

# Monte Carlo Simulation for Radiation Protection Sheets of Pb-Free

Kwon Su Chon \*

Department of Radiological Science, Daegu Catholic University

Received: August 14, 2017. Revised: August 23, 2017. Accepted: August 31, 2017

## ABSTRACT

Radiation protection equipment has widely used to protect human body from radiations, for example X-ray and gamma ray. The material of the radiation protection equipment is mainly lead (Pb) which has brought out lead poisoning and pollution when the equipment is fallen into disuse. This problem makes research and development find new Pb-free materials for use of radiation protection. Manufacturing and evaluation processes for developing those material were carried out repletely until obtaining the performance of protection rate. In this study, combination possibility of shielding material was studied using Geant4 monte carlo simulation. X-ray tube under the same condition in the real measurement of the protection rate was simulated, and X-ray tube spectrum was obtained. The X-ray tube spectrum was applied to study on the protection rate and lead equivalent. The porosity effect was simulated, and was one of key factors to determine protection rate or lead equivalent in radiation protection sheet of Pb-free.

Keywords: Radiation Protection Material, Pb-Free, Monte Carlo Simulation, Geant4

## I. INTRODUCTION

방사선이 인체에 노출될 경우 DNA의 사슬 손상이나 생·화학적 변화가 유발될 수 있기<sup>[1-4]</sup> 때문에 진단목적이나 치료목적이 아닌 경우에는 직접 노출되는 일이 없도록 주의를 기울여야 한다. 따라서 방사선의 사용목적 이외에 무작위로 발생하는 산란 방사선이나, 환경적 요인으로 발생하는 방사선이 인체에 노출되지 않도록 차폐하는 것이 매우 중요하다.<sup>[5]</sup>

의료기관 특히 병원에서 방사선을 취급하는 종사자들은 방사선으로부터 인체를 보호하기 위하여 주로 납으로 만들어진 납 앞치마(Apron)와 같은 보호 장구를 사용한다.<sup>[6-8]</sup> 납으로 만들어진 앞치마는 방사선 차폐효과가 뛰어나지만 무겁고 폐기 시 환경오염의 문제가 발생하여<sup>[9]</sup> 방사선의 차폐효과와 편리성 등을 모두 만족하는 무연(Fb-Free) 차폐 소재 개발이 꾸준히 진행되고 있다.<sup>[10-13]</sup>

무연 방사선 차폐 소재의 개발은 무연 방사선 차

폐 물질을 혼합하여 합성수지로 만들고, 실험적으로 평가하고, 그 결과를 피드백(Feed-back)하여 배합 및 조성을 조정하여, 새로운 조건으로 재제작하고 평가하는, 경험에 기반을 둔 방법을 주로 사용해왔다. 이러한 방법은 경제적·시간적 손실이 매우 크기 때문에 이론적으로 예상 차폐율 또는 납당량을 얻도록 소재를 배합한 다음 전산모사(Simulation)로 평가하고 예상한 효과를 나타낸다고 판단되면 실제 무연 시트를 만들어 차폐율과 납당량을 평가하는 방향으로 연구가 점차 바뀌고 있다.<sup>[14-15]</sup>

본 논문은 무연 방사선의 차폐효과를 실제 실험에 사용되는 환경과 유사하게 전산모사 하는 방법을 제시한 것이다. 이 방법을 사용하면 실험과 비슷한 측정결과를 얻을 수 있어 무연 방사선 차폐소재 개발에 시간적·경제적 손실을 최소화 할 수 있을 것이다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. 몬테카를로 전산모사

\* Corresponding Author: Kwon Su Chon

E-mail: kschon@cu.ac.kr

Tel: +82-53-850-2521

방사선을 전산모사 하기 위한 대표적인 코드로 MCNPX와 Geant4<sup>[16-17]</sup>가 많이 활용되고 있다. 특히 Geant4는 C++기반으로 사용자가 직접 코드를 작성해야하는 어려움이 있지만, 다양한 실험 상황을 전산모사 할 수 있는 장점이 있어 고에너지 입자실험 뿐만 아니라 의료분야에서 광범위하게 활용되고 있다.<sup>[18-20]</sup>

Geant4는 여러 개의 필수 클래스(Class)들이 있으면, 상속을 통하여 구체화 클래스로 구현한 후 사용한다. Geant4에서는 입자의 진행을 추적하기 때문에 계산시간이 매우 오래 걸린다. 이를 개선하기 위해 멀티 스레딩 기법을 사용하였다. 아래의 Table 1은 사용된 컴퓨터 사양과 Geant4의 버전을 나타낸 것이다.

