

이중 에너지 검출기를 이용한 영상 시스템

여화연^{1*}

¹미르사이텍주식회사

Image System Using Dual Energy Detector

Yeo, Hwa-Yeon^{1*}

¹Mirecytech Co., Ltd.

요 약 본 논문은 이중 에너지 DR(Digital Radiography) 방식 중, 단일 조사 X-선(single shot X-ray exposure) 장치와 이중 모드 검출기 모듈 (Low Energy Detector & High Energy Detector)을 이용한 이중 X-선 이미징이 가능한 검출기 모듈에 관한 연구이다.

상용 BIS(baggage inspection system)에서 사용되고 있는 X-선 발생장치의 스펙트럼과 이중 모드 검출기에 대한 특징 및 방사선적 특성을 분석하여 새롭게 제안 할 검출기 모듈의 최적 설계 방향을 기술하고 상용화된 용화된 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.

새롭게 제안 된 검출기 모듈이 적용된 BIS에 대해, 기본 특성 실험에 대한 X-선 영상을 획득하여 실험 및 분석을 실시하였다.

Abstract 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). 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.

Key Words : Dual Energy, Detector, X-ray, Imaging system

1. 서론

비파괴검사 방법 중의 하나인 X-선투과영상법은 IT기술과 함께 기존의 필름영상을 이용하는 방식에서 디지털 방식의 직접영상 획득 및 전송 등이 수행가능한 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 BIS(Baggage Inspection System) 중 핵심 분야인 이중방식 선형배열 X-선 검출기 모듈 (Dual mode linear array X-ray detector module)에 관한 연구이다. BIS에서 적용되는 이중방식 선형배열 X-

*교신저자 : 여화연(milalyhy@hanmail.net)

접수일 10년 07월 14일

수정일 (1차 10년 08월 03일, 2차 10년 08월 16일)

게재확정일 10년 09월 08일

선 검출기 모듈은 이중 적층 구조 (two layer stacked structure) 또는 샌드위치 구조로 두 개의 선형배열 검출기 모듈을 사용하고 있으며[1], 상위 검출기 모듈은 X-선 스펙트럼 중 저에너지 영역을 검출하고 영상화 한다고 하여 저에너지 검출기 (Low Energy Detector : LED)라 하며, 하위 검출기 모듈은 X-선 스펙트럼 중 고에너지 영역을 검출하고 영상화하기 때문에 고에너지 검출기 (High Energy Detector : HED)라 한다. 이때 각층의 검출기는 방사선을 광자로 전환시켜주는 섬광체와 섬광체로부터 발생된 광자를 받아들여 전기적 신호를 생성하는 광다이오드로 구성되어 있으며, 생성된 전기는 증폭기 및 ADC 등을 통하여 양자화된 디지털 값을 컴퓨터로 전송할 수 있도록 모듈화 되어 저에너지 검출기 모듈과 고에너지 검출기 모듈의 조합으로 이중 모드 X-선 영상을 생성한다. 일반적으로 상용화된 이중방식 선형배열 X-선 검출기 모듈에서 적용되는 저에너지 검출기에서는 screen film형의 섬광체를 사용하고, 고에너지 검출기에서는 저에너지 영역의 X-선 스펙트럼을 차단하고 고에너지 영역의 X-선 스펙트럼만을 감지하기 위해 구리 필터를 이용하며, 이때 사용된 섬광체는 고에너지 영역의 X-선 스펙트럼을 충분히 흡수하기 위해 screen film형의 섬광체 대신 crystal형 섬광체를 사용한다[2,3].

그러나 screen film형의 섬광체는 저렴하고 구매하기 쉬운 반면에 crystal형 섬광체는 고가이며 제작 주문을 해야 하는 문제점을 안고 있어, 고에너지 검출기 모듈의 제작단가를 높이는 주원인이 되고 있다.

본 논문에서는 구리 필터와 screen형 섬광체 조합만으로 크리스탈형 섬광체를 대신할 수 있는 이중 에너지 영상 시스템 구현 방안을 제안한다.

