

## Absorbed Spectrum Comparison of Lead and Tungsten in Continuous X-ray Energy using Monte Carlo Simulation

Kyotae Kim, Sangsik Kang, Sicheul Noh, Bongjae Jung, Changhoon Cho, Yeji Heo, Jikoon Park

*Department of Radiological Science, International University of Korea*

## 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 연속 엑스선 에너지에서 납(Pb)과 텅스텐(W)의 흡수 스펙트럼 비교 연구

김교태, 강상식, 노시철, 정봉재, 조창훈, 허예지, 박지훈

한국국제대학교 방사선학과

### Abstract

In 1895, the discovered X-ray is used for not only in this field of medicine wide but also field. The detection of radiation after, people realized the risk of the radiation exposed recommended the principle about the protection of radiation by the part of the effort for lowering the radiation exposure. In this recommendation, all unnecessary radiation exposure have to be prevented by All doses include the protection of radiation, general idea of applicable two kinds of that it has to low maintain. Presently, in the General X-ray room of the clinical, the lead (Pb) was used for the shielding, However, because it had the problem of the lead poisoning which is fatal in the human body, the alternatives was showed. and Among them, the material that it is the tungsten was presented. in this research, the absorbed spectrum according to the thickness in the continuous X-ray energy of the tungsten which is not harmful to the human body through the Monte Carlo simulation, tried to compare with the absorbed spectrum of the lead (Pb).The tungsten confirmed that simulation presumption than result lead in the whole domain that absorbed probability was higher and it is considered that tungsten shows the absorbed efficiency higher than the lead in particularly, 70 keV ~ 90 keV and the tungsten is more useful to the X-ray energy cover of the high energy diagnostic area.

Key Words: Monte Carlo Simulation, Absorbed Spectrum, Lead, Tungsten, Saturnism

### 요약

1895년에 발견된 X-ray는 현재 의료 분야 뿐 아니라 광범위한 분야에 이용되고 있다. 방사선의 발견 이 후 사람들은 방사선피폭의 위험성을 인식하게 되었고 방사선 피폭을 낮추기 위한 노력의 일환으로 방사선 방위에 관한 원칙을 권고하였다. 이 권고안에서는 모든 불필요한 피폭은 방지되어야 하고, 모든 선량은 적용 가능한 한 낮게 유지해야 한다는 두 가지의 방사선 방어 기본 개념을 포함하고 있다. 현재 임상 일반검사실에서는 차폐를 위하여 납(Pb)을 사용하고 있지만 인체에 치명적인 납 중독의 문제점을 가지고 있어 대체 물질이 제시되었고 그 중에 텅스텐이란 물질이 제시되었다. 이에 본 연구에서는 인체에 유해하지 않는 텅스텐의 연속 X선 에너지 영역에서 두께에 따른 흡수 스펙트럼을 몬테

카를로 시뮬레이션을 통하여 모의 추정하였고, 납의 흡수 스펙트럼과 비교하고자 하였다. 모의 추정을 한 결과 납 보다 텅스텐이 전체적인 영역에서 흡수 확률이 더 높은 것으로 확인하였으며, 특히 70 keV ~ 90 keV에서는 텅스텐이 납보다 탁월하게 높은 흡수효율을 보여 텅스텐이 고에너지 진단 영역의 X-ray 에너지 차폐에 더 유용할 것으로 사료된다.

중심단어: 몬테카를로 시뮬레이션, 흡수 스펙트럼, 납, 텅스텐, 납중독

## I. 서론

1895년에 처음으로 발견된 X-ray는 현재 의료 분야 뿐 아니라 광범위한 분야에 이용되고 있다. 방사선의 발견 초기에는 방사선에 대한 위험을 인식하지 못한 많은 방사선작업종사자들이 무분별한 피폭에 노출되었고 이로 인하여 장애를 입었다<sup>[1]</sup>. 이 후 사람들은 방사선피폭의 위험성을 인식하게 되었고 이러한 방사선 피폭을 방지하기 위하여 국제 방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)를 설립하였다. 설립된 국제 방사선방호위원회는 방사선 피폭을 낮추기 위한 노력의 일환으로 현재 국제적 기준의 기본 바탕이 되는 방사선 방어에 관한 원칙을 권고하였다. 이 권고안에서는 모든 불필요한 피폭은 방지되어야 하고, 모든 선량은 적용 가능한 한 낮게 유지해야 한다는 두 가지의 방사선 방어 기본 개념을 포함하고 있다<sup>[2]</sup>. 이러한 기본 개념을 토대로 규정하고 있는 외부피폭에 대한 방어 3원칙을 국민의 건강을 책임지고 있는 병원에서도 중요하게 고려되어지고 있다.

