

<원저>

비스무스, 텅스텐 기반 차폐체의 성능 및 유용성 평가

박훈희

신구대학교 방사선과

The Evaluation of Performance and Usability of Bismuth, Tungsten Based Shields

Hoon-Hee Park

Department of Radiological Technology, Shingu College

Abstract Lead apron is harmful to the human body because it is made at heavy metals, and when worn for long periods of time, it causes pain. Therefore, this paper intended to improve the defects of lead apron by using new material shields. For the comparative evaluation of lead and new material shields, the shielding rate and weight were measured and tested based on lead 0.5 mmPb. The rate of shielding was 97% based on lead at 0.5 mm thickness, while The new material shield T3 showed similar shielding rates as lead in 8 layers, and in T2 these values were measured in 11 layers. In addition, similar shielding rate was measured in 12 layers at B2, and 8 layers in BF, and 4 layers in BF₂. Comparing the weight of cases when commercialized with apron, T3, T2 and B2 were heavier than lead apron. But BF, BF₂ were lighter than the lead apron. Based on the results of the experiment, T3 and T2 can be used as an alternative to lead if human or environmental hazards are considered a priority. However, BF and BF₂ should be used if the reduction of external exposure is considered a priority.

Key Words : Shielding Material, Shielding Rate, Lead, Tungsten, Bismuth

중심 단어 : 차폐체, 차폐율, 납, 텅스텐, 비스무스

1. 서 론

방사선은 세포가 살아가는데 필수적 유전 정보인 DNA를 변형시켜 암을 유발하는 등 세포에 다양한 영향을 준다[1]. 의료업종에 종사하는 방사선 종사자는 외부피폭의 위험에 노출되어 있으며 장시간 동안 지속적으로 저 선량 방사선에 노출된다면 방사선 장애가 문제가 될 수 있기 때문에 이를 줄이기 위한 노력이 끊임없이 이어져왔다[2].

임상에서는 방사선종사자가 외부피폭을 감소시키기 위해 원자번호가 큰 납(lead; Pb)을 차폐체의 주원료로 많이 사용하고 있으며, 경제적인 측면을 고려하였을 때 특히 의료 방사선 분야에서는 차폐능과 가공성이 우수하기 때문에 가장 많이 이용되고 있다[3]. 하지만 납은 중금속으로 분류되어 관리되고 있으며, 작업성 노출, 체내 흡수 등 다양한 면

에서 그 유해성이 이미 널리 알려져 있다[4]. 또한 납을 소재로 만든 방사선 차폐복은 보통 납뿐만 아니라 여러 금속을 더해 합금형태로 만든 것이기 때문에 물리적으로 무게가 무겁고 착용이 불편하여 임상에서의 술자가 오랜 시간 착용 시 근-골격계 이상 질환을 발생시킬 우려가 있다[5]. 실제 방사선종사자의 통증 호소(어깨, 목, 허리, 무릎, 발목 등)가 매우 빈번한 것으로 보고되었으며, 특히 중재적 방사선 시술이나 위장관조영촬영과 같은 투시검사는 장시간에 걸쳐 연속적으로 검사가 이루어지기 때문에 방사선 차폐복은 종사자의 피폭저감 기능뿐만 아니라 작업의 편리성까지 고려된 경량화가 요구되고 있다[6]. 그러나 기존의 납 차폐복은 이미 물리적 경량화가 한계에 도달하였으며, 방사선종사자의 근무환경과 의료기관의 검사실 환경을 고려한다면 더욱 경량화되고, 인체에 무해한 방사선차폐 재료를 새롭게

Corresponding author: Hoon-Hee Park, Department of Radiological Technology, Shingu College, 377 Gwangmyeong-ro, Seongnam, 13174, Korea / Tel: +82-31-740-1638 / E-mail: hzpark@shingu.ac.kr

Received 30 November 2018; Revised 14 December 2018; Accepted 23 December 2018

Copyright ©2018 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

고려해볼 필요가 있다[7]. 대표적으로 텅스텐(tungsten; W)의 경우, 중금속 중독의 우려가 없고, 밀도가 높은 장점으로 인해 납을 대체할 수 있는 차폐 물질로 선호되고 있으며[8], 비스무스(bismuth; Bi) 역시 선량감소 효과가 우수하고, 가공성이 우수하고, 물리적으로 유연성이 있어 인체의 장기 형태로 만든 후 일반 X선 및 CT검사 시 환자의 심부장기 및 병변이 없는 장기의 불필요한 방사선 피폭에 대한 차폐효과를 기대할 수 있는 물질로 보고되고 있다[9,10].

