

&lt;원저&gt;

## 골밀도검사에서 피검자의 장기선량 측정 및 차폐기구의 효용성 평가

조용인<sup>1)</sup>·김정훈<sup>2)</sup><sup>1)</sup>동남권원자력의학원 영상의학과·<sup>2)</sup>부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

## Evaluation of the Effectiveness of the Shielding Device and the Organ Dose of Subject During Bone Mineral Density

Cho Yong-In<sup>1)</sup>·Kim Jung-Hoon<sup>2)</sup><sup>1)</sup>Department of Radiology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center<sup>2)</sup>Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

**Abstract** Bone mineral density is a examination to measure the amount of bone in patients with metabolic bone disease. It is a low dose, but may cause unnecessary exposure to the gonads and other organs located in the periphery when examining the lumbar and proximal femurs. Therefore, the purpose of this study was to evaluated the exposure dose for each organ exposed during the bone mineral density through simulation, and analyzed the applicability of the subject to radiation shielding devices using 3D printing materials. As a result, the highest dose was shown at 11.47 uSv in the breast during lumbar examination and 8.98 uSv in the testis during proximal femur examination. Also, the farther away from the examination site, the lower the effect of the scattering-ray. The shielding effect of using 3D printing shielding device showed high results in proportion to the effective atomic number and specific gravity of the printing material. Among the printing materials, ABS + W showed an effect of at least 78.72 to 96.39% compared to the existing lead material.

**Key Words:** Bone densitometry, Scattering-ray, Simulation, 3D Printing shield, Radiation Protection

**중심 단어:** 골밀도검사, 산란선, 모의실험, 3D 프린팅 차폐기구, 방사선 방호

## I. 서 론

국가의 의료수준향상과 건강 검진 빈도가 증가됨에 따라 인공방사선 중 의료피폭이 차지하는 비중 또한 매년 증가되고 있는 추세이다. 의료기관에서 현재 시행되고 있는 다양한 방사선학적 검사는 질병의 진단 및 치료방향 결정을 위해 필수적으로 시행되지만, 방사선 피폭이라는 잠재적 위험성을 항상 내포하고 있다. 과거 국제방사선방호위원회(ICRP)의 간행물 93에서는 디지털 방사선의학에서의 환자 선량 관리에 대해서 제시하고 있으며 적절한 영상 화질을 유지하면서 최소한의 선량의 사용을 강조하고 있다[1]. 또한

ICRP Publication 103을 통해 의료피폭에 대한 피폭선량 최적화를 위해 각 검사별로 진단참조준위(Diagnostic Reference Level; DRL)를 설정하고 이를 적용할 것을 권고하고 있다[2]. 이에 따라 국내에서도 진단분야 내 의료영상을 목적으로 수행하는 X선 검사인 일반촬영, CT 검사 등에 대한 가이드라인을 개발하는 등 환자의 의료피폭 저감화를 위해 노력을 기울이고 있다.

골밀도검사(Bone Mineral Density; BMD)는 골다공증, 골연화증과 같은 대사성 골질환 환자에 대해 인체 특정부위 즉, 뼈의 양을 측정하기 위한 검사로서, 일반적으로 이중 에너지 방사선 흡수법(Dual-energy x-ray absorptiometry;

Corresponding author: Kim Jung-Hoon, Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, 57 Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan, Republic of Korea / Tel: +82-51-510-0589 / E-mail: donald@cup.ac.kr

Received 21 April 2020; Revised 01 May 2020; Accepted 11 May 2020

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

DEXA)을 이용한다[3]. DEXA검사는 요추와 근위 대퇴골의 측정을 세계표준 검사방법으로 인정하고 있으며, 뛰어난 정확성과 짧은 검사 시간, 낮은 방사선량과 안정적인 보정, 적은 비용 등의 장점을 가지고 있다[4]. 그러나 골밀도검사의 대상은 대다수 여성이며, 요추와 근위 대퇴골 검사 시 2차 산란선에 의해 검사 부위 주변부에 위치한 생식선과 다른 장기에 대해 불필요한 피폭을 유발시킬 수 있다. 현재 골밀도검사와 같이 시행 빈도가 상대적으로 낮은 검사에 대해서는 방사선 방호에 대한 부분을 다소 간과하고 있는 실정이다.

방사선 피폭에 대한 사회적 인식 변화로 인해 일반인들의 의료 방사선에 대한 관심이 증가되고 있으며, 검사를 수행하는 검사자는 피검자의 의료피폭을 최소화하기 위한 노력을 기울여야 한다. 그러나, 의료피폭의 경우 검사에 대한 정당화를 확보한다는 이유로 피검자를 위한 방사선 차폐기구의 사용은 거의 이루어지지 않는 실정이다. 이처럼 방사선 차폐기구는 현재에도 의료기관에서 구비된 형태에 따라 제한적으로 사용되고 있으며, 환자로 하여금 개인적으로 사용할 수 없다는 한계가 있다. 최근 3D 프린팅 기술은 의료분야에서 다양하게 활용되고 있으며, 다품종 소량생산으로 사용자 중심의 맞춤형 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다[5]. 3D 프린팅 기술을 활용한 다양한 연구들이 이뤄지고 있으나, 방사선 차폐기구 제작에 관한 연구는 부족한 상황이다.