Table 1. Specifications of the computer used in this study and Geant4 version.

Components	Specification	Remarks
CPU	Intel i7 X990	Hex-core
Clock Speed	3.47 GHz	
Memory	16 GB	
OS	Scientific Linux 6.9	
Geant4	Version 10.01	

## 2. 구조 배치

전산모사에 사용될 실험 배치는 DetectorConstruction<sup>[16,17]</sup> 구체화 클래스에 구현 되었고, Fig. 1과 같은 배치를 갖도록 하였다.

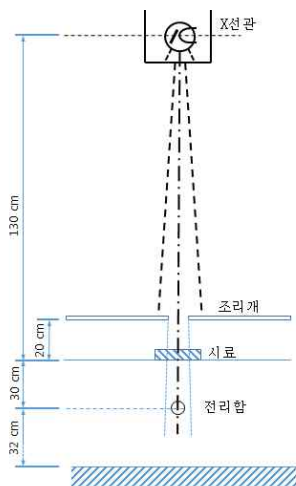


Fig. 1. Geometry for measuring protection of radiation.

이 배치는 방사선 방호용품류(예, 납 앞치마)의 납당량 측정방법(KS A 4025)과 동일한 구조 및 거리를 갖는다. 차폐율 및 납당량 측정을 위해 사용한 엑스선관 장치는 병원에서 사용하고 있는 일반 촬영용 엑스선장치와 동일하며, 방사선의 조사선량을 측정하기 위해 전리함을 두었다.

관전압이 150 kV 미만인 방사선 방호에 사용되는 제품의 시험은 관전압 100 kV, 총여과 0.25 mm Cu 이상인 엑스선을 사용하도록 규정하고 있어 엑스선관에서 발생하는 엑스선 스펙트럼을 먼저 얻어 차폐 시료의 평가에 사용하였다.

## 3. 차폐율 계산

방사선 차폐소재의 성능을 결정하는 차폐율은

$$\left(1 - \frac{I}{I_0}\right) \times 100\% \quad (1)$$

로 계산된다. 여기서  $I_0$ 는 시료 없이 엑스선관으로부터 직접 전리함에 도달하는 광자(직접빔)의 세기를 나타낸 것이고,  $I$ 는 차폐재(또는 표준납)를 위치시키고 차폐재를 투과해서 전리함에 도달하는 광자의 세기를 나타낸다.

## III. RESULT

### 1. 엑스선관 전산모사

차폐율의 전산모사는 실험으로 직접 시료를 측정하는 것과 같은 구조 또는 방법으로 수행해야 의미가 있다. Fig. 2는 엑스선관의 전산모사를 위한 구조를 나타낸 것이다.

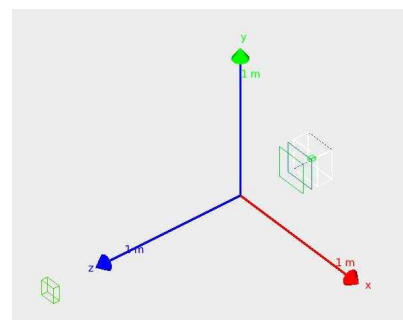


Fig. 2. Geometry for Geant4 simulation

엑스선관의 양극으로 텅스텐(W)을 사용하고 각도를 12° 기울어지게 한 상태에서 (-1, 0, 0) 방향으로  $2.1 \times 10^9$ 개의 전자(4 bytes int형 정수가 가질 수 있는 최대값 즉, 입사 시킬 수 있는 최대 전자의 개수)를 엑스선관의 양극으로 100 keV의 운동에너지를 갖도록 하여 입사시킨다. 이는 맥동을 고려하지 않은 경우 엑스선관의 양극에 100 kV를 인가했을 때의 환경과 동일하다. 검출기에서 얻어지는 엑스선의 에너지 스펙트럼은 Fig. 3과 같다. Fig. 2에서 1.0 mm 두께의 Be 윈도우 및 0.25 mm 두께의 구리 필터가 엑스선관 앞단에 설치되어 있고, 0.25 mm Cu로 여과되기 때문에 낮은 에너지(대략 30 keV 이하)는 대부분 제거되는 것을 확인할 수 있고, 전체적으로 광자의 개수가 상당히 줄었다는 것을 알 수 있다. 텅스텐 스펙트럼에서 텅스텐의 특성 에너지 피크들이 정확한 위치(59.3 keV, 67.2 keV)에 나타나고 있는 것을 알 수 있으며 제동복사의 형태도 잘 알려진 것과 같이 직선에 가까운 1/에너지의 형태를 가진다는 것도 확인된다.<sup>[21]</sup>

