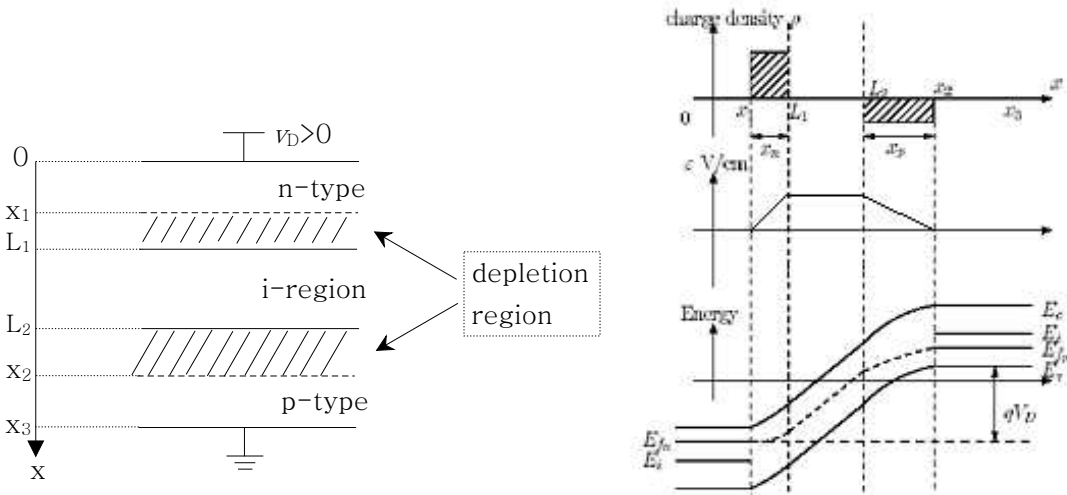
다. Photocurrent 계산

Photocurrent는 Photodiode에 방사선이 입사하여 생성되는 전류로써, 정상적 조건하에서 역전압에 의한 Photocurrent는 다음 식으로 주어진다.

$$j_{ph} = j_{ph}^{sc} + (j_{ph}^p + j_{ph}^i + j_{ph}^n) + j_{ph}^{th}$$

첫 번째 항 j_{ph} 은 방사선에 의해서 Space charge region (i-layer)에 생성된 캐리어

에 의한 드리프트 전류밀도이고 두 번째 항인 $(j_{ph}^p + j_{ph}^i + j_{ph}^n)$ 은 반도체 벌크내의 공핍층 외부와 역전압으로 바이어스된 접합으로 확산되는 캐리어에 의한 확산 전류밀도이며, 마지막 항인 j_{ph}^{th} 은 열적으로 생성된 열전류밀도이다. [16] PIN Photodiode에서 생성된 총 전류는 열적으로 생성된 전류는 무시하고 p층 표면이 $1/a$ 보다 더 매우 얇다는 가정하에 유도될 수 있다. [17]



<그림 2-5. Depletion Approximation과 Energy-band diagram at reverse bias>

PIN photodiode 표면에 Photon flux F_0 [photon/cm² · s]인 단색광이 입사했다고 가정하면 깊이 x 에서 Carrier generation rate $G(x)$ 는 다음과 같다.

$$G(x) = \alpha F_0 e^{-\alpha x} \text{ [ph/cm}^3 \cdot \text{s]} \quad (\alpha : \text{흡수상수})$$

따라서 Space charge region에서 생성된 모든 Carrier가 모인다고 가정할 때 전류 밀도는 다음 식과 같이 표현되고,

$$j_{ph}^{sc} = qF_0(e^{-\alpha x_1} - e^{-\alpha L_1}) + qF_0(e^{-\alpha L_2} - e^{-\alpha x_2}) \text{ [A/cm}^2\text{]}$$

Quasi-neutral n-region에서 생성된 hole들 때문에 발생하는 확산(diffusion) 전류 밀도는 다음 식과 같다.

$$j_{ph}^p = -qD_p \frac{\partial p_n'(x)}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = \frac{qF_0}{\alpha x_1} (1 - (\alpha x_1 + 1)e^{-\alpha x_1})$$

Quasi-neutral p-region에서 생성된 전자들 때문에 발생하는 확산(diffusion) 전류 밀도는 다음과 같고,

$$j_{ph}^n = \frac{qF_0}{\alpha(x_3 - x_2)} (\alpha(x_3 - x_2) - 1)e^{-\alpha x_2} + e^{-\alpha x_3}$$

마지막으로 i-region 내에 흐르는 전류 밀도는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$j_{ph}^i = qF_0 (e^{-\alpha L_1} - e^{-\alpha L_2}) \text{ [A/cm}^2\text{]}$$

이처럼 위의 계산식에서 볼 수 있는 것처럼 Photocurrent는 F_0 , 즉 입사되는 Photon의 양에 비례하고, 흡수계수(α)와 파장(λ)에는 비선형 특성을 가짐을 알 수 있다.

라. *Dark current*

Photodiode는 입사광 에너지에 의해서 발생하는 광전류 외에 입사광에 의하지 않는 소위 암전류(dark current)가 존재한다. 이것은 신호에 대해 잡음로서 다루어짐을 알 수 있는데 그 값이 매우 중요한 것으로서, 이것은 신호 (Signal)에 대한 잡음 (Noise)이며, 일반적으로는 S/N비로 생각할 수 있다. 또 이 영향은 미약한 입사광일수록 현저하게 나타나며 그 패해도 크게 된다.

따라서 그 값은 작을수록 좋지만 현실적으로는 그 값을 무시할 수는 없다. Dark current는 Diffusion current, Surface leakage current 그리고 Bulk generation current의 합이다. Surface current는 p⁺-layer를 싸고 있는 보호막으로 줄일 수 있고 Highly doped depleted photodiode는 Diffusion current를 무시할 수 있다. 따라서 전체 Reverse current는 주로 Bulk generation current에 의해 결정된다.

Bulk defects에 의해 발생하는 Dark current density는 다음 세 가지로 구분된다.[17]

1) quasi-neutral n-region에서 발산되는 carrier에 의한 current density j_{dc}^n

$$j_{dc}^n = qD_n \frac{n_i^2}{N_a(x_3 - x_2)}$$

2) quasi-neutral p-region에서 발산되는 carrier에 의한 current density j_{dc}^p

$$j_{dc}^p = qD_p \frac{n_i^2}{N_d x_1}$$

3) space charge region에서 발생하는 current density j_{dc}^{sc}

$$j_{dc}^{sc} \approx \frac{qn_i}{2} \left(\frac{x_n}{\tau_p} + \frac{x_p}{\tau_n} \right) \quad (\tau_p, \tau_n \text{ 은 excess carrier의 수명})$$

이처럼 Dark current는 Intrinsic carrier concentration n_i^2 에 비례하고, n_i 는 $T^{1.5} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ 에 비례한다. 따라서, Dark current는 온도(T)가 증가함에 따라 크게 증가한다. 또한 i_{dc}^{sc} 가 dark current의 가장 큰 부분을 차지하므로 다음과 같은 특성이 있다.

- 1) τ 가 N에 반비례하므로, doping 농도가 증가함에 따라 증가한다.
- 2) Depletion width를 줄이면 감소한다. 따라서 역방향 전압을 줄이면 Dark current를 줄일 수 있지만, i_{ph} 도 줄어드는 것이 문제이다.
- 3) 위에서 계산한 i_{dc}^{sc} 는 낮은 전기장을 가정한 결과이지만, 전기장이 더 높아지면 역방향 전압이 높아짐에 따라 Dark current가 훨씬 더 빨리 증가한다.

마. Spectral Response

Spectral response $\eta(\lambda)$ 는 파장의 함수로서, 입사되는 전체 Photon flux에서 어느 정도의 비율이 Photocurrent의 생성에 관여하는지를 나타내는 척도이다. [15]

위에서 유도한 photocurrent 식을 사용하여 Spectral response $\eta(\lambda)$ 을 구할 수 있다.

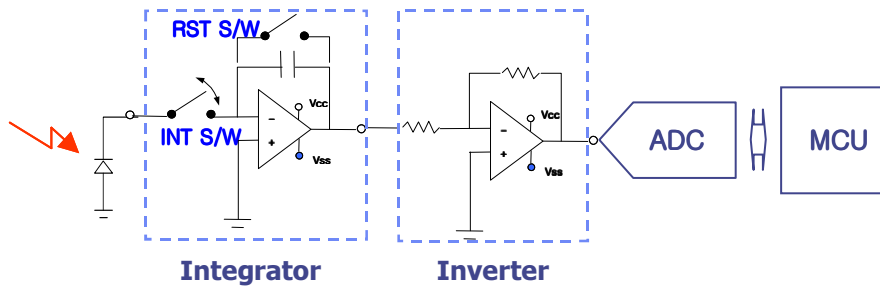
$$\eta(\lambda) = \frac{j_{ph}}{qF_0} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{(1 - e^{-\alpha x_1})}{x_1} - \frac{(e^{-\alpha x_2} - e^{-\alpha x_3})}{(x_3 - x_2)} \right) \text{ electron/photons}$$

이는 위에서 가정한 것들 이외에도 여러 항목들을 무시하고 얻은 결과이다.

- 1) 칩 표면에서의 반사
- 2) photodetector 위에 있는 층에서의 반사와 흡수
- 3) photodetector 면적에 대한 j_{ph} 의 변화 (edge effect)

제4절 신호처리회로

신호처리회로는 X-ray에 의해 센서 (Scintillator + Photodiode)에서 출력되는 전류신호를 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. 본 연구에서는 Integration Mode을 이용하여 출력되는 신호를 검출하였기에 Count Mode에 대한 설명을 생략하였다.

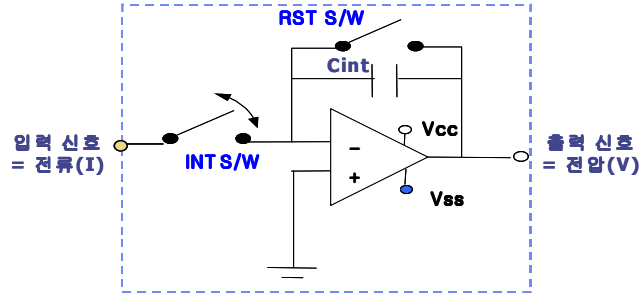


<그림 2-6. Integration Mode 신호처리회로 Diagram>

Integration Mode의 신호처리 회로는 <그림 2-6>와 같이 Photodiode에서 출력 되는 신호인 전류를 전압으로 변환시켜주는 Integrator와 입력된 신호를 반전하여 출력하는 기능을 가지는 Inverter, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC (Analog to Digital Converter), 각 채널의 신호, 데이터를 처리 및 통신하는 기능을 수행하는 MCU (Main Control Unit)로 구성된다.

1. Integration Amplifier의 동작

INT S/W가 "ON" 동작하여 Integration Time동안 입력 신호인 전류가 C_{int}에 충전시킨다. INT S/W를 "OFF"하여 C_{int}에 충전된 전압의 크기가 입력 신호를 세기를 나타낸다. RST S/W를 "ON"하면 C_{int}에 충전된 전하를 방전한다.



<그림 2-7. Integrator 회로도>

출력 전압은 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$V_{OUT} = \frac{-1}{C_{INT}} \int_0^t I_{IN} dt$$

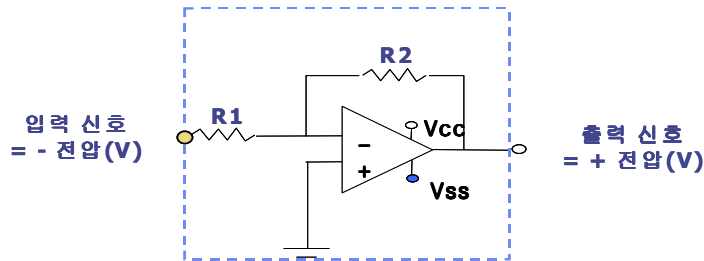
V_{OUT} = output voltage of op amp

C_{INT} = integration capacitor

I_{IN} = sensor current

2. Invertor의 동작

입력신호를 반전 하여 출력 하는 기능으로써 입력 신호가 Negative 신호이면 출력 신호를 Positive 신호로 출력 한다.



<그림 2-8. Invertor 회로도>

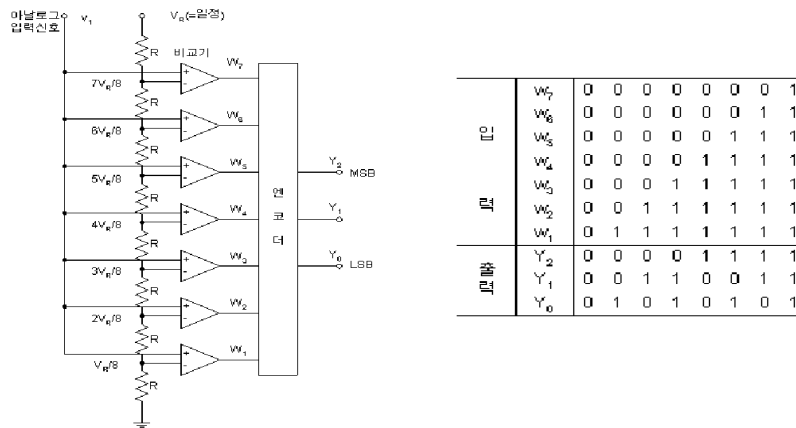
출력 전압은 입력 신호와 Gain인 R2/R1의 관계식에 의해 결정된다.

$$V_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} V_{IN}$$

$$R_{IN} = R_1$$

3. ADC의 동작

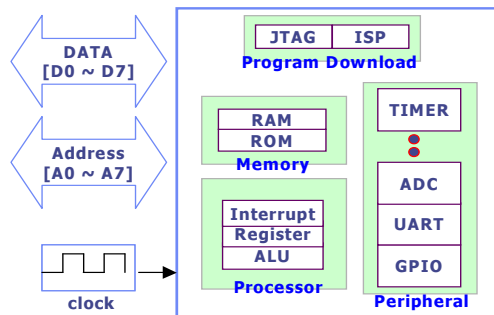
아날로그 입력 신호를 디지털 신호로 출력한다. <그림 2-10>과 같이 병렬 비교형 구조인 경우 아날로그 입력 신호와 기준 전압의 크기를 비교기를 통해 비교하여 출력한 후 엔코더를 통해 디지털 데이터로 출력되어진다, 출력 디지털 bit의 크기에 의해 ADC 분해능 사양이 결정된다.



<그림 2-9. ADC Block diagram 및 Digital 출력 형태>

4. MCU의 동작

작성된 운영 프로그램에 따라 포터를 통해 디지털 데이터를 수신하여 연산 및 데이터 처리하며 외부 인터페이스를 통해 제어 하는 기능을 한다.



