

# Analysis of Photon Spectrum for the use of Added Filters using 3D Printing Materials

Yong-In Cho<sup>1</sup>, Sang-Ho Lee<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiology, Dongnam Institute of Radiological Medical Sciences Cancer center

<sup>2</sup>Department of Nuclear Medicine, Dongnam Institute of Radiological Medical Sciences Cancer center

Received: December 15, 2021. Revised: February 11, 2022. Accepted: February 28, 2022

## ABSTRACT

3D printing technology is being used in various fields such as medicine and biotechnology, and materials containing metal powder are being commercialized through recent material development. Therefore, this study intends to analyze the photon spectrum during added filtration using 3D printing material during diagnostic X-ray examination through simulation. Among the Monte Carlo techniques, MCNPX (ver. 2.5.0) was used. First, the appropriateness of the photon spectrum generated in the simulation was evaluated through SRS-78 and SpekCalc, which are X-ray spectrum generation programs in the diagnostic field. Second, photon spectrum the same thickness of Al and Cu filters were obtained for characterization of 3D printing materials containing metal powder. In addition, the total photon fluence and average energy according to changes in tube voltage were compared and analyzed. As a result, it was analyzed that PLA-Al required about 1.2 ~ 1.4 times the thickness of the existing Al filter, and PLA-Cu required about 1.4 ~ 1.7 times the thickness of the Cu filter to show the same degree of filtration. Based on this study in the future, it is judged that it can be utilized as basic data for manufacturing 3D printing additional filters in medical fields.

Keyword: Monte Carlo Simulation, Photon Spectrum, Added filter, 3D Printing materials

## I. INTRODUCTION

현대의학에서 의료 방사선을 이용한 검사는 질병의 진단 및 치료 방향의 설정 등을 위해 필수적인 것으로 인식되고 있으며, 사용 건수 또한 매년 증가되고 있는 추세이다. 의료 방사선 검사에 따른 국민 1인당 노출되는 유효선량은 2007년 0.93 mSv에서 2015년 1.38 mSv로 8년간 약 40% 이상이 증가하였다고 보고되었다<sup>[1]</sup>. 의료 방사선 검사의 선량 최적화를 위해서는 검사 부위에 따른 관전압, 관전류, 촬영거리, 격자의 유무, IR(Image Receptor) 물질과 조합의 종류, 조사시간 등에 대해 고려하여야 한다<sup>[2]</sup>. 또한 디지털 방사선 영상은 검출기의 특성에 따라 넓은 다이내믹 레인지를 가지므로 환자

에게 주어질 수 있는 피폭범위가 넓으며, 주기적인 선량 관찰이 필요하다<sup>[3]</sup>.

일반적으로 진단용 방사선 발생장치에서 발생하는 X-선은 전자기파의 파장이 높은 것부터 낮은 것까지 다양한 형태의 연속적인 스펙트럼 분포를 나타낸다. 진단 X-선 검사에서의 적절한 여과 장치의 사용은 연속 스펙트럼 분포 중 영상 형성에 기여하지 않는 장파장 영역의 X-선을 여과시켜 피부에 불필요한 피폭을 줄여주는 효과를 나타낸다<sup>[4]</sup>. 현재 미국 방사선측정위원회(NCRP; National Council on Radiation Protection and Measurements)에서는 관전압에 따라 50 kVp 이하에서 0.5 mmAl, 50 ~ 70 kVp에서 1.5 mmAl, 70 kVp 이상에서 2.5 mmAl의 필터 사용을 권고하고 있다<sup>[5]</sup>. 국내에서도 진단 X-

\* Corresponding Author: Sang-Ho Lee

E-mail: riroom@hanmail.net

Tel: \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*

선 검사 시 다양한 부가 필터의 재료와 두께에 대해 많은 연구가 이뤄져왔으며<sup>[6,7]</sup>, 알루미늄(Al)과 구리(Cu)의 복합 재료를 이용한 필터 사용 시 영상 화질의 영향을 주지 않는 범위 내 가장 높은 효과를 나타내었다고 보고하였다<sup>[8]</sup>. 하지만, 실제 의료 기관에서는 부가필터가 따로 구비되어 있거나, 디지털 방사선 영상 장치 내 자체적으로 부가필터가 내장되어 있지 않은 경우에는 거의 사용되고 있지 않은 실정이다.