이에 본 연구에서는 납과 같은 차폐 효과를 지니면서 경량화가 가능한, 새롭게 개발된 텅스텐, 비스무스를 납 대체 물질로 적용하였으며, 각 소재별로 흡수선량에 따른 차폐율을 납과 비교, 방사선 차폐복으로 제작되었을 때의 무게를 비교하여 실제 임상 적용 시 유용성을 알아보려고 하였다.

II. 대상 및 방법

1. 차폐체 제원

1) 납 제원

교정용 납을 사용하였으며, 0.5 mmPb의 두께에 10 × 10 cm 규격이다.

2) 신소재 차폐체(텅스텐, 비스무스) 제원

신소재 차폐체는 텅스텐, 비스무스를 기반으로 개발된 차폐체를 사용하였다(Table 1). 신소재 차폐체는 Rad-Ban series(Drview, Korea)에 적용되는 텅스텐, 비스무스를 기반으로 개발된 차폐체를 사용하였다(Table 1).

세부적으로 텅스텐이 함유된 소재를 T3와 T2로 나누었으며, 비스무스가 함유된 소재를 B2, BF, BF₂로 구분하였다. T3는 두께 0.26 mm, SQM당 725g 무게의 소재를 사용하였고, T2는 두께 0.21 mm, SQM당 604g 무게의 소재를 사용하였다. T3와 T2는 모두 텅스텐이 50% 함유되었고, 균열 저항의 유연성이 낮으며, 저준위 저항 및 우수한 방사선 방호 성능을 지닌 특징이 있다. B2는 비스무스가 50% 함유되었고, 두께 0.23 mm, SQM당 590g 무게의 소재를 사용하였다. B2는 균열 저항의 유연성이 높고, 고준위 저항 및 높은 방사선 방호 성능을 지닌 특징이 있다. BF는 film type에 비스무스가 30% 함유되었고, 두께 0.03 mm, SQM당 68g의 무게의 소재를 사용하였다. BF₂는 film type에 비스무스가 50% 함유되었고, 두께 0.05 mm, SQM당 113g, 고주파 난방을 목적으로 접착 기능이 추가된 소재를 사용하였다(Fig. 1).

2. 장비 및 측정

X선 발생 장치는 General X-ray System CS-60(DK

Table 1. Composition of the new material shield

	T3	T2	B2	BF	BF ₂
Thickness (mm)	0.26	0.21	0.23	0.03	0.05
Weight (g/SQM)	725	604	590	68	113
Material (Main)	Tungsten 50%	Tungsten 50%	Bismuth 50%	Bismuth 30%	Bismuth 50%
Characteristics	- Low level of flex cracking resistance - Low level of abraision resistance - Excellent performance of radiation protection		- High level of Flex cracking resistance - High level of abraision resistance - High performance of radiation protection	- Film type	- Film type - Adhesive function added(for high frequency heating)

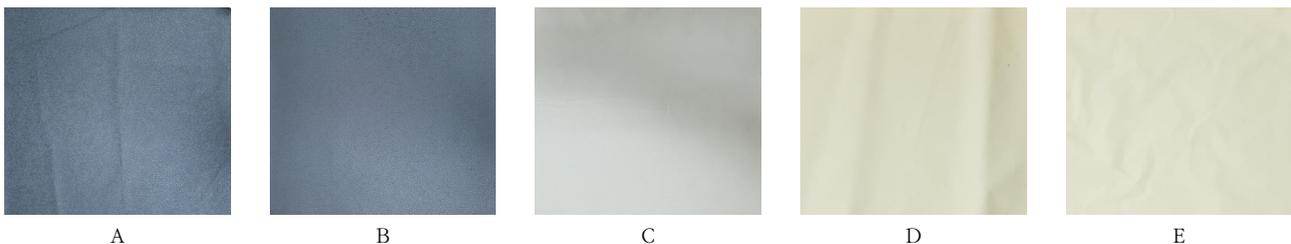


Fig. 1. Tungsten, Bismuth based shields(A: T3, B: T2, C: B2, D: BF, E: BF₂)