<그림 2-10. MCU Block Diagram>

제3장 *Detector Module* 설계 및 제작

제1절 *X-ray* 선원

일반적으로 의료분야에서의 *X-ray* 선원은 인체를 대상으로 하기 때문에 환자의 피폭 최소화와 안전을 고려한 저에너지, 저선량의 *X-ray* 선원을 사용한다. 하지만 공항 및 항만 등의 승객의 물품이나 화물을 검사하는 검색 시스템에서는 검색하는 물품의 밀도 및 두께가 상대적으로 두꺼워 의료용으로 사용되는 *X-ray*의 선원을 가지고는 검색이 불가능하기 때문에 고에너지, 고선량의 *X-ray* 선원이 요구된다.

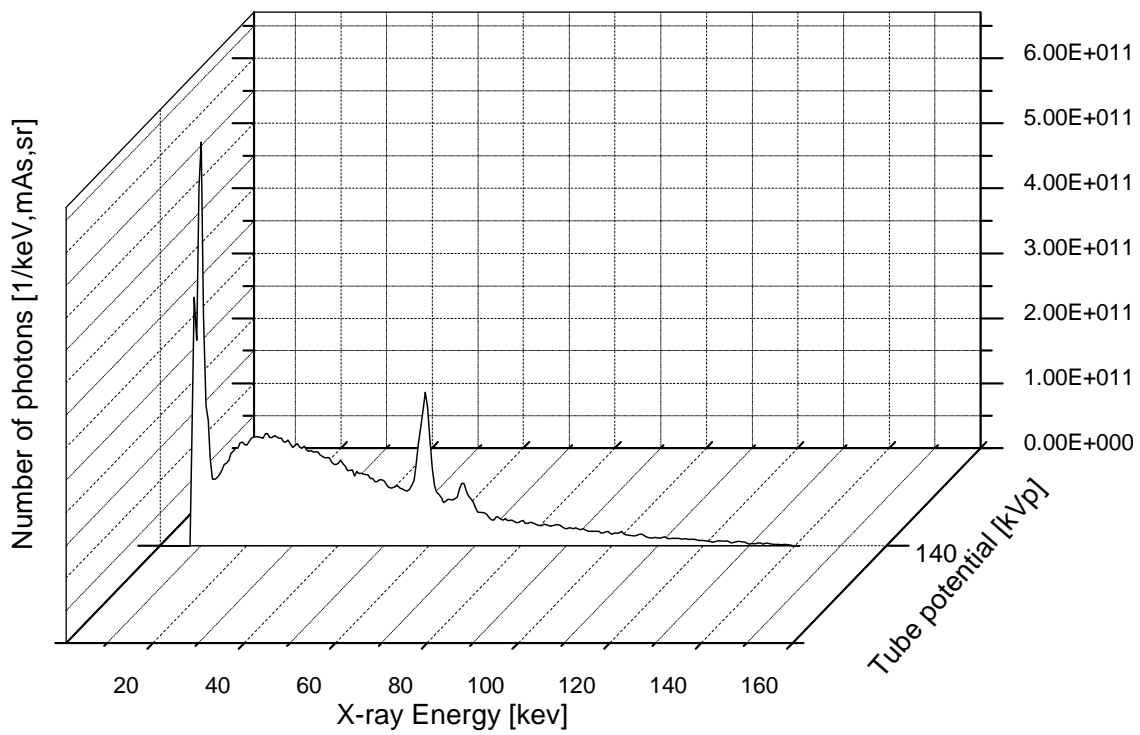
따라서 본 연구에서는 공항 및 항만의 Baggage Inspection System (BIS)에 적용되고 있는 산업용 *X-ray* (140 kVp, 1mA) 사양과 동일한 조건을 설정하기 위해 전남공업고등학교 (광주 소재)에 비치되어 있는 SMART 200 E (ANDREX, Denmark) *X-ray* tube 및 스펙트럼을 이용하여 실험 및 Simulation을 수행하였으며, 그 세부적인 사양과 스펙트럼은 <표 3-1>과 <그림 3-2>과 같다. [18] [19]



<그림 3-1. 실험에 사용된 산업용 *X-ray* tube>

<표 3-1. X-ray tube의 세부 사양>

구분	사양	비고
Model	SMART 200 E (ANDREX)	제조국 : Denmark
Anode voltage	60 - 200 kVp	
Target current	0.5 - 4.5 mA	
Focal spot	1.6 mm	IEC 336
Beam angle	40° × 40°	
Filter	3 mm Al	

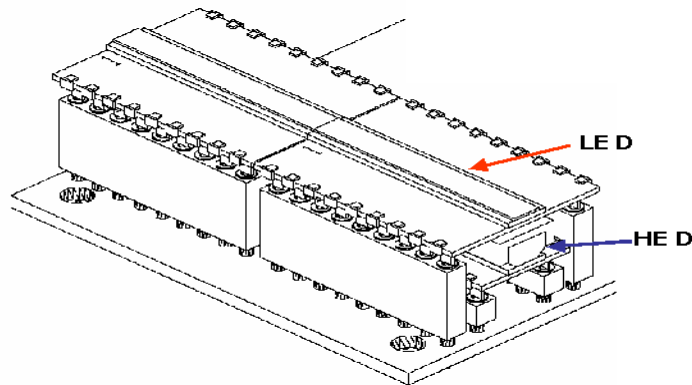


<그림 3-2. Simulation에 사용된 X-ray 스펙트럼 @ 1 mAs>

제2절 섬광체 및 검출기 설계

Dual-Energy X-ray Imaging 시스템은 단일 조사로 동일한 검사체를 통과한 X-ray를 <그림 3-3>과 같은 Sandwich 구조의 고에너지 검출기 (HED)와 저에너지 검출기 (LED)로 검출하여 영상을 획득하므로 각각 특성이 다른 두 종류의 검출기가 설계·제작되어야 한다. [20] 즉, 저에너지 X-ray는 LED의 섬광체에 모두 흡수되어 LED에 검출되고 고에너지 X-ray는 HED의 섬광체에 모두 흡수되어 HED에 검출되도록 설계되는 것이 이상적인 구조라 할 수 있으며, 이러한 저에너지 및 고에너지 검출 특성을 고려하여 섬광체의 종류가 선정되어야 한다. 또한 저에너지가 고에너지 검출기에 흡수되는 것을 최소화하기 위하여 HED의 섬광체 위에 부착되는 필터 두께의 최적화도 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 현재 상용화되고 있는 DT (Detection Technology) 社의 섬광체 조합을 기준으로 상대적으로 가격이 저렴하고 Light yield 측면에서도 성능이 비슷한 Lanex Regular, Lanex Fast B와 국내 (KAIST)에서 연구·개발된 Ceramic Scintillator를 선정하여 저에너지와 고에너지 분리가 가능한 구리 필터의 두께를 MCNP Code를 이용하여 Simulation 하였다.



<그림 3-3. 저에너지 검출기 (LED)와 고에너지 검출기 (HED)의 구조>

1. 섬광체 선정 및 조합

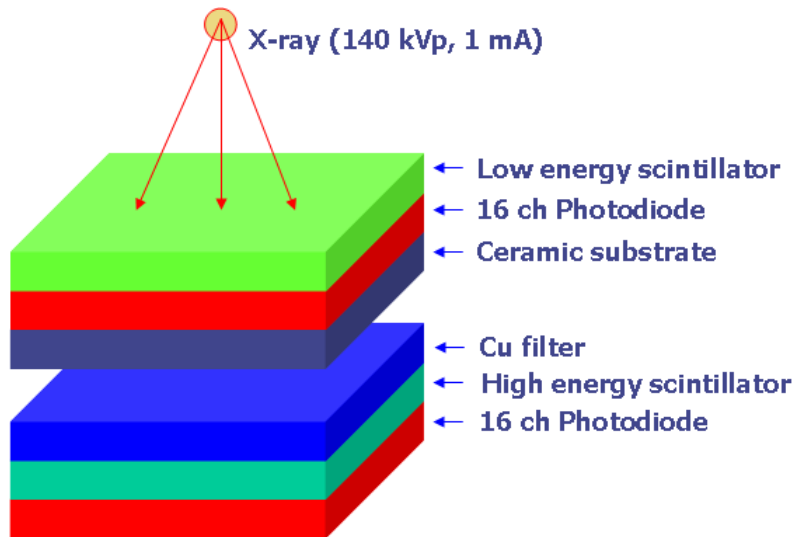
섬광체는 구성 물질의 물성에 따라 각 장·단점이 있어 사용 목적 및 적용 분야에 따라 여러 가지 종류가 쓰이지만 본 연구에서는 현재 상용화된 DT1, DT2를 기준으로 KAIST에서 개발 중인 섬광체 조합 (KAIST)과 본 연구에서 제안된 조합의 섬광체 (IDEA1)를 선정하여 LED 및 HED에 대해 섬광체 및 검출기 구조를 대상으로 비교 및 분석을 수행하였다. <표 3-2>는 상용화 및 개발 중인 LED 및 HED와 본 연구에서 고려된 LED 및 HED에 대한 섬광체 조합 및 특성을 요약하였다.

<표 3-2. 섬광체 조합 및 특성>

구분	섬광체	Density (g/cm ³)	Thickness (mm)	Wavelength (nm)	Refractive Index	Light yield (#/MeV)
DT1	LED Lanex Regular	7.34	0.0913	545	2.20	22,400
	HED CsI(Tl)	4.51	3.0	560	1.79	55,000
DT2	LED Lanex Fast B	7.34	0.1826	545	2.20	22,400
	HED CsI(Tl)	4.51	3.0	560	1.79	55,000
KAIST	LED Lanex Regular	7.34	0.0913	545	2.20	22,400
	HED Ceramic Scint.	5.92	1.3	610	1.95	20,000
IDEA1	LED Lanex Regular	7.34	0.0913	545	2.20	22,400
	HED Lanex Fast B	7.34	0.1826	545	2.20	22,400

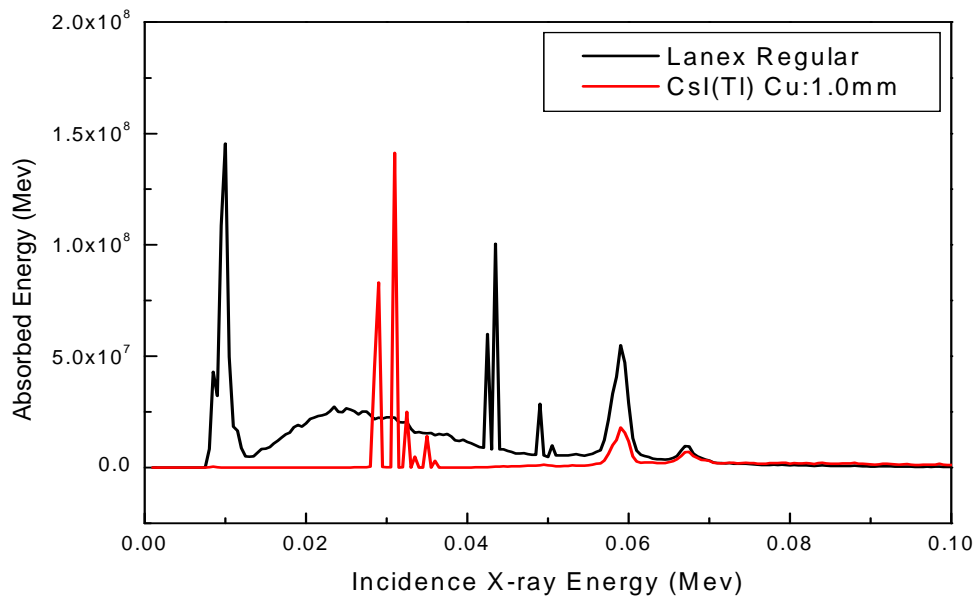
2. 섬광체 및 LED/HED 설계

각 섬광체 조합별로 <그림 3-4>과 같은 구조를 구성하여 구리 필터의 두께를 변화시키면서 140 kVp의 관전압과 1mA의 관전류를 갖는 X-ray가 각 섬광체에 흡수되는 에너지를 MCNP를 이용하여 Simulation하였다.

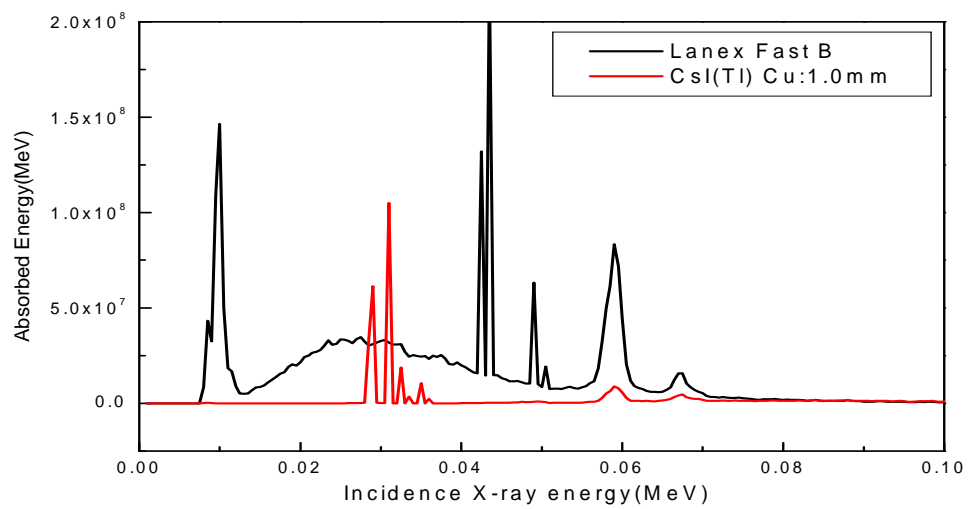


<그림 3-4. MCNP Simulation을 위한 검출기 모듈의 구조>

먼저 현재 상용화되어 시판되고 있는 DT社의 LED 및 HED에 대해 MCNP Simulation에 의한 각각의 검출기에 흡수되는 에너지 (Absorbed Energy)를 분석하였다. <그림 3-5>는 Lanex Regular와 CsI(Tl)의 조합을 갖는 DT1에 대한 흡수되는 에너지 결과이며, <그림 3-6>은 Lanex Fast B와 CsI(Tl)의 조합을 갖는 DT2에 대한 흡수되는 에너지 결과이다.



