

2001 추계 학술발표회 논문집

한국원자력학회

## 디지털 X-ray 센서용 형광물질의 최적화 연구

### Study on the optimization of phosphor screen for digital X-ray sensor

정진범, 배진형, 황주호

경희대학교

경기도 용인시 기흥읍 서천 1리

#### 요약

Monte Carlo 기법의 MCNP4A와 DETECT97 Code를 이용하여 산업용과 의료용 디지털 X선 영상센서에 사용되는  $Gd_2O_2S:Tb$ ,  $CsI:Tl$ ,  $CaWO_4$ 의 형광체(phosphor)에 대한 X선 흡수량과 빛 확산도를 계산하였다. 그리고 디지털 X선 영상센서의 해상능(resolution)을 평가하는 요소들인 Modulation Transfer Function(MTF), Point Spread Function(PSF), 반치폭(FWHM)을 고려하여 형광물질 최적화 두께를 결정하였다.  $Gd_2O_2S:Tb$ 의 최적두께는 20, 40, 100 keV에서 40.8, 48, 51  $\mu m$  결정되었으며  $CsI:Tl$ 는 40 keV에서 51.5  $\mu m$  그리고  $CaWO_4$ 는 100, 150 keV에서 54.5, 58.6  $\mu m$ 로 결정되었다. 향후, 코드로 계산한 결과값의 신뢰성을 획득하기 위해서 형광물질에 대한 영상실험을 할 것이다.

#### Abstract

In this research, it was calculated X-ray absorption rate and light spread rate for three phosphors;  $Gd_2O_2S:Tb$ ,  $CsI:Tl$  and  $CaWO_4$ , which is used for Digital X-ray sensor for industrial and medical field. It, moreover, can determine the optimum thickness of phosphor screen by these parameters (MTF, PSF, and FWHM) estimated digital X-ray sensor resolution. The optimum thickness of  $Gd_2O_2S:Tb$  is shown 40.8, 48, and 51 in each energy of 20, 40, and 100 keV. As the same way,  $CsI:Tl$  takes 51.5 in 40 keV and  $CaWO_4$  gets 54.5 and 58.6 in energy of 100 and 150 keV respectively. After this, we will take image experimentations of phosphor screen in order to gain reliability of calculated results using its code.

# 1. 서론

과학기술 및 컴퓨터의 발달로 인해 X선을 이용한 디지털 X선 시스템이 산업분야와 의료분야에 널리 사용되고 있다. 최근에는 X선 조사선량과 센서영상의 불선예도(unsharpness)를 감소하기 위하여 간접방식의 디지털 X선 센서가 출현하게 되었다. 디지털 X선 센서는 크게 형광물질의 사용 여부에 따라 간접방식과 직접방식으로 나누어진다. 간접방식은 X선이 형광물질과 반응하여 가시광선으로 변환되며, 변환된 빛 광자는 영상소자에 의해 전기적인 신호로 변환되어 영상으로 표현되는 방식이다. 그리고 직접방식은 형광물질을 사용하지 않고 X선이 직접 영상소자에 의해 영상으로 표현되는 방식이다. 직접방식은 X선이 직접적으로 영상소자에 입사되기 때문에 영상소자에 방사선손상(radiation damage)이 있으며, 조사선량이 간접방식보다 크다.

본 논문에서는, 산업 및 의료분야의 디지털 X선 시스템에 사용되는 형광물질의 종류 및 특성을 조사하고 센서의 최적의 해상능을 결정하기 위하여 센서에 입사되는 X선 에너지와 센서의 해상능을 나타내는 인자(MTF, PSF, FWHM)들을 고려하여 형광물질의 최적화 두께를 결정한다.