이에 본 연구에서는 몬테카를로 전산모사를 통해 BMD검사 시 산란선에 의한 피검자의 장기 피폭선량을 확인하고, 산란선 방호를 위해 3D 프린팅 재료를 통한 방사선 차폐기구로의 효용성을 평가하고자 한다. 이를 통해 의료분야 내 3D 프린팅 기술을 이용한 방사선 차폐기구 적용 연구에 대

한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. 대상 및 방법

### 1. 몬테카를로 시뮬레이션

#### 1) 골밀도검사 장비에 대한 기하학적 설계

몬테카를로 방법은 통계적 난수를 이용한 무작위적인 표본 추출을 통해 문제를 해결하는 방법으로, 본 연구에서는 로스알라무스 국립연구소에서 개발된 MCNPX(Monte Carlo N Particle eXtended, Ver. 2.5.0)을 통해 전산모사를 수행하였다. 이중에너지 X선 흡수법을 통한 골밀도검사장비에 대한 전산모사를 위해 임상적으로 사용되는 DEXUM T(Osteosys Co., Ltd., Korea) 장치에 대한 기술적 정보에 대해 조사하였으며, 시스템, 성능, 규격 등의 세부정보(Specification)는 Table 1과 같다[6]. 조사한 기하학적 규격을 토대로 환자 검사 테이블, X선 튜브 헤드 등을 단순 모사하였으며, 내부는 탄소섬유로 구성하였다[Fig. 1].

검사 시 피검자의 인체 장기에 대한 선량평가를 위해 ORNL(Oak ridge national laboratory)에서 개발한 MIRD(Medical Internal Radiation Dose)형 팬텀을 선정하였으며, 연구 수행 시 성별에 대한 구분을 두지 않기 위해 인체 혼성 팬텀을 이용하여 검사 테이블 위에 위치시켰다. 요추 및 근위 대퇴부 검사 시 발생하는 방사선원에 대한 모사를 위해 IPPEM(Institute of Physics and Engineering in Medicine)에서 제공하는 X선 스펙트럼 생성 프로그램인 SRS-78을 이용하였으며, 검사 조건(L-spine : 83 kV, 1.5 mA, 187 sec, Femur : 83 kV, 1.5 mA, 119 sec)과 X선 발

**Table 1.** Technical Specifications of DEXUM T device

Technical Specifications		
System	X-ray system	DEXA (Dual Energy X-ray Absorptiometry)
	Scanning method	Pencil beam
Performance	Scan site	AP Spine, femur (dual femur)
	Scan type	Non-stop scan (AP Spine, dual femur)
	Scan time	AP Spine : 3 min, 07 sec, Femur : 2 min (Normal)
	Precision/Accuracy	< 1.0%
	Measured parameters	BMD, BMC, area, tissue thickness
	Calibration system	Automatic calibration, daily QC phantom
	Patient positioning	Laser aid positioning (plus shape type)
	Image transmission	DICOM system
Dimensions & Weight	Dimensions	Medium size : 1900 × 800 × 1221 (mm)
	Weight	130.5 kg

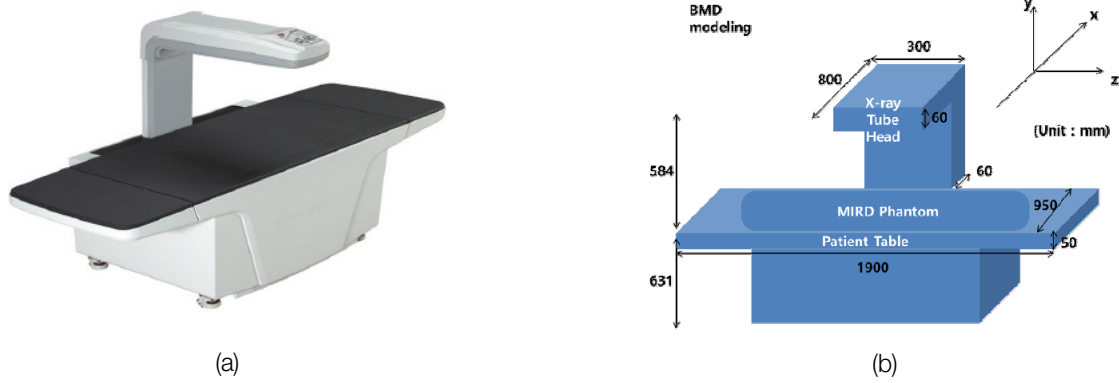


Fig. 1. Simplified model of BMD Device (a) Osteosys Dexxum T device (b) Simulated geometry

생장치에 관한 정보(Tungsten target, angle : 16 degree, Total filtration : 2.8 mmAl)를 토대로 발생되는 X선에 대한 에너지 스펙트럼 분포를 획득하였다[Fig. 2].

