Journal of Radiological Science and Technology, 46(6), 519-526 ISSN 2384-1168(On-line) ISSN 2288-3509(Print)

<원저>

납과 텅스텐 기반 차폐체의 성능 비교 평가

박정환[1]·이현성[2]·이은서[1]·한효정[1]·허윤희[3]·최재호[1]

[1]안산대학교 방사선학과·[2]가톨릭관동대학교 국제성모병원 영상의학과·[3]검단탑병원 영상의학과

Evaluation of the Shield Performance of Lead and Tungsten Based Radiation Shields

Jeong-Hwan Park[1]·Hyeon-Seong Lee[2]·Eun-Seo Lee[1]·Hyo-Jeong Han[1]·Yun-Hee Heo[3]·Jae-Ho Choi[1]

[1]*Department of Radiologic Science, Ansan University*

[2]*Department of Radiology, Catholic Kwandong University International St. Mary's Hospital*

[3]*Department of Radiology, Gumdan Top General Hospital*

Abstract This study was intended to evaluate the shielding rate of radiation shields manufactured using 3D printers that have recently been used in various fields by comparing them with existing shields made of lead, and to find out their applicability through experiments. A 3D printer shield made of tungsten filament 1 mm, 2 mm, 4 mm shield, RNS-TX (nanotungsten) 1.1 mm, lead 0.2 mmPb, and 1mmPb were exposed to ^{99m}Tc, ^{18}F, and ^{201}Tl for 15, 30, 45 minutes, and 60 minutes after measuring cumulative dose three times. Based on this, the shielding rate of each shield was calculated based on the dose in the absence of the shield. In addition, ^{99m}Tc, ^{18}F, and ^{201}Tl were located 100 cm away from the phantom in which the OSLD nano Dot device was inserted, and if there was no shield for 60 minutes, the dose of thyroid was measured using 1.0 mm of lead shield, 1.1 mm of RNS-TX shield, and 2 mm of tungsten shield made by 3D printer. The use of shields during radiation shielding emitted from open radiation sources all resulted in a reduction in dose. The radiation dose emitted from the radionuclides under the experiment was all reduced when the shield was used. This study has been confirmed that tungsten is a material that can replace lead due to its excellent performance and efficiency as shield, and that it even shows the possibility of manufacturing a customized shield using 3D printer.

Key Words: Lead, Radiation shield, 3D printer shield, Open radiation source, Tungsten filament

중심 단어: 납, 방사선 차폐, 3D 프린터, 개봉 선원, 텅스텐 필라멘트

Ⅰ. 서 론

핵의학은 방사성동위원소를 추적자로 사용하여 인체에 대한 형태학적인 정보와 아울러 생물학적이고 기능적인 정보를 얻을 수 있는 의학 전문 분야이다. 핵의학과는 방사성의약품을 인체에 투여하여 질병의 진단 및 치료를 시행하는 곳으로 알파 붕괴, 베타 붕괴, 감마 방출 때문에 방출되는 방사선을 이용한다[1]. 현재 핵의학 영상 검사에서 사용하는 에너지는 140 keV, 364 keV, 511 keV 등 고에너지 γ선을 이용하고 있다[2].

방사선은 세포가 살아가는데 필수적인 유전 정보인 DNA를 변형과 파괴로 암을 유발하는 등 세포에 다양한 영향을 준다[3]. 의료에서 방사선 피폭은 진단 및 치료를 받는 개인뿐만 아니라 의료진이나 간병인까지도 해당할 수 있다[4]. 특히 방사선 종사자는 외부 피폭의 위험에 노출되어 있고 장시간 지속해서 저선량 방사선에 노출된다면 방사선장애가 문제가 발생할 수 있으므로 이를 감소시키기 위한 노력이 끊임없이 이어져 왔다[5].