최근 3D 프린팅 기술은 제조업의 혁신적인 변화를 가져올 것으로 기대되고 있으며, 의료·바이오 분야를 포함한 다양한 분야에서 활용되고 있다. 그 중 의료 분야에서는 인체 팬텀 제작, 수술 모형 제작, 환자 보조기구 제작 등의 연구가 제시되었다<sup>[9]</sup>. 최근에는 다양한 소재 개발이 이뤄지고 있으며 금속 분말이 함유된 재료 등이 상용화되고 있으나, X-선 부가 필터로의 활용 연구는 다소 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 금속 분말이 함유된 3D 프린팅 재료를 이용한 X-선 부가 필터로의 적용 가능성에 대해 평가하고자 하였으며, 이를 통해 3D 프린팅 기술을 접목하여 의료기관 내 진단용 방사선 발생장치에 부착 가능한 맞춤형 부가 필터 제작을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## II. MATERIAL AND METHOD

### 1. 몬테카를로 전산모사(Monte Carlo Simulation)

#### 1.1. 디지털 방사선 영상장치에 대한 구성

몬테카를로 방법은 통계적 난수를 이용한 무작위적 표본 추출을 통해 문제를 해결하는 방법으로, 범용 코드 중 MCNPX(ver.2.5.0)을 이용하였다. 본 연구에서는 현재 임상적으로 사용되고 있는 LISTEM, PHILIPS 사의 2가지의 디지털 방사선 영상 장치를 선정하였으며, Table 1과 같이 장치 내 X-선관에 대한 세부 정보를 토대로 전산 모사하였다.

#### 1.2. X-선의 여과

X-선의 여과는 관용기, 절연유, 유리 등을 통한 고유 여과, 콜리메이터와 피사체 사이에 삽입된 금

속 물질을 통해 여과하는 부가 여과로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 고유 여과와 부가 여과에 대한 부분을 각각 모사하였다. 본 연구에서는 기존 알루미늄(Al), 구리(Cu) 단일 필터와의 여과 정도의 비교를 위해 기존 재료가 함유된 3D 프린팅 혼합재료를 사용하였다. 선정된 3D 프린팅 재료는 FDM 방식 3D 프린터에서 사용하는 선정된 재료는 PLA 재료 기반에 금속분말이 혼합된 PLA 혼합 알루미늄(PLA-Al), PLA 혼합 구리(PLA-Cu), PLA 혼합 청동(PLA-bronze) 등을 이용하였으며, 내부 조성 및 밀도는 Table 2와 같다<sup>[10]</sup>.

Table 1. Specifications for simulation of x-ray tube in digital radiography devices

Specifications	Listem DR X-ray tube	Philips DR X-ray tube
Target materials	Tungsten	Tungsten
Anode angle	12°	13°
Filtration (inherent)	0.9 mmAl	2.1 mmAl
Total filtration	maximum 2.4 mmAl	minimum 2.6 mmAl
maximum tube voltage	150 kVp	150 kVp
Anode heat storage capacity	210 kJ	220 kJ
Assembly heat capacity	900 kJ (1250 kHU)	1,700 kJ (2315 kHU)
Continuous anode input power	180 W	190 W
Weight	16 kg	27 kg

Table 2. Composition for 3D Printing materials with metal powders

3D Printing materials						
PLA-Al (Aluminum 6061 filament)						
element	C	O	S	K	Al	
atomic No.	6	8	16	19	13	
composition	0.192	0.157	0.046	0.042	0.65	
density	1.54 g/cm <sup>3</sup>					
PLA-Cu (Copper filament)						
element	C	O	S	K	Cu	
atomic No.	6	8	16	19	29	
composition	0.055	0.045	0.013	0.012	0.9	
density	4.7 g/cm <sup>3</sup>					
PLA-Bronze (Bronze filament)						
element	C	O	S	K	Cu	Sn
atomic No.	6	8	16	19	29	50
composition	0.082	0.067	0.020	0.018	0.765	0.085
density	4.5 g/cm <sup>3</sup>					

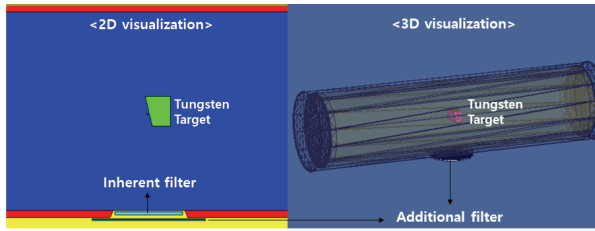


Fig. 1. Simulation of added filter in x-ray tube.

## 2. 실험방법

### 2.1. 모의실험 내 광자 스펙트럼에 대한 분석

모의실험을 통해 2가지 디지털 방사선 영상장치에서 획득한 X-선 스펙트럼에 대한 적정성 평가를 위해 X-선 스펙트럼 생성 프로그램인 SRS-78과 SpekCalc 프로그램을 이용하였다<sup>[11,12]</sup>. 이 프로그램은 이론과 실험적 결과를 바탕으로 진단 영역에서의 원하는 촬영 조건에 맞는 X-선 스펙트럼에 대한 추정이 가능하다.