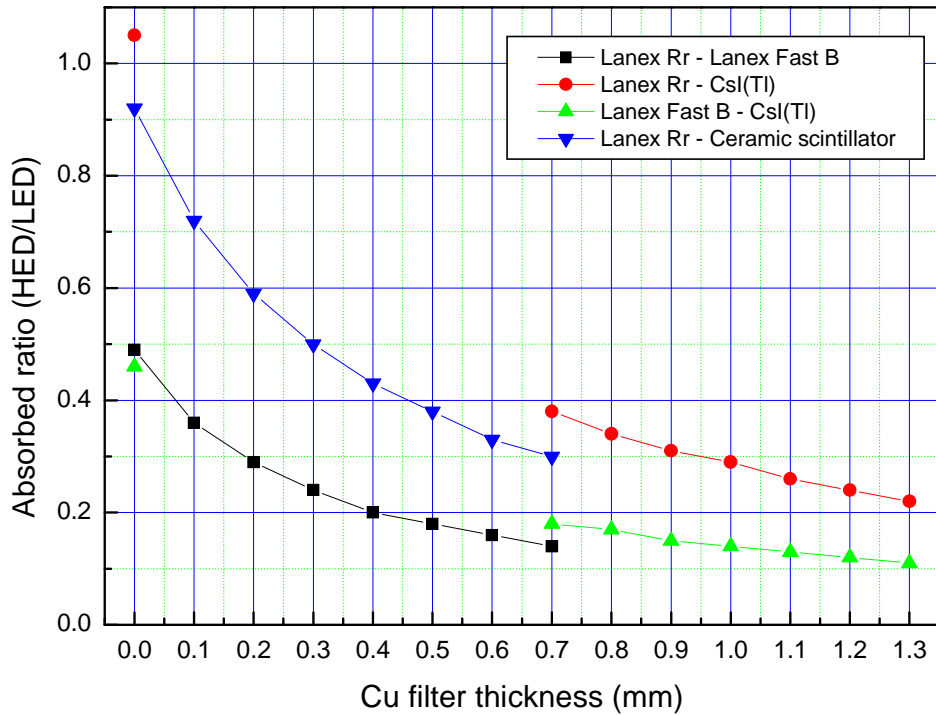
<그림 3-5. DT1의 Lanex Regular와 CsI(Tl)에 흡수되는 에너지>



<그림 3-6. DT2의 Lanex Fast B와 CsI(Tl)에 흡수되는 에너지>

일반적으로 LED 및 HED의 단일 X-ray 에너지 스펙트럼 분리 정도는 LED에 흡수되는 저에너지 영역에서의 흡수에너지와 HED에 흡수되는 고에너지 영역에서의 흡수에너지 비 (Absorbed Energy Ratio; HED/LED)를 기준으로 LED와 HED의 성능을 예측한다. 이때 Absorbed Energy Ratio; HED/LED의 값이 적을수록 단일 X-ray 에너지에 대한 저에너지 영역의 스펙트럼과 고에너지 스펙트럼과의 차 (Difference)가 커지게 되어 궁극적으로 이중 에너지를 조사해주는 효과를 얻게 된다.

따라서 DT사의 HED에 사용되는 Cu 필터 두께가 1 mm로 고정되어 있기 때문에 이 필터 두께에서 LED 및 HED의 흡수에너지를 구한 후 이 기준치를 바탕으로 각각의 LED 및 HED 조합상의 흡수에너지비 (Absorbed Energy Ratio; HED/LED)를 비교 분석하였다. <그림 3-7>은 <표 3-2. 섬광체 조합 및 특성>에서 언급된 각 LED 및 HED에서 사용된 섬광체 조합별 구리 필터 두께에 따른 Absorbed ratio 결과이다.



<그림 3-7. 섬광체 조합별 구리 필터 두께에 따른 Absorbed ratio>

<그림 3-7>과 같이 상용화된 DT社의 DT1과 DT2의 구리 필터 두께 1 mm에서 LED 및 HED의 흡수에너지비는 각각 0.3과 0.15를 나타냈으며, KAIST의 조합에서는 DT1을 기준으로 할 때 HED에서 사용되는 필터 두께는 0.7 mm, DT2를 기준으로 할 때는 1 mm 이상으로 나타났으며, 본 연구에서 제안한 IDEA1의 조합에서는 DT1을 기준으로 할 때 필터 두께는 0.2 mm, DT2를 기준으로 할 때는 0.7 mm인 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제안하는 섬광체 조합의 검출기 모듈에서 HED의 구리 필터 두께가 0.7 mm 이상일 때 저에너지와 고에너지 분리가 가능한 것으로 예측되었으며, 이를 바탕으로 X-ray 특성 실험을 수행하였다.

제3절 PIN Photodiode 설계

1. PIN Photodiode Simulation

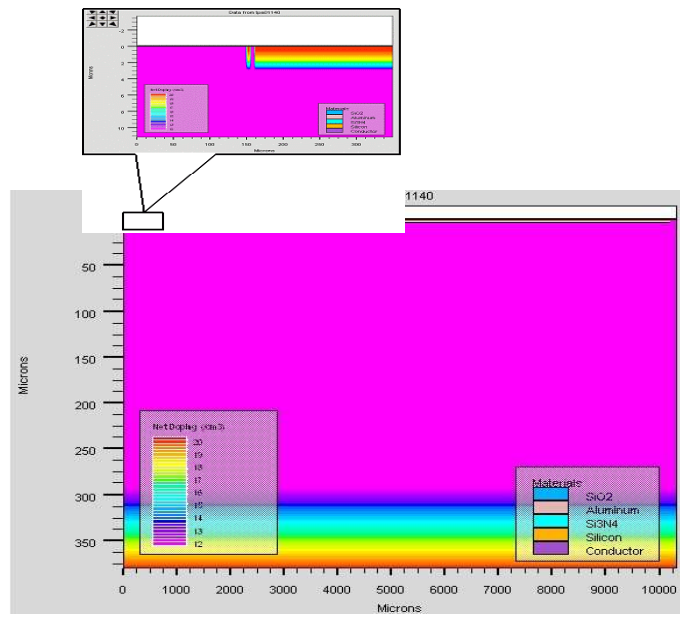
PIN Photodiode는 P-layer, I-layer, N-layer로 구성되며, 그중 Photodiode의 Sensitivity와 Quantum Efficiency가 가장 큰 영향을 미치는 변수는 P-layer의 두께이다. 빛의 Sensitivity 관점에서 보면 P-layer의 두께는 얇을수록 유리하지만 P-layer가 얇아짐에 따라 Potential barrier height가 낮아서 Reverse current가 증가하고 또한 Noise도 증가하여 결국 SNR (Signal to Noise Ratio)이 감소하게 된다.

따라서 Sensitivity와 Noise 사이의 Trade-off를 고려해야 한다. 본 연구에서는 P-layer, I-layer가 Sensitivity와 Reverse current에 미치는 영향을 분석하기 위해 ETRI (전자정보통신연구원) 공정의 Fab Parameter를 바탕으로 Silvaco社의 Structure Simulator인 Athena를 이용하여 Photodiode의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 P+ layer의 두께 및 Doping profile을 구하고 Device Simulation Code인 ATLAS를 이용하여 Photodiode Characteristic Simulation을 수행하였다.

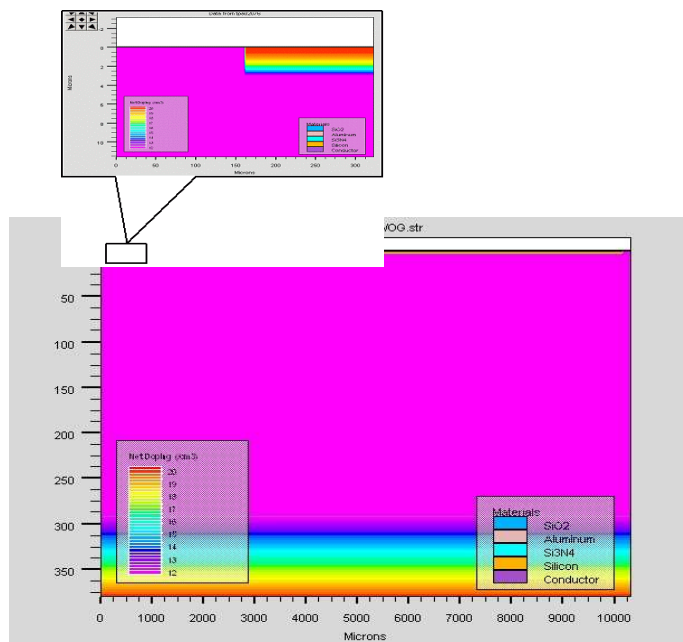
<표 3-3. Simulation Parameters>

Conversion method	Orientation	Thickness (μm)	Doping concentration		
			P+ (Active, Guard)	Intrinsic	N+ (Active)
Indirect	<100>	380	$1.5 \times E15/\text{cm}^3$	$6.11 \times E11/\text{cm}^3$	$1E20 \sim 1E21/\text{cm}^3$

PIN Photodiode의 경우 Guardring의 유·무에 따른 각각의 성능을 비교하기 위해 Guardring이 있는 경우 $1,509 \times 380 \mu\text{m}$ 의 Wafer에 $1,400 \mu\text{m}$ 의 p+ Active를 도핑하고 그 옆에 $4 \mu\text{m}$ 폭의 p+ Guardring을 도핑하여 Simulation을 수행하였다.

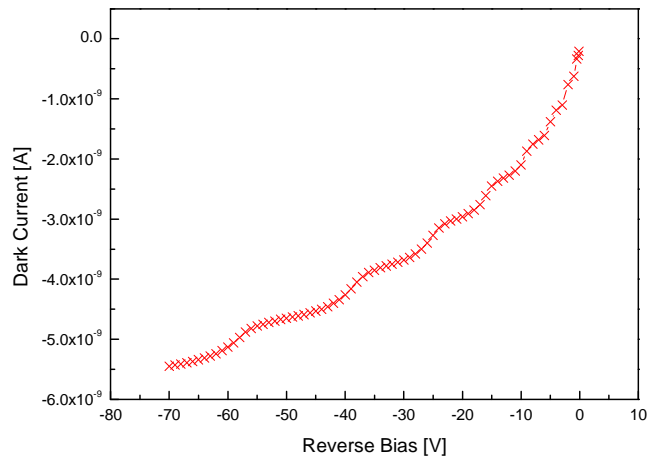


<그림 3-8. Atlas Simulation Structure with Guardring

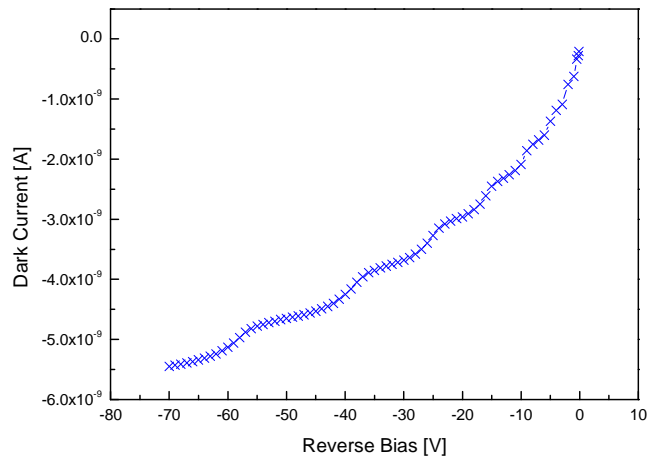


<그림 3-9. Atlas Simulation Structure without Guardring>

Simulation 결과 Guardring의 유·무에 따른 PIN Photodiode에서의 Dark current는 Guardring이 있는 PIN Photodiode에서 약간 낮게 계산되었다. 따라서 Guardring이 있을 때 낮은 노이즈를 생성함으로써 높은 SNR (Signal to Noise Ratio)을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

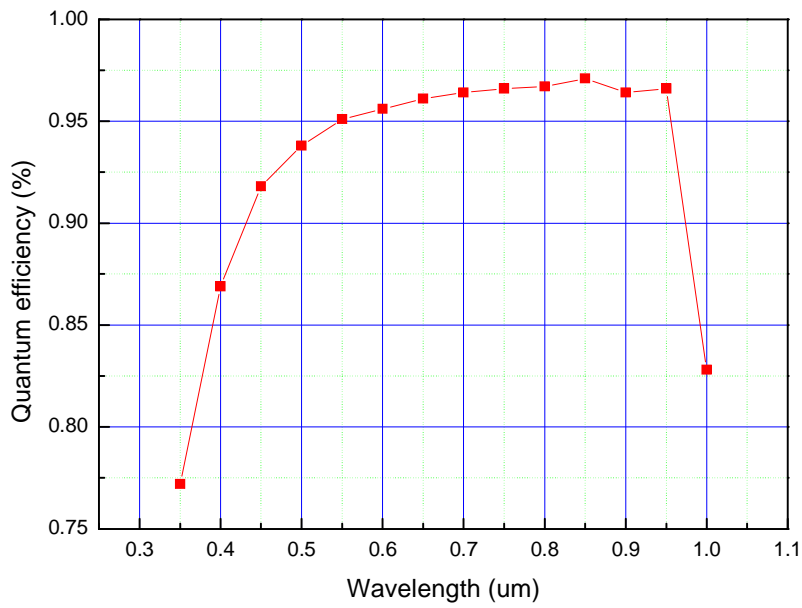


<그림 3-10. Dark current with Guardring>



<그림 3-11. Dark current without Guardring>

Quantum Efficiency 경우 입사되는 빛의 광량과 이에 반응하여 생성되는 전하의 양을 비교하는 것으로써 Guardring의 유·무와는 무관하며 입사되는 Wave-length에 따라 Quantum Efficiency가 다르게 계산되었다. 예를 들어 섬광체 조합 중 파장이 가장 짧은 CWO_4 (475 nm)와 파장이 가장 긴 Ceramic scintillator 및 $\text{ZnSe}(\text{Te})$ (610 nm)의 Quantum Efficiency는 약 93%와 96 %로써 파장이 길수록 Quantum Efficiency가 높게 나타남을 알 수 있었다.



