

<원저>

심근 핵의학 검사에서 다양한 방사성핵종 조건에 따른 내부피폭선량 평가: 몬테카를로 시뮬레이션

이민관·박찬록

을지대학교 방사선학과

Evaluation of Internal Dosimetry according to Various Radionuclides Conditions in Nuclear Medicine Myocardial Scan: Monte Carlo Simulation

Min-Gwan Lee·Chanrok Park

Department of Radiological Science, Eulji University

Abstract The myocardial nuclear medicine examination is widely performed to diagnose myocardium disease using various radionuclides. Although image quality according to radionuclides has improved, the radiation exposure for target organ as well as peripheral organs should be considered. Here, the aim of this study was to evaluate absorbed dose (Gy) for peripheral organs in myocardial nuclear medicine scan from myocardium according to various scan environments based on Monte Carlo simulation. The simulation environment was modeled 5 cases, which were considered by radionuclides, number of injections, and radiodosage. In addition, the each radionuclide simulation such as distribution fraction was considered by recommended standard protocol, and the mesh computational female phantom, which is provided by International Commission on Radiological Protection (ICRP) 145, was used using the particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.33. Based on the results, the closer to the myocardium, the higher the absorbed dose values. In addition, application for dual injection for radionuclides led to high absorbed dose compared with single injection for radionuclide. Consequently, there is difference for absorbed dose according to radionuclides, number of injections, and radiodosage. To detect the accurate diseased area, acquisition for improved image quality is crucial process by injecting radionuclides, however, we need to consider absorbed dose both target and peripheral inner organs from radionuclides in terms radiation protection for patient.

Key Words : Internal dosimetry, Absorbed dose, Monte Carlo simulation, Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS), Nuclear medicine

중심 단어 : 내부피폭, 흡수선량, 몬테카를로 시뮬레이션, 방사선수송모사코드, 핵의학 검사

1. 서론

핵의학은 방사성 동위원소와 목표로 하는 장기로 집적되는 방사성의약품의 표지를 통하여 생성된 방사성 핵종을 인체 내에 투여하여 영상을 획득하는 원리를 적용한다[1,2]. 환자 몸에 투여된 방사성 핵종은 목적하는 장기로의 이동 및 흡수되며, 흡

수된 장기로부터 방출되는 감마선을 감마카메라의 핵의학 의료 장치를 이용하여 획득하고 감마선 발생지점을 확인할 수 있는 위치 로직을 이용하여 영상화함으로써 진단 및 치료 가이드에 이용하고 있다[3]. 또한, 핵의학 영상은 해부학적 정보와 동시에 인체의 기능적, 생리학적 정보를 획득할 수 있기 때문에 영상의학적 검사와 함께 의료영상에서의 중요한 역할을 하고

This paper was supported by Eulji University in 2023.

Corresponding author: Chanrok Park, Department of Radiological Science, Eulji University, 553, Sanseong-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13135, Republic of Korea / Tel: +82-31-740-7185 / E-mail: tigeaglepcr@eulji.ac.kr

Received 9 May 2024; Revised 18 May 2024; Accepted 28 May 2024

Copyright ©2024 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

있다[4]. 심근 핵의학 검사는 심근의 기능을 영상화함으로써 심근 관련 질환을 확인할 수 있는 매우 유용한 검사이지만, ^{201}Tl -Chloride(이하 ^{201}Tl)와 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI의 다양한 방사성 핵종을 사용하고 있으며 이와 같은 방사성 핵종을 단일 주입 또는 이중 주입으로 검사를 수행하고 있다[5]. 심근 핵의학 검사는 미국 심장핵의학회에서 권고하는 검사 절차에 따라 정상 상태의 심근 기능(휴식기)을 확인하기 위하여 1회 심근 집적 방사성 핵종을 주입하고 운동과 같은 상태의 심근 기능(부하기)을 확인하기 위하여 심근에 집적하는 방사성 핵종을 1회 추가 주입함으로써 영상의 질을 비교하고 있다[6].