현재 임상의 일반검사실에서는 의료 영상 획득을 위하여 연속 X-ray를 이용하는데, 이용 시에는 산란선이 발생하게 되고 이는 환자 뿐 아니라 주변의 방사선 작업종사자에게도 피폭을 줄 수 있다. 이러한 산란선을 차폐하고자 현재 일반검사실에서는 납(Pb)을 사용하고 있지만 이러한 납은 인체에 치명적인 납 중독의 문제점을 가지고 있어 대체 물질이 제시되었고 연구 중에 있다<sup>[3]</sup>. 그 중에 텅스텐이란 물질이 제시되어 연구 한 결과로는 텅스텐이 납 보다 차폐능이 우수하면서, 납의 문제점인 납 중독이 없다고 알려져 있다<sup>[4]</sup>.

이에 본 연구에서는 인체에 유해하지 않는 텅스텐의 연속 X선 에너지 영역에서 두께에 따른 흡수 스펙트럼을 비교하고자 하였다. 이를 위하여 MCNPX 시뮬

레이션을 통해 상호작용 확률을 모의 추정하였고, 이를 납의 흡수 스펙트럼과 비교하였다.

## II. 연구방법

시뮬레이션에 이용할 차폐체의 면적은  $5.08 \times 10.16$  cm<sup>2</sup>로 고정하고, 두께를 변화시켜가면서 X-ray에 대한 흡수 스펙트럼의 변화를 모의 추정하였다. 이용된 선원은 진단영역(120 kVp)에 해당하는 X-ray 스펙트럼을 이용하였다.

흡수 스펙트럼 추정을 하기 위하여 투과 스펙트럼을 모의 추정하였다. 물질은 납과 텅스텐을 이용하였고, 두께는 30 μm에서부터 150 μm까지 30 μm 간격으로 모의 추정했다. 진단 영역의 X선 광자들에 대해 물질과의 상호 작용하여 통과한 광자들의 에너지 스펙트럼을 알기 위해 Mode P를 이용하여 X선 광자들의 전달을 정의하였다. 시뮬레이션에 이용된 ERG는 연속 X선 광자의 에너지 분포 데이터를 선원 정보(SI), 선원 확률(SP)을 이용하여 선원 에너지의 히스토그램을 정의하였다.

본 실험에서 X선 관전압 맥동률 10%, 2.5 mmAl의 여파에 의해 생성되는 에너지 스펙트럼을 선원 데이터로 이용하였다. 선원 입자의 샘플링은 SUR을 이용하여 납과 텅스텐 직육면체 시편의 표면에서 X선 광자들을 발생하고 선원 입자 타입을 정의하는 PAR는 광자에 해당하는 PAR2를 이용하였다. 마지막으로, Tally Specification cards는 F1 Tally를 이용하여 X선의 한 표면에 입사하는 광자가 반대쪽 표면을 통과할 확률을 모의 추정하였고, 50000번의 모의 추정을 하였다<sup>[5]</sup>.

위에서 제시하는 MCNPX에 이용되는 Code의 고유 용어는 다음과 같은 의미이다. Mode P에서 P는 Photon의 약자이고, ERG는 Energy의 약자이며, SUR는 Surface의 약자이다. PAR는 Particle의 약자로 선원 입자 타입

을 규정하는데, PAR2는 광자를 규정한다. Tally는 결과 값의 표현 방법을 규정하는 용어로, F1 Tally는 중성자, 광자, 전자에 대한 Surface current를 규정한다.

두께 별 투과 스펙트럼에서 흡수 스펙트럼을 계산하기 위하여 일반적인 에너지 스펙트럼의 투과 스펙트럼과 투과 전의 스펙트럼의 차이를 계산하였다. MCNPX로 시뮬레이션을 통해 임의의 두께에 대한 투과 스펙트럼을 모의 추정 후  $\Delta I$ 을 계산하여 그 결과 값을 비교하였다. 납과 텅스텐에 대해서 X선이 상호작용한 흡수량은 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\Delta I = I_0 - I \tag{1}$$

식 (1)에서  $I_0$ 는 입사 X선의 강도를 의미하고,  $I$ 는 투과 X선 강도를 의미하며,  $\Delta I$ 는 흡수된 X선의 강도를 의미한다.