핵의학 작업종사자는 환자나 선원으로부터 불필요한 피폭을 받기 때문에 국제방사선방호위원회(International

Corresponding author: Jae-Ho Choi, Department of Radiologic Science, Ansan University, 155 Ansandaehak-ro, Sangrok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do, 15326, Republic of Korea / Tel: +82-31-400-7105 / E-mail: akalaka93@ansan.ac.kr
Received 24 October 2023; Revised 27 November 2023; Accepted 29 November 2023
Copyright ⓒ2023 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

Commission on Radiological Protection, ICRP)의 권고에 맞춰 차폐해야 한다. 방사선 피폭을 방지하기 위해서는 여러 가지 차폐 도구들을 사용하는데 일반적으로 핵의학과에서는 에너지와 투과력이 높은 감마선을 사용하기 때문에 텅스텐과 납을 혼합한 재질을 주로 사용 한다[6]. 하지만 최근 납으로 제작된 차폐체가 제작 시 무게가 무거워 장시간 착용할 경우 근골격계 부담 등을 줄 수 있기 때문에 대체할 수 있는 차폐체 물질의 연구는 더 요구되고 있다[7]. 이러한 점을 해결을 위한 방안 중 하나로 3차원 프린팅 기술을 이용한 가볍지만 차폐 효과가 높고 개인 체형에 맞춘 다양한 차폐체 제작이 또 다른 방안으로 제시되고 있다.

3차원 프린팅 기술은 4차 산업 혁명 대표 기술 중 하나로 컴퓨터로 설계한 디지털 데이터를 시간과 공간의 제약 받지 않고 원하는 모형으로 첨삭 가공하여 적층하는 방식으로 출력할 수 있으며, 제작비용 및 시간을 절약할 수 있다[8, 9]. 또한 3차원 프린터의 재료가 플라스틱부터 금속까지 확대되어 납과 유사한 차폐율을 가진 차폐체 제작에 효율적으로 대체 가능할 것으로 제시할 수 있다[8,9]. 3D 프린터의 조형기술 방식은 재료의 성질과 형태에 따라서 분말, 액체, 고체 기반으로 분류할 수 있으며 현재에는 정밀성 및 효율성이 높은 선택적 레이저 소결 조형(selective laser sintering, SLS), 압출 적층 조형(fused deposition model, FDM) 방식의 3D 프린터가 전 세계 시장에서 주목받고 있다. 그중 압출 적층 조형 방식(FDM)은 플라스틱 종류 등 열가소성 물질의 필라멘트를 얇은 실 형태로 녹인 후 적층하여 물체를 제작하는 방식으로 현재 범용 3D 프린터로 많이 이용되고 있다[10].

따라서, 본 연구에서는 핵의학과 내에서 핵종 사용 시 불필요한 피폭을 막기 위해 3D 프린터로 제작한 차폐체를 사용하여 방사선 차폐체의 차폐 성능을 기존의 납 및 나노 텅스텐 차폐체와 비교 평가하여 유용성을 알아보고자 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 개인 방사선량 측정기를 이용한 차폐체의 차폐 효율 측정

1) 실험재료

(1) 개인 방사선량 측정기

감마선과 엑스선 같은 광자를 측정할 수 있으며, Semiconductor 방식의 검출기를 사용한다. 0.1 μSv~10 Sv의 선량 측정 범위를 갖고, 0.1 μSv/h~1 Sv/h의 선량률 측정 범위를 갖고 있으며, 1 μSv~9,999 mSv 범위의 누적 선량을 측정할 수 있다. 측정 가능한 에너지 범위는 30 keV~6 MeV이며, 표시 단위는 μSv/h, mSv이다(Fig. 1).

Fig. 1. SPD-9200 SFTechnology Co.

(2) 차폐체

RNS-TX 1개 : 85 ㎜ × 55 ㎜ × 1.1 ㎜(동원엔텍, Korea)를 사용하였으며, 가로 85 ㎜ × 세로 50 ㎜로 0.2 ㎜, 0.5 ㎜ 두께의 납을 2개 붙여서 만든 1.0 ㎜ 두께의 납(Pb), 3D 프린터로 제작한 70 ㎜ × 70 ㎜ 사각 형태의 텅스텐 1 ㎜, 2 ㎜, 4 ㎜를 실험에 이용하였다(Fig. 2).

