

<원저>

일반촬영분야에서의 3D 프린터로 제작한 텅스텐 혼합 필라멘트 차폐체의 성능평가

윤준¹⁾·윤명성²⁾

¹⁾동남보건대학교 방사선과·²⁾한양대학교 의과대학 응급의학교실

Evaluation of Tungsten Blended Filament Shields Made by 3D Printer in Radiography

Joon Yoon¹⁾·Myenog-Seong Yoon²⁾

¹⁾Department of Radiological Technology, Dongnam Health University

²⁾Department of Emergency Medicine, Hanyang University

Abstract In the medical field, radiation provides information for the diagnosis and treatment of diseases. As the use of radiation increases and the risk of exposure increases, interest in radiation protection is also rapidly increasing. Lead shielding material is mainly used, which has a risk of lead poisoning and absorption into the body. Tungsten mixed filament shielding sheets were fabricated with a size of 70 × 70 mm and a thickness of 1, 2, and 4 mm by using a 3D printer. In the general shooting experiment, the thickness of the shielding sheet is 1 ~ 5mm, the tube voltage is 60, 80, 100, 120 kVp and the tube current is 20, 40 mAs. In general photography, Tungsten showed better shielding rate compared to Brass, Copper, and Lead protective tools under all irradiation conditions, and in particular, Tungsten 5 mm showed 100% shielding rate. The 3D-printed tungsten mixed filament shielding is expected to be used as a new shield that can replace the existing lead protection tools as it shows a better shielding rate than the existing lead protection tools in Radiography.

Key Words: 3D printer, Shielding sheet, Tungsten, X-ray, Radiation

중심 단어: 3D 프린터, 차폐체, 텅스텐, 일반촬영, 방사선

1. 서론

방사선은 인체를 투과하여 감약된 에너지를 영상화하여 질병의 진단과 치료를 위한 정보를 제공하며 우리 생활에 있어서 많은 이점으로 사용되고 있다. 진단에 이용되는 방사선은 대부분 저준위에 속하지만 문턱값이 없어 반복적, 지속적으로 방사선에 노출되는 경우 확률적 영향의 발생 위험성을 가지고 있다[1]. 이에 국제방사선방호위원회(International Commission on Radiological Protector; ICRP)는 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)를

권고하였으며, 불필요한 방사선 피폭 방어를 위해 시간, 거리, 차폐의 방호 3대 원칙을 임상 현장에 적용하고 있다. 하지만 방사선 검사 시 시간 및 거리를 이용하는 데 한계가 있어 방사선사, 환자, 보호자 등에게까지 피폭의 영향을 주고 그 정도에 따라 심각한 장애를 초래할 수 있다[2, 3]. 현재 임상에서 방사선종사자의 피폭 감소를 위한 노력으로 가장 대표적인 예시로 차폐복을 사용하고 있으며, 이때 사용되는 납은 금속원소로 밀도가 높고 원자번호가 높으며, 광자에 대한 반응률과 차폐력이 뛰어나 방호도구로 사용되고 있다[4]. 하지만 납은 인체에 유해한 축적독성이 강한 대표적

Corresponding author: MyenogSeong Yoon, Department of Emergency medicine, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul, 04763, Republic of Korea / Tel: +82-2-2220-0114 / E-mail: yoon5690@naver.com

