

Reliability Verification of FLUKA Transport Code for Double Layered X-ray Protective Sheet Design

Sang Sik Kang,¹ Seung Wook Heo,³ Il Hong Choi,¹ Jae Hoon Jun,² Sung Woo Yang,²
Kyo Tae Kim,³ Ye Ji Heo,³ Ji Koon Park^{1,*}

¹Institute of Radiation Fusion Technology, International University of Korea

²Department of Radiological Science, International University of Korea

³Department of Biomedical Engineering, Inje University

Received: November 29, 2017. Revised: December 25, 2017. Accepted: December 31, 2017

ABSTRACT

In the current medical field, lead is widely used as a radiation shield. However, the lead weight is very heavy, so wearing protective clothing such as apron is difficult to wear for long periods of time and there is a problem with the danger of lethal toxicity in humans. Recently, many studies have been conducted to develop substitute materials of lead to resolve these problems. As a substitute materials for lead, barium(Ba) and iodine(I) have excellent shielding ability. But, It has characteristics emitting characteristic X-rays from the energy area near 30 keV. For patients or radiation workers, shielding materials is often made into contact with the human body. Therefore, the characteristic X-rays generated by the shielding material are directly exposed in the human body, which increases the risk of increasing radiation absorbed dose.

In this study, we have developed the FLUKA transport code, one of the most suitable elements of radiation transport codes, to remove the characteristic X-rays generated by barium or iodine. We have verified the reliability of the shielding fraction of the structure of the structure shielding by comparing with the MCPDX simulations conducted as a prior study. Using the MCNPX and FLUKA, the double layer shielding structures with the various thickness combination consisting of barium sulphate (BaSO_4) and bismuth oxide(Bi_2O_3) are designed. The accuracy of the type shown in IEC 61331-1 was geometrically identical to the simulation. In addition, the transmission spectrum and absorbed dose of the shielding material for the successive x-rays of 120 kVp spectra were compared with lead.

In results, 0.3 mm- BaSO_4 /0.3 mm- Bi_2O_3 and 0.1 mm- BaSO_4 /0.5 mm- Bi_2O_3 structures have been absorbed in both 33 keV and 37 keV characteristic X-rays. In addition, for high-energy X-rays greater than 90 keV, the shielding efficiency was shown close to lead. Also, the transport code of the FLUKA's photon transport code was showed cut-off on low-energy X-rays(below 33keV) and is limited to computerized X-rays of the low-energy X-rays. But, In high-energy areas above 40 keV, the relative error with MCNPX was found to be highly reliable within 6 %.

KeyWords: lead, barium sulfate, bismuth oxide, shielding rate

I. INTRODUCTION

최근 고령화 진입과 함께 의료 분야에서 방사선 관련 의료기기는 질병의 조기 진단 및 정확한 진단 그리고 치료에 대한 핵심적인 역할 수행을 위하여

발전하고 있으며 이용이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 이에 방사선 종사자 및 환자에 대한 불필요한 방사선 피폭을 저감하기 위한 체계적인 관리의 중요성이 높아지고 있는 실정이다.^[1] 방사선안전관리와 관련하여 방사선방호위원회(International Commission of Radiation Protection; 이하 ICRP)는

* Corresponding Author: Ji Koon Park

E-mail: radiopjk@iuk.ac.kr

Tel: +82- 55-751-8301

외부피폭 방어 3원칙으로 시간단축, 선원과의 거리 유지 및 차폐체 활용을 제시하고 있다. 한편, 의료 방사선 분야는 일반촬영, 유방촬영, 투시촬영, 그리고 핵의학 및 종양학 분야 등 사용하는 방사선의 에너지와 선량이 다양하지만, 외부방사선 차폐를 위한 납치마의 종류가 세분화되어 있지 않고, 인식 또한 미흡한 실정이다.

