

<원저>

몬테카를로 모의 모사를 이용한 핵의학과 방사선작업종사자의 손에 대한 피폭선량 분석

- An Analysis of Exposure Dose on Hands of Radiation Workers using a Monte Carlo Simulation in Nuclear Medicine -

동남권 원자력의학원 핵의학과¹⁾·부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

장동근·강세식¹⁾·김정훈¹⁾·김창수¹⁾

— 국문초록 —

핵의학과에 근무하는 방사선작업종사자들은 방사성동위원소의 생산, 분배, 조제, 주입 등의 업무를 진행하며, 이러한 과정에서 손에 대한 방사선 피폭이 높게 발생한다. 이에 본 연구에서는 핵의학과에서 이용되는 방사성동위원소의 에너지로서 140 keV와 511 keV의 γ 선에 대한 차폐효과를 몬테카를로 모의 모사를 통해 분석하였다. 모의실험 결과 140 keV γ 선은 차폐체에 두께와 상관없이 모두 방사선에 대한 차폐효과가 발생되었으며, 511 keV의 γ 선에서는 1.1 mm 이상에서 차폐효과가 발생되었다. 그러나 1.1 mm 미만에서는 2차적으로 발생된 산란선으로 인하여 차폐효과가 없었으며, 오히려 방사성동위원소의 피폭선량이 증가되었다. 따라서 효율적인 방사선 방어를 위해서는 핵종별 에너지에 따른 납 차폐체의 두께를 고려하여야 할 것이다.

중심 단어: 차폐, 피폭선량

I. 서 론

핵의학이란 개봉된 방사성 핵종을 추적자로 사용하여 인체에 대한 형태학적인 정보와 생리학적인 정보를 얻어, 인체장기의 조직의 기능 및 대사 변화를 동시에 분석하여 진단 및 치료를 시행하는 분야이다^{1,2)}. 핵의학에서 사용되는 방사성 핵종은 검사 장비에 따라 단일광자단층촬영(Single photon emission computed tomography, SPECT)에서 이용되는 핵종과 양전자방출단층촬영(Positron emission tomography, PET)에서 이용되는 핵종으로 구별 할 수 있으며, SPECT에 이용되는 핵종은 약 85%가 ^{99m}Tc(E=140 keV)을 사용하며, PET에서 이용되는 핵종은 약 98%가 ¹⁸F(E=511 keV)를 이용하고 있다³⁾. 일부 방사성의약품은 방사성 핵종에 표지화합물이 표지된 채로 공급이 되기도 하

지만 대부분의 방사성의약품은 핵의학과 내에서 직접 생산, 분배, 조제, 환자에게 주입까지 방사선작업종사자의 손을 거치게 된다⁴⁻⁷⁾. 뿐만 아니라 환자 이송, 영상 촬영 등의 작업 단계에 투입되어 각각의 업무를 수행하게 되며, 이러한 과정에서 방사선 피폭을 필연적으로 받게 된다⁵⁻⁷⁾.

방사선 작업 시 방사선에 의한 피폭정도는 일반적으로 개인피폭선량계를 착용하여 개인의 피폭선량을 분기별로 평가, 관리한다. 그러나 개인피폭선량계는 몸통에 국한되어 있어 손에 대한 피폭을 정량적으로 평가하는 데는 어려움이 있다⁷⁾. 또한 최근 최첨단 핵의학 진단기술의 발달로 임상적 이용이 증가되어 핵의학에 사용되는 방사성 핵종과 작업종사자의 수적 증가와 근무시간이 점차 늘어남에 따라 개인별 방사선 피폭에 따른 심각성이 대두되고 있다⁷⁾. 이에 국제방사선방어위원회(International commission on radiological

