

Analysis of Lead and Bismuth Absorption Rate by Monte Carlo Simulation

Gap-Jung Kim¹, Nak-Sang Kim¹, Se-Jong Yoo², Won-Jeong Lee³, Jeong-Ho Kim⁴, Seong-Il Hong⁵, Min-Cheol Jeon^{3,*}

¹Department of Radiological Technology, Songho University

²Department of Radiology, Konyang University

³Department of Radiology, Daejeon Health Institute of Technology

⁴Department of Radiological Science, Sunlin University

⁵Department of Radiological Technology, Gwangyang Health Sciences University

Received: July 27, 2022. Revised: August 17, 2022. Accepted: August 31, 2022.

ABSTRACT

In the medical field, lead aprons are used to protect the human body from radiation. However, lead is a heavy metal that is harmful to the human body and the environment, so various shield are being developed. In this study, bismuth, which has a similar atomic number to lead, was set as a new material and the absorption rate according to thickness in the same energy region was compared and evaluated through Monte Carlo simulation. The same tendency was confirmed when the thickness of the lead shield was 0.25 mm, the thickness of the bismuth was 0.3 mm, when the lead was 0.50 mm, the bismuth was 0.60 mm, and when the lead was 0.75 mm, the bismuth was 0.90 mm. Therefore, it is reasonable to replace lead with bismuth in the shield material.

Keywords: Monte Carlo, Lead, Bismuth, Shield, Absorption rate

I. INTRODUCTION

사람들은 항상 방사선 피폭을 받으면서 살아왔고 현재도 주위로부터 방사선 피폭을 받으며 살고 있다^[1,2]. 방사선(Radiation)이란 불안한 상태에 있는 원자 또는 원자핵이 기저상태로 되돌아가기 위해 방출하는 에너지의 흐름으로 정의할 수 있다^[3]. 방사선은 전리방사선과 비전리방사선으로 구분할 수 있는데, 전리방사선은 물질과의 상호작용을 통해 물질을 이온화시키는 것으로 X선, 감사선 등 짧은 파장을 갖는 방사선이고, 비전리방사선은 전리하는 능력이 없는 것으로 라디오파, 마이크로파, 적외선과 같이 긴 파장을 갖는 방사선을 말한다^[4,5].

방사선 피폭은 세포가 살아가는데 필수적 유전 정보인 DNA를 변형시켜 암을 유발하는 등 세포에

다양한 영향을 준다^[6]. 따라서 방사선의 강도를 측정하여 인체에 미치는 영향 정도를 알아보는 것은 중요한 문제가 되므로 방사선 차폐는 방사선 피폭에 대한 방호방법으로서 중요한 수단이다. 방사선 종사자의 경우 무엇보다도 지속적인 저선량 방사선 피폭에 의한 신체적 장애로부터 보호되어야 한다^[7]. 따라서 의료기관에서 방사선을 취급하는 종사자들은 인체를 보호하기 위하여 납으로 만들어진 납 앞치마와 같은 보호장비를 사용한다^[8]. 하지만 납은 증금속으로 인체 및 환경에 대한 유해성과 같은 단점을 가지고 있어^[9-12] 현재 납을 대신할 다양한 차폐체 개발이 활용이 진행되고 있다. 예를 들어 BaSO₄, Bi₂O₃ 두 가지 물질을 사용하여 다중층으로 제작^[13]하는 등의 방법을 통해 경량화가 시도되고 있다.

