

Simulation of Energy Absorption Distribution using of Lead Shielding in the PET/CT

Dong-Gun Jang*, Changsoo Kim**, Junghoon Kim**

Department of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center,
Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, Korea***

PET/CT 검사에서 납 차폐체 사용에 따른 에너지 흡수 분포에 관한 모의실험

*, **, **

*, 가 **

Abstract

Energy absorption distribution according to lead shielding for 511 keV ray was evaluated using a Monte Carlo simulation in PET/CT. Experimental method was performed about the depth of skin surface(0.07), lens(3) and the depth (10) was conducted by using ICRU Slab phantom. Difference of energy absorption distribution according to lead thickness and effect of air gap according to distance of lead and phantom. As a result, study showed that using a lead shielding makes high energy distribution by backscatter electron. As a distance between lead and phantom increased, energy absorption distribution gradually decreased. 9 cm or more air gap should exist to prevent effect of backscatter electron which reaches skin surface, when 0.25 mmPb shielding is used. Also 1 cm or more air gap was needed to prevent the effect in 0.5 mmPb. If air gap was not concerned, 0.75 mm or more lead thickness was necessary to prevent effect of backscatter electron.

Keyword : backscatter electron, Shielded

요약

PET/CT에서 사용되는 511 keV 선의 납 차폐체 사용 유·무에 따른 에너지 흡수 분포를 몬테카를로 모의 모사를 통해 평가하였다. 실험은 ICRU Slab 팬텀을 이용하여 깊이에 따라 피부표면(0.07), 수정체(3), 심부(10)에 대해 실험을 진행하였으며, 납 두께에 따른 에너지 흡수 분포 차이와 납과 팬텀의 거리에 따른 공기층의 영향에 대해 분석 하였다. 그 결과 납 차폐체 사용 시 산란전자선에 의해 피부표면에 에너지 흡수 분포가 높게 나타났다. 산란전자선은 납과 팬텀 사이의 거리가 증가함에 따라 점차 제거되었으며, 0.25 mm 납 차폐체 사용 시 9 cm 이상의 공기층이 있어야 피부표면의 도달하는 산란전자선의 영향을 방지 할 수 있었다. 또한 0.5 mm의 납 차폐체 사용 시 1 cm 이상의 공기층이 있어야 피부표면에 도달하는 산란전자선의 영향을 방지 할 수 있었으며, 공기층을 고려하지 않을 경우 0.75 mm이상의 납 두께를 사용하여야 피부표면의 산란전자선의 영향을 방지 할 수 있다.

중심단어: 산란전자선, 차폐체

I. INTRODUCTION

PET/CT (Positron Emission Tomography/Computed Tomography)는 개봉된 방사성 핵종을 신체의 해부학적 또는 생리학적인 상태를 진단, 평가하는 검사이다. 방사성 핵종을 환자에게 투여하면 환자는 하나의 방사선원으로 방사선을 방출하게 되며, 이러한 특징이 방사선종사자 및 환자주변인에 대한 높은 방사선 피폭 위험성을 가지게 된다^{[1],[2]}. 이에 국제 방사선방어위원회(ICRP)에서는 방사선 노출을 합리적으로 달성 가능한 낮게 유지 할 수 있도록 최적의 방사선 방호 계획을 수립하고 이행하도록 권고하고 있다^[3]. 국내 또한 국가표준인증합센터에서 "진료용 X선 방호 앞치마 KS P 6023:2007" 규정^[4]에 따라 전자과 방사선인 X선을 의료용으로 사용할 경우 최소 0.25 mm 이상의 납당량을 가진 납치마를 사용하도록 규정하고 있다. 진단용 X선의 평균 광(Photon) 에너지는 약 50 keV 이며^{[5],[6]}, PET/CT에서 사용되고 있는 방사선인 선은 511 keV의 광 에너지를 사용하고 있다^{[7],[8]}. 이처럼 진단용 X선에 비해서 PET/CT에 사용되는 선의 에너지가 매우 높으며, 이로 인해 발생하는 방사선 피폭 또한 매우 높음을 알 수 있다^{[9],[10]}. 하지만 선 차폐에 대한 연구가 매우 부족한 실정이며, 연구자에 따라 511 keV의 선에 대한 납치마의 차폐효율이 있다는 의견과 차폐효과가 없고 오히려 피폭을 증가시키는 역효과가 발생된다는 서로 상반된 주장들이 제기되고 있다^{[5],[11],[12]}. 이에 본 연구는 몬테카를로 모의 모사를 이용하여 PET/CT 검사 시 납 차폐체에 사용 유·무에 따른 에너지 흡수 분포를 평가하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