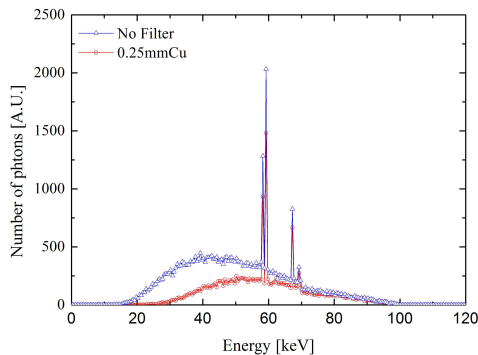


Fig. 3. X-ray tube spectrum for electrons of 100 keV energy.

## 2. 표준 납(Pb) 시트에 대한 전산모사

엑스선관의 에너지 변환 효율이 0.7% 이하인 것을 감안하고, 검출기에 입사하는 입체각을 고려한다면 실제 검출기에 도달하는 광자의 개수는 매우 적다. 따라서 엑스선관에 입사하는 전자 1개에 대한 스펙트럼으로 표시하고 전체 스펙트럼의 광자 개수가  $1 \times 10^7$ 개가 되도록 하여 차폐재료 및 납 시트의 차폐율 전산모사에 사용하였다.

엑스선관의 스펙트럼을 0.25 mmPb의 시트(Sheet)

에 입사하도록 하여 검출되는 광자의 개수를 측정하였다. Fig. 4와 같이 검출기에서 검출되는 광자는 주로 높은 에너지를 갖는 엑스선임을 알 수 있고, 그 개수도 입사 광자에 비해 매우 적음을 알 수 있다. 특히 88.0 keV 근방에서 납의 흡수단(Absorption edge)으로 인해 스펙트럼의 갑작스런 변화가 관찰되는 것을 통해 스펙트럼이 정상적으로 전산모사되었다는 것을 알 수 있다.

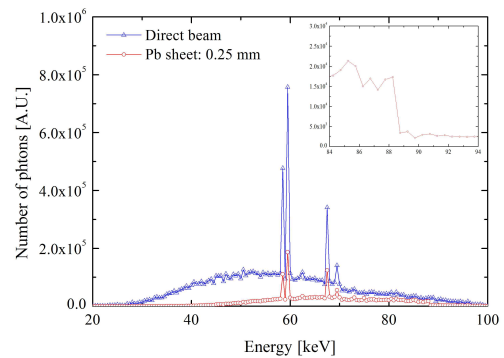


Fig. 4. X-ray spectrum after passing standard Pb sheet of 0.25 mm in thickness.

차폐율을 계산하는 Eq(1)을 이용하면 0.25 mm 두께의 납 시트의 차폐율은 73.73%였다. 만약 납의 두께가 5% 증가하면 (0.2525 mm) 차폐율은 74.91%가 되고, 납 두께가 10% 증가하면(0.275 mm) 차폐율이 76.21%가 되기 때문에 사용되는 표준납의 두께를 정확히 보정하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있다. Table 2는 두께 0.2 mm, 0.25 mm, 0.3 mm 두께의 표준납에 대한 검출기에서의 조사선량을 나타낸 것이다.

Table 2. Exposure after passing standard Pb of three thickness.

Components	Direct beam	Pb 0.20mm	Pb 0.25mm	Pb 0.30mm
Total charge (nC)	2.766	0.916	0.733	0.592
Exposure (nR)	0.841	0.279	0.223	0.180
Protection rate (%)	-	66.825	73.484	78.597

\* Direct Beam after passing 0.25mmCu filter

## 3. 무연(Pb-Free) 시트에 대한 전산모사

납을 대신해서 텅스텐(W)과 비스무스(Bi)를 혼합

한 무연 차폐재를 전산모사 하였다. Table 3은 두께 0.25 mm에 대해 각 혼합분포에 따른 전리함에서 검출되는 조사선량을 나타낸 것이다. 텅스텐의 비율이 차폐율에 더 큰 영향을 준다.

Table 3. Protection rate according to mixing rate between tungsten and bismuth.

