

<원저>

몬테카를로 방법을 이용한 임신한 여성 핵의학 종사자의 모체 장기 및 태아선량 평가

조용인

부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

Assessment of Maternal Organs and Fetal Doses in Pregnant Female Nuclear Medicine Practitioners Using the Monte Carlo Method

Yong-In Cho

Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Abstract The purpose of this study was to evaluate maternal organ and fetal doses by week of pregnancy for pregnant women nuclear medicine practitioners in the nuclear medicine field. In addition, we intend to present basic data for the management of exposure doses of female nuclear medicine practitioners. In this study, phantoms of childbearing women, 3, 6, 9 months pregnant women were simulated using MCNPX(Monte Carlo N-Particle Extended) among the Monte Carlo methods. First, volume source was constructed based on 10 cm of the anterior part of the lower abdomen of the phantom, and the organ and fetal doses were evaluated for each week of the pregnant woman according to the type of radioactive isotope. Second, the organ and fetal dose of pregnant women were evaluated by increasing the distance between the source and the abdominal surface by 50 and 100 cm. As a result, ^{18}F sources showed high organ and fetal doses in pregnant women 0 to 3 months, and the dose distribution gradually decreased in 6 to 9 months pregnant women. The distribution of organ and fetal doses for $^{99\text{m}}\text{Tc}$ and ^{123}I sources showed the same tendency as that of ^{18}F , and the overall absorbed dose distribution was relatively lower than that of ^{18}F . Through this study, it is considered that workers in the early stages of pregnancy within 3 months will need appropriate management to minimize occupational exposure dose.

Key Words: Pregnant Woman, Nuclear Medicine Practitioners, Radioactive Isotope, Monte Carlo Simulation, Maternal Organ Dose, Fetal Dose

중심 단어: 임신부, 핵의학 종사자, 방사성동위원소, 몬테카를로 전산모사, 모체 장기선량, 태아선량

1. 서론

핵의학은 방사성 추적자의 특이한 성질을 이용하여 신체의 해부학적, 생리학적, 생화학적 상태를 진단, 평가하고 개봉 방사선원을 이용해 치료하는 의학의 전문 분야이다[1]. 핵의학 진단에 사용되는 방사성의약품은 소량이지만, 방사성동위원소의 생산, 표지, 분배, 주사 등의 업무 특성상 불가피한 방사선 피폭에 노출된다[2]. 일반적으로 핵의학 진단

분야에서 사용되는 방사성동위원소는 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (Technetium), ^{18}F (Fluorine), ^{123}I (Iodine), ^{201}Tl (Thallium), ^{67}Ga (Gallium), ^{111}In (Indium) 등이 있으며, 이는 붕괴방식에 따라 방출하는 방사선의 종류, 에너지(energy), 반감기(Half life) 등의 물리적인 특성이 다르다. 이러한 방사성동위원소를 취급하는 핵의학 종사자의 경우, 업무 절차에 따라 피폭선량은 광범위한 차이를 나타낸다[3]. 2019년 의료기관 종사자의 피폭선량 통계 자료에 따르면, 의료기관 내 방사선 관련 업무를

This paper was supported by RESEARCH FUND offered from Catholic University of Pusan in 2022.

Corresponding author: Yong-In Cho, Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, 57, Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan, 46252, Republic of Korea / Tel: +82-51-510-0571 / E-mail: yicho@cup.ac.kr

Received 15 July 2022; Revised 21 July 2022; Accepted 11 August 2022

Copyright ©2022 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

수행하고 있는 영상의학과 종사자의 피폭선량은 연간 0.26 mSv, 핵의학과 종사자의 피폭선량은 연간 0.41 mSv로 핵의학과에 종사하는 방사선작업종사자가 가장 높은 피폭선량을 나타낸다고 보고되었다[4,5]. 이처럼 핵의학 분야 내 업무를 수행하는 종사자는 직업상 피폭선량을 줄이기 위한 노력이 필요하다.

최근 여성 핵의학 검사 비율이 점차 증가함에 따라 핵의학 종사자의 환자 접촉 빈도는 점차 늘어나고 있다. 여성의 핵의학 검사 중 민감한 부위에 대한 검사 시 환자 개인의 생활 보호 등의 요구로 의료기관별로 여성 핵의학 종사자가 점차 증가하고 있는 추세이다. 여성은 남성보다 방사선에 대한 민감도가 높다고 알려져 있으며, 특히 가임 여성의 경우, 임신 시 방사선 피폭으로 인한 태아의 확률적 장애 발생의 우려가 있다[6]. 태아의 방사선 장애는 모체가 방사선에 노출되는 임신 시기와 노출되는 선량에 따라 장애 발생 위험도가 다르며, 착상 전기와 기관 형성기에 100 mGy 이하의 선량은 태아 사망, 기형 발생에 원인이 된다고 알려져 있다[7]. 과거 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protection, ICRP)에 따르면, 임신한 방사선 작업종사자에 대한 방호를 위해 임신이 확인된 방사선 작업종사자에 대하여는 임신이 확인된 시점부터 출산 시까지 하복부 표면에서의 등가선량한도를 2 mSv로 하고 같은 기간 동안 섭취하는 방사성핵종의 한도는 연간섭취한도(ALI)의 1/20로 규정하고 있다[7]. 과거 핵의학 분야의 일반적인 종사자에 대한 피폭선량 관련 연구는 다양하게 이뤄져 왔으나, 가임 여성이나 임신한 여성에 대한 선량 평가에 관한 연구는 다소 부족한 실정이다. 따라서 여성 핵의학 종사자의 방사선 안전관리를 위해 핵의학 분야 내 업무환경에 따라 노출되는 선량에 대한 정량적인 자료가 필요하다.

