

Evaluation of the Effectiveness of 3D Printing Shielding Devices using Monte Carlo Simulation in Plain Radiography

Yong In Cho¹, Jung Hoon Kim^{2,*}

¹Department of Radiology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center

²Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Received: May 15, 2020. Revised: June 20, 2020. Accepted: June 30, 2020

ABSTRACT

Scattering-ray generated during plain radiography can cause secondary exposure to organs and tissues other than the target area. Currently, Shielding devices used to reduce radiation exposure are mostly used for radiation protection of workers, and radiation protection of patients is rarely performed. Therefore, this study intends to evaluate the organ dose by scattered-rays and the effectiveness 3D printing materials as a radiation shielding device during plain radiography through simulation. As a result, the absorbed dose for each organ at the time of examination showed a high effect due to the secondary scattering-ray as the distance from the source was close and the organ closer to the skin surface. The dose reduction effect due to the use of 3D printing shielding devices to protect this showed a higher shielding effect in the case of mixed printing materials compared to plastics.

Keyword: Scattering-ray, Simulation, Radiation shield, 3D Printing materials

I. INTRODUCTION

의료분야 내 방사선은 질병의 진단 및 치료를 위해 중요한 임상적 정보를 제공하는 이점으로 널리 이용되고 있으며, 이를 이용한 의료장비 또한 비약적으로 발전되어 왔다. 의료기관에서 진단용 방사선발생장치를 이용한 검사는 일반영상 검사(Plain Radiography), 방사선 투시검사(Fluoroscopy), 전산화 단층검사(CT, Computed Tomography), 골밀도 검사(BMD, Bone marrow density), 치과 방사선 검사(Dental Radiology) 등이 있다. 그 중 일반 X선 검사는 영상의학 검사 중 가장 빈번하게 시행되며, 환자뿐만 아니라 일반인의 건강검진 목적으로 자주 이뤄진다. 그러나, 영상검사를 포함한 의료 방사선 피폭은 인공 방사선 피폭원 중 가장 큰 비중을 차지하고 있다고 알려져 있다.^[1] 과거 국제방사선방호위원회(ICRP)에서는 의료피폭의 경우 방사선으

로부터 이득을 얻는 유익한 행위로서 부당하게 제한하지 않도록 권고하고 있으나, 최적화 원칙에 근거해야 함을 명시하고 있다. 또한 진단 영상의학 검사에 대한 선량 최적화를 위해 각 나라별로 적절한 진단참고수준(Diagnostic Reference Level, DRL)을 적용할 것을 권고하고 있다.^[2] 이러한 진단참고수준(DRL)은 일반적으로 많이 시행되는 검사부위에 대해 제시하고 있으며, 이는 가장 최적화된 프로토콜을 찾고, 방사선 검사 시 피폭선량의 정당성을 유지하기 위한 권고치이다.

이처럼 의료 방사선 피폭에 대한 최적화를 위한 노력을 기울이고 있지만, 검사 시 발생하는 산란선(scattering-ray)은 검사 부위 외 다른 장기 및 조직에 대해 2차적인 피폭을 유발할 수 있다. 일반 X선 검사 시 사용하는 에너지 영역에서 발생하는 산란선의 피폭은 소량이지만, 피폭되는 장기 및 조직에 따라 방사선에 의한 위해도는 다르게 나타날 수 있

* Corresponding Author: Jung Hoon Kim E-mail: donald@cup.ac.kr

Tel: +82-10-9142-1171

다. 따라서, 검사 시 환자의 피폭선량을 최소화하기 위해 적절한 표준 촬영조건의 적용과 더불어 불필요한 방사선 피폭의 최적화를 위한 방사선 방호를 수행하는 것이 필요하다. 그러나, 현재 방사선 피폭을 저감하기 위해 사용되는 차폐기구는 대다수 종사자들의 방사선 방호를 위한 목적으로 대부분 사용되며, 환자의 방사선 방호를 위한 노력은 다소 부족한 실정이다.

최근 적층 제조(Additive Manufacturing, AM)방식을 이용한 3D 프린팅 의료·바이오 분야를 포함한 다양한 분야에 활용되고 있다.^[6] 또한 기존 연구에서는 3D 프린팅 기술을 통해 의료영상 검사 시 보조기구의 제작, CT 팬텀 제작 등 영상검사에서의 적용 연구가 증가되고 있다.^[4,5]

이에 본 연구에서는 3D 프린팅 기술 중 범용으로 사용되는 3D 프린터에서 이용 가능한 재료를 통해 방사선 차폐기구로의 효용성을 평가하고자 한다. 이를 위해, 첫 번째, 몬테카를로 기법을 이용한 모의실험을 통해 영상의학 검사 중 흉·복부 X선 검사에 대한 피폭환경에 모사하고, 검사 시 발생하는 인체 장기별 흡수선량을 평가하고자 한다. 두 번째로, 피폭환경 내 3D 프린팅 재료를 이용한 방사선 차폐기구 사용 시 선량감소효과에 대해 산정하고자 하며, 이를 통해 3D 프린팅 기술을 이용한 방사선 차폐기구의 제작 및 활용을 위한 기초자료로서 제시하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