Components	Direct beam	Mixing rate (W : Bi)			
		100:0	95:5	90:10	85:15
Total charge (nC)	2.766	0.338	0.344	0.351	0.359
Exposure (nR)	0.841	0.103	0.104	0.107	0.109
Protection rate (%)	-	87.781	87.577	87.325	87.026

\* Direct Beam after passing 0.25mmCu filter

차폐율은 측정되는 조사선량으로 구해지기 때문에 이 조사선량과 같은 값을 주는 표준납의 두께를 내삽 또는 외삽을 통해 구할 수 있다. 텅스텐 95%와 비스무스 5%로 된 0.25 mm 두께 차폐재는 0.38 8 mmPb와 같아진다.

Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 높은 에너지에서 텅스텐은 59.3 keV, 67.2 keV의 흡수단으로 인해 방사선 차폐에 매우 효과적임을 알 수 있다. 비스무스도 77.1 keV와 87.3 keV에 흡수단이 위치하기 때문에 차폐효과가 있으나 텅스텐의 밀도보다 낮아, 텅스텐 보다는 그 효과가 떨어진다. 그러나 비스무스는 입자의 크기를 작게 하여, 예를 들면 0.5  $\mu\text{m}$ 로 하여 50  $\mu\text{m}$  크기의 텅스텐과 혼합하면 텅스텐 입자 사이의 공극을 줄여주는 역할을 할 수 있어 실제 차폐효과 감소하지 않을 것이다.

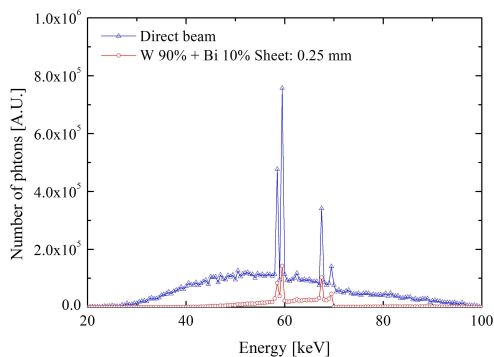


Fig. 5. X-ray spectrum after passing Pb-free sheet of 0.25 mm in thickness.

비스무스는 무연납 시트의 공극률을 줄이기 위해 사용되기 때문에 공극률에 따른 차폐율의 변화를 몬테카를로 전산모사 하였다. 텅스텐 90%와 비스무스 10%로 혼합된 재료에 공기 기포가 포함되도록 하여 시뮬레이션 하였다. Table 4는 공극률에 따른 차폐율의 변화를 나타낸 것으로, 공극률이 증가할수록 차폐율은 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다.

Table 4. Protection rate for porosity

Components	Porosity (W: 90%, Bi: 10%)				
	0%	2.5%	5%	7.5%	10%
Total charge (nC)	0.351	0.379	0.418	0.445	0.481
Exposure (nR)	0.107	0.115	0.125	0.135	0.146
Protection rate (%)	87.325	86.289	85.113	83.896	82.601

#### IV. DISCUSSION

150 keV 이하에 사용되는 방호용품류(예, 납 앞치마)의 납당량 및 차폐율 측정은 100 kV 관전압, 200 mA 관전류, 0.1 s 노출시간을 적용해서 구한다. 엑스선관에서 발생하는 광자를 전산모사하기 위해  $2.1 \times 10^9$ 개의 전자를 입사시켜 광자 스펙트럼을 획득하였다. 이 스펙트럼은 3.36 pA의 전류에 의해 생성된 것과 동일하다. 200 mA의 실험조건에서 차폐율 및 납당량이 측정되기 때문에 전자 한 개당 광자 발생을 구한 다음, 200 mA의 전류에 대응하는 전자 개수로 적용하면 실제 엑스선관의 조건을 모사할 수 있다. 예를 들면 0.25 mmCu의 경우  $W_K\alpha$ 의 1,482개 광자는  $8.82 \times 10^{10}$ 개의 광자로 변환된다. C++의 int형 정수의 한계로 인해 이렇게 많은 광자를 전산모사하기 어렵기 때문에 상대적으로 적은 수의 광자를 이용하여 계산을 수행하였다. 그러나 결과는 Eq (1)과 같이  $I/I_0$ 의 비에 의해 결정되기 때문에 두 결과는 통계적 요동을 제외하고는 거의 동일하게 된다.

전통적으로 방호용품은 납당량을 측정하는 경우가 많다. 납당량을 측정하기 위해서 사용되는 표준납 시트의 두께가 매우 정확하게 보정되어야 한다. 납 시트는 매우 연하고 두께를 정밀하게 측정하기

가 쉽지 않기 때문에 표준납의 두께 오차가 발생하게 된다. 이 두께의 오차가 상대적으로 큰 납당량 차이를 유발하게 된다. 따라서 사용되는 표준납의 두께 보정은 납당량 측정에 중요한 절차라는 것을 알 수 있다.

