Calculation of Shielding Rate and Dose Distribution of Space of L-Block-Type Protective Equipment for Radioactive Fluorine using the Monte Carlo Method

Dong-Hyun Han*

The Korean Society of Radiology Education Institute

Received: November 02 2021. Revised: November 26, 2021. Accepted: November 30, 2021

ABSTRACT

In this study, the shielding rate of L-block-type shielding equipment used for radiation protection when radioactive fluorine is injected into the human body and the dose distribution of the space in the injection room were calculated using the Monte Carlo method. The shielding rate of the body and window parts of the L-block-type shielding equipment was 99.99%. The dose distribution calculated at a distance of 1 m was relatively high at 135°, 45°, 225°, 315°, and 180° of the XZ plane, and was calculated to be very low at 0°, 90°, and 270°. In the YZ plane, it was relatively high at 135°, 180°, and 225°, and was calculated very low at the remaining angles. The AZ and BZ planes also showed similar results to the YZ plane. In addition, it was confirmed that the shielding rate was the best in the range of 225° to 315° through the dose distribution in the horizontal direction of the source and the 45° direction above the source. These results can be used as basic data necessary for radiation protection of radiation workers.

Keywords: Radioactive fluorine, L-block-type shielding equipment, Monte Carlo, shielding rate, dose distribution.

I. INTRODUCTION

최근 방사선 진단 및 치료는 임상 전 분야에 걸쳐 사용이 증가되고 있고, 이로 인해 방사선 작업 종사자들의 방사선에 노출되는 기회는 날로 증가하고 있다[1]. 전리방사선 특히, 감마선의 저선량에 피폭된 방사선 작업 종사자들의 피폭선량과 암사망률과는 유의한 차이가 없었으나, 백혈병 발생위험도가 높아지고[2], Ashmore 등[3]은 1951~1983년까지 캐나다의 방사선 작업 종사자 206,620명을 대상으로 한 코호트 연구를 통해 10 mSv당 암발생위험도가 3% 증가할 것으로 보고한 바 있다. 이에 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP) 산하의 상설분과위원회에서 주로 환자측면의 방호와 종사자측면의 방호에 대해 다양한 연구와 권고를 제공하고 있다[4]. ICRP에서는 방사선 작업 종사자 방호 목적으로 선량한도를 5년간 100 mSv를 초과하지 않는 범위 내에서 연간 최대 20 mSv로 권고하고 있다[5]. 특히 핵의학과의 방사선 작업 종사자들에 대한 피폭은 대부분의 작업이 수작업이기 때문에 선원과 가깝게 위치해 있고[6], 환자에게 동위원소를 주입하는 과정뿐만 아니라 제너레이터에서 동위원소의 용출 및 분배과정, 환자의 검사과정 등에서 많은 피폭선량이 가해진다[7]. 최근 PET를 이용한 진료와 연구활동이 급속히 확대되면서 방사성 불소 등의 양전자방출핵종의 사용이 증가하고 있다. 따라서 방사선 작업 종사자는 방사선 방호활동을 포함한 방호장비 및 방호시설을 통해 방사선으로부터 안전을 확보하고 방호에 적정화를 기할 수 있는 특별한 장치들을 갖추어야 한다[8]. 방사선 방호를 위해 검출

* Corresponding Author: Dong-Hyun Han E-mail: rth93@hanmail.net Tel: +82-010-4657-9209
Address: 30-14, Uncheon-ro 154beon-gil, Seo-gu, Gwangju, Republic of Korea

기를 이용한 실제 측정의 경우 외부적인 변수 요인이 많고, 측정기의 에너지 및 방향의존성 등에 의해 결과 값에 대한 신뢰성을 확보하기 어렵다[9]. 또한 선량계의 위치와 종류에 따라서 선량의 과대 또는 과소평가 등의 여러 가지 오차가 발생할 수 있는 문제점이 있다[10]. 이에 본 연구에서는 몬테칼로 기반의 Geant4를 이용해 방사성 불소를 인체 내에 주입할 때 차폐목적으로 사용되는 L-블럭형 방호장비의 차폐능력을 평가하고, 작업공간의 선량분포를 계산하여 방사선 작업 종사자들을 위한 방사선 방호에 필요한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. Geant4