* Corresponding Author: Min-Cheol Jeon

E-mail: 99jmc@hanmail.net

Tel: +82-42-670-9179

본 연구는 납의 문제점을 해결하기 위해 밀도와 원자번호가 높은 점을 공유하고 있는 납과 가장 비슷한 비스무트를 새로운 차폐용 소재로 설정하고 같은 에너지 영역에서 납과 비스무트의 두께에 따른 흡수율을 비교하였다. 이를 통해 방사선 흡수율을 납보다 높이면서, 적정 수준의 차폐 성능을 유지할 수 있는 무납 차폐체 소재로의 제작 가능성을 평가하는 것이 본 연구의 목적이다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 실험재료

1.1. 몬테카를로 기법

몬테카를로 기법이란 알려진 모든 미시적 상호작용을 통계적으로 계산하여 거시적인 측정량을 구하는 방법이다. 방사선 분야에서 위험요인이 따르는 핵물질 연구 또는 측정에 제한이 있는 경우(인체 내부 측정 등) 해당 기법에 의한 물리량 예측은 매우 실용적이다. 몬테카를로 기법 적용을 위해서는 수많은 반복 계산이 필요하므로 전산코드를 이용하여 수행하여야 하며 이는 방사선 방출, 수송, 검출 과정의 추계적인 특성으로 진단용 X선, 핵의학, 방사선 치료, 방사선 방호 등 의학 물리 분야에서 유용하게 사용되고 있다^[4]. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 Geant4 기반의 GATE v8.0을 사용하였다. 이는 2004년 유럽에서 처음 개발되어 대중에게 오픈 소스로 배포되었고 현재까지 많은 인용 수를 통해 그 신뢰성을 증명하고 있다.



Fig. 1. Open Source GATE Homepage^[15].

2. 실험방법

전체적인 시뮬레이션 모식도는 Fig. 2와 같으며 점선원으로부터의 검출기 거리는 임상에서 원거리 조건으로 주로 사용되는 180 cm로 설정하였고, 이때 검출기의 크기는 $150 \times 150 \text{ mm}^2$ 이다. 또한 에너지의 경우 의료 진단 영역 내의 70, 100, 120 kVp를 사용하였으며(고유여과: 0.5 mmAl) 방출 범위를 제한하여 10 GBq의 방사선을 발생시켰다.

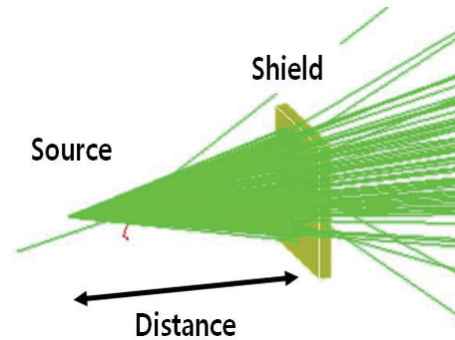


Fig. 2. Overall simulation structure.

이와 동시에 Table 1과 같이 설정된 차폐체의 각 변수에 따른 방사선 흡수율을 시뮬레이션 결과를 통해 비교 분석하였다.

Table 1. Shielding Characteristics and Setting Parameters

Shield	Lead	Bismuth
atomic number	82	83
atomic weight (amu)	207.20	208.98
density (g/cm^3)	11.34	9.78
thickness (mm)	0.25-1.00	0.10-1.00

납(Lead, Pb)의 경우 다른 차폐 원소에 비해 상대적으로 저렴한 원가와 가공비로 현재까지 임상에서 사용되는 방사선 방호 물품의 대부분을 구성하고 있다. 하지만 인체 유독성과 환경 측면에서의 여러 문제^[9-12]로 다른 대안이 요구되고 있으며 지속적으로 친환경 차폐체에 대한 연구가 진행되고 있는 이유이기도 하다.

반면 비스무트(Bismuth, Bi)는 원자번호와 밀도가 납과 유사하여 대표적인 친환경 차폐원소 중 하나

로 주목받고 있다. 또한 물리적 특성으로 유연성을 갖추어 제품 가공 측면에서 장점을 발휘할 수 있는 특징이 있다. 하지만 혼합물이 아닌 순수 비스무트를 활용할 경우 가격이 높게 책정되어 있는 실정이다.

III. RESULT

본 연구에서는 차폐체의 종류 및 두께를 주요 변수로 두어 연속 스펙트럼을 갖는 엑스선에 대해 각 에너지에 따른 방사선 흡수율을 평가하고자 하였다.

