

## &lt;원저&gt;

## PET/CT실에서 사용되는 주사기 차폐체의 산란선 측정

장동근<sup>1)</sup>·박철우<sup>2)</sup>·박은태<sup>3)</sup><sup>1)</sup>동남권원자력의학원 핵의학과·<sup>2)</sup>동의과학대학교 방사선과·<sup>3)</sup>인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

## Scattering Measurement of Syringe Shield Used in PET/CT

Dong-Gun Jang<sup>1)</sup>·Cheol-Woo Park<sup>2)</sup>·Eun-Tae Park<sup>3)</sup><sup>1)</sup>Dept. of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center<sup>2)</sup>Dept. of Radiological Technology, Dong-Eui Institute of Technology<sup>3)</sup>Dept. Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

**Abstract** PET/CT is a medical equipment that detects 0.511 MeV of gamma rays. The radiation workers are inevitably exposed to ionizing radiation in the process of handling the isotope. Accordingly, PET/CT workers use syringe shields made of lead and tungsten to protect their hands. However, lead and tungsten are known to generate very high scattering particles by interacting with gamma rays. Therefore, in this study, we tried to find out the effect on the scattering particles emitted from the syringe shield. In the experiment, first, the exposure dose to the hand (Rod phantom) was evaluated according to the metal material (lead, tungsten, iron, stainless steel) using Monte Carlo simulation. The exposure dose was compared according to whether or not plastic is attached. Second, the exposure dose of scattering particles was measured using a dosimeter and lead. As a result of the experiment, the shielding rate of plastics using the Monte Carlo simulation showed the largest difference in dose of about 40 % in lead, and the lowest in iron, about 15 %. As a result of the dosimeter test, when the plastic tape was wound on lead, it was found that the reduction rate was about 15 %, 28 %, and 39 % depending on the thickness. Based on the above results, it was found that 0.511 MeV of gamma ray interacts with the shielding tool to emit scattered rays and has a very large effect on radiation exposure. However, it was considered that the scattering particles could be sufficiently removed with plastics with a low atomic number. From now on, when using high-energy radiation, the shielding tool and the skin should not be in direct contact, and should be covered with a material with a low atomic number.

**Key Words :** Scatter ray, Hand dose, Syringe shield, Recoil electron, PET/CT

**중심 단어 :** 산란선, 손 선량, 주사기 차폐체, 반도체자, PET/CT

## I. 서 론

PET/CT (Positron Emission Tomography/Computed Tomography)는 방사성동위원소를 이용하여 질병을 진단하는 장비로 관련 종사자들은 동위원소를 취급하는 과정에서 필연적으로 전리 방사선에 노출된다. 특히 방사성의약품을 분배하여 환자에게 주입되기까지 방사선작업종사자의

손에 높은 방사선피폭을 발생시킨다[1].

국제방사선방어위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)에서는 핵의학에 근무하는 방사선작업종사자들의 전신등가선량한도를 50 mSv/year, 말단선량한도를 500 mSv/year로 권고하고 있다[2]. 하지만, 말단선량한도가 전신선량에 비해 10배 높음에도 불구하고 말단선량한도의 초과자가 전신선량을 초과한 작업 종사자

의 수에 비해 많을 뿐만 아니라, 말단선량의 잠재적 위험성이 전신선량에 비해 더욱 크다고 보고되고 있다[3]. 방사선 피폭은 개인피폭선량계를 이용하여 몸통의 심부선량만을 평가하고 있으며, 말단선량에 대한 피폭은 관리되고 있지 않다.

방사선피폭을 효과적으로 방어할 수 있는 방법으로 적절한 차폐체 사용이 제안되고 있으며, PET/CT 검사실에서는 차폐물질로 고원자번호인 납과 텅스텐이 주로 사용된다[4]. 하지만, 차폐를 위해 사용된 납과 텅스텐에서는 산란선이 발생하며, 방사선피폭의 잠재적 요소로 알려져 있다[5]. 이에 본 연구에서는 PET/CT실에서 이용되는 방사성동위원소의 에너지인 0.511 MeV의 감마선을 대상으로 차폐체와 밀착되어 산란선의 영향을 매우 높게 받는 손의 피폭선량을 비교 분석하고자 하였다.