현재 의료분야에서 방사선 차폐를 위해 납(Pb) 재질의 여러 형태의 방호복을 착용하고 있는데, 이러한 납은 인체에 유해한 납 중독 및 경량화 한계 등의 문제를 가지고 있으며 친환경 대체 물질을 개발하고자 많은 연구를 진행하고 있다.^[2-6] 최근 납의 대체물질로서 연구되고 있는 바륨(Ba)과 요오드(I) 등은 차폐능은 우수하지만, 30 keV 근처의 에너지 영역에서 특성 X선이 방출되는 문제점이 있기 때문에 이전 연구에서 MCNPX 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 황산바륨(BaSO₄)과 산화비스무스(Bi₂O₃)를 이용한 이중구조의 차폐 시트의 구조를 설계하였다. MCNPX 방사선수송코드는 주로 고에너지 광자 또는 원자력분야에서 중성자 수송코드로 많이 개발되어져 왔기 때문에 저에너지 영역에서 연속 X선 광자에 대한 차폐체 성능을 검증하기 위한 벤치마크 코드의 개발 필요성이 요구되어져 왔다.

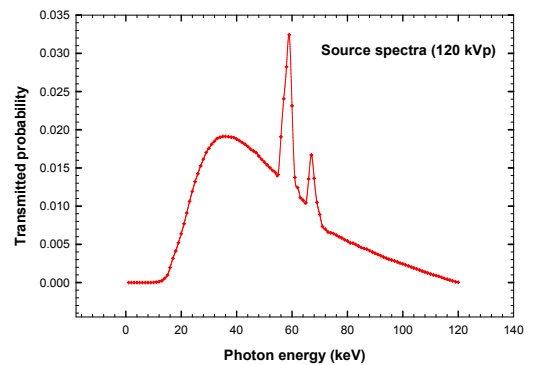
이에 본 연구에서는 윈도우 기반의 몬테카를로 시뮬레이션 도구인 FLUKA 프로그램을 이용하여 다양한 두께의 이중구조 차폐시트에 대한 연속 X선의 투과스펙트럼 및 차폐능을 납과 비교분석하여 이중구조차폐시트의 차폐능을 평가하였다. 또한, 이중구조의 차폐시트에 대한 FLUKA 프로그램의 시뮬레이션과 동일 조건으로 진행된 MCNPX 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

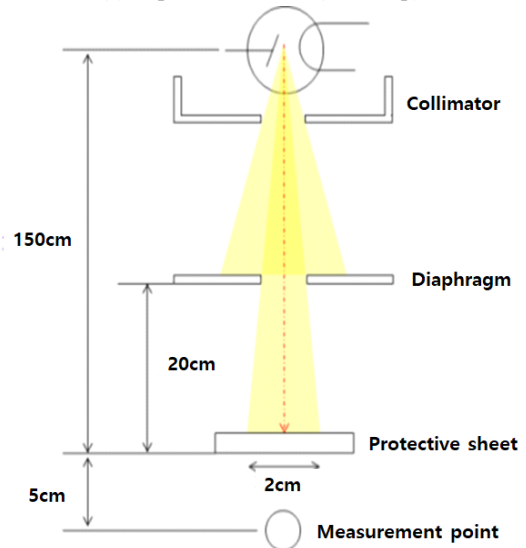
본 논문에서 이용되는 MCNPX 코드는 Monte Carlo N-Particle Extended의 약자로 미국 핵무기 연구소인 로스알라모스 연구소에서 개발되어 주로 원자력분야에서 중성자 수송코드로 이용되고 있으며, FLUKA(FLUKtuernede KAskade)는 CERN에서 개발한 코드로 고에너지 입자와 물질과의 상호작용과 수

송현상을 모사하기 위한 몬테카를로 시뮬레이션 패키지로 입자물리, 차폐체 설계, 검출기 설계, 의학 물리 등 최근 다양한 분야에서 활용되고 있다.

본 연구에서는 의료진단 분야에서 적용되는 친환경 차폐시트를 설계하기 위한 적합한 몬테카를로 시뮬레이션 코드가 없기 때문에 현재 고에너지 영역에서 신뢰성이 검증된 MCNPX와 FLUKA 코드를 이용하였다. Fig. 1 (a)에서와 같이 의료진단영역인 관전압 120 kVp의 X선 광자의 1차 빔 에너지 스펙트럼을 소스 데이터로 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.