1. 일반 X선 검사 시 인체 장기별 선량 평가

본 연구에서는 X선 검사 시 가장 일반적으로 시행되고 있는 복부 전후방향(Abdomen AP), 흉부 후전방향(Chest PA)검사를 선정하였다. 검사 시 장기에 대한 흡수선량 평가를 위해 과거 ORNL(Oak ridge national laboratory)에서 개발한 MIRD형 인체 혼성팬텀(UF-revised phantom)을 사용하여 환자를 모사했다. 영상 검사에 대한 촬영조건은 영상의학 검사에서의 표준촬영기법에서 제시하고 있는 표준촬영조건(Abdomen : 80 kVp, 20 mAs, 2.0 mmAl filter / Chest : 110 kVp, 8 mAs, 2.5 mmAl filter)을

참조하였으며,^[6] 1차선에 의한 주변 장기선량의 영향평가를 위해 그리드(grid)에 대한 것은 배제하였다. 검사 시 발생하는 X선은 IPEM(Institute of Physics and Engineering in Medicine)에서 제공하는 스펙트럼 생성 프로그램인 SRS-78을 사용하였다. 이 프로그램은 X선 관전압(30~150 kVp)의 모사가 가능하며, 다양한 타깃 재질(텅스텐, 몰리브덴, 로듐 등)과 필터(알루미늄, 구리, 철 등)에 따라 X선 스펙트럼의 모사가 가능하다(IPEM 1997).^[7] 본 연구에서는 양극 타깃의 각도, 관전압, 필터에 따른 광자 스펙트럼을 Fig. 1과 같이 획득한 후 선원항(Source specification)으로 지정했다.

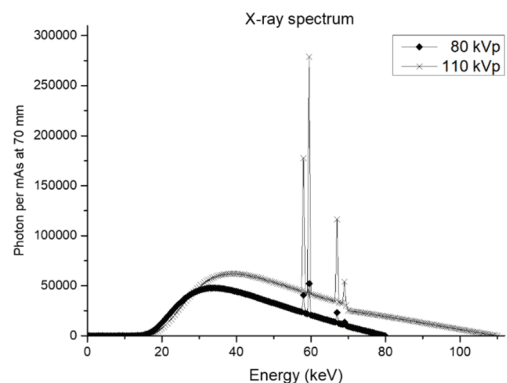


Fig. 1. Distribution of 80 & 110 kVp photon spectrum generated by SRS-78 program.

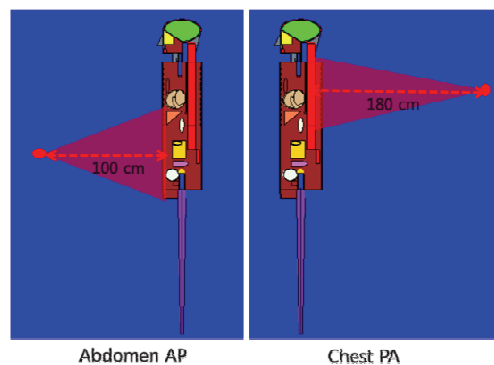


Fig. 2. Simulation model for dose assessment during thoracic and abdominal X-ray examination.

다음은 실험에 대한 모델링으로 복부검사의 경우, SID(source to image-receptor distance)는 팬텀 전면부로부터 100 cm 거리에 설정하였고, 전후(AP)방향으로 40 x 40 cm 크기의 복부 조사야(field size)를 고려하여 방사형으로 X선을 조사했다. 두 번째

로, 흉부검사의 경우, Fig. 2와 같이 팬텀 후면부로부터 약 180 cm 거리(SID : 180 cm)에 선원발생지점을 설정한 후, 후전(PA)방향으로 40 x 40 cm 크기의 흉부 조사야를 고려하여 방사형으로 X선을 조사했다.