Fig. 2. (a) Tungsten 1 ㎜, 2 ㎜, 4 ㎜, (b) Pb 0.2 ㎜, (c) Pb 1.0 ㎜, (d) RNS-TX 1.1 ㎜

* RNS-TX consists of nanoparticle-sized tungsten

(3) 방사성동위원소

실험 장소의 공간선량률 측정 결과 0.09 μSv/h로 측정되었으며, 실험 핵종은 ^{99m}Tc 25 mCi, ^{201}TI 3 mCi, ^{18}F 10 mCi를 대상으로 대학병원과 종합병원에서 실험을 진행하였다.

2) 실험 방법

방사성동위원소 ^{99m}Tc, ^{18}F, ^{201}TI를 각각 개인 방사선량 측정기와 30 ㎝의 일정한 간격을 두고 방사성동위원소에서

방출되는 방사선이 방사 형태임을 고려하여 위치시켰고, 15, 30, 45, 60분 동안의 누적 선량을 측정했다. 차폐체가 없는 경우, 납 차폐체 0.2 ㎜, 납 차폐체 1.0 ㎜, RNS-TX 차폐체 1.1 ㎜, 3D 프린터로 제작한 텅스텐 차폐체 1 ㎜, 2 ㎜, 4 ㎜를 사용한 경우로 나누어 각각의 차폐체에 따른 누적 선량을 3회 측정 후 평균값을 산출하였다.

2. 팬텀을 이용한 장기(갑상샘) 선량 측정

1) 실험재료

(1) 팬텀(phantom)

성인 팬텀(The Alderson Radiation Therapy Phantom, Model ART-210X, Alderson, Oklahoma)을 사용하였다. 인체와 동일한 구조이며, 조직 등가 물질로 구성되어 있어 22개의 내부 장기의 특징을 구현하는데 최적화되어 있다(Fig. 3).

Fig. 3. Model ART-210X, Alderson

(2) 광자극발광선량계시스템(Optically Stimulated Luminescence Dosimetry System, 이하 OSLD)

Reading 시스템은 OSLD MicroStar Reading System (MicroStar, Landauer, USA), 소자는 OSLD nano Dot (Landauer Co., Glenwood, IL, USA), Annealing 시스템은 수동 OSL annealing(Serial NO: HA-ONH001, Hanil Nuclear Co., KOREA)을 사용했다(Fig. 4).

Fig. 4. OSLD system(Landauer Co., Glenwood, IL, USA)

2) 실험 방법

선원과 팬텀 사이 거리를 100 ㎝로 유지하고, 선원 노출 시간은 60분으로 설정했다. 장기 선량 측정 부위는 갑상샘으로 설정하고 실험을 진행했다. OSLD nano Dot 소자가 삽입된 팬텀과 100 ㎝ 떨어진 곳에 3회 측정 시점 평균 25.11 mCi ^{99m}Tc 선원을 위치시키고, 60분 동안 차폐체가 없는 경우, 납 차폐체 1.0 ㎜, RNS-TX 차폐체 1.1 ㎜, 3D 프린터로 제작한 텅스텐 차폐체 2 ㎜를 이용하여 갑상샘의 선량을 측정했다. OSLD nano Dot 선량계로 측정한 누적 선량을 3회 측정하여 계산한 평균에서 Background 선량을 제외한 값을 사용하였다. 장기는 갑상샘으로 설정하고 각각 2개씩의 선량을 측정했다. 위와 같은 방법으로 ^{201}TI 3.03 mCi, ^{18}F 10.14 mCi 선원을 이용해 동일하게 실험을 진행했고, 갑상샘의 깊이는 체표면 기준으로 실측했다.

3D 모델링은 Tungsten 필라멘트를 이용하여 출력하기 위해 Open source Free CAD 0.19 3D 설계프로그램을 사용하여 크기 100×100 mm, 두께는 1, 2, 4 mm로 제작하고 STL로 변환저장 하였다. 출력 설정 및 Slicing는 STL 파일로 변환된 3D 모델을 슬라이싱 프로그램(Cura 5.4.1, Ultimaker, Nethelands)을 이용하여 출력온도 210℃, 내부 채움 100%으로 출력 설정하고, G-code로 변환하였다. 텅스텐 필라멘트와 3D 프린팅은 슬라이싱 된 G-code를 3D 프린터(S3, Ultimaker, Nethelands)와 텅스텐(7.5 g/cm^3) 필라멘트를 사용하여 출력하였다.