본 연구에서는 첫 번째, 모사한 X-선관을 위치시킨 후 전자의 가속전압은 진단 영역에서 사용하는 관전압 범위(40, 60, 80, 100, 120 kVp)를 사용하였으며, Fig. 2와 같이 타겟과의 충돌지점으로부터 100 cm 지점에서 광자 스펙트럼을 획득하였다.

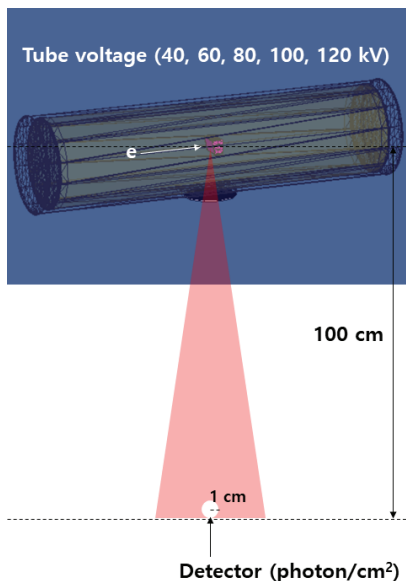


Fig. 2. Geometry for comparative analysis of X-ray spectrum.

모의실험을 통해 부가 필터가 없는 고유 여과 조건에서의 광자 스펙트럼을 획득하였으며, SRS-78, SpekCalc 프로그램 등을 통해 광자의 평균 에너지, 특성 에너지 등을 비교 분석하였다. 모의실험 내 관심영역 지정 카드(Tally Specification card)는 F5 tally를 이용하여 설정한 지점의 반경 1 cm 구에 입사되는 광자 플루언스(particle/cm<sup>2</sup>)와 0.5 keV 에너지 간격대별로 발생되는 광자 스펙트럼 분포를 획득하였다. 모의실험 내 반복횟수는 10<sup>9</sup>번 이상 수행하였으며, 불확도는 3% 이내로 유지하였다.

### 2.2. 3D 프린팅 재료에 대한 적용성 평가

두 번째, 3D 프린팅 재료에 대한 부가 필터로의 적용 가능성을 평가하고자, 기존의 부가 필터로서 사용되는 Al(1, 2 mm), Cu(0.1, 0.2, 0.3 mm), Al - Cu 혼합(1 mmAl + 0.1 mmCu, 1 mmAl + 0.2 mmCu, 1 mmAl + 0.3 mmCu) 필터를 대상으로 관전압에 따른 광자 스펙트럼 분포를 획득하였다. 기존 부가 필터의 재료 및 두께에 대한 비교 분석을 위해 3D 프린팅 재료 중 PLA-Al은 기존 Al과 동일한 두께로 구성하였고, PLA-Cu와 PLA-Bronze는 Cu와 동일한 두께로 설정한 후 광자 스펙트럼을 획득하였다. 동일한 조건에서 획득한 광자 스펙트럼 분포에 대한 경향성을 비교하였으며, 관전압에 따라 발생된 총 광자 플루언스(total fluence)와 평균 에너지(mean energy) 등을 산정하였다.

## III. RESULT

### 1. 디지털 방사선 영상 장치에 따른 X-선 스펙트럼 분석

현재 임상적으로 사용되는 디지털 방사선 영상장치에서 사용하는 관전압 범위에 따른 X-선 스펙트럼 분포를 평가하였으며, 모의실험과 스펙트럼 생성 프로그램 간 비교 분석을 위해 정규화(normalization) 과정을 수행하였다.

첫 번째, 관전압에 따른 광자 스펙트럼에 대한 평가 결과, Table. 3과 같이 LISTEM DR 장치의 경우, SRS-78, SpekCalc과 모의실험 내 산정한 평균 에너지에 대한 상대오차는 최소 0.0 % ~ 최대 3.5 %, Philips DR 장치의 경우, 최소 0.9 % ~ 최대

2.6%의 상대오차를 나타내었다. 두 번째로, 모의실험 내 특성 X-선의 경우, Fig. 3과 같이 58.1, 59.6, 67.6, 69.6 keV 지점에서 특성 피크가 확인되었으며, 최소 0.2 ~ 최대 1.0% 이내의 상대오차를 나타내었다. 디지털 방사선 영상 장치 간 평균 에너지의 차이는 Philips DR 장치가 LISTEM DR 장치보다 관전압별 최소 4.4 ~ 8.4% 정도 더 높은 평균 에너지 분포를 보였다.