2. 이중 에너지 검출기를 이용한 영상 시스템

2.1 LED 및 HED 설계

본 연구에서는 Kodak사 Lanex계열의 스크린 타입의 섬광체를 이용하였다. Lanex계열의 스크린 타입의 섬광체에 대한 특성[4]을 표 1에 나타내었다. Lanex계열의 섬광체는 표 1에서 알 수 있듯이 밀도는 동일하나 두께가 달라 입사된 X-선 에너지의 흡수율이 다르며, 이 흡수된 에너지에 비례하여 광 발생량도 달라진다.

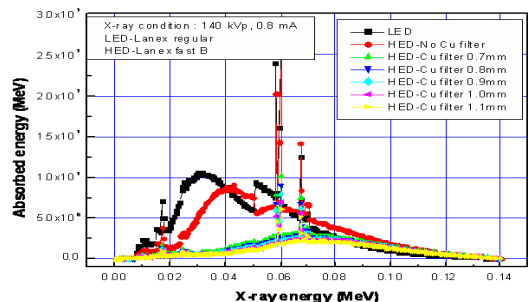
Lanex계열의 섬광체 후보 중 LED 및 HED의 에너지 흡수에너지비 및 광발생비를 최대화 할 조합으로 LED에는 Lanex Fine을 HED에는 Lanex Fast-B가 우선된다.

[표 1] Lanex 계열의 스크린 타입의 섬광체에 대한 특성

형태	구성	표면 (mg/cm ²)	밀도 (g/cm ³)	최대 방출 (nm)	변환 효율	두께 (μm)
Fine	Gd ₂ O ₂ S:Tb	34	7.34	545	15%	46.32
정규	Gd ₂ O ₂ S:Tb	70	7.34	545	15%	95.37
Fast	Gd ₂ O ₂ S:Tb	133	7.34	545	15%	181.2

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

제안된 LED는 Lanex Regular, HED는 Lanex Fast-B의 조합 (이하 “new LEDHED”)에서 구리필터의 두께를 변화시켜가면서 흡수에너지의 분포를 알아보았다. 이에 대한 결과는 그림 1에 나타났다.



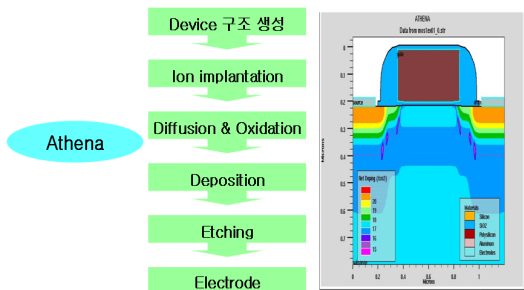
[그림 1] LED, HED 구리필터 두께와 흡수에너지

그림 1에서와 같이 LED에서 흡수된 X-선 스펙트럼을 비교분석 한 결과 HED에서 구리필터의 두께 증가에 따라 저에너지 X-선 스펙트럼이 감소함을 알 수 있다. 그리고 new LEDHED 조합에서는 약 70 keV에서 최대치를 보였으며 입사 스펙트럼이 분리됨을 알 수 있다.

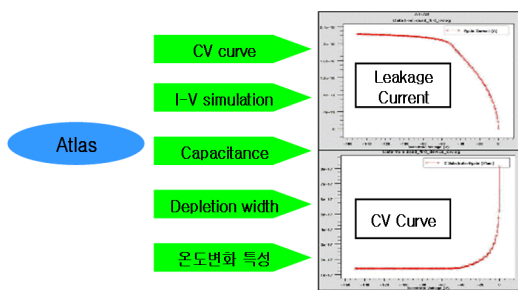
2.2 PIN형 광 다이오드의 설계

PIN 광다이오드의 구조, 실리콘웨이퍼의 선정, 압전류 최소화 방안, 그리고 QE를 고려하여, 먼저 제작을 진행할 반도체 Fab의 공정 파라미터가 적용된 기하학적 구조를 결정하고, P영역의 불순물의 농도, N영역의 불순물의 농도를 정의하며, 적당한 반도체 모사 코드를 이용하여 구조 해석을 수행한다. 이때 모사 코드는 Silvaco사의 ATHENA[5]와 ATLAS[6] Tool을 이용하였다. ATLAS를 이용하여 해당 광다이오드 구조에서 전기적, 광학적 성능

