

Development and Evaluation of Shielding with Mixed Iron- oxide-copper Filament using 3D printing

Nareoyng Shin¹, Seong-gwan Nam¹, JiSu Kang¹, GeonJu Lee¹, HuiMin Jang^{1,2}, Myeong-Seong Yoon^{1,3}, Dong-Kyoon Han^{1,*}

¹Department of Radiological Science, College of Helath Sciences, Eulji University

²Department of Radiology Namcheon Hospital

³MIP(Medical Imaging Process) Lab

Received: November 04, 2024. Revised: November 29, 2024. Accepted: November 30, 2024.

ABSTRACT

This study developed a lead-free shielding material using a filament made from a mixture of iron oxide and copper to address the toxicity issues associated with lead-based shielding. After creating the filaments, various thicknesses of shielding materials were printed using a FDM 3D printer. Shielding performance and dose measurements were taken by varying the tube voltage and current with a diagnostic X-ray generator, and data analysis was performed using SPSS ($p < 0.05$). The results showed that the iron oxide-copper mixed filament shielding exhibited better performance than a 0.25 mmPb lead-equivalent protection tool at thicknesses of 8 mm or more, except for the conditions of 120 kVp and 20 mAs. This research demonstrates that the mixed filament shielding can mitigate the drawbacks of lead while providing comparable shielding effectiveness, suggesting its potential as foundational data for further studies on lead-free shielding materials.

Keywords: 3D printing, X-ray shielding, Lead-free Shielding, Iron oxide, Lead, Filament

I. INTRODUCTION

현대의학에서 방사선은 질병의 진단 및 치료에 있어 필수적인 역할을 하고 있다. 특히 X선 검사는 비침습적으로 인체 내 구조를 확인할 수 있는 장점 덕분에 광범위하게 사용되고 있으며, 다양한 질병의 조기 발견과 치료에 기여하고 있다^[1].

그러나 방사선 노출은 여러 장애를 초래할 수 있으며, 특히 저 에너지 영역의 방사선도 장기간 피폭 시 확률적 영향의 증가로 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있다^[2]. 이러한 이유로 방사선 차폐는 환자과 의료진 모두에게 필수적인 요소이다^[3].

의료 분야에서 사용되는 차폐체의 주 재료인 납은 인체에 유해한 중금속으로 분류되어 납중독과 같은 문제를 일으킬 수 있어^[4] 이를 대체할 무납 차폐체의 연구가 많이 이루어지고 있다^[5-6]. 그 중 3D

프린팅 기술의 적용은 무납 차폐체 연구의 새로운 방향성을 제시할 수 있을 것이라 사료된다. 3D 프린팅은 원하는 모형의 데이터만 있으면 필라멘트를 이용하여 시간과 장소에 구애받지 않고 출력할 수 있으며, 맞춤형 제작이 가능하여 개별 환자나 특정 장비에 적합한 차폐체를 효율적으로 제작할 수 있다^[7].

기존 3D 프린팅을 위한 필라멘트는 생분해성인 TPU(Thermoplastic Polyurethane), 고기능성이고 기계적으로 견고한 PBT(Polybutylene Terephthalate) 등의 플라스틱이 사용되고 있다^[8]. 그러나 이러한 필라멘트는 대부분 플라스틱 기반으로 밀도가 낮아 차폐 성능이 필요한 응용 분야에 적합하지 않다^[9].

따라서 차폐 기능이 요구되는 경우, 보다 높은 밀도의 재료가 필요하다. 이를 위해 금속 필라멘트나 특수 복합재료의 개발이 요구되고 있다. 최근

* Corresponding Author: Dong-Kyoon Han E-mail: handk@eulji.ac.kr

Tel: +82-31-740-7276

3D 프린팅 재료의 범위가 확대되면서 금속분말이 추가된 필라멘트에 관한 연구도 이루어지고 있다^[10]. 이에 따라 3D프린팅 기술 또한 발전되면서 이를 이용한 방사선 차폐체에 관한 연구 또한 활발히 진행되고 있다^[11]. 차폐체로 사용되는 금속 필라멘트에는 텅스텐(Tungsten, W, Z=74), 비스무스(Bismuth, Bi, Z=83) 등이 사용되고 있다^[12]. 텅스텐은 높은 밀도와 강한 기계적 성질로 인해 방사선 차폐에 효과적이며^[13], 비스무스는 상대적으로 낮은 독성과 우수한 차폐 능력을 갖추고 있어 환경적인 측면에서도 장점이 있다^[14].

그러나 이들 소재는 높은 비용과 복잡한 가공 과정으로 인해 상업적으로 활용하기 어려운 점이 많아^[5,6], 연구자들은 보다 저비용이며 효과적인 대체 소재를 모색하고 있다^[15]. 이를 위한 대안으로 안정적인 차폐 성능과 합리적인 비용의 산화철(Fe_2O_3)과 높은 차폐 능력을 갖춘 구리(Cu), 내열성과 내화학성이 뛰어난 PBT를 선택하였다^[16].