각 목적하는 장기에 적합한 방사성 핵종 주입을 통한 진단은 질병의 상태를 정확하게 파악할 수 있는 중요한 검사 방법이지만, 주입된 방사성 핵종은 목적하는 장기로의 집적뿐만 아니라 주변 장기에도 함께 집적되므로 목적하는 장기와 주변 장기의 방사선 피폭이 동반된다. 고용량의 방사성 핵종 주입은 같은 시간 동안 감마선이 더욱 많이 방출하기 때문에 영상의 질이 우수해질 수 있고, 단시간 검사가 가능하지만 방사선 방어 측면에서는 환자 피폭선량이 증가할 수밖에 없다. 또한, 국제방사선방호위원회는 의료방사선으로부터 발생한 피폭은 선량한도 및 규제가 없도록 권고하기 때문에 방사성 핵종 종류, 방사성 핵종 주입 횟수, 방사성 핵종 주입량에 따른 핵의학 검사에 있어서 피폭선량에 대한 정보가 필요하다[7]. 특히, 심근 핵의학 검사는 2회 방사성 핵종 주입, 다양한 방사성 핵종 적용으로 검사의 진단적 가치를 향상할 수 있지만, 심근 주변 장기에 대한 피폭이 발생하기 때문에 환자의 방사선 피폭적인 측면을 고려해야 한다. 최근, 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 내부 장기 피폭 선량 측정을 위한 연구가 많이 수행되고 있다[8-10]. 방사성 핵종으로부터 방출되는 방사선이 인체와 상호작용함으로써 감소하는 에너지를 측정함으로써 몬테카를로 코드를 이용하여 흡수선량을 평가할 수 있다[8]. 입자 및 중이온 수송 코드(Particle and Heavy Ion Transport code System; PHITS)는 낮은 에너지부터 고에너지의 방사선이 수송하면서 인체 등 물질과 상호작용하는 다양한 환경을 모사할 수 있는 대표적인 몬테카를로 시뮬레이션 코드다. 특히, 국제 방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection; ICRP)에서 개발한 mesh 타입의 표준 성인 여성 팬텀으로 PHITS 코드를 이용하여 정확한 내부 피폭선량 평가가 가능해졌다[9]. Sato 등은 핵의학 α 선 치료에서의 환자 흡수선량 시스템을 평가하기 위하여 PHITS 기반의 몬테카를로 시뮬레이션 툴을 사용하였으며 생물학적 효과에 따른 환경을 모사함으로써 흡수선량 평가 프로그램인 OLINDA 2.0과 비교했을 때 ^{18}F , ^{211}At , ^{177}Lu 방사성 핵종에서 유사함을 확인함으로써 유용성을 입증했다[11].

환자의 정확한 진단 및 질병의 위치를 검출하기 위한 영상의 질 향상에 관한 연구는 많이 수행되었다. 최근 의료장치 및 기술의 발전으로 영상의 질 향상 및 환자 피폭에 대한 연구는 많이 수행되고 있는 시점에서 인체를 대상으로 내부피폭선량의 측정에는 한계가 있다. 그러므로 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 내부피폭선량 측정 연구가 많이 필요한 시점에서, 심근 핵의학 검사와 같이 다양한 환경에서 시행되는 검사에서의 내부피폭선량 측정에 관한 정보는 매우 유용하다.

그러므로 본 연구에서의 목적은 몬테카를로 시뮬레이션 기반인 PHITS를 활용하여 심근 핵의학 검사에서의 방사성 핵종 종류, 주입 횟수, 주입량에 따른 주변 장기의 내부피폭선량을 흡수선량(Gy)으로 평가하고자 한다.

II. 대상 및 방법

심근 핵의학 검사를 모사하기 위하여 방사선 수송 전산 모사 코드인 PHITS (ver. 3.33)을 사용하였다. T-Deposit tally를 이용하여 흡수선량을 측정하였고 PHITS 코드에서 Maxcas는 10^6 , Maxbch는 20으로 설정하여 시뮬레이션 결과의 오차가 모든 장기에서 1.5% 미만이 되도록 설정하였다[12,13].

인체 팬텀은 ICRP 145에서 제공하는 mesh 타입의 표준 성인 여성 팬텀을 사용하였다[14]. PHITS를 통하여 투여된 방사성 핵종이 심근 벽에 고르게 분포하도록 모사하여 선원 장기로 설정하였고 폐, 간, 담낭, 유방, 위, 이자를 표적 장기로 설정하여 선원 장기로부터의 흡수선량을 표적 장기에서 측정하였다. Fig. 1은 ICRP 145에서 제공하는 mesh 타입의 표준 성인 여성 팬텀과 연구에서 설정한 선원 장기와 표적 장기를 나타냈다.