1. 몬테카를로 모의 모사

몬테카를로 모의 모사는 통계적 난수(random number)를 사용한 무작위적인 표본 추출을 이용하여 해결하는 방법으로, 물질들의 다양한 3차원 구조에서 입자의 거동을 모사 할 수 있다^[13]. 본 연구에서는 로스알라모스 국립 연구소에서 개발된 Monte Carlo N-Particle Transport Code (MCNPX, Los Alamos National Laboratory,

ver.2.5.0, USA)를 사용하였다.

2. ICRU Slab 팬텀

인체의 흡수선량을 위해 본 연구에서는 국제방사선단위위원회(ICRU)의 ICRU Slab 팬텀을 사용하였다. ICRU 47 보고서^[14]에 따르면 Slab 팬텀은 개인선량당량 Hp(d)는 바깥 표면으로부터 각각 피부표면(0.07 mm), 수정체(3 mm), 심부(10 mm)에 대해 정의하고 있다.

3. 실험 방법

3.1 납 차폐체 두께에 따른 에너지 분포 측정

실험은 Fig. 1과 같이 납 차폐체 뒤에 ICRU Slab 팬텀을 위치시켜 Hp(0.07), Hp(3), Hp(10)의 단위 질량당 흡수된 에너지 (MeV/g)를 MCNPX의 Tally 6을 사용하여 획득 하였으며, 계산은 통계적인 오차를 2% 이하로 줄이기 위해 1×10^5 번 모의 추정하였다. 단위 질량당 흡수 에너지는 광자(Photon)와 전자(Electron)로 구분하여 측정하였으며, 납두께는 0.05 mm ~ 1.0 mm 까지 0.05 mm 단위로 모사하였다. 납 차폐체와 ICRU Slab 팬텀의 구성성분은 Table 1과 같은 조직등가물질을 사용하였다.

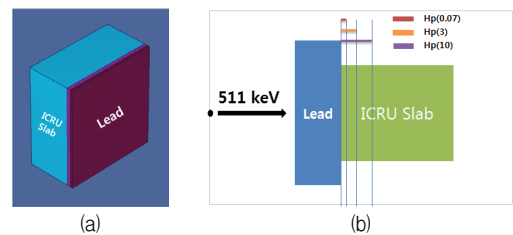


Fig. 1. Lead thickness experimental using ICRU Slab phantom : a: Experimental models using MCNPX Visual Editor, b: Sectional view of the ICRU Slab phantom.

Table 1. Components of the experimental

Geometry	Material	Element weight (%)	Density (g/cm ³)
Lead shield	Lead	⁸² Pb(100)	11.34
ICRU Slab	PMMA (ICRU)	¹ H(10.1), ⁶ C(11.1) ⁷ N(2.6), ⁸ O(76.2)	1.0

3.2 납 차폐체와 팬텀의 거리에 따른 공기층의 산란전자선 제거율

납 차폐체의 두께를 납치마에서 주로 사용되는 두께 0.25 mm, 0.5 mm 로 고정한 후 납과 ICRU Slab 팬텀과의 거리를 20 cm까지 1cm 단위로 조정하여 납 차폐체와 팬텀 사이의 공기층에 대한 영향을 차폐율을 통해 알아보하고자 하였다[Fig. 2].