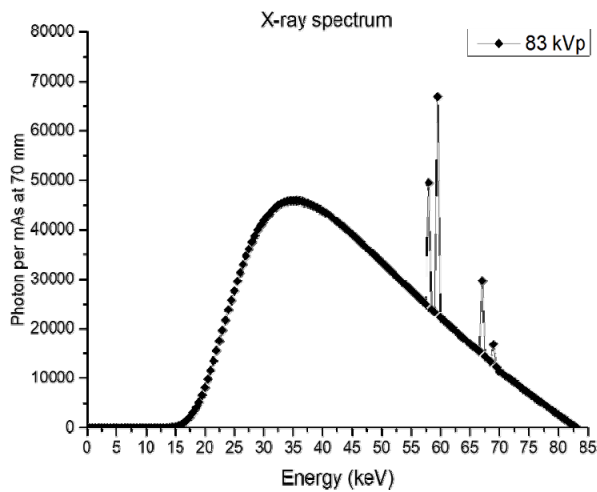


Fig. 2. X-ray Energy Spectrum distribution by SRS-78 Program

2) 3D 프린팅 차폐기구에 대한 설계

3D 프린팅 출력방식 중 현재 범용으로 사용되고 있는

FDM(Fused deposition modeling) 방식의 3D 프린팅 재료에 대해 사전 조사하였고, 본 연구에서는 PLA(Poly lactic acid)와 같은 플라스틱 계열과 금속계열이 혼합된 재료를 이용하였으며, 구성성분 및 비중은 Table 2와 같다. 기존 선행연구에서 검증된 여러 원료를 이용하여 BMD검사 시 방사선 차폐기구로서의 실효성 평가를 위해 앞서 모사한 MIRD 팬텀 전면부의 눈, 유방, 갑상선, 생식선 부위에 직사각형 형태로 3D 프린팅 재료 및 두께(5, 10, 15, 20, 25 mm)에 따른 차폐기구를 단순 모사했다.

2. 실험방법

1) 골밀도검사 시 피검자의 인체장기에 대한 선량 평가

첫 번째로 요추 및 근위 대퇴부 검사 시 1차선 및 산란선에 의한 인체 장기별 피폭선량 측정을 위해 X선 발생지점은 앞서 모사한 X선 튜브 헤드의 중심부로 설정하였으며, 검사 시 환자의 검사 목적 부위 및 영상 크기(Spine : 160 mm × 192 mm, Femur : 120 mm × 180 mm)를 고려하여 검사범위를 설정하였다[Fig. 3]. 검사 시 환자의 인체 장기선량 평가를 위해 유방(Breast), 폐(Lungs), 위(Stomach), 간(Liver), 식도(Esophagus), 갑상선(Thyroid), 정소(Testis), 대뇌(Brain), 신장(Kidney), 타액선(Salivary gland), 췌장(Pancreas),

Table 2. Information of FDM 3D printer materials

	3D Printing Materials						
	PLA	PLA+Cu	PLA+Al	PLA+SS	PLA+Ir	ABS+Bi	ABS+W
Composition	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> + Cu(40%)	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> + Al(60%)	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> + Stainless steel(40%)	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub> + Fe(40%)	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N+C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> +Bi(40%)	C <sub>3</sub> H <sub>3</sub> N+C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> +W(40%)
Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	1.24	2.46	1.48	2.4	2.4	2.7	4.0

\*PLA : Poly lactic acid, ABS : Acrylonitrile butadiene styrene

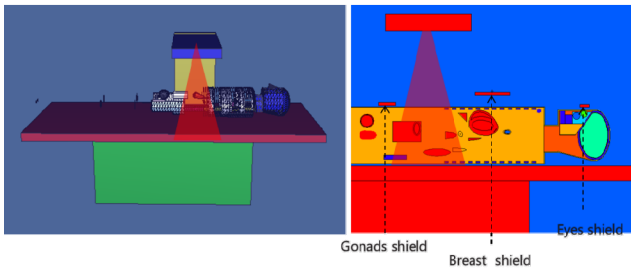


Fig. 3. Simulation model for exposure dose assessment during dual energy X-ray absorptiometry

전립선(Prostate), 자궁(경부 포함, Uterus & cervix), 난소(Ovaries), 눈(Eye), 요추(L-spine), 근위 대퇴부가 포함된 하지의 상부(Upper portion of leg bone), 하지의 중앙부(Middle portion of leg bone)에 대해 관심지점(Tally)를 지정하였고, tally specification card는 F4 tally (particle/cm<sup>2</sup>)를 이용하였으며, DE/DF card를 통해 ICRP 74 ambient equivalent dose conversion factor를 통해 Sv/h 단위로 환산하였다. MCNP 코드에서 산출된 결과값은 방사선의 입자 1개당 발생하는 확률값으로서, 검사 조건 등을 고려한 보정계수(Normalization factor)를 산정하였다. 이를 통해 인체 장기에 대한 선량평가를 수행하였으며, ICRP Publication 103 권고에서 제시하는 조직가중치(Tissue weighting factor; W<sub>T</sub>)를 통해 유효선량(uSv)으로 환산했다. 모의실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 반복횟수(nps)는 10<sup>8</sup>번 이상 추정하였고, 통계적 불확도(uncertainty)는 3% 이내로 평가되었다.