이에 본 연구는 구리(Cu)와 산화철(Fe_2O_3)을 PBT 기반의 필라멘트 원재료와 혼합함으로써 새로운 필라멘트를 개발하고, 차폐체를 제작해 X-선 차폐율을 평가하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 산화철 이용한 금속 혼합 필라멘트 제작 및

Pilot Test

산화철 필라멘트를 개발하기 위해 산화철 파우더와 PBT기반의 혼합 비율을 달리하여 Fig. 1, Fig. 2와 같이 4종류의 필라멘트를 개발하였다

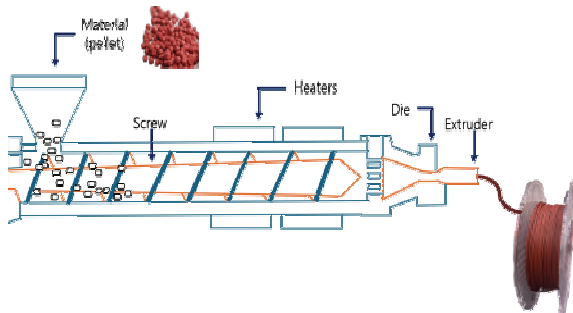


Fig. 1. Filament extruder and schematic diagram.

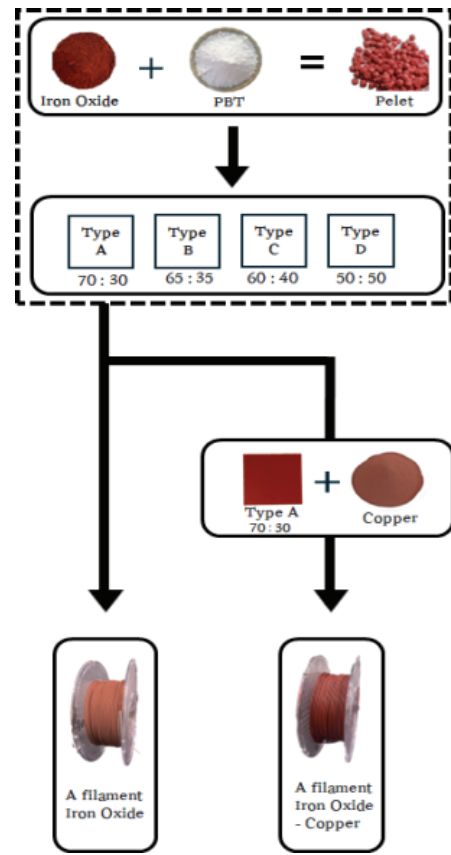


Fig. 2. Flow chart for self-made filament development.

1.1. 산화철 필라멘트(A) 제작

4종의 산화철 필라멘트를 제작하였다. 이를 위해 산화철 파우더와 PBT를 혼합하였으며 혼합 비율은 Type 별로 상이하게 설정하였다. Type A는 70 : 30%, Type B는 65 : 35%, Type C는 60 : 40%, Type D는 50 : 50%으로 달리하여 4종류의 산화철 필라멘트(A)를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 각 파우더를 혼합하여 작은 고체 입자로 펠렛화 하였다. 펠렛을 압출기에 넣어 히터 가열을 하며 녹아 스크류를 통해 앞으로 나아가면서 필라멘트 형태로 압출한다. 압출된 필라멘트는 수조 통의 라인을 따라 열변형을 최소화하였으며 냉각 후 젖은 필라멘트를 건조 과정을 거쳐 레이저 포인트를 이용하여 직경 1.75 ± 0.05 mm의 두께로 제작하였다.

1.2. Pilot Test

산화철 비율에 따른 차폐율 비교를 위해 Pilot Test를 진행하였다. 서로 다른 4종류의 산화철 필라

멘트를 슬라이싱 프로그램 Bambu Studio v1.9.3.50 (Bambu, China)를 사용하여 기본 모델링 사각형을 이용하여 크기는 $70 \times 70 \text{ mm}^2$, 두께는 1, 2, 4 mm로 모델링 후 3D 프린터(A1. Bambu, China)로 출력하였다. 이후 진단용 X선 발생 장치(m-38, SITEC, South Korea)를 사용해 120 kVp, 2.5 mAs의 조건으로 차폐체의 두께를 1 mm부터 10 mm까지 올리며, 각 5회씩 선량값을 측정하고 차폐율을 비교하였다.

2. 구리와 산화철 이용한 금속 혼합 필라멘트 개발

2.1. 산화철-구리 혼합 필라멘트(B) 제작

Pilot Test 결과를 토대로 선정된 필라멘트와 구리 파우더를 Type A와 동일한 70 : 30의 비율로 혼합하여 Fig. 1과 같이 산화철-구리 혼합 필라멘트를 제작하였다. 제작 과정은 전과 동일하며, 자체 제작한 필라멘트를 이용하여 Fig. 3과 같은 과정으로 차폐 시트를 출력하였다.

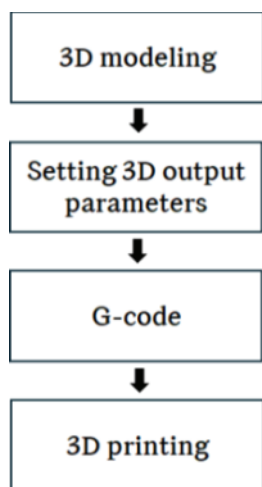


Fig. 3. 3D Printing Modeling for Shielding Sheet Production.