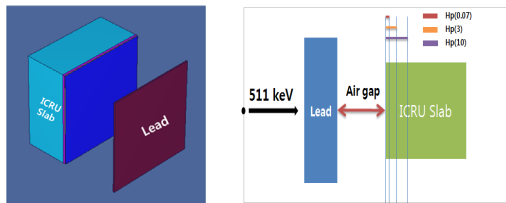


Fig. 2. Air gap thickness experimental using ICRU Slab phantom. : a: Experimental models using MCNPX Visual Editor, b: Sectional view of the ICRP Slab phantom.

III. RESULT

1. 납 차폐체 두께에 따른 에너지 분포 측정

본 연구에서는 PET/CT 검사에서 사용되는 511 keV의 선에 대해 납 차폐체 사용에 따른 에너지 흡수 분포를 분석하였다. 첫 번째 실험에서는 납 두께에 따른 ICRU Slab 팬텀의 Hp(0.07), Hp(3), Hp(10)의 부위별 에너지 분포를 측정하였다. Hp(0.07) 에너지 흡수 분포에서 광자는 납 두께가 증가함에 따라 점점 감소하는 그래프가 나타났으며, 전자는 차폐를 실시하였을 때 오히려 에너지 흡수 분포가 높게 나타났다[Fig. 3],[Fig. 4]. 광자와 전자의 에너지 흡수 분포를 합한 결과 약 0.7

mm 에서 차폐체가 없는 경우와 유사한 에너지 흡수 분포를 나타냈다[Fig. 5].

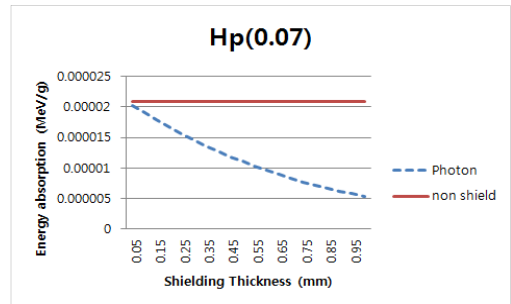


Fig. 3. Photon energy absorption of the Hp(0.07).

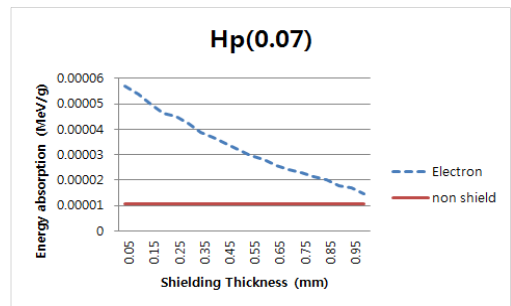


Fig. 4. Electron energy absorption of the Hp(0.07).

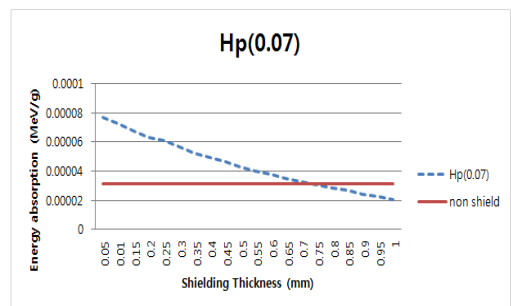


Fig. 5. Total energy absorption of the Hp(0.07).

Hp(3)의 에너지 흡수 분포에서 광자는 두께에 따라 감소하였고, 전자는 차폐체를 사용하지 않았을 때 보다 에너지 흡수 분포가 높게 나타났으며, 납두께 약 0.8 mm 에서 차폐체가 없는 경우와 에너지 흡수 분포가 유사하게 나타났다. 광자와 전자의 에너지 흡수 분포를 합한 결과 약 0.45 mm 부터 차폐효과가 발생됨을 알 수 있었다[Fig. 6],[Fig. 7],[Fig. 8].