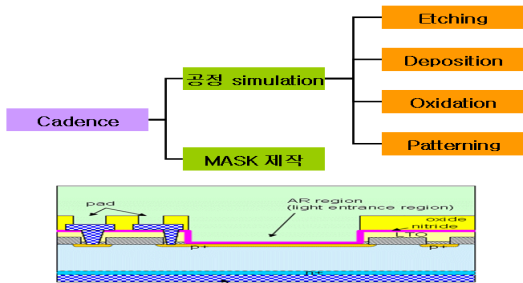
을 정량적인 값으로 출력하여 목적하는 광다이오드의 성능을 검증하는 절차를 거친다. CAD Tool을 이용하여 PIN 광다이오드의 적층구조에 따라 마스크 작업이 진행되며, 이와 같은 광다이오드의 구조 해석, 모사, 그리고 설계과정에 필요한 절차는 다음과 같이 도식화된다.



[그림 2] 광다이오드 공정 구조해석 흐름도



[그림 3] 특성 분석



[그림 4] 광다이오드 Mask Layout 공정

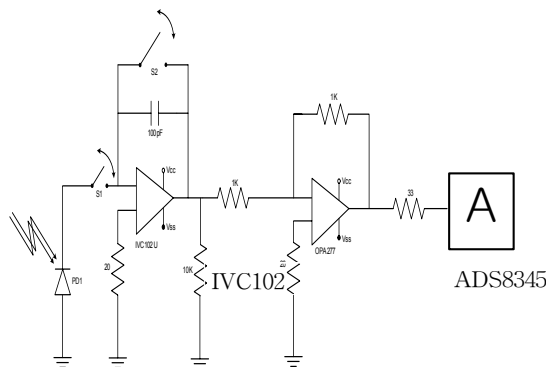
2.3 신호처리 장치의 최적화 설계

신호처리회로는 X-선에 의해 검출기(섬광체 + 광 다이오드)에서 출력되는 전류신호를 검출하기 위한 회로로써 일반적으로 신호를 증측하는 방법에는 크게 통합 모드와 계수 모드 두 가지로 구분된다.

통합 모드는 센서의 이득(gain)이 낮아 출력신호자체가 미약할 경우 센서 외부 콘덴서의 센서에서 생성된 전

하를 연속 충전하여 스위칭 소자를 통해 아날로그 출력하는 방식이며, 계수 모드는 센서의 이득이 충분하여 적은양의 입사물리량으로도 충분한 전하를 생성하여 콘덴서에 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.

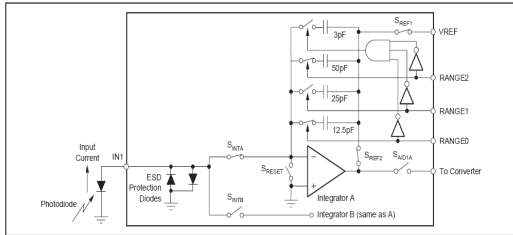
BIS에서 사용되는 광다이오드의 이득은 약 "1"로서 이득이 낮아 계수 모드 방식의 신호처리 방식은 적용하기 어려우며, 대부분의 상용화 BIS에서도 통합 모드 방식을 사용하고 있다. 따라서 본 연구에서도 통합 모드 방식의 신호처리에 국한하여, 개념설계를 하였으며, 특히 16 채널 광다이오드를 단위 모듈로 하며 이 단위 모듈이 여러 개 모인 다중 모듈의 선형 배열 검출기 형태임으로 다 채널 모듈에서 발생한 아날로그 신호를 순차적으로 처리 가능한 스위칭 소자와 증폭회로, 그리고 아날로그를 디지털화하는 ADC를 한 블록으로 하는 아날로그 디지털 인터페이스 보드에 국한하였다. IC형의 스위칭 및 인테그레이터 소자는 16채널 모듈을 단위 처리할 수 있는 IVC 102 소자와 DDC 118 소자를 선정하였고, 각 스위칭 소자에 적합한 ADC를 선정하였으며, 두 소자의 개념 설계는 그림 5 및 그림 6에 도식화 하였다.