검사 시 1차선 및 산란선에 의한 인체 장기별 선량 평가를 위해 대뇌(Brain), 눈(Eye), 갑상선(Thyroid), 유방(Breast), 폐(Lung), 위(Stomach), 간(Liver), 식도(Esophagus), 콩팥(Kidney), 타액선(Salivary gland), 이자(Pancreas), 전립선(Prostate), 자궁/경부(Uterus/Cervix), 생식선(Gonad; testis, ovary)에 대해 관심지점(tally)를 지정하였고, Tally specification card는 f6 tally를 이용하여 지정한 장기의 단위 질량당 축적된 에너지(MeV/g) 분포를 획득했다. MCNPX 코드에서 산출된 결과값은 방사선 입자 1개에 대한 확률값으로, 실제 장기선량을 결정하기 위해서 환산과정이 필요하다.¹⁸⁾ 이를 위해 X선관 내부에서 발생하는 실제 X선 발생효율 고려하여 계산된 환산인자(Normalization factor)를 보정하여 장기별 흡수선량(mGy)으로 환산했다. 모의실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 반복횟수(nps)는 10⁸번 이상 추정하였고, 통계적 불확도(uncertainty)는 3% 이내로 평가되었다.

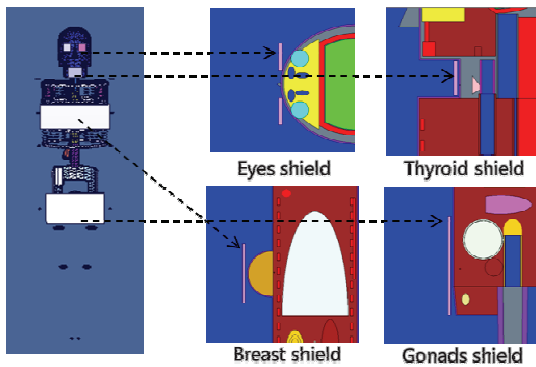
2. 3D 프린팅 차폐기구 사용 시 인체 장기에 대한 선량감소효과 평가

앞선 실험에서 평가한 복부·흉부 X선 검사 시 발생하는 1차선 및 산란선에 의한 인체 내 장기 흡수선량을 저감하기 위해 3D 프린팅 기술 중 FDM(Fused Deposition Model) 방식의 원료에 대해 사전 조사했다. 현재 FDM 방식의 3D 프린터에 사용되는 원료는 노즐에 삽입이 용이한 필라멘트 형태로 플라스틱 계열인 PLA(Poly Lactic Acid), TPU(Thermoplastic Poly Urethane), ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene), PVA(Polyvinyl Alcohol), Nylon(Nylon; Polyamides)와 기존 플라스틱 계열에 금속이 혼합된 재료 등이 알려져 있으며, 재료에 대한 구성성분 및 비중에 대한 정보는 Table 1과 같다.

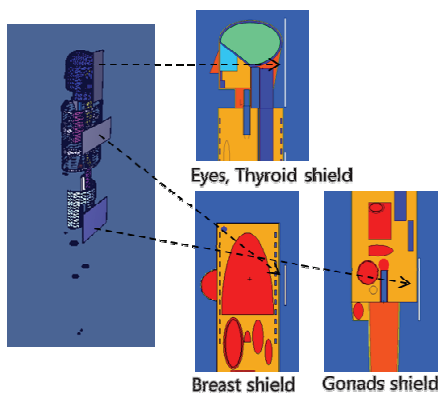
차폐기구에 대한 모델링은 인체 장기에 대한 방사선 감수성을 고려하여 복부 검사의 경우, Fig. 3(a)와 같이 눈, 갑상선, 유방, 생식선이 위치한 장기의 전면부에 직육면체 형태로 구성하였고, 흉부 검사의 경우, Fig. 3(b)와 같이 눈, 갑상선, 유방, 생식선이 위치한 인체의 후면부에 직육면체로 단순 모사했다. 3D 프린팅 재료의 종류 및 차폐기구 두께에 따른 선량감소효과를 산정하고자, 프린팅 재료별로 각각의 차폐기구를 구성한 후 두께 변화(5, 10, 10, 20, 25 mm)에 따른 장기별 흡수선량 분포를 획득하였다. 차폐기구 미사용 시 평가한 장기별 흡수선량 분포를 기준으로 각 차폐원료 및 두께별 선량감소효과(%)를 산정하여 비교 분석하였다.

Table 1. Information of 3D Printing materials in FDM type

Printing Type	Materials	Composition	Specific Gravity (g/cm ³)
Fused Deposited Modeling	PLA (Poly Lactic Acid)	C ₃ H ₄ O ₂	1.24
	TPU(Thermoplastic Poly Urethane)	C ₃ H ₄ O ₃ CO	1.1
	ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)	C ₃ H ₃ N + C ₄ H ₆ + C ₂ H ₃	1.04
	PVA(Polyvinyl Alcohol)	CH ₂ (CH)(OH)	1.24
	Nylon(Nylon;Polyamides)	C ₁₀ H ₂₀ (CO) ₂ (NH) ₂	1.2
	PLA + Copper	C ₃ H ₄ O ₂ + Cu(40%)	2.46
	PLA + Aluminum	C ₃ H ₄ O ₂ + Al(60%)	1.48
	PLA + Stainless steel	C ₃ H ₄ O ₂ + Stainless steel(40%)	2.4
	PLA + Iron	C ₃ H ₄ O ₂ + Fe(40%)	2.4
	ABS + Bismuth	C ₃ H ₃ N + C ₄ H ₆ + C ₂ H ₃ + Bi(40%)	2.7
ABS + Tungsten	C ₃ H ₃ N + C ₄ H ₆ + C ₂ H ₃ + W(40%)	4.0	



(a) Abdomen AP shielding devices



(b) Chest PA shielding devices.