(a) Input source data(120 kVp)



(b) Set-up diagram for simulation

Fig. 1. (a) Input source data and (b) set-up diagram for FLUKA and MCNPX simulation for double layered x-ray protective sheet.

차폐체의 종류는 일반적으로 방호용으로 이용되고 있는 납(Pb)과 본 연구에서 선정한 황산바륨(BaSO₄)과 산화비스무스(Bi₂O₃)를 이용하였으며, 면적은 10 cm

$\times 10 \text{ cm}$ 로 하였다. 차폐체에 대해서 X선 광자가 상호작용한 흡수율은 다음의 수식과 같다.

$$\Delta I = I_0 - I, \quad I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

여기서 I_0 는 입사 X선 강도, I 는 투과된 X선 강도, μ 는 선감약계수이고, x 는 차폐체의 두께이다. 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 임의의 x 에 대한 I 를 추정하여 ΔI 를 계산하여 그 결과값을 비교하였다.

Fig. 1 (b)는 이중 구조의 X선 차폐시트에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위한 IEC61331-1에 제시된 모식도를 나타내었다. 입사되는 연속 X선 광자들에 대해 차폐체의 투과스펙트럼을 얻기 위해 MCNPX의 TALLY F2와 FLUKA의 USRBDX를 사용하여 차폐체의 하단 표면을 통과하는 광자선속(photon flux)를 검출하였다. 또한, 이온전리함(ion chamber)은 Exradin A3 모델(면적 3.6 cm^2)을 구현하였으며, MCNPX의 TALLY F4와 FLUKA의 USRTRACK를 사용하여 전리함 내부로 들어오는 광자선속을 측정하였다. 끝으로 투과된 방사선에 대한 피폭선량을 평가하여 차폐능을 평가하기 위해 MCNPX의 TALLY F6과 FLUKA의 USRBIN-region 코드를 사용하여 이온전리함 내부에서의 흡수선량을 도출하였다.

시뮬레이션 결과 값을 얻기 위하여 X선의 한 표면에 입사하는 광자가 반대쪽 표면을 통과할 확률을 추정하였다. 소스 광자들이 진단 영역의 연속 X선 스펙트럼과 동일한 확률로 샘플링 하였으며, 이러한 연속 에너지를 가지는 광자의 투과 확률을 에너지별로 구분하여 적분함으로써 차폐능을 도출하였다.

차폐체의 두께에 따른 차폐능을 조사하기 위해 Reference 차폐물로 두께 0.6 mm의 Pb에 대하여 결과값을 얻었고, 다양한 두께조합의 황산바륨(BaSO_4)와 산화비스무스(Bi_2O_3)로 구성된 이중구조 차폐체에 대해 투과스펙트럼을 얻었다.

III. RESULT AND DISCUSSION

Fig. 2는 방사선 전산모사 코드인 FLUKA와 MCNPX 코드로 얻은 0.6 mm 두께의 납 단일층과

다양한 두께 조합의 BaSO_4 (상부)/ Bi_2O_3 (하부) 이중 구조로 된 차폐시트를 통과한 투과 스펙트럼 결과를 나타내었다.