Medical, Seoul, Korea)을 사용하였고, 실험 전 장비의 성능 및 신뢰성 확인을 위해 재현성 평가를 실시하였다(Fig. 2). 재현성 평가를 통해 X선 발생장치의 조사선량 변동계수(CV) 결과 값이 0.05 이하일 때, 신뢰성이 있다고 평가되는데 연속 10회의 측정치에 대한 결과 값이 0.01616이었다. 그러므로 출력에 대한 안정성을 확보하고, 조건은 KS 규격을 기준을 적용하여 100 kVp, 5 mAs로 설정하였다.

차폐율 측정 장비로는 반도체 검출기 Piranha Dosimeter (RTI Electronics, Molndal, Sweden)를 사용하였으며(Fig. 3), 무게 측정은 전자저울 RG202(A&D Company, Tokyo, Japan)을 사용하였다.



Fig. 2. X-ray Generator(General X-ray System CS-60, DK Medical Seoul, Korea)



Fig. 3. Semiconductor Detector(Piranah Dosimeter, RTI Electronics, Molndal, Sweden)

3. 연구방법

실험은 X선관 초점과 납 및 신소재 차폐체까지의 거리를 150 cm으로 동일하게 설정하였고, 실험 차폐체와 측정기 사이의 거리는 넓은 빔 조건이므로 50 mm 이상으로 설정하였다. 측정기와 뒤쪽벽면 혹은 바닥면과의 거리는 90 cm 이상으로 하였고, 사용 X선 출력은 100 kVp로 설정하였다.

0.5 mmPb 두께의 납 차폐율, 신소재 차폐체가 몇 장에서 이와 유사한 차폐율을 측정하고, 해당 두께에서의 무게를 전자저울을 이용하여 확인하였다.

1) 차폐율 비교

납과 신소재 차폐체의 차폐율을 비교하기 위해 반도체 검출기로 0.5 mm 두께의 납을 5회 측정하여 납의 평균 차폐율을 측정하였고(Table 1), 신소재 차폐체(T3, T2, B2, BF, BF)를 통해 납 차폐율과 비교하였다. 조건은 KS 규격을 기준으로 납과 신소재 차폐체에 대해 넓은 빔 조건으로 설정하였다. 납과 신소재 차폐체를 10 × 10 cm로 규격화하여 차폐율을 측정하였다.

2) 무게 비교

(1) 규격에 따른 무게 비교

납과 신소재 차폐체의 무게를 비교하기 위해 10 × 10 cm의 크기로 규격화하여 전자저울로 무게를 측정하였다.

(2) 방사선 차폐복으로 임상 적용 시 무게 비교

납과 신소재 차폐체가 방사선 차폐복으로 임상 적용 시 무게 비교를 위해 방사선차폐복의 면적을 실물로 적용하여 환산한 110 × 60 cm 면적을 기준으로 하였다. 10 × 10 cm의 경우 차폐체가 66장이 요구되며, 측정한 각 소재별 무게와 차폐율 비교를 통해 얻은 결과값 즉, 납과 유사한 차폐율을 갖는 소재별로 산출하여 방사선차폐복 제작에 필요한 신소재 차폐체의 무게를 적용하여 비교하였다.

III. 결 과

1. 차폐율 비교

납과 신소재 차폐체의 차폐율 비교를 위해 0.5 mmPb의 납을 기준으로 하여 차폐율을 5회 측정하였다(Table 2).

Table 2. Shielding rate of lead 0.5 mmPb

Thickness	Lead	
	Absorption Dose (μ Gy)	Shielding rate (%)
0.5mm	54.69	96.98
	54.95	97.01
	54.73	97.01
	54.52	97.02
	54.63	97.02
Average	54.70	97.01