## 2. 형광물질

### 2.1 형광물질 종류

형광물질은 무기염결정체로서 X선이나 방사선에 노출되었을 때 빛을 발생하는 화합물이다. 이러한 형광체로서  $\text{CaWO}_4$ (calcium tungstate)와  $\text{ZnCdS}$ (zinc cadmium sulfide)를 주로 이용한다.  $\text{CaWO}_4$ 는 증감지 형광체로서,  $\text{ZnCdS}$ 는 투시형광관의 형광체 또는 간접촬영의 형광판으로 이용하고 있지만 최근 새로운 형광체의 출현으로 X선 영상증배관에는  $\text{CsI}$ (cesium iodide), 증감지 형광체로는  $\text{BaFCl}$ (barium fluorochloride),  $\text{BaSr}(\text{SO}_4)_2$ (barium strontium sulfate), Y(Yttrium)과 희토류(rare earths)인 Gd(Gadolinium), La(lanthanum)등의 이용도가 증가하고 있다. 표 1은  $\text{CaWO}_4$ 를 포함한 희토류 형광체의 종류 및 발광파장을 나타낸다.

표 1 여러 종류의 증감지 등급

제조사	상품명	형광체	발광색	감도 등급
Du Pont	Cronex Hi Plus	$\text{CaWO}_4$	청색	250
	Cronex Quanta V	$\text{La}_2\text{OBr:Tm}$	청색	320
	Quanta Fast Detail	$\text{YTao}_4\text{:Nb}$	자외/청색	400
Kodak	X-Omatic Regular	$\text{BaSrSO}_4\text{:Eu}$	청색	200
	Lanex Fine	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	녹색	100
	Lanex Regular	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$	녹색	250

## 2.2 형광물질 선정

디지털 X선 센서의 형광물질 최적화 연구에 있어서 X선 정보 획득의 원리는 아주 중요하다. 일반적으로 CCD(Charge Coupled Device)용으로 사용되는 가시광선에 감도가 높은 CCD를 사용시에는 X선에 대한 감도가 낮으므로 형광물질을 이용하여 X선을 가시광선대의 파장으로 변환시켜 CCD에서 그 정보를 획득할 수 있다. 이와 같이 형광물질의 사용으로 어느 정도의 정보 손실과 영상의 질 저하를 가져올 수 있다. 따라서, 연구를 통하여 가장 최적의 형광물질을 선정하여 적용하여야 한다. X선에 사용되는 형광체는 표 2와 같이 여러 가지가 있다. 하지만 본 연구에서는 여러가지 형광체 중에서 의료진단과 산업진단에 가장 많이 사용되는 형광체 CsI:Tl, Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb, CaWO<sub>4</sub>를 선택하여 연구하였다.

형광물질 선택에 있어서는 X선의 흡수율, 고유변환효율, 입사 X선 에너지, 사용의 용이성 등을 고려하여 선택하였다.

표 2 X선용 형광체의 특성

형광체	X선흡수		변환효율 (%)	발광 spectrum		결정특성	
	원자번호	X선흡수단(keV)		발광파장(nm)	발광색	결정형	비중
ZnCoS:Ag	30/48	9.66/26.7	19	530	녹	hexa	4.8
ZnS:Ag	30	9.66	17	450	청	hexa	3.9
CsI:Tl	55/53	35.95/33.16	10	540	녹	cuboid	4.5
CaWO <sub>4</sub>	74	69.48	5~3	420	청	tetra	6.1
BaSO <sub>4</sub> :Eu	56	37.38	6	375	자	rhombic	4.5
Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	64	50.22	13	545	녹	hexa	7.3
La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	57	38.92	12.5	545	녹	hexa	6.5
Y <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb	39	17.3	18	415, 440	청	hexa	4.9
La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Br:Tb	57	38.92	20	415, 440	청	tetra	6.3
La <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Br:Tm	57	38.92	13	460	청	tetra	6.3
BaFCl:Eu	56	37.38	13	380	자	tetra	4.7
BaFBr:Eu	56	37.38	16	390	자	tetra	5.0
HfP <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	72	65.29	11	300	자외	cuboid	4.3

### 3. Monte Carlo Code 모사

본 연구의 목표인 X선 에너지에 대한 형광물질의 최적 해상도와 흡수율을 만족하는 최적두께 도출을 위하여 이론적으로 설정되어 있는 인자들에 대한 형광물질의 MTF와 방사선 반응도에 대한 자료가 요구된다. 그래서 Monte Carlo 기법으로 형광물질에 대한 X선의 수송과 가시광선의 수송반응을 모사 할 수 있는 Code인 MCNP4A와 DETECT97을 이용하여 각 형광물질의 두께에 대한 Point Spread Function(PSF)과 Modulation Transfer Function(MTF)을 모사하였다.