### III. 결과 및 고찰

시뮬레이션을 통하여 투과 스펙트럼을 모의 추정하였고, 투과 스펙트럼을 이용하여 흡수 스펙트럼을 계산하였다. 이 때 일반적인 에너지를 납과 텅스텐의 두께에 따라 모의 추정하여 얻어낸 결과를 Fig 1에 나타내었다.

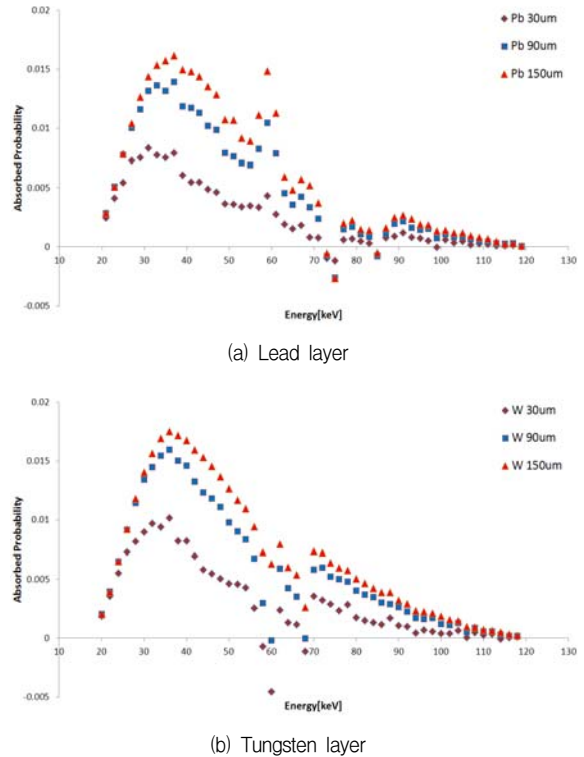


Fig 1. X-ray absorbed spectra for lead layer (a) and tungsten layer (b) obtained by MCNPX code

Table 1. Absorption yield of lead and tungsten in various x-ray energy zone

Zone \ material	Pb			W		
	30 μm	90 μm	150 μm	30 μm	90 μm	150 μm
A	0.2126	0.3966	0.4847	0.2450	0.4276	0.5105
B	0.0199	0.0540	0.0770	0.0145	0.0477	0.0752
C	0.0092	0.0225	0.0341	0.0471	0.0918	0.1124
D	0.0104	0.0255	0.0358	0.0144	0.0331	0.0440
Total	0.2521	0.4986	0.6316	0.3210	0.6001	0.7422

납 흡수 스펙트럼을 나타내는 Fig 1. (a)에서의 전체적인 추세는 36 keV 까지는 흡수 확률이 증가하다가, 점차 감소하는 것으로 모의 추정되었다. 그리고 56 keV ~ 60 keV 까지는 흡수 확률이 증가하는 것으로 나타났으며, 150 μm 이하의 73 keV, 75 keV, 85 keV 에너지 영역에서는 에너지를 모두 흡수하지 못하고 투과하는 것으로 나타나는데 이는 고에너지 영역에서

산란된 산란 광자가 모두 흡수되지 못하여 흡수 확률이 흡수 값으로 표시되는 것으로 분석된다. 텅스텐의 흡수 스펙트럼을 나타낸 Fig 1. (b)에서의 전체적인 추세는 납 흡수 스펙트럼과 마찬가지로 36 keV 까지는 흡수 확률이 증가하다가, 점차 감소하는 것으로 모의 추정되었다. 그리고 56 keV ~ 61 keV 까지는 흡수 확률의 증가와 감소가 반복적으로 발생하였으며, 90 μm

이하의 60 keV, 68 keV 에너지 영역에서는 에너지를 모두 흡수하지 못하고 투과하는 것으로 나타나는 데 이는 고에너지 영역에서 산란된 산란 광자가 모두 흡수되지 못하여 흡수 확률이 음수 값으로 표시되는 것으로 분석된다. 이러한 납과 텅스텐의 흡수 스펙트럼을 정확하게 비교하기 위하여 4개의 영역별로 나누어 Fig 2에 나타내었다. Fig 2을 보면 에너지를 4개의 영역으로 나눈 것을 확인 할 수 있다. A 영역은 20 keV ~ 60 keV이고, B 영역은 60 keV ~ 70 keV이며, C 영역은 70 keV ~ 90 keV이다. 그리고 D 영역은 90 keV ~ 120 keV 영역이다.