이에 본 연구에서는 몬테카를로 전산모사를 이용하여 여성의 인체 장기 및 태아에 대한 세부 구성정보를 반영한 모의피폭체를 모사하고, 핵의학 업무환경 내 여성 핵의학 종사자를 대상으로 임신 주 수별 임신부의 장기 및 태아선량에 대해 평가하고자 한다. 이를 통해 여성 핵의학 종사자의 직업상 피폭 관리를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

II. 대상 및 방법

1. 몬테카를로 전산모사(Monte Carlo Simulation)

1) MCNPX(Monte Carlo N-Particle Extended)

몬테카를로 전산모사란 무작위로 추출된 난수(Random

number)를 이용하여 물리적·수학적 문제를 통계적으로 해결하는 방법이다. 복잡한 기하학적 구조를 가지는 모의피폭체에 입사한 광자의 거동을 모사하여 각 장기 체적에 부여하는 선량을 계산하는 작업에 이용되고 있다[8]. 본 연구에서 사용한 MCNPX(ver. 2.5.0) 코드는 몬테카를로 방식을 이용한 계산 중 하나로서 미국의 핵무기 연구소인 로스앨러모스 국립연구소(Los Alamos National Laboratory, LANL)에서 개발되었다. 이는 전자, 광자, 중성자, 양성자 등의 입자 수송이 가능하여 입자 레벨에서 통계의 누적을 통해서 실측이 어려운 상황을 대체하여 계산을 수행할 수 있다[9]. 또한 출력 연산자(Tally)를 사용하여 플루언스, 에너지 분포, 에너지 흡수 등 다양한 물리량을 출력할 수 있는 장점이 있다[9]. 이러한 장점으로 과거 핵의학 분야 내 방사선량 분석 및 방사선 방호 연구에 다양하게 활용되었다[10,11].

2) 핵의학 진단용 방사성동위원소

본 연구에서는 현재 핵의학 진단 분야에서 사용되고 있는 대표적인 방사성동위원소 중 사용 빈도가 높은 ^{99m}Tc , ^{18}F , ^{123}I 을 선정하였다. ^{99m}Tc 의 경우 반감기 6시간, 140 keV의 γ 선을 방출하는 물리적 특성과 조직 투과율이 우수하여 단일광자방출영상촬영장치(SPECT) 검사 시 전체 사용량의 90% 이상을 차지한다. 또한 ^{18}F 은 양전자방출 핵종으로 반감기가 109.8분으로 짧으며, 양전자 소멸 이후 방출되는 511 keV의 소멸 광자를 이용하는 특성으로 양전자방출단층촬영장치(PET/CT) 검사 시 거의 대부분을 차지하고 있다. ^{123}I 은 반감기 13.2시간, 159 keV의 γ 선을 방출하며 방사성 요오드 치료 이후 갑상샘 환자 추적 검사 시 이용되고 있으며, Table 1의 물리적 특성을 토대로 방사선원을 모사하였다[12].

3) 임신부 모의피폭체

과거 Stabin 등(1995)의 연구에서는 MIRD형 모의피폭체를 토대로 임신부에 따른 모의피폭체를 개발하였으며, Body builder(White Rock Science) 프로그램을 통해 원하는 임신 개월 수에 따른 모의피폭체의 기하학적 정보를 획득할 수 있다[13]. 우리원 등(2020)의 연구에서는 body build 프로그램을 통해 생성되는 기존 4가지 구성과 ICRU 74에서 제시한 장기 및 조직 내부 구성을 반영한 모의피폭체와의 선량 분석을 통해 구성 물질의 변화에 따른 흡수선량 변화를 제시하였다[14]. 따라서 본 연구에서는 임신부에 대한 정량적인 흡수선량 분석을 위해 모의피폭체는 Fig. 1

과 같이 가임 여성(0개월, 3개월, 6개월, 9개월 임신부의 장기 및 태아에 대해 Table 2의 장기별 세부 구성성분과 밀도를 반영하여 모사하였다.

