

Analysis of Shielding Effect of Lead and Tungsten by use of Medical Radiation

Donggun Jang,¹ Gyoo Hyung Kim,² Cheolwoo Park^{3,*}

¹Department of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center

²Department of Radiology, MyongJi hospital

³Department of Radiological Technology, Dong-Eui Institute of Technology

Received: March 15, 2018. Revised: April 24, 2018. Accepted: April 30, 2018

ABSTRACT

Lead is a very useful material in shielding radiation in hospitals. But lead is toxic. Therefore, there are many studies on substitutable materials, Typically, there are many studies using tungsten. In this study, we investigated the physical properties of lead and tungsten and the Half value layer. As a result, lead having higher atomic number showed higher cross - sectional area than tungsten. But, at the same size, the electron density of tungsten with a high density is about 1.7 times higher than that of lead. In MCNPX simulation, the shielding effect of tungsten is about 1.4 times higher than that of lead, It was confirmed that tungsten had better shielding efficiency than lead. However, considering the economic aspect, tungsten is a rare metal, which is about 25 times more expensive than lead, which is considered to be inappropriate as an alternative to lead.

Keyword: Lead, Tungsten, Shielding

I. INTRODUCTION

방사선에 의한 피폭은 내부피폭과 외부피폭으로 구분 할 수 있으며, 의료에 종사하는 방사선관계종사자 및 방사선작업종사자들은 주로 외부피폭을 통해 방사선피폭을 받게 된다.

식품의약품안전청 연구조사에 따르면 다른 직종에 비하여 방사선관계종사자가 적게는 4배에서 많게는 24배까지 더 많은 피폭을 받는 것으로 조사되었으며,^[1] 의료용 방사선은 저선량으로 고선량에 비하여 상대적으로 결정적 영향이 발생할 확률은 낮지만 저선량의 장기적인 피폭으로 인하여 백혈병 및 유전적 영향의 발생확률이 증가되어 문제가 되고 있다.^[2-4]

국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에서는 방사선 피폭의 저감화를 위하여 방사선 방어에 관한 원칙을 권고하고 있으며, 외부피폭에 대한 방어하기 위한 방안으로 시간, 거리, 차폐의 3원칙을 규정하고 있다.^[5]

방사선을 방어하는 입장에서 인체에 방사선이 노출되지 않도록 차폐하는 것이 매우 중요하며,^[6] 의료 환경에서는 이러한 원칙을 지키기 위해 납(Pb) 차폐체를 주로 이용하고 있다.^[7,8] 납 차폐체는 높은 원자번호를 가지고 있어 차폐율이 우수하고 가격이 저렴하여 경제성이 좋고 가공이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 납은 중금속으로 인체 및 환경에 대한 유해성과 같은 단점을 가지고 있어,^[9] 이러한 단점을 극복하고자 다양한 대체물질 연구가 진행되고 있다. 이 중 텅스텐이 납 보다 방사선 차폐율이 높으며 납 중독과 같은 부작용이 없는 것으로 알려져 있어,^[10] 이에 본 연구에서는 납과 텅스텐의 물리적 특성과 의료용 방사선에 대한 차폐율을 비교 분석 하였다.

II. MATERIAL AND METHOD

1. 실험재료

실험은 Table 1과 같은 텅스텐과 납 원자의 물리

* Corresponding Author: Cheolwoo Park

E-mail: cwpark@dit.ac.kr

Tel: +82-51-860-3532

적 조건을 사용하였다

Table 1. Physical properties of elements

	W	Pb
Atomic number	74	82
Density(g/cm ³)	19.25	11.34

2. 물리적 특성 비교

2.1 반응단면적

방사선과 물질과의 반응단면적을 산출하기 위해 식(1, 2)^[11]를 이용해 텅스텐과 납 원자의 광전효과, 콤프턴 산란의 반응단면적을 산출하였으며, 식(3)^[11]을 이용하여 동일한 크기의 납과 텅스텐에 들어가는 원자의 수를 산출하여 전자밀도로 비교 분석하고자 하였다.

$$\text{Cross-section of photoelectric effect} \quad \tau \propto \frac{Z^5}{(hv)^{3.5}} \quad (1)$$

$$\text{Cross-section of compton scattering} \quad \sigma \propto Z \cdot f(hv) \quad (2)$$

$$N = \frac{W \cdot N_A}{M} \quad (3)$$

N: Number of Atom, W: Mass, NA: Avogadro number, M: Atomic mass

2.1 감쇠계수

텅스텐과 납의 감쇠계수를 비교 분석하기 위해 국제 표준 기술 연구소(National Institute of Standards and Technology; NIST)^[12]에서 개발한 X-COM 프로그램을 이용하였으며, 의료용 방사선에 에너지를 고려하여 1 MeV 이하의 전자과 방사선과 물질과의 상호작용을 통한 질량감쇠계수를 산출한 후 비교 분석 하였다.