GEANT4는 GEometry ANd Tracking의 약자로써 1970년대 CERN의 주도로 개발된 거대 강입자충돌기(Large Hardron Collider)에 발생되는 고에너지 입자의 물리작용 즉 광자(Photon)와 중성자(Neutron)의 상호작용을 전산모사하기 위해 개발되었다. 현재는 원래 목적을 넘어 천체물리, 핵물리, 의료, 가속기, 환경 및 우주방사선 모니터링을 위한 실험, 방사선 방어 및 차폐 등의 광범위한 분야에서 응용되고 있다[11].

2. 전산모사의 구성

2.1. 선원의 구성

방사성불소는 핵의학 검사를 목적으로 사이클로트론에서 생산되는 양전자 방출핵종으로써 일반적으로 $^{18}O(p,n)^{18}F$ 반응에 의해 생산되며, 109.77분의 반감기로 β^+ 붕괴($p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$)하여 양전자를 방출하고, 양전자는 쌍소멸 후 0.511 MeV의 감마선 2개를 방출한다. 방사성의약품 제조 시 생체활성물질의 수소나 수산기를 방사성 불소로 치환하여 방사성추적자로 이용한다. 방사성 불소의 특성을 Table 1에 정리하였다. 주사기 내의 선원의 방사능량은 370 MBq(10 mCi), 체적은 생리식염수와 방사성불소를 혼합한 2 ml로 하고, Primary GeneratorAction_Class에 4π 방향으로 랜덤하게 방출할 수 있도록 코딩하였다. 방사성불소에서 방출되는 양전자의 평균 운동에너지는 249.8 keV, 쌍소멸 후 감마선의 방출률은 96.73%이다. 따라서 370 MBq의 방사성 불소에서 방출되는 양전자의 수는 아래 식과 같이 계산하였다.

$$n = y \times A \quad (1)$$

n : Number of positrons(#/sec)
y : Radioactive fluorine emission rate (0.9673 positron/decay)
A : Radioactivity(370 MBq)

따라서 Eq. (1)처럼 양전자의 수는 3.579×10^8 #/sec이며, 이 횟수만큼 전산모사를 진행하였다.

Table 1. Radiophysical Property of Radioactive Fluorine

Nucleus	Half life	Decay	Q-value	Daughter Nucleus
^{18}F	109.77m	β^+: 100%	1655.50 keV	^{18}O

2.2. L-블럭형 방호장비의 기하학적 모델링

본 연구의 대상인 방사성불소 방호장비는 납유리(100 mm), 납(50 mm) 등의 재질로 구성하여 방사선 작업종사자의 피폭을 방호하는 장치로서 국내에서 널리 사용되고 있다. Fig. 1과 같이 Detector Construction Class에 나비형 바늘 및 주사기, 3-way, L-블럭형 방호장비를 모델링 하였다. 모델링에 필요한 각각의 구성 물질에 대한 정보는 Table 2와 같이 미국 국립표준기술연구소(National Institute of Standards Technology, NIST)의 데이터를 사용하였다.

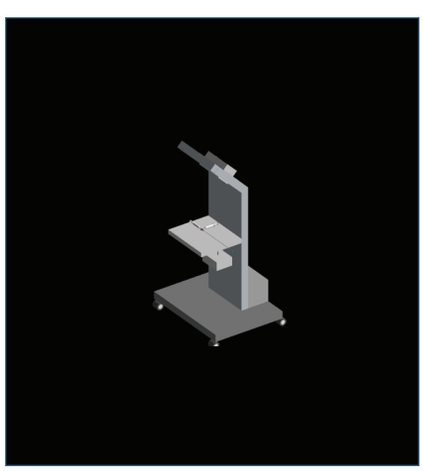

Fig. 1. Geometric Modeling of L-block Shielding Equipment.