#### 3.1 MCNP4A 코드

MCNP4A 코드는 중성자, 광자는 물론 전자의 수송까지도 Monte Carlo 기법으로 계산할 수 있도록 개발된 코드이다. 피사체가 각종 면(Surface)을 사용자가 정의하고 그 면을 Boolean 대수의 방법으로 특정한 부피 즉, cell을 정의할 수 있으므로 3차원의 어떠한 형태도 쉽게 계산의 대상이 될 수 있다. 또한 점, 면, 체적선원(point, surface and volume source)을 채택할 수 있으며 다양한 선원의 분포도 쉽게 선택할 수 있다. 본 연구에서는 MCNP4A 코드를 이용하여 각 입사되는 X선 에너지와 형광체의 두께 변화에 따라 흡수되는 X선 분포를 계산하였다.

#### 3.2 DETECT97 코드

DETECT97 코드는 형광물질 내에서 빛의 수송을 모사하는 Monte Carlo 기법의 코드이다. 이 코드는 평면, 원통, 원뿔 또는 구형으로 나타나는 체적의 기하학적 형상을 METAL, PAINT, POLISH, GROUND 그리고 UNIFIED의 면(surface)으로 묘사하여 빛의 움직임(이탈, 흡수, 검출)을 나타낸다. 광(light) 발생의 검출물질에서 bulk absorption, 산란 그리고 파장변동 등은 광자 평균자유행정 거리에 의해서 표현된다. 그리고 광 접촉 표면은 스넬의 반사법칙에 의해 계산된다.

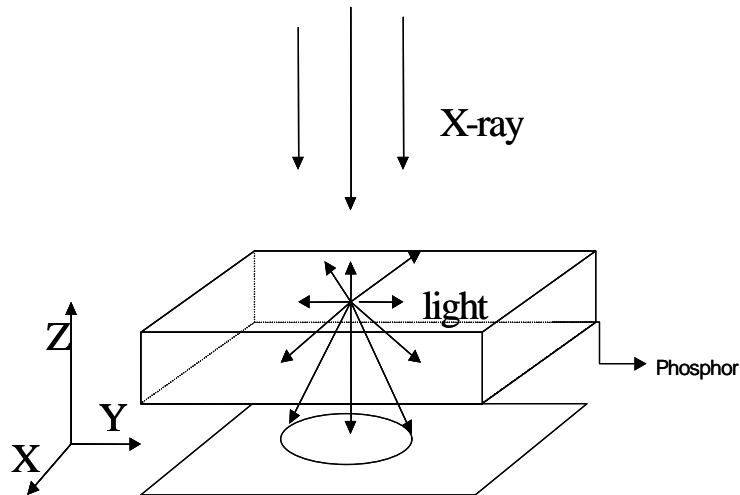
#### 3.3 모사방법

의료진단에 사용되는 X선 에너지는 보통 20 ~ 120 keV의 범위를 사용한다. 본 연구에서는 mammography와 dental 센서에 주로 사용되는 형광체  $Gd_2O_2S:Tb$ , CsI:Tl와 X선 에너지 20 keV, 40 keV에 대해 최적화 연구를 하였다. 그리고 산업진단 부분에서는 형광체  $Gd_2O_2S:Tb$ ,

CaWO<sub>4</sub>와 100 keV, 150 keV의 에너지에 대해 각 형광물질의 두께에 따라 최적화 연구를 하였다.