<그림 3-12. Wave-length에 따른 Quantum Efficiency>

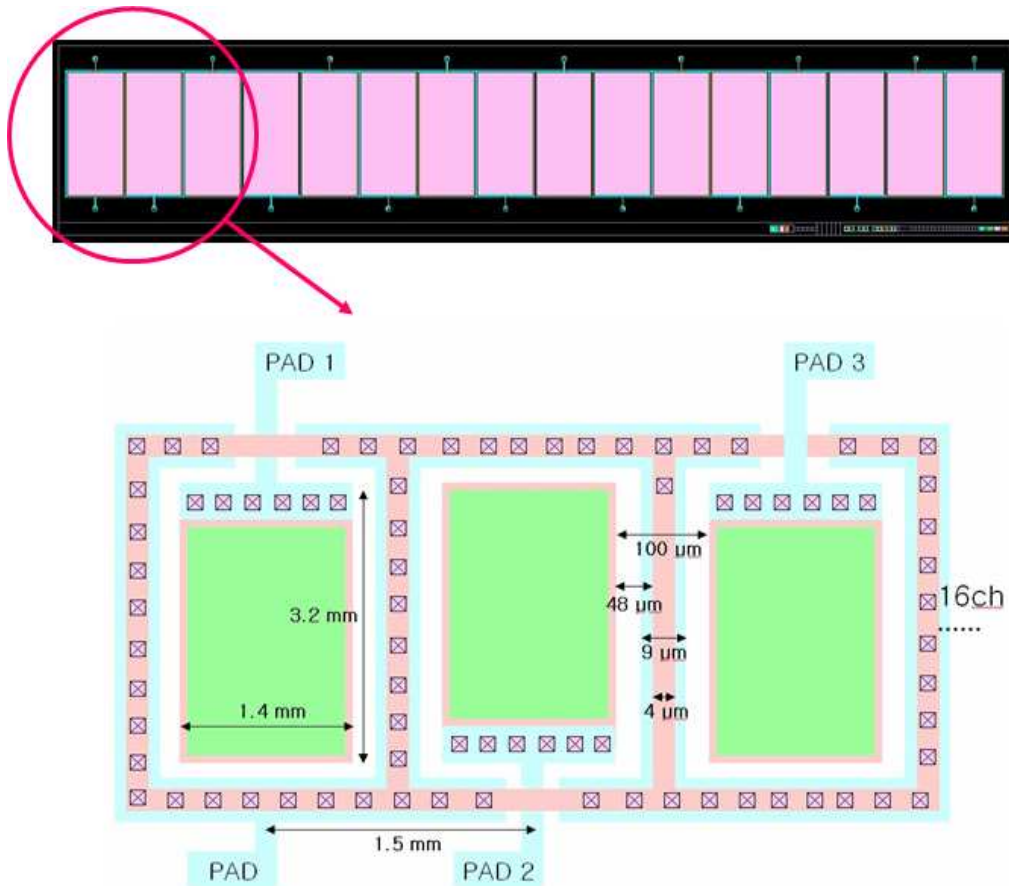
2. PIN Photodiode Layout

PIN Photodiode의 제작 공정에는 Stepper, Contact Aligner 등의 공정이 있으며, 기본적으로 어떤 공정을 선택하느냐에 따라 Layout Rule이 달라지기 때문에 Layout을 수행하기 전에 Photodiode 제작공정을 결정하여야 한다. 기존 Stepper 공정에서의 기본적인 Layout Rule은 Layer의 최소 Width, Spacing 및 Overlap Margin이 1 μm 이상이면 제작 가능한 공정으로 본 연구에서는 이러한 Stepper 공정의 기본 Rule을 적용하였으며 <표 3-4>와 같은 Layout data와 Cadence Tool을 이용하여 16 채널 PIN Photodiode Layout을 수행하였다.

<표 3-4. PIN Photodiode layout data>

구분	Layout data	비 고
Pixel size	1.5mm×3.2mm	16channel
P+ layer	1.4 mm × 3.2 mm	
Pixel pitch	1.5 mm	
Inter pixel gap	100 μm	
With Guard Ring	P+(pixel사이, 외부) - width : 4 μm	
P+ layer-P+ Guardring gap	48 μm	
AR Coating	Si_3N_4	
PAD	80 μm × 80 μm	
Contact	2 μm × 2 μm	
Metal layer	Width : 9 ~ 10 μm	

Layout에 사용된 Layer는 Narrow P+ active, P+, Guardring, AR, Contact, Metal 및 Pad로 총 5개의 Layer를 사용하였으며, <그림 3-13>과 같이 하나의 픽셀에 대한 Active layer의 크기는 1.4 x 3.2 mm, Pixel pitch는 1.5 mm로 Layout 하였다. 그리고 P+ Guardring의 폭은 4 μ m로 하고 Active layer와의 거리는 48 μ m로 하였으며, Packaging 시 Wiring의 편의성을 도모하기 위하여 Metal을 80 x 80 μ m로 Open 하였다.



<그림 3-13. 16-Channel PIN Photodiode Layout>

P+ active Layer는 PIN 포토다이오드의 제작에 사용되는 N-type wafer 위에 Boron 을 도핑하여 생성되는 Layer로서 포토다이오드에 PN junction을 만들어 공핍층을 생성시켜주는 역할을 하는 Layer이다. 본 연구에서 설계한 포토다이오드는 X-ray가 섬광체에 입사하여 생성되는 Photon을 검출하여 신호를 출력하는 간접방식 (indirect method)을 이용하는 것으로 포토다이오드는 섬광체에서 생성되는 짧은 파장의 빛이 공핍층에 도달할 수 있도록 포토다이오드 제작 공정상에서 P+를 얇게 도핑하였다.

P+ guardring은 포토다이오드의 Breakdown voltage를 증진시켜주는 역할과 Leakage current를 감소시켜주는 역할을 하는 Layer로서 Zero bias에서는 큰 의미가 없지만 Reverse bias를 걸어주는 구조에서는 포토다이오드의 특성을 크게 향상시킬 수 있어 Guardring 구조를 채택하고 Layout을 수행하였다.

또한 본 연구에서와 같은 섬광체에서 생성된 빛을 수광하여 신호를 출력하는 방식, 즉 간접방식을 이용하는 포토다이오드의 경우 섬광체에서 생성되는 빛이 Si 표면에 바로 입사하는 경우 입사되는 파장에 따라 약간 차이는 있지만 반사되는 양이 많아 실제 포토다이오드에서 출력되는 신호가 미약하게 된다. 따라서 반사되는 빛의 양을 줄여 포토다이오드에서 수광하는 빛의 양을 충분하게 하기 위하여 Anti-Refraction (AR) coating layer를 채택하여 Layout 하였다.

기타 Contact, Metal 및 Pad layer는 포토다이오드에서 출력되는 신호 및 Reverse bias를 걸어주기 위하여 Electronic circuit 및 외부전원과 포토다이오드의 전극을 연결시켜주기 위한 Layer 이다.

제4절 PIN Photodiode 및 검출기 모듈 제작

1. Wafer 및 Fab 공정 선정

ATLAS Simulation과 Cadence Tool을 이용하여 설계된 16 채널 PIN Photodiode는 국내 ETRI Fab의 Stepper 공정을 이용하여 제작하였다. 사용된 실리콘 기판은 <표 3-5>과 같이 두께가 380 um, 직경 5 inch, 저항 5 kΩcm, 격자방향이 <100>인 P형 실리콘 Wafer를 사용하였다.

<표 3-5. PIN Photodiode 제작에 사용된 Wafer 사양>

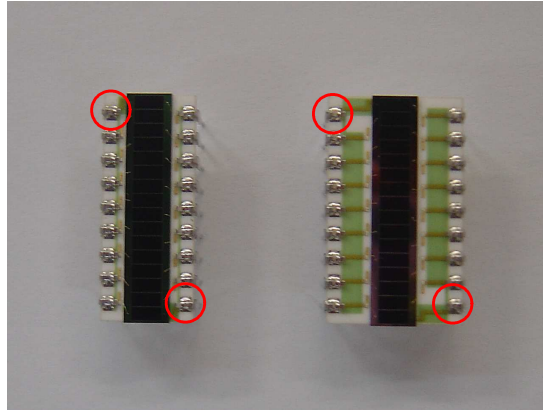
구 분	사 양	비 고
Type	N-type Si Wafer	
Orientation	Dir : <100>	
Size	5 inch	
Thickness	380 ± 10 μm	
Resistivity	5000 ~ 1,2000 Ω	
Grade	Prime	
Surface	DSP (Double Surface Polished)	

2. PIN Photodiode 제작

ETRI 공정에서 Fab-out된 Wafer 상태의 Photodiode가 Sawing에 의한 특성변화 (Leakage current 증가)를 최소한으로 하기위해 각 Photodiode 사이의 Gap를 고려하여 Sawing line을 결정하였다.

Sawing 과정을 거친 각각의 Photodiode는 LED, HED 형태의 Module로의 기능을 수행하기 위해 <그림 3-14>와 같이 HED와 LED의 공간적 배치를 고려하여 서로 다른 크기의 Ceramic substrate 위에 Photodiode를 Bonding하고, 16 채널 Photodiode의 각 Pixel에서 나오는 출력신호의 처리를 위한 전극을 Photodiode의 Metal Pad와 Ceramic substrate의 Pin에 Gold wire를 통해 형성시켰다.

16 채널 Photodiode의 총 18개의 Pad 중 양쪽 끝 Pixel에 위치한 Guardring Pad 2개를 제외한 16개 Pad에 Wiring을 하였으며, Ceramic substrate에 연결된 Pin 18 개중 양쪽 끝 대각선에 위치한 Pin은 Ground 역할을 하는 Common 단자로써 Photodiode bottom에 연결하였다.



<그림 3-14. Packaging 된 LED 및 HED 모듈>

3. 검출기 모듈 제작

제2절에서 설계된 섬광체 조합 중 Lanex Regular (LED) - Ceramic Scintillator (HED) 조합과 Lanex Regular (LED) -Lanex Fast B (HED) 조합을 선정하여, Ceramic substrate에 Packaging 된 Photodiode와 각각 광학 Coupling을 수행하여 광학적·X-ray 특성 실험을 위한 저에너지 검출기와 고에너지 검출기 모듈 (Detector 1, 2)을 제작 하였다.

Detector 1 (Lanex Regular (LED) - Ceramic Scintillator (HED))의 섬광체 Coupling은 LED의 경우 Film 형태인 Lanex Regular를 16 채널 PIN Photodiode의 Active Layer 크기 (24 mm × 3.2 mm)로 절단한 후 Epoxy (DEVCON-5minute fast drying epoxy)를 이용하여 Photodiode에 광학 Coupling하였고, HED의 경우 KAIST에서 Pixel 형태의 Ceramic Scintillator에 Reflector를 결합하여 Array 형태로 제작된 Ceramic Scintillator를 16 채널 Photodiode의 각 채널에 맞춰 Epoxy를 이용하여 광학

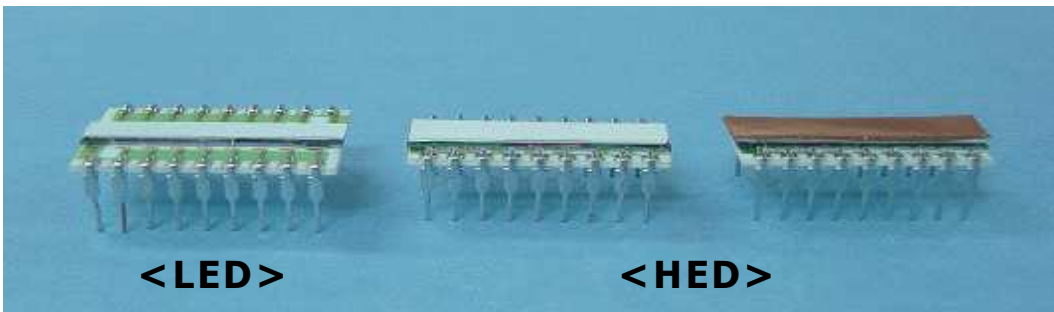
Coupling하였다.

Detector 2 (Lanex Regular (LED) -Lanex Fast B (HED))의 섬광체 Coupling은 Detector 1의 LED와 같은 방법으로 Film 형태의 Lanex Regular와 Lanex Fast B를 16 채널 PIN Photodiode의 Active Layer 크기 (24 mm × 3.2 mm)로 절단한 후 Epoxy (DEVCON-5minute fast drying epoxy)를 이용하여 Photodiode에 광학 Coupling하였다.

또한 고에너지 검출기 모듈에 도달하는 저에너지 X-ray의 차폐를 위해 사용되는 구리 필터 (0.1 ~ 1.0 mm (0.1 mm Step))를 제작하였다.



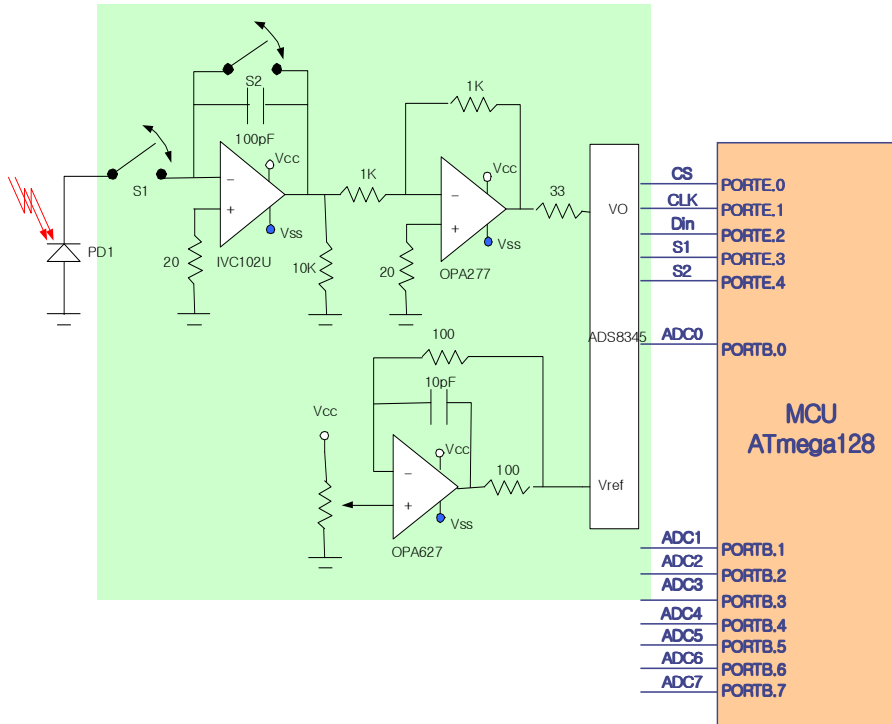
<그림 3-15. Lanex Regular (LED) - Ceramic Scintillator (HED) 조합 검출기 모듈>



<그림 3-16. Lanex Regular (LED) - Lanex Fast B (HED) 조합 검출기 모듈>

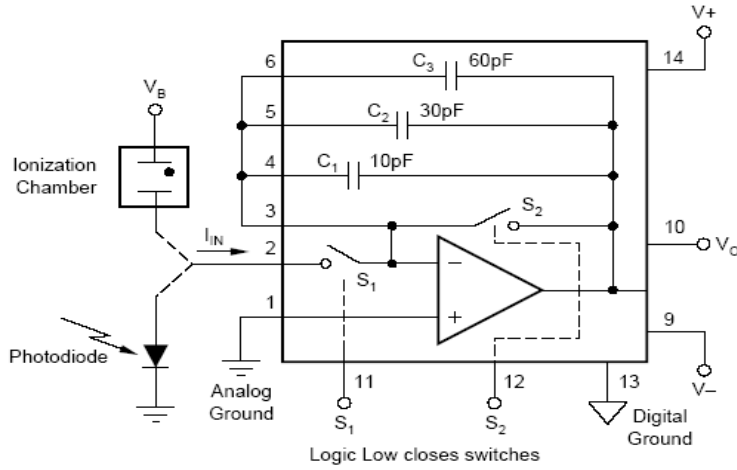
제4장 신호처리회로 실험용 보드

제3장에서 제작된 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈의 특성 및 성능을 테스트하기 위한 신호처리회로 실험용 보드는 IVC102U, OPA277, ADS8345, ATmega128 등의 제품으로 설계, 제작된 신호처리회로 실험용 보드를 사용하였다.