Table 2. Characteristics of Geometric Components

Geometry	Material	Element weight	Density (g/cm^3)
World volume	Air	N(70), O(30)	1.290×10^{-3}
Detector	Tissue Soft (ICRP)	H(10.447), C(23.219), N(2.488), O(63.024) Na(0.113), Mg(0.013), S(0.199), P(0.133), Cl(0.134), K(0.199), Ca(0.023), Fe(0.005), Zn(0.003)	1.0
Shielding equipment	Lead	Pb(100)	11.35
Syringe needle	Fe	Fe(100)	7.874
Syringe body	PVC	H(2.0793), C(24.7793), Cl(73.1413)	0.92

2.3. 검출부(Tally)의 설정과 에너지 수송 과정

L-블럭형 방호장비의 차폐율 평가 및 주변공간의 흡수선량분포를 확인하기 위한 검출부의 구성은 인체의 조직에 해당하는 Tissue_Soft_ICRP를 이용하였다. 검출부는 반경 5cm의 구형태로 설정하여 방향의존성을 최소화하였다. 차폐율 계산을 위해 방호장비의 선원측, 몸체(Body part) 후면부, 납유리창 부분(Window part) 후면에 검출부를 각각 설정하였다. 방호장비 주변 공간의 선량분포를 계산하기 위해 Fig. 2와 같이 선원을 중심으로 X, Y, Z축을 설정하고, 45° 방향으로 A, B축을 추가로 설정하였다. 이때 검출부는 선원과 1 m거리에서 각 축이 Z축과 만나서 이루는 평면 즉 XZ평면, YZ평면, AZ평면, BZ평면에 각각 45° 간격으로 Fig. 3과 같이 총 26개의 검출부를 설정하여 공간의 선량분포를 계산하였다. 선량의 계산은 검출부에 흡수된 에너지를 질량으로 나누어 nGy/370 MBq · sec 단위로 환산하였다.

방사성 불소의 양전자 및 쌍소멸, 감마선과 물질과의 상호작용을 구현하기 위해 G4EMStandard Physics를 이용하였고, 이 물리과정에는 콤프턴산란, 쌍소멸, 광전효과 등을 포함하고 있다. 또한 발생된 양전자와 감마선에 의해 발생된 2차전자의 에너지 수송과정을 위해 다중산란, 전리, 제동방사 등을 포함한 전자와 물질과 상호작용도 포함하여 전산모사하였다. 차폐율의 계산은 선원측 선량과 차폐측 선량을 구하여 Eq. (2)와 같이 계산하였다.

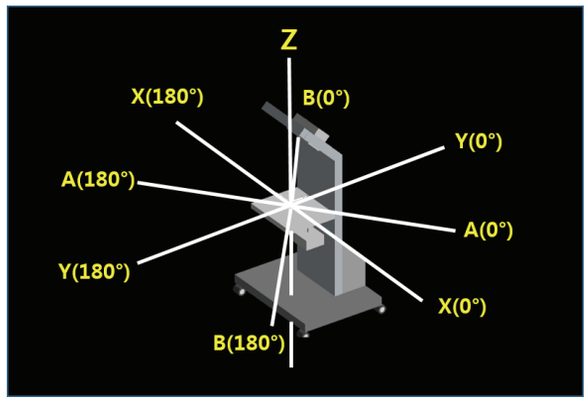

Fig. 2. Axial direction for Tally's Coordinate Setting.

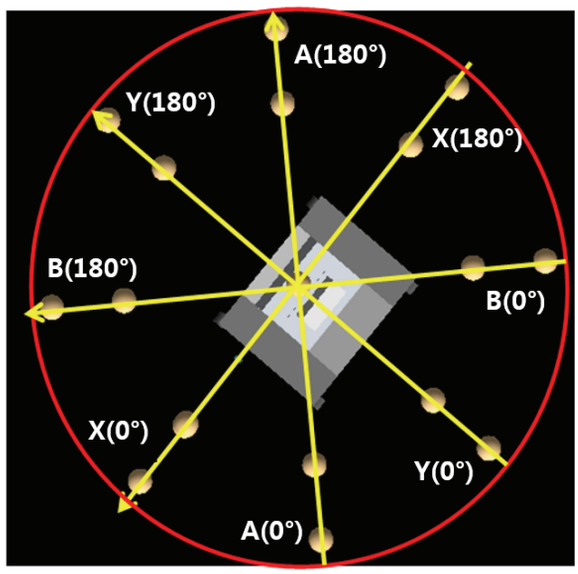

Fig. 3. Position of Tally by Axis and Angle.