3. 통계 분석

SPSS Ver. 23.0(IBM Co, Chicago, USA)을 이용하여 자료 분석을 진행하였으며, 통계 분석은 비모수 검정인 Kruskal Wallis 검정을 시행하였으며, 신뢰구간 95%로 설정하여 유의확률 0.05 미만인 경우를 통계적으로 유의성이 있는 값으로 판단했다.

Ⅲ. 결 과

1. 개인 방사선량 측정기를 이용한 ^{99m}Tc에 대한 차폐체의 측정값

15분 경과 시 누적 선량은 납 0.2 ㎜, 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 32.20 ㎲v, 11.60 ㎲v, RNS-TX 1.1 ㎜ 차폐체 사용 시 11.92 ㎲v, 텅스텐 1.0 ㎜, 2.0 ㎜, 4.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 15.20 ㎲v, 12.70 ㎲v, 2.30 ㎲v로 나타났으며,

Table 1. Measurement of accumulated dose and shielding rate (Unit: μSv)

Radionuclide	Shield	(%)*	15 min	30 min	45 min	60 min
^{99m}Tc	No shield	100	44.65±0.22	76.85±0.04	111.95±0.15	146.35±0.35
	Pb 0.2 ㎜	70.38	32.20±0.24	56.40±0.34	81.00±0.19	103.00±0.10
	Pb 1.0 ㎜	15.45	11.60±0.20	16.10±0.51	19.30±0.20	22.60±0.34
	RNS-TX 1.1 ㎜	21.87	11.92±0.75	16.40±0.11	24.20±0.41	32.00±0.40
	Tungsten 1.0 ㎜	43.39	15.20±0.04	29.50±0.47	44.80±0.07	59.10±0.11
	Tungsten 2.0 ㎜	21.32	12.70±0.18	15.80±0.17	23.75±0.14	31.20±0.07
	Tungsten 4.0 ㎜	5.95	2.30±0.17	4.30±0.12	6.30±0.08	8.70±0.09

* 차폐율은 60분 경과 시 측정값으로 계산

Table 2. Measurement of accumulated dose and shielding rate (Unit: μSv)

Radio nuclide	Shield	(%)*	15 min	30 min	45 min	60 min
^{201}Tl	No shield	100	6.43±0.14	12.20±0.43	18.54±0.42	24.60±0.61
	Pb 0.2 ㎜	53.70	3.52±0.34	6.60±0.53	10.07±0.24	13.21±0.14
	Pb 1.0 ㎜	11.14	0.81±0.15	1.51±0.34	2.12±0.81	2.74±0.20
	RNS-TX 1.1 ㎜	15.78	1.04±0.18	1.91±0.40	2.95±0.22	3.88±0.41
	Tungsten 1.0 ㎜	39.92	2.33±0.74	4.95±0.16	7.40±0.51	9.82±0.15
	Tungsten 2.0 ㎜	16.92	0.95±0.17	1.91±0.09	3.14±0.17	4.16±0.66
	Tungsten 4.0 ㎜	9.80	0.65±0.21	1.25±0.13	1.85±0.17	2.41±0.09

차폐체 미사용 시 44.65 μSv로 나타났다. 또한, 60분 경과 시 누적 선량은 납 0.2 ㎜, 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 103.00 μSv, 22.60 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 차폐체 사용 시 32.00 μSv, 텅스텐 1.0 ㎜, 2.0 ㎜, 4.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 59.10 μSv, 31.20 μSv, 8.70 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 146.35 μSv로 나타났다(Table 1).

2. 개인 방사선량 측정기를 이용한 ^{201}Tl에 대한 차폐체의 측정값

15분 경과 시 누적 선량은 납 0.2 ㎜, 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 3.52 μSv, 0.81 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 차폐체 사용 시 1.04 μSv, 텅스텐 1.0 ㎜, 2.0 ㎜, 4.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 2.33 μSv, 0.95 μSv, 0.65 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 6.43 μSv로 나타났다. 또한, 60분 경과 시 누적 선량은 납 0.2 ㎜, 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 13.21 μSv, 2.74 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 차폐체 사용 시 3.88 μSv, 텅스텐 1.0 ㎜, 2.0 ㎜, 4.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 9.82 μSv, 4.16 μSv, 2.41 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 24.60 μSv로 나타났다(Table 2).