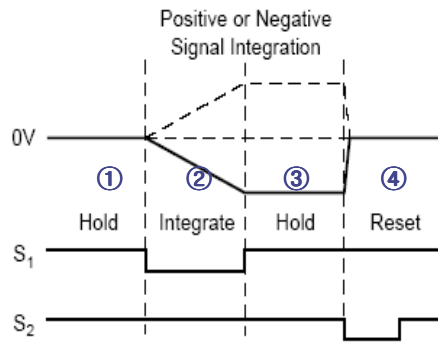
<그림 4-1. 신호처리회로 실험용 보드 블록도>

Integrator (IVC102U)의 피드백 캐패시턴스 값은 10, 30, 60 pF의 조합에 의해 가변 가능하다. 동작 원리는 S1, S2가 Integration switch와 Reset switch로 동작하여 사용되어 진다.



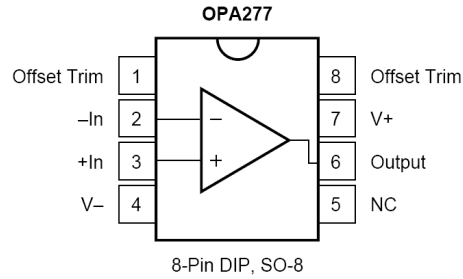
<그림 4-2. Integrator (IVC102U) 회로도>

초기에 S1, S2 가 “OFF”되어 캐패시터의 값이 HOLD되어 있고 S1이 ”ON” 구간동안 캐패시터에 충전이 된다. S1이 “OFF”되면 충전된 상태로 HOLD 되어 유지된다. S2가 ”ON”된 구간동안 캐패시터에 충전된 값이 방전된다.



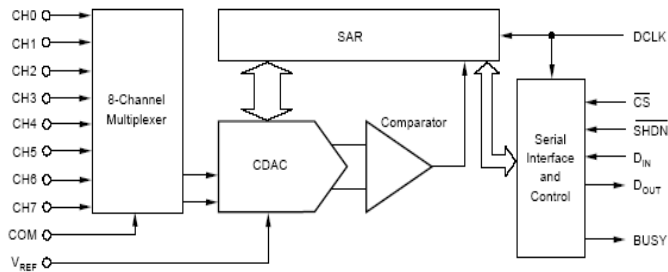
<그림 4-3. IVC102 타이밍도>

Invertor (OPA277)는 연산 증폭기(OP Amp) 하나를 내장 하고 있고 offset trimme 단자를 통해 offset 값을 조정한다.



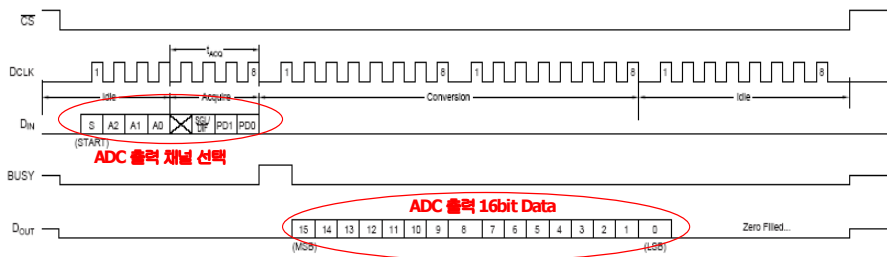
<그림 4-4. OPA277 내부 블럭도>

ADC (ADS8345)는 입력 채널이 8ch인 16bit ADC로써 시리얼 데이터 출력을 한다.



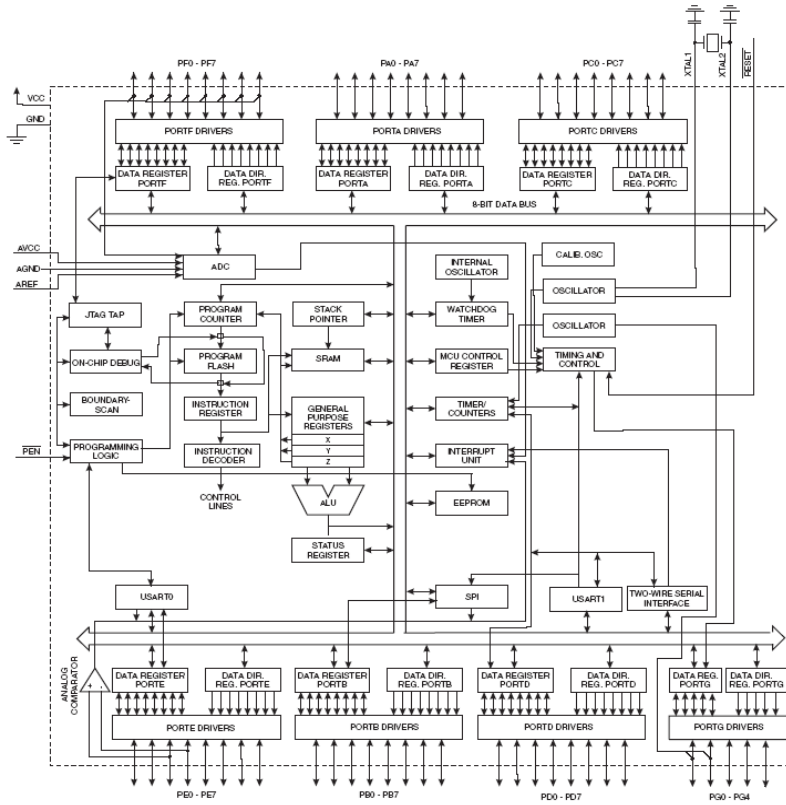
<그림 4-5. ADS8345 내부 블럭도>

Din 단자를 통해 A2~A0의 채널 선택 데이터를 송신 하면 Dout 단자를 통해 16bit ADC 데이터를 출력되어 진다.

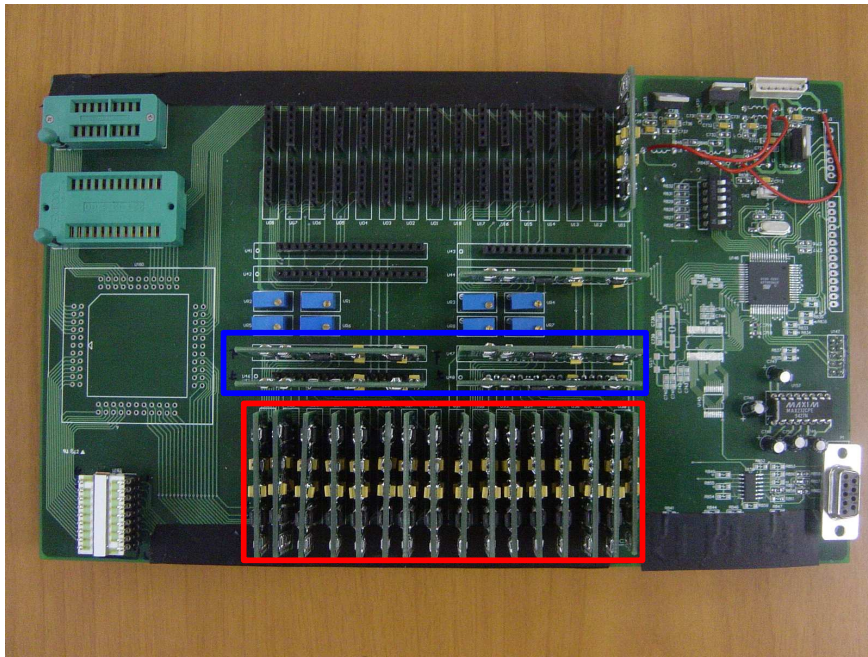
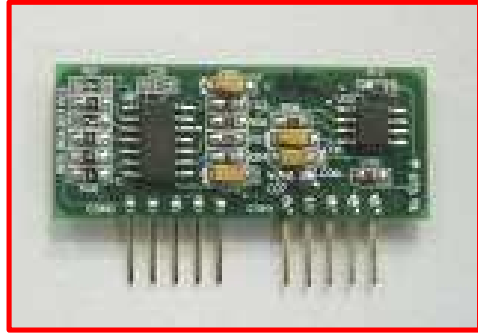


<그림 4-6. ADS8345 입/출력 데이터 타이밍도>

MCU (ATmega128)는 8bit MCU로써 내부에 Flash 메모리를 내장 하고 있어 동작 프로그램을 저장하여 운영 할 수 있다. JTAG 포터를 통해 프로그램 다운로드 및 디버깅이 가능하고 주변 기기로 UART기능을 내장 하고 있어 외부와 시리얼 통신을 한다.



<그림 4-7. MCU (ATmega128) 내부 블럭도>



<그림 4-8. 제작된 신호처리회로 테스트 보드>

제5장 성능 및 특성 실험

제1절 PIN Photodiode I-V 특성 실험

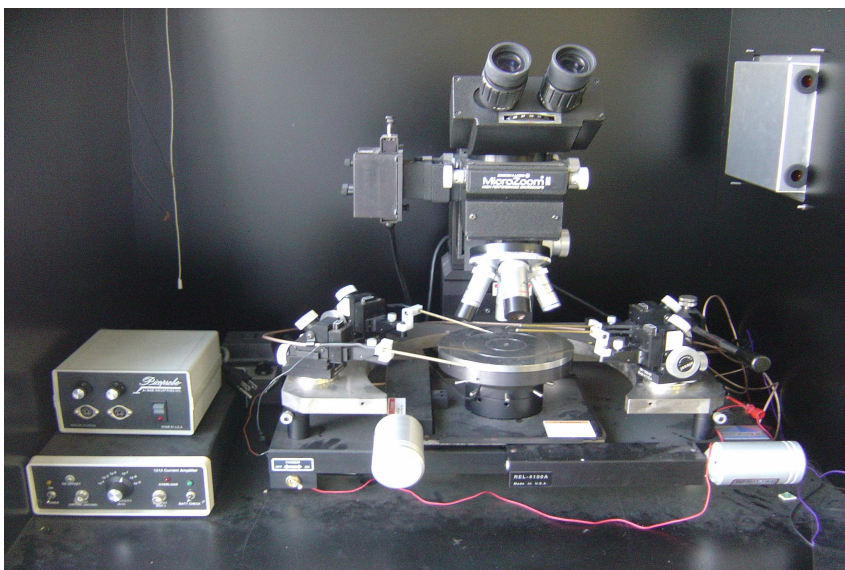
1. 실험 방법 및 조건

ETRI에서 공정을 마친 Wafer 상태의 Photodiode 중 4개의 Module을 Random Sampling하여 Leakage current를 ETRI 측에서 차체 측정한 결과 0.1 ~ 0.5 pA로 측정되었으며 16 채널에 대해서는 $\pm 5\%$ 의 Non-uniformity 보였다.

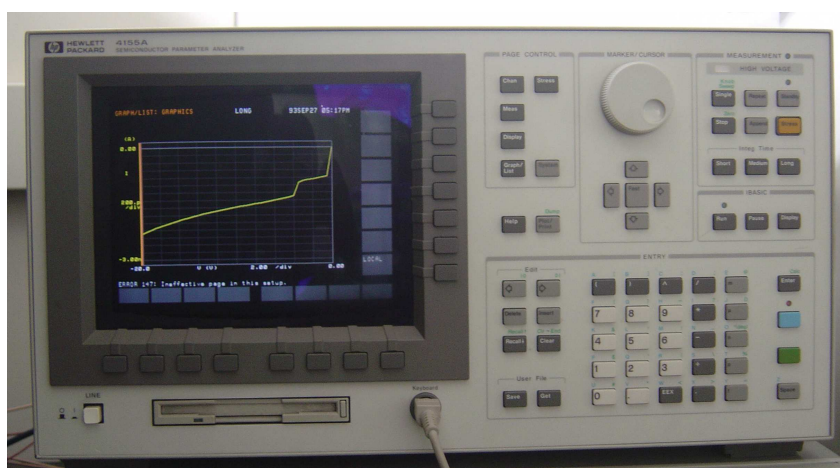
Wafer 상태의 Photodiode를 Sawing, Wiring 및 Packaging, 섬광채 Coupling 등의 가공 단계에 따른 Dark 상태에서 Leakage current 측정은 한국과학기술원 원자핵공학과에 비치된 Probe Station과 Semiconductor Parameter Analyzer를 이용하여 <표 5-1>와 같은 실험 조건에서 수행하였다.

<표 5-1. Leakage current 측정 실험 장비 및 조건>

구분	조 건	비고
장비	- Probe Station - Semiconductor Parameter Analyzer (HP-4145A)	KAIST
인가전압	0 ~ -20 V	-0.5 V step
Delay time	200 msec	
온도	상온	



<그림 5-1. Probe Station System>

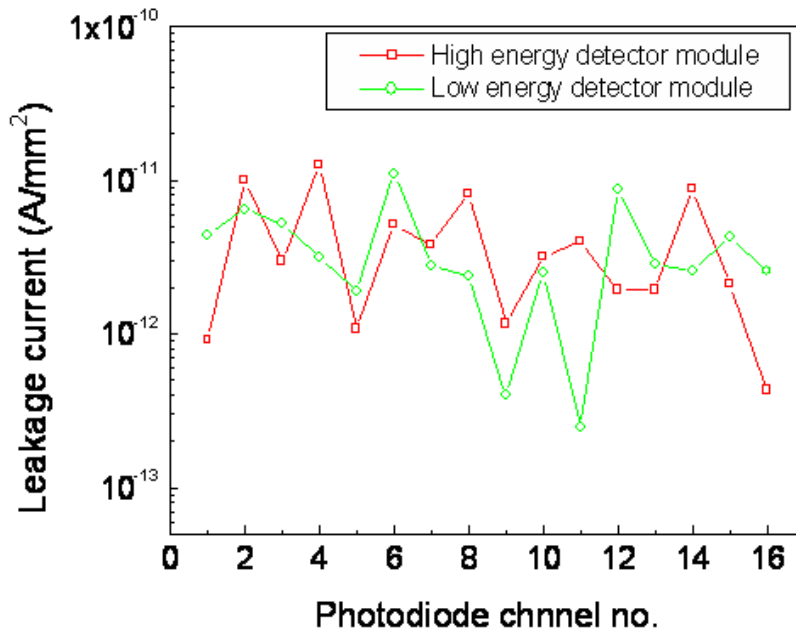


<그림 5-2. Semiconductor Parameter Analyzer-HP 4155A>

2. 실험 결과

가. Packaging 후 Leakage current

Ceramic substrate위에 Sawing을 완료한 16 채널 PIN Photodiode을 Bonding 및 Wiring을 수행하고 Packaging을 완료한 Photodiode module에 대하여 저에너지 검출기 및 고에너지 검출기 모듈 각 10개씩을 Random Sampling하여 Zero bias에서의 Leakage current를 측정 한 결과 <그림 5-3>와 같이 0.2 ~ 10 pA 범위 값을 보였으며, 이는 현재 상용되고 있는 DT社의 16 채널 PIN Photodiode의 Leakage current Range인 수십 pA 보다 우수한 성능을 보였다.