Table 3. Accuracy evaluation of mean energy in simulations by comparison with SRS-78, Spekcalc

Tube voltage	LISTEM DR radiography			Philips DR radiography		
	SRS-78	SpekCalc	MCNPX	SRS-78	SpekCalc	MCNPX
40 kVp	25.0	25.2	24.9	27.3	27.5	27.1
60 kVp	32.4	32.2	32.0	35.1	35.1	34.7
80 kVp	39.5	38.6	38.6	42.2	41.9	41.5
100 kVp	46.1	44.8	44.4	48.7	48.0	47.4
120 kVp	51.7	50.1	49.7	54.1	53.3	52.7

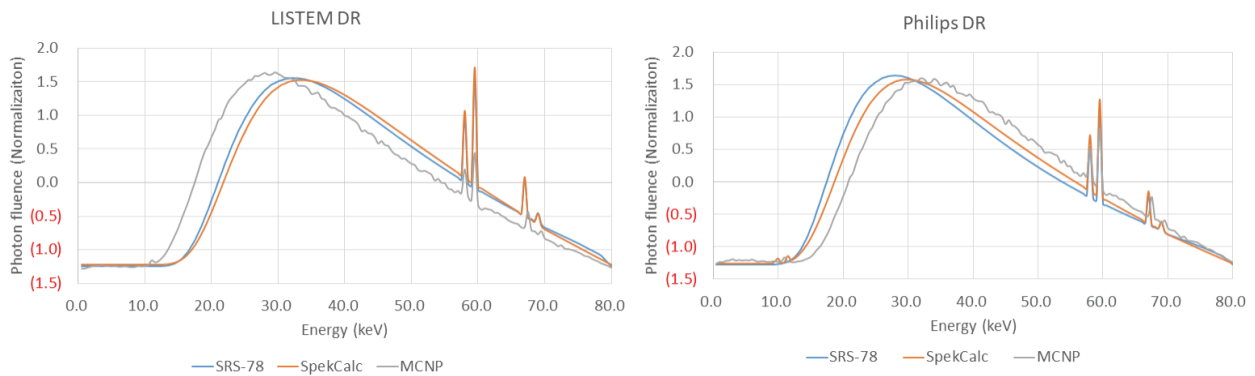


Fig. 3. Comparison of tendency for 80 kVp photon spectrum.

## 2. 3D 프린팅 재료를 이용한 부가 필터의 적용성 평가

3D 프린팅 재료를 이용한 X-선 부가 필터로의 적용 가능성을 평가하고자, LISTEM DR 장치를 기준으로 기존 필터로 사용되는 Al, Cu, Al + Cu 혼합 필터와 동일한 두께에서 3D 프린팅 재료별 광자 스펙트럼 분포를 획득하였으며, 관심지점 내 도달하는 총 광자의 수와 평균 에너지를 산정하였다. 그 결과, 검출기 내 도달하는 총 광자수는 Table 4와 같이 모든 조건에서 관전압이 높아짐에 따라 점차 증가되었으며, 필터 두께 증가에 따른 총 광자수는 저에너지 X-선의 여파로 인해 점차 낮아지는 결과를 나타내었다. 또한 광자 스펙트럼 분포를 통해 산정한 X-선 평균 에너지는 PLA-Al 재료의 경우, Table 5와 같이 1 ~ 2 mm 두께에서는 관전압 별로 필터가 없는 경우 대비 최소 4.0 ~ 최대 7.0%

정도의 평균 에너지 증가 효과를 나타내었으며, 기존 Al 단일 필터 대비 최소 2.0 ~ 최대 4.1% 정도 낮은 증가 효과를 보였다.

PLA-Cu 재료의 경우, 검출기 내 도달하는 총 광자수는 Table 6과 같이 필터 두께 증가에 따른 총 광자수는 저에너지 X-선의 여파로 인해 점차 낮아지는 결과를 나타내었다. 이를 통한 평균 에너지 산정 결과, Table 7와 같이 0.1 ~ 0.2 mm 두께에서 관전압에 따라 필터가 없는 경우 대비 최소 9.9 ~ 최대 21.6% 정도의 평균 에너지 증가 효과를 나타내었으며, 기존 Cu 단일 필터 대비 최소 5.9 ~ 최대 7.7% 정도 낮은 증가 효과를 보였다. 그에 반해 PLA-Bronze 재료의 경우, Table 7와 같이 0.1 ~ 0.2 mm 두께에서는 관전압에 따라 필터가 없는 경우 대비 최소 9.6 ~ 최대 21.1% 정도의 평균 에너지 증가 효과를 나타내었으며, 기존 Cu 단일 필터 대비 최소 8.1 ~ 최대 9.5% 정도 낮은 증가 효과를 보였다.