Fig. 3. Simplified simulations of radiation shielding devices during X-ray examination.

III. RESULT

1. 복부 · 흉부 X선 검사 시 인체 장기별 선량 분포

본 연구에서는 현재 일반적으로 시행되는 복부 · 흉부 X선 검사 시 발생하는 1차선 및 산란선에 의해 노출되는 장기 선량분포를 평가하고자, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 전산모사를 수행하였다. 그 결과, 복부 검사 시, Fig. 4와 같이 검사 부위에 포함되는 장기인 정소의 경우 5.91 mGy, 위 4.17 mGy, 간 3.16 mGy, 전립선 3.41 mGy, 난소 2.62 mGy로 펜텀 내 상대적으로 피부표면에 가장 근접한 정소가 가장 높은 선량분포를 보였고, 그 외 주변장기의 경우 유방 3.93 mGy, 폐 2.44 mGy, 눈 3.28 mGy, 갑상선 2.68 mGy로 평가되었다.

이에 반해 흉부 검사 시 장기별 흡수선량 평가

결과, Fig. 4와 같이 검사 부위에 포함되는 폐의 경우, 0.32 mGy, 식도 0.18 mGy, 유방 0.06 mGy로 폐가 가장 높은 선량분포를 보였다. 그 외 주변장기의 경우 콩팥 0.51 mGy, 이자 0.19 mGy, 난소 0.17 mGy, 갑상선 0.16 mGy, 전립선 0.14 mGy, 정소 0.06, 눈 0.03 mGy로 인체 후복막 장기인 콩팥의 경우, 검사 시 가장 높은 선량분포를 나타내었다.

위 결과에 따라 흉부검사는 상대적으로 복부 검사에 비해 장기별 흡수선량은 전반적으로 낮은 수치를 보였으며, 이는 흉부 검사 시 높은 관전압의 사용과 원거리 촬영으로 인해 연속 X선의 저 에너지 광자의 감쇠를 통한 평균에너지의 증가현상에 기인한 것으로 보인다.

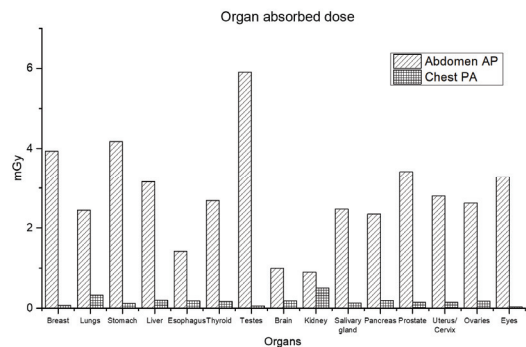


Fig. 4. Absorbed dose distribution according to human organs during abdominal and thoracic X-ray examination.

2. 3D 프린팅 재료를 이용한 방사선 차폐기구 사용 시 인체 장기별 선량감소효과

현재 범용으로 사용되는 FDM 방식의 3D 프린팅 재료를 대상으로 한 방사선 차폐기구의 선량감소 효과를 평가하고자 모사한 차폐기구의 재료 및 두께(5, 10, 15, 20, 25 mm)에 따른 각 장기별 흡수선량을 산정한 후 차폐기구 미사용 시 흡수선량을 기준으로 각 장기별 선량감소효과(%)를 산정하였다.

첫 번째로, 복부검사 시 Table 2와 같이 플라스틱 계열(PLA, ABS, Nylon, PVA, TPU)의 경우, 두께 증가에 따라 유방에서 최소 5.2~최대 27.4%, 정소 3.9~23.7%, 폐 4.4~20.0%, 갑상선 4.2~18.7%, 눈 3.7~8.0%, 난소 2.4~5.8%로 최대 30% 이하의 낮은 효과를 나타내었다. 플라스틱 계열 내 차폐효과는 Nylon

과 PVA가 상대적으로 높은 차폐효과를 보였고, PLA, TPU, ABS 순서로 차폐효과가 떨어지는 양상을 나타내었다. 이에 비해 PLA, ABS와 금속 혼합 재료인 PLA+Al, PLA+Cu, PLA+Fe, PLA+Stainless steel, ABS+Bi, ABS+W의 경우, 차폐두께 증가에 따라 정소에서 최소 9.8~최대 92.6%, 유방 10.9~91.1%, 갑상선 7.5~60.7%, 폐 7.4~49.3%, 눈 6.6~42.0%, 난소 3.4~18.9%로 상대적으로 높은 차폐효과를 나타내었다.