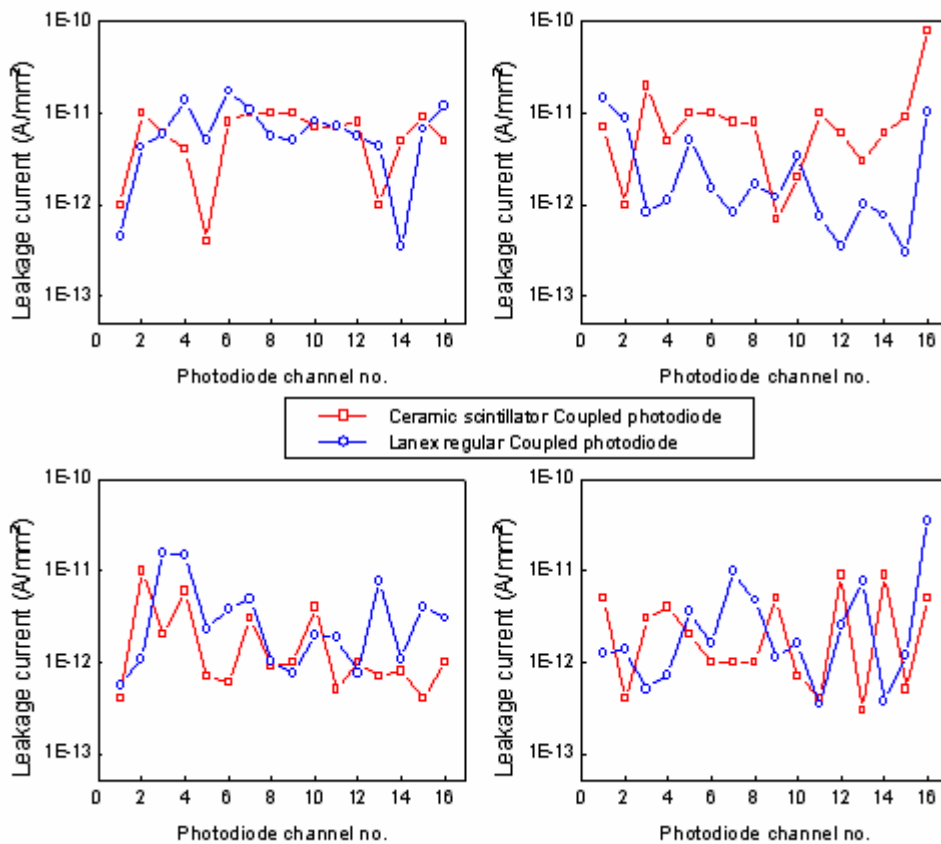


<그림 5-3. Ceramic substrate packaging 후 측정된 Leakage current>

나. 섬광체 Coupling 후 Leakage current

Ceramic substrate에 Packaging을 완료한 Photodiode 위에 Low energy용으로 Lanex-Regular를 Coupling하고 High energy용으로는 Ceramic Scintillator를 Coupling한 검출기 모듈을 각각 4개씩 Random Sampling하여 Zero Bias에서의 Leakage current를 측정하였다. 측정결과 <그림 5-4>와 같이 LED와 HED에서의 Leakage current는 0.5~90 pA 범위로 측정되었으며, Scintillator Coupling전과 비교하여 보았을 때 Leakage current가 다소 증가하는 현상을 관찰할 수 있었다.

이는 섬광체와 Photodiode의 광학 Coupling으로 인해 Photodiode의 표면이 오염되어 Leakage current가 증가한 것으로 해석할 수 있다.

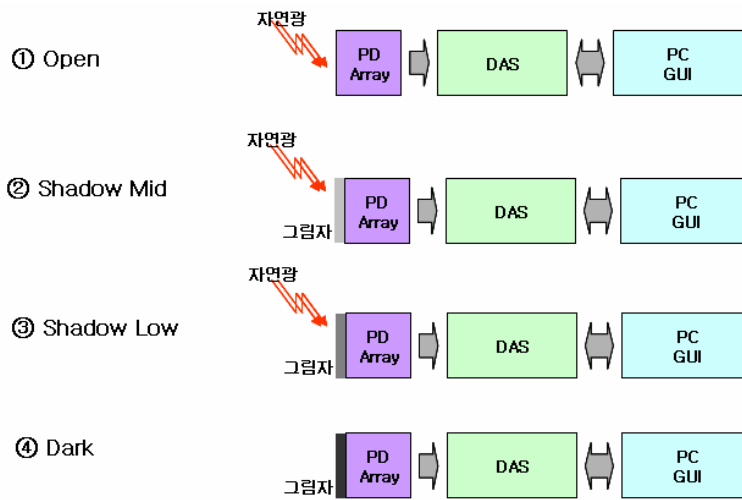


<그림 5-4. 섬광체 Coupling 후 측정된 Leakage current>

제2절 광학적 특성 실험

1. 실험 방법 및 조건

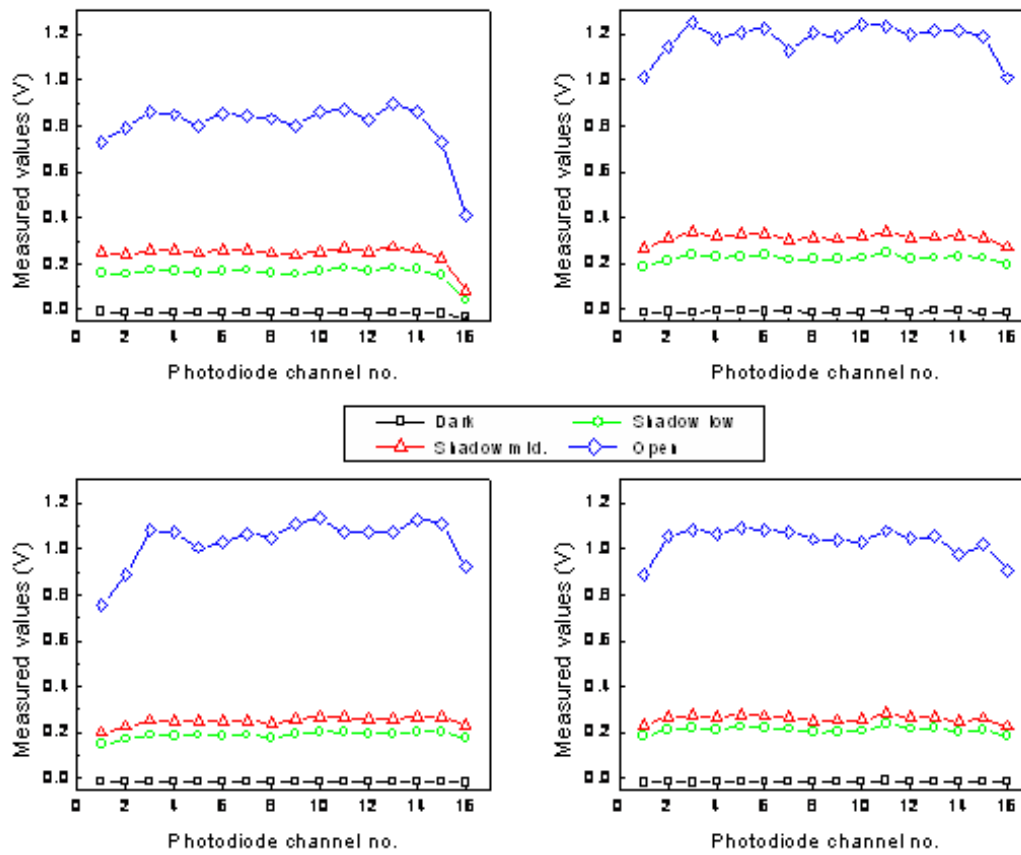
Ceramic scintillator을 Coupling한 고에너지 검출기 모듈과 Lanex-Regular을 Coupling한 저에너지 검출기 모듈을 각각 4개씩 무작위 샘플링하여 <그림 5-5>과 같이 자연광의 광량을 가변시키면서 ADC 값의 변화를 Oscilloscope를 통해 측정하였다.



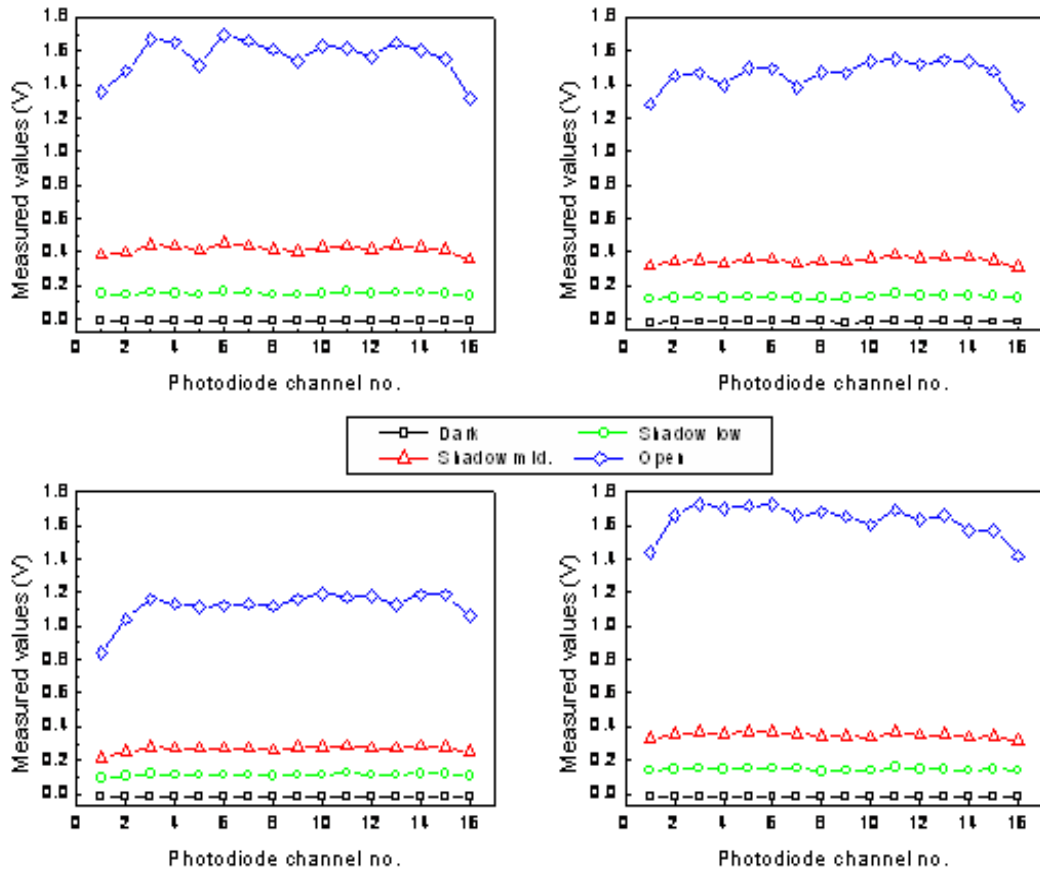
<그림 5-13. 광량 Test block diagram>

2. 실험 결과

자연광의 광량을 가변시키면서 ADC 값의 변화를 측정한 결과 광량의 증가에 따라 출력신호가 증가 하는 현상을 관찰할 수 있었으며, 동일한 광량에 대하여 Lanex-Regular을 Coupling한 저에너지 검출기 모듈에서의 출력신호가 Ceramic scintillator을 Coupling한 고에너지 검출기 모듈에서의 신호보다 크게 출력됨을 볼 수 있었다.



<그림 5-6. 고에너지 검출기 모듈의 광량 Test 결과>

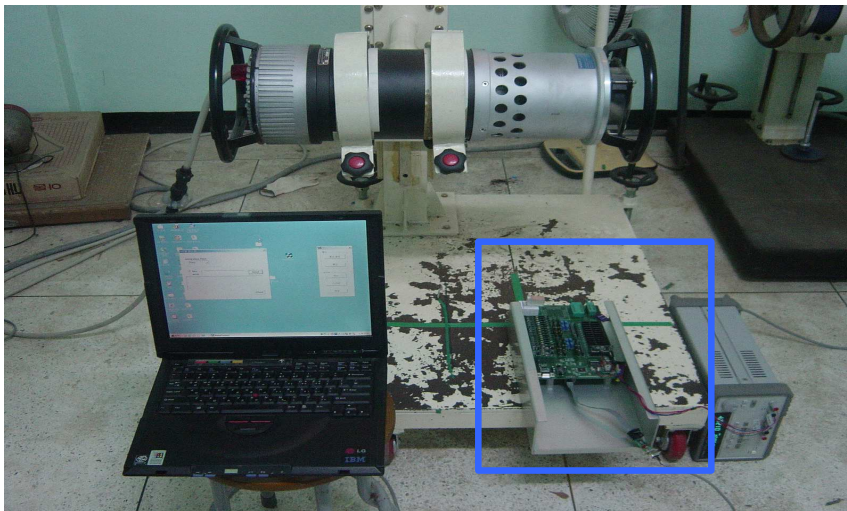
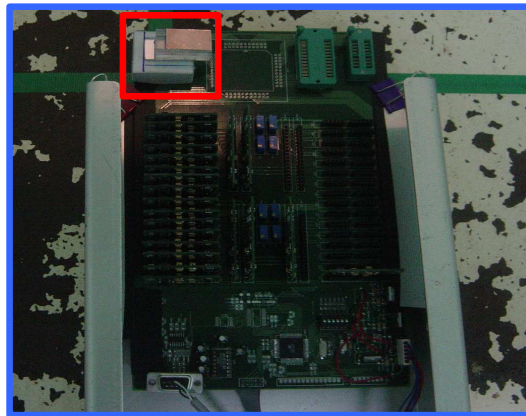
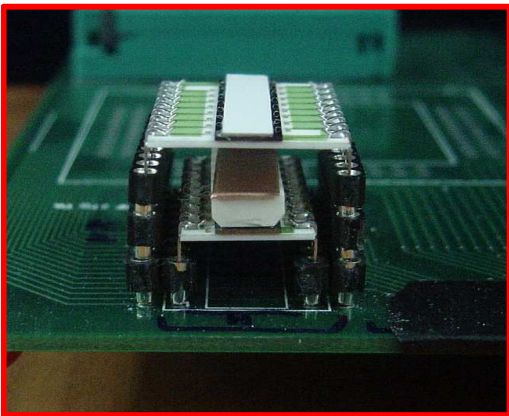


<그림 5-7. 저에너지 검출기 모듈의 광량 Test 결과>

제3절 X-ray 특성 실험

1. 실험 방법 및 조건

산업용 X-ray 조사에 따라 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈에서 출력되는 신호를 측정하기 위해 <그림 5-8>와 같이 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈 (Detector 1, Detector 2)의 각 LED와 HED를 Sandwich 구조로 배치하고, Test board를 함께 구성하여 동일 조사조건 (140 kVp, 1 mA)에서 Integration time, 구리 필터 두께, Test Phantom의 종류를 가변 시키면서 LED와 HED에서 출력되는 ADC 값을 측정하였다.