복합 필터 조건에서의 광자 스펙트럼에 대한 평가 결과, 검출기 내 도달하는 총 광자수는 Table 8 과 같이 필터 두께 증가에 따른 총 광자수는 저에너지 X-선의 여과로 인해 점차 낮아지는 결과를 나타내었다. 이를 통한 평균 에너지 산정 결과, 1 mm PLA-Al과 0.1 ~ 0.3 mm PLA-Cu 조합의 경우, Table 9과 같이 관전압에 따라 필터가 없는 경우 대비 최소 11.7 ~ 최대 26.6% 정도의 평균 에너지 증가효과를 나타내었으며, 기존 Al + Cu 혼합 필터 대비 최소 6.8 ~ 최대 11.2% 정도 낮은 증가효과를 보였다. 그에 반해 1 mm PLA-Al과 0.1 ~ 0.3 mm PLA-Bronze 재료의 경우, 관전압에 따라 필터가 없는 경우 대비 최소 12.2 ~ 최대 26.9% 정도의 평균 에너지 증가효과를 나타내었으며, 기존 Al + Cu 혼합 필터 대비 최소 6.3 ~ 최대 12.8% 정도 낮은 증가효과를 보였다.

Table 4. Distribution of total fluence according to Al, PLA-Al material and thickness

Added filter	Total Fluence (photon/cm <sup>2</sup> )				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
None	9.94E-09	2.59E-08	4.63E-08	6.75E-08	9.05E-08
1 mm Al	5.60E-09	1.80E-08	3.55E-08	5.45E-08	7.60E-08
1 mm PLA-Al	6.80E-09	2.03E-08	3.89E-08	5.85E-08	8.06E-08
2 mm Al	3.64E-09	1.37E-08	2.90E-08	4.61E-08	6.60E-08
2 mm PLA-Al	5.01E-09	1.68E-08	3.38E-08	5.21E-08	7.31E-08

Table 5. Distribution of X-ray mean energy according to Al, PLA-Al material and thickness

Added filter	Mean Energy (keV)				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
None	24.91	31.97	38.60	44.44	49.74
1 mm Al	27.37	34.82	41.53	47.48	52.75
1 mm PLA-Al	26.66	33.94	40.60	46.49	51.73
2 mm Al	28.73	36.61	43.49	49.53	54.81
2 mm PLA-Al	27.73	35.28	42.07	48.03	53.27

Table 6. Distribution of total fluence according to Cu, PLA-Cu, PLA-Bronze material and thickness

Added filter	Total Fluence (photon/cm <sup>2</sup> )				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
None	9.94E-09	2.59E-08	4.63E-08	6.75E-08	9.05E-08
0.1 mm Cu	2.16E-09	1.03E-08	2.39E-08	4.03E-08	5.93E-08
0.1 mm PLA-Cu	3.95E-09	1.46E-08	3.09E-08	4.92E-08	7.00E-08
0.1 mm PLA-Bronze	4.08E-09	1.49E-08	3.14E-08	4.97E-08	7.06E-08
0.2 mm Cu	7.94E-10	5.87E-09	1.61E-08	2.96E-08	4.59E-08
0.2 mm PLA-Cu	2.04E-09	9.96E-09	2.34E-08	3.96E-08	5.84E-08
0.2 mm PLA-Bronze	2.15E-09	1.03E-08	2.39E-08	4.03E-08	5.92E-08

Table 7. Distribution of X-ray mean energy according to Cu, PLA-Cu, PLA-Bronze material and thickness

Added filter	Mean Energy (keV)				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
None	24.91	31.97	38.60	44.44	49.74
0.1 mm Cu	30.07	38.68	46.04	52.26	57.58
0.1 mm PLA-Cu	28.38	36.36	43.29	49.40	54.66
0.1 mm PLA-Bronze	28.27	36.23	43.14	49.24	54.49
0.2 mm Cu	32.11	41.72	49.68	56.22	61.73
0.2 mm PLA-Cu	30.21	38.87	46.27	52.51	57.83
0.2 mm PLA-Bronze	30.08	38.70	46.06	52.28	57.61

Table 8. Distribution of total fluence according to composite filter material and thickness

