

<원저>

피부선량을 기준으로 0.511 MeV 감마선에 대한 납 차폐체의 산란선 및 차폐 효율 분석

장동근¹⁾·박은태²⁾

¹⁾동남권원자력의학원 핵의학과·²⁾인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

Analysis of Scattering Rays and Shielding Efficiency through Lead Shielding for 0.511 MeV Gamma Rays Based on Skin Dose

Dong-Gun Jang¹⁾·Eun-Tae Park²⁾

¹⁾Dept. of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center

²⁾Dept. of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Abstract Radiation causes radiation hazards in the human body. In Korea, a case of radiation necrosis occurred in 2014. In this study, the scatter and shielding efficiency according to lead shielding were classified into epidermis and dermis for 0.511 MeV used in nuclear medicine. In this study, experiments were conducted using the slab phantom that represents calibration and the dose of human trunk. Experimental results showed that the shielding rate of 0.25 mmPb was 180% in the epidermis and 96% in the dermis. Shielding at 0.5mmPb showed shielding rates of 158% in the epidermis and 82% in the dermis. As a result of measuring the absorbed dose by subdividing the thickness of the dermis into 0.5 mm intervals, when the shielding was carried out at 0.25 mmPb, the dose appeared to be about 120% at 0.5 mm of the dermis surface, and the dose was decreased at the subsequent depth. Shielding at 0.5 mmPb, the dose appeared to be about 101% at the surface 0.5 mm, and the dose was measured to decrease at the subsequent depth. This result suggests that when lead aprons are actually used, the scattering rays would be sufficiently removed due to the spaces generated by the clothes and air. Therefore, the scattered ray generated from lead will not reach the human body. The ICRU defines the epidermis (0.07), in which the radiation-induced damage of the skin occurs, as the dose equivalent. If the radiation dose of the dermis is considered in addition, it will be helpful for the evaluation of the prognosis for radiation hazard of the skin.

Key Words: Scatter, Skin, Apron, PET/CT, Shielded

중심 단어: 산란선, 피부, 방사선방어용앞치마, 양전자방출단층촬영장치, 차폐

1. 서론

방사선이 인체에 조사되면 방사선장해를 유발하게 되며, 세계보건기구(World Health Organization; WHO)에서는 방사선을 발암물질로 분류하고 있다[1]. 방사선을 이용할 때에는 ALARA(As Low As Reasonably Achievable) 원칙에 따라 최소의 방사선량을 조사하여 최대의 이익을 얻도록 해

야 하며, 방사선 피폭으로 인한 위해를 방지하기 위해 철저한 안전관리가 필요하다. 방사선 피폭을 방어하기 위한 방법으로는 시간, 거리, 차폐의 세 가지 방법이 있으며, 방사선 차폐물질로는 납이 방사선차폐가 매우 우수하다. 의료환경에서는 납이 함유된 방사선방어용앞치마를 주로 사용한다. 하지만, 0.511 MeV의 고에너지 감마선을 방출하는 PET/CT (Positron Emission Tomography/Computed Tomography)

Corresponding author: Eun-Tae Park, Dept. of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University, 75, Bokji-ro, Busanjin-gu, Busan, 47392, Republic of Korea / Tel: +82-51-890-6677 / E-mail: linacpet@hanmail.net

Received 17 July 2020; Revised 05 August 2020; Accepted 21 August 2020

Copyright ©2020 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

환경에서는 일반적으로 방사선방어용앞치마를 사용하지 않으며[2,3], 방사선방어용앞치마의 무게로 인한 불편함으로 방사선방어용앞치마 사용이 정당화될 수는 없다[4,5]. 뿐만 아니라 일부 연구에서는 PET/CT 환경에서 방사선방어용앞치마에 따른 차폐효과가 없다는 주장도 있다[6]. 납은 고원자번호의 물질로 높은 에너지의 감마선과의 상호작용을 통해 산란선이 발생되며, 이러한 산란선으로 인해 제동복사선을 발생시킨다. 방사선 피폭의 잠재적 요소 중 하나로 납으로부터 발생된 제동복사선으로 알려져 있으며[7], 산란입자의 비정이 짧아 피부의 높은 영향을 미치게 된다. 피부는 외부와 접촉하는 표피층과 기저세포층인 진피층으로 구성되어 있으며, 표피에 장애가 발생할 경우 진피층의 세포 분열로 인해 표피층의 장애를 복구하지만, 진피층이 손상을 받게 되면 새로운 세포를 공급받지 못해 장애 복구되지 못하게 된다[8].