$$SR(\%) = \frac{NS - S}{NS} \times 100 \quad (2)$$

SR(%) : 차폐율(Shielding rate)
NS : 차폐없음(No shield)
S : 차폐(Shield)

III. RESULT & DISCUSSION

1. L-블럭형 방호장비의 차폐율

종양의 조기 진단 및 전이여부 등의 검사를 목적으로 핵의학과에서 사용되는 방사성 불소의 인체 내 주입 시 방사선 방호를 위해 사용되는 L-블럭형 차폐장치의 차폐율을 계산한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Shielding Rate of L-block-type Shielding Equipment

Tally Position	Window Part	Body Part
Doses of Source side (nGy/370 MBq · sec)	5,788.8	5,788.8
Doses of Shielding side (nGy/370 MBq · sec)	0.37	0.52
Shielding rates(%)	99.99	99.99

방사성 불소 선원측의 선량은 5,788.8 nGy/370 MBq· sec 였고, 납유리창이 설치된 부위(Window part)의 선량은 0.37 nGy/370 MBq· sec 였다. 차폐율은 99.99 %로 매우 높은 차폐율을 나타냈다. 또한 차폐장치의 몸체(Body part) 후면 부위의 선량은 0.52 nGy/370 MBq· sec로 계산되어 차폐율은 99.99%였다. 방사성 불소는 109.77분의 반감기로 β^+ 붕괴($p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$)하여 양전자를 방출하고, 양전자의 소멸과정에서 발생되는 감마선의 에너지 0.511 MeV이다. 이 감마선 에너지의 납에 대한 반가층(HVL)이 약 4.1 mmPb인데 반해 L-블럭형 방호장비의 납유리는 반가층의 약 24배, 몸체부위는 12배 이상으로 설계되었기 때문이다. 그러나 이러한 결과는 방사선원과 차폐체의 직선적인 물리과정의 결과이다. 방사성 불소의 인체 내 주입 시 방호장비에 의한 차폐효과는 방사선작업종사자의 몸통과 머리부위에 제한된다. 핵의학과 업무 특성상 방사선 작업 종사자들에 대한 피폭은 대부분의 작업이 수작업이므로 선원에 직접 노출우려가 있는 팔과 손 등에 대한 방호를 위한 노력이 필요하다[3]. 또한 의료기관에 따라서 사용되는 차폐장치의 종류 및 형태가 다양하고, 종사자간에 차폐장치 사용에 대한 인식수준의 편차가 큰 편이다[12]. 따라서 방사선 관리구역 내에서 사용하는 방호장비의 특성에 대한 이해와 적정한 운영이 필요하다고 생각된다.

2. L-블럭형 방호장비 주변 공간의 선량분포

선원을 중심으로 차폐장치의 X, Y, Z, A, B축을 설정하고, 각 축이 Z축과 만나는 평면에서 45° 간격으로 선량을 계산한 결과는 Table 4와 같다. 종사자 기준으로 방호장비의 좌측에서 우측방향으로 설정된 XZ평면의 최대선량지점은 135°에서 112.44 nGy/370 MBq · sec 였고, 45°, 225°, 315°, 0° 순이었다. 90°, 270° 위치는 상대적으로 낮게 계산되었으며, 최소선량지점은 270°였다. 종사자측에서 선원측으로 설정된 YZ평면의 최대선량지점은 135°로 114.3 nGy/370 MBq· sec 였고, 180°, 225° 순이었다. 0°, 45°, 90°, 270°, 315°는 상대적으로 낮게 나타났으며, 최소선량지점은 315°로 0.18 nGy/370 MBq· sec 였다. 종사자의 좌측 사방향에 선원측 사방향으로 설정된 AZ평면의 최대선량지점은 135°로 112.73 nGy/370 MBq· sec 였고, 180°, 225°에서 상대적으로 높았으며, 다른 각도에서는 낮게 나타났다. 종사자의 우측 사방향에서 선원측 사방향으로 설정된 BZ평면은 AZ평면과 유사한 결과를 나타냈다. 한편 선원과 수평위치에서 1 m거리의 각도별 선량분포와 선원 상방 45° 위치의 선량분포는 Fig. 4와 같다.