2) 3D 프린팅 차폐기구 사용 시 장기별 선량감소효과 측정

두 번째로 요추 및 근위 대퇴부 검사 시 3D 프린팅 차폐기구 사용에 따른 선량감소효과를 평가하고자 인체 장기 중 방사선에 민감한 장기인 갑상선, 유방, 생식선(정소, 난소), 눈 등에 대한 결정장기를 선정하였다. 3D 프린팅 재료 및 두께에 따른 선량감소효과를 평가하고자, 부위별로 3D 프린팅 차폐기구를 구성한 후 두께를 5, 10, 15, 20, 25 mm 까지 증가시켜 검사 부위를 포함한 주변 결정장기에 대한 피폭선량 분포를 획득하였다. 차폐기구 미 사용 시 평가한 장기선량 분포를 기준으로 각 프린팅 재료 및 두께별 선량감소효과(%)를 산정하였다. 또한 현재 일반적으로 사용되는 납(Pb) 차폐 재질 사용 시 선량감소효과에 대한 비교를 위해 추가적으로 분석하였다.

III. 결 과

1. 이중에너지 흡수법을 이용한 골밀도검사 시 인체 장기에 대한 피폭선량 분포

골밀도검사 시 인체 장기에 대한 피폭선량 평가 결과, 요추검사 시 유방의 경우 11.47 uSv로 검사 시 유효선량이 가장 높은 것으로 평가되었고, 그 외 장기인 위는 8.75 uSv, 자궁 4.36 uSv, 정소 4.33 uSv, 췌장 3.43 uSv, 전립선

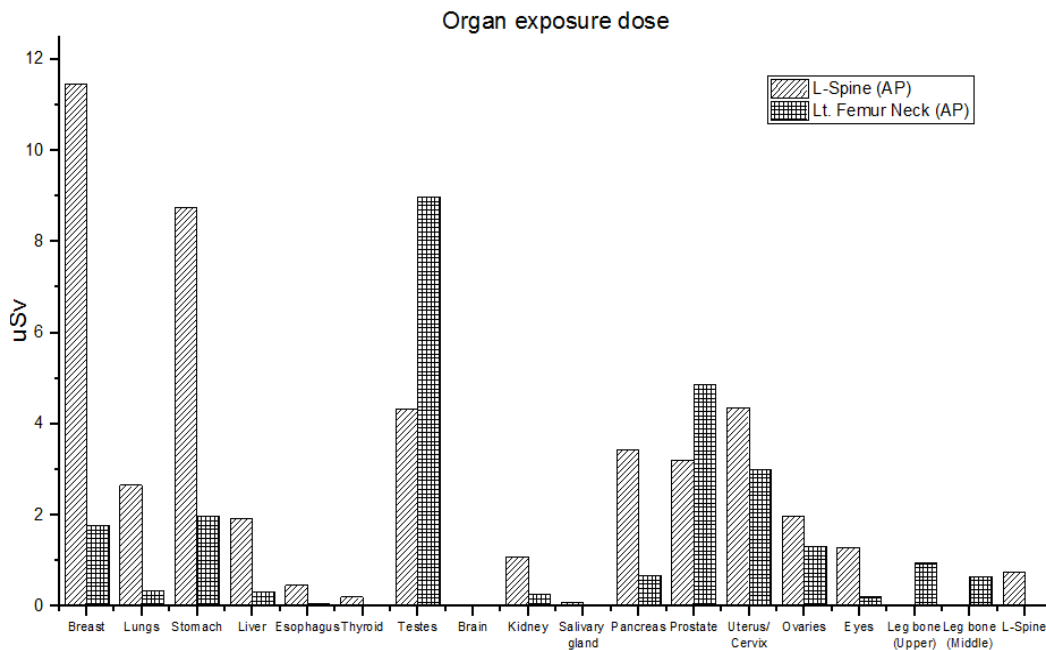


Fig. 4. Effective dose distribution according to human organs during lumbar spine and femur neck examination

3.21 uSv, 폐 2.65 uSv, 간 1.93 uSv, 눈 1.29 uSv, 신장 1.08 uSv, 요추 0.76 uSv, 갑상선 0.20 uSv, 타액선 0.08 uSv, 대뇌 0.01 uSv으로 나타내었다. 검사 부위에 근접한 장기 중 검사 방향인 인체 전면부의 근접한 표재성 장기일 수록 산란선에 의한 영향이 높은 경향을 보였으며, 검사 부위와 원거리에 위치한 장기일수록 산란선에 의한 영향이 낮은 양상을 나타내었다[Fig. 4].