<그림 5-8. X-ray 테스트 장비 및 Setup>

<표 5-2. Xray Test 조건>

구분	조 건		구 분
X-ray	140 kVp, 1 mA		산업용
SID	60 cm		
Integration time	5 ~ 20 ms		5 ms step
Detector 1	LED(Lanex Regular) + HED(Ceramic Scintillator)		
Detector 2	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	

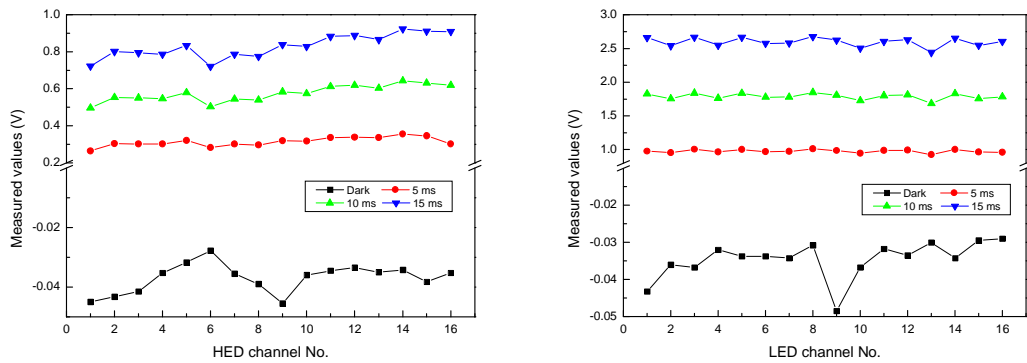
2. 실험 결과

가. 채널별 *Uniformity*

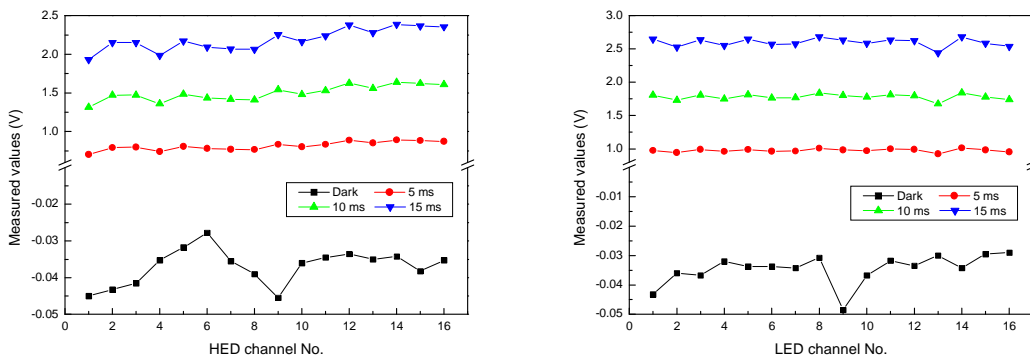
Detector 1, 2에 대하여 16 채널 Photodiode의 각 채널에서 출력되는 신호의 Uniformity와 Dark 상태에서의 각 채널간의 Non-uniformity가 X-ray 조사시 출력신호에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 Test Phantom 없이 X-ray를 조사하지 않는 상태를 기준으로 Integration time을 증가시키면서 각 채널에서의 출력신호를 측정하였다.

실험 결과, Detector 1의 경우 <그림 5-9>와 같이 Integration time이 증가 할수록 LED 및 HED에서 출력되는 신호가 증가하는 현상을 관찰 할 수 있었고, Dark 상태 즉 X-ray가 조사되지 않았을 때의 각 채널의 Non-uniformity는 X-ray response signal에 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다.

Detector 2의 경우에도 <그림 5-10>와 같이 입사 X-ray의 양이 증가 할수록 출력 신호가 커지는 현상을 관찰할 수 있었고, Dark 상태의 각 채널 간의 Non-uniformity가 X-ray 조사량 증가에 따른 Response signal에는 크게 영향을 미치는 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 위의 실험결과에서 알 수 있듯이 LED, HED의 출력신호는 Dark 상태에서의 각 채널별 Non-uniformity 보다 Scintillator 및 Optical coupling등에 더 민감한 Non-uniformity가 존재하여 LED, HED에서 출력되는 신호에 영향을 미치는 것으로 판단된다.



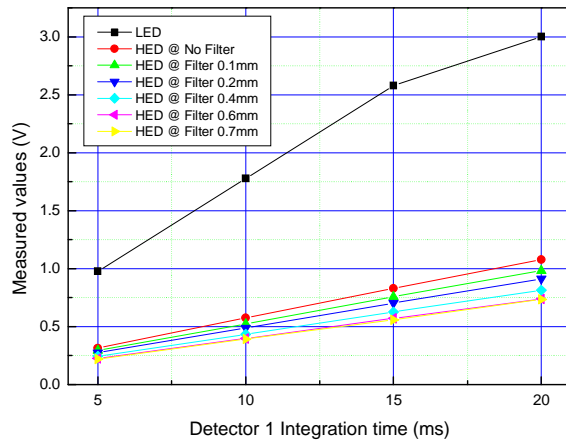
<그림 5-9. Detector 1의 채널별 Uniformity @ No Filter & Phantom>



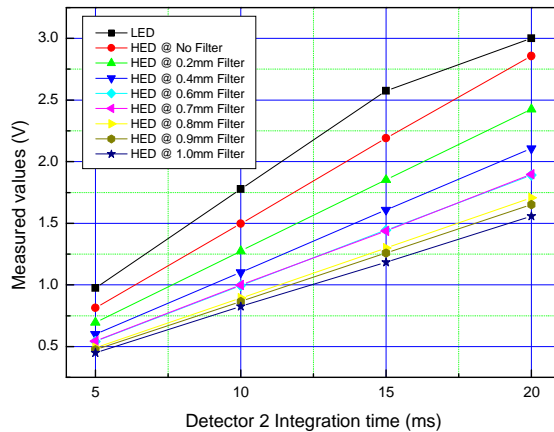
<그림 5-10. Detector 2의 채널별 Uniformity @ No Filter & Phantom>

나. 출력신호 및 선형성

두께별 구리 필터가 HED에 Coupling된 Detector 1,2에 대하여 Test Phantom이 없는 상태에서의 X-ray 조사시간 즉, Integration time 증가에 따른 출력신호를 측정한 결과, 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 크음을 알 수 있었다.

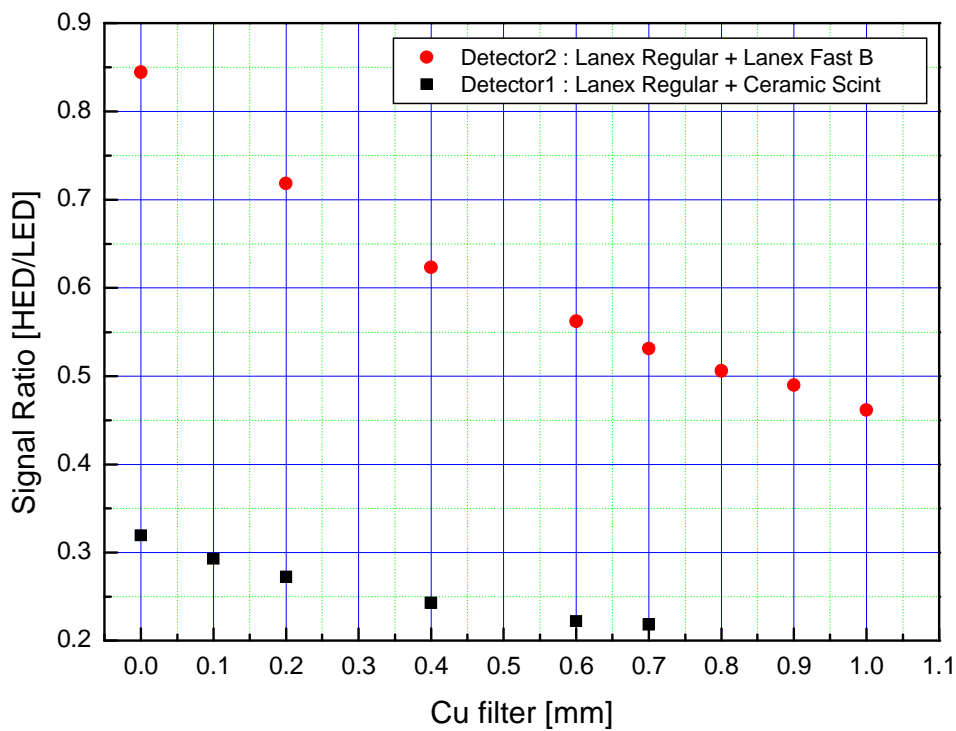


<그림 5-11. Detector 1의 Integration time에 따른 출력 신호 @ No Phantom>



<그림 5-12. Detector 2의 Integration time에 따른 출력 신호 @ No Phantom>

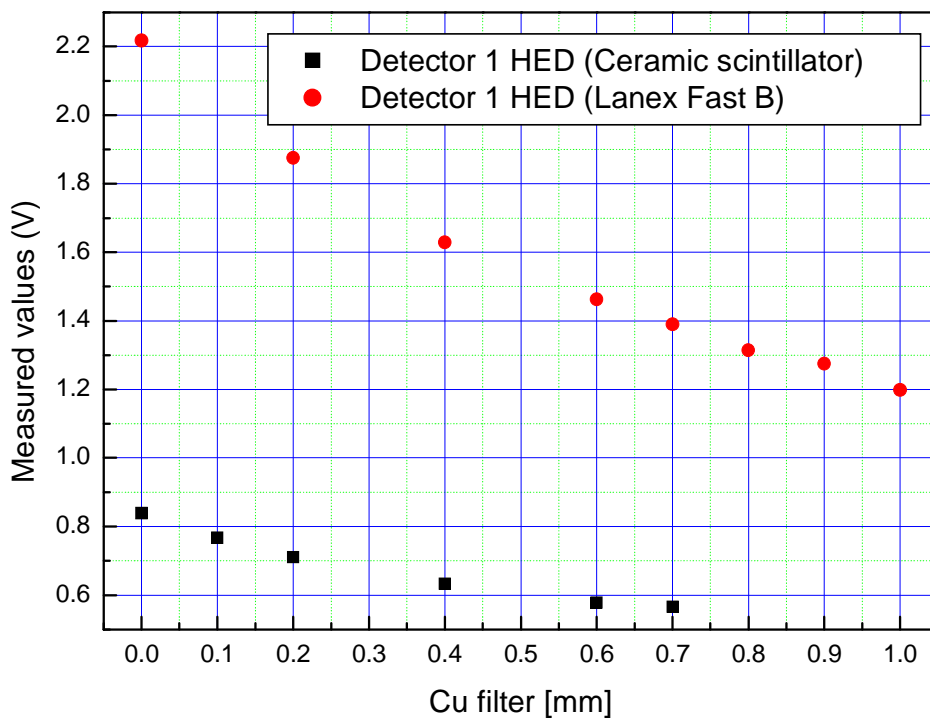
동일 Integration time 조건에서 Detector 1, 2의 LED 및 HED에서 출력되는 신호의 비 (HED/LED)는 <그림 5-13>와 같이 구리필터 두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었는데 이는 구리 필터의 두께가 증가할수록 LED와 HED의 출력신호 차가 커짐을 의미한다. 또한 구리 필터 0.7 mm 두께에서의 출력신호비 (HED/LED)는 Detector 1에서 0.21, Detector 2에서 0.52로 Detector 1이 더 작음을 볼 수 있는데, 이러한 차이는 두 Detector의 HED에 결합된 Scintillator의 X-ray에 대한 Photon yield 및 기하학적·물리적 특성 차이에 기인한 것으로 판단된다.



<그림 5-13. Detector 1, 2의 Filter 두께에 따른 출력신호비 (HED/LED)>

또한 동일 조건 및 구조 (2층 구조, No Phantom)에서 Detector 1, 2의 HED에서 출력되는 신호를 비교해 볼 때 Ceramic Scintillator에 의해 출력되는 신호보다 Lanex Fast B에 의한 출력신호가 약 2.5배 정도 크을 볼 수 있었으며, Test Phantom (Al : 2mm + Acryl : 20 mm + Cu : 0.2)에 대한 출력신호는 Lanex Fast B의 경우 0.82 V, Ceramic scintillator의 경우 0.32 V로 역시 약 2.5배 정도 차이가 남을 알 수 있었다.

따라서 위의 결과로부터 Ceramic Scintillator의 경우 측정 가능한 Phantom의 종류 및 두께의 제한이 Lanex Fast B에 비하여 클 것으로 예상된다.