혼합재료 내 차폐효과는 ABS+W, PLA+Stainless steel, ABS+Bi의 경우 가장 높은 차폐효과를 나타내었으며, 그 외 재료의 경우, PLA+Cu, PLA+Fe, PLA+Al 순서로 차폐효과가 낮아지는 경향을 보였다.

이처럼 복부 검사 시 ABS+W을 이용한 차폐기구 사용 시, 검사 부위를 제외한 유방의 경우 76.5~91.1%, 갑상선 49.9~60.7%, 대뇌 20.6~31.5%, 눈 37.2~42.0 %으로 가장 높은 선량감소효과를 나타낸 것으로 분석되었다.

Table. 2. Dose reduction effect according to thickness(5~25 mm) of 3D printing material in abdominal X-ray examination

Organ	3D Printing Materials						(Unit : %)
	PVA	PLA+Al	PLA+Cu	PLA+Fe	PLA+SS	ABS+Bi	ABS+W
Breast	6.2 ~ 27.4	10.9 ~ 45.2	56.0 ~ 89.1	47.7 ~ 86.9	65.9 ~ 90.4	71.6 ~ 90.5	76.5 ~ 91.1
Lungs	5.4 ~ 20.0	7.4 ~ 25.8	28.9 ~ 47.6	24.8 ~ 46.3	33.9 ~ 48.6	37.1 ~ 48.4	40.1 ~ 49.3
Esophagus	2.9~ 12.9	3.9 ~ 16.6	17.8 ~ 32.1	15.0 ~ 31.0	21.3 ~ 32.8	23.6 ~ 32.4	25.8 ~ 33.3
Thyroid	5.0 ~ 18.7	7.5 ~ 27.3	36.1 ~ 57.9	31.1 ~ 55.8	43.6 ~ 59.7	46.9 ~ 59.0	49.9 ~ 60.7
Brain	3.4 ~ 13.0	4.5 ~ 15.8	15.4 ~ 29.5	13.5 ~ 28.2	17.6 ~ 30.5	19.3 ~ 29.4	20.6 ~ 31.5
Salivary gland	4.1 ~ 18.9	6.1 ~ 25.4	22.8 ~ 47.5	19.9 ~ 46.0	26.1 ~ 48.8	28.3 ~ 46.1	30.1 ~ 49.9
Eye	4.5 ~ 8.0	6.6 ~ 12.6	28.1 ~ 36.5	24.6 ~ 33.8	32.8 ~ 39.4	34.8 ~ 40.4	37.2 ~ 42.0

Table. 3. Dose reduction effect according to thickness(5~25 mm) of 3D printing material in thoracic X-ray examination

Organ	3D Printing Materials						(Unit : %)
	PVA	PLA+Al	PLA+Cu	PLA+Fe	PLA+SS	ABS+Bi	ABS+W
Stomach	1.8 ~ 3.9	1.8 ~ 4.5	4.8 ~ 8.7	4.4 ~ 8.3	5.7 ~ 8.9	-17.0 ~ -13.7	-15.6 ~ -13.6
Liver	0.2 ~ 1.2	0.4 ~ 2.3	3.6 ~ 7.0	3.1 ~ 6.7	4.4 ~ 7.4	-18.8 ~ -15.7	-17.7 ~ 15.5
Thyroid	7.2 ~ 20.4	8.8 ~ 26.1	28.2 ~ 51.8	23.6 ~ 48.9	32.3 ~ 53.3	23.6 ~ 44.1	33.5 ~ 45.5
Testes	3.0 ~ 29.5	4.4 ~ 41.4	38.9 ~ 71.8	33.7 ~ 69.8	45.6 ~ 72.5	43.2 ~ 69.5	52.9 ~ 70.5
Brain	9.9 ~ 38.7	14.2 ~ 50.0	52.3 ~ 83.6	46.2 ~ 81.4	59.5 ~ 85.0	58.9 ~ 83.8	68.8 ~ 84.5
Kidney	-0.3 ~ -0.1	-0.13 ~ -0.1	0.3 ~ 0.9	0.3 ~ 0.8	0.4 ~ 1.0	-24.4 ~ -23.9	-24.3 ~ 24.0
Salivary gland	9.8 ~ 38.7	12.2 ~ 45.4	44.1 ~ 76.6	38.9 ~ 74.0	50.4 ~ 77.8	47.1 ~ 74.8	59.4 ~ 75.2
Pancreas	-0.1 ~ 0.8	-0.1 ~ 1.7	2.4 ~ 5.3	2.2 ~ 5.0	3.2 ~ 5.4	-20.3 ~ 18.0	-19.5 ~ -17.8
Prostate	5.5 ~ 29.6	8.0 ~ 39.5	42.6 ~ 78.6	34.8 ~ 74.2	51.9 ~ 80.1	47.6 ~ 77.0	59.1 ~ 78.4
Uterus/Cervix	2.4 ~ 4.0	3.2 ~ 6.7	9.7 ~ 18.2	8.5 ~ 17.1	12.2 ~ 18.7	-7.7 ~ -0.5	-4.8 ~ -0.5
Ovaries	-2.4 ~ -0.2	-1.8 ~ 3.6	4.5 ~ 14.1	3.5 ~ 13.0	7.2 ~ 14.8	-13.7 ~ -5.7	-11.0 ~ -6.0
Eye	2.0 ~ 28.6	6.3 ~ 31.9	28.6 ~ 65.6	24.6 ~ 65.0	36.5 ~ 66.8	33.6 ~ 61.3	49.7 ~ 65.4