Received 14 September 2021; Revised 14 November 2021; Accepted 24 November 2021

Copyright ©2021 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

인 금속으로 알려져 있으며, OECD 회원국에서는 납 사용량을 낮추기 위해 법제화하고 있을 정도로 그 유해성이 이미 널리 알려져 있다[5]. 이를 대체할 무납차폐체의 연구는 활발하게 이루어지고 있으며 대표적으로 텅스텐의 경우 납보다 밀도가 높아 감쇠계수가 커져 입자와 반응하지 않고 독성이 없어 납 혼합 재료에 의한 2차 방사선을 처리하는데 탁월하여 납보다 높은 차폐효과가 기대되고 있어 납을 대체할 수 있는 차폐 물질로 선호되고 있다[6-9]. 하지만 Tungsten의 경우 희소 금속으로 전량 수입해 의존하고 있으며, 밀도와 경도, 녹는점이 높아 고온에서의 변형이 쉽지 않고 단단하기 때문에 가공이 어려운 점이 있다[10]. 이에 4차 산업혁명 시대에 대표적으로 대두되어 나날이 발전하고 있는 3D 프린팅 기술을 이용한다면 보다 저렴한 비용으로 제조할 수 있으며, 컴퓨터로 설계한 데이터를 시간과 장소에 구애받지 않고 원하는 모형으로 출력할 수 있다는 장점이 있다[11]. 또한, 재료가 플라스틱에서 금속까지 확대되고 있어 납과 동등한 차폐율을 가진 차폐체 제작에 효율적으로 대체 가능할 것으로 사료된다. 또한, 일반적으로 3D 프린터에 사용되는 필라멘트라는 재료는 제조사마다 그 성분이 다르며, Tungsten이라는 이름으로 판매되는 필라멘트들도 제조사마다 그 성능이 모두 다르다. 이에 본 연구에서는 함유율이 90.7% Tungsten 혼합 필라멘트 차폐 시트를 가공성과 경제성이 우수한 FDM 방식의 3D 프린팅 기술로 제작하고, 인체에 무해하며, 기존의 납과 동등한 차폐성을 가진 차폐체를 제작하여 X선에서의 차폐 가능성을 확인하고 진단적 가치가 있는지 알아보려고 한다.

II. 대상 및 방법

1. 3D 프린터와 Tungsten 혼합 필라멘트를 이용한 차폐 시트 제작

1) 3D 모델링

순도 90.7%의 Tungsten 혼합 필라멘트로 제작한 차폐 시트는 3D 설계프로그램인 Open source Free CAD 0.19를 사용하여 크기는 70×70 mm, 두께는 1 mm, 2 mm, 4 mm로 Fig. 1과 같이 제작하였다.

2) 출력변수 설정 및 G-code 변환

STL 파일로 변환된 3D 모델을 슬라이싱 프로그램(Cura 4.9.1, Ultimaker, Netherlands)을 이용하여 Table 1과 같이 출력 설정하고, G-code로 변환하였다.

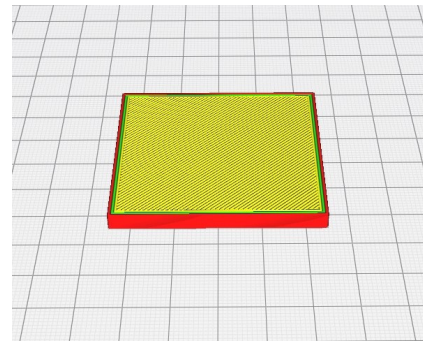


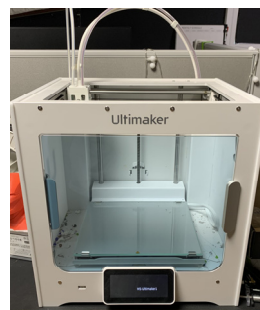
Fig. 1. 3D Printing Modeling for Shielding Sheet Production

Table 1. The output parameters of 3D printing

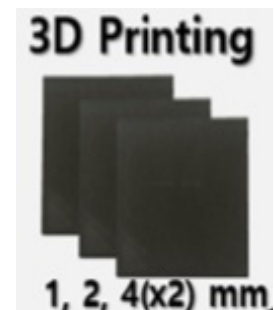
Parameter	Value
Temperature of printing (°C)	210
Bed temperature (°C)	60
Infill Density (%)	100
Nozzle size	0.6
Filament	Tungsten (7.5 g/cm ³)
	Brass (3.9 g/cm ³)
	Copper (4.7 g/cm ³)

3) 3D 프린팅 출력 및 차폐 시트 제작

전송된 G-code를 Fig. 2-(a) 3D 프린터 (Ultimaker, Netherlands)로 전송하여 Fig. 2-(b)와 같이 차폐 시트를 출력하였다.



(a) 3D Printer



(b) shielding sheet

Fig. 2. Shielding sheet output for dosimetric measurement

2. 선량 측정

1) X선에서의 선량 측정

순도 90.7%의 Tungsten 혼합 필라멘트를 사용하여 제작한 차폐 시트의 차폐 성능을 확인하기 위해 X선원과 차폐 시트의 거리는 1,000 mm, 차폐 시트와 선량 측정용 전리함

중심과의 거리는 50 mm로 위치하였다. Brass, Copper, Tungsten 혼합 필라멘트로 제작한 차폐 시트들을 각각 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm로 변화를 주며, X선 발생 장치(DR System, GX-650H, Dong Kang Korea)와 선량 측정용 전리함 (06-526, Fluke, USA)을 Fig. 3과 같이 위치시켜 선량을 검출하였다. 조사조건은 Table 2와 같으며 선량을 각 10회 측정하여 평균 선량을 산출하였다.