3. 선량 측정

3.1. X선에서의 선량 측정

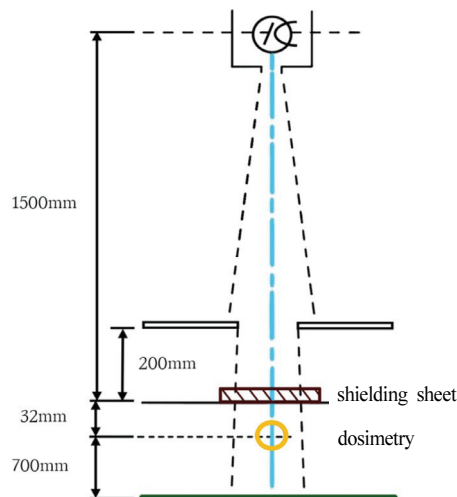
3D 프린터를 이용해 산화철 혼합 필라멘트 차폐체를 Fig. 4와 같이 위치하였다. 조사 선량계 (MagicMax Universal, IBA)를 이용하여 선량을 측정하였다. 선량 측정 시 조사 조건은 Table. 1과 같으며, 차폐체의 두께를 1 mm부터 10 mm까지 올리며, 각 5회 측정하여 평균 선량값을 측정하였다.

Table 1. Parameter for dose measurement

Parameter	Value
Tube voltage [kVp]	60, 80, 100, 120
Tube current [mAs]	20, 40
Collimation [cm]	4 × 4



(a) X-ray equipment used for dose measurement



(b) Diagram of the Experimental Method

Fig. 4. Dosimetry Method of Produced Shielding Sheets.

3.2. 차폐율 측정

차폐율은 Eq. 1과 같이 적용하여 계산하였다. 이 때, W는 차폐체가 있을 경우의 조사선량이며, W₀는 차폐체가 없을 경우의 조사선량이다.

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

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

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

3.3. 기존 차폐체와의 선량 측정 비교

산화철 - 구리 혼합 필라멘트로 제작한 차폐체의 차폐율을 비교하기 위해 산화철 필라멘트 차폐체와 임상에서 쓰이는 납 Apron 0.25 mmPb의 조사선량 및 차폐율을 측정하였고, 산화철 - 구리 혼합 필라멘트의 차폐율과 비교 및 분석하였다.

4. 분석

IBM SPSS Statistics 30.0.0(IBM Co, Chicago, USA)을 이용하여 비모수 검정인 Mann-Whitney U 검정을 선량에 대해 시행하였으며, p-value 0.05 이상에서 유의한 차이가 없다고 판단하였다.

III. RESULT

1. Pilot test 결과

1.1. 산화철 필라멘트 차폐체 Type A-D의 차폐율 비교

120 kVp, 2.5 mAs에서 조사선량은 32.78 mR이었으며, 이때 차폐율은 4 mm에서부터 Type A의 경우 80%의 차폐율을 확인하였고, Type B는 79.98%, Type C는 77.44%, Type D는 66.84%로 Table. 2, Table. 3과 같이 나타났다.

Table 2. Radiation exposure of self-produced Iron oxide filament (120 kVp, 2.5 mAs)

Sheet [ratio]	Exposure [mR]				
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
A [70%]	22.3	16.23	12.75	10.23	7.93
B [65%]	22.35	17.26	13.47	10.32	8.08
C [60%]	23.04	17.51	14.74	11.63	8.947
D [50%]	26.58	22.18	19.3	17.09	15.43
	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
A [70%]	6.3	4.84	4.02	3.39	2.81
B [65%]	6.63	5.24	4.26	3.51	2.93
C [60%]	7.352	5.876	4.811	4.178	3.55
D [50%]	13.86	12.67	11.67	10.91	10.1

Table 3. Shielding ratio of self-produced Iron oxide filament (120 kVp, 2.5 mAs)

Sheet [ratio]	Exposure [mR]				
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
A [70%]	56.64	65.81	75.26	80.15	84.61
B [65%]	56.60	68.51	73.8	79.98	84.31
C [60%]	55.30	66.03	71.40	77.44	82.64
D [50%]	48.43	56.97	62.55	66.84	70.06
	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10mm
A [70%]	87.77	90.6	92.19	93.41	94.55
B [65%]	87.13	89.8	91.7	93.17	94.30
C [60%]	85.74	88.60	90.67	91.89	93.11
D [50%]	73.11	75.42	77.36	78.83	80.40

2. 차폐율 측정을 위한 차폐 시트 출력



Fig. 5. Shielding Sheet Production.

Pilot Test 결과, 차폐율이 가장 높았던 Type A 필라멘트에 구리를 혼합하여, 산화철-구리 혼합 필라멘트를 제작하였다. 제작한 산화철-구리 혼합 필라멘트 차폐체를 3D 프린터로 Fig. 5와 같이 출력하였다.

3. 선량 및 차폐율 측정 결과

3.1. 산화철-구리 혼합, 산화철 필라멘트 차폐체의 선량

120 kVp, 20 mAs 조건에서 차폐 시트가 없을 때 조사선량은 549.1 mR로 측정되었습니다. 산화철-구리 혼합 필라멘트의 3 mm 두께에서는 107.27 mR, 산화철 필라멘트의 경우 150.06 mR로 나타났습니다. 120 kVp, 40 mAs 조건에서는 차폐 시트가 없을 때 조사선량이 729.7 mR이 측정되었으며, 산화철-구리 혼합 필라멘트의 8 mm 두께에서 67.84 mR, 산화철 필라멘트에서는 101.49 mR로 Table 4와 같이 나타났습니다.

