

## 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 X선 변환물질의 특성 연구

김진영, 박지균, 강상식, 김소영, 정은선\*, 남상희\*\*, 강신원\*\*\*  
인제대학교 의용공학과, 인제대학교 컴퓨터응용공학부\*, 인제대학교 의료영상연구소\*\*,  
경북대학교 전기전자공학부\*\*\*

### Characteristic Study of X-ray convert material by Monte Carlo Simulation

Jin-Young Kim, Ji-Koon Park, Sang-Sik Kang, So-Young Kim, Eun-Sun Jung\*,  
Sang-Hee Nam\*\*, Sin-Won Kang\*\*\*  
Dept. of Biomedical Engineering, Inje Univ  
School of Computer Aided Science, Inje Univ\*  
Medical Imaging Research Center of Inje Univ\*\*  
School of Electronic & Electrical engineering, Kyungpook National Univ\*\*\*

#### Abstract

Today, much terminologies such as noise spectrum, Sharpness, contrast, MTF had been defined for Image quality revaluation of radiation Image. Since development of Xeroradiography In the 1970s, Digital radiation detector that use amorphous selenium was developed. The aim of this research is to analyze physical phenomenon of digital radiation detector that use amorphous selenium. Result of Monte Carlo simulations on amorphous selenium based on physical properties(creation of electron-hole pairs) by induced x-ray are described. From the simulation, intrinsic point spread function(PSF) was found and used to observe modulation transfer function(MTF). We investigated how PSF and MTF changed with various x-ray energy. This result can be used to design digital x-ray detector based on a-Se.

**Key Words** : modulation transfer function(MTF), point spread function(PSF), amorphous selenium  
Monte Carlo simulation

#### 1. 서론

오늘날 방사선 영상의 영상 평가를 위해 선예도, 대조도, 노이즈 스펙트럼 등 많은 용어들이 정의되어져 왔으며, 이는 기존 필름 스크린 방식의 방사선 영상에서 영상의 질적 평가를 위해 이용되어져 왔다. 1970년대 Xeroradiography 장치의 개발을 시초로 비정질 셀레늄을 이용한 디지털 방사선 검출기의 개발은 활발히 진행되어져 왔으며, 현재 국외

에서는 비정질 셀레늄을 이용한 디지털 방사선 검출기가 개발되어져 실제 임상에서 기존의 필름 스크린 방식의 역할을 충분히 해 내고 있는 실정이다.

본 연구는 국내 방사선 분야의 교체 전환점을 맞이하고 있는 비정질 셀레늄을 이용한 디지털 방사선 검출기의 물리적인 현상을 분석하였으며 이는 몬테카를로(Monte Carlo)방법을 이용해서 전산모

사를 했다. 전산모사해서 얻은 결과로 LSF (Line Spread Function)를 구하고, 이를 통해 MTF (Modulation Transfer Function)를 구한다. X선 에너지에 따라 LSF, MTF가 어떻게 달라지는지 알아보고, 마지막으로 광자가 흡수된 위치에 따라 흡수도를 계산하였다.

## 2. 연구 방법

X-선에 의한 a-Se 내에서의 물리적인 현상을 알아보기 위해서는 MCS(Monte Carlo Simulation)방법을 통한 구현과 평가하고자 에너지 대역에서 발생하는 광자의 상호작용 타입에 대한 연구가 필요하다. 상호작용 타입에는 크게 3가지(Rayleigh type, Compton type, photoelectric type)가 있는데 이를 고려하기 위하여 XCOM이라는 포트란으로 구성된 프로그램에 대한 분석이 필요하였다. 각각은  $\mu_p/\mu_t$ ,  $\mu_r/\mu_t$ ,  $\mu_c/\mu_t$ 의 확률로 상호작용이 일어난다.  $s(R) = -\ln R/\mu_t(E)$ 인 식을 이용하여 광자가 이동한 거리를 구할 수 있으며, 위에서 나타낸 확률을 가지고 광자가 상호작용한 타입을 구할 수 있다.