Added filter	Total Fluence (photon/cm <sup>2</sup> )				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
None	24.91	31.97	38.60	44.44	49.74
1 mm Al + 0.1 mm Cu	1.56E-09	8.52E-09	2.08E-08	3.58E-08	5.33E-08
1 mm Al + 0.2 mm Cu	6.12E-10	5.07E-09	1.44E-08	2.70E-08	4.20E-08
1 mm Al + 0.3 mm Cu	2.74E-10	3.32E-09	1.08E-08	2.15E-08	3.47E-08
1 mm PLA-Al + 0.1 mm PLA-Cu	3.27E-09	1.30E-08	2.81E-08	4.57E-08	6.56E-08
1 mm PLA-Al + 0.2 mm PLA-Cu	1.86E-09	9.36E-09	2.23E-08	3.79E-08	5.62E-08
1 mm PLA-Al + 0.3 mm PLA-Cu	1.14E-09	7.12E-09	1.83E-08	3.25E-08	4.93E-08
1 mm PLA-Al + 0.1 mm PLA-Bronze	3.27E-09	1.25E-08	2.69E-08	4.38E-08	6.31E-08
1 mm PLA-Al + 0.2 mm PLA-Bronze	1.75E-09	8.35E-09	2.01E-08	3.46E-08	5.19E-08
1 mm PLA-Al + 0.3 mm PLA-Bronze	9.86E-10	5.87E-09	1.56E-08	2.84E-08	4.40E-08

Table 9. Distribution of X-ray mean energy according to composite filter material and thickness

Added filter	Mean Energy (keV)				
	40 kVp	60 kVp	80 kVp	100 kVp	120 kVp
None	24.91	31.97	38.60	44.44	49.74
1 mm Al + 0.1 mm Cu	30.85	39.69	47.29	53.53	58.96
1 mm Al + 0.2 mm Cu	32.54	42.30	50.49	57.06	62.70
1 mm Al + 0.3 mm Cu	33.55	44.11	52.78	59.55	65.40
1 mm PLA-Al + 0.1 mm PLA-Cu	29.03	37.14	44.22	50.28	55.55
1 mm PLA-Al + 0.2 mm PLA-Cu	30.50	39.19	46.64	52.84	58.22
1 mm PLA-Al + 0.3 mm PLA-Cu	31.54	40.75	48.46	54.83	60.31
1 mm PLA-Al + 0.1 mm PLA-Bronze	28.43	36.75	44.11	50.36	55.83
1 mm PLA-Al + 0.2 mm PLA-Bronze	29.57	38.83	46.77	53.34	58.99
1 mm PLA-Al + 0.3 mm PLA-Bronze	30.37	40.53	48.98	55.80	61.55

#### IV. DISCUSSION

의료 방사선 검사 중 진단 X-선 검사는 다른 검사에 비해 낮은 피폭선량 비중을 나타내지만, 가장 높은 빈도로 시행된다고 보고되고 있다<sup>[13]</sup>. 과거 진단 X-선 검사 시 X-선 부가 필터에 관한 다양한 연구들이 이뤄져 왔으며<sup>[6,7,14]</sup>, 알루미늄(Al), 구리(Cu) 뿐만 아니라 Ni, 회중석(CaWO<sub>4</sub>), 브롬산 가돌리늄(Gd+Ba)에 대한 연구도 제시되었다<sup>[15]</sup>. 최근 적층 가공 방식을 이용한 3D 프린팅 기술은 의료분야 내에서 활발하게 적용되고 있으나<sup>[16]</sup>, 3D 프린팅 재료를 이용한 부가 필터의 적용에 관한 연구는 다소 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 금속분말이 함유된 3D 프린팅 재료를 이용한 X-선 부가 필터로의 적용 가능성에 대해 평가하고자 하였다.

본 연구의 결과에 따르면, 첫 번째, 디지털 X-선 영상장치별 스펙트럼의 비교 분석을 통해 방사선

원에 대한 신뢰성을 확보하였으며, X-선 장치 내부가 필터가 없는 경우 X-선관 내 고유 여과 두께에 비례하여 X-선 평균 에너지가 증가된 것으로 분석되었다. 두 번째, 부가 필터 재료인 Al, Cu, Al + Cu 필터와 동일한 두께의 3D 프린팅 재료 사용 시 발생하는 총 광자 플루언스의 경우, 기존 재료 대비 관전압에 따라 검출기 내 도달하는 광자수가 더 높은 결과를 보였으며, 이를 통해 기존 필터의 경우 더 높은 여과 효과를 나타낸 것으로 분석되었다. 또한 각 조건에 따른 X-선 스펙트럼 분석을 통해 평균 에너지를 산정한 결과, 기존 필터 대비 상대적으로 낮은 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 3D 프린팅 재료의 경우, 기존 필터로 구성된 단일 물질에 비해 밀도와 실효 원자번호가 상대적으로 낮은 이유인 것으로 생각되며, 평가한 3D 프린팅 재료 중 PLA-Cu에서 가장 높은 평균 에너지 분포를 나타낸 것으로 사료된다.