## II. 대상 및 방법

실험은 몬테카를로 모의 모사의 일종인 Monte Carlo N-P Transport Code (MCNPX, Los Alamos National Laboratory, ver.2.5.0, USA)와 방사선계측기 (Inspector radiation Alert meter, USA)를 이용한 실측실험을 진행하였다. 실험을 통계적 오차를 줄이기 위해 모의 모사의 경우 10E6번 모의 추정하였으며, 실측의 경우 20회 반복 측정하였다.

### 1. 몬테카를로 모의 모사

#### 1) 산란선에 대한 비정

0.511 MeV 감마선이 물질과 상호작용을 통해 발생하는 산란선의 에너지는 산란각도에 의존하며, 본 연구에서는 식 (1) [6]과 같이 산란된 반도전자의 최대에너지를 갖는 180°를 기준으로 최대에너지를 산출하였다.

$$E_{e^-} = h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha} \quad \text{식(1)}$$

$$E_{e^-} : \text{반도전자 에너지}, h\nu : \text{감마선 에너지}, \alpha : \frac{h\nu}{m_e c^2}$$

반도전자의 산출된 에너지를 선원으로 Fig. 1과 같이 구 형태의 플라스틱을 제작하여 0.05 mm 단위로 단위 면적당 입자 수(Particles/cm<sup>2</sup>)로 측정하였다. 플라스틱 물성은 Table 1과 같다[7]. 비정은 CSDA (Continuous Slowing Down

Approximation range)[8] 방법을 이용하여 감소율이 지속적으로 감소하는 구간을 평균 비정의 매우 근접한 근사치를 비정으로 정의하였으며, 본 연구에서는 Log 값으로 변환하여 비정을 산출하였다.

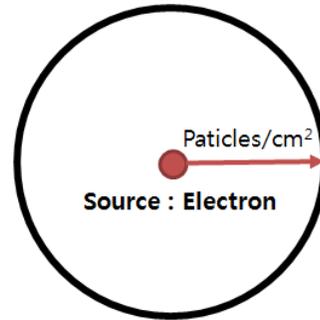


Fig. 1. Measurement of the range of scatter

Table 1. Components of Plastic

	Elemental composition (% by mass)			Density (g/cm <sup>3</sup> )
	H	C	Cl	
Polyvinyl Chloride (PVC)	0.048382	0.384361	0.567257	1.406

#### 2) 팬텀

ICRU에서 제공하는 팬텀 중 손가락을 대표하는 Rod phantom[9]을 사용하였으며, 직경 19 mm, 길이 3,000 mm로 물성은 Table 2와 같다. 측정은 ICRP 권고에 따라 Phantom에 2 mm의 피부를 추가 삽입하여[10] 진행하였으며, 피부의 물성은 Table 3과 같다[11].

Table 2. Components of Rod phantom

Geometry	Material	Element weight(%)				Density (g/cm <sup>3</sup> )
		H	C	N	O	
Rod Phantom	PMMA (ICRU)	10.1	11.1	2.6	76.2	1.11

Table 3. Components of Skin

Organ/tissue	Elemental composition (% by mass)								
	H	C	N	O	Na	P	S	Cl	K
Skin	10.0	20.4	4.2	64.5	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1

#### 3) 실험 모델링

Fig. 2와 같이 차폐도와 손을 밀착시키기 위해 Fig. 3과 같이 Rod phantom에 피부를 부착하여 금속으로 구성된

차폐도구를 둘러쌌으며, 차폐도구의 모양에 따라 손잡이 없이 차폐체와 접촉하는 A 타입 차폐체, 손잡이 있는 B 타입 차폐체로 구분하여 실험을 진행하였다. 보수적 관점으로 손의 장갑은 고려하지 않았다.

측정 위치는 ICRU에서 정의하는 피부선량의 대표 위치인 0.07 mm와 피부의 평균 선량을 표현하는 반경 9.4~9.45 mm로 설정하였으며[10], 실험값은 단위 질량당 흡수된 에너지 (MeV/g)로 진행하였다. 금속물질은 대표적인 차폐물질인 납과 텅스텐 그리고 일반적인 금속물질인 철과 스테인리스 스틸[12]로 선정하였으며, 물성은 Table 4와 같다.