Table 4. The Absorption Dose in Tally by Angle according to the Axial Direction

Angle	Dose by plane of axis(nGy/370 MBq · sec)			
	XZ plane	YZ plane	AZ plane	BZ plane
0°	88.25	0.25	3.59	3.93
45°	111.8	0.26	4.96	4.99
90°	0.73	0.73	0.73	0.73
135°	112.44	114.3	112.73	112.03
180°	89.23	110.09	109.69	108.99
225°	90.15	91.4	91.27	90.44
270°	0.32	0.32	0.32	0.32
315°	89.68	0.18	6.44	6.56

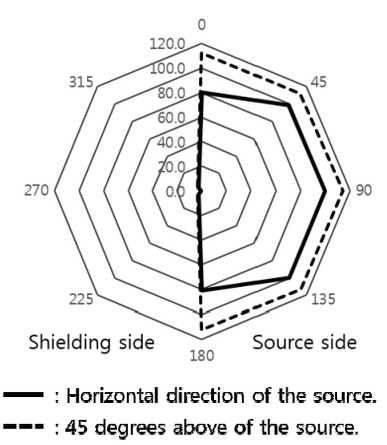

Fig. 4. Dose Distribution at a Distance of 1m from the Source of Radiation.

방호장비에 의해 차폐가 이루어진 종사자측의 선량이 현저히 낮음을 확인하였고, 선원과 수평방향보다 45° 상방의 선량이 상대적으로 높게 계산되었다. L-블럭형 방호장비 주변공간의 선량분포를 통해 종사자측의 225°~315° 범위의 차폐율이 가장 우수하였다. 핵의학과 종사자의 PET/CT 업무 환경 중 방사성 의약품의 준비 및 주사과정에서 상당히 많은 피폭선량을 받고 있으며, 의료기관의 업무환경과 방호장비의 사용 유무에 따라 다양한 형태의 피폭이 우려되고 있다[13]. 따라서 종사자가 방호장비의 차폐특성을 이해하는 것은 매우 중요하다. 저자는 본 연구를 통해 방사선 피폭저감을 위해서 L-블럭형 차폐장치 주변에 이동형 납유리 등 추가적이 방호장비의 설치를 제안한다. 피검자가 앉게 되는 구역을 제외한 0°~45°, 135°~180° 범위에 이동형 차폐장치를 설치한다면 종사자의 피폭선량 감소에 유효할 것으로 사료된다. 또한 지속적인 모의훈련을 통해 방사성 불소의 취급시간을 최소화해야 할 것이며, 본 연구의 결과가 종사자의 피폭저감을 위한 자료로 활용되기를 기대한다.

IV. CONCLUSION

본 연구에서는 방사성 불소의 취급 시 방사선 방어 목적으로 사용되는 L-블럭형 방호장비의 차폐율과 주변 공간의 선량분포를 몬테칼로 방법으로 계산하였고, 그 결과는 다음과 같다. 첫째, 납유리부분 및 몸체의 차폐율은 99.99%로 매우 높았다. 둘째, 선원으로부터 1 m 거리에서의 선량분포를 계산한 결과 225°～315°범위에서 방사선차폐가 가장 우수함을 확인하였다. 이와 같은 결과가 향후 방사선 작업 종사자들의 방사선 방호에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

Reference

[1] B. S. Lim, "Radiation Exposure Dose on Persons Engaged in Radiation-related Industries in Korea", Journal of radiological science and technology Vol. 29. No. 3, pp. 185-195, 2006. http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2012.6.1.027