Table 1은 심근 핵의학 검사에서의 미국 심장 핵의학학회(American Society of Nuclear Cardiology)에서 권고하는 표준 프로토콜을 참고하여 다양한 방사성 핵종 환경을 모사하였다[15]. 심근 핵의학 검사 표준 프로토콜에 따라 방사성 핵종을 1회만 주입하는 검사과정은 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI를 심근의 부하 상태에서 370 MBq 주입하는 방법과 ^{201}Tl 을 심근의 부하 상태에서 111 MBq 주입하는 방법으로 설정하였다. 방사성 핵종을 2회 주입하는 검사과정은 총 3가지로 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI를 휴식 상태에서 370 MBq 주입한 후 심근의 부하 상태에서 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI를 1,110 MBq 추가로 주입하는 방법과 ^{201}Tl 을 심근의 부하 상태에서 111 MBq 주입한 후 휴식 상태에서 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MIBI를 370 MBq 주입하는 방법, ^{201}Tl 을 부하 상태에서 111 MBq 주입한 후 심근의 휴식 상태에서 ^{201}Tl 을 55.5 MBq를 주입하는 방법으로 설정하였다.

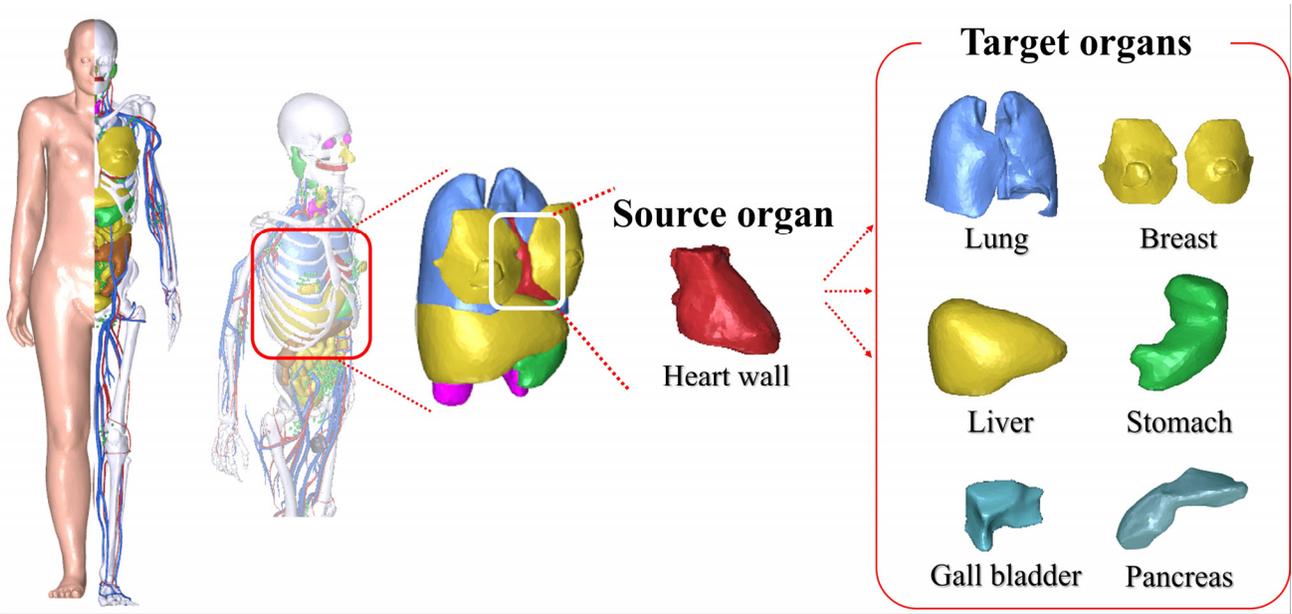


Fig. 1. PHITS based computational female phantom provided by ICRP 145 including source and target organs

Table 1. Simulation conditions based on recommended standard protocol including fractional distribution in radionuclides