시뮬레이션 환경 및 조건은 점선원의 크기와 방사능 양, 검출기와의 거리 등 차폐체 변수 외에는 모두 동일하게 설정되었으며 납과 비스무트 차폐체에 대한 흡수율 실험 결과는 Table 2, 3과 같다.

Table 2. Lead Shield Absorption Rate at each Tube Voltage (Unit : %)

Thickness (mm)	Tube Voltage (kVp)		
	70	100	120
0.25	87.88	79.67	77.41
0.50	92.77	89.58	88.85
0.75	93.71	92.61	92.50
1.00	93.94	93.79	93.90

Table 3. Bismuth Shield Absorption Rate at each Tube Voltage (Unit : %)

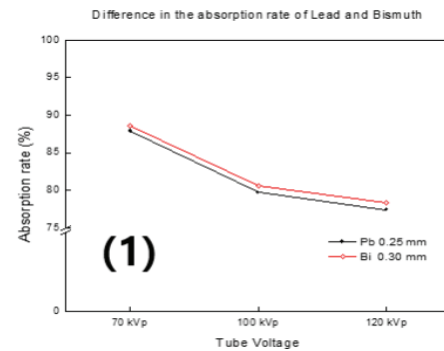
Thickness (mm)	Tube Voltage (kVp)		
	70	100	120
0.10	69.34	52.25	52.14
0.20	83.36	72.65	69.37
0.30	88.64	80.64	78.31
0.40	91.07	85.20	83.63
0.50	92.33	88.12	86.95
0.60	93.01	90.00	89.21
0.70	93.42	91.29	90.79
0.80	93.66	92.20	91.88
0.90	93.80	92.84	92.63
1.00	93.88	93.31	93.19

에너지 70 kVp에서 납 차폐체를 이용하여 방사선을 흡수하고자 할 경우, 0.25 mm 만큼 두께가 증가할수록 각각 87.88%, 92.77%, 93.71%, 93.94%로 나타났다. 하지만 비스무트 차폐체의 경우, 0.10 mm의 두께가 증가함에 따라 69.34%, 83.36%, 88.64%, 91.07%, 92.33%, 93.01%, 93.42%, 93.66%, 93.80%, 93.88%로 나타났다.

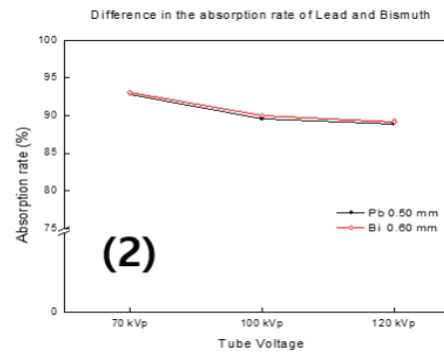
에너지 100 kVp에서는 차폐체가 납일 경우 각각

79.67%, 89.58%, 92.61%, 93.79%로 나타났으며 비스무트 차폐체의 경우, 56.25%, 72.65%, 80.64%, 85.20%, 88.12%, 90.00%, 91.29%, 92.20%, 92.84%, 93.31%로 나타났다.

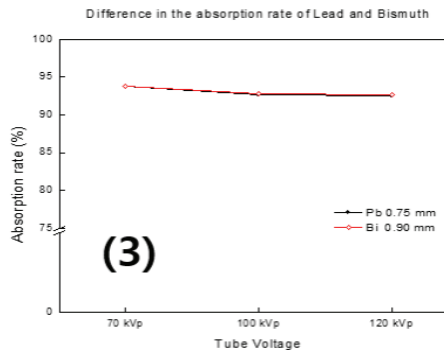
마지막으로 에너지 120 kVp에서, 납일 때 각각 77.41%, 88.85%, 92.50%, 93.90%로 나타났고, 비스무트일 때 52.14%, 69.37%, 73.31%, 83.63%, 86.95%, 89.21%, 90.79%, 91.88%, 92.63%, 93.19%로 나타났다.