[그림 5] IVC 102를 이용한통합 모드 신호처리회로 Diagram

통합 모드의 신호처리 회로는 그림 5와 같이 광 다이오드에서 출력 되는 신호인 전류를 전압으로 변환시켜주는 인테그레이터와 입력된 신호를 반전하여 출력하는 기능을 가지는 변환기의 기능을 하는 IVC102와 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC ADS8345, 그리고 각 채널의 신호, 데이터를 처리 및 통신하는 기능을 수행하는 MCU(Main Control Unit) ATmega128로 구성된다. 통합 모드의 검출기를 구성하기 위해서는 인테그레이터와 Hold/Reset 스위치가 필요로 하게 된다. 현재 상용화

된 스위치가 내장된 인테그레이터 칩을 이용하여 설계하였다.



[그림 6] DDC 118을 이용한 통합 모드 신호처리회로 Diagram

DDC118은 IVC102와 같은 기능을 수행하지만 IVC102와 다른점은 칩 하나에 8개의 IVC102가 있다는 점이다. IVC102를 보면 광다이오드 하나에 하나의 앰프가 연결되어있는 모양이다. 반면 DDC118은 광다이오드 하나에 하나의 앰프가 연결되어 있는데 이것들이 8개가 한번에 있는 것이다. IVC102와 같이 통합 모드의 검출기로 PCB 보드의 간결함을 얻을 수 있고, 칩 하나로 8개의 광다이오드에서 나오는 신호를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 X-선 반응

산업용 X-선 조사에 따라 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈에서 출력되는 신호를 측정하기 위해 저에너지 및 고에너지 검출기 모듈 새로운 검출기의 각 LED와 HED를 샌드위치 구조로 배치하고, 테스트 보드(Test Board)를 함께 구성하여 표 2와 같이 동일 조사조건 (140 kVp, 1 mA)에서 통합 시간, 구리 필터 두께, 시험 팬텀(phantom)의 종류를 가변 시키면서 LED와 HED에서 출력되는 ADC 값을 측정하였다.

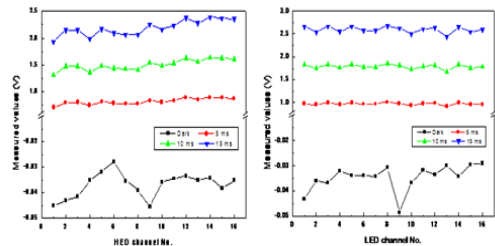
[표 2] X-선 반응실험 조사조건

구분	조건	구분	
X-선	140 kVp, 1 mA	산업용	
SID	60 cm		
통합시간	5 ~ 20 ms	5 ms step	
새검출기	LED(Lanex Regular)+HED(Lanex Fast B)		
구리필터 (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	

3.2 균일도(Uniformity)

새 검출기에 대하여 16채널 광 다이오드의 각 채널에서 출력되는 신호의 균일도와 어두운 상태에서의 각 채널간의 비 균일도가 X-선 조사 시 출력신호에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 시험 팬텀없이 X-선을 조사하지 않는 상태를 기준으로 통합 시간을 증가시키면서 각 채널에서의 출력신호를 측정하였다.