3.2. 납 방호도구의 선량

120 kVp, 20 mAs 조건에서 납 방호도구 0.25 mmPb의 조사선량은 1.34 mR로 측정되었으며, 120 kVp, 40 mAs 조건에서는 84.42 mR로 Table. 5와 같이 나타났습니다.

3.3. 산화철-구리 혼합, 산화철 필라멘트 차폐체의 차폐율

120 kVp, 20 mAs 조건에서 차폐율은 산화철-구리 혼합 필라멘트 차폐체의 3 mm 두께에서 70.54%, 산화철 필라멘트 차폐체는 3 mm 두께에서 58.72%로 측정되었다. 120 kVp, 40 mAs 조건에서 차폐율은 산화철-구리 혼합 필라멘트 차폐체의 8 mm 두께에서 90.7%, 산화철 필라멘트 차폐체는 8 mm 두께에서 86.09%로 Table. 6과 같이 나타났습니다.

3.4. 납 방호도구의 차폐율

120 kVp, 20 mAs 조건에서 차폐율은 납당량 0.25 mmPb의 납 방호도구는 88.45%로 측정되었으며, 120 kVp, 40 mAs 조건에서는 88.43%로 Table 7과 같이 나타났습니다.

3.5. 납 방호도구와의 비교

산화철 필라멘트 8 mm 두께에서의 차폐율은 60 kVp에서 20 mAs 조건에서 95.02%, 40 mAs 조건에서 95.09%로 측정되었다. 120 kVp에서는 20 mAs 조건에서 86.06%, 40 mAs 조건에서 86.09%로 나타났다. 이 모든 조건에서 산화철 필라멘트의 차폐율은 납 방호도구보다 낮았으며, 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$).

반면, 산화철-구리 필라멘트 8 mm 두께의 차폐율은 60 kVp에서 20 mAs 조건에서 99.19%, 40 mAs 조건에서 99.06%로 나타났다. 120 kVp에서는 20 mAs 조건에서 87.10%, 40 mAs 조건에서 90.70%의 차폐율을 보였다. 120 kVp, 20 mAs 조건을 제외한 나머지 조건에서 산화철-구리 필라멘트는 납 방호도구보다 높은 차폐율을 나타냈고, 모든 조건에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($p < 0.05$).

IV. DISCUSSION

환자의 진단을 위한 X선 검사는 꾸준히 증가하고 있으며, 환자와 의료진이 받는 피폭의 양 또한 증가하고 있다^[17]. 이에 따라 방사선 방호의 관심이 높아지고 있으며, 방호의 3원칙 시간, 거리, 차폐를 임상 현장에 적용하고 있으나, 시간과 거리를 조절하는 데는 한계가 존재한다^[18]. 그렇기에 차폐체의 역할이 중요하며^[19], 현재 임상에서는 X선을 차폐하기 위한 대표적인 물질로 납이 사용되고 있다. 하지만 납은 중금속 물질로 독성이 있으며^[4], 무게가 무거워 오랜 시간 사용이 어렵다.

따라서 납을 대체할 수 있는 새로운 차폐 물질에 대한 개발이 이루어지고 있다^{[5][6]}. 금속 필라멘트를 활용한 3D 프린팅 기술을 이용하는 것이다. 차폐를 위해선 일반 필라멘트에 금속 분말을 추가하여 방사선 차폐율을 높여야 한다. 하지만 이와 같은 특수 필라멘트에 대한 개발 및 연구는 미비한 상황이다^[20].