	1st injection				2nd injection			
	Radionuclide	Status	Activity	Fractional distribution	Radionuclide	Status	Activity	Fractional distribution
Single injection	^{99m} Tc-MIBI	Stress	370 MBq	0,020	-	-	-	-
	²⁰¹ Tl-Chloride	Stress	111 MBq	0,034	-	-	-	-
Dual injection	^{99m} Tc-MIBI	Rest	370 MBq	0,015	^{99m} Tc-MIBI	Stress	1110 MBq	0,020
	²⁰¹ Tl-Chloride	Stress	111 MBq	0,034	^{99m} Tc-MIBI	Rest	370 MBq	0,015
	²⁰¹ Tl-Chloride	Stress	111 MBq	0,034	²⁰¹ Tl-Chloride	Rest	55.5 MBq	0,034

심장벽에 방사성 핵종이 집적되는 비율은 ICRP 128에서 제공하는 방사성 의약품별 각 장기의 집적 비율을 참고하였으며, ^{99m}Tc-MIBI의 부하 상태에서는 2%, 휴식 상태에서는 1.5%를 적용하였다. ²⁰¹Tl의 집적 비율은 부하 상태와 휴식 상태 모두 3.4%를 적용하였다[16,17].

III. 결과

Fig. 2와 3은 방사성 핵종을 ^{99m}Tc-MIBI와 ²⁰¹Tl 단일 주입했을 때와 ^{99m}Tc-MIBI와 ^{99m}Tc-MIBI, ²⁰¹Tl과 ^{99m}Tc-MIBI, ²⁰¹Tl과 ²⁰¹Tl을 이중 주입했을 때 각각 내부 장기의 흡수선량을 평가한 결과값이다.

Fig. 2는 ^{99m}Tc-MIBI를 부하 상태에서 단일 주입한 경우 유방, 폐, 위, 간, 담낭, 이자 순서로 7.97×10^{-9} , 6.49×10^{-9} ,

4.19×10^{-9} , 2.78×10^{-9} , 1.78×10^{-9} , 1.14×10^{-9} Gy/Bq의 흡수선량을 나타냈다. ²⁰¹Tl을 부하 상태에서 단일 주입한 경우 같은 순서로 3.14×10^{-9} , 2.91×10^{-9} , 1.83×10^{-9} , 1.20×10^{-9} , 6.84×10^{-10} , 4.47×10^{-10} Gy/Bq의 흡수선량을 나타냈다.

Fig. 3은 ^{99m}Tc-MIBI를 휴식 상태에 먼저 주입하고 부하 상태에 추가로 주입하는 경우 유방, 폐, 위, 간, 담낭, 이자 순서로 2.99×10^{-8} , 2.43×10^{-8} , 1.57×10^{-8} , 1.04×10^{-8} , 6.66×10^{-9} , 4.29×10^{-9} Gy/Bq의 흡수선량을 나타냈다. ²⁰¹Tl을 부하 상태에 먼저 주입하고 ^{99m}Tc-MIBI를 휴식 상태에 추가로 주입하는 경우는 같은 순서로, 1.11×10^{-8} , 9.40×10^{-9} , 6.02×10^{-9} , 3.98×10^{-9} , 2.46×10^{-9} , 1.59×10^{-9} Gy/Bq로 나타났다. ²⁰¹Tl을 부하 상태와 휴식 상태에 모두 주입하는 경우는 4.72×10^{-9} , 4.37×10^{-9} , 2.75×10^{-9} , 1.80×10^{-9} , 1.03×10^{-9} , 6.71×10^{-10} Gy/Bq로 나타났다.