Table 1. Physical Properties of Diagnostic Radionuclide

	Physical Property		
	^{99m} Tc	¹⁸ F	¹²³ I
Half Life (hour)	6.01	1.83	13.22
Decay Type	γ Emission	β^+ Decay → Annihilation γ	γ Emission
Energy (yield)	γ 140.5(0.89) keV 18.4(0.04) keV 18.3(0.02) keV	β^+ _{max} 633.5(0.97) keV → γ 511(1.94) keV	γ 159.0(0.83) keV 27.5(0.46) keV 27.2(0.25) keV 31.0(0.09) keV 31.7(0.03) keV 529.0(0.01) keV

Table 2. Organ and Tissue Composition for a Pregnant Woman Simulated Phantom Model

Organ	Composition												Density (g/cm ³)
	H	C	N	O	Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	I	
Lung	10.3	10.5	3.1	74.9	0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	-	-	0.26
Bone	10.3	25.5	3.1	47.9	0.3	0.1	5.1	0.2	0.1	0.2	10.2	-	1.40
Soft Tissue	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1	-	0.2	0.3	0.2	0.2	-	-	1.03
Muscle	10.2	14.3	3.4	71.0	0.1	-	0.2	0.3	0.1	0.4	-	-	1.05
Skin	10.0	20.4	4.2	64.5	0.2	-	0.1	0.2	0.3	0.1	-	-	1.09
Brain	10.7	14.5	2.2	71.2	0.2	-	0.4	0.2	0.3	0.3	-	-	1.04
Eyes	9.6	19.5	5.7	64.6	0.1	-	0.1	0.3	0.1	-	-	-	1.07
Thyroid	10.4	11.9	2.4	74.5	0.2	-	0.1	0.1	0.2	0.1	-	0.1	1.05
Upper Face	8.9	24.1	2.8	55.7	0.2	-	2.6	0.2	0.1	0.2	5.1	-	1.22
Larynx	9.6	9.9	2.2	74.4	0.5	-	2.2	0.9	0.3	-	-	-	1.10
Trachea	10.5	25.6	2.7	60.2	0.1	-	0.2	0.3	0.2	0.2	-	-	1.03
GI Tract	10.6	11.5	2.2	75.1	0.1	-	0.1	0.1	0.2	0.1	-	-	1.03
Ovaries	10.5	9.3	2.4	76.8	0.2	-	0.2	0.2	0.2	0.2	-	-	1.05
Uterus	10.6	31.5	2.4	54.7	0.1	-	0.2	0.2	0.1	0.2	-	-	1.02
Urinary Bladder	10.5	9.6	2.6	76.1	0.2	-	0.2	0.2	0.3	0.3	-	-	1.04
Spleen	10.3	11.3	3.2	74.1	0.1	-	0.3	0.2	0.2	0.3	-	-	1.06
Heart	10.4	13.9	2.9	71.8	0.1	-	0.2	0.2	0.2	0.3	-	-	1.05
Pancreas	10.6	16.9	2.2	69.4	0.2	-	0.3	0.1	0.2	0.2	-	-	1.04
Liver	10.3	18.6	2.8	67.1	0.2	-	0.2	0.3	0.2	0.3	-	-	1.05
Kidneys	10.3	13.2	3.0	72.4	0.2	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	-	1.05
Breast	11.6	51.9	-	36.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94
Placenta	10.3	6.5	2.0	78.2	-	-	0.2	0.1	-	-	0.4	-	0.995
Fetus 6 m	10.5	6.9	1.6	79.5	-	-	0.4	0.1	-	-	1.0	-	0.97
Fetus 9 m	10.5	6.9	1.6	79.4	-	-	0.5	0.1	-	-	1.0	-	1.02
Fetal Skeleton	8.0	9.7	2.7	66.8	0.3	0.1	3.7	0.3	0.1	0.1	8.0	-	1.22