교신저자: 김창수 (46252) 부산시 금정구 오륜대로 57 부산가톨릭대학교
보건과학대학 방사선학과 Tel: 051-510-0580 / E-mail: cszzim@cup.ac.kr
접수일(2015년 10월 16일), 심사일(2015년 11월 10일), 확정일(2015년 12월 08일)

protection, ICRP)에서는 전신등가선량한도를 50 mSv/year, 손에 대한 선량한도는 500 mSv/year로 권고하고 있다⁸⁾. 일반적으로 말단선량 초과자의 작업종사자의 수가 전신선량을 초과한 작업 종사자의 수에 비해 많을 뿐만 아니라, 말단선량의 잠재적 위험성이 전신선량에 비해 더욱 크다고 보고되고 있다⁹⁾. 그러나 방사선 방어를 위한 선량 평가는 전신피폭에 대한 연구가 주로 이루어졌으며, 손가락 및 말단에 대한 연구는 미비한 실정이다¹⁰⁾. 이에 본 연구는 손을 중심으로 몬테카를로 모의 모사를 이용하여 핵의학과에서 주로 이용되는 에너지 140 keV와 511 keV의 γ 선을 납 차폐체 두께별로 분석하여 차폐효과에 대해 알아보하고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 몬테카를로 모의 모사

본 연구의 차폐 모의 모사는 몬테카를로 방법을 이용하였다. 몬테카를로 모의 모사는 통계적인 문제를 수학적 난수를 이용한 표본 추출을 통해 해결하는 방법으로 도박의 대명사인 모나코의 도시 이름을 따서 명명되었다¹¹⁾. 방사선에 이용되고 있는 몬테카를로 모사 코드들은 매우 다양하게 있으나, 본 연구에서는 Geant4 Toolkit를 기반으로 OpenGATE Collaboration에서

개발된 GATE code를 사용하였다¹²⁾.

1) 기하학적 모델링

손의 흡수선량을 평가하기 위해 납 차폐체와 ICRP 35⁸⁾에 근거한 연부조직과 뼈를 구성하였다(Table 1). 기하학적 구조는 손바닥(Soft tissue), 뼈(Bone), 손등(Soft tissue)으로 모사하였으며, 손바닥 1 cm, 뼈 1.5 cm, 손등 0.5 cm 로 전체 손의 두께는 3 cm 로 설정 하였다¹³⁾. 실험은 납으로 차폐된 방사성동위원소를 감싸고 있는 것으로 표현 하였으며, 피폭선량은 손 3 cm의 전체 선량으로 비교하였다(Figure 1). 차폐체의 두께는 방사선안전관리정보통합망¹⁴⁾에서 제공하는 십가층의 두께까지 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

1) 140 keV의 γ 선에 대한 차폐효과 분석

SPECT에서 주로 사용되는 ^{99m}Tc를 모사하기 위해 납 차폐체 내부에 140 keV의 γ 선원을 삽입하여 실험하였으며, 납 차폐체의 두께는 0.1 mm부터 십가층인 1.0 mm 까지 0.1 mm 단위로 설정하여 손에 대한 피폭선량을 측정하였다. 실험에 사용된 방사능은 1 MBq로 1초간 백만개의 방사선을 방출 시켰다.

Table 1 Physical properties of the hand phantom

Material	Element weight (%)	Density (g/cm ³)
Syringe	H(2.0793), C(24.7793), Cl(73.1413)	0.92
Lead	Pb(100)	11.34
Finger Tissue	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
Finger Bone	H(4.72), C(14.43), N(4.20), O(44.61), Mg(0.22), P(1.50), S(0.31), Ca(21.00), Zn(0.01)	1.850

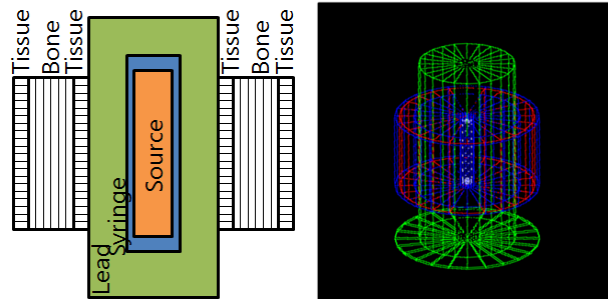


Figure 1 Lead shielding and hand phantom using Monte Carlo Simulation

2) 511 keV의 γ 선에 대한 차폐효과 분석

PET에서 사용되는 ^{18}F 를 모사하기 위해 납 차폐체 내부에 511 keV의 γ 선원을 삽입하여 1초간 실험하였으며, 납 차폐체의 두께는 0.1 mm부터 십가층인 17.1 mm 까지 1.0 mm 단위로 설정하여 손에 대한 피폭선량을 측정하였다. 그 후 세밀한 분석을 위하여 0.1 mm 단위로 0.1 mm부터 1.1 mm 까지 추가적으로 손에 대한 피폭선량을 획득하였다. 실험에 사용된 방사능은 1 MBq로 1초간 백만개의 방사선을 방출 시켰다.