- i) Rayleigh type ;  $0 < R < \frac{\mu_r(E)}{\mu_t(E)}$
- ii) Compton type ;  $\frac{\mu_r(E)}{\mu_t(E)} < R < \frac{\mu_r(E) + \mu_c(E)}{\mu_t(E)}$
- iii) Photoelectric type ;  $\frac{\mu_r(E) + \mu_c(E)}{\mu_t(E)} < R < 1$

그리고 그 위치  $r_i$ 에서 산란 작용이 일어날 경우, 산란각  $\theta_i$ 는 미분 cross-section  $d\sigma/d\Omega$ 에 의해 결정된다. Unpolarized radiation일 경우  $\phi_i$ 는 random으로 선택될 수 있다.

우리가 구하고자 하는  $\theta_i$ 는  $\theta_i = F_{E_i}^{-1}(R)$ 에 따라 구해질 수 있으며,  $F_{E_i}^{-1}(R)$ 은 에너지  $E$ 에 따르는 광자의 산란각에 대한 누적 분포 함수의 역함수이다. 누적 분포 함수는 (eq1) 이 된다.

$$F_{E_i}(\theta) = \frac{2\pi}{\sigma(E_i)} \int_0^\theta \frac{d\sigma}{d\Omega}(v, E_i) \sin v \, dv \quad (\text{eq1})$$

여기서, rayleigh scattering일 경우의  $d\sigma/d\Omega$ 은

$$\frac{d\sigma_R}{d\Omega}(\theta, E_i) = \frac{d\sigma_T}{d\Omega}(\theta) F^2(x, Z) = \frac{r_e^2}{2} (1 + \cos^2\theta) F^2(x, Z) \quad (\text{eq2})$$

으로 주어지며, 여기서

$x(\text{\AA}^{-1}) = \sin(\theta/2) E(keV)/12.4$  이고,  $F(x, Z)$ 은 atomic form factor이다. 광자의 에너지는 rayleigh scattering인 경우에 보존됨으로  $E_{i+1} = E_i$ 이다.

광자가 Compton scattering을 할 경우, bound electrons의 compton cross-section은

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_C}{d\Omega}(\theta, E_i) &= \frac{d\sigma_{KN}}{d\Omega}(\theta) S(x, Z) \\ &= \frac{r_e^2}{2} \left(\frac{K}{K_0}\right)^2 \left(\frac{K_0}{K} + \frac{K}{K_0} - \sin^2\theta\right) S(x, Z) \end{aligned} \quad (\text{eq3})$$

이 된다.

여기서  $d\sigma_{KN}/d\Omega$ 은 Klein-Nishina scattering cross-section이고,  $r_e$ 은 고전 전자의 반지름이며,  $S(x, Z)$ 은 incoherent scattering 함수이다. 그리고  $K/K_0$ 은 입사 광자의 에너지와 산란 광자의 에너지의 비를 나타낸다.

$$\frac{K_0}{K} = 1 + \frac{E_i}{m_e c^2} (1 - \cos\theta) \quad (\text{eq4})$$

여기서  $m_e$ 는 전자의 rest mass이고,  $c$ 는 진공에서의 빛의 속도이다. 광자의 에너지 손실은 산란각  $\theta_i$ 로부터 계산할 수 있는데

$$E_{i+1} = E_i \left( \frac{K_0}{K} - \frac{2p_z}{m_e c} \sin \frac{\theta}{2} \right)^{-1} \quad (\text{eq5})$$

이 된다.  $p_z$ 은 상호 작용중의 에너지 전이에 대한 산란 전자의 momentum이다.

$$p_z = q \frac{m_e e^2}{2\epsilon_0 h} \quad (\text{eq6})$$

여기서,  $q$ 는 산란 전자의 줄어든 momentum이고,  $\epsilon_0$ 은 진공 유전율이며,  $e$ 는 전자의 charge를 나타내며,  $h$ 는 Planck 상수를 가리킨다. 위 식들을 이용하여 우리는 a-Se 내에서 광자가 진행하는 방향과 거리 모두를 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 광자가 검출되는 위치를 통해 PSF(Point Spread Function)을 구할 수 있고 이를 통해 MTF(Modulation Transfer Function)를 구하였다.