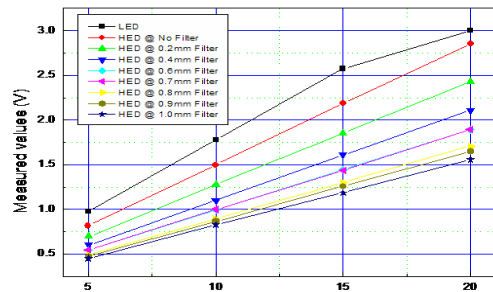
실험 결과, 새 검출기의 경우에 그림 7과 같이 입사 X-선의 양이 증가 할수록 출력신호가 커지는 현상을 관찰할 수 있었고, 어두운 상태의 각 채널 간의 비 균일도가 X-선 조사량 증가에 따른 응답신호에는 크게 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있었다. 따라서 LED, HED의 출력신호는 어두운 상태에서의 각 채널별 비 균일도 보다 섬광체 및 광 결합 등에 더 민감한 비 균일도가 존재하여 LED, HED의 출력신호에 영향을 미치게 된다.



[그림 7] 새 검출기의 채널별 균일도 @ No Filter & Phantom

3.3 선형성 및 신호

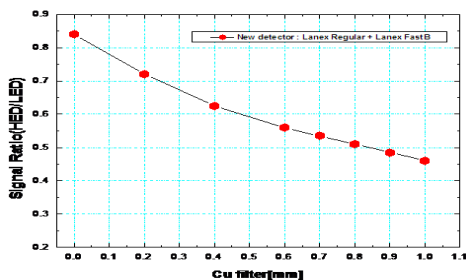
두께별 구리 필터가 HED에 결합된 새로운 검출기에 대하여 시험 팬텀이 없는 상태에서의 X-선 조사시간 즉, 통합 시간 증가에 따른 출력신호를 측정한 결과, 그림 8과 같이 LED 및 HED에서 출력되는 신호는 통합 시간이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있었고, 동일조건에서의 출력신호는 HED에서 출력되는 신호 보다 LED에서 출력되는 신호가 더 큼을 알 수 있었다.



[그림 8] 출력 신호 @ No Phantom

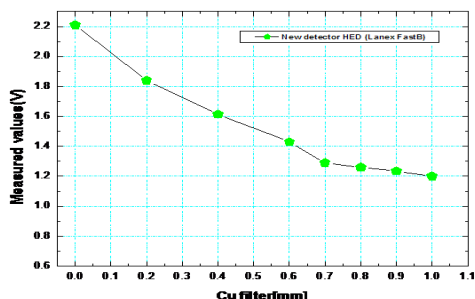
3.4 신호의 비(signal ratio)

동일 통합 시간 조건에서 새 검출기의 LED 및 HED에서 출력되는 신호의 비 (HED/LED)는 그림 9와 같이 구리 필터 두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었는데 이는 구리 필터의 두께가 증가할수록 LED와 HED의 출력신호 차가 커짐을 의미한다.



[그림 9] 출력 신호비(HED/LED)

또한 동일 조건 및 구조 (2층 구조, No 팬텀)에서 새 검출기의 HED에서 출력되는 신호를 볼 때 Lanex Fast B에 의한 출력신호는 그림 10과 같이 구리 필터 두께가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있었고 시험 팬텀(Al : 2mm + Acryl : 20mm + Cu : 0.2mm)에 대한 출력신호는 1.87 V임을 알 수 있었다.



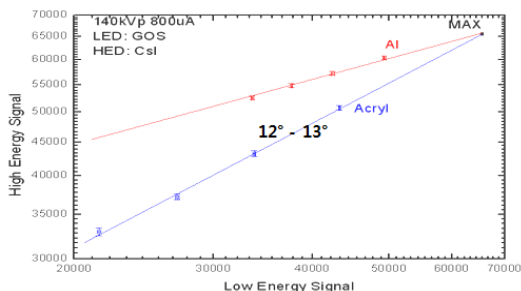
[그림 10] HED에서의 Filter 두께에 따른 출력신호

3.5 Z-Map

그림 11은 현재 상용화되고 있는 DT (Electron Tube)사의 LED (GOS), HED (CsI)에서 구리 필터 1.0 mm와 알루미늄, 아크릴에 대해 획득된 Z-Map으로써, 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 약 12° - 13°이다.