국내에서는 2014년 장시간 X선 노출로 인한 손의 피부에 대한 방사선장해가 보고되었고[9], 이에 본 연구에서는 X선보다 높은 에너지의 방사선인 0.511 MeV의 감마선을 대상으로 납으로부터 발생된 산란선이 표피와 진피에 미치는 영향을 몬테카를로 모사를 이용하여 알아보고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 실험재료

ICRU(International Commission on Radiation Units and Measurements)에서는 방사선 측정을 위해 다양한 팬

텀을 제공하고 있으며, 본 연구에서는 교정 및 인체의 흉부 선량을 대표하는 Slab 팬텀[10,11]을 사용하여 실험을 진행하였다. ICRU Slab 팬텀은 Table 1과 같은 물성으로 구성되어 있으며, 인체의 선량을 측정할 경우 2 mm의 피부층을 삽입하도록 권고하고 있다[12]. 본 연구에서는 Table 2와 같이 ICRP(International Commission on Radiological Protection)에서 제공하는 Publication 89[13]의 흉부의 피부두께 2.062 mm를 삽입하였으며, 물성은 Table 3과 같다.

2. 실험방법

실험은 몬테카를로 모의모사의 일종인 Monte Carlo N-P Transport Code(MCNPX, Los Alamos National Laboratory, ver.2.5.0, USA)를 사용하여, Fig. 1과 같이 0.511 MeV의 감마선 1개를 ICRU Slab 팬텀에 조사시켰다. MCNPX는 선량측정을 위하여 다양한 Tally card를 제공하고 있으며, 본 연구에서는 단위 질량당 흡수된 에너지(MeV/g)를 측정하는 Tally 6을 이용하였으며, 흡수선량의 단위인 Gy로 환산하여 비교 분석하였다. 측정 부위는 ICRU에서 제시된 개인선량당량이 아닌 실제 표피와 진피, 그리고 팬텀의 전체선량으로 구분하여 실험을 진행하였다. 이때 산란선의 평가를 위해 0.25 mm와 0.50 mm의 납을 부착하였으며, 공기층에 의한 산란선의 제거율을 알아보기 1 cm 단위로 팬텀과 납사이의 공간을 확보하였다. 실험은 첫째, 납 두께에 따른 부위별 흡수선량, 둘째, 납 두께에 따른 진피 두께별(0.50 mm) 흡수선량, 셋째, 공기층 두께에 따른 산란선 제거율로 구분하였다.

Table 1. Components of the experimental

Geometry	Material	Element weight (%)	Density (g/cm ³)
ICRU Slab	PMMA (ICRU)	H(10,1), C(11,1) N(2,6), O(76,2)	1.0

Table 2. Thickness of the epidermis and dermis at ages 20-60 years

Site	Males	
	Epidermis (mm)	Dermis (mm)
Thorax (anterior)	0.062	2.0

Table 3. Composition of soft tissues for children and adults

Organ/tissue	Elemental composition (% by mass)									Density (g/cm ³)
	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	1,09

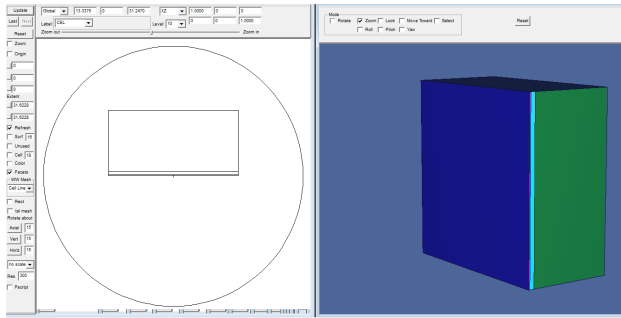


Fig. 1. Geometry of Slab Phantom

III. 결과

1. 납 두께에 따른 부위별 흡수선량

0.511 MeV 감마선 1개를 Slab 팬텀에 조사하여 납 차폐체 사용 유무에 따른 실험을 진행한 결과 Table 4와 같이 측정되었으며, 백분율로 환산한 결과 Table 5와 같이 나타났다. 0.25 mm 납 차폐체를 사용하였을 때, 표피의 흡수선량은 약 180% 증가되었으며, 진피 및 Slab 팬텀의 경우 각각

4%, 6% 선량이 감소되는 것으로 측정되었다. 0.50 mm 납 차폐체에서는 표피의 흡수선량이 약 158%배 증가되었고, 진피와 Slab 팬텀은 각각 8%, 3% 감소되는 것으로 측정되었다.