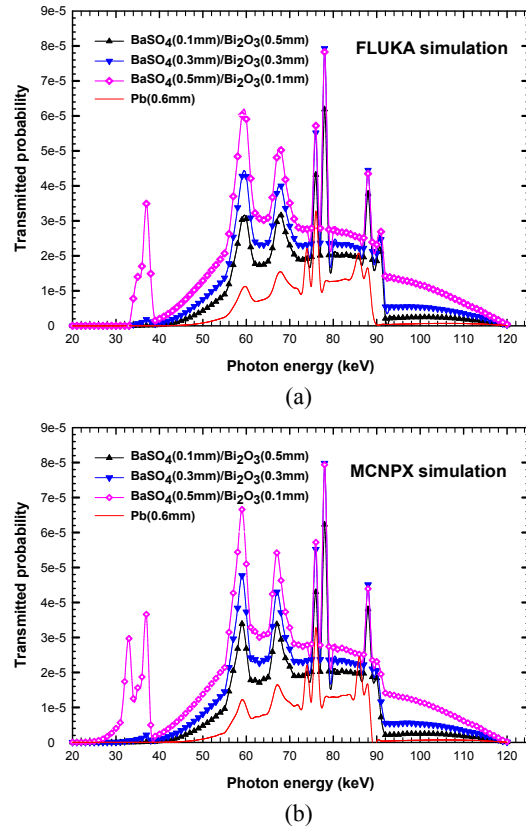


Fig. 2. The FLUKA(a) and MCNPX(b) transmitted spectrum of thickness of combination $\text{BaSO}_4/\text{Bi}_2\text{O}_3$ double layer and Pb(0.6 mm) single layer

0.5 mm- BaSO_4 /0.1 mm- Bi_2O_3 구조에서 0.1 mm 두께의 Bi_2O_3 층은 상부의 BaSO_4 층에서 발생하는 40keV 이하의 특성 X선을 모두 제거하지 못하여 방출하였고, 90 keV 이상의 에너지 대역에서 X선 광자의 투과율이 납에 비해 약 10 % 낮은 차폐능을 보였다. 한편, 0.3 mm- BaSO_4 /0.3 mm- Bi_2O_3 와 0.1 mm- BaSO_4 /0.5 mm- Bi_2O_3 구조에서는 33 keV 와 37 keV의 특성 X선을 모두 흡수하였으며, 90 keV 이상의 고에너지 X선에 대해서도 납과 거의 유사한 차폐효율을 보였다.

Fig. 3은 MCNPX와 FLUKA를 이용하여 120 kVp의 연속 X선 광자에 대한 다양한 두께조합의 $\text{BaSO}_4/\text{Bi}_2\text{O}_3$ 이중 차폐시트와 납(Pb)에 대한 MCNPX와 FLUKA 투과 스펙트럼을 비교하여 그래프로 나타내었다.