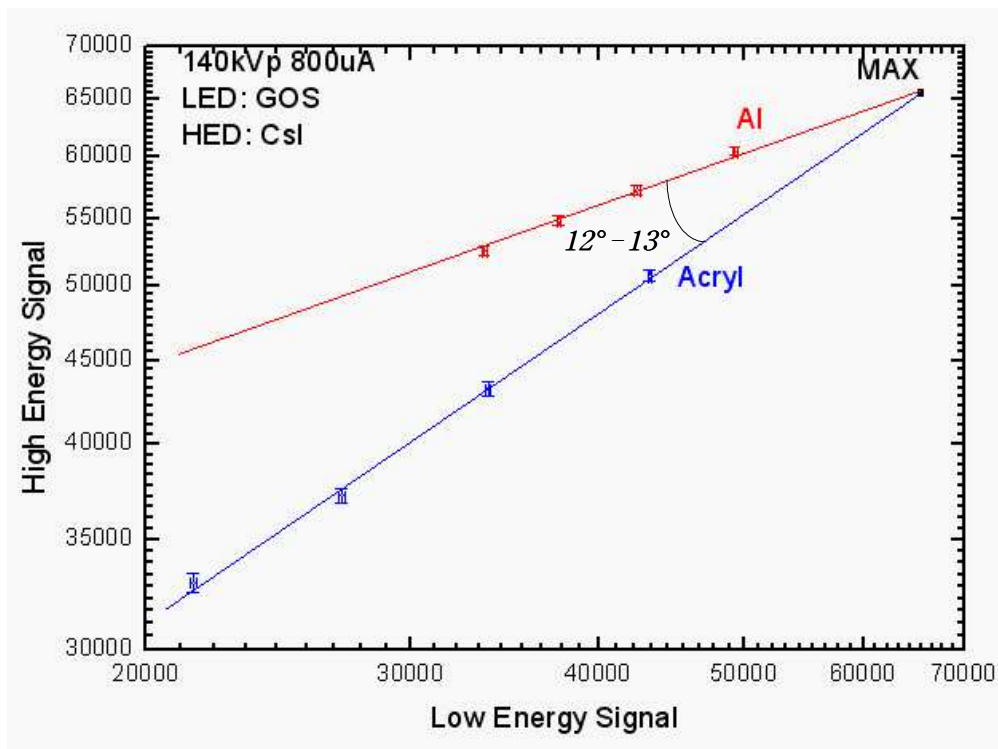


<그림 5-14. Detector 1, 2 HED에서의 Filter 두께에 따른 출력신호비>

다. Z-Map 획득 및 고에너지 검출기 비교

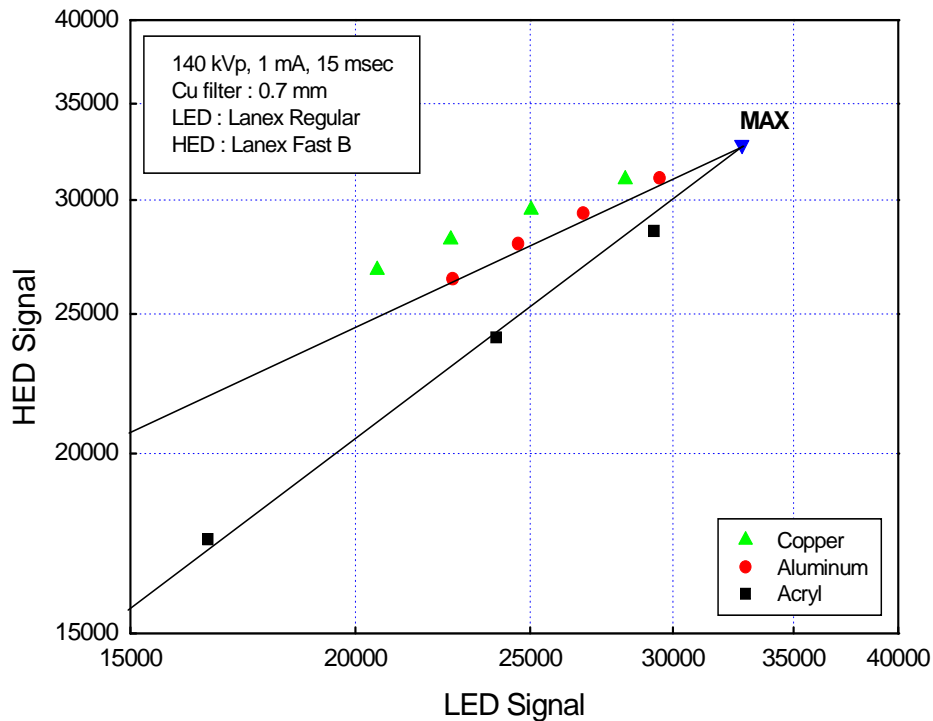
Z-Map은 이중 에너지를 이용해 유기물과 무기물을 구분하는데 사용되는 지표로써 가로축을 저에너지 검출기의 신호 값, 세로축을 고에너지 검출기의 신호 값으로 한 로그 비율의 그래프로써 나타낼 수 있다. <그림 5-15>은 현재 상용화되고 있는 ET (Electron Tube) 社의 LED (GOS), HED (CsI)에서 구리필터 1.0 mm와 알루미늄, 아크릴에 대해 획득된 Z-Map으로써, 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 약 12° - 13°이다.

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. [21]

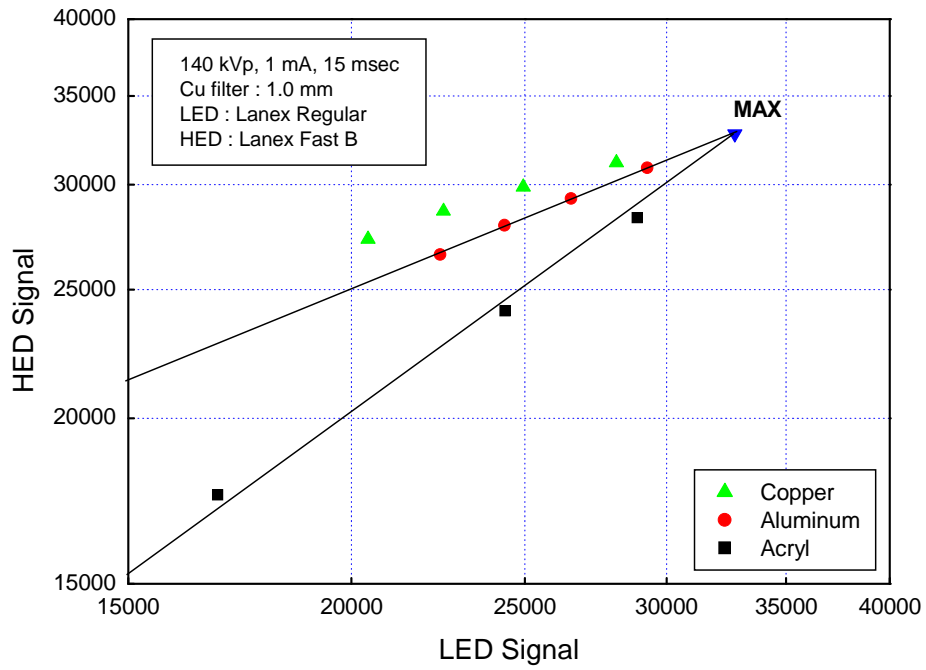


<그림 5-15. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map - ET社>

따라서 본 연구에서 제안하는 섬광체 조합의 검출기 모듈과 여러 가지 다른 물질의 Test Phantom을 이용하여 Z-map을 구성하였다. <그림 5-16>, <그림 5-17>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 ET 社의 12° - 13°와 유사한 결과를 얻었다.



<그림 5-16. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 0.7 mm>



<그림 5-17. Aluminum과 Acryl 에 대한 Z-map @ 1.0 mm>

제5장 결론 및 고찰

본 연구에서는 Dual X-ray Imaging용 검출기 모듈의 섬광체를 설계하기 위해 현재 상용화 되어 있는 DT (Detection Technology)社와 ET (Electron Tube)社의 섬광체 조합과 산업용으로 많이 사용되고 비용이 저렴한 Lanex 시리즈 및 국내에서 연구·개발중인 Ceramic Scintillator (KAIST) 등의 섬광체 조합을 구성하여 기존의 상용화된 섬광체 조합의 검출기 모듈을 바탕으로 제안된 조합에 대하여 Monte carlo code인 MCNPX Simulation을 수행하여 저에너지와 고에너지 분리 가능성 및 고에너지 검출기의 필터 두께를 예측하였으며, 그 결과 Lanex Regular - Lanex Fast B 조합과 Lanex Regular - Ceramic Scintillator 조합의 섬광체가 저에너지 검출기 (LED) 및 고에너지 검출기 (HED) 섬광체로의 적용 가능성을 확인하였으며, 그 때 고에너지 검출기의 구리 필터의 두께는 0.7 mm 이상인 것으로 예측하였다.

또한 섬광체에서 생성되는 Light의 수광부인 Photodiode는 Silvaco社의 Semiconductor Device Simulator인 ATLAS tool과 Photodiode layout tool인 CADENCE를 이용하여 설계하고, ETRI (전자정보통신연구원)의 Fab 공정을 이용하여 최종적으로 1.5 mm × 3.2 mm의 16채널 PIN Photodiode를 제작하였으며, 제작된 Photodiode의 Leakage current 측정 결과 0.2 ~ 10 pA 범위 값을 나타내어, 현재 상용되고 있는 DT社의 16 채널 PIN Photodiode (Leakage current : 수십 pA) 보다 우수한 성능을 보였다.

제작된 센서와 Lanex Regular - Lanex Fast B 조합과 Lanex Regular - Ceramic Scintillator 조합의 섬광체를 Coupling하여 산업용 X-ray (140 kVp, 1 mA)에 대한 특성 실험을 수행하였으며, 검출기 채널별 Uniformity 측정 및 조사시간에 따른 선형성 실험결과 다채널 포토다이오드의 경우 일반적으로 첫 채널과 마지막 채널에서의 Non-uniformity가 일반적이거나, 본 연구에서 제작된 포토다이오드의 경우 첫 번째 및 마지막 채널에서 근소한 Non-uniformity가 존재할 뿐 검출기로서 우수한 Uniformity 성능을 나타내었고, 조사시간에 따른 출력신호 또한 우수한 선형성을 보였다. 이러한 결과는 예측해 볼 때 Dual X-ray 영상 시스템의 핵심 구성 요소인 포토다이오드 기반 선형 어레이 검출기의 상용화가 가능할 것으로 보인다.

또한 동일 조사조건에서 구리 필터 두께 증가에 따라 LED와 HED의 출력신호의 차

는 증가함을 알 수 있었고, 구리 필터 0.7 mm 두께에서의 출력되는 신호의 차는 Lanex Regular - Lanex Fast B 섬광체 조합의 검출기 모듈보다 Lanex Regular - Ceramic Scintillator 섬광체 조합의 검출기 모듈에서의 LED, HED 출력신호 차가 더 큰 것으로 나타나 에너지 Discrimination 관점에서 볼 때 두 검출기 조합으로 Dual X-ray 영상 시스템 구현이 가능 할 것으로 예측된다. 하지만 고에너지 검출기 (HED)에서의 출력신호 크기는 구리 필터 0.7 mm 두께에서 Lanex Fast B에 의한 신호가 Ceramic Scintillator에 의한 신호보다 약 2.5배 큰 것으로 나타나 Dual X-ray imaging 용 검출기로서의 적용측면에 볼 때 Ceramic Scintillator 보다는 출력신호가 더 큰 Lanex Fast B 조합이 적당할 것으로 판단된다.

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-map을 구성한 결과, 이 두께 영역에서는 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 ET 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.

따라서 향후 두 검출기 조합을 어레이 형태로 구성하여 영상처리 알고리즘을 통한 실제적인 Dual X-ray 영상 획득 실험을 수행해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 한국과학기술원, “디지털 X선 촬영장치의 성능평가 기준 개발”, 식품의약품안전청, 3장, 2004.
- [2] S. BACCARO, A. CECILIA, et.al., “Scintillator and phosphor material : latest developments and applications”, ENEA FIS-ION, 2006.
- [3] Hartman, T.E., Dual-energy radiography. Seminars in Roentgenology, (1997)
- [4] V, Rebuffel, J.M. Dinten, “Dual-Energy X-Ray Imaging: Benefits and Limits”, ECNDT-Th.1.3.1 pp 1-12 (2006)
- [5] Young Kwan Kim, and et.al., NIM, B. 225 (2004) 392-396
- [6] MCNPXTM User’s Manual, Version 2.5.0, Denise B, Pelowitz, Ed., Los Alamos Nat. Lab. Rep., Los Alamos, NM, 2005.
- [7] ATLAS User’s Manual, Silvaco Int., Santa Clara, CA, 1998.
- [8] Irving Kaplan, Nuclear physics, 2nd Ed., Addison Wesley, Ch. 4, 1986.
- [9] C. D’Ambrosio, et.al., “Particle Detector - Principles and Techniques”, CERN Academic Training Programme, 2004/2005.
- [10] M. Kobayashi (KEK), “Introduction to scintillators,” 2003.
- [11] Marketech International, Inc., “Scintillator Crystals”
- [12] Robert F. Pierret, “ Semiconductor Device Fundamentals”, Addison Wesley, Ch. 9, 14, 1997.
- [13] G. F Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2nd Ed., John Wiley & Son, 1989.
- [14] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd ed., John Wiley & Son, 2004.
- [15] HAMAMATSU Inc., “Photodiode Technical Information”
- [16] P. Eithinger, “Characterization and Analysis of Detector Materials and Process”, Nucl, Inst. and meth. in Phy. Res., A253, pp. 313-318, 1987
- [17] D. S. McGregor, et al., “Room-Temperature Compound Semiconductor Radiation Detector”, Nucl, Inst. and meth. in Phy. Res., A395, pp. 124, 1997

- [18] Smart portable X-ray Unit Instruction and Maintenance Manual, Manual No. 583 565, 09-97, Ed. 7, ANDREX, 1998.
- [19] Peter Hammersberg et al., "Absolute energy spectra for an industrial micro focal X-ray source under working conditions measured with a Compton scattering spectrometer - full spectra data," J. X-ray Sci. and Tech. 8(1) (1998), ISO press
- [20] Ahn, Seong Kyu, "A study on a scatter correction method based on thickness estimation in dual-energy radiography", KAIST, Doctoral Thesis, 2006.
- [21] 이비테크(주) 한국과학기술원, "유기물과 무기물 구분 가능한 이중에너지 검색 시스템 개발", 과학기술부, 3장, 2006.

감사의 글

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

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

여러모로 부족한 저를 학문적으로 인격적으로 성숙할 수 있도록 이끌어 주시고, 이 논문을 쓰기까지 실험환경을 마련해 주신 김광현 교수님께 감사함과 미안함을 전하고, 실험실 후배로써 연구실을 같이 지키지 못해 항상 미안한, 하지만 친형처럼 묵묵히 물심양면으로 도움을 주신 염유선 선배님과 언제나 친동생처럼 격려와 관심을 가지고 지켜봐 주신 최금주 선배님, 황보미 선배님께 고마움을 전하며, 지난 1년간 많은 밤을 지세우고 동거동락하며 항상 곁에서 많은 조언과 도움으로 힘이 되어준 황정래 선배님, 처음으로 소속감과 직장생활의 마음가짐을 일깨워준 라드텍의 윤성은 팀장님과 항상 웃음으로 대해줬던 정지현씨께 진심으로 감사드리고, 실험실을 부담 없이 내어주신 KAIST 김영수 박사님께도 감사함을 전합니다.

석사과정 동안 매번 신세만을 졌던 학부 선배이자 대학원 동기인 인준형, 연수형에게 미안함과 고마움을 전하고, 같은 과 후배는 아니지만 학부선배 이상으로 잘 대해주고 많은 도움을 주었던 인성, 진우와 언제나 밝고 명랑한 모습으로 응원해 준 친여동생 같은 꼬맹이 애선에게도 고마움을 전합니다. 그리고 무심하기 짝이 없는 친구를 마다하지 않고 변치 않는 우정으로 감싸준 정선, 영철, 상민, 동채, 동완, 관태, 명주를 비롯한 친구들 모두에게 고마움을 전하고, 언제나 힘이 들 때 휴식처와 위안을 주었던 죽마고우 친구 인환에게도 진심으로 고마움을 전합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 헌신적인 사랑과 믿음으로 묵묵히 지켜봐 주신 사랑하는 어머니, 아버지께 진심으로 감사드립니다. 그리고 온갖 어려움 속에서도 학업에 열중할 수 있도록 격려와 염려를 다해주신 형, 큰누나, 바쁘다는 핑계로 동생노릇도 제대로 못해준 작은누나에게 고마움을 전합니다. 또한 항상 내 편에 서서 응원해 주고 삶을 활력소를 제공해주신 수진에게 지면을 빌어 사랑한다는 말과 함께 이 작은 결실의 기쁨을 드립니다.