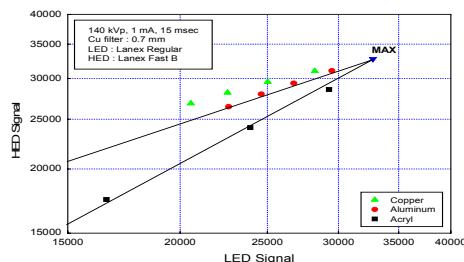
이처럼 Z-Map에서 한 가지의 물질은 하나의 직선으로 표현되고, 서로 다른 물질은 서로 다른 기울기를 가지는 직선으로 표현된다. 또한 원자번호가 낮을수록 아래쪽에, 클수록 위쪽에 위치하게 되며, 그래프 상에서 기울기 차이가 많

이 날수록 서로 다른 두 물질의 구별능력이 뛰어나게 된다 [6][7].

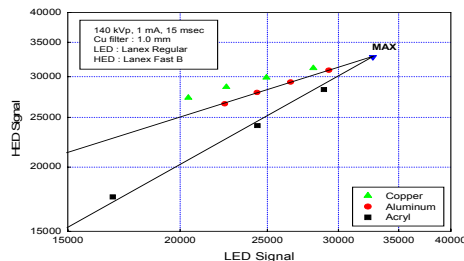


[그림 11] 알루미늄과 아크릴에 대한 Z-map - DT사

본 연구에서 제안하는 섬광체 조합의 검출기 모듈과 여러 가지 다른 물질의 시험 팬텀을 이용하여 Z-map을 구성하였다. 그림 12, 13은 구리 필터 0.7 mm와 1.0 mm에서의 시험 팬텀(알루미늄 : 1 - 4 mm, 아크릴 : 10, 20, 40 mm, 구리 : 0.1 - 0.4 mm)에 대한 저에너지, 고에너지 신호를 바탕으로 구성한 Z-Map이며, 이 두께 영역에서는 아주 우수한 선형성을 보였다. 이는 시험 팬텀의 두께와 유효원자번호가 작기 때문에 X-선의 선속 강화와 같은 다른 영향을 받지 않기 때문이다. 분리도 측면에서의 구리 필터 두께에 따른 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 0.7 mm 일 때 약 11°, 1.0 mm일 때 약 13°로 구리 필터 1.0 mm일 때 더 우수한 결과를 보였으며, 이는 DT사의 12° - 13°와 유사한 결과를 얻었다.



[그림 12] 알루미늄과 아크릴에 대한 Z-map @ 0.7 mm



[그림 13] 알루미늄과 아크릴에 대한 Z-map @ 1.0 mm

3.6 영상 생성

발생장치에 85 kV, 3.5 mA를 부하하였고, 피사체와의 거리는 60 cm로 하여 실험하였다. 그리고 다음으로 고려한 것은 X-선 스캐너(Scanner)의 주사 속도이다. 본 연구에서 X-선로 영상을 얻기 위한 시스템에는 피사체가 콘테이너 벨트를 이용하여 이동한다.

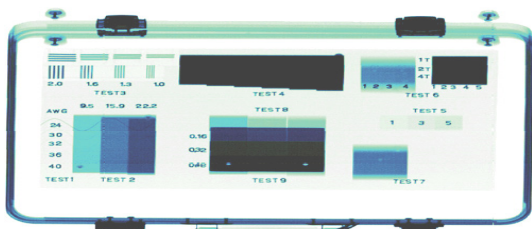
피사체로는 Highcom security Inc와 Larry copello Inc에서 만든 ASTM F792 Step wedge를 사용하였다.



[그림 14] ASTM F792 Step wedge

X-선 영상의 질을 판단하기 위해서 만들어진 이 피사체를 통해 얻은 영상으로 X-선영상의 질을 측정할 수 있다. 위의 그림 14]는 ASTM 792 step wedge의 내부 사진이다.