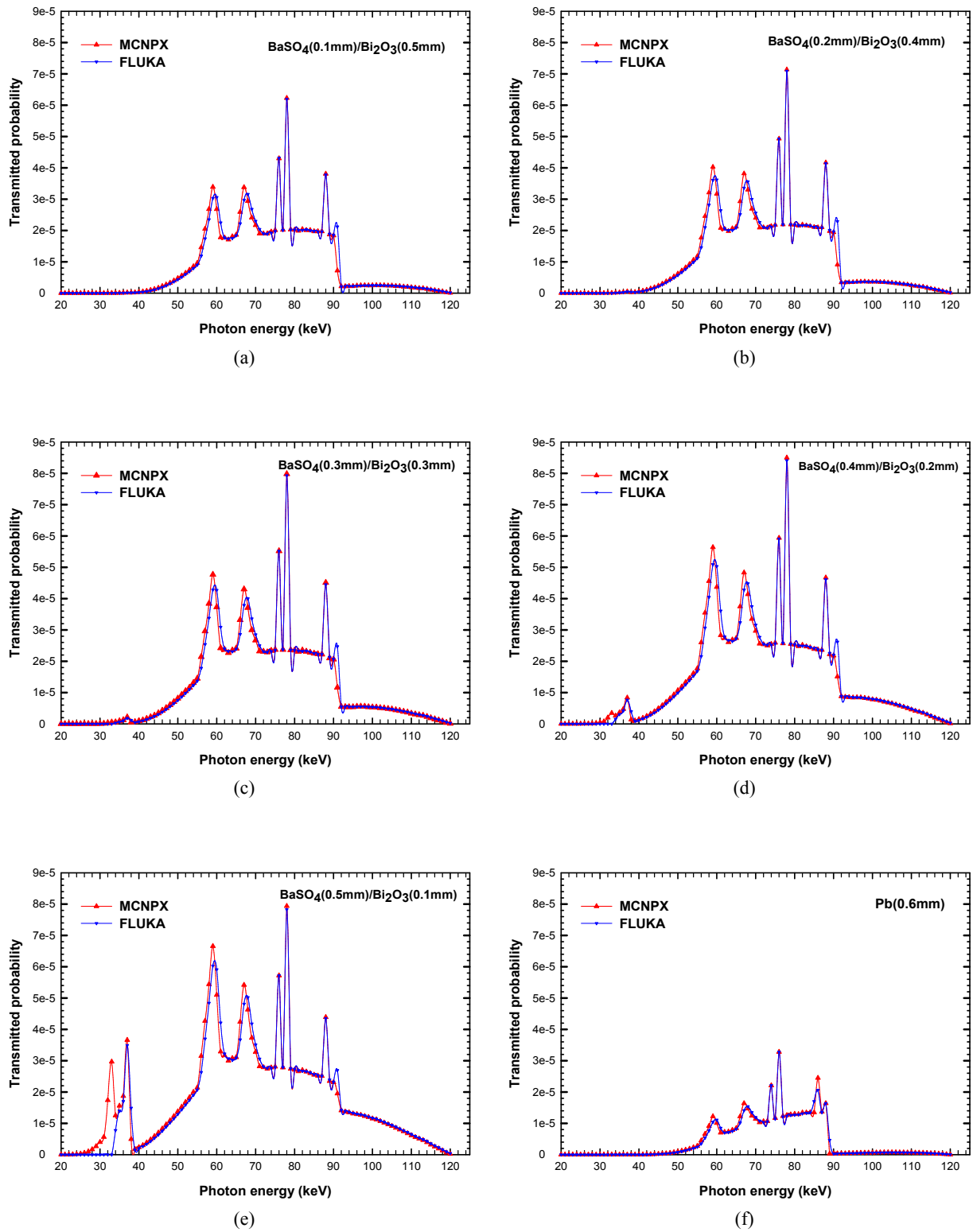


Fig. 3. Transmitted spectrum of BaSO₄/Bi₂O₃ double layer and Pb(0.6 mm) single layer obtained by FLUKA and MCNPX simulation with continuous x-ray photons(120 kVp).

Table 1. Simulation results of Pb single layer and BaSO₄/Bi₂O₃ double layer

Thickness combination of double protective layer (mm)	Scoring type	MCNPX		FLUKA		Relative error (%)
		mean	error(%)	mean	error(%)	
BaSO ₄ (0.1)/Bi ₂ O ₃ (0.5)	Surface flux	9.51×10 ⁻⁴	0.05	9.48×10 ⁻⁴	0.02	0.26
	Cell(ion chamber) flux	1.08×10 ⁻³	0.13	1.08×10 ⁻³	0.04	-0.35
	Absorbed dose (MeV/g)	2.13×10 ⁻⁶	0.16	2.08×10 ⁻⁶	2.76	2.39
BaSO ₄ (0.2)/Bi ₂ O ₃ (0.4)	Surface flux	1.1×10 ⁻³	0.05	1.09×10 ⁻³	0.01	0.4
	Cell(ion chamber) flux	1.24×10 ⁻³	0.13	1.24×10 ⁻³	0.01	-0.09
	Absorbed dose (MeV/g)	2.46×10 ⁻⁶	0.15	2.33×10 ⁻⁶	2.61	5.46
BaSO ₄ (0.3)/Bi ₂ O ₃ (0.3)	Surface flux	1.27×10 ⁻³	0.05	1.26×10 ⁻³	0.01	0.6
	Cell(ion chamber) flux	1.44×10 ⁻³	0.12	1.44×10 ⁻³	0.03	0.02
	Absorbed dose (MeV/g)	2.88×10 ⁻⁶	0.14	2.84×10 ⁻⁶	2.71	1.47
BaSO ₄ (0.4)/Bi ₂ O ₃ (0.2)	Surface flux	1.49×10 ⁻³	0.04	1.47×10 ⁻³	0.02	1.19
	Cell(ion chamber) flux	1.7×10 ⁻³	0.11	1.69×10 ⁻³	0.03	0.51
	Absorbed dose (MeV/g)	3.47×10 ⁻⁶	0.13	3.48×10 ⁻⁶	1.9	-0.25
BaSO ₄ (0.5)/Bi ₂ O ₃ (0.1)	Surface flux	1.84×10 ⁻³	0.04	1.76×10 ⁻³	0.01	4.41
	Cell(ion chamber) flux	2.13×10 ⁻³	0.1	2.06×10 ⁻³	0.03	3.17
	Absorbed dose (MeV/g)	4.63×10 ⁻⁶	0.12	4.53×10 ⁻⁶	1.58	2.28
Pb(0.6)	Surface flux	4.49×10 ⁻⁴	0.07	4.41×10 ⁻⁴	0.02	1.94
	Cell(ion chamber) flux	5.12×10 ⁻⁴	0.2	5.03×10 ⁻⁴	0.05	1.84
	Absorbed dose (MeV/g)	9.97×10 ⁻⁷	0.23	1.02×10 ⁻⁶	3.61	-2.34