두 번째로, 흉부 검사 시 플라스틱 계열(PLA, ABS, Nylon, PVA, TPU)의 경우, Table 3과 같이 두께 증가에 따라 유방에서 최소 5.5~최대 37.8%, 정소 -0.4~30.2%, 폐 4.5~23.7%, 갑상선 5.0~20.4%, 눈 -2.9~28.6%, 난소 -2.9~-0.2%로 최대 40% 이내 낮은 선량감소효과를 보였다. 플라스틱 계열 내 차폐효과는 복부검사와 유사한 경향을 보였으며, Nylon, PVA, PLA, ABS, TPU 순서로 차폐효과가 감소되는 양상을 나타내었다. 이에 반해 혼합 원료인 PLA+Al, PLA+Cu, PLA+Fe, PLA+ Stainless steel의 경우, 차폐두께 증가에 따라 정소에서 최소 4.4~최대 72.5%, 유방 10.0~73.1%, 갑상선 8.8~53.3%, 폐 8.8~57.6%, 눈 6.3~66.8%, 난소 -1.8~14.8%로 상대적으로 높은 차폐효과를 나타내었다.

이처럼 흉부 검사 시 PLA+Stainless steel를 이용한 차폐기구 사용 시 검사부위를 제외한 대뇌의 경우 59.5~85.0%, 눈의 경우 36.5~66.8%, 갑상선 32.3~53.3%, 정소 45.6~72.5%의 선량감소효과를 나타내어 가장 높은 결과를 보였다.

IV. DISCUSSION

국민의 의료피폭 수준과 일본 후쿠시마 원전사고 이후 방사선 피폭에 대한 관심이 급증하면서 방사선안전 및 국민보건 관점에서 우려의 대상으로 언급되고 있다.^[9] 의료 방사선의 경우, 환자측면의 의료피폭과 종사자 측면의 직업상 피폭으로 구분되고, 의료피폭은 행위의 정당화 원칙에 따라 선량한도를 따로 규정하여 관리하고 있지 않으며, 종사자에 비해 방사선 피폭 방어에 대해 다소 간과하고 있는 실정이다. 또한 피검자를 위한 방사선 방호구에 대한 구비가 부족하거나, 소아 또는 가임여성 등을 제외하고는 사용하지 않는 경우가 많다.

기존 연구^[10]에서는 X선 산란 선량은 관전압, 조사시간, 조사야 크기, 피사체의 물리적 성질, 피사체 주변 물체 등에 영향을 받아 결정되며, 최성관^[11]은 X선 촬영 시 적정 조사야 크기 사용에 따라 피사체 주변 X선 산란선 발생량이 약 6~7배 정도 감소한다고 평가하였다. 이처럼 산란 선량 감소를 위해 검사 조건 설정과 관련된 방법 이외에 피검자의 선량 감소를 위한 관련 연구는 현재 다소 부족

한 실정이다.