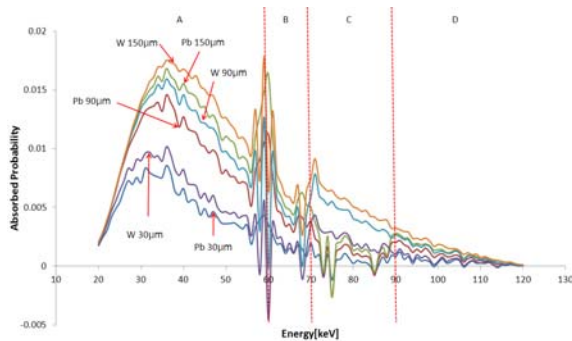


Fig 2. Absorbed spectra of lead and tungsten as function of x-ray energy about various thickness

이러한 4개의 영역으로 나누어 비교하여 보면 A 영역에서는 대체적으로 동일한 두께일 때는 텅스텐이 납 보다 흡수 확률이 더 좋은 것을 알 수 있다. 그리고 B 영역 중 57 keV ~ 62 keV와 67 keV ~ 69 keV에서는 대체적으로 텅스텐이 납 보다 흡수 확률이 적은 것으로 모의 추정된다. C 영역에서는 납 보다 텅스텐의 흡수 확률이 훨씬 뛰어나다는 것을 알 수 있고, D 영역에서는 A 영역과 비슷한 모의 추정 결과를 보인다.

이를 더 정확하게 비교하기 위하여 에너지 영역별로 흡수 확률을 모두 더하여 면적을 계산하였고 이를 Table 1에 도출하였다.

Table 1에서와 같이 A 영역에서는 대체적으로 동일한 두께에서 텅스텐의 흡수 확률이 약 9.45% 높은 것으로 모의 추정되었다. 하지만, B 영역에서는 납이 텅스텐 보다 대체적으로 흡수 확률이 큰 것을 알 수 있다. 두께가 30 µm에서 약 27% 정도, 90 µm에서는 11%,

150 µm에서는 2.3% 감소되는 것을 알 수 있다. 즉, 텅스텐 보다 납이 60 keV ~ 70 keV 에너지 영역의 광자를 더 많이 흡수한다는 것을 알 수 있다. 하지만 C 영역에서는 B 영역과는 대조적으로 텅스텐이 납 보다 월등히 흡수 확률이 큰 것을 알 수 있다. 두께가 30 µm에서 41%, 90 µm에서는 308%, 150 µm에서는 229% 증가 되는 것을 알 수 있다. D 영역에서는 텅스텐의 흡수 확률이 약 30.3% 높은 것으로 모의 추정되었다. 즉, 60 keV ~ 70 keV 에너지 영역에서는 납이 우수하다는 것을 알 수 있었고, 70 keV ~ 90 keV 에너지 영역에서는 텅스텐이 우수함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 납과 텅스텐의 흡수단에 따른 차이가 나타나는 것으로 사료된다. 납의 질량감약계수는 B 영역의 에너지 중 60 keV에서 5.02 cm<sup>2</sup>/g, C 영역의 에너지 중 80 keV에서 3.71 cm<sup>2</sup>/g로 나타났다. 그리고 텅스텐의 질량감약계수는 B 영역의 에너지 중 60 keV의 3.71 cm<sup>2</sup>/g, C 영역의 에너지 중 80 keV에서는 7.81 cm<sup>2</sup>/g로 나타났다<sup>[6]</sup>. 이러한 질량감약계수의 차이는 물질의 흡수량을 결정하게 된다. B 영역에서는 텅스텐 보다 납의 질량감약계수가 더 높게 나타나므로 납의 흡수량이 더 많고, C 영역에서는 납 보다 텅스텐의 질량감약계수가 더 높게 나타나므로 텅스텐의 흡수량이 더 높을 것이다.

하지만 에너지 영역에 따라 흡수 확률이 달라지나 전체적인 총 흡수 확률을 비교하면 텅스텐이 납과 비교하여 약 21.7% 더 우수한 것을 알 수 있다. 이러한 두 차폐재의 두께에 따른 총 흡수 확률을 비교하고자 Fig 3에 나타내었다.