텅스텐 양극에서 발생된 엑스선 스펙트럼을 이용하여 무연재료로 선택된 텅스텐 차폐재를 사용하여 차폐효과를 전산모사 하였다. 69.5 keV의 텅스텐 흡수단의 위치 때문에 높은 에너지의 엑스선이 효과적으로 제거된 것을 Fig. 5를 통해서 확인할 수 있다. 만약 비스무스를 주 재료를 사용한다면, 비스무스의 흡수단이 90.5 keV에 위치하고 있어 에너지가 90.5 keV 이상의 엑스선 제거에 효율적이기 때문에 텅스텐을 주 재료로 사용하는 것 보다 차폐효과가 떨어질 것이다. 따라서 무연 차폐재의 주 재료를 선정할 때 흡수단의 위치를 먼저 파악하는 것이 차폐효과 측면에서 중요함을 알 수 있다.

실제 차폐재는 합성수지 형태의 시트로 만들어진다. 여기서는 순수한 텅스텐과 비스무스의 두께 0.25 mm에 대한 것이다. 합성수지의 비율이 전체 두께의 30%라고 하면, 실제 텅스텐-비스무스 차폐 시트의 두께는 0.357 mm가 된다. 순수 차폐 재료에 대한 전산모사의 결과를 통해 합성수지와 비율을 조정하면 실제 차폐재의 두께를 환산할 수 있다. 반대로 전체 차폐 시트의 두께를 결정하고 필요한 합성의 비율도 계산을 할 수 있다.

## V. CONCLUSION

Genat4 몬테카를로 전산모사를 통해 무연 방사선 차폐소재의 차폐율 및 납당량을 평가하는 방법을 제시하였다. 차폐율 및 납당량 평가에 사용되는 100 kV관전압 조건에서  $2.1 \times 10^9$ 개의 전자를 입사시켜 엑스선관의 광자 스펙트럼을 획득하였다. 이론적인 텅스텐의 특성 방사선 위치와 동일한 에너지에서 특성 방사선이 얻어졌고 및 1/에너지의 제동복사의 형태를 갖는다는 것을 확인하였다. 이 스펙트럼을 무연 소재인 텅스텐과 비스무스 혼합 비율에 대한 납당량과 차폐율을 평가하였다. 텅스텐의 함량이 높을수록, 공극률이 낮을수록 높은 차폐효과를 나타내었다.

납당량 측정에 있어 표준납의 두께 보정이 매우 중요하였고, 납당량의 부정확한 측정의 요인이 될 수 있음을 보였다. 무연 차폐재를 투과한 엑스선의 조사선량을 측정함으로써 차폐율을 계산하였고 이와 동등한 값을 주는 납당량을 계산하였다.

요구하는 납당량 또는 차폐율을 사전에 전산모사함으로써 실제 제작과정에서의 제작 횟수를 최소화 할 수 있을 것이다. 전산모사 과정에서 고려하지 못한 차폐재의 두께 불균일성 등의 인자들을 추가로 함으로서 전산모사의 결과를 향상시키고, 실제 측정 결과 사이의 차이를 최소화 할 수 있을 것이다.

## Acknowledgement

본 연구는 중소기업기술개발사업(해외수요처연계기술개발사업, No. 2319977)의 지원에 의해 수행되었다.

## Reference

- [1] R. Telule, "Radiation-induced DNA Damage and Its Repair," *International Journal of Radiation Biology and Related Studies in Physics, Chemistry and Medicine*, Volume 51, No. 4, pp. 573-589, 1987.
- [2] P. A. Riley, "Free Radicals in Biology: Oxidative Stress and the Effects of Ionizing Radiation," *International Journal of Radiation Biology*, Volume 65, No. 1, pp. 27-33, 1993.
- [3] D. T. Goodhead, "The Initial Physical Damage Produced by Ionizing Radiations," *International Journal of Radiation Biology*, Volume 56, No. 5, pp. 623-634, 1989.
- [4] A. C. Upton, "The Biological Effects of Low-Level Ionizing Radiation," *Scientific American*, Vol. 246, No. 2, pp.41-49 1982.
- [5] A. Martin, S. Harbison, K. Beach, R. Cole, *AN INTRODUCTION TO RADIATION PROTECTION*, 6th Ed., CRC Press, FL, 2012.
- [6] E. Vano. L. Gonzalez, E. Guibelalde, J. Fernández, J. Ten, "Radiation exposure to medical staff in interventional and cardiac radiology," *The British Institute of Radiology*, Vol. 71 pp.954-960, 1998.