2.2 반가층 실험

의료에 사용되는 방사선의 에너지를 Table 2와 같은 3개의 영역으로 구분하였으며, 진단 x선의 경우 감쇠계수를 이용한 결과값과 비교를 위해 평균 에너지를 이용하였다.

반가층 실험은 몬테카를로 시뮬레이션의 일종인 Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPX)를 이용하였으며, MCNPX의 기하학적 구조는 Fig. 1과 같이 진공의 공간에 선원을 중심으로 원형의 검출기를 배치한 후, 차폐체의 두께를 조정하여 반가층의 두께를 비교 분석하고자 하였다.

Table 2. Field of medical radiation

Field	Energy
Diagnostic x-ray	50 keV
Gamma camera	140 keV
PET	511 keV

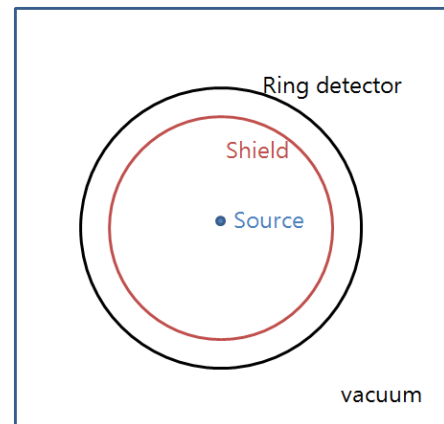


Fig. 1. Geometrical structure for Half-value layer.

III. RESULT

1. 반응단면적

텅스텐과 납에 동일한 에너지가 조사되었을 때, 반응단면적은 원자번호와 비례하므로 광전효과에 대한 반응단면적은 원자번호가 높은 납이 텅스텐에 비해 약 1.67배 높게 나타났으며, 콤프턴 산란의 경우 납이 텅스텐에 비해 1.10배 높게 발생하는 것으로 나타났다. 동일한 크기일 경우 차폐체에 포함되는 원자의 수는 텅스텐이 납에 비해 약 1.88배 많은 원자수를 가지고 있는 것으로 나타났다.

2. 감쇠계수

NIST의 X-COM을 이용하여 Fig. 2와 같은 납과

텅스텐의 질량감쇠계수를 획득하였으며, 의료에 이용되는 방사선의 에너지인 50, 140, 511 keV에서의 질량감쇠계수의 값을 추출하였다. 추출된 값은

Table 3과 같이 선형감쇠계수로 환산 하여 반가층으로 비교분석 하였다.