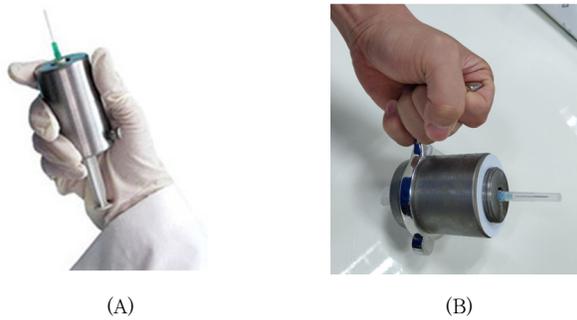


Fig. 2. Two types of shielding tools

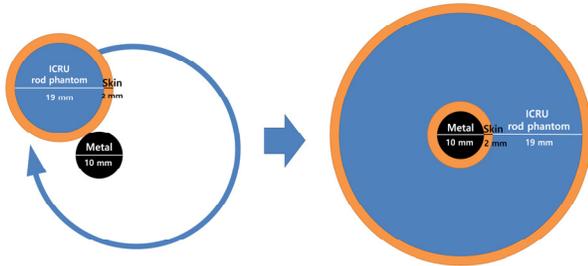


Fig. 3. Geometric structure

선원의 위치는 Fig. 2와 같은 조건으로 금속내부와 외부로 설정하였으며, 금속물질 외부에 플라스틱 두께를 0.02 mm 단위로 증가시켰으며, 플라스틱의 최대두께는 산란선

의 비정으로 설정하였다. 실험결과는 플라스틱 유무에 따른 차폐율로 비교 분석하였다.

## 2. 계측기를 이용한 실측

0.511 MeV의 감마선을 방출하는 <sup>18</sup>F (37 MBq) 선원에 대한 선량을 계측하였으며, 계측기는 GM 계수관의 일종인 Inspector를 사용하였다. 산란선을 최대 반영하고자 Fig. 4와 같이 계측부위에 1 cm 두께의 납을 밀착시켰다. 산란선의 감소를 위해 Fig. 5와 같은 임상에서 쉽게 사용가능한 PVC반창고를 납에 부착시켜 선량을 비교 측정하였다. 계측값의 통계적 유의확률은 IBM사의 SPSS를 이용하였으며, 각 그룹간의 비교를 위해 일원배치분산분석을 사용하였다.



Fig. 4. Measurement of scatter using a dosimeter



Fig. 5. Plastic tape

## III. 결 과

### 1. 몬테카를로 모의 모사

#### 1) 비정

0.511 MeV 감마선에서 발생하는 반도체의 최대에너지는 수식에 따라 0.34 MeV로 산출되었으며, 산출된 에너지를 선원으로 설정하여 플라스틱의 비정을 측정한 결과 Fig. 6과 같이 0.8 mm의 비정을 갖는 것으로 나타났다.

Table 4. Components of stainless steel

		Elemental composition (% by mass)							Density (g/cm <sup>3</sup> )
Lead	Pb								11.34
	1.0								
Tungsten	W								19.25
	1.0								
Iron	Fe								7.9
	1.0								
Stainless steel	C	Si	P	S	Ti	Cr	Mn	Fe	7.8
	0.000790	0.009830	0.000440	0.000440	0.007370	0.111300	0.009830	0.860000	

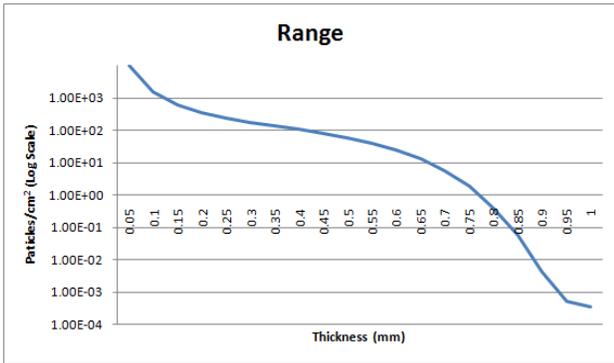


Fig. 6. Beta ray range

2) A 타입 차폐체

선원이 납 차폐체 내부에 있는 경우 Fig. 7과 같이 플라스틱 두께가 증가할수록 피부가 받는 피폭선량은 0.8 mm 플라스틱 두께에서 최대 40%의 감소율을 나타냈으며, 손의 평균 피폭선량은 최대 10%의 감소율이 나타났다.