이에 반해 근위 대퇴부 검사 시 장기별 피폭선량 평가 결과, 방사선에 대해 민감한 정소의 경우 8.98 uSv로 가장 높은 유효선량을 나타내었고, 그 외 장기의 경우 전립선 4.86 uSv, 자궁 3.01 uSv, 위 1.97 uSv, 유방 1.78 uSv, 난소 1.31 uSv, 하지(상부) 0.94 uSv, 하지(하부) 0.65 uSv, 췌장 0.68 uSv, 폐 0.34 uSv, 간 0.31 uSv, 신장 0.26 uSv, 눈 0.20 uSv, 갑상선 0.02 uSv, 타액선 0.01 uSv, 대뇌 0.002 uSv으로 평가되었다. 근위 대퇴부 검사의 경우, 요추검사에 비해 영상획득을 위한 조사시간이 짧은 이유로 전체적인 장기별 피폭선량이 낮게 측정된 것으로 분석된다. 또한 요추검사와 동일하게 검사 범위에 근접한 표재성 장기의 경우, 산란선에 의한 영향이 높은 경향을 보였으며, 검사

부위와 원거리에 위치한 장기일수록 그 영향은 낮아지는 양상을 나타내었다.

2. 골밀도검사 시 3D 프린팅 차폐기구 사용에 따른 결정장기의 피폭선량 감소효과

몬테카를로 전산모사를 통해 골밀도검사 시 3D 프린팅 차폐기구 사용에 따른 장기별 선량감소효과(%)를 산정한 결과, 요추검사 시 FDM 방식에서 가장 많이 사용되고 있는 플라스틱 계열인 PLA 재료의 경우, 두께 증가에 따라 유방에서 최소 9.3~최대 32.2%, 갑상선 7.6~34.9%, 정소 5.8~11.1%, 난소 2.4~11.2%, 눈 -6.4~-2.9%, 요추 0.0~0.1%으로 가장 낮은 선량감소효과를 보였다. 이에 비해 혼합원료인 ABS+W의 경우, 유방에서 최소 78.2~최대 80.4%, 갑상선 63.0~86.4%, 정소 49.0~50.9%, 난소 28.1~32.5%, 눈 5.1~7.0%, 요추 1.8~2.2%으로 가장 높은 선량감소효과를 나타내었다. 그 외 3D 프린팅 재료에 대한 평가결과, ABS+W, ABS+Bi, PLA+SS, PLA+Cu, PLA+Fe, PLA+Al 순서로 재료의 실효원자번호와 밀도에 비례하여 높은 선량감소효과를 나타내었다(Table 3).

Table 3. Dose reduction effect according to thickness(5 ~ 25 mm) of 3D printing material during lumbar spine examination

	Organ						(Unit : %)
	Breast	Thyroid	Testes	Ovaries	Eyes	L-Spine	
PLA	9.3 ~ 32.2	7.6 ~ 34.9	5.8 ~ 11.1	2.4 ~ 11.2	-6.4 ~ -2.9	0.0 ~ 0.1	
PLA+Al	25.3 ~ 58.9	15.1 ~ 56.0	15.0 ~ 27.3	5.4 ~ 17.6	-0.7 ~ -0.4	0.2 ~ 0.6	
PLA+Cu	72.7 ~ 79.7	55.0 ~ 85.2	44.8 ~ 48.9	23.1 ~ 31.4	4.3 ~ 6.5	1.2 ~ 2.1	
PLA+Fe	68.8 ~ 79.0	50.5 ~ 84.1	42.1 ~ 47.6	20.7 ~ 30.6	3.8 ~ 5.9	1.1 ~ 2.0	
PLA+SS	76.3 ~ 80.3	59.5 ~ 86.1	47.6 ~ 50.3	25.7 ~ 32.1	5.1 ~ 7.0	1.6 ~ 2.2	
ABS+Bi	77.4 ~ 80.3	61.4 ~ 86.3	48.4 ~ 50.6	27.2 ~ 32.3	5.1 ~ 6.9	1.6 ~ 2.3	
ABS+W	78.2 ~ 80.4	63.0 ~ 86.4	49.0 ~ 50.9	28.1 ~ 32.5	5.1 ~ 7.0	1.8 ~ 2.2	
Pb	81.2 ~ 81.3	69.8 ~ 87.7	52.2 ~ 53.1	31.4 ~ 33.6	6.2 ~ 7.7	2.2 ~ 2.4	

Table 4. Dose reduction effect according to thickness of 3D printing material during femur neck examination