그래프에서와 같이, MCNPX와 FLUKA로 얻은 두 투과 스펙트럼이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, BaSO₄(0.5 mm)/Bi₂O₃(0.1 mm)의 차폐체에 대한 투과 스펙트럼에서 FLUKA의 투과 스펙트럼 결과에 33 keV의 특성 X선이 나타나지 않았다. 이러한 결과로부터 FLUKA의 경우 34 keV 이하의 에너지에 대해 cut-off가 되는 것을 알 수 있었으며, 이러한 cut-off는 향후 FLUKA 프로그램의 옵션 모드 변경으로 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로, 본 연구에서 개발된 FLUKA 수송코드의 신뢰성을 검증하기 위하여 이중구조 차폐시트를 통과한 엑스선 광자의 투과확률과 이온전리함에 흡수된 흡수선량을 도출하였으며, 검증 코드인 MCNPX 시뮬레이션 결과 값과 비교한 표를 Table 1에 나타내었다.

결과와 같이 개발된 FLUKA 수송 입력 코드의 신뢰성을 검증하기 위해 MCNPX 코드의 벤치마크(benchmark)를 한 결과 상대오차가 최대 6%이지만, 이는 Cut-off 현상에 의한 것이며, 40 keV 이상에서는 거의 1% 이내로 MCNPX와의 일치성이 매우 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 결과로부터 FLUKA의 수송코드의 신뢰성이 우수하다는 것을 확인할 수 있었지만, 33 keV 이하의 저에너지에서 cut-off가 생기기 때문에 이에 대한 향후 프로그램 코드의 수정 및 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.

IV. CONCLUSION

본 연구에서 일반촬영 에너지(120 kVp) 스펙트럼에 대해 차폐체(Pb, BaSO₄/BiO)의 투과스펙트럼, 흡

수선량을 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 FLUKA 수송코드의 신뢰성을 검증하였다.

검증결과, FLUKA의 수송코드는 33 keV 이하에서는 cut-off 가 발생하여 저에너지 X선 광자에 대한 전산모사에 제약이 있지만, 40 keV 이상의 고에너지 영역에서 MCNPX와의 상대오차가 6 % 이내로 신뢰성이 매우 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 향후 납을 대체하기 위한 다양한 친환경 차폐체 물질에 대한 다층 구조의 차폐체 개발을 위한 구조설계를 위해 개발된 FLUKA 수송코드는 유용하게 적용이 가능할 것으로 기대되며, 특히, 핵의학, 치료용 고에너지 감마선 등에 대한 차폐체 구조설계 연구에 활용이 가능할 것으로 판단되며, 실제 차폐체 제작을 통한 성능 평가 시 기초자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 중견연구자 지원사업(과제번호 2017R1A2B4009249)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Reference