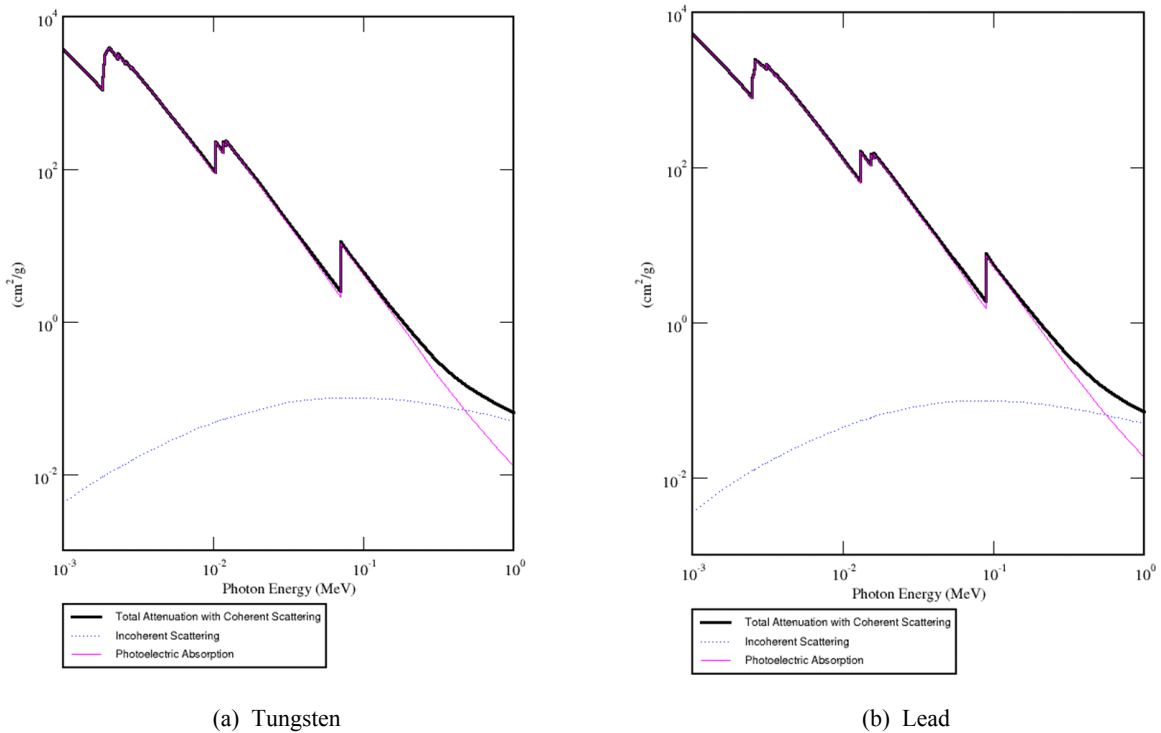


Fig. 2. Attenuation coefficient curve of a material.

Table 3. Linear attenuation coefficient and Half layer Thickness of materials

(a) Linear attenuation coefficient (cm-1)				(b) Half layer Thickness(cm)			
Material \ keV	50	140	511	Material \ keV	50	140	511
Pb	9.12E+01	2.29E+01	1.83E+00	Pb	7.60E-03	3.03E-02	3.79E-01
W	1.15E+02	3.04E+01	2.65E+00	W	6.05E-03	2.28E-02	2.61E-01
Diff. (%)	125.59	133.19	145.02	Diff. (%)	79.62	75.08	68.96

3. 반가층

MCNPX를 이용하여 차폐두께에 따른 선량률을 측정하여 반가층의 두께를 표현한 결과 Table 4와 같이 에너지와 물질에 종류에 따른 반가층의 두께가 나타났다.

Table 4. Half layer thickness using MCNPX (Unit: cm)

Material \ keV	50	140	511
Pb	9.60E-03	3.40E-02	5.00E-01
W	7.20E-03	2.30E-02	3.60E-01
Diff.	75.00	67.65	72.00

IV. DISCUSSION

방사선 차폐물질로 가장 많이 사용되는 물질은 납으로 알려져 있으며, 납은 금속원소로 전자밀도가 높고 가격이 낮아 방사선을 차폐하는 물질로 매우 유용하게 이용되고 있다. 심지어 방사선의 차폐 두께를 표할 때는 연당량(mmPb)으로 표기하여 납이 방사선 차폐의 기준이 된다. 하지만 납은 인체에 유해한 축적독성이 강한 대표적인 금속으로 알려져 있으며,^[13] 다량의 피부접촉은 중독을 유발할 수 있다.^[14] 이에 납을 대체할 차폐물질 개발이 다양하게 이루어지고 있으며,^[8,10] 이에 본 연구에서는 납의 대체물질 중에 하나인 텅스텐에 대한 차폐효율을 분석하고자 하였다. 실험은 납과 텅스텐의 물리적 특성 비교와 몬테카를로 모의 모사를 이용한 반가층 실험을 진행하였다.

실험 결과 첫째, 원자번호가 높은 납 원소가 텅스텐 원소에 비해 반응단면적이 높게 나타나 납 원소가 텅스텐 원소에 비해 차폐율이 높게 나타날 것으로 사료되었다. 하지만 동일한 크기의 차폐체로 가정할 경우 밀도가 높은 텅스텐이 납 보다 약 1.88 배 높은 원자수를 포함하는 것으로 나타났으며, 각 원소의 원자번호를 고려하였을 때, 텅스텐의 전자 밀도가 납 보다 약 1.7배 높은 것을 알 수 있었다.