	Organs							(Unit : %)
	Breast	Thyroid	Testes	Ovaries	Eyes	Leg Bone (Upper)	Leg Bone (Middle)	
PLA	3.2 ~ 4.1	11.5 ~ 42.5	9.4 ~ 39.0	4.3 ~ 14.4	-4.3 ~ -2.4	0.6 ~ 3.3	0.1 ~ 0.2	
PLA+Al	12.1 ~ 19.4	22.6 ~ 56.8	22.7 ~ 62.7	7.3 ~ 21.4	-2.8 ~ 4.9	1.1 ~ 4.9	0.1 ~ 0.6	
PLA+Cu	32.0 ~ 33.3	61.8 ~ 71.4	72.7 ~ 84.4	27.3 ~ 36.0	3.4 ~ 14.0	4.6 ~ 9.3	0.8 ~ 1.5	
PLA+Fe	30.6 ~ 32.6	59.4 ~ 71.1	67.7 ~ 83.9	24.5 ~ 35.1	2.3 ~ 13.1	4.0 ~ 9.0	0.7 ~ 1.5	
PLA+SS	33.4 ~ 34.1	64.8 ~ 72.5	77.5 ~ 84.7	30.2 ~ 36.9	4.3 ~ 15.1	5.3 ~ 9.6	0.9 ~ 1.6	
ABS+Bi	33.5 ~ 34.0	65.8 ~ 71.9	79.1 ~ 84.8	31.5 ~ 37.2	4.4 ~ 15.1	5.7 ~ 9.7	1.0 ~ 1.6	
ABS+W	33.8 ~ 34.2	66.4 ~ 71.9	80.1 ~ 84.8	32.5 ~ 37.4	4.0 ~ 14.9	5.9 ~ 9.8	1.0 ~ 1.6	
Pb	35.4 ~ 35.5	69.7 ~ 73.4	84.3 ~ 85.1	36.3 ~ 38.4	5.0 ~ 16.1	6.9 ~ 10.2	1.2 ~ 1.7	

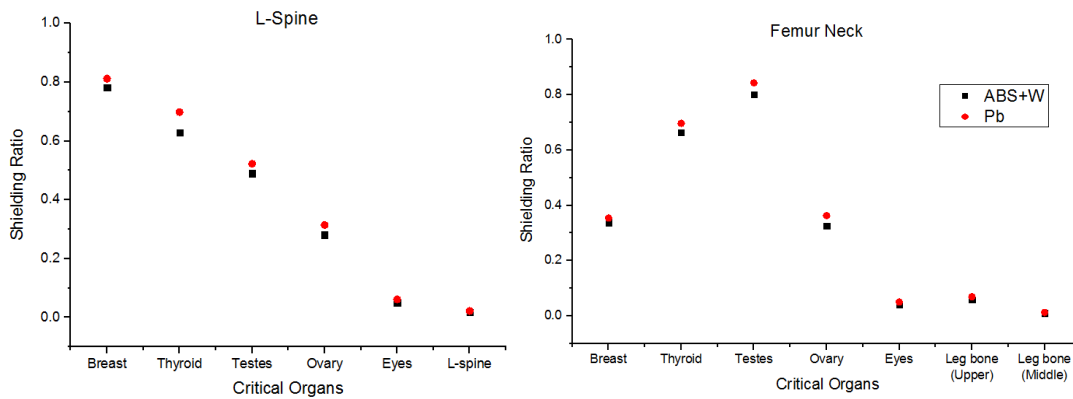


Fig. 5. Comparison of dose reduction effect according to shielding materials (ABS+W, Pb) during dual X-ray absorptiometry exam

근위 대퇴부 검사 시 PLA의 경우, 두께 증가에 따라 유방은 최소 3.2~최대 4.1%, 갑상선 11.5~42.5%, 정소 9.4~39.0%, 난소 4.2~14.4, 하지(상부) 0.6~3.3%, 하지(중양부) 0.1~0.2%로 상대적으로 낮은 선량감소효과를 나타내었으며, 눈의 경우 오히려 PLA 물질과의 상호작용으로 인해 피폭선량이 오히려 증가되어 -4.3~-2.4% 선량 증가 효과를 보였다. 이에 반해 혼합원료 중 ABS+W의 경우, 유방에서 최소 33.8~최대 34.2%, 갑상선 66.4~71.9%, 정소 80.1~84.8%, 난소 32.5~37.4%, 눈 4.0~14.9%, 하지(상부) 5.9~9.8%, 하지(하부) 1.0~1.6%로 프린팅 재료 중 가장 높은 선량감소효과를 나타내었다. 그 외 3D 프린팅 재료에 따른 선량감소효과의 경우, 요추검사와 동일하게 재료의 실험원자번호와 밀도에 비례하여 높은 경향을 나타내었다 (Table 4).

위 결과에 따라 골밀도검사 중 산란선에 의한 결정장기의 선량감소효과는 요추 검사 시에는 유방과 갑상선, 근위 대퇴부 검사 시 정소와 갑상선에 대해 가장 유효한 선량감소효과를 나타내었다. 또한 앞서 평가한 FDM 방식의 프린팅 재료 중 ABS+W의 경우, 주변 장기별로 가장 높은 선량감소효과를 나타내었으며, 일반적인 차폐재질로 사용되는 납재질과 5 mm 두께에서의 차폐효과를 비교 분석한 결과, Fig. 5와 같이 요추검사 시 결정 장기별로 납 대비 최소 78.72~최대 96.39% 정도의 차폐효과를 보였으며, 근위 대퇴부 검사 시 납 대비 최소 79.74~최대 95.46% 정도의 차폐효과를 나타내는 것으로 분석되었다(Fig. 5).