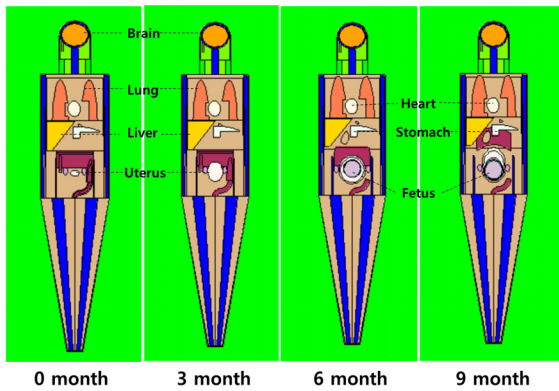


Fig. 1. Simulated Phantom of Female Pregnancy Month

2. 연구방법

1) 핵의학 진단용 방사성동위원소에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아 선량 평가

핵의학 진단용 방사성동위원소의 종류에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아선량을 평가하고자 모의실험을 수행하였다. 앞서 모사한 가임 여성, 임신 3개월, 임신 6개월, 임신 9개월 팬텀에 대한 모의피폭체 위치시킨 후 방사선원의 위치는 Fig. 2와 같이 하복부 전면부에 표면방사선량률로 정의된 10 cm 지점을 기준으로 체적 선원을 구성하였다. 방사선원은 Table 1에 제시된 물리적 특성을 세부 정보로 이용하였으며, 방사능은 현재 핵의학 진단 검사로 시행되는 PET/CT 검사(^{18}F -FDG, 370 MBq), 전신 뼈 검사($^{99\text{m}}\text{Tc}$ -MDP, 1110 MBq), 요오드 전신검사(^{123}I , 259 MBq)의 투여량을 고려하여 방사선원을 설정하였다. 방사선원에서 방출되는 감마선에 의한 임신부의 장기 및 태아선량 평가를 위해 관심지점(tally)는 모의피폭체 내 유방(Breast), 폐(Lung), 위(Stomach), 간(Liver), 갑상샘(Thyroid gland), 뇌(Brain), 콩팥(Kidney), 이자(Pancreas), 식도(Esophagus), 지라(Spleen), 흉선(Thymus), 피부(Skin), 소장(Small intestine), 부신(Adrenal gland), 대장(Colon), 난소(Ovary), 자궁(Uterus), 태반(Placenta), 태아(Fetus), 태아뼈(Fetal skeleton) 등을 선정하였다. Tally specification card는 f6 tally를 이용하여 진단용 방사선원에서 방출되는 감마선에 의한 장기 및 조직의 단위질량당 축적된 에너지(MeV/g) 분포를 획득하였다. 획득한 장기의 에너지 분포를 각 장기별 흡수선량 분포를 평가하고자 흡수선량률에 대한 단위(mGy/h)로 환산하였다. 모의실험 결과에 대한 신뢰성을 확보하고자 반복 횟수(nps)는 10^8 번 수행하였다.

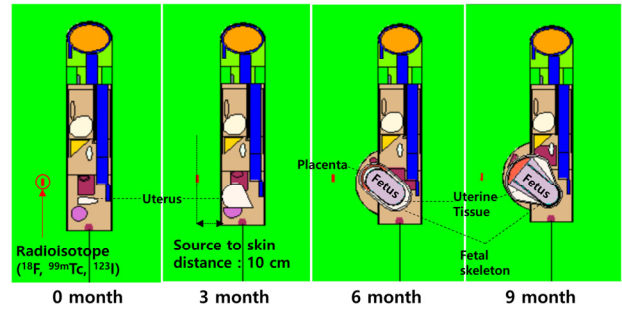


Fig. 2. Assessment of Organ and Fetal Doses of Pregnant Woman by Type of Diagnostic Radioisotope

2) 방사선원의 종류별 거리에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아선량 평가

핵의학 진단용 방사성동위원소의 종류별 거리에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아선량을 평가하고자, 선원과 임신부 복부 표면과의 거리를 50, 100 cm로 증가함에 따른 임신부의 장기 및 태아 선량을 평가하였다. 모의실험 내 기하학적 구성 및 출력 연산자의 설정은 앞선 실험과 동일하게 설정하였고, 반복횟수(nps)는 10^8 번 시행하였다.

III. 결과

1. 핵의학 진단용 방사성동위원소에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아선량 평가

첫 번째, 핵의학 진단용 방사성동위원소 취급 시 표면방사선량률로 정의된 선원과의 거리 10 cm 지점에서의 임신 주 수별 모체 장기 및 태아선량을 평가하였다. ^{18}F 선원의 경우, 가임여성(0개월)~3개월 임신부에서 Table 3과 같이 복부 장기 중 소장에서 0.619~0.670 mGy/h로 가장 높은 선량 분포를 보였으며, 그 외 장기는 위, 대장, 난소, 간, 췌장, 비장 순으로 점차 낮아지는 선량 분포를 나타내었다. 복부 이외의 장기에서는 유방 0.343 mGy/h, 갑상샘 0.082 mGy/h으로 평가되었으며, 선원으로부터 원거리에 있는 장기일수록 선량 분포는 낮아지는 경향을 보였다. 또한 임신 주 수에 따른 장기 및 태아선량 비교 결과, 0~3개월보다 6~9개월로 임신 주 수가 점차 증가함에 따라 모체 장기 및 태아 선량은 평균적으로 감소하는 양상을 나타내었다. 3개월 임신부의 복부 장기선량을 기준으로 6개월 임신부의 동일 장기의 흡수선량 분포는 27.1%~62.1%, 9개월 임신부의 흡수선량 분포는 21.9%~56.2% 수준으로 감소된 선량 변화를 보였다. 또한 태아선량 분포는 3개월 자궁 선량 기준으

Table 3. Distribution of Absorbed Dose to Organ and Fetus by Gestational Weeks when ¹⁸F Sources are Used (Unit : mGy/h)