Table 4. Iron oxide and iron oxide-copper shielding dosimetry results

Sheet	kVp	mA _s	Exposure [mR]													
			1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm				
			Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	
Iron Oxide	60	20	66.53 ± 0.04	43.46 ± 0.03	29.41 ± 0.02	20.40 ± 0.05	14.39 ± 0.01	10.25 ± 0.02	7.38 ± 0.01	5.41 ± 0.01	3.96 ± 0.04	2.95 ± 0.01				
		40	134.05 ± 0.05	87.32 ± 0.01	59.03 ± 0.03	40.64 ± 0.02	28.53 ± 0.02	20.43 ± 0.01	14.84 ± 0.03	10.78 ± 0.02	7.89 ± 0.05	5.85 ± 0.01				
	80	20	122.44 ± 0.39	84.82 ± 0.08	60.68 ± 0.13	43.74 ± 0.04	32.29 ± 0.04	24.02 ± 0.01	17.94 ± 0.05	13.63 ± 0.03	10.40 ± 0.02	7.97 ± 0.01				
		40	246.67 ± 0.04	170.80 ± 0.01	121.28 ± 0.02	88.01 ± 0.01	64.21 ± 0.01	48.01 ± 0.03	35.92 ± 0.03	27.76 ± 0.01	20.74 ± 0.04	15.90 ± 0.01				
Iron Oxide	100	20	189.06 ± 0.09	137.42 ± 0.08	102.32 ± 0.22	77.97 ± 0.04	60.19 ± 0.01	47.27 ± 0.04	35.80 ± 0.02	28.40 ± 0.01	22.77 ± 0.01	18.40 ± 0.22				
		40	380.04 ± 0.03	276.10 ± 0.06	205.68 ± 0.02	156.53 ± 0.02	120.07 ± 0.07	93.45 ± 0.03	71.87 ± 0.02	57.03 ± 0.03	45.70 ± 0.01	36.74 ± 0.02				
	120	20	262.10 ± 0.03	198.34 ± 0.09	150.06 ± 0.08	117.90 ± 0.05	93.21 ± 0.01	75.86 ± 0.02	61.47 ± 0.03	50.76 ± 0.04	41.06 ± 0.06	35.01 ± 0.02				
		40	526.72 ± 0.02	400.38 ± 0.57	301.23 ± 0.02	237.11 ± 0.02	188.12 ± 0.03	151.91 ± 0.04	123.38 ± 0.03	101.49 ± 0.01	84.23 ± 0.02	70.30 ± 0.01				
Copper	60	20	29.50 ± 0.07	28.75 ± 0.04	11.04 ± 0.01	50.04 ± 0.01	4.39 ± 0.01	2.03 ± 0.05	1.96 ± 0.05	0.88 ± 0.01	0.88 ± 0.03	0.43 ± 0.03				
		40	61.32 ± 0.02	65.59 ± 0.03	24.64 ± 0.03	10.91 ± 0.01	9.06 ± 0.02	4.39 ± 0.06	4.22 ± 0.01	2.06 ± 0.04	1.83 ± 0.01	0.89 ± 0.01				
	80	20	67.80 ± 0.04	61.70 ± 0.42	28.07 ± 0.01	17.38 ± 0.01	15.42 ± 0.04	9.38 ± 0.05	8.13 ± 0.01	5.15 ± 0.01	4.29 ± 0.02	2.87 ± 0.04				
		40	137.51 ± 0.01	136.93 ± 0.04	65.81 ± 0.01	56.65 ± 0.03	34.04 ± 0.05	30.77 ± 0.06	18.87 ± 0.01	12.01 ± 0.01	9.77 ± 0.02	6.61 ± 0.01				
Copper	100	20	118.90 ± 0.16	106.01 ± 0.01	57.90 ± 0.03	39.69 ± 0.04	32.34 ± 0.21	25.40 ± 0.01	20.12 ± 0.02	14.75 ± 0.03	13.52 ± 0.01	10.33 ± 0.05				
		40	239.99 ± 0.01	213.04 ± 0.04	123.04 ± 0.05	115.82 ± 0.03	76.01 ± 0.01	65.21 ± 0.01	48.21 ± 0.01	35.93 ± 0.04	29.49 ± 0.01	22.58 ± 0.01				
	120	20	180.18 ± 0.04	174.57 ± 0.04	107.27 ± 0.11	92.10 ± 0.39	62.07 ± 0.12	54.15 ± 0.05	51.17 ± 0.04	46.98 ± 0.01	44.91 ± 0.01	40.31 ± 0.02				
		40	361.32 ± 0.27	315.31 ± 0.02	201.71 ± 0.01	187.63 ± 0.03	131.93 ± 0.04	116.14 ± 0.05	86.72 ± 0.02	67.84 ± 0.00	62.15 ± 0.03	50.33 ± 0.03				

Table 5. Aprone 0.25 mmPb dose measurement results

Sheet	kVp	mAs	Non[mR]		Dose[mR]	
			Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD	Mean ± SD
Aprone 0.25 mmPb	60	20	108.6 ± 0.01	1.34 ± 0.03		
		40	219.7 ± 0.02	2.71 ± 0.01		
	80	20	186.2 ± 0.05	8.45 ± 0.02		
		40	375.8 ± 0.03	17.42 ± 0.02		
100	20	273.2 ± 0.02	23.25 ± 0.01			
	40	549.1 ± 0.02	47.28 ± 0.02			
120	20	364.1 ± 0.03	42.05 ± 0.05			
	40	729.7 ± 0.04	84.42 ± 0.02			

Table 6. Shielding ratio measurement results for iron oxide and iron oxide-copper shielding

Sheet	kVp	mAs	Shielding rate [%]									
			1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
Iron Oxide	60	20	38.74	59.98	72.92	81.22	86.75	90.56	93.20	95.02	96.35	97.29
		40	38.99	60.26	73.13	81.50	87.02	90.70	93.24	95.09	96.41	97.34
	80	20	34.24	54.45	67.41	76.51	82.66	87.10	90.36	92.68	94.41	95.72
		40	34.36	54.55	67.73	76.58	82.91	87.22	90.44	92.61	94.48	95.77
100	20	30.80	49.70	62.55	71.46	77.97	82.70	86.90	89.60	91.67	93.27	
	40	30.79	49.72	62.54	71.49	78.13	82.98	86.91	89.61	91.68	93.31	
120	20	28.01	45.53	58.79	67.62	74.40	79.17	83.12	86.06	88.72	90.38	
	40	27.82	45.13	58.72	67.51	74.22	79.18	83.09	86.09	88.46	90.37	
60	20	72.83	73.53	89.83	95.36	95.96	98.13	98.20	99.19	99.19	99.60	
	40	72.09	70.14	88.78	95.03	95.88	98.00	98.08	99.06	99.17	99.59	
Iron Oxide	80	20	63.59	66.86	84.92	90.67	91.72	94.96	95.63	97.23	97.70	98.46
		40	63.41	63.56	82.49	84.92	90.94	91.81	94.98	96.80	97.40	98.24
Copper	100	20	56.48	61.20	78.81	85.47	88.16	90.70	92.63	94.60	95.05	96.22
		40	56.29	61.20	77.59	85.91	88.16	90.70	92.63	94.60	95.05	96.22
120	20	50.51	52.05	70.54	74.70	82.95	85.13	88.12	91.22	93.46	94.63	95.89
	40	50.48	56.79	72.36	74.29	81.92	84.08	88.12	90.70	91.48	93.10	