2. 납 두께에 따른 진피 두께별(0.50 mm) 흡수선량

진피의 두께를 0.50 mm간격으로 세분화하여 흡수선량을 측정한 결과는 Table 6과 같이 측정되었으며, 백분율로 환산한 결과 Table 7과 같이 측정되었다. 0.25 mm 납 차폐체 사용 시 진피의 표면 0.50 mm에서 약 1.2배로 선량이 증가되었으며, 그 이후의 깊이에서는 선량이 감소되는 것으로 측정되었다. 0.50 mm 납 차폐체 사용 시 표면 0.50 mm에서 약 1.01배로 선량이 증가되었으며, 그 이후의 깊이에서는 선량이 감소되는 것으로 측정되었다.

3. 공기층 두께에 따른 산란선 제거율

납 차폐체와 팬텀과의 사이 공기층을 이용하여 산란선의 제거율을 실험한 결과 Table 8과 같이 측정되었고 0.25

Table 4. Absorbing dose by site according to lead thickness

Gy	Epidermis	Dermis	Slab
without Pb	7.04E-15	8.42E-15	2.25E-15
0.25 mmPb	1.29E-14	8.06E-15	2.11E-15
0.50 mmPb	1.12E-14	6.88E-15	1.96E-15

Table 5. Percentage of absorbed dose per site according to lead thickness

%	Epidermis	Dermis	Slab
0.25 mmPb	183	96	94
0.50 mmPb	158	82	87

Table 6. Absorbed dose by skin thickness(0.50 mm) according to lead thickness

Gy	Dermis			
	0.50 mm	1.00 mm	1.50 mm	2.00 mm
without Pb	8.39E-15	8.80E-15	8.38E-15	8.11E-15
0.25 mmPb	1.00E-14	8.03E-15	7.24E-15	7.00E-15
0.50 mmPb	8.45E-15	6.83E-15	6.22E-15	6.07E-15

Table 7. Percentage of absorbed dose by dermis thickness(0.50 mm) depending on lead thickness

%	Dermis			
	0.50 mm	1.00 mm	1.50 mm	2.00 mm
0.25 mmPb	120	91	86	86
0.50 mmPb	101	78	74	75

Table 8, Removal Rate of Scattering Lines by Air Layer Thickness

	air gap	Epidermis (%)	Dermis (%)			
			0,05 mm	0,10 mm	0,15 mm	0,20 mm
0,25 mmPb	1 cm	149	100	77	71	72
	2 cm	126	87	65	60	61
	3 cm	110	78	56	51	52
	4 cm	99	70	49	44	45
0,50 mmPb	1 cm	130	87	68	64	65
	2 cm	112	77	59	55	56
	3 cm	98	69	51	48	49

mm 납 차폐체를 사용한 경우 공기층의 두께 2 cm 이상의 진피에 도달하는 산란선은 제거되는 것으로 측정되었으며, 표피의 경우 4 cm 이상의 공기층이 필요한 것으로 측정되었다. 0.50 mm 납 차폐체를 사용한 경우 공기층의 두께 1 cm 이상의 진피에 도달하는 산란선은 제거되는 것으로 측정되었으며, 표피의 경우 3 cm 이상의 공기층이 필요한 것으로 측정되었다.