3. 개인 방사선량 측정기를 이용한 $_{18}$F에 대한 차폐체의 측정값

15분 경과 시 누적 선량은 납 0.2 ㎜, 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 156.11 μSv, 124.71 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 차폐체 사용 시 138.40 μSv, 텅스텐 1.0 ㎜, 2.0 ㎜, 4.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 141.48 μSv, 132.51 μSv, 120.55 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 159.95 μSv로 나타났다. 또한, 60분 경과 시 누적 선량은 납 0.2 ㎜, 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 488.33 μSv, 396.20 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 차폐체 사용 시 452.13 μSv, 텅스텐 1.0 ㎜, 2.0 ㎜, 4.0 ㎜ 차폐체 사용 시 각각 457.94 μSv, 420.60 μSv, 387.74 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 498.80 μSv로 나타났다(Table 3).

4. OSLD를 이용한 ^{99m}Tc의 갑상샘 선량 측정값

갑상샘 피폭 선량은 납 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 2.412 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 2.557 μSv, 텅스텐 2.0 ㎜ 2.764 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 16.221 μSv로 차폐체별 유의한 차이를 보였다(p<0.05)(Table 4).

5. OSLD를 이용한 ^{201}Tl의 갑상샘 선량 측정값

갑상샘 피폭 선량은 납 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 0.306 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 0.335 μSv, 텅스텐 2.0 ㎜ 0.377 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 2.731 μSv로 차폐체별 유의한 차이를 보이지 않았다(p>0.05)(Table 5).

Table 3. Measurement of accumulated dose and shielding rate (Unit: μSv)

Radio nuclide	Shield	(%)*	15 min	30 min	45 min	60 min
^{18}F	No shield	100	159.95±0.61	279.12±0.42	395.75±0.53	498.80±0.40
	Pb 0.2 ㎜	97.91	156.11±0.19	275.27±0.61	389.47±0.44	488.33±0.34
	Pb 1.0 ㎜	79.44	124.71±0.20	217.42±0.90	310.06±0.34	396.20±0.51
	RNS-TX 1.1 ㎜	90.65	138.40±0.14	253.09±0.64	358.34±0.38	452.13±0.31
	Tungsten 1.0 ㎜	91.81	141.48±0.70	253.30±0.66	360.80±0.60	457.94±0.74
	Tungsten 2.0 ㎜	84.33	132.51±0.34	231.57±0.81	333.75±0.09	420.60±0.71
	Tungsten 4.0 ㎜	77.74	120.55±0.12	213.81±0.51	308.35±0.81	387.74±0.48

Table 4. Thyroid dose by using ^{99m}Tc (Unit: μSv)

Radionuclide	Shield	Mean	S.D.	Ratio(%)	Efficiency(%)	*p*-value
^{99m}Tc	No shield	16.221	1.050	100	0	
	Pb 1.0 ㎜	2.412	0.474	14.86	85.14	
	RNS-TX 1.1 ㎜	2.557	1.037	15.76	84.24	〈0.05
	Tungsten 2.0 ㎜	2.764	1.144	17.03	82.97	

Table 5. Thyroid dose by using ^{201}Tl (Unit: μSv)

Radionuclide	Shield	Mean	S.D.	Ratio(%)	Efficiency(%)	*p*-value
^{201}Tl	No shield	2.731	0.541	100	0	
	Pb 1.0 ㎜	0.306	0.337	11.20	88.8	
	RNS-TX 1.1 ㎜	0.335	0.217	12.26	87.74	0.0687
	Tungsten 2.0 ㎜	0.377	0.183	13.80	86.20	

Table 6. Thyroid dose by using ^{18}F (Unit: μSv)

Radionuclide	Shield	Mean	S.D.	Ratio(%)	Efficiency(%)	*p*-value
^{18}F	No shield	55.420	1.784	100	0	
	Pb 1.0 ㎜	44.025	4.148	79.43	20.57	
	RNS-TX 1.1 ㎜	49.237	3.211	88.84	11.16	0.0741
	Tungsten 2.0 ㎜	46.734	1.981	84.32	15.68	