본 모사에서 사용한 형광물질의 크기는 5 mm × 4 mm이며, 두께는 10 ~ 100 μm 범위에서 각 10 μm 씩 증가시키면서 코드를 모사 하였다. 형광체의 기하학적 형상은 그림 1과 같이 직육면체로 가정하여 X선 에너지 분포를 계산하였다. 또한 X선 선원은 형광체 중심과 수직으로 입사된다고 가정했다.

통계적인 error 발생을 줄이기 위해서 3,000,000번의 이력수(history)를 이용하였으며, MCNP 코드에서 계산한 X선 에너지 흡수분포를 DETECT97 코드의 입력문으로 적용하여 X선 에너지 흡수지점에서의 빛 확산분포를 계산하였다. DETECT97에 계산된 빛 확산 값으로 x축에 대한 PSF(Point Spread Function)를 계산하였고 그 축에 대해서는 확산이 대칭 된다고 가정하였다.

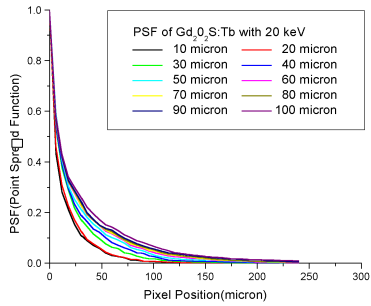


<그림 1> 형광물질 모사의 Geometry

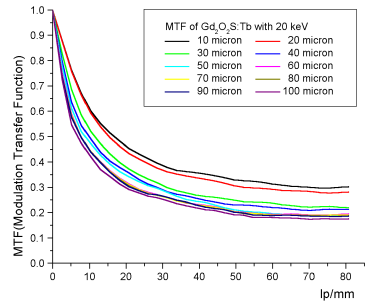
## 4. 모사 결과

### 4.1 PSF(Point Spread Function), MTF(Modulation Transfer Function) 결과

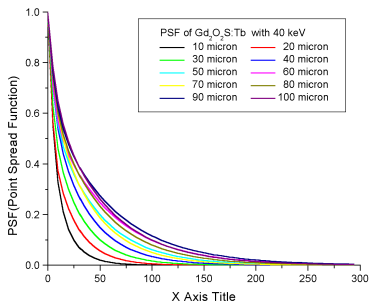
위 모사 방법으로 MCNP4A와 DETECT97 코드 실행시켜 의료진단에 사용되는 20와 40 keV의 X선 에너지에서 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb와 CsI:Tl의 형광체 두께변화에 따라 PSF와 MTF를 나타내었다. 그림 2와 4는 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb의 PSF의 결과이고 그림 3과 5는 MTF의 결과이다. 그리고 그림 6과 7은 40 keV X선 에너지에서 CsI:Tl의 PSF와 MTF를 나타낸 것이다.



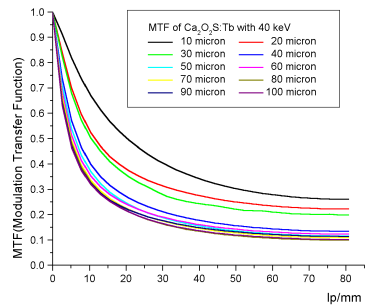
<그림 2> 20 keV X선 에너지에 따른  $Gd_2O_2S:Tb$ 의 PSF



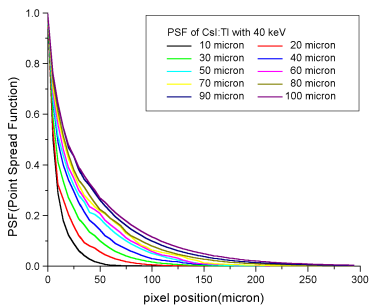
<그림 3> 20 keV X선 에너지에 따른  $Gd_2O_2S:Tb$ 의 MTF



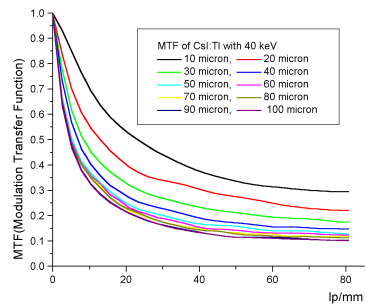
<그림 4> 40 keV X선 에너지에 따른  $Gd_2O_2S:Tb$ 의 PSF