Radionuclide (¹⁸ F)	The Number of Weeks of Pregnancy			
	0 Month	3 Month	6 Month	9 Month
Breast	0.343	0.343	0.256	0.242
Lung	0.164	0.164	0.134	0.111
Stomach	0.590	0.590	0.209	0.121
Liver	0.412	0.411	0.174	0.097
Thyroid	0.082	0.082	0.103	0.104
Brain	0.016	0.016	0.025	0.026
Kidneys	0.201	0.201	0.067	0.050
Pancreas	0.340	0.339	0.121	0.085
Esophagus	0.150	0.150	0.087	0.061
Spleen	0.214	0.214	0.080	0.056
Thymus	0.207	0.207	0.178	0.172
Trunk Skin	0.350	0.350	0.200	0.075
Small Intestine	0.619	0.670	0.192	0.123
Adrenals	0.177	0.177	0.068	0.048
Colon	0.571	0.565	0.349	0.316
Ovaries	0.452	0.443	0.119	0.096
Uterus	0.563	0.770	0.400	0.434
Fetal Skeleton	-	-	0.394	0.292
Fetus	-	-	0.354	0.328
Placenta	-	-	0.841	0.881

로 6개월 태아는 46.0%, 9개월 태아는 42.7% 수준으로 감소된 분포를 나타내었다.

^{99m}Tc 선원의 경우, 가임 여성(0개월)~3개월 임신부에서 Table 4와 같이 복부 장기 중 소장에서 0.489~0.530 mGy/h로 가장 높은 선량 분포를 보였으며, 그 외 장기는 위, 대장, 난소, 간, 췌장, 비장 순으로 점차 낮아지는 선량 분포를 나타내었다. 복부 이외 장기에서는 유방 0.248 mGy/h, 갑상샘 0.04 mGy/h으로 평가되었으며, 선원으로부터 원거리에서 위치한 장기일수록 선량 분포는 낮아지는 경향을 보였다. 또한 임신 주 수에 따른 장기 및 태아선량 비교 결과, 0~3개월보다 6~9개월로 임신 주 수가 점차 증가함에 따라 모체의 장기 및 태아 선량은 평균적으로 감소하는 양상을 나타내었다. 3개월 임신부의 복부 장기선량을 기준으로 6개월 임신부의 동일 장기 흡수선량 분포는 19.9%~54.0%, 9개월 임신부의 흡수선량 분포는 15.1%~49.0% 수준으로 감소된 선량 변화를 나타내었다. 또한 태아선량 분포는 3개월 자궁 선량 기준으로 6개월 태아는 43.7%, 9개월 태아는 39.5% 수준으로 감소된 선량 분포를 나타내었다.

¹²³I 선원의 경우, 가임 여성(0개월)~3개월 임신부에서 Table 5와 같이 복부 장기 중 소장에서 0.083~0.093 mGy/h로 가장 높은 선량 분포를 보였으며, 그 외 복부 장기는 위,

대장, 난소, 간, 췌장, 비장 순으로 점차 낮아지는 선량 분포를 나타내었다. 복부 이외 장기에서는 유방 0.054 mGy/h, 갑상샘 0.007 mGy/h으로 평가되었으며, 선원으로부터 원거리에서 위치한 장기일수록 선량 분포는 낮아지는 경향을 보였다. 또한 임신 주 수에 따른 장기 및 태아선량 비교 결과, 0~3개월보다 6~9개월로 임신 주 수가 점차 증가함에 따라 모체의 장기 및 태아 선량은 평균적으로 감소하는 양상을 나타내었다. 3개월 임신부의 복부 장기 선량을 기준으로 6개월 임신부의 동일 장기 흡수선량 분포는 19.5%~55.6%, 9개월 임신부의 흡수선량 분포는 15.0%~49.1% 수준으로 감소된 선량 변화를 나타내었다. 또한 태아선량 분포는 3개월 자궁 선량 기준으로 6개월 태아는 37.6%, 9개월 태아는 34.8% 수준으로 감소된 분포를 나타내었다.

모의실험을 통해 평가한 임신부의 장기 및 태아의 흡수선량 분포에 대한 통계적 불확도(uncertainty)는 3% 이내로 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.

위 결과에 따라 핵의학 진단용 방사성동위원소의 종류별 장기 및 태아선량 분포를 평가한 결과, ¹⁸F에서 가장 높은 결과를 보였으며, ^{99m}Tc, ¹²³I으로 갈수록 낮아지는 선량 분포를 나타내었다.

Table 4. Distribution of Absorbed Dose to Organ and Fetus by Gestational Weeks when ^{99m}Tc Sources are Used (Unit : mGy/h)

Radionuclide (^{99m} Tc)	The Number of Weeks of Pregnancy			
	0 Month	3 Month	6 Month	9 Month
Breast	0,248	0,248	0,193	0,180
Lung	0,106	0,106	0,088	0,071
Stomach	0,455	0,455	0,143	0,071
Liver	0,306	0,306	0,119	0,058
Thyroid	0,040	0,040	0,061	0,063
Brain	0,006	0,006	0,012	0,013
Kidneys	0,134	0,134	0,036	0,024
Pancreas	0,255	0,255	0,081	0,050
Esophagus	0,100	0,100	0,056	0,036
Spleen	0,146	0,146	0,049	0,029
Thymus	0,138	0,139	0,132	0,127
Trunk Skin	0,273	0,273	0,148	0,049
Small Intestine	0,489	0,530	0,119	0,074
Adrenals	0,114	0,114	0,040	0,025
Colon	0,443	0,440	0,238	0,209
Ovaries	0,354	0,346	0,069	0,052
Uterus	0,436	0,604	0,281	0,296
Fetal Skeleton	-	-	0,404	0,287
Fetus	-	-	0,264	0,239
Placenta	-	-	0,641	0,666