3) 에너지 스펙트럼 분석

방사선은 물질과의 상호작용을 통해 물질에 에너지를 부여함과 동시에 감쇄 또는 산란을 하게 되며, 방사선이 물질에 에너지를 부여하는 과정에서 물질의 특성과 에너지의 세기에 따라 고유의 스펙트럼을 형성하게 된다. 이러한 에너지 스펙트럼 분석을 통하여 조사된 방사선과 물질과의 상호작용을 간접적으로 평가할 수 있다. 이에 본 연구에서는 차폐체의 스펙트럼을 비교하여 피폭선량이 증가된 원인을 분석하였다.

III. 결 과

본 연구에서는 핵의학과에서 이용되는 140 keV와 511 keV로서 γ 선을 몬테카를로 모의 모사를 통하여 납 차폐체의 두께에 따른 방사선에 대한 차폐효과를 비교 분석 하고자 하였다.

1. 140 keV의 γ 선에 대한 차폐효과 분석

SPECT에서 주로 이용되는 방사성의약품의 에너지인 140 keV의 γ 선 1 MBq을 선원으로 설정하여 실험을 진행한 결과 납 차폐체의 두께가 증가함에 따라 손에서 받는 피폭선량 또한 같이 감소하였다(Figure 2).

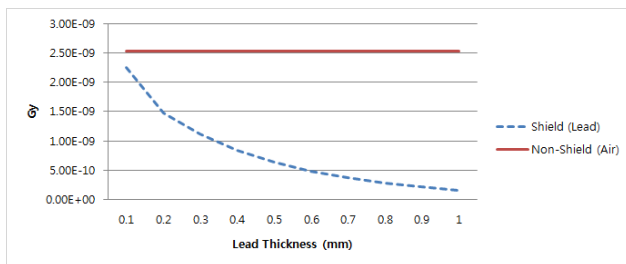


Figure 2 Hand phantom dose (140 keV)

2. 511 keV의 γ 선에 대한 차폐효과 분석

PET에서 이용되는 방사성의약품의 에너지인 511 keV의 γ 선 1 MBq을 선원으로 설정하여 실험을 진행한 결과 납 차폐체의 두께가 증가됨에 따라 피폭선량은 감소하지만, 0.1 mm에서 1.1 mm의 구간의 피폭선량 값이 납 차폐체를 하지 않은 상태보다 피폭선량이 높게 나타났다(Figure 3). 좀더 세부적인 피폭선량 분석을 위하여 피폭선량이 늘어난 1.1 mm 이하의 구간을 0.1 mm 단위로 측정된 결과 1.1 mm 이하에서 납 차폐체를 사용하였을 때 피폭선량이 증가되는 것을 확인하였다(Figure 4).

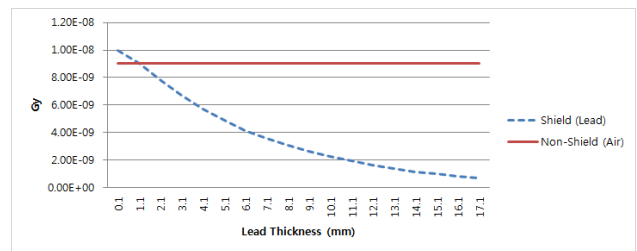


Figure 3 Hand phantom dose (511 keV)

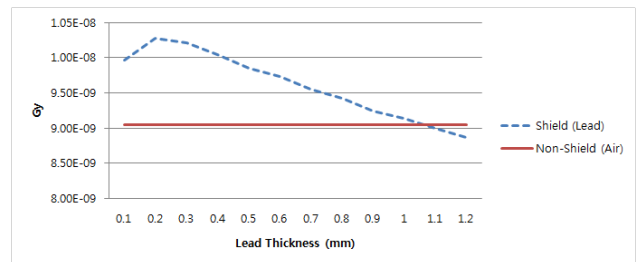


Figure 4 Hand phantom dose with less than 1.2 mmPb thickness (511 keV)

3. 에너지 스펙트럼 분석

차폐체 내에서 일어난 상호작용을 간접적으로 추론하기 위하여 스펙트럼을 비교한 결과 선 스펙트럼(광전피크)과 연속 스펙트럼(2차 산란선)이 나타났으며, 140 keV의 에너지에서는 두께에 상관없이 유사한 스펙트럼을 관찰할 수 있었다(Figure 5). 그러나 511 keV의 에너지에서는 두께가 얇아 오히려 피폭이 증가되었던 구간과 차폐효과가 나타난 구간에서의 스펙트럼이 산란선의 증가로 인한 연속 스펙트럼의 차이를 나타냈다(Figure 6).