(1) 0.25 mm lead and 0.30 mm bismuth



(2) 0.50 mm lead and 0.60 mm bismuth



(3) 0.75 mm lead and 0.90 mm bismuth

Fig. 3. This Graph show the Comparison of Radiation Absorption Rates at each Shielding Element Thickness.

위와 같은 결과를 통해 Fig. 3과 같이 각 차폐 원소의 두께에 따른 방사선 흡수율을 비교 분석하였다. 납 차폐체 두께가 0.25 mm인 경우 70, 100, 120 kVp에서의 방사선 흡수율은 87.88, 79.67, 77.41로 나타났으며 이는 비스무트 두께가 0.3 mm일 때의 방사선 흡수율(88.64, 80.64, 78.31)과 유사하였다. 또한, 납 0.50 mm인 경우 70, 100, 120 kVp에서의 방사선 흡수율은 92.77, 89.58, 88.85로 나타났으며 이는 비스무트 0.60 mm일 때의 방사선 흡수율(93.01, 90.00, 89.21)과 유사하다, 또한 납 0.75 mm인 경우 70, 100, 120 kVp에서의 방사선 흡수율은 93.71, 92.61, 92.50로 나타났으며 이는 비스무트 0.90 mm에서 방사선 흡수율(93.80, 92.84, 92.63)과 유사한 경향성을 확인할 수 있었다.

IV. DISCUSSION

국제 방사선 방호 위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)는 수정체, 갑상선, 림프 유선조직, 생식기 등은 방사선 감수성이 높은 조직으로 쉽게 전리방사선에 의해 세포가 죽거나 장애를 받을 수 있어 방사선으로부터 보호되어야 할 조직들이라고 설명하고 있다^[16]. 따라서 방사선 피폭을 감소시키도록 최적화 원칙을 적용하여 달성할 수 있는 한 낮게(As Low As Reasonable Achievable; ALARA) 최소화 하는 것을 권고하고 있다^[17,18]. 방사선의 피폭을 감소하기 위해서는 차폐체를 사용하게 되는데, 납은 무게가 무겁기도 하고 인체의 유해하기에 현재 무납차폐체 소재에 연구가 많이 이뤄지고 있는 실정이다.

방사선은 각 종류마다 투과력이 달라진다. 투과력은 방사선의 강도에 의해 결정되기에 연속스펙트럼을 갖는 X선은 물질을 통과하면서 상호작용에 의해 많은 수의 저에너지가 감약 되어 강도는 증가하게 된다. 이러한 현상에 의하여 방사선 강도를 물리적으로 약하게 하는 것을 차폐라고 하며 이때 사용되는 물질을 차폐체라 한다. 일반적으로 투과력이 강한 엑스선, 감마선의 경우는 밀도가 높고 원자번호가 큰 납, 텅스텐, 철을 주로 차폐체로 사용하고 있다. 박의 연구^[6]는 에너지 100 kVp에서의 납 0.5mm의 차폐율은 평균 97.01%로 나타났으나,

본 연구에서는 89.58%로 나타났다. 이는 실제 실험과 시뮬레이션의 결과이기에 실험 환경에 따른 약간의 차이가 발생할 수 있다. 의료방사선 영역에서 0.5 mmPb는 차폐체로 가장 많이 사용되고 있으며 100 kVp에서는 75 % 정도 차폐되는 것으로 알려져 있으나^[19] 본 연구에서 0.6 mm 비스무트 사용 시 90 %까지 차폐할 수 있는 결과를 나타냈기에 비스무트를 사용하는데는 무리가 없을 것 같다. 참고로 현재 비스무트 차폐체는 생식기, 갑상선, 유방, 안구 등의 장기에 맞춰 사용되고 있으며, 유방의 경우 소아 57%, 성인 41%의 감소효과를 얻는 것으로 나타났다^[20]. 본 연구의 제한점으로는 첫째, 에너지 범위가 제한적이었다. 둘째 차폐체의 두께 변화를 보다 더 다양화하지 못했다. 셋째, 시뮬레이션뿐만이 아닌 실제 실험을 통한 결과값을 도출하지 못했다. 차후에는 이러한 것들을 보완하여 심층적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 몬테카를로 기법 중 하나인 GATE v8.0을 사용하여 의료 진단에너지 영역 내에서 차폐원소인 납과 비스무트의 두께에 따른 방사선 흡수율을 모의 추정하고자 하였다.