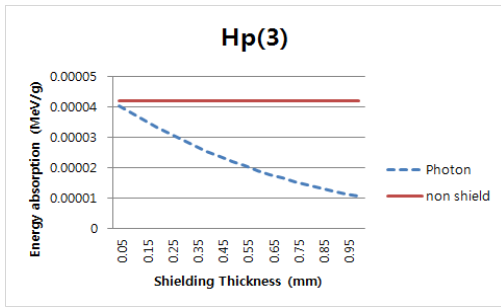


Fig. 6. Photon energy absorption of the Hp(3).

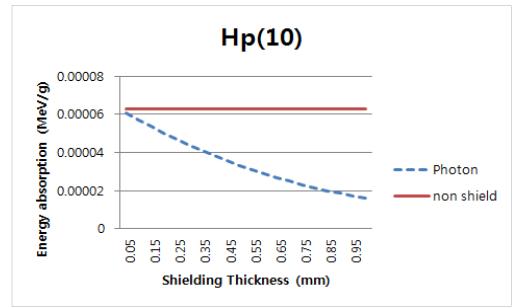


Fig. 9. Photon energy absorption of the Hp(10).

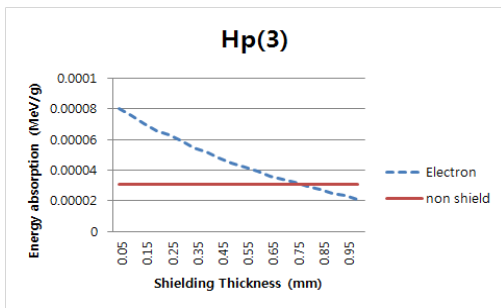


Fig. 7. Electron energy absorption of the Hp(3).

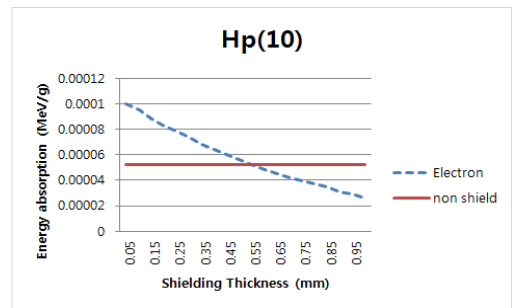


Fig. 10. Electron energy absorption of the Hp(10).

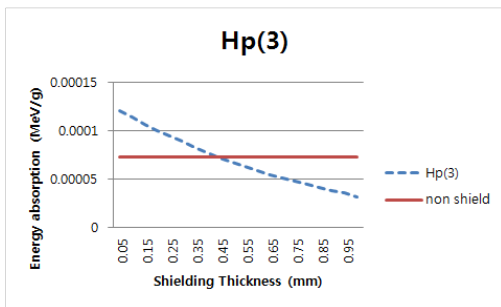


Fig. 8. Total energy absorption of the Hp(3).

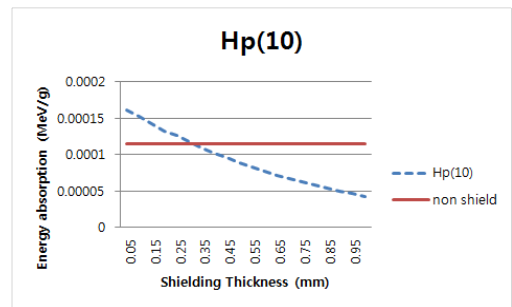


Fig. 11. Total energy absorption of the Hp(10).

Hp(10)의 에너지 흡수 분포에서 광자는 납 두께에 따라 감소하였으며, 전자는 약 0.55 mm 전후로 차폐효과가 나타났었다. 광자와 전자의 에너지 흡수 분포를 합한 결과 약 0.3 mm 전후로 차폐효과가 나타났었다[Fig. 9],[Fig. 10],[Fig. 11].