<그림 5> 40 keV X선 에너지에 따른  $Gd_2O_2S:Tb$ 의 MTF

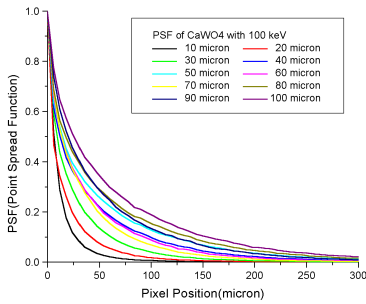


<그림 6> 40 keV X선 에너지에 따른 CsI:Tl의 PSF

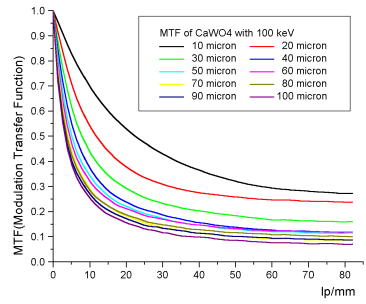


<그림 7> 40 keV X선 에너지에 따른 CsI:Tl의 MTF

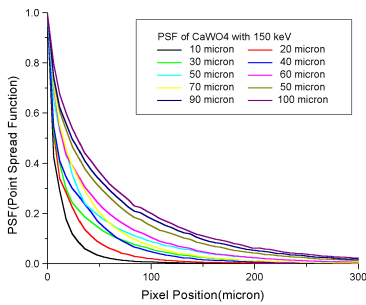
또 산업진단에 사용되는 100과 150 keV의 X선 에너지에서  $\text{CaWO}_4$ 와  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 형광체 두께변화에 따라 PSF와 MTF의 결과를 나타냈다. 그림 8, 9, 10와 11은  $\text{CaWO}_4$ 의 형광체에 대한 PSF와 MTF를 나타낸 것이고 그림 12와 13은 100 keV의 X선 에너지에서  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 PSF와 MTF를 나타낸 것이다.



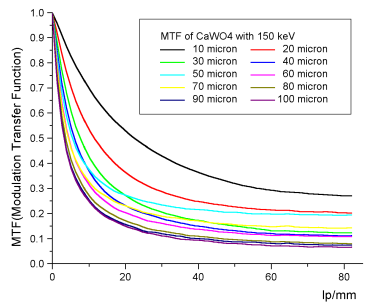
<그림 8> 100 keV X선 에너지에 따른  $\text{CaWO}_4$ 의 PSF



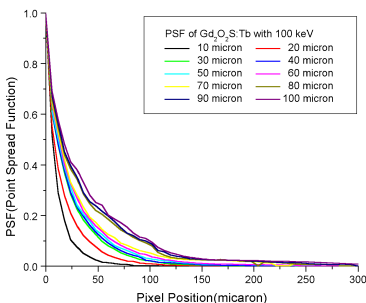
<그림 9> 100 keV X선 에너지에 따른  $\text{CaWO}_4$ 의 MTF



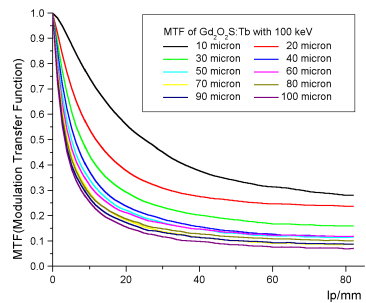
<그림 10> 150 keV X선 에너지에 따른  $\text{CaWO}_4$ 의 PSF



<그림 11> 150 keV X선 에너지에 따른  $\text{CaWO}_4$ 의 MTF



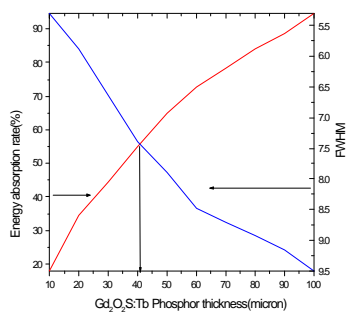
<그림 12> 100 keV X선 에너지에 따른  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 PSF