Table 7. Aprone shielding ratio measurement results with a lead equivalent of 0.25 mmPb

Sheet	kVp	mAs	Shielding rate [%]
Aprone 0.25 mmPb	60	20	98.76
		40	98.77
	80	20	95.46
		40	95.37
	100	20	91.49
		40	91.39
	120	20	88.45
		40	88.43

Table 8. Comparison of radiation exposure and shielding ratio between Apron 0.25 mmPb and Iron oxide-copper 8 mm, Iron oxide 8 mm

Sheet	kVp	mAs	Exposure [mR]	Shielding rate [%]	
			Mean ± SD		
Aprone 0.25 mmPb	60	20	1.34 ± 0.02	98.76	
		40	2.71 ± 0.01	98.77	
	80	20	8.45 ± 0.03	95.46	
		40	17.42 ± 0.02	95.37	
	100	20	23.25 ± 0.01	91.49	
		40	47.28 ± 0.02	91.39	
	120	20	42.05 ± 0.05	88.45	
		40	84.42 ± 0.02	88.43	
	Iron Oxide - Copper 8mm	60	20	0.88 ± 0.01	99.19
			40	2.06 ± 0.04	99.06
80		20	5.15 ± 0.01	97.23	
		40	12.01 ± 0.01	96.80	
100		20	4.75 ± 0.03	94.60	
		40	35.93 ± 0.04	93.46	
120		20	46.98 ± 0.01	87.10	
		40	67.84 ± 0.02	90.70	
Iron Oxide 8mm		60	20	5.41 ± 0.01	95.02
			40	10.78 ± 0.02	95.09
	80	20	13.63 ± 0.03	92.68	
		40	27.76 ± 0.01	92.61	
	100	20	28.40 ± 0.01	89.60	
		40	57.03 ± 0.03	89.61	
	120	20	50.76 ± 0.04	86.06	
		40	101.49 ± 0.01	86.09	

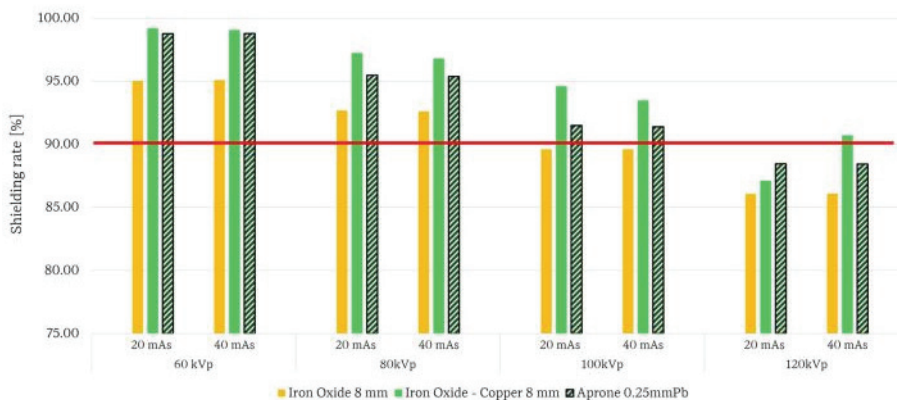


Fig. 6. Comparison of radiation exposure and shielding ratio between Apron 0.25 mmPb and Iron oxide-copper 8 mm, Iron oxide 8 mm.

산화철과 관련된 선행 연구를 통해, 산화철과 석고를 교반하여 10 mm 로 제작한 산화철 차폐체가 100 kVp, 50 mAs 조건에서 납당량 0.25 mmPb의 납 방호도구와 유사한 차폐율을 보임을 확인하였다. 이에 더해 본 실험을 위한 산화철 필라멘트 차폐체로 Pilot test 결과 산화철만 함유된 필라멘트로는 임상에 적용하기에 차폐율이 낮다고 판단하였다.

따라서 산화철 필라멘트에 차폐 성능이 우수한 구리 파우더를 혼합하여 산화철-구리 혼합 필라멘트를 개발 후 3D 프린팅을 이용하여 차폐체 제작 및 차폐율 평가를 진행하였다.

산화철-구리 혼합 필라멘트의 두께가 6 mm 이하에서 0.25 mmPb의 납 방호도구의 차폐율에는 미치지 못하는 결과값을 보였다. 하지만 7 mm일 때 120 kVp, 20 mAs를 제외한 나머지 조건에서 0.25 mmPb의 납 방호도구와 유사한 차폐율을 보였고, 8 mm일 때 120 kVp, 20 mAs를 제외한 나머지 조건에서 0.25 mmPb의 납 방호도구보다 더 높은 차폐율을 보였다.