2. 납 차폐체와 팬텀의 거리에 따른 공기층의 산란 전자선 제거율

두 번째 실험에서 납 차폐체(0.25 mm, 0.5 mm) 사용하여 ICRU Slab 팬텀과의 거리에 따라 공기층의 산란 전자선 제거의 영향을 차폐율을 통해 비교 하였다. 0.25 mm 의 납 차폐체를 사용하였을 때 Hp(0.07)에서 공기층 약 9 cm 이상 일 때 차폐효과가 있는 것으로 나타났으며, Hp(3)은 약 3 cm 이상부터 차폐효과가 있는 것으로 나타났었다. 그리고 Hp(10)은 경우 약 0.5 cm 이

상부터 차폐효과가 있는 것으로 나타났다[Fig. 12].

0.5 mm의 납 차폐체 사용하였을 때 Hp(0.07)에서 공기층 약 1 cm 이상일 때 차폐효과가 있는 것으로 나타

났으며, 나머지 부위는 공기층과 관계없이 차폐효과가 있는 것으로 나타났다[Fig. 13].

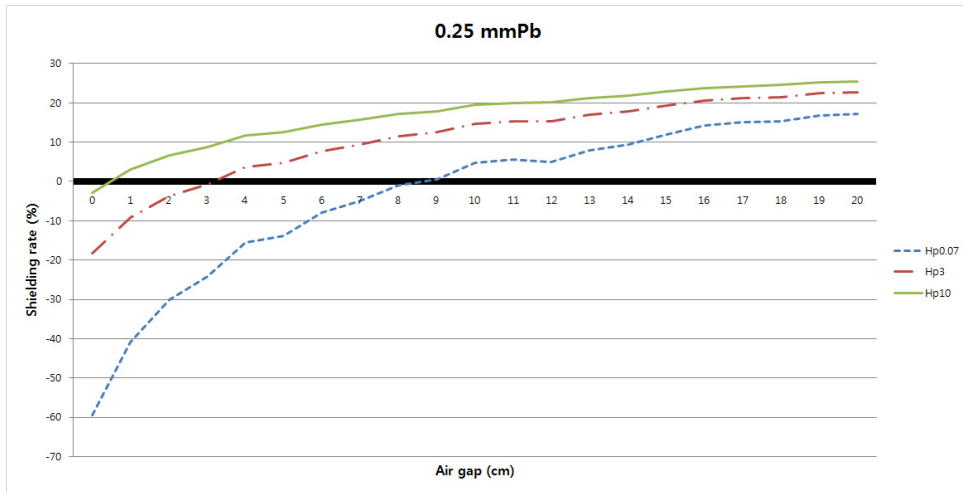


Fig. 12. Shielding rate by the thickness of the air gap with a 0.25 mmPb.

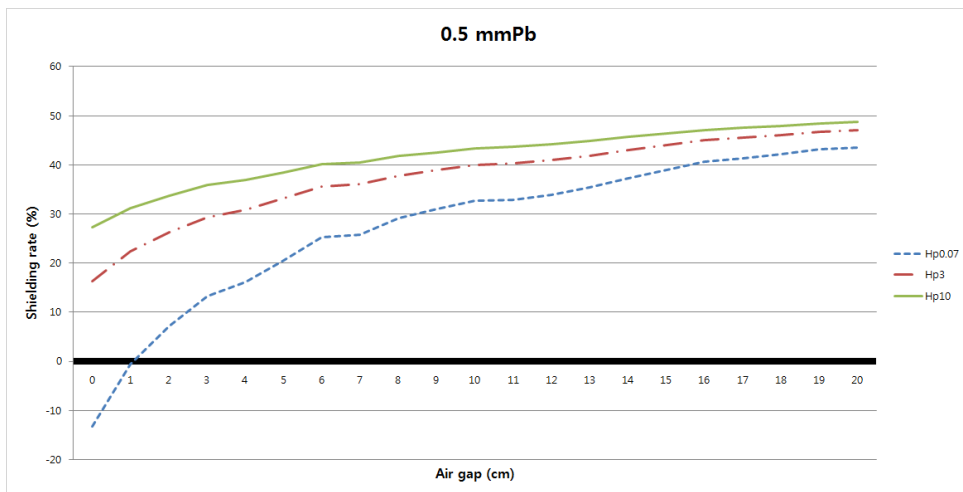


Fig. 13. Shielding rate by the thickness of the air gap with a 0.5 mmPb.