이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 의료분야 내 일반적으로 시행되는 복부, 흉부 X선 검사 시 환자의 인체 장기에 대한 선량평가를 수행하고, 환자의 피폭선량 최적화를 위해 3D 프린팅 차폐기구 사용에 대한 효용성을 평가하고자 하였다. 모의실험을 통해 식약처에서 제시하는 표준촬영조건을 적용하여 검사 시 발생하는 1차선 및 2차 산란선에 기인한 인체 장기별 흡수선량에 대해서 사전적으로 평가한 후 3D 프린팅 재료의 종류 및 두께에 따른 차폐분석을 수행하였다. 첫 번째로, 복부 촬영 시 1차선 및 산란선에 의한 인체장기의 흡수선량은 선원과의 거리가 인접하고, 피부표면에 근접한 장기일수록 산란선 영향이 높은 것으로 생각된다. 이에 반해 흉부 촬영의 경우, 복부 검사에 상대적으로 높은 관전압의 사용과 원거리 촬영으로 인해 저에너지 광자의 감약을 통한 평균 에너지 증가현상으로 인해 복부 검사보다 낮은 장기 선량분포를 나타낸 것으로 사료된다. 두 번째로, FDM 방식의 3D 프린터에서 사용 가능한 재료별로 인체 장기에 따른 선량감소효과 분석을 통해 플라스틱 계열(PLA, ABS, TPU, Nylon, PVA)의 경우 저 원자번호 구성 물질과 낮은 비중으로 미미한 차폐효과를 나타내었으며, PLA, ABS 금속혼합물의 경우, 구성물의 높은 실효원자번호와 상대적으로 높은 비중으로 유효한 차폐효과를 나타낸 것으로 분석된다. 예외적으로 ABS+Bi, ABS+W의 경우 흉부 검사 시 특정 장기에서 오히려 선량이 증가되는 현상을 보였으며, 이는 원자번호가 높은 재료와의 상호작용을 통해 증가된 산란선에 의한 것으로 생각된다. 이에 따라 차폐하고자 하는 목적장기를 고려한 재료의 선택과 두께설정을 통해 검사 시 활용되어야 할 것으로 사료된다.

최근 일반촬영 분야의 진단참고수준 가이드라인에서 제시한 진단참고수준은 입사표면선량을 기준으로 복부(AP)의 경우 3.64 mGy, 흉부(PA)의 경우 0.40 mGy로 제시하고 있다.^[12] 본 연구에서 사용한 모의실험의 결과와 비교하여 복부 장기별로 최소 0.9 mGy ~ 최대 5.91 mGy, 흉부 장기별로 0.03 ~ 0.51 mGy 로 장기의 위치별로 조금 다른 양상을 보

였으나, 평가한 장기선량 범위 내 진단참고수준이 포함되는 것을 확인하였다. 이처럼 모의실험을 이용한 방법을 통해 평가한 결과 유사한 경향을 보였으며, 이는 간접적으로 인체 장기 선량평가를 위해 유용한 도구로서 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

최근 J. Ceh, et. al^[13] 과 C. M. Shemelya, et al^[14] 는 3D 프린팅 재료 중 기존의 플라스틱 계열의 재질과 텅스텐, 비스무스 등의 첨가를 통한 팬텀 제작 및 방사선 차폐효과 평가 등에 대한 활용에 대해 제시하고 있다. 이처럼 3D 프린팅 기술을 이용한 활용에 대해서도 국·내외적으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 이에 본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 통한 방사선 차폐기구로서의 적용 가능성을 평가하고자 하였으며, 범용으로 활용되고 있는 FDM 방식의 3D 프린팅 재료를 이용한 차폐기구 제작 시, 혼합원료의 사용을 통해 환자의 피폭선량 최적화에 도움 될 수 있을 것으로 사료된다.

추후 의료분야로의 활용을 위해서는 진단 X선 검사 이외 다양한 영상의학 검사 시 적용성 평가에 대해 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다. 또한 제작된 3D 프린팅 차폐기구를 실제 임상적으로 환자에게 적용하기 위해서는 사용 시 거부감이 없어야 하고, 인체에 적합한 형태의 차폐기구 제작을 위한 3D CAD 기반의 모델링에 대해서도 논의가 필요할 것으로 사료된다. 추후 환자의 의료피폭의 최적화를 위한 3D 프린팅 방사선 차폐기구의 제작 및 적용을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

V. CONCLUSION

본 연구는 모의실험을 통해 의료 방사선 검사 중 복부·흉부 X선 검사 시 환자의 인체 장기별 흡수 선량을 평가하고, 3D 프린팅 재료를 통한 방사선 차폐기구 적용에 따른 선량감소효과에 대해 분석하였다. FDM 방식의 3D 프린팅 재료 중 플라스틱 계열의 경우 검사 부위 외 장기별로 최대 30% 이하의 낮은 차폐효과를 보였고, 금속혼합 계열의 경우 최대 90% 이상의 상대적으로 높은 차폐효과를 나타내었다. 그러나, 검사에 따라 다소 장기선량을 오히려 증가시킬 수 있는 경우가 있으므로, 검사별

로 적절한 차폐방법에 대한 고려가 필요하다. 이처럼 의료 방사선 검사 시 적극적인 방사선 방호는 잠재적인 암 발생확률을 저하시키고, 환자의 의료 피폭 최적화에 도움 될 것으로 사료된다. 나아가 의료기관 내 종사자들로 하여금 방사선 피폭에 대한 정기적인 교육과 피폭선량 저감화를 위한 노력을 하는 등 피검자의 방호측면에 대해서도 지속적인 관심을 기울여야 할 것으로 판단된다.