Table 5. Distribution of Absorbed Dose to Organ and Fetus by Gestational Weeks when ¹²³I Sources are Used (Unit : mGy/h)

Radionuclide (¹²³ I)	The Number of Weeks of Pregnancy			
	0 Month	3 Month	6 Month	9 Month
Breast	0,054	0,054	0,042	0,040
Lung	0,017	0,017	0,015	0,012
Stomach	0,081	0,081	0,024	0,011
Liver	0,053	0,053	0,020	0,009
Thyroid	0,007	0,007	0,010	0,011
Brain	0,001	0,001	0,002	0,002
Kidneys	0,020	0,021	0,006	0,004
Pancreas	0,040	0,040	0,013	0,008
Esophagus	0,016	0,016	0,009	0,006
Spleen	0,023	0,023	0,008	0,005
Thymus	0,024	0,024	0,024	0,024
Trunk Skin	0,067	0,067	0,036	0,011
Small Intestine	0,083	0,093	0,018	0,011
Adrenals	0,018	0,018	0,006	0,004
Colon	0,075	0,075	0,041	0,040
Ovaries	0,056	0,055	0,011	0,008
Uterus	0,073	0,114	0,052	0,056
Fetal Skeleton	-	-	0,073	0,045
Fetus	-	-	0,043	0,040
Placenta	-	-	0,130	0,133

2. 방사선원의 종류별 거리에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아선량 평가

두 번째, 핵의학 진단용 방사성동위원소의 종류별 거리에 따른 임신 주 수별 장기 및 태아선량 평가 결과 중 6개월 임신부를 기준으로 분석하였다. 그 결과, ^{18}F 선원에서는 Fig. 3과 같이 태아뼈, 태아, 태반 등은 모체 장기에 비해 상대적으로 높은 선량 분포를 나타내었으며, 10 cm 지점의 흡수선량 대비 50 cm 거리에서 86.7%~90.4%, 100 cm 거리에서 95.8%~97.2%의 선량 감소효과를 나타내었다. $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 선원의 경우, ^{18}F 의 선량 분포에 비해 평균 19.5~24.2% 정도 낮은 선량을 나타내었으며, 10 cm 지점의 흡수선량 분포 대비 50 cm 거리에서 86.2%~89.9%, 100 cm 거리에서 95.6%~97.0%의 선량 감소효과를 나타내었다. ^{123}I 선원의 경우, ^{18}F 의 선량 분포에 비해 평균 84.7~85.9% 정도 낮은 선량을 나타내었으며, 10 cm에서의 흡수선량 분포 대비 50 cm에서는 86.5%~90.3%, 100 cm에서는 95.7%~97.2%의 선량 감소효과를 나타내었다.

모의실험을 통해 평가한 방사선원의 종류별 거리에 따른 임신부의 장기 및 태아의 흡수선량 분포에 대한 통계적 불확도(uncertainty)는 3% 이내로 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다.

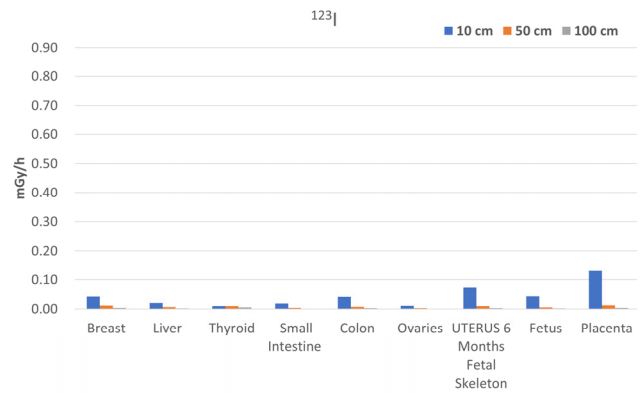
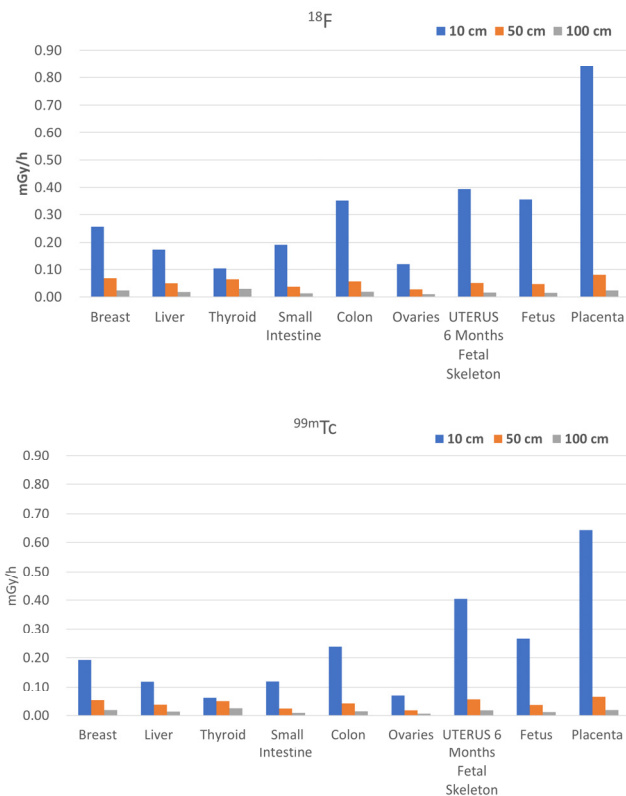