아래의 그림 15은 이번 연구에서 X-선 영상 획득 시스템을 통해 나온 ASTM F792 Step wedge의 X-선 영상이다. 실제 사진과 비교하면 숫자가 보이지 않거나 두께의 차이를 볼 수 없거나 와이어가 보이지 않는다. 이런 것들이 X-선 영상의 질을 측정하는 것이다.



[그림 15] ASTM F792 Step wedge의 X-선 영상

4. 결론

본 논문은 BIS에서 사용되고 있는 이중 에너지 X-선 방식으로 상용화되어 있는 제품들에 비해 낮은 비용으로 더 좋은 이중 에너지 영상을 획득하기 위한 방안을 연구하였다. 이를 위해 현재 상용화 되어 있는 DT사와 ET사의 섬광체 조합과 Lanex시리즈 섬광체 조합을 구성하여

기존의 검출기 모듈을 바탕으로 몬테카를로 코드(Monte carlo code)인 MCNPX 모사 실험과 Z-map을 수행하여 고에너지와 저에너지의 분리 가능성 및 고에너지 검출기의 필터 두께에 대해 예측하였다. 예측한 결과를 이용하여 저에너지 검출기 영역에는 Lanex-Regular, 고에너지 검출기 영역에는 Lanex-Fast B의 조합을 얻어냈다.

그리고 그때의 구리 필터의 두께는 고에너지 영역과 저에너지 영역의 차이가 분명하게 나타낼 수 있는 0.7 mm이상으로 나타났다. 동일한 X-선 실험 조건에서 구리 필터의 두께 증가에 따라 저에너지 검출기(LED)와 고에너지 검출기(HED)의 출력신호의 차이는 같이 증가하였다. 특히 HED에서의 출력신호의 크기는 구리 필터 두께가 증가 할수록 감소함을 알 수 있었다.

연구에서 제안하는 Lanex Regular - Lanex Fast B 섬광체 조합의 검출기 모듈과 여러 가지 다른 물질의 시험 팬텀(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 우수한 선형성을 보였다. 분리도 측면에서의 구리필터 두께에 따른 아크릴과 알루미늄에 대한 기울기 차이는 0.7 mm 일 때 약 11°, 1.0 mm 일 때 약 13°로써 현재 상용화되고 있는 DT 사의 검출기 모듈에서의 기울기 차인 12° - 13°와 유사한 결과를 얻어 본 연구에서 제안하는 섬광체 조합의 검출기 모듈로의 유기물 및 무기물 구분이 가능한 것으로 판단되었다.

본 논문에서 제안한 구리 필터와 섬광체 조합으로 크리스탈 형태의 섬광체를 대신한 이중 에너지 영상 시스템은 상용화되어 있는 제품과 비교하여 낮은 비용으로 우수한 성능을 보였다.

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 촬영장의 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] S. L. Issler and C. C. Torardi, "Solid state chemistry and luminescence of x-ray phosphors, "J. All. Comp. 229 pp. 54-65, 1995.
- [5] ATHENA User's Manual, Silvaco Int., SantaClara, CA, 1998.
- [6] ATLAS User's Manual, Silvaco Int., Santa Clara,

CA, 1998.

- [7] 이비테크(주), 한국과학기술원, “유기물과 무기물 구분 가능한 이중에너지 검색시스템 개발”, 과학기술부, 3장, 2006.
-

여 화 연(Yeo, Hwa-Yeon)

[정회원]



- 1996년 2월 : 광주대학교 졸업
- 2003년 2월 : 조선대학교 원자력 공학과(공학석사)
- 2009년 2월 : 조선대학교 원자력 공학과(공학박사)
- 2003년 3월 ~ 현재 : 남부대학교 방사선학과 겸임교수
- 2010년 7월 ~ 현재 : 미르사이텍 기술부장

<관심분야>

방사선취급기술, 방사선계측기술, BIS-Imaging