IV. 고 찰

0.511 MeV의 감마선은 PET/CT에서 사용되는 고에너지 영역으로 방사선 위험에 대한 특별한 관리가 필요하다. Deb P.[2]의 연구에서는 0.511 MeV의 감마선을 방출하는 ^{18}F 의 차폐실험을 하였을 때, 0.25 mm의 방사선방어용앞치마 사용 시 1.7% 선량감소가 나타났으며, 0.50 mm의 방사선방어용앞치마 사용 시 22% 선량감소가 보고되었으며, He X.[3]의 연구에 따르면 0.50 mmPb 방사선방어용앞치마의 ^{18}F 에 대한 차폐율은 약 10%로 보고되었다. Leide-Svegborn S[6]의 연구에 따르면 ^{18}F 에 대한 0.50 mm의 방사선방어용앞치마는 차폐효과를 실측하였을 때 0.2 m에서는 25~26 $\mu\text{Sv/h}$ 정도의 매우 낮은 차폐효과가 나타났으나 통계적으로 유의하지 않았으며, 2 m 거리에 측정된 결과 납 치마 유무에 따른 선량변화는 없는 것으로 나타났다. 이처럼 ^{18}F 을 이용한 0.511 MeV의 방사선방어용앞치마에 대한 유사실험에서 연구자에 따라 다소 차이가 나는 결과가 나타났으며, 이는 방사선에 대한 요동과 실측에 따른 측정거리에 대한 오차로 사료된다. 방사선은 거리역자승법칙에 따라 100 cm를 기준으로 측정 위치가 2 cm만 벗어나도 통계적 오차인 5%(-2.5~+2.5%)를 벗어나게 된다.

높은 에너지의 광자는 인체와 상호 작용하지 않고 대부분 통과하며 콤프턴 산란이 주요 상호 작용이다[14]. 이때 발생

된 산란전자는 인체에 흡수되는 광자의 비율을 높아지게 하며[14], 납과 같은 높은 원자번호일수록 전자의 발생효율이 높아지게 된다[2,3]. 이처럼 납 차폐 후의 감마선의 에너지 스펙트럼은 전자에 의해 발생된 제동복사선으로 인해 변화된다[15,16]. 하지만 방사선량을 평가할 때 변화된 스펙트럼(산란선)은 평가되지 않으며, 많은 종류의 방사선동위원소를 다루는 핵의학과 경우에 방사선방어용앞치마 착용 시 발생하는 2차 선(산란선)의 영향을 무시할 수 없다[3]. 0.25 mm 납의 경우 감마선의 에너지가 180 keV 이상일 경우 산란선에 의해 차폐효과가 떨어지는 것으로 나타나 있다[17]. 이에 본 연구 결과 0.511 MeV 감마선에 대해 납 차폐체를 사용하였을 때, 차폐체의 두께와는 상관없이 표피의 피폭선량은 증가되었고, 진피 및 전체 팬텀의 피폭선량은 감소하였다. 위 결과를 토대로 납으로부터 발생된 산란선은 비정이 짧아 표피에는 영향을 미치지 않지만 진피에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 표피의 선량이 증가함에 불구하고 표피를 포함한 slab 팬텀 전체의 피폭선량은 감소되어 표피에 미치는 피폭선량이 팬텀 전체선량에 비해 미미한 것을 알 수 있었다.

방사선장해의 주요 원인인 진피층을 세분화하여 측정된 결과 차폐체의 두께와 상관없이 진피 0.50 mm까지는 산란선의 영향으로 피폭이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 그 이후의 깊이에서는 선량이 감소되는 것으로 측정되었다. 피부에 도달하는 산란선을 제거하고자 피부와 납 차폐체 사이에 공기층을 삽입하여 산란선 제거 효과를 알아본 결과 0.25 mmPb에서 진피는 약 2 cm이상, 표피는 약 4 cm이상에서 산란선 제거 효과가 나타났으며 0.50 mmPb에서 진피는 약 1 cm이상, 표피는 약 3 cm이상에서 산란선 제거 효과가 나타났다. 실제 방사선방어용앞치마를 사용할 경우 옷이나 공기 등에 의해 발생하는 공간으로 인하여 산란선은 충분히 제거될 것으로 사료되었으며, 산란선을 충분히 반영하였을 때, 차폐율은 납 두께에 따라 6%(0.25 mmPb), 13%(0.50 mmPb)로 나타났다.

방사선방어용앞치마는 0.50 mm를 기준으로 약 9 kg 무게를 가지며[18], 방사선방어용앞치마 착용으로 인해 발생하는 back pain의 관계는 오랜 시간 증명되어왔다[18,19]. 업무 시 고에너지 방사선에 대한 노출빈도가 매우 높은 PET/CT 종사자들은 방사선방어용앞치마의 불편감에도 불구하고 ALARA원칙에 따라 방사선차폐에 대한 선택이 반드시 필요하다.