#### IV. 고 찰

2007년 국제방사선방호위원회에서는 ICRP Pub. 103을 통해 진단 방사선 분야 내 X선 검사 시 환자선량 최적화를

위해 진단참조준위(DRL)를 설정하여 적용할 것을 권고하고 있다. 이에 국내에서는 현재 의료피폭에 많은 비중을 차지하는 X선 검사, 유방촬영, CT 등과 같은 영상 검사에 대해서는 가이드라인이 제정되어 있다[7-9]. 그에 반해, 골밀도 검사는 일반영상검사나 유방촬영과 같은 방사선학적 검사에 비해 낮은 검사 빈도와 저 선량을 수반한다고 알려져 있어[10,11], 검사 시 산란선에 의한 환자 피폭에 대해 다소 간과할 수 있다. 또한 정동락의 연구에서는 DXA검사 시 발생하는 산란선은 불규칙하여, TLD 소자를 이용한 실측 시 측정범위가 다소 불규칙한 양상을 보이며, 무작위적으로 검출된다고 언급되고 있다[12].

이에 본 연구에서는 컴퓨터 가상공간 내 모의실험을 통해 일반적으로 시행되는 이중에너지 X선 흡수법을 이용한 골밀도검사에 대해 전산모사하고, 검사 시 인체 장기별 피폭 선량을 산정함으로써 산란선에 대한 영향 평가와 주변 결정장기에 대한 피폭선량 저감을 위한 3D 프린팅 차폐기구 사용에 따른 선량감소효과를 분석하고자 하였다. 이중에너지 X선 흡수법을 이용한 골밀도검사 시 주변 장기 중 인체 표면에 근접한 장기인 유방, 생식선에 대해서는 산란선에 의한 영향이 높은 것으로 나타났으며, 검사 목적부분과 원거리에 있는 장기일수록 산란선에 대한 효과는 점차적으로 줄어드는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 검사 시 발생된 1차선이 검사 장비, 공기, 환자와의 상호작용을 통해 발생된 2차적인 산란선에 의한 영향으로 생각되며, 발생된 산란선은 체표에 위치한 장기에 대해 그 영향이 더 높은 것으로 사료된다. 또한 검사 시 인체 장기별 피폭선량 저감을 위한 3D 프린팅 재료 및 두께에 따른 선량감소효과 분석을 통해 ABS+W의 경우, 다른 재료에 비해 납에 근접한 차폐효과를 보여 차폐기구로서 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.

한채연의 연구에서는 유리선량계를 이용한 방법을 통해 골밀도검사 시 산란선에 의한 유방차폐기구에 대한 차폐효

과를 평가한 결과, 납 1 mm 사용 시 산란선에 대해 약 60% 차폐효과를 보인다고 언급하고 있으며[13], 본 모의실험을 통한 결과에서는 납 1 mm 사용 시 유방에 대해 약 80%로 더 높은 효과를 보였으며, 납 이외 3D 프린팅 재료를 이용한 차폐기구 사용 시 유방을 포함한 다양한 인체 결정장기에 대한 선량감소효과 산정하였다. 이를 통해 향후 3D 프린팅 차폐기구 제작 및 활용 시 의료분야로의 적용에 대한 참고 자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 Karimian A.의 연구에서는 몬테카를로 방법을 통해 골밀도검사 시 자궁경부와 콩팥 등 주변 장기 흡수선량에 대해 제시하였으며[14], 본 연구의 결과와는 다소 상이한 경향을 나타내었다. 이는 검사 선원에 대한 모델링 및 모의피폭체에 대한 차이 등에 의한 것으로 생각된다. 이처럼 몬테카를로 방법은 정확한 기하학적 모델링이 중요한 부분이며, 실험 내 측정 불가능한 장기에 대한 선량 분석에 유용한 방법으로 활용될 수 있을 것이다. 또한 윤정수의 연구에서는 골밀도검사 시 피폭선량 최적화를 위해 임상적으로 사용되는 몇몇 장치에 대한 평균선량 측정을 통해 ICRP에서 권고하는 진단참조준위(DRL)의 제 3사분위 값에 대해 제시하고 있으며[15], 추후 다양한 연구를 통해 골밀도검사에 관한 가이드라인의 개발이 필요할 것으로 생각된다. 최근 이준호 등의 연구에서는 3D 프린팅을 이용하여 골밀도검사 시 정도관리를 위한 팬텀을 개발하고자 하는 연구 또한 제시되고 있다[16]. 이처럼 3D 프린팅 기술을 이용한 의료분야에의 활용은 더 넓게 이뤄지고 있으며[17,18], 본 연구에서는 방사선 피폭에 대한 국민적 관심 증가에 따라 의료분야 내 3D 프린팅 재료를 이용한 차폐기구 사용에 대한 효용성을 평가하고자 하였다. 이에 따라 방사선 관계 및 작업종사자는 피검자의 의료피폭 저감화를 위해 검사 시 최적화된 검사 조건에 대한 사용과 적극적인 차폐기구 사용을 통해 불필요한 선량 저감화를 위해 최선의 노력을 기울여야 할 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구는 모의실험을 통해 일반적으로 시행되는 골밀도 검사 시 환자의 인체 장기별 피폭선량을 평가하고, 3D 프린팅 재료를 이용한 차폐기구 사용에 따른 결정장기의 선량감소효과에 대해 분석하였다. 검사 시 산란선의 영향은 검사 목적부위에 근접한 표재성 장기에 큰 영향을 주는 것으로 분석되며, 이러한 결정장기에 대한 피폭선량 감소를 위해 부위별 차폐기구 사용이 필요할 것으로 사료된다. FDM 방식의 3D 프린팅 재료 중 ABS+W의 경우 가장 유효한 선량