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 PET/CT검사에서 납 차폐체 사용 시 발생하는 산란전자선의 영향과 이러한 산란전자선을

제거하기 위한 공기층의 두께를 알아보려고 실험을 진행하였다.

Myeong-Hwan Park^[5], Seoung-Wook Lee^[11] 에 따르면 511 keV의 선을 0.25 mm, 0.5 mm 의 납치마로 차폐

하였을 때 차폐효과가 있는 것으로 보고 하였고, Soo-Kyung Na^[12] 주장에 따르면 511 keV의 선을 0.25 mm, 0.5 mm 납치마로 차폐하였을 때 오히려 피폭이 증가된다는 연구가 제기 되고 있다. 이처럼 서로 상반된 주장들이 제기 되고 있어 본 논문에서는 몬테카를로 모의 모사를 통하여 광자, 전자에 대한 에너지의 흡수 분포를 측정하여 PET/CT 검사에 이용되는 511 keV 선의 차폐효과에 대해 알아보고자 하였다.

그 결과 첫째, 511 keV의 광자에 대해 납 두께에 따른 에너지 흡수 분포는 차폐효과가 있었으며, 두께에 따라 증가함에 따라 차폐효과 또한 증가 하였다. 하지만, 전자의 에너지 흡수 분포는 두께에 따라 차폐효과가 증가하지만, 일정 두께 이하에서는 오히려 차폐체가 없을 때 보다 에너지 흡수 분포가 높게 나타났다. 이는 2차적으로 발생한 전자의 비정이 짧고 에너지가 낮아 모두 흡수되어 투과의 성질을 가진 광자와는 다른 양상을 나타낸 것으로 추론된다. 둘째, 광자와 전자의 에너지 흡수 분포를 합한 결과 전자의 에너지 흡수 분포처럼 차폐효과가 역효과를 나타내는 구간이 나타났다. 이는 방사선 피폭의 주원인이 투과력이 강한 광자가 아닌 2차적으로 발생한 산란선이 피폭의 주원인이기 때문인 것으로 판단되며, Dae Moo Shim^[15] 등의 연구결과와 유사한 경향을 나타냈다. ICRU 팬텀 내 깊이가 증가 할수록 비정이 짧은 산란전자선의 영향 보다 투과력이 강한 광자의 영향으로 차폐효과가 발생하는 납 두께가 감소되는 것을 확인 할 수 있었으며, 산란전자선에 의한 영향이 피부표면에 집중된다는 것을 확인 할 수 있었다. 이처럼 산란전자선은 에너지가 작고 비정이 짧아 피부표면의 선량을 증가시키지만, 깊이가 증가함에 따라 산란전자선에 의한 피부선량의 증가보다 광자에 대한 차폐효과가 커져 전체적인 선량은 감소하는 것으로 사료된다.

셋째, ICRU Slab 팬텀을 이용하여 0.25 mm 의 납 차폐체를 사용하였을 때 피부표면 Hp(0.07)의 산란전자선 영향을 제거하기 위해선 공기층 9 cm 이상이 필요한 것으로 나타났으며, 심부로 들어갈수록 산란전자선의 영향이 약해져 Hp(10)에서는 약 0.5 cm 정도의 공기층만으로도 차폐효과를 얻을 수 있다. 0.5 mm 의 납 차폐체를 사용하였을 때는 피부표면(0.07)에서 약 1 cm 이상의 공기층으로 차폐효과가 발생하는 것으로 나타

났으며, 나머지 Hp(3), Hp(10) 에서는 공기층과 무관하게 모두 차폐효과가 발생하는 것으로 나타났다. 기존 Wang-Hui Lee^[16]의 연구에 따르면 140 keV의 선을 조사 하였을 때 차폐체 사이의 공기층으로 인하여 피폭이 감소된다는 의견과 유사한 결과를 나타냈다.