둘째, NIST의 X-COM을 이용한 에너지 영역별 선형감쇠계수를 분석한 결과 텅스텐이 납에 비해 선형감쇠계수가 높게 나타났으며, 에너지가 증가함에 따라 납과 텅스텐의 선형감쇠계수의 차이 또한 증가되어 에너지가 높을수록 텅스텐이 납 보다 우수한 차폐효율을 갖는 것으로 나타났다.

셋째, 감쇄계수를 이용한 결과 값과 비교를 위하여 진단 X선의 에너지를 평균에너지인 50 keV의 단일에너지를 이용하였다. K. T. Kim^[10]의 주장에 따르면 진단 X선의 연속스펙트럼을 이용할 경우 텅스텐이 납에 비해 1.2배의 높은 차폐효율을 갖는 것으로 나타나 있으며, 본 연구에서는 약 1.3배로 결과가 나타나 연속스펙트럼을 이용한 실험과 단일 에너지를 이용한 실험이 유사한 결과 값을 나타내는 것으로 확인하였다.

넷째, MCNPX를 이용하여 반가층 실험 결과 선

형감쇠계수로 산출한 반가층보다 높게 나타났으며, MCNPX를 이용한 반가층의 실험결과에서는 텅스텐이 납에 비해 차폐효율이 50 keV에서 약 1.33배, 140 keV에서 1.48배, 511 keV에서 1.39배로 높게 나타났으며, 511 keV에서 차폐효율이 140 keV의 효율보다 감소하는 결과가 나타났다. 511 keV에서 텅스텐과 납의 차폐효율의 차이가 감소된 원인은 에너지 증가에 따라 증가된 산란선의 영향으로 사료되며, 에너지가 높아질수록 텅스텐과 납의 차이는 점점 감소될 것으로 사료되었다. Fig. 2의 질량감쇠계수 그래프를 보면 약 500 keV의 에너지부터 콤프턴 산란의 반응단면적이 광전효과와 반응단면적 보다 높아지는 것으로 확인 할 수 있으며, 콤프턴 산란의 반응단면적은 에너지가 증가함에 따라 완만한 그래프를 나타내며, 약 80~90 keV에서 최대 반응단면적을 보여주고 있다. 하지만, 광전효과와 광전효과에 따라 급격히 감소하는 그래프를 보여줌으로써 광전효과에 대한 반응단면적의 감소에 따라 상대적으로 산란선의 영향이 높아지는 것으로 보일 수 있다. D. G. Jang^[15]의 주장에 따르면 0.25 mm의 납 차폐시 180 keV 이상부터 산란선의 영향으로 차폐효과가 감소하는 것으로 나타나 있으며, 이와 같이 수식을 이용한 산술적 방법으로 방사선량을 평가할 경우 2차선에 대한 배제로 과소평가 될 수 있으며, 반드시 실측과 같은 방법이 병행되어야 할 것으로 사료되었다.

다섯째, 경제적 측면을 고려하였을 때, 텅스텐은 대표적인 희소금속으로 전량 수입해 의존하고 있으며,^[16] 한국비철금속협회^[17]의 단가를 토대로 동일한 크기일 경우 텅스텐이 납에 비해 약 25배정도 가격이 높은 것으로 나타나 있다.

본 연구의 실험 결과 텅스텐의 차폐효율만 본다면 납의 대체물질로써 매우 유용하다고 볼 수 있다.^[8,10] 하지만 각 물질의 가격을 고려하였을 때, 텅스텐은 방사선 차폐물질로 매우 비효율적인 것으로 사료되었다.

V. CONCLUSION

납 원소는 원자번호가 높아 텅스텐에 비해 반응단면적이 높다. 하지만 텅스텐의 밀도가 납에 비해 높

아 동일한 크기 일 때 납 보다 높은 전자밀도를 갖게 되므로 납에 비해 약 1.5배 높은 차폐효율을 갖게 된다. 하지만 텅스텐은 희소금속으로 전량 수입에 의존하고 있어 납에 비해 약 25배 가격이 높다. 텅스텐이 납보다 차폐효율이 우수하지만 가격대비 텅스텐을 대체물질로 사용하기에는 매우 비효율적인 것으로 사료되었다.