감소효과를 나타내었으며, Pb 대비 최대 95.5~96.3%의 차폐효과를 보여 3D 프린팅 차폐기구로서 활용될 수 있을 것이다. 이처럼 피검자(환자)의 결정장기 방호를 위한 차폐기구의 사용은 불필요한 피폭 저감화에 기여할 수 있을 것이며, 피검자로 하여금 방사선에 의한 불안감 해소에 도움될 것으로 판단된다. 나아가 의료기관 내에서도 검사 시 피검자의 방사선 피폭정도에 대해 정확히 인지하고, 방사선관계 종사자들로 하여금 피검자의 방사선 방호를 위해 적극적인 노력을 기울여야 할 것이다.

## REFERENCES

- [1] ICRP. Managing Patient Dose in Digital Radiology. ICRP Publication 93. Annals of the ICRP. 2004;34(1).
- [2] ICRP. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Publication 103, Annals of the ICRP. Pergamon Press, Oxford 2007;137(2-4).
- [3] Han MS, Cho DH. Correlation analysis of bmd in proximal femur and spine with dual energy X-ray absorptiometry. Journal of The Korea Society of Computer and Information. 2012 Sep;17(9):165-9.
- [4] Shin YR. Assessment of bone mineral density. Journal of Korean Society of Pediatric Endocrinology. 2006;11(2):123-30.
- [5] CHO Alliance. Medical 3D printing, bio-organ, and bio-material market conditions and technology development strategy. 2017 Mar;ISBN 979-11-86934-06-7.
- [6] OsteoSys Co. Ltd. DEXXUM T User Manual, DOC. No. : OT08-2F7430-MUL-01
- [7] Korea Centers for Disease Control and Prevention. Guidelines for Diagnostic Reference Levels in Plain Radiography. Medical Radiation Series, No.16, 2019.
- [8] Korea Centers for Disease Control and Prevention. Guidelines for Diagnostic Reference Levels in Mammography. Medical Radiation Series, No.17, 2019.
- [9] Korea Centers for Disease Control and Prevention. Guidelines for Diagnostic Reference Levels in Computed Tomography(CT). Medical Radiation Series, No.10, 2017.

- [10] Hackett D. Dual-energy X-ray absorptiometry (DEXA). Retrieved from [http://epublications.bond.edu.au/crn\\_physique/4](http://epublications.bond.edu.au/crn_physique/4) University of Sydney, 2017 Apr.
- [11] Guglielmi G, Link TM. Radiation exposure in X-ray-based imaging techniques used in osteoporosis. *European Radiology*. 2010;20(11):2707-14.
- [12] Jung DR. Genital gland dose and reduction due to scattered radiation measured bone mineral density with dual energy X-ray absorptiometry [master's thesis]. Daegu: Catholic University of Daegu Graduate School, Department of Radiological Science; 2016.
- [13] Han CY. Evaluation of using breast shield to reduce the dose of breast by scattered radiation on bone densitometry [master's thesis]. Seoul: Korea University of Graduate School, Department of Radiological Science; 2013.
- [14] Karimian A, Hajarizadeh A. Assessment of the absorbed dose to organs from bone mineral density scan by using TLDs and the monte carlo method. *Nuclear Technology & Radiation Protection*. 2014; 29(4):289-95.
- [15] Yoon JS. The study of radiation dose on BMD using dual energy x-ray absorptiometry [master's thesis]. Daejeon: Eulji University of Graduate School, Department of Radiological Science; 2017.
- [16] Lee JH, Choi KY, Hong SY. Development of BMD Phantom using 3D Printing. *Journal of Korean Society Radiology*. 2019 Apr;13(2):185-92.
- [17] Park HH, Lee JY. Development and evaluation of the usefulness for hoffman brain phantom based on 3D printing technique. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2019;42(6):441-6.
- [18] Ahn KS, Jung WC, Kim DH, Kim MS, Yoon DK, Shim JG, et al. Evaluation of the usefulness of patient customized shielding block made with 3D printer in the skin cancer electron beam therapy. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2019;42(6):447-54.

구분	성명	소속	직위
제1저자	조용인	동남권원자력의학원 영상의학과	방사선사
교신저자	김정훈	부산가톨릭대학교	교수