또한 X선 에너지에 따라 PSF, MTF가 어떻게 달라지는지 알아보고, 마지막으로 광자가 흡수된 위치에 따라 흡수정도를 계산하였다. 본 연구에서는 이 프로그램을 단순화시켜 혼합물과 화합물에 대한 정보는 없애고, MCS에 적용시키기 위해 포트

란(Fortran)으로 구성된 코드를 연구 목적에 맞게 Visual C++로 다시 개발하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 프로그램의 구성

에너지, 밀도, 물질의 두께 등 여러 가지 파라메타를 달리하여 a-Se 내에서의 광자와 물질의 상호작용을 통한 물리적 현상들을 전산모사 하기 위해 메뉴창, 파라메타 입력창, 실제 광자의 검출위치 창 등이 필요했다.

그림 1에서 전산모사를 하기 위한 사용자로부터 인자들을 입력 받는 창이다 에너지, 물질, 셀레늄의 두께, 밀도 등을 입력할 수 있게 하였다.

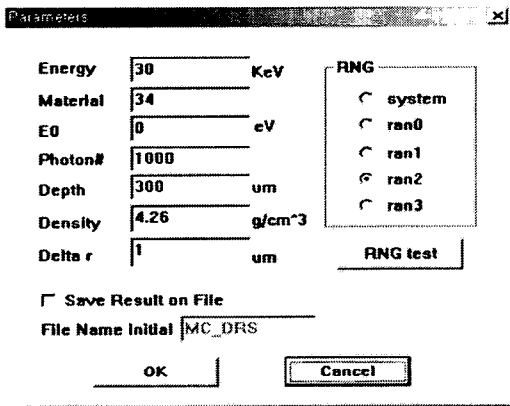


그림 1. MCS를 하기 위한 다양한 파라메타 입력창

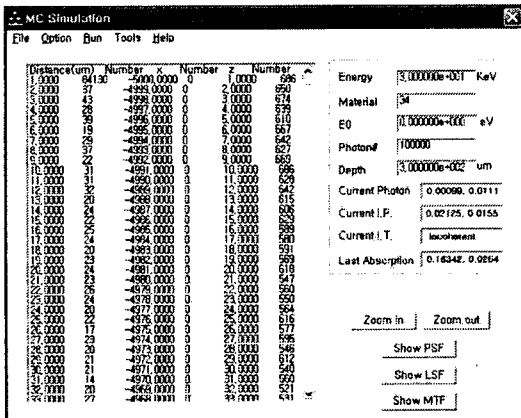


그림 2. MCS의 메인창

그림 2는 프로그램의 메인 창으로 메뉴를 통해

정보를 입력하고 직접 그림을 볼 수 있는 실행 메뉴가 있다. 오른쪽에는 우리가 입력한 파라메타의 정보를 제공하며 현재의 광자의 위치를 알려주기도 한다. 왼쪽에서는 두께에 따라 광자가 흡수된 정도를 나타내는 리스트 박스가 제공된다.

#### 3.2 프로그램 분석

위의 프로그램을 통해 원하는 에너지, 다양한 인자들에 따르는 광자의 상호작용을 엿볼 수 있었다. 에너지에 따라 a-Se 내에서의 고유 MTF가 어떻게 바뀌는지 메스메티카 프로그램을 이용하여 그래프를 비교, 분석해보았다.

실제 데이터는 Energy별로(5 keV, 10 keV, 20 keV, 30 keV, 50 keV, 80 keV, 100 keV), Density 4.26g/cm<sup>3</sup>인 셀레늄에 100000개의 광자를 쪼였을 때 실제 상호작용하는 모습을 전산모사 하였다. 정확하게 데이터를 뽑기 위하여 같은 조건으로 10번씩 같은 프로그램을 수행하여 데이터를 산출하였다. Fig 3는 그 중 30 keV일 때를 전산모사한 것으로 100000개 중 86257개가 검출되었으며 노란색 점들이 검출된 점의 위치를 나타낸 것이다.