Fig. 3. Maternal Organ and Fetal Dose According to Distance by Type of Diagnostic Radioisotope

IV. 고찰

최근 핵의학 종사자 중 여성의 비율이 점점 증가하고 있으며, 여성 핵의학 종사자 간 업무환경에서 노출되는 방사선 피폭에 대한 인식과 행태는 남성 종사자에 비해 높다고 보고되고 있다[6]. 과거 김우란(2001), 우리원 등(2020)의 연구에서는 진단 X선 검사 시 임신부의 방사선량에 대해 평가한 연구 등이 이뤄져 왔으며, 현재 핵의학 분야 내 임신한 여성 종사자의 장기 및 태아선량을 평가한 자료는 부족한 실정이다[14~16]. 이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 핵의학 진단용 방사성동위원소의 종류별 선원 취급 시 종사자의 임신 주 수에 따른 임신부의 장기 및 태아선량을 산정하고자 하였다.

기존 선행연구에서 제시한 가임 여성(0개월), 3개월, 6개월, 9개월 임신부 모의피폭체를 모의실험 내에서 구현하였다. 가임 여성(0개월), 임신 3개월의 경우, 미성숙한 태아 형태의 표현에 있어 다소 제한적인 부분이 존재하여 임신부의 자궁 내 태아가 위치되는 것으로 간주하여 보수적인 평가를 수행하였다. 본 연구의 결과에 따르면, 첫 번째, 임신 주 수별 모체 장기 및 태아선량 분석을 통해 0~3개월 임신부의 경우, 6~9개월 임신부에 비해 높은 선량을 나타내었으며, 선원과 근거리에 위치한 복부 장기일수록 더 높은 선량 분포를 보였다. 또한 태아 선량의 경우, 임신 주 수별 모체 장기와 유사한 선량 변화를 나타내었으나, 모체 장기의 평균 선량과 비교하여 1.8배 정도 더 높은 선량을 나타낸 것으로 분석되었다. 이는 과거 우리원 등의 연구에서 제시한 것과 상응한 결과를 나타내었으며, 6~9개월 임신부는 태아의 체적이 증가함에 따른 복부 크기 변화로 선량이 감소한 것으로 분석된다[14]. 이에 따라 0~3개월 이내 임신한 중

사자의 경우 6~9개월 종사자보다 태아 선량 관리 측면에서 더욱 주의를 기울여야 할 것으로 사료된다. 두 번째, 진단용 방사성동위원소의 종류에 따른 거리별 장기 및 태아선량의 경우, ^{18}F 에서 가장 높은 값을 보였고, $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I 의 순서로 점차 낮아지는 선량 분포를 나타내었으며, 선원과의 거리에 따른 장기 및 태아선량은 감소하는 경향을 보였다. 이는 방사선원의 비방사능과 붕괴 시 방출되는 감마선에 대한 발생 수율에 의한 결과이며, 거리에 따른 선량은 거리 역제곱 법칙에 따라 선량 분포가 감소한 것으로 분석된다. 이러한 결과에 따라 임신한 여성 핵의학 종사자는 선원과 환자 접촉 시 가능한 한 원거리를 유지하고, PET/CT 검사 업무보다는 SPECT 검사 업무를 담당하는 것이 선량 저감화 측면에서 더 유리할 것으로 사료된다. 또한 한상현 등(2017)의 연구에서는 핵의학 분야에서 사용되는 0.35 mmPb 납 앞치마에 대해 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I 선원의 평균 차폐율은 각각 31.6%, 76.6%라고 제시하였다[12]. 이에 따라 임신한 종사자의 불가피한 방사선원 취급 시 납 앞치마를 활용한다면 피폭선량 최적화에 도움될 수 있을 것으로 생각된다.