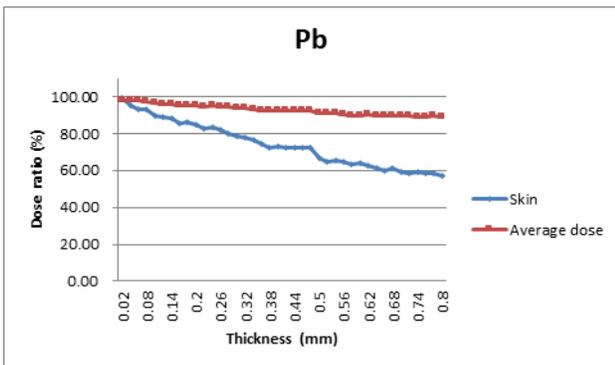


Fig. 7. Dose reduction rate according to plastic thickness of A type lead shield

선원이 텅스텐 차폐체 내부에 있는 경우 Fig. 8과 같이 플라스틱 두께가 증가할수록 피부가 받는 피폭선량은 0.8 mm 플라스틱 두께에서 최대 40%의 감소율을 나타냈으며, 손의 평균 피폭선량은 최대 5%의 감소율이 나타났다.

선원이 철 차폐체 내부에 있는 경우 Fig. 9와 같이 플라스틱 두께에 따라 최대 15%의 감소율이 나타났으며, 피부와 손의 평균 선량은 큰 차이가 나타나지 않았다.

선원이 스테인리스 스틸 차폐체 내부에 있는 경우 Fig. 10과 같이 플라스틱 두께가 증가할수록 피부가 받는 피폭선량은 0.8 mm 플라스틱 두께에서 최대 20%의 감소율을 나타냈으며, 손의 평균 피폭선량은 최대 10%의 감소율이 나타났다.

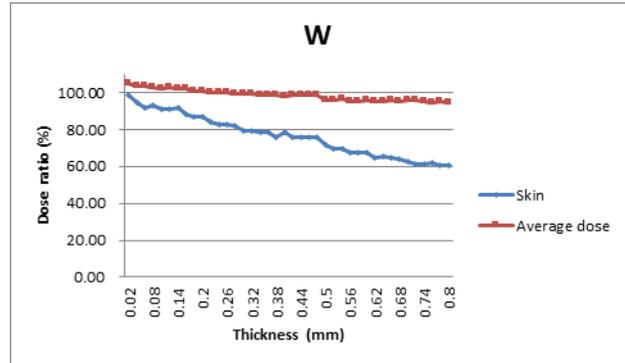


Fig. 8. Dose reduction rate according to plastic thickness of A type tungsten shield

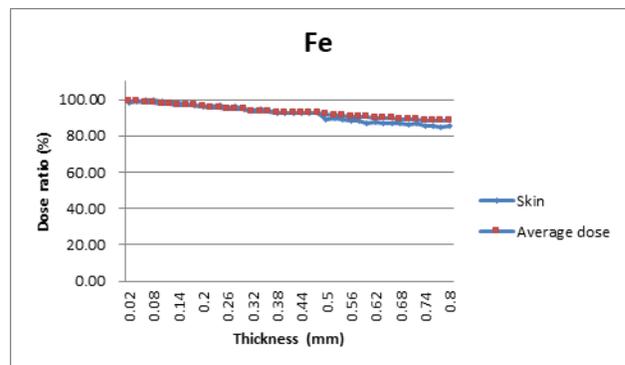


Fig. 9. Dose reduction rate according to plastic thickness of A type iron shield

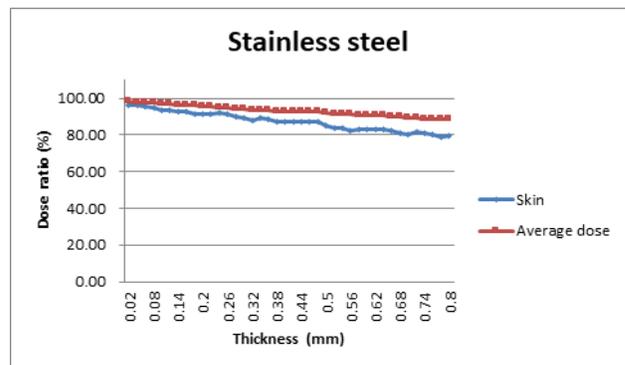


Fig. 10. Dose reduction rate according to plastic thickness of A type Stainless steel shield