6. OSLD를 이용한 ^{18}F의 갑상샘 선량 측정값

갑상샘 피폭 선량은 납 1.0 ㎜ 차폐체 사용 시 44.025 μSv, RNS-TX 1.1 ㎜ 49.237 μSv, 텅스텐 2.0 ㎜ 46.734 μSv로 나타났으며, 차폐체 미사용 시 55.420 μSv로 차폐체별 유의한 차이를 보이지 않았다(p〉0.05)(Table 6).

Ⅳ. 고 찰

핵의학과 방사선 작업종사자의 피폭 선량이 병원내 타 직군의 종사자보다 높다는 선행 연구들이 있다[11]. 에너지 방향성이 없고, 고에너지의 개봉 선원에서 방출되는 방사선에 의한 피폭을 감소시키는데 가장 효과적인 방법은 선원으로부터 종사자가 노출되는 시간을 감소시키는 것이다. 또 다른 방법으로 핵의학분야에서는 선원으로부터 방출되는 방사선을 차폐하기 위한 도구로 Syringe holder, Vial shield, L-block, Apron 등을 이용하고 있다[12]. 현재 임상에서는 대표적으로 차폐복을 사용함으로써 피폭을 감소시키고 있는 노력을 기울이고 있다. 이때 사용되는 납은 고밀도이고 높은 원자번호인 금속원소로 광자에 대한 반응률과 높은 차폐력으로 방호 도구로 사용되고 있다[13]. 하지만, 납이 인체의 혈액 속에 있는 적혈구와 결합하게 된다면 납 중독의 위험성 등이 있어 납을 대체할 차폐 재료의 연구가 지속해

서 진행 중이다[14]. 이처럼 무납 차폐체에 관한 지속적인 연구를 진행하면서 납의 한계점을 개선하고 있지만, 경제성과 가공성 측면에서의 제한점이 있다[15]. 이를 대체할 기술 중 하나로 3D 프린터로 제작한 텅스텐을 사용하여 방사선 차폐체의 차폐율을 기존의 납 및 나노 텅스텐으로 제작된 차폐체와 비교하여 성능을 평가하고자 하였다.

본 연구에 사용한 ^{99m}Tc 25 mCi에서는 텅스텐 4 ㎜의 차폐율이 가장 높게 나타났으며 0.2 ㎜Pb가 가장 낮게 나타났다. 또한 텅스텐 2 ㎜와 RNS-TX 1.1 ㎜가 유사한 차폐율을 보인다. ^{201}TI 3 mCi 또한 텅스텐 4 ㎜의 차폐율이 가장 높게 나타났으며, 0.2 ㎜Pb가 가장 낮은 차폐율을 보인다. 그리고 ^{201}TI의 경우 에너지가 63 keV의 비교적 낮은 에너지이기 때문에 차폐 효과 차이가 크지 않았다. 또한 텅스텐 2 ㎜와 RNS-TX 1.1 ㎜ 그리고 텅스텐 4 ㎜와 1.0 ㎜Pb가 유사한 차폐율을 보였다. 텅스텐 2 ㎜와 RNS-TX 1.1 ㎜가 차폐 효과가 비슷하게 나타났지만, 그중에서도 더 얇은 두께의 RNS-TX 1.1 ㎜가 차폐 효과가 더 높게 측정되었다. 이는 RNS-TX 1.1 ㎜가 텅스텐 2 ㎜에 비해 입자크기를 매우 미세화하여 높은 밀도를 가지고 있기 때문이라고 사료된다. ^{18}F 10 mCi의 경우 역시 텅스텐 4 ㎜의 차폐율이 가장 높게 나타났으며, 0.2 ㎜Pb가 가장 낮게 나타났다. 하지만 ^{99m}Tc 25 mCi보다 전체적으로 비교적 낮은 차폐 효과를 보였다. 이는 ^{18}F의 에너지가 511 keV로 다른 선원에 비해 투과력이 매우 강하기 때문이라고 사료된다. 1.0 ㎜Pb와 3D 프린터로 제작한 텅스텐 차폐체를 비교해보면 텅스텐 두께 2 ㎜ 이상부터가 1.0 ㎜Pb와 비슷한 차폐율을 보이는 것을 알 수 있으며 4 ㎜ 이상이 될 땐 1.0 ㎜Pb보다 더 높은 차폐율을 보인다. 이 부분을 다음에 3D 프린팅을 사용하여 텅스텐 기반의 차폐체 두께를 고려할 시에 참고하면 의미 있을 것이라 사료된다.