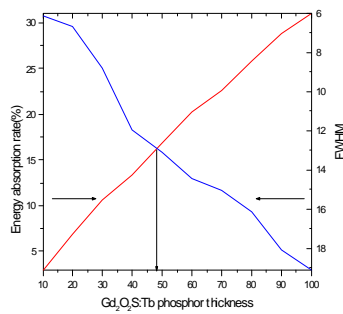
<그림 13> 100 keV X선 에너지에 따른  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 MTF

## 4.2 최적화 두께 도출

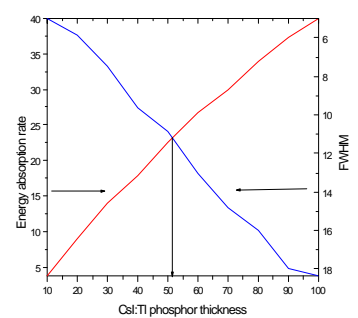
코드모사 결과인 PSF, MTF, 반치폭(FWHM)과 형광물질 두께에 따라 흡수된 X선 흡수율을 고려하여 최적의 해상도를 나타낼 수 있는 형광물질 최적두께를 나타내었다. 형광물질의 최적 두께는 10 ~ 100  $\mu\text{m}$  사이에서 결정하였다.  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 경우는 20, 40과 100 keV의 X선 에너지에서 최적두께를 결정하였고  $\text{CsI:Tl}$ 는 40 keV,  $\text{CaWO}_4$ 는 100과 150 keV의 X선 에너지에서 최적두께를 결정했다.



<그림 14> 20 keV의 에너지에서  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 최적화 두께

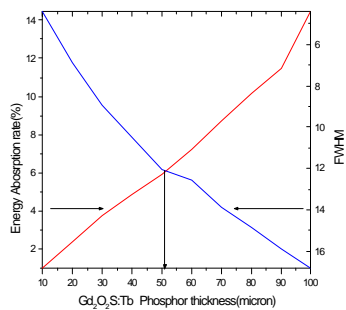


<그림 15> 40 keV의 에너지에서  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 최적화 두께

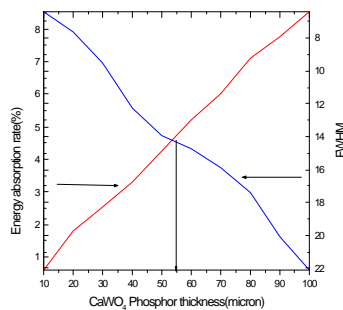


<그림 16> 40 keV의 에너지에서  $\text{CsI:Tl}$ 의 최적화 두께

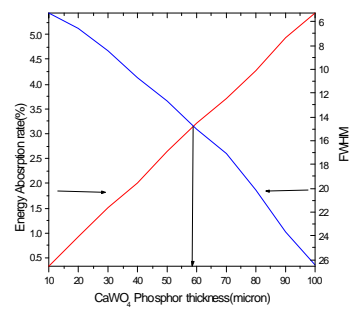
그림 14와 15는 20과 40 keV의 X선 에너지에서  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 형광체에 대한 최적두께를 나타낸 것이다. 최적두께는 40.8, 48  $\mu\text{m}$ 로 결정되었다. 그리고  $\text{CsI:Tl}$ 의 경우에는 40 keV 에너지에서 51.5  $\mu\text{m}$ 로 결정되었다.



<그림 17> 100 keV의 에너지에서  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ 의 최적화 두께



<그림 18> 100 keV의 에너지에서  $\text{CaWO}_4$ 의 최적화 두께



<그림 19> 150 keV의 에너지에서  $\text{CaWO}_4$ 의 최적화 두께



그림 17, 18과 19는  $Gd_2O_2S:Tb$ 와  $CaWO_4$ 의 형광체를 100, 150 keV의 에너지에 대해서 최적 두께를 나타낸 것이다.  $Gd_2O_2S:Tb$  경우, 100 keV의 X선 에너지에서 형광물질의 최적두께가 51  $\mu m$ 로 결정되었고  $CaWO_4$ 의 경우는 100와 150 keV 에너지에 대해서 54.5, 58.6  $\mu m$ 로 결정되었다.