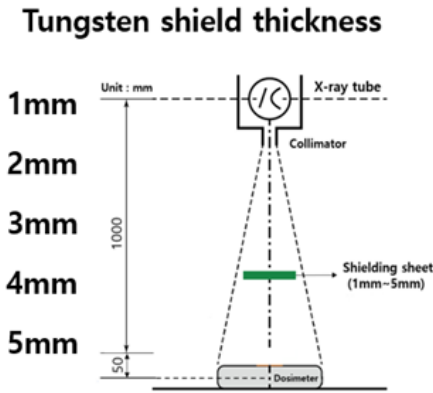


Fig. 3. Method of Dosimetry of Produced Shielding Sheets

Table 2. Parameter for dose measurement

Parameter	Value
Tube voltage [kVp]	60, 80, 100, 120
Tube current [mAs]	20, 40
Collimation [inch]	1.5 × 1.5
Filter [mmAl]	1.2

2) 차폐율 측정

차폐율은 Eq. 1과 같이 적용하여 계산하였다.

이때, W는 차폐체가 있을 경우의 조사선량이며, W₀는 차폐체가 없을 경우의 조사선량이다.

$$* \text{Shieldingrate}(\%) = \left(1 - \frac{W}{W_0}\right) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

* W: radiation dose and dose rate as measured at the shielding

W₀: radiation dose and dose rate as measured at the non-shielding

3) 납 방호도구의 선량측정

Tungsten으로 제작한 차폐 시트와 기존의 납 방호도구의 차이를 비교하기 위해 X선 실험에서는 추가적으로

Apron 0.175 mmPb, 0.25 mmPb, 0.35 mmPb, Thyroid protector의 조사선량 및 차폐율을 측정하고, 차폐 시트의 차폐율과 비교·분석하였다.

III. 결과

1. X선에서의 선량 측정

1) X선에서의 선량 측정 및 차폐율 평가

X선에서의 선량 및 차폐율 결과는 120 kVp, 20 mAs에서 차폐 시트가 없을 때 133.67 mR, Tungsten 1 mm는 7.33 mR로 94.52%, Brass 1 mm는 51.33 mR로 66.09%, Copper 1 mm는 45.33 mR로 61.6%를 확인할 수 있었다.

120 kVp, 40 mAs에서 차폐 시트가 없을 때, 274.33 mR, Tungsten 5 mm는 0 mR로 100%, Brass 5 mm는 28.33 mR로 92.1%, Copper 5 mm는 21.67 mR로 89.67%의 차폐율을 Table 3과 같이 확인하였다.

모든 조건에서 Tungsten과 Brass, Copper 1 mm부터 5 mm까지 비교하였을 때, Tungsten이 가장 우수한 차폐효과를 보였고, Tungsten, Brass, Copper 순으로 차폐율이 높음을 Fig. 4와 같이 확인하였다.

2) 납 방호도구와 차폐 시트의 차폐율 비교

납 방호도구의 선량 및 차폐율 결과는 120 kVp, 20 mAs에서 차폐 시트가 없을 때 133.67 mR, 0.175 mmPb는 32.33 mR로 75.81%, 0.25 mmPb는 19.33 mR로 85.54%, 0.35 mmPb와 Thyroid protector는 14.33 mR로 89.28%를 확인할 수 있었다.

120 kVp, 40 mAs에서 차폐 시트가 없을 때 274.33 mR, 0.175 mmPb는 63.67 mR로 76.79%, 0.25 mmPb는 19.33 mR로 86.03%, 0.35 mmPb는 28.67 mR로 89.55%, Thyroid protector는 27.67 mR로 89.91%의 차폐율을 확인할 수 있었다. 이를 Tungsten 차폐 시트와 비교하였을 때 120 kVp, 20 mAs에서 Tungsten 1 mm는 7.33 mR로 94.52%, 2 mm는 1.67 mR로 98.75%, 3 mm는 0.33 mR로 99.78%, 4 mm와 5 mm는 0 mR로 100%를 Table 4와 같이 확인할 수 있었다. 또한, 120 kVp, 40 mAs에서 Tungsten 1 mm는 13.67 mR로 95.00%, 2 mm는 3.67 mR로 98.66%, 3 mm는 0.67 mR로 99.78%, 4 mm는 0.33 mR로 99.88%, 5 mm는 0 mR 100%의 차폐율이 나온 것으로 보아 납 방호도구보다 우수한 차폐효과가 있음을 Fig. 5와 같이 확인할 수 있었다.