본 연구의 한계점으로 첫째, 대부분의 조건에서 7 mm의 두께 이하에서는 납 당량 0.25 mmPb의 납 방호도구보다 낮은 차폐율을 보였으며, 8 mm의 두께부터 유사하거나 더 높은 차폐율을 보였다. 이는 선행 연구보다는 얇은 두께에서 납 방호도구보다 뛰어난 차폐율을 보였지만 현재 임상에서 사용되고 있는 납 방호도구보다 더 두꺼운 두께로 차폐체를 제작해야 한다.

둘째, 산화철과 구리의 혼합 비율을 70 : 30으로만 설정하여, 혼합 비율을 달리하였을 때, 결과를 제시하지 못하였다. 이에 혼합 비율을 달리하여, 새로운 산화철-구리 혼합 필라멘트 차폐체를 제작했을 때, 다른 결과를 보일 것이라 판단되며, 이에 본 연구는 산화철-구리 혼합 필라멘트 차폐체 제작에 있어서 기초 자료로 사용될 수 있을 것이라 사료된다.

셋째, 금속 필라멘트는 노즐의 크기에 민감하기 때문에 작은 크기의 노즐을 사용할 경우 필라멘트의 금속 불순물에 의해 노즐 구멍이 막히거나 마모될 수 있다. 또한 3D 프린터의 조건이나 출력 설정에 따라 내부 채움의 재현성이 떨어질 수 있어 밀도와 조성의 변동이 발생할 가능성이 존재한다. 금

속 필라멘트는 일반 플라스틱 필라멘트보다 더 높은 온도를 요구하기 때문에 프린터의 온도 조절이 더욱 중요해지며, 이로 인해 프린팅 과정이 복잡해질 수 있다는 한계점이 존재한다.

넷째, 본 연구에서는 구리와 산화철을 기반으로 한 차폐 물질을 개발하였으나, 이들 물질의 인체 안정성에 대한 추가 검토가 필요하다. 구리는 미량 원소로서 인체에 필수적인 역할을 하지만, 고농도에서는 독성을 유발할 수 있다^[21]. 산화철(Fe_2O_3)은 생체 적합성이 높아 의료 및 생리학적 응용에서 널리 사용되지만, 나노입자 형태에서는 고농도 시 독성을 나타낼 가능성이 있다^[22]. 따라서 구리와 산화철이 방사선 차폐 재료로 사용될 때 PBT와 결합하여 발생할 수 있는 장기적인 안정성 및 독성에 대한 체계적인 검토가 필요하다.

본 연구에서 자체 제작한 산화철 구리 혼합 필라멘트 차폐체는 합리적인 비용과 높은 접근성을 지녔기에 방사선 방호 분야에서 새로운 대안으로 자리 잡을 수 있을 것이라 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 산화철-구리 혼합 필라멘트를 개발하고, 이를 3D 프린팅 기술을 통해 제작한 차폐체의 성능을 평가하였다. 개발된 산화철-구리 혼합 필라멘트는 합리적인 비용으로 방사선 차폐 성능을 제공하며, 방사선 차폐 기술의 효율적인 대안으로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 연구는 2024년 을지대학교 대학혁신지원사업 지원을 받아 진행한 연구임.

Reference

- [1] J. Choi, "Prospects on the increase of radiological examinations in Korea", *Journal of the Korean Medical Association*, Vol. 63, No. 3, pp. 136-139, 2020. <http://dx.doi.org/10.5124/jkma.2020.63.3.136>
- [2] J. S. Kim, "Analysis of breast shielding rate of bismuth shield", *Journal of the Korea Institute of*