3) B 타입 차폐체

선원이 외부에 있으며, 금속을 손에 쥐고 있는 B타입의 경우 Fig. 11, 12와 같이 납, 텅스텐 금속을 사용할 때, 손의 평균선량은 변화가 없었다. 피부의 선량의 경우 Fig. 11과 같이 납은 약 0.25 mm부터 40% 감소율을 갖는 것으로 나타났다. 텅스텐의 경우 Fig. 12와 같이 0.22 mm에서부터

30%의 감소율로 나타났다.

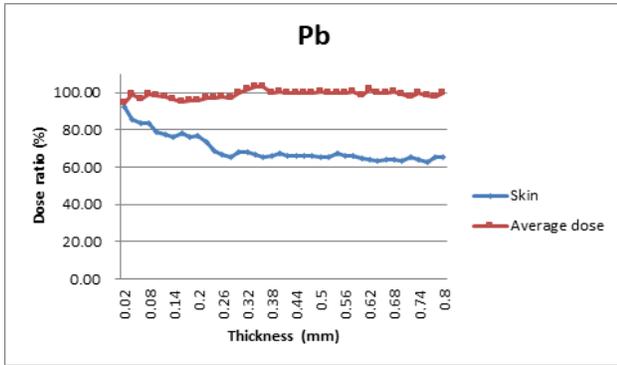


Fig. 11. Dose reduction rate according to plastic thickness of B-type lead handle

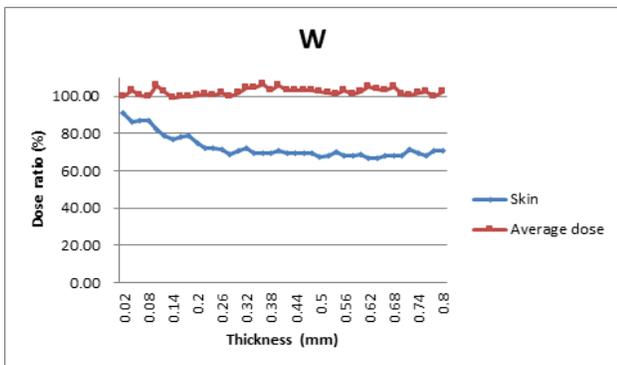


Fig. 12. Dose reduction rate according to plastic thickness of B-type tungsten handle

철과 스테인리스 스틸을 손에 쥐고 있는 경우 Fig. 13, 14와 같이 피부의 선량과 손의 평균선량은 변화가 나타나지 않았다.

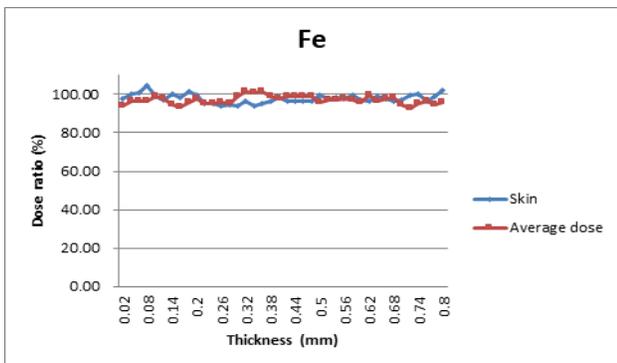


Fig. 13. Dose reduction rate according to plastic thickness of B-type iron handle

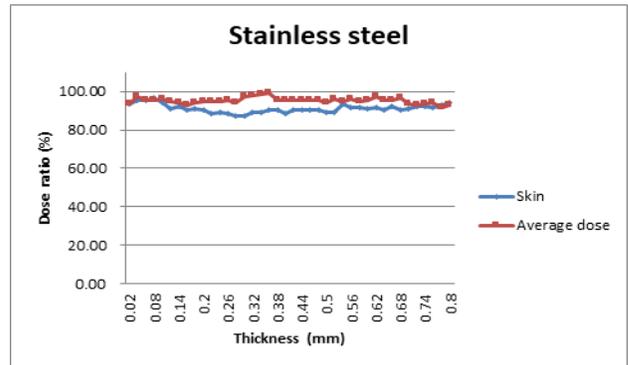


Fig. 14. Dose reduction rate according to plastic thickness of B-type Stainless steel handle