Table 3. The result of the radiation shielding sheet tests in X-ray (60, 80, 100, 120 kVp, 20, 40 mAs)

Sheet	kVp	mAs	X-ray									
			1 mm		2 mm		3 mm		4 mm		5 mm	
			Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]
Tungsten	60	20	0,67	98,38	0	100	0	100	0	100	0	100
		40	0,67	99,17	0	100	0	100	0	100	0	100
	80	20	1,67	97,52	0,33	99,51	0	100	0	100	0	100
		40	3,67	97,29	1,33	99,02	0	100	0	100	0	100
	100	20	3,33	96,58	1,33	98,63	0	100	0	100	0	100
		40	8,33	95,80	1,67	99,16	0,33	99,83	0	100	0	100
	120	20	7,33	94,52	1,67	98,75	0,33	99,75	0	100	0	100
		40	13,67	95,00	3,67	98,66	0,67	99,78	0,33	99,88	0	100
Brass	60	20	5,67	86,28	1,67	95,96	0,67	98,38	0	100	0	100
		40	10,67	86,83	3,67	95,47	1,67	97,94	0	100	0	100
	80	20	15,33	77,23	7,33	89,11	3,67	94,55	2,33	96,54	1,33	98,02
		40	29,67	78,13	14,33	89,44	7,67	94,35	5,67	95,82	3,33	97,55
	100	20	30,33	68,84	17,33	82,19	11,33	88,36	8,33	91,44	6,33	93,50
		40	60,67	69,41	34,67	82,52	23,33	88,24	16,67	91,59	12,33	93,78
	120	20	51,33	61,60	32,67	75,56	23,67	82,29	17,67	86,78	14,67	89,02
		40	103,67	62,21	66,33	75,82	47,67	82,62	37,33	86,39	28,33	89,67
Copper	60	20	3,67	91,12	0,67	98,38	0,33	99,20	0	100	0	100
		40	7,33	90,95	1,67	97,94	0,67	99,17	0	100	0	100
	80	20	11,67	82,67	5,33	92,08	2,67	96,03	1,67	97,52	0,67	99,00
		40	23,67	82,55	10,33	92,39	5,67	95,82	3,33	97,55	1,67	98,77
	100	20	25,33	73,98	13,67	85,95	9,67	90,06	5,67	94,17	3,67	96,23
		40	50,67	74,45	28,67	85,54	17,33	91,26	11,67	94,12	8,67	95,63
	120	20	45,33	66,09	26,67	80,05	19,33	85,54	14,33	89,28	10,33	92,27
		40	89,67	67,31	55,67	79,77	38,67	85,90	28,33	89,67	21,67	92,10