이와 같이 차폐체의 소재로 납을 비스무트로 대체하여 사용되는데 무리가 없을 것으로 사료된다. 현재 납의 사용이 기피되고 있는 시점에서 납을 대신하여 사용할 차폐체 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이를 통해 납보다 방사선 흡수율을 높이면서 적정 수준의 차폐 성능을 유지할 수 있는 무납 차폐체 소재의 제작 가능 및 발전 가능성이 무궁할 것으로 사료된다.

Reference

- [1] M. C. Jeon, H. S. Lim, M. S. Han, "The Study About Attenuation of Scatter Ray According to Distance Inverse Square Law at General Projection", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 34, No. 3, pp. 183-188, 2011.
- [2] P. K. Cho, "Distribution of the Scatter Ray on Chest X-ray Examinations", *Journal of the Korea Contents*

- Association, Vol. 12, No. 7, pp. 255-260, 2012.
<http://dx.doi.org/10.5392/JKCA.2012.12.07.255>
- [3] M. J. Bae, H. M. Lee, "A Study on Radiation Shielding Materials for Protective Garments using Monte Carlo Simulation", *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol. 43, No. 3, pp. 239-252, 2015.
<http://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2015.43.3.239>
- [4] Y. J. Jung, C. W. Shin, S. M. Ahn, J. Y. Hong, Y. J. Ahn, C. H. Lim, "The Evaluation of Non-Ionizing Radiation (Near-Infrared Radiation) based Medical Imaging Application : Diabetes Foot", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 39, No. 3, pp. 399-406, 2016.
- [5] E. K. Chung, K. B. Kim, S. W. Song, "Exposure Assessment and Management of Ionizing Radiation", *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, Vol. 25, No. 1, pp. 27-35, 2015. <http://dx.doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.1.27>
- [6] H. H. Park, "The Evaluation of Performance and Usability of Bismuth, Tungsten Based Shields", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 41, No. 6, pp. 611-616, 2018.
<http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2018.41.6.611>
- [7] S. J. Seo, M. S. Han, C. G. Kim, M. C. Jeon, Y. K. Kim, G. J. Kim, "A study on the usefulness of a fusion model designed cloak shield to reduce the radiation exposure of the assistant during CT of severely injured patient", *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 8, No. 9, pp. 211-216, 2017. <http://dx.doi.org/10.15207/JKCS.2017.8.9.211>
- [8] K. S. Chon, "Monte Carlo Simulation for Radiation Protection Sheets of Pb-Free", *Journal of Korean Society Radiology*, Vol. 11, No. 4, pp. 189-195, 2017. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2017.11.4.189>
- [9] J. K. Park, I. H. Choi, H. H. Park, S. W. Yang, K. T. Kim, S. S. Kang, "Design of Double Layer Shielding Structure using Eco-friendly Shielding Materials Three Dimensional Curvature Analysis of Femoral Shaft Bowing based on CT Image", *Journal of Korean Society Radiology*, Vol. 10, No. 8, pp. 559-563, 2016.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2016.10.8.559>
- [10] D. D. Jang, G. H. Kim, C. W. Park, "Analysis of Shielding Effect of Lead and Tungsten by use of Medical Radiation", *Journal of Korean Society Radiology*, Vol. 12, No. 2, pp. 173-178, 2018.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2018.12.2.173>
- [11] D. H. Kim, S. H. Kim, Y. J. Lee, J. C. Lim, D. K. Han, "Study on Exposure Dose and Image Quality of Operator Using Shielding Material in Neuro Interventional Radiology", *Journal of Korean Society Radiology*, Vol. 11, No. 7, pp. 579-587, 2017.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2017.11.7.579>
- [12] S. Servaes, X. Zhu, "The effects of bismuth breast shields in conjunction with automatic tube current modulation in CT imaging", *Pediatric Radiology*, Vol. 43, No. 10, pp. 1287-1294, 2013.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00247-013-2687-0>
- [13] S. U. Yang, G. B. Park, Y. J. Heo, J. K. Park, "Evaluating the Reduction of Spatial Scattering based on Lead-free Radiation Shielding Sheet using MCNPX Simulation", *Journal of Korean Society Radiology*, Vol. 14, No. 4, pp. 367-373, 2020.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2020.14.4.367>
- [14] H. S. Hong, "A Study on comparison of resolution according to filter material and Calculation of the Radiation Dose of X-ray generator using MCNPX code", Myongji Universtisy, Master of Physics, 2015.
- [15] <http://www.opengatecollaboration.org/>
- [16] J. Yoon, H. J. Kim, "Usefulness of Dual Energy CT to Improve Image Quality Degradation due to Lens Shielding", *Journal of Korean Society Radiology*, Vol. 13, No. 7, pp. 969-977, 2019.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.7.969>
- [17] B. Y. Koo, S. H. Han, "A Study on the Performance Evaluation of Portable Radiation Shielding Apparatus", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 41, No. 4, pp. 289-295, 2018.
<http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2018.41.4.289>
- [18] ICRP, "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", ICRP publication 103, Ann ICRP, 2007.
- [19] K. J. Kim, J. G. Shim, "A Study on the Shielding Element Using Monte Carlo Simulation", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 40, No.