- [7] J. Heron, R. Padovani, I. Smith, R. Czarwinski, "Radiation protection of medical staff, European," *Journal of Radiology*, Vol. 76, pp.20-23, 2010.
- [8] B. Schueler, "Operator Shielding: How and Why," *Techniques in Vascular and Interventional Radiology*, Vol. 13, pp.167-171, 2010.
- [9] E. Millstone, J. Russel, "Lead toxicity and public health policy," *Perspectives in Public Health*, Vol. 115, pp.347-350, 1995.
- [10] K. Kirdsiri, J. Kaewkhao, N. Chanthima, P. Limsuwana, "Comparative study of silicate glasses containing Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO and BaO: radiation shielding and optical properties," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 38, pp.1438-1441, 2011.
- [11] N. Chanthima, J. Kaewkhao, P. Limsuwan, "Study of photon interactions and shielding properties of silicate glasses containing Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BaO and PbO in the energy region of 1 keV to 100 GeV," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 41, pp.119-124, 2012.
- [12] S. Kaewjang, U. Maghanemi, S. Kothan, H. Kim, P. Limkitjaroenporn, J. Kaewkhao, "New gadolinium based glasses for gamma-rays shielding materials," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 280, pp.21-26, 2014.
- [13] P. Kaur, D. Singh, T. Singh, "Heavy metal oxide glasses as gamma rays shielding material," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 307, pp.364-376, 2016.
- [14] H. Mori, K. Koshida, O. Ishigamori, K. Matsubara, "Evaluation of the effectiveness of X-ray protective aprons in experimental and practical fields," *Radiological Physics and Technology*, Vol. 7, pp.158-166, 2014.
- [15] M. Zuguchi, K. Chida, M. Taura, Y. Inaba, A. Ebat, S. Yamada, "Usefulness of non-lead aprons in radiation protection for physicians performing interventional procedures," *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 131, pp.531-534, 2008.
- [16] S. Agostinelli, *et al.*, "Geant4—a simulation toolkit," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 506, No. 3, pp. 250-303, 2003.
- [17] J. Allison *et al.*, "Geant4 developments and applications," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 53, pp.270-278, 2006.
- [18] V. Ivanchenko, "Geant4 toolkit for simulation of HE P experiments," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 502, pp.666-668, 2003.
- [19] H. Jiang, H. Paganetti, "Adaptation of GEANT4 to Monte Carlo dose calculations based on CT data," *Medical Physics*, Vol. 31, pp.2811-2818, 2004.
- [20] E. Poon, F. Verhaegen, "Accuracy of the photon and electron physics in GEANT4 for radiotherapy applications," *Medical Physics*, Vol. 32, pp.1696-1711, 2005.
- [21] M. Ay, M. Shahriari, S. Sarkar, M. Adib, H. Zaidi, "Monte carlo simulation of x-ray spectra in diagnostic radiology and mammography using MCNP4C," *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 49, pp.4897-4917, 2004.

## 무연 방사선 차폐 시트에 대한 몬테카를로 전산모사

천권수\*

대구가톨릭대학교 방사선학과

### 요 약

방사선 특히, 엑스선 또는 감마선으로부터 인체를 보호하기 위해 납(Pb)으로 된 보호 장구를 광범위하게 사용해왔다. 최근 납 중독 및 환경오염의 문제로 납을 대신하는 무연 방사선 차폐재의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 차폐재의 성능 확보를 위해서는 제작 및 평가의 순환 사이클을 반복하게 된다. 본 연구는 실제 무연 방사선 차폐소재의 제작에 앞서 차폐재의 성능을 몬테카를로 전산모사를 통해 확인함으로써 가능한 차폐소재의 조합을 연구하였다. 방사선 차폐소재의 평가에 사용되는 조건으로 엑스선관을 Geant4를 이용하여 전산모사하고 획득된 광자 스펙트럼을 이용하여 텅스텐과 비스무스의 조합에 따른 차폐소재의 성능을 평가하였다. 차폐소재의 공극에 따른 성능 저하도 평가하였다. 방사선 차폐 소재 개발 시 공극률을 줄이는 것이 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

중심단어: 방사선 차폐 소재, 무연(Pb-Free), 몬테카를로 전산모사, Geant4