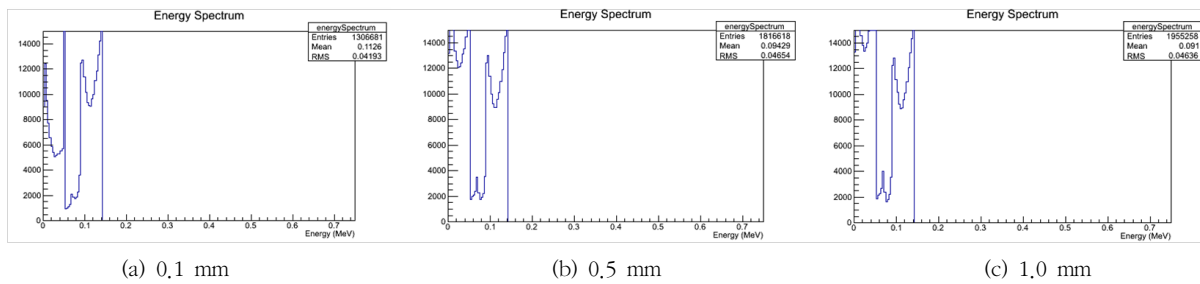


Figure 5 Energy spectrum in hand phantom (140 keV)

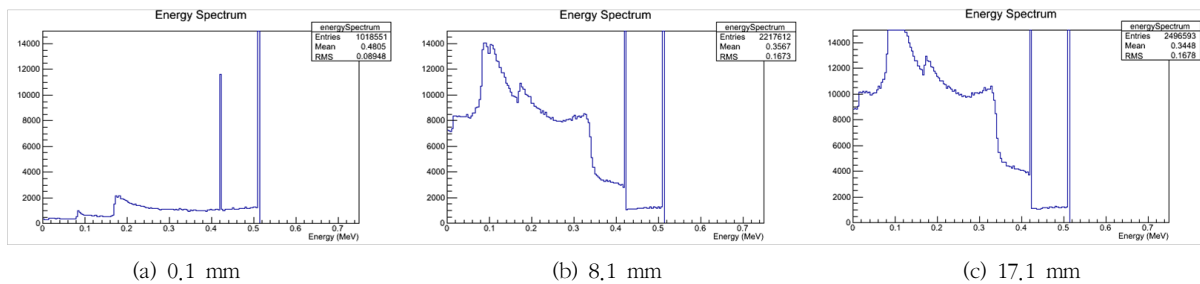


Figure 6 Energy spectrum in hand phantom (511 keV)

III. 고 찰

핵의학과에서 근무하는 방사선작업종사자들은 임상에서 직접 방사성동위원소의 생산, 분배, 조제, 환자에게 주입까지의 과정을 통해 손에 대한 높은 방사선 피폭을 받는 것으로 알려져 있다⁴⁻⁷⁾. 이에 본 연구에서는 핵종에 따른 차폐체의 적절한 두께와 손에서 받는 피폭선량의 원인을 파악하고자 모의실험을 진행하였다.

그 결과 첫째, SPECT에서 주로 이용되는 140 keV의 에너지의 γ 선에서는 납 0.1 mm부터 1 mm 까지 모두 차폐효과가 있는 것으로 나타났으며, 납의 두께가 증가함에 따라 차폐효과 또한 비례적으로 증가하는 결과를 나타냈다. Abdulaziz¹⁵⁾에 연구에 따르면 방사성동위원소 ^{99m}Tc에 0.25 mm의 납을 사용하였을 때 52%, 0.5 mm의 납을 사용하였을 때 77%의 차폐율을 얻을 수 있다고 보고하고 있으며, 본 실험과 유사한 결과를 나타냈다.