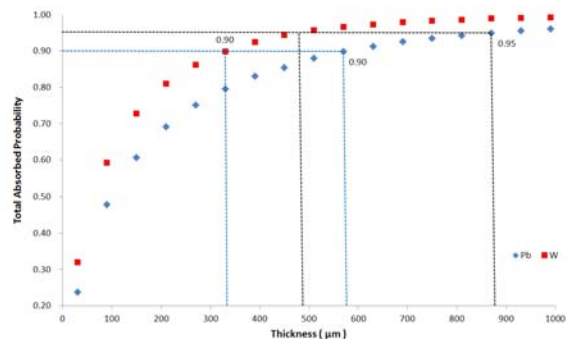


Fig 3. Absorbed probability of lead and tungsten as a function of layer thickness (at 120 kVp)

Fig 3에서 납과 텅스텐의 총 흡수 확률을 같게 하기

위해서는 납의 두께가 두꺼워 저야 한다는 것을 알 수 있다. 임상에서 Apron의 차폐율의 기준인 90%을 만족하기 위해서는 납 두께 570  $\mu\text{m}$ , 텅스텐 두께 330  $\mu\text{m}$ 가 되어야 하고 임상의 일반촬영실 차폐시설의 차폐율의 기준인 95%을 충족하기 위해서는 납의 두께가 900  $\mu\text{m}$  이고 텅스텐은 480  $\mu\text{m}$ 가 되어야한다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 인체에 유해하지 않는 텅스텐의 연속 X선 에너지 영역에서 두께에 따른 흡수 스펙트럼을 비교하고자 하였다. 이를 위하여 MCNP로 시뮬레이션하여 모의 추정하였고, 이를 납의 흡수 스펙트럼을 비교하고자 하였다.

흡수 스펙트럼에서 총 흡수선량은 텅스텐이 납보다 평균적으로 21.7% 정도 높다. 즉, 텅스텐이 납보다 평균 21.7% 정도 차폐능이 크다. 하지만 모든 에너지 영역에서 텅스텐이 납 보다 좋은 것은 아니다. 영역별로 나누어 살펴보았을 때 20 keV ~ 60 keV에서는 텅스텐이 납보다 약 9.45% 흡수 확률이 높은 것으로 나타났다. 그리고 60 keV ~ 70 keV에서는 텅스텐이 납 보다 더 낮은 흡수 확률이 낮은 것을 볼 수 있는데, 이는 납의 질량감약계수가 텅스텐 보다 약 1.31  $\text{cm}^2/\text{g}$ 이 높아 납이 더 많은 흡수를 보인다. 이와 대조적으로 70 keV ~ 90 keV에서는 텅스텐이 납 보다 월등히 우수한 흡수 확률을 보이는데, 이는 텅스텐의 질량감약계수가 납 보다 약 4.1  $\text{cm}^2/\text{g}$ 이 높아 텅스텐이 더 많은 흡수를 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 90 keV 이상에서는 20 keV ~ 60 keV와 마찬가지로 추세를 보이며, 텅스텐이 납 보다 약 30.3% 흡수 확률이 높은 것으로 확인되었다. 하지만 전체적인 총 흡수 확률을 비교하면 텅스텐이 납과 비교하였을 때 약 21.7% 더 우수한 것을 확인 할 수 있었다.

이러한 모의 측정을 한 결과를 토대로 납 보다 텅스텐이 몇몇 영역을 제외한 전체적인 영역에서 흡수 확률이 더 높았으며, 특히 70 keV ~ 90 keV에서는 텅스텐이 납보다 탁월하게 높은 흡수 확률을 보였으므로, 텅스텐이 고에너지 영역의 X-ray 차폐에서 더 우수 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업(No. 10038652) 및 한국연구재단(No. 2011-0027312)의 지원을 받아 수행하였음.

#### 참고문헌

- [1] Mosby's Radiography Online, "Radiographic Imaging & Radiologic Science for Technologists Ninth edition Part I",
- [2] 송종순, "방사선 방어의 최적화 절차론 개발에 관한 연구", 방사선방어학회지, Vol 5, No 2, pp. 1-11, 1994.
- [3] 김교태, 김혜주, 김주희, 조창훈, 최일홍, 박지근, 강상식, "몬테카를로 시뮬레이션을 통한 연속 엑스선 에너지에서 납과 텅스텐의 차폐율 비교", 한국방사선학회 2011년 추계학술대회, Vol 5, No 2, pp. 35-39, 2011.
- [4] 박영웅, "텅스텐 또는 감손우라늄을 재료로 한 방사선 차폐벽돌", 2012.
- [5] Judith F. Briesmeister, "MCNPTM A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C", 2000.
- [6] J. H. Hubbell, S. M. Seltzer, "Tables of X-ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients", National Institute of Standards and Technology(NIST), 1999.