실험 결과 방사성 핵종에서 방출하는 방사선량을 차폐체 사용 시 모두 갑상샘의 피폭 선량을 감소시키는 결과를 보였다. 납 1.0 ㎜, RNS-TX 1.1 ㎜, 3D 프린터로 제작한 텅스텐 2.0 ㎜ 간의 차폐 능력은 ^{99m}Tc에서는 납 1.0 ㎜가 유의한 차이를 보였으나, ^{201}TI, ^{18}F의 경우는 차폐체 간 유의한 차이가 없었다.

본 연구에서는 ^{99m}Tc, ^{201}TI 결과를 보면 텅스텐 2 ㎜가 각각 차폐체 없을 경우를 100% 기준으로 21.32%, 16.92%의 감마선 차폐율을 보인다. Yoon 등의 선행 연구를 보면 X선 대상으로 하였을 때 3D 프린터로 제작한 텅스텐이 1 ㎜부터 차폐체 없을 경우를 0% 기준으로 차폐율 90% 이상을 보여주었으며 본 연구와 같은 두께인 2 ㎜에선 최대 100%의 차폐율을 보인다[15]. 이를 통해 추후 3D 프린터로 제작한 텅스텐 차폐체가 X선을 이용하는 일반 촬영이나 감마선을 이용하는 핵의학 그리고 더 나아가 치료 분야에서도 적용할 수 있을 것으로 해석된다. 향후 본 연구에 사용된 텅스텐 차폐체를 이용하여 핵의학 전용 방사선 차폐복을 제작하거나 본 연구에서 사용된 방사선원을 제외하고 핵의학 검사 시 자주 사용하는 방사선원을 사용하여 갑상샘을 포함한 다른 장기별 선량 감소에 관한 실험을 추가로 한다면 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것이라 사료된다. 또한 3D 프린터에 사용되는 필라멘트 재료를 Aluminium, Barium, Brass, Bismuth, Tungsten과 PLA 및 ABS의 혼합물 등을 사용하여 더 다양한 차폐체를 제작하고 이를 실험해 본 연구 결과와 비교하여 가장 적절한 납 대체 차폐 물질, 차폐체 두께를 알아보는 비교 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 핵의학과 내에서 핵종 사용 시 불필요한 피폭을 막기 위해 3D 프린터로 제작한 차폐체를 사용하여 방사선 차폐체의 차폐 성능을 기존의 납 및 나노 텅스텐 차폐체와 비교 평가하여 유용성을 분석한 결과는 다음과 같다.

우선, 개인 방사선량 측정기를 이용한 차폐체의 차폐 효율 측정 결과 실험에 사용된 각각의 개봉 선원에서 방출하는 방사선 차폐 시 모두 선량을 감소시키는 효과를 보였다. ^{99m}Tc, ^{18}F, ^{201}TI 모두에서 납 1.0 ㎜와 3D 프린터로 제작한 텅스텐 2.0 ㎜가 유사한 차폐 효율을 보였고, RNS-TX 1.1 ㎜는 다소 낮은 차폐 효율을 보였다. 그다음으로 OSLD를 이용한 갑상샘 선량 측정 결과 실험 대상 방사성 핵종에서 방출하는 방사선량을 차폐체 사용 시 모두에서 갑상샘의 피폭 선량을 감소시키는 결과를 보였다. 납 1.0 ㎜, RNS-TX 1.1 ㎜, 3D 프린터로 제작한 텅스텐 2.0 ㎜ 간의 차폐 능력은 ^{99m}Tc에서는 납 1.0 ㎜가 유의한 차이를 보였으나 ^{201}TI, ^{18}F의 경우는 차폐체 간 유의한 차이가 없었다.