둘째, PET에서 사용되는 511 keV의 에너지에서는 납 1.1 mm 이하에서 납 차폐체를 사용하였을 때 오히려 차폐체를 하지 않았을 때 보다 피폭선량이 증가되었다.

Soo-Kyung Na¹⁶⁾에 연구에 따르면 ¹⁸F 취급 시 0.5 m 이내에서 작업이 이루어지는 약품분배나 주사 시는 오히려 납 치마의 착용이 피폭을 초래한다고 보고하고 있으며, 본 실험과 유사한 결과를 나타냈다. Dong-Gun Jang¹⁷⁾에 따르면

감마선의 에너지가 180 keV 이상에서는 산란선의 영향으로 피폭이 증가 될 수 있다고 보고하고 있으며, 본 실험에서도 에너지가 낮은 140 keV에서는 차폐효과가 있었으며, 에너지가 높은 511 keV에서는 차폐효과가 없는 경우가 나타났다.

셋째, 납 차폐체의 에너지 스펙트럼을 비교해본 결과 차폐효과에 따라 연속 스펙트럼의 분포가 다른 경향을 나타냈으며, 차폐효과가 발생된 납 두께에서는 두께와 무관하게 연속 스펙트럼의 분포가 유사하게 나타났다. 이는 납 차폐체에서 연속스펙트럼을 갖는 산란선이 모두 흡수되었음을 의미하며, 차폐효과가 발생되지 않은 그래프에서는 연속스펙트럼이 차폐효과가 나타났을 때보다 낮음을 관찰할 수 있다. 이는 연속스펙트럼을 갖는 산란선이 납 차폐체에 흡수되지 않고 투과해서 통과 한 것으로 추론 할 수 있다. 연속스펙트럼은 γ 선이 차폐체와 상호작용하여 2차적으로 발생된 산란선을 의미하며, Dae Moo Shim¹⁸⁾와 Mehlman¹⁹⁾의 주장에 따르면 산란선이 피폭의 주원인이라고 주장하고 있으며, Arnstein²⁰⁾은 손이 X선 튜브 안으로 들어가면 튜브 15 cm 밖에서 받는 피폭선량의 100배에 해당되는 양을 산란선에 의해 피폭된다고 산란선의 위험성을 주장하고 있다. 이러한 산란선은 비정기 짧고 에너지가 낮아 대부분 산란선이 발생된 근처에서 전부 흡수되는 성질을 가지고 있어 피폭을 증가시키는 원인으로 작용하게 되며, 차폐효과가 발생된 두께의 스펙트럼에서는 2차적으로 발생된 산란선이 차폐

체를 투과하지 못하고 모두 흡수되어 유사한 연속 스펙트럼을 갖게 된 것으로 사료된다. 하지만, 차폐효과 없이 피폭이 증가된 두께에서는 차폐체에서 발생된 산란선이 낮은 차폐체의 두께를 투과하여 손에 도달하게 되어 피폭을 증가시키는 요인으로 작용하게 된 것으로 사료된다.