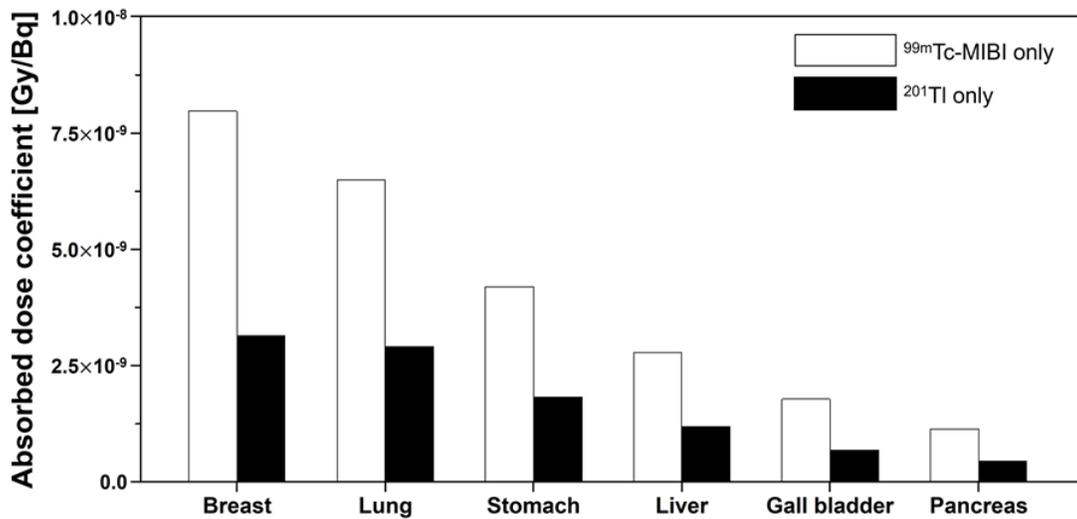


Fig. 2. The results of absorbed dose according to various inner organs at the $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ and ^{201}Tl radionuclides, respectively

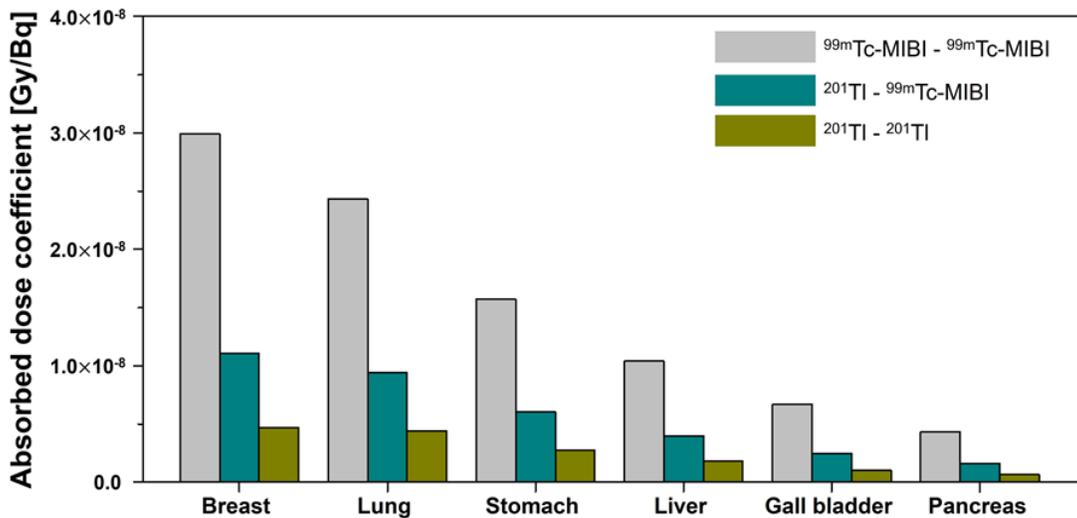


Fig. 3. The results of absorbed dose according to various inner organs at the $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ and $^{99m}\text{Tc-MIBI}$, ^{201}Tl and $^{99m}\text{Tc-MIBI}$, and ^{201}Tl and ^{201}Tl radionuclides, respectively

IV. 고찰

핵의학 영상에서 우수한 영상의 질 획득과 주입된 방사성 핵종에 따른 방사선 피폭 선량 평가 및 감소 방안은 많은 연구자들이 고려해야 할 연구 주제다. 심근 핵의학 검사와 같이 방사성 핵종의 이중 주입, 다양한 방사성 핵종 사용, 방사성 핵종 주입량이 다양한 검사 방법에서는 내부 장기가 받을 피폭선량에 대한 평가가 매우 중요하다[18,19]. 본 연구에서는 심근 핵의학 검사에서의 방사성 핵종의 종류, 주입량, 주입 횟수에 따라 심근으로부터의 주변 장기가 받을 방사선 피폭선량을 흡수선량(Gy)의 단위로 ICRP 145에서 제공한 성인 표준 여성 팬텀을 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션 툴인 PHITS를 이

용하여 획득 및 평가하였다.