앞으로 심부선량 뿐만 아니라 피부의 선량 또한 관리가 필요하며, 방사선장해가 발생하는 위치인 표피(0.07) 뿐만 아니라 추가로 진피에 대한 방사선량을 고려한다면 피부의 방사선장해에 대한 예후평가에 도움이 될 것으로 사료된다.

V. 결론

방사선을 이용한 진단, 치료와 같은 의료 행위들에서 의료 시술자에 대한 장기적인 피폭은 장해로 발현된다. 본 연구에서 0.511 MeV 감마선 이용 시 납 차폐체 사용에 따른 피부선량을 분석한 결과, 납으로부터 발생하는 산란선은 무시할 수준이었으며, 납 두께에 따라 6~13%의 차폐율을 나타냈다. 이를 토대로 0.511 MeV 에너지의 방사성동위원소를 이용하는 PET/CT 종사자들은 방사선방어용앞치마의 무거운 무게에 불편함에도 반드시 방사선방어용앞치마의 사용으로 방사선 차폐를 하여야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] Srinivasan D, Than KD, Wang AC, La Marca F, Wang PI, Schermerhorn TC, et al. Radiation safety and spine surgery: Systematic review of exposure limits and methods to minimize radiation exposure. *World Neurosurgery*. 2014;82(6):1337-43.
- [2] Deb P, Jamison R, Mong L, UP. An evaluation of the shielding effectiveness of lead aprons used in clinics for protection against ionising radiation from novel radioisotopes. *Radiat Prot Dosim*. 2015;165(1-4):443-7.
- [3] 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. *Radiat Prot Dosim*. 2017;174(4):558-64.
- [4] Heggie J, Bigg-Wither G, Bowan S. Safety guide for radiation protection diagnostic and interventional radiology. Radiation Protection Series Publication; 2008: 1-68.
- [5] Holst JP, Burman KD, Atkins F, Umans JG, Jonklaas J. Radioiodine therapy for thyroid cancer and hyperthyroidism in patients with end-stage renal disease on hemodialysis. *Thyroid*. 2005;15(12):1321-31.
- [6] Leide-Svegborn S. Radiation exposure of patients and personnel from a PET/CT procedure with 18F-FDG. *Radiat Prot Dosim*. 2010;139(1-3):208-13.
- [7] Dale LB, David WT, Peter EV, Michael NM. Positron Emission Tomography. Springer; 2005: 251-265.
- [8] Hopewell JW. The skin: Its structure and response to ionizing radiation. *Int J Radiat Biol*. 1990;57(4): 751-73.
- [9] 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.
- [10] International Commission on Radiation Units and Measurements. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRU Publication 57; 1998.
- [11] International Commission on Radiation Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. ICRP Publication 74; 1996.
- [12] International Commission on Radiation Protection. Adult reference computational phantoms. ICRP Publication 110; 2009.
- [13] International Commission on Radiation Protection. Basic Anatomical and Physiological Data for use in Radiological Protection: Reference Values. ICRP Publication 89; 2002.
- [14] 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.
- [15] Young AM. Dose rates in nuclear medicine and the

- effectiveness of lead aprons: Updating the department's knowledge on old and new procedures. Nucl Med Commun. 2013;34(3):254-64.
- [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, Lee SH, Choi HS, Son JC, Yoon CY, Ji YS, et al. A study on the apron shielding ratio according to electromagnetic radiation energy. Journal of Radiological Science and Technology. 2014;37(4):247-52.
- [18] Hejazi P, Sohrabi MAHDI. Staff radiation doses associated with nuclear procedures and efficacy of syringe shield for reduction dose. Koomesh. 2001; 2(2):117-22.
- [19] Moore B, VanSonnenberg E, Casola G, Novelline RA. The relationship between back pain and lead apron use in radiologists. Am J Roentgenol. 1992; 158(1):191-3.

구분	성명	소속	직위
제1저자	장동근	동남권원자력의학원 핵의학과	방사선사
교신저자	박은태	부산백병원 방사선종양학과	방사선사