기존 부가 필터에 관한 연구에 따르면, 신수인 등<sup>[6]</sup>은 0.3 mmCu 필터 사용 시 15.9%의 평균 에너지 상승을 나타내었다고 보고하였으며, 본 연구에서도 필터 두께 증가에 따라 평균 에너지 상승되는 상응한 결과를 나타내었다. 또한 이초희 등<sup>[3]</sup>은 머리뼈 전후방향 촬영 시 구리와 알루미늄 혼합 필터 사용 시 흡수선량이 현저히 감소되었으며, 0.1 mmCu + 1~2 mmAl, 0.2 mmCu + 1 mmAl 조합에서 진단에 우수한 영상정보를 나타내었다고 보고하였다. 이처럼 진단 X-선 검사 시 여과에 의한 방법은 영상의 형성에는 영향을 주지 않고 환자에게 흡수되는 장과장의 X-선을 제거해주는 효과적인 방법으로<sup>[4]</sup>, 적정 여과판의 사용은 X-선 평균 에너지 증가에 따른 투과력 상승으로 피검자의 피폭 선량을 감소시킬 수 있다<sup>[17]</sup>. 현재 디지털 방사선 영상 시스템의 경우, flat-panel detector의 도입과 디지털 영상처리 기법의 발달로 인해 영상의 화질 저하 없이 환자선량을 감소시킬 수 있다고 제시하고 있다<sup>[18]</sup>. 향후 추가적인 연구를 통해 3D 프린팅 재료를 이용한 부가 필터 활용 시 영상 화질 평가 연구가 필요할 것으로 사료되며, 의료기관 내 3D 프린팅 X-선 부가 필터 제작을 위한 기초자료로서 활용될 수 있으리라 판단된다.

## V. CONCLUSION

본 연구에서는 모의실험을 통해 기존 X-선 부가 필터와의 비교 분석을 통해 3D 프린팅 재료에 대한 부가 필터로의 적용 가능성을 평가하였다. 3D 프린팅 재료 중 PLA-AI는 기존 AI 필터 대비 약 1.2 ~ 1.4배, PLA-Cu와 PLA-Bronze는 Cu 필터 대비 1.4 ~ 1.7배 정도의 두께가 필요한 것으로 분석되었다. 이처럼 X-선 부가 필터의 사용은 불필요한 저에너지 X-선 여과로 피검자의 피폭선량을 저감하고 영상 화질 개선에 도움될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 각 의료기관에 따라 진단 X-선 검사 시 진단참고수준을 고려한 검사 조건의 설정과 함께 디지털 방사선 영상 장치에 적합한 부가필터의 활용을 통해 선량 저감화를 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

이 연구는 2021년도 정보(과학기술정보통신부)의 재원으로 동남권원자력의학원 지원을 받아 수행된 연구임(No.50606-2021)

## Reference

- [1] Ministry of Food and Drug Safety, "Standard imaging methods in radiological examination", Radiation Safety Management Series, No. 38, 2014.
- [2] L. J. M. Kroft, Wouter J H Veldkamp, Bart J A Mertens, Jan Pieter A van Delft, Jacob Geleijns, "Detection of simulated nodules on clinical radiographs: dose reduction at digital posteroanterior chest radiography", *Radiology*, Vol. 241, No. 2, pp. 392-398, 2006.  
<https://doi.org/10.1148/radiol.2412051326>
- [3] C. H. Lee, C. S. Lim, "A Study on Added Filters for Reduction of Radiation Exposure Dose in Skull A-P Projection", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 12, No. 7, pp. 3117-3122, 2011.  
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2011.12.7.3117>
- [4] R. R. Carlton, A. M. Adler, Vesna Balac, "*Principles of Radiographic Imaging*", Cengage Learning. 2012.
- [5] J. G. Bailey, "Medical X-ray and Gamma Ray Protection for Energies up to 10 MeV-Equipment Design and Use : NCRP Report No. 33", *American journal of public health and the nation's health*, Vol. 58, No. 11, pp. 2176-2177, 1968.
- [6] S. I. Shin, C. Y. Kim, S. C. Kim, "The Study on the Reduction of Patient Surface Dose Through the use of Copper Filter in a Digital Chest Radiography", *Journal of radiological science and technology*, Vol. 31, No. 3, pp. 223-228, 2008.
- [7] N. G. Choi, H. J. Seong, J. S. Jeon, Y. H. Kim, D. O. Seong, "A Comparative Study of Image Quality and Radiation Dose according to Variable Added Filter and Radiation Exposure in Diagnostic X-ray Radiography", *Journal of radiation protection*, Vol. 37, No. 1, pp. 25-34, 2012.  
<https://doi.org/10.14407/jrp.2012.37.1.025>
- [8] S. H. Kim, "A Convergence Study on Evaluation of Usefulness of Copper Additional Filter in the Digital Radiography System", *Journal of Digital Convergence*, Vol. 13, No. 9, pp. 351-359, 2015.  
<https://doi.org/10.14400/JDC.2015.13.9.351>
- [9] 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.  
<http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2015.38.4.08>
- [10] M. Alssabbagh, A. A. Tajuddin, M. B. A. Manap, R. Zainon, "Evaluation of nine 3D printing materials as tissue equivalent materials in terms of mass attenuation coefficient and mass density", *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, Vol. 4, No. 9, pp. 168-173, 2017.  
<http://dx.doi.org/10.21833/ijaas.2017.09.024>
- [11] G. Poludniowski, G. Landry, F. Deblois, P. M. Evans, F. Verhaegen, "SpekCalc: a program to calculate photon spectra from tungsten anode x-ray tubes", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 54, No. 19, N433, 2009.
- [12] K. Cranley, "Catalogue of diagnostic x-ray spectra and other data", *The Institute of Physics and Engineering in Medicine Report*. 1997.
- [13] J. Thurston, "NCRP Report No. 160: ionizing radiation exposure of the population of the United States", *Physics In Medicine And Biology*, Vol. 55,