Fig. 2의 결과를 바탕으로 방사성 핵종을 단일 주입할 결과 $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ 단일 주입과 ^{201}Tl 단일 주입 모두 유방, 폐, 위, 간, 담낭, 이자 순서로 높은 흡수선량 값을 나타냈다. 또한, $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ 를 사용할 때 ^{201}Tl 을 사용할 때보다 장기별로 평균 2.38배 높은 흡수선량 값을 나타냈다. 결과적으로 두 조건 모두에서 유방이 가장 높은 흡수 선량 분포를 나타냈으며, 이자가 가장 낮은 흡수 선량값을 나타냈다. $^{99m}\text{Tc-MIBI}$ 를 사용할 때 유방이 이자보다 흡수 선량이 6.97배 높게 나타났고 ^{201}Tl 을 사용할 때는 7.04배 높게 나타났다. 방사성 핵종 이중 주입에 따른 흡수선량을 평가한 Fig. 3의 결과를 바탕으로 설정한 세 조건 모두 유방, 폐, 위, 간, 담낭, 이자 순서로 높은 흡수선량 값을

나타냈다. 또한, 각 표적 장기의 평균 흡수선량은 ^{99m}Tc -MIBI를 휴식기와 부하기에 모두 주입하는 방법 1.52×10^{-8} Gy/Bq, ^{201}Tl 을 부하기에 먼저 주입하고 ^{99m}Tc -MIBI를 휴식기에 주입하는 방법 5.76×10^{-9} Gy/Bq, ^{201}Tl 을 휴식기와 부하기에 모두 주입하는 방법 2.55×10^{-9} Gy/Bq로 나타났다. 세 조건에서 모두 유방이 가장 높은 흡수 선량을 나타냈고 이자가 가장 낮은 흡수선량을 나타냈다. ^{201}Tl 을 휴식기와 부하기에 모두 주입하는 방법에서 유방이 이자보다 7.04배 높게 나타났다.

본 연구는 방사성의약품을 주입한 직후와 방사성의약품이 심근에만 집적한 상황을 모사하여 시간에 따른 방사성의약품의 체내 배출과 다른 장기로의 생리적 집적에 따른 심근 이외의 장기로부터의 선량을 고려하지 않았다. 또한, 심장과 가까이 위치한 장기 중 유방의 흡수선량에 대한 정보는 추후 유방암 발생률과의 상관관계를 분석할 수 있는 기초자료가 될 수 있기 때문에 사전 연구로 여성 팬텀만을 적용하여 평가하였다. 그러므로 추후 연구에서는 주입 핵종에 따른 집적 기전과 생체동역학적 환경 모사를 고려함으로써 더욱 정확한 내부 피폭량을 측정하고, 성인 남성 팬텀에도 적용하여 남성과 여성의 선량을 비교 분석하고자 한다. 그러므로 추후 연구에서는 주입 핵종에 따른 집적 기전과 생체동역학적 환경 모사를 고려함으로써 더욱 정확한 내부 피폭량을 측정하고자 한다. 획득한 데이터를 기반으로 실제 환자데이터에 적용하여 비교분석 할 수 있는 방안을 고려해 보고자 한다.