V. CONCLUSION

방사선 작업 종사자의 피폭 방어를 위해 다양한 형태의 차폐방어가 필요하다. 그러나 본 연구결과를 토대로 할 때, 감마선으로부터 피폭방어를 위한 납 차폐체가 오히려 종사자의 피부표면 선량을 증가시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다. 보다 더 효율적인 방사선방어를 위해 향후 방사선과 차폐체 그리고 차폐체와 종사자와의 거리등을 종합적으로 평가하여 산란전자선에 의한 종사자의 피폭평가가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] Benjamin Guillet, Pierre Quentin, Serge Waultier, P, "Technologist Radiation Exposure in Routine Clinical Practice with 18F-FDG PET", Journal of Nuclear Medicine Technology, Vol. 33, No. 3, pp.175-179, 2005.
- [2] Fiona O. Roberts, Dishan H. Gunawardana, Kunthi Pathmaraj, et al, "Radiation Dose to PET Technologists and Strategies to lower Occupational Exposure", Journal of Nuclear Medicine Technology, Vol. 33, No. 1, pp.44-47, 2005.
- [3] ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection", Ann ICRP, Vol. 21, pp.1-201, 1991.
- [4] Korea Standards & certifications, "Medical X-ray Protective Aprons", KS P 6023, 2007.
- [5] Myeong-Hwan Park, Deok-Moon Kwon, "Measurement of Apron Shielding rate for X-ray and Gamma ray", Korean Society Radiological Science, Vol. 30, No. 3, pp.245-250, 2007.
- [6] Andrew J Reilly, "Report 78 Spectrum Processor", IPEM, 1997.
- [7] Yong-Gil Kang, "Textbook of nuclear Medicine", pp.81-86, 2013.
- [8] Hongmoon Jung, June ho Cho, Jaeun Jung, et al, "Evaluation of the Radiation Dosage Flowing out of the Hot Cell During Synthesis of ¹⁸FDG", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 7, No. 5, pp.365-369, 2013.

-
- [9] Bong-Sik Lim, "Radiation Exposure Dose on Persons Engaged in Radiation-related Industries in Korea", The Korean Society of Radiological Science, Vol. 29, No. 3, pp.185-195, 2006.
- [10] Seongmin Baek, Eunsung Jang, "Comparative evaluation of radiation exposure in radiation-related workers", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 5, No. 4, pp195-200, 2011.
- [11] Seoung-wook Lee, Seung-hyun Kim, Bong-geun Ji, et al, "A Consideration of Apron's Shielding in Nuclear Medicine Working Environment", Korean J. Nucl. Med. Technol., Vol. 18, No. 1, pp.110-114, 2014.
- [12] Soo-Kyung Na, Byung-Sub Park, Yong-Gil Kang, "Study of occupational exposure in PET/CT", Journal of Digital Convergence, Vol. 10, No. 11, pp.449-457, 2012.
- [13] Yong Hyun Chung, Cheol-Ha Beak, Seung-Jae Lee, "Monte Carlo Simulation Codes for Nuclear Medicine Imaging", Med. Mol. Imaging, Vol. 42, No. 2, pp.127-136, 2008.
- [14] ICRU, "Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations", Report 47 ICRU Publications, 1998.
- [15] Dae Moo Shim, Yu Mi Kim, Sung Kyun Oh, et al, "Radiation Induced Hand Necrosis of an Orthopaedic Surgeon Who Had Treated a Patient with Fluoroscopy-Guided Spine Injection", The Journal of the Korean Orthopaedic Association, Vol. 49, No. 3, pp.250-254, 2014.
- [16] Wang-Hui Lee, Sung-Min Ahn, "Evaluation of Reductive Effect of Exposure Dose by Using Air Gap Apron in Nuclear Medicine Related Work Dose", The Korea Contents Association, Vol. 14, No. 12, pp.845-853, 2014.