[2] G. M. Kendall, C. R. Muirhead, B. H. MacGibbon, J. A. O'Hagan, A. J. Conquest, A. A. Goodill, B. K. Butland, T. P. Fell, D. A. Jackson, M. A. Webb, et al., "Mortality and occupational exposure to radiation: first analysis of the National Registry for Radiation Workers", British Medical Journal, Vol. 304, pp. 220-225, 1992. https://doi.org/10.1136/bmj.304.6821.220

[3] J. P. Ashmore, D. Krewski, J. M. Zielinski, H. Jiang, R. Semenciw, P. R. Band, "First analysis of mortality and occupational radiation exposure based on the National Dose Registry of Canada", American Journal of Epidemiology, Vol. 148, No. 6, pp. 564-574, 1998. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a009682

[4] ICRP, "Radiation Protection and Safety in Medical Care", Publications 73, Pergamon Press, Oxford, 1996.

[5] ICRP, "Recommendation of the International Commission on Radiological Protection", Publications 60, Pergamon Press, Oxford, 1990.

[6] W. Chruscielewski, J. Olszewski, J. Jankowski M, Cygan, "Hand exposure in nuclear medicine workers", Radiation protection dosimetry, Vol. 101, No. 1-4, pp. 222-232, 2002. https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a005973

[7] T. E. Hilditch, A. T. Elliott, D. E. Anstee, T. Murray, "Fifteen years of radiological protection experience in a regional radiopharmacy", Health physics, Vol. 59, No. 1, pp. 109-116, 1990. https://doi.org/10.1097/00004032-199007000-00013

[8] Y. S. Park, J. S. Yoo, D. Y. Kim, *Medical Radiation Management*, ShinKwang Publisher, pp. 73-100, 1992.

[9] M. Sans-Merce, N. Ruiz, I. Barth, et al. "Recommendations to Reduce Hand Exposure for Standard Nuclear Medicine Procedures", Radiation Measurements, Vol. 46, No. 11, pp. 1330-1333, 2011. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.07.011

[10] A. Carnicer, M. Ginjaume, M. A. Duch, et al., "The use of different types of thermoluminescent dosimeters to measure extremity doses in nuclear medicine", Radiation Measurements, Vol. 46, No. 12, pp. 1835-1838, 2011. https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2011.06.047

[11] GEANT4 Homepage, http://geant4.cern.ch

[12] Y. S. Kim, M. D. Seo, W. K. Lee, et al., "The Usefulness Evaluation of Radiation Shielding Devices in PET Scan Procedures", Korea Society of Nuclear medicine Technology, Vol. 14, No. 2, pp. 65-76, 2010.

[13] J. C. Park, S. J, Pyo, "Study of External Radiation Expose Dose on Hands of Nuclear Medicine Workers", Journal of Korean Society of Radiological Technology, Vol. 35, No. 2, pp. 141-149, 2012.

몬테칼로 방법을 이용한 방사성 불소에 대한 L-블럭형 방호장비의 차폐율 및 공간의 선량분포 계산

한동현

한국방사선학회교육원

요 약

본 연구에서는 방사성 불소의 인체 내 주입 시 방사선 방호목적으로 사용되는 L-블럭형 방호장비의 차폐율과 주변공간의 선량분포를 몬테칼로 방법을 이용해 계산하였다. L-블럭형 차폐장치의 몸체 및 윈도우 부위의 차폐율은 99.99 %였다. 1 m거리에서 계산한 선량분포는 XZ평면의 135°, 45°, 225°, 315°, 180°에서 상대적으로 높게 나타났고, 0°, 90°, 270°에서는 매우 낮게 계산되었다. YZ평면에서는 135°, 180°, 225°에서 상대적으로 높게 나타났고, 나머지 각도에서는 매우 낮게 계산되었다. AZ와 BZ 평면에서도 YZ평면과 유사한 결과를 나타냈다. 또한 선원의 수평방향과 선원의 상방 45°방향의 선량분포를 통해 225°~315°범위에서 차폐율이 가장 우수함을 확인하였다. 이와 같은 결과가 방사선 작업 종사자들의 방사선 방호에 필요한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

중심단어: 방사성 불소, L-블럭형 방호장비, 몬테칼로, 차폐율, 선량분포

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	한동현	한국방사선학회교육원	연구위원