## 5. 결론

본 연구논문은 디지털 X선 센서용 형광물질을 최적화하는 방법으로 센서의 해상도를 결정하는 인자들을 고려하여 형광물질 두께의 최적화 연구를 수행하였다. 형광물질은 의료진단과 산업진단에 많이 사용하는  $Gd_2O_2S:Tb$ ,  $CsI:Tl$ ,  $CaWO_4$ 의 형광체에 대하여 10 ~ 100  $\mu m$ 의 두께에서 흡수되는 X선 흡수율과 확산함수(PSF)를 고려한 반치폭(FWHM)으로 최적두께를 표 3과 같이 결정하였다. 실질적인 형광물질 최적두께는 X선 흡수율과 해상도 중 어느 곳에 비중을 더 두느냐에 따라 다르게 나타난다. 본 연구에서는 X선 흡수율과 해상도에 동일한 비중을 두어 최적두께를 결정한 것이다.

표 3 X선 에너지에 따른 형광물질 최적두께

구분	형광물질	에너지(keV)	최적두께( $\mu m$ )
의료진단 분야	$Gd_2O_2S:Tb$	20	40.8
	$Gd_2O_2S:Tb$	40	48
	$CsI:Tl$	40	51.5
산업진단 분야	$Gd_2O_2S:Tb$	100	51
	$CaWO_4$	100	54.5
	$CaWO_4$	150	58.6

동일한 형광물질에서도 입사되는 X선 에너지에 따라 흡수율과 최적두께는 다르게 나타났다. 또, 에너지가 증가함에 따라 형광물질의 최적두께는 증가되었고 X선 흡수율은 감소하였다. 의료진단 디지털 X선 영상센서에 많이 사용하고 있는  $Gd_2O_2S:Tb$ ,  $CsI:Tl$ 의 형광물질을 40 keV 동일한 에너지에서 비교해 본 결과  $CsI:Tl$ 의 경우가 X선 흡수율도 좋고 더 적은 확산을 나타내었다. 그리고 산업진단에 사용되는  $Gd_2O_2S:Tb$ ,  $CaWO_4$ 의 경우 동일한 100 keV의 에너지에서 비교해 본 결과  $Gd_2O_2S:Tb$ 이 더 좋은 X선 흡수율과 적은 확산이 나타남을 확인할 수 있다. 향후에는 형광물질의 영상실험을 통하여 코드로 모사한 최적두께와 실험한 값을 비교 분석하여 결과값에 대한 신뢰성의 입증에 필요하다.

## 6. 참고문헌

- [1] A Workman and DS Brettle, "Physical performance measures of radiographic imaging system" *Dentomaxillofacial Radiology*, Vol 26, 1997, p 139~146
- [2] Ho Kyung Kim, Gyuseong Cho, "Monte Carlo studies of metal/phosphor screen in therapeutic X-ray imaging" *Nucl. Instru. and Meth. in Phys. Res. A* 422. 1999, p 713~717
- [3] 김태우, 정진범, 황주호 "광학적으로 결합된 간접 방식 구내 치과용 X선 영상센서의 특성 개선 연구" 한국원자력학회 2000년 추계학술발표회 논문집, 2000
- [4] Robert K. Swank, "Absorption and noise in X-ray phosphor", General Electric Corporate Research and Development, 1973
- [5] Jan Lindstrom and Gudrun Alm Carlsson, "A simple model for estimating the particle size dependence of absorption efficiency of fluorescent screens" *Phys. Med. Biol.*, Vol 44, 1999, p 1353~1367
- [6] 박수성의 5명, "진단방사선의 원리", 대학서림 1998, p 197~223