Reference

- [1] Ministry of food and drug safety, "A study of health effect for occupational exposure in radiation workers," 2008.
- [2] J. W. Kil, "Comparing of the Administered Activities and the Effective Dose of the Various Pediatric Dose Formulas of Nuclear Medicine," Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 18, No. 8, pp. 147-154, 2017.
- [3] H. Y. Kim, M. S. Lim, "A Study of Influence on the Psychological State of Hospital Employees through Convergence Career Management Systems," Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 6, No. 6, pp. 119-129, 2015.
- [4] J. H. Kim, S. J. Yoo, "Application and development of radiation worker management program," Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 11, pp. 367-373, 2017
- [5] International commission on radiological protection, "Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations," ICRP Publication 109, 2009
- [6] A. Martin, S. Harbison, K. Beach, R. Cole, AN INTRODUCTION TO RADIATION PROTECTION, 6th Ed., CRC Press, FL, 2012.
- [7] S. C Kim, K. T Kim, J. K. Park, "Barium compounds through Monte Carlo simulation compare the performance of medical radiation shielding analysis," The Korean Society of Radiology, Vol. 7, No. 6, pp. 403-408, 2013.
- [8] K. S. Chon, "Monte Carlo Simulation for Radiation Protection Sheets of Pb-Free", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 11, No. 4, pp. 188-195, 2017.
- [9] D. H. Kim, S. H. Kim, Y. J. Lee, et al., "Study on exposure dose and image quality of operator using shielding material in neuro interventional radiology", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 11 No. 7, pp. 579-587, 2017.
- [10] K. T. Kim, S. S. Kang, S. C. Noh, et. al., "Absorbed spectrum comparison of lead and tungsten in continuous x-ray energy using monte carlo simulation", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 6, No. 6, pp. 483-487, 2012.
- [11] Radiation Measurement Research Society, "Radiation detection & measurement", chuung-ku publisher, 2010.
- [12] National Institute of Standard and Technology, Physical Measurements Laboratory, XCOM Photon Cross-Sections Database, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>.
- [13] World Health Organization, "Lead (Environmental Health Criteria)," pp. 44-54, 1997.
- [14] Y. L. Oh, Y. R. Choi, B. S. Chang, et al., "Antioxidative Effect of Portulaca oleracea L. Extract on Allergic Contact Dermatitis-Induced Agent, Copper in Cultured Human Skin Fibroblasts," Journal of Investigative Cosmetology, Vol. 8, No. 4, pp. 243-249, 2012.
- [15] D. G. Jang, S. H. Lee, H. S. Choi, et al., "A study on the apron shielding ratio according to electromagnetic radiation energy," Journal of radiological science and technology, Vol. 37, No.4, pp. 247-252, 2014.
- [16] J. W. Song, S. H. Lee, H. S. Hong, et al., "Industrial Supply Chain Trend of Domestic Tungsten," Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, Vol. 19, No. 1, pp. 79-86, 2012.
- [17] Korea Nonferrous Metal Association, <http://www.nonferrous.or.kr/>

의료 방사선사용에 따른 납과 텅스텐의 차폐효과 분석

장동근,¹ 김규형,² 박철우^{3,*}

¹동남권 원자력의학원 핵의학과

²명지병원 영상의학과

³동의과학대학교 방사선과

요 약

병원에서 방사선을 차폐하는데 있어 납은 매우 유용하게 사용되고 있다. 하지만 납은 독성을 가지고 있고 대체물질에 대한 연구가 많이 이루어지고 있으며, 대표적으로 텅스텐을 대체물질로 한 연구가 많이 이루어지고 있다. 이에 본 연구에서 납과 텅스텐의 물리적 특성 및 반가층 실험을 진행한 결과 원자번호가 높은 납 원소의 반응단면적이 텅스텐에 비해 높게 나타났으나, 텅스텐의 밀도가 높아 동일한 크기일 경우 텅스텐의 전자밀도가 납에 비해 약 1.7배 높은 것으로 나타났다. MCNPX를 이용한 모의 모사에서도 에너지 따라 다소 차이가 있지만 텅스텐이 납에 비해 약 1.4배 차폐효과가 높은 것으로 나타났으며, 텅스텐이 납에 비해 우수한 차폐효율을 갖고 있는 것으로 확인 되었다. 하지만 경제적 측면을 고려할 때 텅스텐은 희소금속으로 납에 비해 가격이 약 25배 높아 납에 대한 대체물질로는 부적당한 것으로 사료되었다.

중심단어: 납, 텅스텐, 차폐물질