- Information and Communication Engineering, Vol. 24, No. 9, pp. 1132-1137, 2020.
<http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.9.1132>
- [3] W. H. Lee, S. M. Ahn, "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*, Vol. 14, No. 12, pp. 845-853, 2014.
<http://dx.doi.org/10.5392/JKCA.2014.14.12.845>
- [4] H. H. Gang, D. H. Kim, "Study on Shielding using CT Contrast Medium", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 12, No. 5, pp. 693-698, 2018.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2018.12.5.693>
- [5] D. G. Eom, S. H. Kim, "3D Printing of Tungsten-Polymer Composites for Radiation Shielding", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 14, No. 5, pp. 643-650, 2020.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2020.14.5.643>
- [6] K. T. Kwon, H. M. Jang, M. S. Yoon, "Evaluation of the Usefulness of the Transmittance of Metal Filaments Fabricated by 3D Printers in Radiation Therapy", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 15, No. 7, pp. 965-973, 2021.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2021.15.7.965>
- [7] D. S. Kim, T. H. Kim, M. S. Yoon, S. H. Kim, "Shielding Performance of PLA and Tungsten Mixture using Research Extruder", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 17, No. 4, pp. 557-564, 2023.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2023.17.4.557>
- [8] H. Lee, D. Kim, "Assessment of Radiation Shielding Ability of Printing Materials Using 3D Printing Technology: FDM 3D Printing Technology", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 12, No. 7, pp. 909-917, 2018.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2018.12.7.909>
- [9] K. S. Park, W. J. Choi, D. H. Kim, "Evaluation of Metal Composite Filaments for 3D Printing", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 15, No. 5, pp. 697-704, 2021.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2021.15.5.697>
- [10] B. J. Choi, J. Y. Yang, M. G. Lee, Y. H. Jeon, "Defect analysis of metal 3D printing process", *Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 30, No. 1, pp. 92-98, 2021. <https://doi.org/10.7735/ksmte.2021.30.1.92>
- [11] H. Lee, D. Kim, "Assessment of Radiation Shielding Ability of Printing Materials Using 3D Printing Technology: FDM 3D Printing Technology", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 12, No. 7, pp. 909-917, 2018.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2018.12.7.909>
- [12] K. S. Park, D. H. Kim, "Evaluation of 3D printing filaments for radiation shielding using high density polyethylene and bismuth", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 16, No. 3, pp. 233-240, 2022. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2022.16.3.233>
- [13] S. H. Han, B. Y. Koo, "Transmission Dose Measurement of Gamma-ray Using Tungsten Shield", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 9, pp. 124-129, 2018.
<https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.9.124>
- [14] Y. I. Cho, J. H. Kim, S. I. Bae, "Evaluation of Shielding Performance of Tungsten Containing 3D Printing Materials for High-Energy Electron Radiation Therapy", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 17 No. 5, pp. 641-649, 2023.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2023.17.5.641>
- [15] H. H. Gang, D. H. Kim, "A Study on Barium Mixed Radiation Shield using 3D Printer", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 14, No. 5, pp. 627-634, 2020.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2020.14.5.627>
- [16] Gnanasekaran K, Heijmans T, van Bennekom S, Woldhuis H, Wijnia S, de With G, Friedrich H, "3D printing of CNT- and graphene-based conductive polymer nanocomposites by fused deposition modeling", *Applied Materials Today*, Vol. 9, pp. 21-28, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.04.003>
- [17] J. L. Choi, "Prospects on the increase of radiological examinations in Korea", *Journal of the Korean Medical Association*, Vol. 63, No. 3, pp. 136-139, 2020.
<http://dx.doi.org/10.5124/jkma.2020.63.3.136>
- [18] International commission on radiological protection, "Application of the Commission's Recommendations for the Protection of People in Emergency Exposure Situations", ICRP Publication 109, 2009.

- [19] A. Martin, S. Harbison, K. Beach, R. Cole, *An Introduction To Radiation Protection*, 6th Ed., CRC Press, FL, 2012.
- [20] K. S. Park, D. H. Kim, "Evaluation of 3D printing filaments for radiation shielding using high density polyethylene and bismuth", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 16, No. 3, pp. 233-240, 2022. <https://doi.org/10.7742/jksr.2022.16.3.233>
- [21] G. Borkow, "Safety of Using Copper Oxide in Medical Devices and Consumer Products", *Current Chemical Biology*, Vol. 6, pp. 86-92, 2012. <http://dx.doi.org/10.2174/187231312799984349>
- [22] M. Pourmadadi, E. Rahmani, A. Shamsabadipour, S. Mahtabian, M. Ahmadi, A. Rahdar, A. M. Díez-Pascual, "Role of Iron Oxide (Fe₂O₃) Nanocomposites in Advanced Biomedical Applications: A State-of-the-Art Review", *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, Vol. 12, No. 21, pp. 3873, 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/nano12213873>

3D 프린팅 기술을 이용한 산화철-구리 혼합 필라멘트 차폐체 개발 및 차폐율 평가

신나령¹, 남성관¹, 강지수¹, 이건주¹, 장희민^{1,2}, 윤명성^{1,3}, 한동균^{1,*}

¹을지대학교 보건과학대학 방사선학과

²남천병원 영상의학과

³MIP(Medical Imaging Process) Lab

요 약

본 연구는 납 기반 차폐체의 독성 문제를 해결하기 위해 산화철과 구리를 혼합한 필라멘트를 이용해 무납 차폐체를 개발하고 성능을 평가하였다. 산화철과 구리 과우더를 혼합하여 필라멘트를 제작한 후, FDM 방식의 3D 프린터로 다양한 두께의 차폐체를 출력하였다. 관전압과 관전류를 변화하며 선량 및 차폐율을 측정하였으며, 데이터 분석은 SPSS 프로그램을 통해 이루어졌다($p < 0.05$). 실험 결과, 산화철 - 구리 혼합 필라멘트 차폐체는 관전압 120 kVp, 관전류 20 mAs 일 때를 제외한 모든 조건에서 8 mm 이상의 두께부터 납당량 0.25 mmPb 납 방호 도구보다 높은 차폐 성능을 나타냈다. 이 연구는 산화철 - 구리 혼합 필라멘트 차폐체가 납의 단점을 보완하면서 유사한 차폐 성능을 제공할 수 있음을 입증하였으며 무납 차폐체 연구의 기초 자료로 활용될 수 있는 가능성을 제시하였다.

중심단어: 3D 프린팅, X선 차폐체, 무납 차폐체, 산화철, 납, 필라멘트

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	신나령	을지대학교 방사선학과	학부생
	남성관	을지대학교 방사선학과	학부생
	강지수	을지대학교 방사선학과	학부생
(공동저자)	이건주	을지대학교 방사선학과	학부생
	장희민	남천병원 영상의학과	방사선사
	윤명성	MIP(Medical Imaging Process) Lab	연구원
(교신저자)	한동균	을지대학교 방사선학과	교수