## 2. 계측기를 이용한 실측

납 차폐체만을 사용했을 때의 평균 선량은 9.35  $\mu\text{Sv}$ 로 측정되었고, 납 차폐체에 PVC 테이프를 2, 4, 6겹으로 감았을 때 각각의 평균 선량은 Fig. 15와 같이 7.93  $\mu\text{Sv}$ , 6.69  $\mu\text{Sv}$ , 5.67  $\mu\text{Sv}$ 로 측정되어, 15%, 28%, 39%의 감소율을 갖는 것으로 나타났다. 각 그룹 간 통계적 유의확률은  $p < 0.01$  이하로 만족하였다.

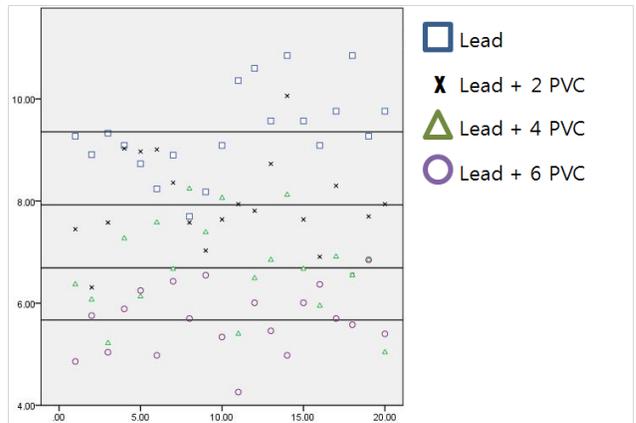


Fig. 15. Dose measurement using a dosimeter

## IV. 고찰

0.511 MeV의 감마선은 PET/CT(Positron Emission Tomography/Computed Tomography)에서 사용되는 고에너지의 방사선 영역으로 방사선 방어에 대한 특별한 관리가 필요하다[13]. 의료용 방사선의 에너지는 검사장비에 따라 차이를 가지게 되며, 진단용 x선 장치의 경우 약 50 keV 전후, 핵의학 장치인 감마카메라에서 140 keV, PET/CT에서

는 511 keV를 사용하고 있다[14]. 이와 같이 PET/CT에서 사용되는 방사선의 에너지는 진단용 방사선 중 가장 높은 에너지를 사용하고 있으며, 콤프턴 산란이 주 상호작용으로 이때 발생된 산란전자는 인체에 흡수되는 광자의 비율을 높아지게 한다[15].

방사선 차폐물질로 주로 사용되는 납과 같은 고원자번호의 물질은 콤프턴 산란의 발생확률을 높이게 되며, 이로 인해 전자의 발생효율 또한 높아지게 된다[6]. 전자는 다시 제동복사선으로 변화되어 방사선의 스펙트럼을 변화시키며 피폭을 증가시키게 된다[16]. 하지만 기존의 연구에 따르면 차폐체로부터 발생된 2차 전자는 방사선피폭을 증가시키는 요인이지만, 비정이 매우 짧아 공기층으로도 차폐가 가능한 것으로 알려져 있으며[17], 방사선량을 평가할 때 변화된 스펙트럼(산란선)은 평가하지 않고 있다. 하지만 손으로 방사성동위원소를 다루는 핵의학과의 경우 인체(손)와 차폐체가 밀착되어 2차 전자가 직접적인 영향을 받게 되며, 납으로부터 발생된 2차선(산란선)의 영향을 무시할 수 없다[18]. 이에 본 연구에서는 손을 기준으로 산란선에 대한 피폭평가와 감소방안을 제시하고자 한다.