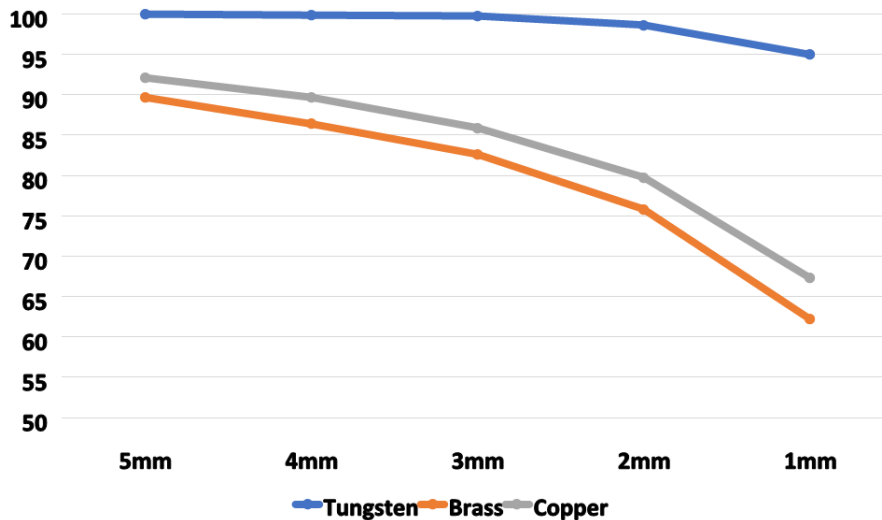
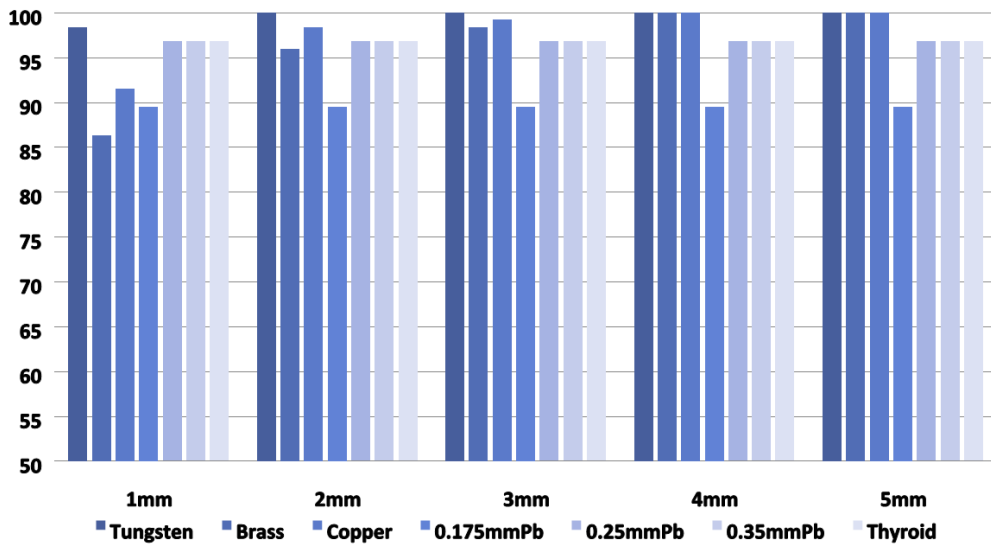


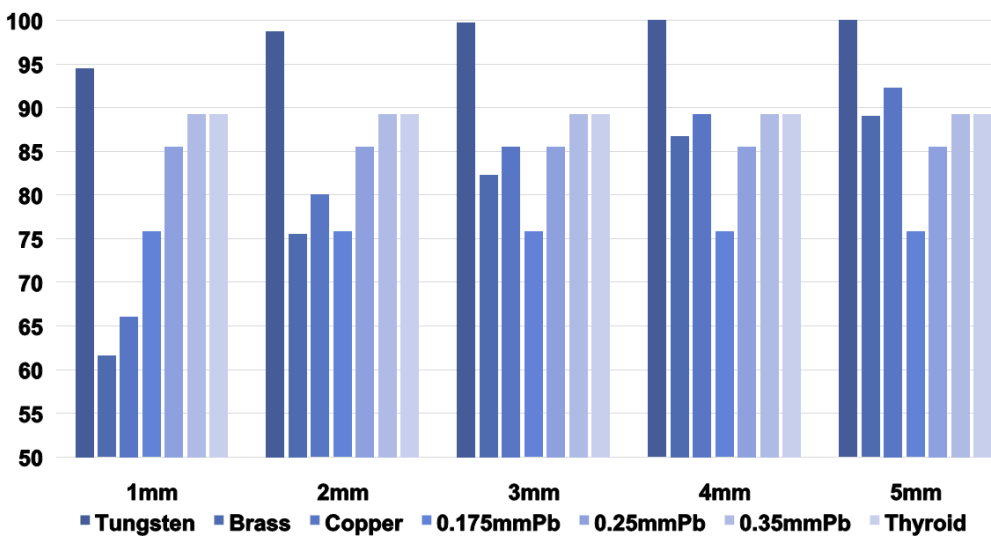
Fig. 4. Results of graph for shielding rate according to sheet thickness in X-ray. (120kVp, 40 mAs)