V. 결론

본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션 툴인 PHITS 기반의 심근 핵의학 검사에서의 다양한 검사 환경을 모사하였으며 ICRP 145에서 제공하는 성인 표준 여성 팬텀을 이용하여 심근으로부터 발생하는 감마선이 주변 장기에 흡수되는 양을 흡수선량 (Gy)으로 평가하였다. 결과적으로, 방사성 핵종의 종류, 주입 횟수에 따라 흡수선량에 차이가 발생함을 확인하였고, 심근에서 가까울수록 흡수선량의 증가함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Gnanasegaran G, Ballinger JR. Molecular imaging agents for SPECT (and SPECT/CT). *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2014;41(S1):26-35. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00259-013-2643-0>.
- [2] Hutton BF. The origins of SPECT and SPECT/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2014;41(S1):3-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00259-013-2606-5>.
- [3] Mariani G, Bruselli L, Kuwert T, Kim EE, Flotats A, Israel O, et al. A review on the clinical uses of SPECT/CT. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*. 2010;37(10):1959-85. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00259-010-1390-8>.
- [4] Ficaro EP, Corbett JR. Advances in quantitative perfusion SPECT imaging. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2004;11(1):62-70. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclcard.2003.10.007>.
- [5] Baggish AL, Boucher CA. Radiopharmaceutical agents for myocardial perfusion imaging. *Circulation*. 2008;118(16):1668-74. DOI: <http://dx.doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.778860>.
- [6] Einstein AJ, Moser KW, Thompson RC, Cerqueira MD, Henzlava MJ. Radiation dose to patients from cardiac diagnostic imaging. *Circulation*. 2007;116(11):1290-305. DOI: <http://dx.doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.107.688101>.
- [7] ICRP. 1990 Recommendations of the international commission on radiological protection. ICRP Publication 60. Ann. ICRP. 1991;21(1-3):1-201. Retrieved from <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2060>.
- [8] Salari S, Khorshidi A, Soltani-Nabipour J. Simulation and assessment of ^{99m}Tc absorbed dose into internal organs from cardiac perfusion scan. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023;55(1):248-53. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.net.2022.08.024>.
- [9] Sato T, Iwamoto Y, Hashimoto S, Ogawa T, Furuta T, et al. Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2018;55(6):684-90. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>.
- [10] Cater LM, Choi C, Krebs S, Beattie BJ, Kim CH, Schoder H, et al. Patient size-dependent dosimetry methodology applied to ^{18}F -FDG using new ICRP mesh phantoms. *The Journal of Nuclear Medicine*. 2021;62(12):1805-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.2967/jnumed.120.256719>.

- [11] Sato T, Furuta T, Liu Y, Naka S, Nagamori S, Kanai Y, et al. Individual dosimetry system for targeted alpha therapy based on PHITS coupled with micro-dosimetric kinetic model. 2021;8(1):4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/s40658-020-00350-7>.
- [12] Yeom YS, Han H, Choi C, Nguyen TT, Shin B, Lee C, et al. Posture-dependent dose coefficients for mesh-type ICRP reference computational phantoms for photon external exposures. *Physics in Medicine & Biology*. 2019;64(7):075018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-6560/ab0917>
- [13] Carter LM, Bellamy MB, Choi C, Kim CH, Bolch WE, Jokisch D, et al. Influence of body posture on internal organ dosimetry: Radiocesium exposure modeling using novel posture-dependent mesh computational phantoms. *Health Physics*. 2023;125(2):137-46. DOI: <http://dx.doi.org/10.1097/HP.0000000000001701>
- [14] ICRP. Adult mesh-type reference computational phantoms. ICRP Publication 145. *Ann. ICRP*. 2020;49(3):13-201. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0146645319893605>
- [15] Henzlova MJ, Duvall WL, Einstein AJ, Travin MI, Verberne HJ. ASNC imaging guidelines for SPECT nuclear cardiology procedures: Stress, protocols, and tracers. *Journal of Nuclear Cardiology*. 2016;23(3):606-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12350-015-0387-x>
- [16] ICRP. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: A compendium of current information related to frequently used substances. ICRP Publication 128. *Ann. ICRP*. 2015;44(2S):7-321. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0146645314558019>
- [17] Thomas SR, Stabin MG, Castronovo FP. Radiation-absorbed dose from 201Tl-thallous chloride. *Journal of Nuclear Medicine*. 2005;46(3):502-8. Retrieved from <https://jnm.snmjournals.org/content/46/3/502>
- [18] Choi SG. Clinical review of the current status and utility of targeted alpha therapy. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2023;46(5):379-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2023.46.5.379>
- [19] Jang BJ, Nam HY, Shin HM, Yun DM, Lee SK, Jang IH, et al. Doses of pediatric and X-ray examination assistants according to changes in pediatric X-ray exposure conditions. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2023;46(5):409-15. DOI: <http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2023.46.5.409>

구분	성명	소속	직위
제1저자	이민관	을지대학교 방사선학과	석사 대학원생
교신저자	박찬록	을지대학교 방사선학과	조교수