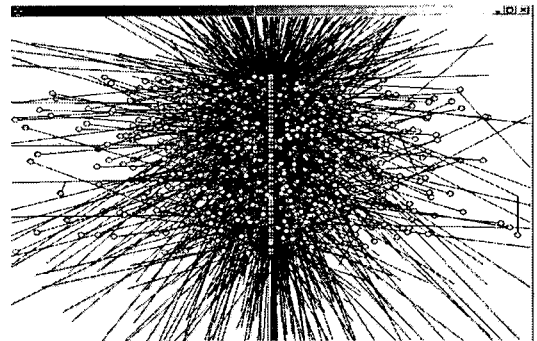


그림 3. Se 두께 300 $\mu$ m, 100,000개의 광자일 때의 검출된 광자

그림 3은 Energy 30 keV, Density 4.26g/cm<sup>3</sup>인 셀레늄에 100000개의 광자를 쪼였을 때 실제 상호작용하는 모습을 시뮬레이션 한 것으로 100000개 중 86257개가 검출되었고 흰색 부분이 셀레늄 내부를 뜻하며 노란색 점들은 검출된 점의 위치를 나타낸 것이다. 데이터 비교를 통하여 에너지가 높아질수록 두께가 얇아질수록 상호작용이 이뤄지는 광자의 개수가 줄어들음을 알 수 있었다.

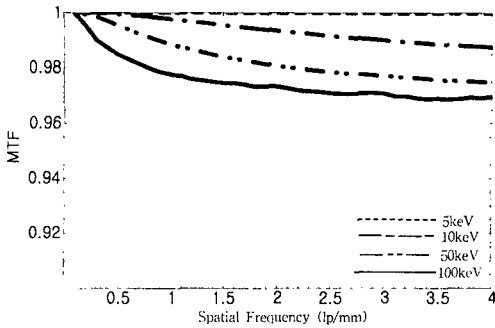


그림 4. 에너지에 따른 MTF 비교

그림 4.는 얻어진 데이터를 이용해서 에너지에 따른 MTF를 측정, 비교한 것으로 에너지가 높아질수록 MTF가 떨어짐을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문은 비정질 셀레늄 (a-Se)을 기반으로 한 직접 변환형 디지털 방사선 검출기의 개발에 있어 X선에 의한 셀레늄 내에서의 발생된 물리적 현상을 이해하고자 하였다. 몬테카를로(Monte Carlo) 전산모사를 통하여 a-Se 내에서의 X선 산란, 광전효과를 기술하는 코드를 개발, a-Se내에서의 고유강도 분포함수(Intrinsic Point Spread Function)를 구할 수 있었고 이를 이용하여 a-Se의 고유 MTF(Modulation Transfer Function)를 구했다.

또한 여러 가지 X선 에너지에 따라 MTF가 어떻게 달라지는가를 고찰해 봤으며, 에너지가 작을수록 두께가 두꺼울수록 많은 신호량이 검출됨을 알 수 있었다.

이는 디지털 영상이 가지는 본질적인 영상의 화질적 측정 평가인 MTF를 구함으로써 a-Se를 기반으로 하는 디지털 방사선 검출기 설계 시 기본 자료로써 활용되어 질 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구논문은 정보통신부의 출연금으로 수행한 정보통신선도기반기술개발사업의 연구결과입니다.

#### 참고 문헌

[1] Knoll, Radiation Detection and Measure

ment, Chap.3, Wiley Pub(3rd). 1999

[2] 이형구, 신경섭, 무정형 실리콘(a-Si : H) 디지털 X-선 영상기기의 개발을 위한 Monte Carlo 컴퓨터 모의실험연구, J. of KOSOMBE Vol 19, No. 3 1998 : 225-232

[3] J. H. Hubbell, Wm. J. Veigele, E. A. Briggs, et al, Atomic Form Factors, Incoherent Scattering Functions and Photon Scattering Cross Section, J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 4, No. 3, 1975

[4] Lee DL, Cheung LK, Jeromin LS, Palecki E. Imaging Performance of a Direct Digital Radiographic Detector Using Selenium and a Thin-Film-Transistor Array. Computer Assisted Radiology 1996, 41~46

[5] C Haugen, S O Kasap, J Rowlands. Charge transport and electron-hole-pair creation energy in stabilized a-Se x-ray photoconductors. J Phys, D:Appl.Phys. 1999, 32 : 200~207

[6] M. Ljungberg, S-E. Strand and M. A. King, Monte carlo calculations of x-ray induced recombination in amorphous selenium, J. Phys. D: Appl. Phys. 33, 2000 : 1417-1423