Reference

- [1] Ministry of Food and Drug Safety, "Guidelines for Recommended Patient Doses for Plain Radiography Imaging", Radiation Safety Management Series, No. 30, 2012.
- [2] ICRP, "Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103", Ann ICRP, Vol. 37, No. 2-4, pp. 1-332, 2007.
- [3] H. G. Kim, J. H. Yoon, S. D. Choi, "Study on 3D printer production of auxiliary device for upper limb for medical imaging test", Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 38, No. 4, pp. 389-394, 2015.
- [4] Y. H. Seung, "Comparison of hounsfield units by changing in size of physical area and setting size of region of interest by using the CT phantom made with a 3D printer", Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 38, No. 4, pp. 421-427, 2015.
- [5] H. W. Park, "3D Printing Technology Status and Applications", Journal of the KSME, Vol. 54, No. 4, pp. 32-35, 2014.
- [6] Ministry of Food and Drug Safety, "Standard imaging methods in radiological examination", Radiation Safety Management Series, No. 38, 2014.
- [7] IPEM, Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data. IPEM Report 78. Institute of Physics and Engineering in Medicine. York, UK. 1997.
- [8] I. Park, K. H. Kim, S. C. Oh, J. Y. Song, O. H. Kwon, K. P. Kim, "Evaluation of Radiation Dose to Patients in Intraoral Dental Radiography Using Monte Carlo Method", Journal of Radiation Industry, Vol. 10, No. 3, pp.139-144, 2016.

- [9] J. C. Ha, Y. J. Song "An Investigation of Awareness on the Fukushima Nuclear Accident and Radioactive Contamination", *Journal of radiation protection and research*, Vol. 41, No. 1, pp.7-14, 2016.
<http://dx.doi.org/10.14407/jrpr.2016.41.1.007>
- [10] S. K. Na, S. H. Han, "A Study on the Factors of Spatial Scattered Ray Occurrence in the X-ray Radiography Room", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 32, No. 4, pp.393-399, 2009.
<http://dx.doi.org/10.15267/KESES.2013.32.4.393>
- [11] S. G. Choi, "Change of the Scattered Dose by Field Size in X-ray Radiography", *Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 13 No. 3, pp.198-203, 2013. <http://dx.doi.org/10.5392/JKCA.2013.13.03.198>
- [12] Korea Centers for Disease Control and Prevention, "Guidelines for Diagnostic Reference Levels in Plain Radiography", *Medical Radiation Series*, No. 16, 2019.
- [13] J. Ceh, T. Youd, Z. Mastrovich, C. Peterson, S. Khan, T. A. Sasser, I. M. Sander, J. Doney, C. Turner, W. M. Leevy, "Bismuth infusion of ABS enables additive manufacturing of complex radiological phantoms and shielding equipment", *Sensors*, Vol. 17, No. 3, pp.459, 2017.
<http://dx.doi.org/10.3390/s17030459>
- [14] C. M. Shemelya, A. Rivera, A. T. Perez, C. Rocha, M. Liang, X. Yu, C. Kief, D. Alexander, J. Stegeman, H. Xin, R. B. Wicker, E. MacDonald, D. A. Roberson, "Mechanical, electromagnetic, and X-ray shielding characterization of a 3D printable tungsten – polycarbonate polymer matrix composite for space-based applications", *Journal of Electronic Materials*, Vol. 44, No. 8, pp.2598-2607, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11664-015-3687-7>

일반영상 검사 시 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 3D 프린팅 차폐기구의 효용성 평가

조용인¹, 김정훈^{2,*}

¹동남권 원자력의학원 영상의학과

²부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

일반영상 검사 시 발생하는 산란선은 검사목적 부위 외 다른 장기 및 조직에 대해 2차적인 피폭을 유발할 수 있다. 현재 방사선 피폭을 저감하기 위해 사용되는 차폐기구는 종사자들의 방사선 방호 목적으로 대부분 사용되며, 환자의 방사선 방호는 거의 이뤄지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 일반영상 검사 시 산란선에 의한 장기 선량과 3D 프린팅 재료를 통한 방사선 차폐기구의 효용성을 평가하고자 한다. 그 결과, 검사 시 장기별 흡수선량은 선원과의 거리가 인접하고, 피부표면에 근접한 장기일수록 2차 산란선에 의해 높은 영향을 나타내었다. 이를 방호하기 위한 3D 프린팅 차폐기구 사용에 따른 선량감소효과는 플라스틱 계열에 비해 혼합 프린팅 재료의 경우 더 높은 차폐효과를 나타내었다.

중심단어: 산란선, 모의실험, 방사선 차폐, 3D 프린팅 재료

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	조용인	동남권 원자력의학원 영상의학과	방사선사
(교신저자)	김정훈	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	교수