본 실험은 몬테카를로 모의 모사를 이용한 실험과 산란선의 발생여부를 가늠하기 위한 실측평가로 구성하였으며, 첫째, 몬테카를로 모의 모사의 실험결과 511 keV의 감마선에서 발생할 수 있는 반도체자의 최대에너지는 340 keV로 플라스틱에서 약 0.8 mm의 비정을 갖는 것으로 나타났다. 본 실험에서는 손잡이가 없는 형태의 A 타입 차폐체와 손잡이가 있는 B 타입 차폐체로 구분하여 실험을 진행하였으며, 납, 텅스텐, 철, 스테인리스 스틸로 구분하여 실험을 진행하였다. 실험 결과, A 타입의 경우 철과 스테인리스 스틸에서 손의 평균 선량과 피부의 선량은 피폭 감소 효과가 5~10% 내외로 큰 차이가 나타나지 않았다. 하지만 납과 텅스텐의 경우 플라스틱 사용에 따라 피부선량에서 최대 40%의 차폐효과가 나타났다. B타입의 경우 또한 4 종류의 물질 모두의 손의 평균 선량과 철, 스테인리스 스틸의 피부선량 감소효과는 매우 미미하였다. 하지만, 납의 경우 피부선량에서 플라스틱 두께 약 0.25 mm부터 차폐효과 40%로 평행을 나타냈고, 텅스텐의 경우 약 0.22 mm 에서부터 30%의 차폐효과로 평행을 나타냈다. 손과 밀착하는 차폐도구 사용에 있어 원자번호가 높은 금속은 산란선 발생으로 인해 피부에 대한 피폭이 증가되므로 반드시 손과 밀착되는 부위는 원자번호가 낮은 물질로 덧씌워져 있어야 할 것이다. 임상에서 실제 사용되는 차폐도구의 두께는 매우 다양하지만, 본 연구에서는 임의의 두께 1 cm를 적용하였으며, 추후 다양한 두께에 대한 실험이 진행되어야 할 것으로 생각된다.

위 실험결과를 토대로 의료용 PVC 반창고를 사용한 결과 두께가 증가됨에 따라 최대 40%의 차폐율이 나타나는 것을 알 수 있었다. 계측기를 이용한 실측의 경우  $^{18}\text{F}$ 의 반감기 및 거리에 대한 오차 등 다양한 변수가 존재하며, 본 연구에서는 실제 매뉴얼에 따른 방사선계측 방법이 아닌 산란선 여부를 가늠하고자 임의의 방법으로 실험을 진행하였다.

핵의학과는 방사성의약품을 직접 생산, 분배, 조제, 환자에게 주입까지 방사선작업종사자의 손을 거치게 되며, 각각의 업무를 수행함에 따라 손에 대한 방사선피폭을 필연적으로 받게 된다[2, 19]. 산란된 반도체자는 비정이 매우 불규칙하고 지그재그 운동을 하여[20], 매우 짧은 비정을 갖는다. 이에 플라스틱 반창고와 같은 간단한 방법으로도 손의 방사선피폭을 충분히 감소시킬 수 있다. 단, 방사성동위원소의 오염을 방지하기 위해 착용하는 비닐장갑은 플라스틱 재질이 포함되어 있으나 두께가 약 0.02 mm로 매우 얇아 차폐의 효과는 없을 것으로 사료되었다.

2014년 우리나라에서는 실제 방사선에 의한 손의 장해가 보고되었으며[21], 앞으로 전신선량 뿐만 아니라 손과 같은 말단선량에 대한 관심이 증가될 필요가 있을 것으로 사료되었다.

## V. 결 론

PET/CT에서 사용되는 0.511 MeV의 감마선은 차폐도구와 상호작용하여 산란선을 발생시킨다. 이러한 산란선은 비정이 매우 짧지만 차폐도구와 피부가 밀착되는 경우 인체에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서 손을 대상으로 원자번호 낮은 플라스틱으로 덧씌운 결과 손의 평균 선량은 변화가 없었지만, 피부의 경우 최대 약 40%의 선량 감소효과를 나타냈다. 앞으로 고에너지의 방사선물질을 사용할 경우 차폐도구가 피부와 직접 접촉하는 부위는 원자번호가 낮은 물질로 덧씌워져 있어야 할 것이며, 더 나아가 말단선량 감소방안에 대해서도 지속적으로 연구되어야 한다.