Table 4. The result of the radiation Apron, Thyroid protector tests in X-ray. (60, 80, 100, 120 kVp, 20, 40 mAs)

kVp	mAs	None	0.175 mmPb		0.25 mmPb		0.35 mmPb		Thyroid protector	
		Dose [mR]	Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]	Dose [mR]	shielding rate [%]
60	20	41.33	4.33	89.52	1.33	96.78	1.33	96.78	1.33	96.78
	40	81.00	7.67	90.53	1.33	98.36	1.33	98.36	1.33	98.36
80	20	67.33	9.33	86.14	4.33	93.63	2.33	96.54	2.67	96.03
	40	135.67	18.67	86.24	8.33	93.86	4.33	96.81	5.33	96.07
100	20	97.33	17.67	81.85	10.67	89.04	6.67	93.15	7.67	92.12
	40	198.33	37.67	81.01	21.33	89.25	13.33	93.28	15.33	92.27
120	20	133.67	32.33	75.81	19.33	85.54	14.33	89.28	14.33	89.28
	40	274.33	63.67	76.79	38.33	86.03	28.67	89.55	27.67	89.91



(a) 60 kVp, 20 mAs



(b) 120 kVp, 40 mAs

Fig. 5. Comparative evaluation of the manufactured shielding sheet and lead protection tool.

IV. 고 찰

현대의학의 발전과 의료서비스의 향상으로 진단 및 치료를 위한 방사선 사용량이 증가하였고, 그에 따라 피폭에 대한 위험성과 방사선 방위에 관한 관심이 급증하였다. 영상의학의 방사선에너지 영역은 저에너지 영역이지만 장기적인 피폭을 받아 생기는 문제를 무시할 수 없으며, 이를 위해 현재 임상에서는 피폭 감소를 위한 노력으로 가장 대표적인 예시로 차폐복을 사용하고 있다. 이때 사용되는 납은 금속 원소로 밀도가 높고 원자번호가 높으며 광자에 대한 반응률과 차폐력이 뛰어나 방호도구로 사용되고 있다[4]. 하지만, 납은 인체의 혈액에 들어가면 적혈구와 결합하는 납중독의 위험성 등이 있어 납을 대체할 수 있는 차폐 재료의 연구가 활발하게 진행 중이다[12]. 이처럼 납의 한계점을 고려한 무납 차폐체에 관한 연구가 지속해서 이루어지고 있지만, 경제성과 가공성 측면에서의 제한점이 있다. 이에 납중독의 위험성이 없으며 밀도가 7.5 g/cm^3 인 Tungsten 혼합 필라멘트와 3D 프린팅 기술을 이용하여 Tungsten 혼합 필라멘트 차폐 시트를 제작하고 X선을 투과하였을 때의 선량과 차폐율을 확인해 보았다[13]. 차폐율의 비교를 위해 X선 실험에서는 Tungsten을 비롯해 Brass, Copper 혼합 필라멘트 차폐 시트와 Apron 0.175, 0.25, 0.35 mmPb, Thyroid protector를 이용하여 실험을 진행하였다. X선 실험에서는 선행 연구를 참고하여 관전압은 60, 80, 100, 120 kVp로 관전류량은 20, 40 mAs로 변경하며 실험을 하였다[14]. X선에서의 실험에서 쓰인 차폐 시트와 납 방호도구 중 차폐율이 가장 높은 것은 Tungsten 혼합 필라멘트로 제작한 차폐 시트였으며, 1 mm일 때부터 90% 이상의 차폐율을 보였다. 기존 납 방호도구와도 비교하였을 때 0.175 mmPb, 0.25 mmPb, 0.35 mmPb, Thyroid protector 모두 Tungsten 혼합 차폐 시트보다 낮은 차폐율을 나타내었고, 이를 통해 납 대체 가능성을 확인하였다. 3D 프린팅 기술을 이용하여 납 대체 차폐체를 만들기 위해 Aluminium, Barium, Brass, Bismuth, Tungsten과 PLA 및 ABS의 혼합물 등을 사용한 무납 차폐체 연구가 활발하게 진행되었다[15,16]. 하지만 Tungsten과 PLA 및 ABS를 혼합하여 제작한 차폐체 연구의 경우는 Tungsten의 적은 함유량으로 인해 본 연구보다 낮은 차폐율을 확인할 수 있었다[10]. 일반적으로 3D 프린터에 사용되는 필라멘트라는 재료는 제조사마다 그 성분이 다르며, Tungsten이라는 이름으로 판매되는 필라멘트들도 제조사마다 그 성능이 모두 다르며 선행 연구에 제시되었던 필라멘트보다 차폐율이 월등한 것을 확인하였다. 3D 프린팅은 적층 시 필요한 서포터나 굴곡의 적층은 재료