III. 결 론

핵의학과에서 방사선작업종사자의 손에 대한 방사선 피폭은 업무상 필연적으로 높을 수밖에 없다. 현재 핵의학과에서는 손에 대한 피폭을 감소시키기 위해 납을 이용한 차폐기구들을 사용하지만, 본 연구결과를 토대로 할 때, 방사선의 에너지에 따라 납 차폐체가 손에 대한 피폭을 오히려 증가시킬 수 있는 요인으로 작용함을 알 수 있었다. 이에 보다 효율적인 방사선방어를 위해서는 핵종별 에너지에 따른 납 차폐체의 두께와 차폐체와의 상호작용을 통해 발생하는 산란선에 대한 인체 부위별 영향에 대해서도 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Wang-Hui Lee, Sung-Chul Kim, Sung-Min Ahn : Comparison on the dosimetry of TLD and OSLD used in nuclear medicine, The Journal of the Korea Contents Association, 12(12), 329-334, 2012
2. Yong-Gil Kang : Textbook of nuclear Medicine, Chung-Ku Publisher, 13-14, 2013
3. The Korean Society of Nuclear Medicine : Nuclear medicine scan statistics, 2013
4. M. Wrzesien, J. Olszewski, J. Jankowski : Hand Exposure to Ionising Radiation of Nuclear Medicine Workers, Radiation Protection Dosimetry, 130(3), 325-330, 2008
5. G. S. Pant and S. Senthambichelvan: Radiation Exposure to Staff in a PET/CT Facility, Indian Journal of Nuclear Medicine, 21(4), 100-103, 2006
6. F. Mariotti, G. Gualdrini : Extremity dosimetry problems during the handling of radionuclides syringes in nuclear medicine: A Monte Carlo radiation transport simplified approach, Radiation Measurements, 46, 430-435, 2011
7. Jun-Chul Park, Sung-Jae Pyo : Study of External Radiation Expose Dose on Hands of Nuclear Medicine Workers, Journal of Radiological Science and Technology, 35(2), 2012
8. ICRP, General Principle of Monitoring for Radiological Protection, ICRP Publication 35, Pergamon Press, Oxford, 1982
9. Dong Hyun Han, Sang Koo Kang, Chong Yeal Kim : Finger Doses Received during 99mTc Injections Calculated with GEANT4, Journal of Radiation Protection, 33(1), 41-46, 2008
10. Kwang-Pyo Kim, Won-Keun Lee, Jong-Su Kim, et al : A theoretical calculation of photon dose equivalent conversion factor for extremity dosimeter, Korean Association for Radiation Protection, 21(1), 41-49, 1996
11. Yong Hyun Chung, Cheol-Ha Beak, Seung-Jae Lee : Monte Carlo Simulation Codes for Nuclear Medicine Imaging, Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 42(2), 127-136, 2008
12. S. Jan, G. Santin, D. Strul, et al : GATE-Geant4 Application for Tomographic Emission : a simulation toolkit for PET and SPECT, Physics Medicine and Biology, 49(19), 4543-4561, 2004
13. Hoon-Yong Yoon : A Study of Measurement on the Hand for Korean Adults, Korean Institute of Industrial Engineers, 16(2), 140-148, 2003
14. Radiation Safety Information System : <http://rasis.kins.re.kr/rasis/index.jsp>, Korea Institute of Nuclear Safety
15. Abdulaziz Alhazmi : Review of Lead Aprons Efficiency for Radionuclides used in the Grove Centre, University Surrey, 2011
16. Soo-Kyung Na, Byung-Sub Park, Yong-Gil Kang : Study of occupational exposure in PET/CT, Journal of Digital Convergence, 10(11), 449-457, 2012
17. Dong-Gun Jang, Sang-Ho Lee, Hyung-Seok Choi, et al : A study on the apron shielding ratio according to electromagnetic radiation energy, Journal of Radiological Science and Technology, 37(4), 247-252, 2014
18. 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, *Journal of the Korean Orthopaedic Association*, 49(3), 250-254, 2014
19. Mehlman CT, DiPasquale TG. : Radiation exposure to the orthopaedic surgical team during fluoroscopy: "how far away is far enough?". *Journal of Orthopaedic Trauma*, 11, 392-398, 1997
20. Arnstein PM, Richards AM, Putney R. : The risk from radiation exposure during operative X-ray screening in hand surgery, *Journal of Hand Surgery*, 19, 393-396, 1994

•Abstract

An Analysis of Exposure Dose on Hands of Radiation Workers using a Monte Carlo Simulation in Nuclear Medicine

Dong-Gun Jang·Sesik Kang¹⁾·Junghoon Kim¹⁾·Changsoo Kim¹⁾

Dept. of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer Center

¹⁾*Dept. of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan*

Workers in nuclear medicine have performed various tasks such as production, distribution, preparation and injection of radioisotope. This process could cause high radiation exposure to workers' hand.

The purpose of this study was to investigate shielding effect for r-rays of 140 and 511 keV by using Monte-carlo simulation.

As a result, it was effective, regardless of lead thickness for radiation shielding in 140 keV r-ray. However, it was effective in shielding material with thickness of more than only 1.1 mm in 511keV r-ray. And also it doesn't effective in less than 1.1 mm due to secondary scatter ray and exposure dose was rather increased.

Consequently, energy of radionuclide and thickness of shielding materials should be considered to reduce radiation exposure.

Key Words : R-ray, Monte-carlo simulation, Exposure on hands