2, pp. 269-274, 2017.

<http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2017.40.2.12>

- [20] K. S. Nam, J. H. Kim, J. Y. Lee, H. H. Park, "The Usability Evaluation According to the Application of Bismuth Shields in PET/CT Examination", The Korean Society of Nuclear Medicine Technology, Vol. 17, No. 1, pp. 36-42, 2014.

몬테카를로 시뮬레이션에 의한 납과 비스무트 흡수율 분석

김갑중¹, 김낙상¹, 유세종², 이원정³, 김정호⁴, 홍성일⁵, 전민철^{3,*}

¹송호대학교 방사선(학)과

²건양대학교 방사선학과

³대전보건대학교 방사선(학)과

⁴선린대학교 방사선(학)과

⁵광양보건대학교 방사선과

요약

의료현장에서는 방사선으로부터 인체를 보호하기 위하여 납 앞치마를 사용한다. 하지만 납은 중금속으로 인체 및 환경에 유해성을 나타내고 있어 다양한 차폐체 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서는 납과 원자번호가 비슷한 비스무트를 새로운 소재로 설정하고 같은 에너지 영역에서 두께에 따른 흡수율을 몬테카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 납 차폐체 두께가 0.25 mm인 경우 비스무트 두께가 0.3 mm, 납 0.50 mm인 경우 비스무트 0.60 mm, 납 0.75 mm인 경우 비스무트 0.90 mm에서 유사한 경향성을 확인할 수 있었다. 따라서 차폐체의 소재로 납을 비스무트로 대체하여 사용하는 데는 무리가 없을 것으로 사료된다.

중심단어: 몬테카를로, 납, 비스무트, 차폐, 흡수율

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김갑중	송호대학교 방사선(학)과	조교수
	김낙상	송호대학교 방사선(학)과	부교수
	유세종	건양대학교 방사선학과	조교수
(공동저자)	이원정	대전보건대학교 방사선(학)과	부교수
	김정호	선린대학교 방사선(학)과	조교수
	홍성일	광양보건대학교 방사선(학)과	부교수
(교신저자)	전민철	대전보건대학교 방사선(학)과	조교수