기존 방사선작업종사자의 피폭선량 관리는 가슴 부위에 선량계를 착용하여 심부 $H_p(10)$, 표층 $H_p(0.07)$ 선량에 대해 분기별로 평가하고 있으며, 이는 임신부의 복부에 대한 선량을 정확하게 반영하기에는 한계가 있다[17,18]. 또한 임신한 핵의학 종사자에 대한 장기 및 태아 선량을 직접적으로 평가하는 것은 불가능하며, 가상공간 내 모의실험을 이용한 방법은 임신부의 선량 평가 및 방사선 방호 측면에서 보조적인 평가 방법으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 임신 기간 내 방사선작업종사자의 하복부의 선량 측정을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각되며, 본 연구 결과를 토대로 핵의학 분야 내 임신한 방사선 작업종사자의 안전관리를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 모의실험을 통해 핵의학 진단에서 사용되는 방사성동위원소를 취급하는 업무환경 내 여성 핵의학 종사자의 임신 주 수별 장기 및 태아선량을 평가하였다. 첫 번째로, 임신 주 수별 장기 및 태아 선량은 6개월 임신부인 임신 중기 이후 흡수선량 분포가 점차 감소하는 것을 확인하였으며, 3개월 이내 임신 초기의 종사자는 피폭선량에 대한 면밀한 관리가 필요하다. 두 번째로, 선원과의 거리에 따른 장기 및 태아 선량 분석을 통해 임신한 여성 핵의학 종사자

가 불가피하게 선원을 취급하거나 환자를 접촉하는 경우, ^{18}F 선원을 이용하는 PET/CT 검사 업무환경보다는 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I 선원을 이용하는 검사 업무를 수행하고, 최대한 원거리 유지를 통해 노출되는 피폭선량을 합리적으로 달성할 수 있는 한 낮게 유지하고자 하는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Ko CS, Nuclear Medicine, 3rd ed, Korea Medical Book Publishing Company; 2008.
- [2] Alkhorayef M, Mayhoub FH, Salah H, Sulieman A, Al-Mohammed HI, Almuwannis M, et al. Assessment of occupational exposure and radiation risks in nuclear medicine departments, Radiation Physics and Chemistry. 2020;170:108529.
- [3] Kang CG, Oh KB, Park HH, Oh SH, Park MS, Kim JY, et al. A Study on the individual radiation exposure of medical facility nuclear workers by job. The Korean Journal of Nuclear Medicine Technology. 2010;14(2):9-16.
- [4] Korea Disease Control and Prevention Agency. 2019 Report occupational radiation exposure in diagnostic radiology in Korea, 2020.
- [5] Korean Statistical Information Service. Average annual radiation exposure dose by field of radiation workers, 2021.
- [6] Lee JY, Park HH. Radiation exposure analysis of female nuclear medicine radiation workers, Journal of Radiological Science and Technology. 2016;39(2):209-25.
- [7] International Commission on Radiological Protection, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1991;21(1-3):1-201.
- [8] Heo NG, Kang HI. Study on teachers' understanding on generating random number in monte carlo simulation, Journal of Korea Society Educational Studies in Mathematics School Mathematics. 2015;17(2):241-55.
- [9] Park ET, Lee DY, Ko SJ, Kim JH, Kang SS. A study on photon spectrum in Medical linear accelerator based on MCNPX, Journal of the Korean Society of

- Radiology. 2014;8(5):249-54.
- [10] Cho YI, Kim JM, Kim JH. Ocular organ dose assessment of nuclear medicine workers handling diagnostic radionuclides. Radiation Protection Dosimetry. 2017;175(2):209-16.
- [11] Kang SS, Cho YI, Kim JH. Organ dose assessment of nuclear medicine practitioners using L-block shielding device for handling diagnostic radioisotopes. Journal of Radiological Science and Technology. 2017;40(1):49-55.
- [12] Han SH, Han BH, Lee SH, Hong DH, Kim GJ. Evaluation of radiation shielding Rate of lead aprons in nuclear medicine. Journal of Radiological Science and Technology. 2017;40(1):41-7.
- [13] Stabin MG, Watson EE, Cristy M, Ryman JC, Eckerman KF, Davis JL, et al. Mathematical models and specific absorbed fractions of photon energy in nonpregnant adult female and at the end of each trimester of pregnancy, (No. ORNL/TM-12907). Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States); 1995.
- [14] Woo RW, Cho YI, Kim JH. Dose assessment during pregnancy in abdominal X-ray examinations. Journal of the Korean Society of Radiology. 2020;14(3):261-70.
- [15] Woo RW, Cho YI, Kim JH. Dose assessment during pregnancy in chest PA examination. Journal of the Korean Society of Radiology. 2020;14(5):661-8.
- [16] Kim WR. Construction of pregnant female phantoms and assessment of radiation doses to fetus and mother due to diagnostic x-ray examination [master's thesis]. Perth: Department of Nuclear Engineering, Hanyang University Graduate School; 2001.
- [17] Cruz-Suarez R, Nosske D, Souza-Santos D. Radiation protection for pregnant workers and their offspring: A recommended approach for monitoring. Radiation Protection Dosimetry. 2011;144(1-4):80-4.
- [18] Son SJ, Park JK, Jung DK, Park MH. Comparison of the equivalent dose of the lens part and the effective dose of the chest in the PET/CT radiation workers in the nuclear medicine department. Journal of Radiological Science and Technology. 2019;42(3):209-15.

구분	성명	소속	직위
제1저자/교신저자	조용인	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	조교수