성질에 따라 출력 제품의 질을 좌우할 것으로 사료된다. Tungsten 혼합 필라멘트를 사용하여 차폐체를 제작한 실험은 부족한 실정이며, 기존 연구들은 대부분 시뮬레이션으로 실험을 진행하였다. 이에 본 연구에 사용한 필라멘트는 함유율이 90.7에 다다르며 Tungsten 혼합 필라멘트를 사용하여 실질적으로 임상에서 사용하고 있는 납 방호도구와의 비교평가를 통해 성능이 떨어지지 않다는 것을 확인하였다. 차폐 시트의 소재인 Tungsten은 유연하지 않기 때문에 다른 물질과 적절하게 혼합하여 유연한 차폐 시트에 관한 연구를 한다면 납 방호도구로 제작하여 일반촬영과 핵의학, 더 나아가 방사선치료분야에도 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

V. 결론

Tungsten 혼합 필라멘트를 3D 프린팅 기술을 통해 차폐 시트를 제작하여, 진단영역에서도 차폐 가능성을 확인하여 진단적 가치를 확인하였다. 제작된 Tungsten 차폐 시트는 임상에서 사용되는 방호도구를 대신할 수 있을 것으로 판단되며 추후 연구를 통해 핵의학, 치료분야에서도 적용될 수 있을 것이라 사료된다.

REFERENCES

- [1] Jang HM, Yoon J. Usefulness Evaluation and Fabrication of the Radiation Shield Using 3D Printing Technology. *Journal of the Korea Society of the Korean Society of Radiology*. 2019;13(7): 1015-24.
- [2] Jang DG, Kim GH, Park CW. Analysis of Shielding Effect of Lead and Tungsten by use of Medical Radiation. *Journal of the Korean Society of Radiology*. 2018;12(2):173-8.
- [3] Kim YS, Seo MD, Lee WK, Jeong YC, Kim SW, Seo IT, Song JB. The Usefulness Evaluation of Radiation Shielding Devices in PET Scan Procedures. *The Korean Journal of Nuclear Medicine Technology*. 2010;14(2):65-76.
- [4] World Health Organization. Lead (Environmental Health Criteria). 1997:44-54.
- [5] Park HH. The Evaluation of Performance and

- Usability of Bismuth, Tungsten Based Shields, Journal of Radiological Science and Technology, 2018;41(6):611-6.
- [6] Park YS, Lee IS, Dong KR. Compare Shielding Performance Evaluation of Lead Alternatives, Journal of Advanced Engineering and Technology, 2015;8(1):79-85.
- [7] Yun JH, Hou JA, Jang WG, Kim JH, Byun HS. Preparation and Optimization of Composition of Medical X-ray Shielding Sheet Using Tungsten, Polymer(Korea), 2019;43(3):346-50.
- [8] Kim SC. Prediction of Shielding Performance by Thickness by Comparing the Single and Laminated Structures of Lead-free Radiation Fusion Shielding Sheets, Journal of the Korea Convergence Society, 2021;12(1):105-10.
- [9] 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.
- [10] Eom DG, Kim SH. 3D Printing of Tungsten-Polymer Composites for Radiation Shielding, Journal of the Korean Society of Radiology, 2020; 14(5):643-50.
- [11] OH WG. Development of 3D Printer System for Making Customized Bone Models of Orthopedic Surgery Patient dissertation, Cheong Joo: University of Choong Book; 2014.
- [12] Wu Y, Cao Y, Wu Y, Li D. Mechanical Properties and Gamma-Ray Shielding Performance of 3D-Printed Poly-Ether-Ether-Ketone/Tungsten Composites, Materials, 2020;13(20):4475.
- [13] Ji SY. Study on Improvement of Tungsten Alloy Granular Powder in Defense Industry, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 2020;21(10):206-11.
- [14] Lee WH, Ahn SM. Evaluation of Reductive Effect of Exposure Dose by Using Air Gap Apron in Nuclear Medicine Related Work Environment, The Journal of the Korea Contents Association, 2014;14(12): 845-53.
- [15] Gang HH, Kim DH. A Study on Barium Mixed Radiation Shield using 3D printer, J. Korean Soc. Radiol, 2020;14(5):627-34.
- [16] Cho YI. A Study on the Design Method of Radiation Shielding Devices Using 3D Printing Material [dissertation], Dept. of Radiological Science, Graduate School, Catholic University of Pusan; 2019.

구분	성명	소속	직위
제1저자	윤 준	동남보건대학교 방사선과	부교수
교신저자	윤명성	한양대학교 의과대학	박사