## REFERENCES

- [1] Park JC, Pyo SJ. Study of external radiation exposure dose on hands of nuclear medicine workers. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2012; 35(2):141-9.
- [2] ICRP. General principle of monitoring for radio-

- logical protection, ICRP Publication 35, pergamon Press, Oxford; 1982.
- [3] Han DH, Kang SK, Kim CY. Finger doses received during  $^{99m}\text{Tc}$  injections calculated with GEANT4. *Journal of Radiation Protection and Research*. 2008;33(1):41-6.
- [4] Warren-Forward H, Cardew P, Smith B, Clack L, McWhirter K, Johnson S, Wessel K. A comparison of dose savings of lead and lightweight aprons for shielding of  $^{99m}\text{Tc}$ -Technetium radiation. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;124(2):89-96.
- [5] Deb P, Jamison R, Mong L, Paul U. An evaluation of the shielding effectiveness of lead aprons used in clinics for protection against ionising radiation from novel radioisotopes. *Radiation Protection Dosimetry*. 2015;165(1-4):443-7.
- [6] Ianniello A, Mansi L, Brian J, McParland: Nuclear medicine radiation dosimetry. Springer; 2011.
- [7] Goldstone KE. Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement, in: ICRU Report 44, International Commission on Radiation Units and Measurements, 1990.
- [8] ICRU. Stopping powers and ranges for electrons and positrons. ICRU Report 37, International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda; 1984.
- [9] Smith H. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, ICRP publication 74, International Commission on Radiological Protection, Pergamon Press; 1997.
- [10] Menzel HG, Clement C, DeLuca P. ICRP Publication 110. Realistic reference phantoms: An ICRP/ICRU joint effort. A report of adult reference computational phantoms. *Annals of the ICRP*. 2009;39(2):1.
- [11] Valentin J. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: Reference values: ICRP Publication 89. *Annals of the ICRP*. 2002;32(3-4):1-277.
- [12] Williams RG, Gesh CJ, Pagh RT. Compendium of material composition data for radiation transport modeling (No. PNNL-15870). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States); 2006.
- [13] Zargan S, Ghafarian P, Monfared AS, Sharafi AA, Bakhshayeshkaram M, Ay MR. Evaluation of radiation exposure to staff and environment dose from  $^{18}\text{F}$ -FDG in PET/CT and cyclotron center using thermoluminescent dosimetry. *Journal of Biomedical Physics & Engineering*. 2017;7(1):1.
- [14] Jang D, Kim GH, Park C. Analysis of shielding effect of lead and tungsten by use of medical radiation. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2018; 12(2):173-8.
- [15] Aminian M, Bakhshandeh M, Allahbakhshian-Farsani M, Bakhshandeh E, Shakeri N. Comparison of the protection performance in a composite shield and a lead standard shield in terms of biological effects in nuclear medicine. *Iranian Journal of Nuclear Medicine*. 2017;25(2):129-35.
- [16] Jang DG, Kang S, Kim J, Kim C. An analysis of exposure dose on hands of radiation workers using a Monte Carlo simulation in nuclear medicine. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2015;38(4):477-82.
- [17] Jang DG, Kim C, Kim J. Simulation of energy absorption distribution using of lead shielding in the PET/CT. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2015;9(7):459-65.
- [18] He X, Zhao R, Rong L, Yao K, Chen S, Wei B. Answers to if the lead aprons are really helpful in nuclear medicine from the perspective of spectroscopy. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017;174(4):558-64.
- [19] Mariotti F, Gualdrini G. Extremity dosimetry problems during the handling of radionuclides syringes in nuclear medicine: A Monte Carlo radiation transport simplified approach. *Radiation Measurements*. 2011;46(4):430-5.
- [20] Jang DG. Therapeutic radionuclides: Beta radiation range. *Journal of Instrumentation*. 2020; 15(08):T08002.
- [21] Shim DM, Kim YM, Oh SK, Lim CM, Kwon BT. Radiation induced hand necrosis of an orthopaedic surgeon who had treated a patient with fluoroscopy-guided spine injection. *Journal of the Korean Orthopaedic Association*. 2014;49(3):250-4.

구분	성명	소속	직위
제1저자	장동근	동남권원자력의학원 핵의학과	방사선사
공동저자	박철우	동의과학대학교 방사선과	교수
교신저자	박은태	부산백병원 방사선종양학과	방사선사