- [1] J. S. Song, "Study on optimal process development of radiation protection", Journal of radiation protection and research, Vol. 5, No. 2, pp. 1-11, 1994.
- [2] K. T. Kim, H. J. Kim, J. H. Kim, C. H. Cho, I. H. Choi, J. K. Park, S. S. Kang, "Comparison of shielding rate of tungsten and lead in continuous x-ray energy using monte carlo simulation", Proceedings of the 2011 autumn symposium on the korean society of radiology, Vol. 5, No. 2, pp. 35-39, 2011.
- [3] S. C. Kim, M. W. Park, "Development of radiation shielding sheet with environmentally-friendly materials; II:
- [4] Evaluation of barum, tourmaline, silicon polymers in the radiation shielding sheet", Journal of radiological science and technology, Vol. 34, No. 2, 2011.
- [5] Katoh Y, Fukushi M, Abe S, et al. "Evaluation of non-lead board as X-ray protective material", Nippon Hoshasen Gijutsu Gakkai Zasshi., Vol. 20, No. 63, p

p. 428-435, 2007.

- [6] Aghamiri M. R., Mortazavi S. M. J., et al. "A novel design for production of efficient flexible lead-free shields against x-ray photons in diagnostic energy range", J. of Biomed. Phys. Eng. Vol. 1(1). pp. 17-21, 2011.

이중 구조의 X선 차폐시트 설계를 위한 FLUKA 수송코드의 신뢰성 검증

강상식,¹ 허승욱,³ 최일홍,¹ 전제훈,² 양승우,² 김교태,³ 허예지,³ 박지균^{1,*}

¹한국국제대학교 방사선융합기술연구소

²한국국제대학교 방사선학과

³인제대학교 의용공학과

요 약

현재 의료분야에서는 방사선 차폐체로서 납(Pb)이 널리 쓰이고 있다. 하지만 납은 무게가 매우 무거워 납 치마 등의 방호복은 장시간 착용이 어려우며, 인체에 치명적인 납 중독의 위험이 상시 가지고 있다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하고자 납을 대체 할 수 있는 물질에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 납의 대체물질로써 대표적인 바륨(Ba)과 요오드(I) 등은 우수한 차폐능을 가지고 있지만, 30keV 근처의 에너지 영역에서 특성 X선을 방출하는 특성을 가지고 있다. 환자나 방사선 종사자의 경우 차폐체를 인체에 접촉하고 있는 경우가 많으므로 차폐체에서 발생하는 특성 X선이 인체에 직접 조사되어 방사선 피폭을 증가시킬 위험이 매우 높다.

본 연구에서는 바륨(Ba)과 요오드(I)등에서 발생하는 특성 X선을 제거하기에 적절한 이중구조 차폐체를 방사선 수송코드 중 하나인 FLUKA 수송코드를 개발하여 선행연구로서 진행된 MCNPX 시뮬레이션과 비교 분석하여 이중구조 차폐체의 차폐율에 대한 신뢰성을 검증하고자 하였다. MCNPX와 FLUKA를 이용하여 황산바륨(BaSO₄)과 산화비스무스(Bi₂O₃)로 이루어진 다양한 두께조합의 이중구조 차폐체를 설계하였으며, IEC61331-1에 제시된 모식도를 기하학적으로 동일하게 시뮬레이션 상에 구현하였다. 또한, 120 kVp의 연속 X선 스펙트럼에 대한 차폐체의 투과스펙트럼과 흡수선량을 납과 비교 평가하였다.

평가결과, 0.3 mm-BaSO₄/0.3 mm-Bi₂O₃ 와 0.1 mm-BaSO₄/0.5 mm-Bi₂O₃ 구조에서는 33 keV와 37 keV의 특성 X선을 모두 흡수하였으며, 90 keV 이상의 고에너지 X선에 대해서도 납과 거의 유사한 차폐효율을 보였다. 또한, FLUKA의 수송코드는 33 keV 이하에서는 cut-off 가 발생하여 저에너지 X선 광자에 대한 전산모사에 제약이 있지만, 40 keV 이상의 고에너지 영역에서 MCNPX와의 상대오차가 6 % 이내로 신뢰성이 매우 우수하다는 것을 확인할 수 있었다.

중심단어: 납, 황산바륨, 산화비스무스, 차폐율