No. 20, pp. 6327, 2010.

<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/55/20/6327>

- [14] S. K. Shin, "Reducing Methods of Patient's Exposed Dose Using Auto Exposure Control System in Digital Radiography", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 36, No. 2, pp. 111-122, 2013.
- [15] D. Y. Lee, J. S. Lee, "Spatial Dose Distribution for Diagnostic X-ray Examination within X-ray Room using the MCNPX Program", *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 15, No. 11, pp. 298-306, 2015.  
<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.5392/JKCA.2015.15.11.298>
- [16] K. T. Kwon, D. Y. Yoon, R. U. Shin, B. J. Han, M. S. Yoon, "A Study on the Usefulness of Copper Filter in Single X-ray Whole Spine Lateral using 3D Printer", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 14, No. 7, pp. 899-906, 2020.
- [17] M. J. Oh, J. W. Hong, Y. J. Lee, "Comparison Evaluation of Image Quality with Different Thickness of Aluminum added Filter using GATE Simulation in Digital Radiography", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 13, No. 1, pp. 81-86, 2019.  
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.81>
- [18] O. W. Hamer, C. B. Sirlin, M. Strotzer, I. Borisch, N. Zorger, S. Feuerbach, M. Völk, "Chest radiography with a flat-panel detector: image quality with dose reduction after copper filtration", *Radiology*, Vol. 237, No. 2, pp. 691-700. 2005.  
<https://doi.org/10.1148/radiol.2372041738>



# 3D 프린팅 재료를 이용한 X-선 부가 여과 시 광자 스펙트럼에 대한 분석

조용인<sup>1</sup>, 이상호<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>동남권 원자력의학원 영상의학과

<sup>2</sup>동남권 원자력의학원 핵의학과

## 요 약

3D 프린팅 기술은 의료, 바이오 등 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 최근 소재 개발을 통해 금속 분말이 함유된 물질 등이 상용화되고 있다. 이에 본 연구에서는 모의실험을 통해 진단 X-선 검사 시 3D 프린팅 재료를 이용한 부가 여과 시 광자 스펙트럼을 분석하고자 한다. 몬테카를로 기법 중 MCNPX(ver. 2.5.0)를 이용하였으며, 첫 번째, 진단 분야에서의 X-선 스펙트럼 생성 프로그램인 SRS-78, SpekCalc를 통해 모의실험 내 발생된 광자 스펙트럼에 대한 적정성을 평가하였다. 두 번째, 금속분말이 함유된 3D 프린팅 재료에 대한 특성 평가를 위해 기존 Al, Cu 필터와 동일한 두께 내 광자 스펙트럼을 획득하였으며, 관전압 변화에 따른 광자 플루언스 및 평균 에너지 등을 비교 분석하였다. 그 결과, 동일한 여과 정도를 나타내기 위해 PLA-Al는 기존 Al 필터 대비 약 1.2 ~ 1.4배, PLA-Cu는 Cu 필터 대비 1.4 ~ 1.7배 정도의 두께가 필요한 것으로 분석되었다. 향후 본 연구를 토대로 의료분야 내 3D 프린팅 부가 필터 제작을 위한 기초 자료로서 활용될 수 있으리라 판단된다.

중심단어: 모의실험, 광자 스펙트럼, 부가 필터, 3D 프린팅 재료

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	조용인	동남권 원자력의학원 영상의학과	방사선사
(교신저자)	이상호	동남권 원자력의학원 핵의학과	방사선사