이상의 결과를 볼 때 텅스텐이 차폐체로 성능 및 효율이 우수하여 납을 대체할 수 있는 물질이라는 점과 3D 프린터를 이용한 맞춤형 차폐체 제작까지도 가능성을 보여준다는 것이 확인되었다.

REFERENCES

[1] Han SH, Koo BY. Transmission dose measurement of gamma-ray using tungsten shield. Journal of the

Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 2018;19(9):124-29. DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.9.124

[2] Han SH. Performance evaluation of gamma-ray shielding to produce a nuclear medicine exclusive apron. Chungbuk National University Graduate School; 2017. DOI: https://doi.org/10.17946/JRST.2017.40.1.07

[3] Finnerty M, Brennan PC. Protective aprons in imaging departments: Manufacturer stated lead equivalence values require validation. European Radiology. 2005;15(7):1477-84. DOI: https://doi.org/10.1007/s00330-004-2571-2

[4] 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. DOI: 10.5392/JKCA.2014.14.12.845

[5] Mori H, Koshida K, Ishigamori O, Matsubara K. Evaluation of the effectiveness of X-ray protective aprons in experimental and practical fields. Radiological Physics and Technology. 2014;7:158-66. DOI: https://doi.org/10.1007/s12194-013-0246-x

[6] Choi TJ, Oh TK, Kim JH, Kim OB. Development of lead free shielding material for diagnostic radiation beams. Journal of Radiological Science and Technology. 2010;21(2):232-7. Retrieved from https://www.progmedphys.org/journal/view.html?pn=search&uid=530&vmd=Full&all_k=Development%20of%20Lead%20Free%20Shielding%20Material%20for%20Diagnostic%20Radiation%20Beams&

[7] Lee LS. The effect of a radio-protective apron and working posture on EMG activities of muscles of neck extender, trapezius and lumbar erector spine. Yonsei University Medical Library; 2004. Retrieved from https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/128869

[8] Oh WK. Development of 3D printing system for human bone model manufacturing using medical images. Journal of Radiological Science and Technology. 2017;40(3):433-41. DOI: http://dx.doi.org/10.17946/JRST.2017.40.3.11

[9] Park HH, Lee JY, Kim JH, Nam KS, Lyu KY, Lee TS. The usability evaluation according to the application of bismuth shields in PET/CT examination. Journal of Radiological Science and Technology. 2014;37(1):49-56. Retrieved from https://koreascience.kr/article/JAKO201328635215601.page

[10] Lee HY. Department of radiological science. College of Health Sciences, Catholic University of Pusan, J. Korean Soc. Radiology. 2018;12(7):22-45. DOI: https://doi.org/10.7742/jksr.2018.12.7.909

[11] Dong KR, Kim CB, Park YS, Ji YS, Kim CN, Won JU, et al. A study of individual dose for radiological technologists working with easiest. Journal of Korean Society for Indoor Environment. 2009;6(1):38-47. Retrieved from https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/105045

[12] Han SH, Koo BY. Transmission dose measurement of gamma-ray using tungsten shield. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. 2018;19(9):124-9. DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.9.124

[13] Raissaki M, Perisinakis, K, Damilakis J, Nicholas G. Eye-lens bismuth shielding in paediatric head CT: Artifact evaluation and reduction. Pediatric Radiology. 2010;40(11):1748-54. DOI: 10.1007/s00247-010-1715-6

[14] 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. DOI: https://doi.org/10.3390/ma13204475

[15] Yoon MS, Yoon J. Evaluation of tungsten blended filament shields made by 3D printer in radiography. Journal of Radiological Science and Technology. 2021;44(6):615-21. DOI: https://doi.org/10.17946/JRST.2021.44.6.615

구분	성명	소속	직위
제1저자	박정환	안산대학교 방사선학과	조교
공동저자	이현성	가톨릭관동대학교 국제성모병원	방사선사
공동저자	이은서	안산대학교 방사선학과	학생
공동저자	한효정	안산대학교 방사선학과	학생
공동저자	허윤희	검단탑병원	방사선사
교신저자	최재호	안산대학교 방사선학과	부교수