Table 3. Tungsten, Bismuth materials based shields

Type	Layer	Absorption Dose(μ Gy)	Shielding rate(%)	
Tungsten Base	T3	1	699.10	61
		2	410.72	78
		3	265.54	85
		4	185.36	90
		5	133.74	93
		6	101.94	94
		7	75.338	96
		8	51.626	97
		1	872.36	52
		2	548.28	70
		3	399.48	78
	4	296.24	84	
	5	229.44	87	
	T2	6	181.98	90
		7	144.10	92
		8	115.15	94
		9	84.812	95
		10	68.28	96
		11	57.94	97
Bismuth Base	B2	1	746.90	59
		2	484.94	73
		3	337.52	82
		4	267.84	85
		5	210.56	89
		6	171.94	91
		7	143.98	92
		8	119.84	93
		9	97.87	95
		10	82.92	95
		11	64.89	96
		12	53.33	97
BF		1	153.94	92
		2	128.10	93
		3	113.20	94
		4	102.70	94
		5	89.40	95
		6	69.90	96
		7	66.20	96
		8	48.04	97
BF ₂		1	123.84	93
		2	100.22	94
		3	74.97	96
		4	61.80	97

납 0.5 mmPb의 평균 차폐율을 기준으로 신소재 차폐체가 몇 장에서 이와 유사한 차폐율을 보이는지 실험하였다. 기준이 되는 납 0.5 mmPb의 차폐율을 5회 측정된 결과 평균 97.01%의 차폐율이 측정되었다. 신소재 차폐체 T3에서는 8장에서 납과 유사한 차폐율을 보였고, T2에서는 11장에서 이와 같은 값이 측정되었다. 또한 B2에서는 12장에서 유사한 차폐율이 측정되었고, BF에서는 8장에서, BF₂에서는 4장에서 97%의 차폐율이 측정되었다(Table 3), (Fig. 4).

2. 납과 신소재 차폐체의 무게 비교

1) 10 × 10 cm 무게

납 0.5 mm 와 신소재 차폐체를 10 × 10 cm의 동일한 크기로 무게 비교를 하였다. 납은 52.3g이었고, 각각 T2는 9g, T3는 6g, B2는 5.5g, BF는 1.4g, BF₂는 2.2g으로 측정되었다(Fig. 5).

2) 방사선 차폐복으로 환산 시 무게

방사선차폐복 크기로 환산한 경우 무게는 흡수선량을 기준으로 적용하였으며, 이는 차폐복 무게로 환산할 때에 97% 차폐율이 측정된 장수를 적용하지 않고, 납과 가장 유사한 흡수선량이 측정되는 장수를 적용하였다. T3와 T2가 4,752g, B2가 4,356g, BF는 739.2g, BF₂는 871.2g로 산출되었으며, BF가 가장 가벼운 것으로 나타났다(Table 4).

IV. 고 찰

최근 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후로 국내에 있는 원자력 발전소에 대한 안전성 문제가 제기되고 있는 만큼 많은 사람들이 방사선에 대해 경각심을 갖고 피폭에 대해 주의를 기울이고 있는 실정이다. 병원에서 진단을 받기 위해 필수적으로 사용되는 의료용 방사선 역시 저 선량이지만 불필요한 방사선 노출로 인한 방사선 장애의 가능성이 있기 때문에 피폭 감소를 위한 노력이 필수적이다.

임상에서 방사선종사자의 피폭 감소를 위한 노력으로 가장 대표적인 예시가 차폐복 사용이며, 대부분의 종사자는 납 앞치마를 가장 많이 사용하고 있다. 이때 사용된 납은 방사선종사자뿐만 아니라 환자, 보호자, 방사선사, 의료인을 방사선의 위험으로부터 보호해주는 가장 보편화된 차폐체이다(6). 하지만 납은 사용횟수 누적에 따라 균열이 잘 발생하기 때문에 외부유출로 인한 중금속 중독 및 환경오염을

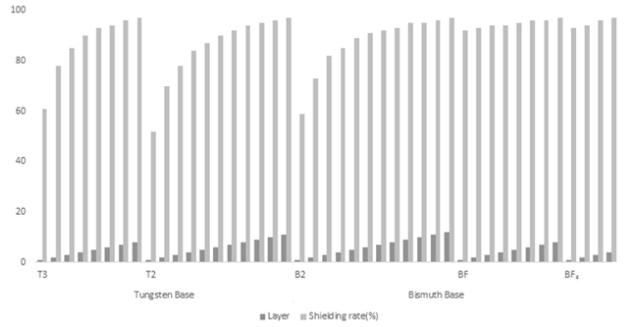


Fig. 4. Comparison of the weight of a shield with dimensions of 10 × 10 cm

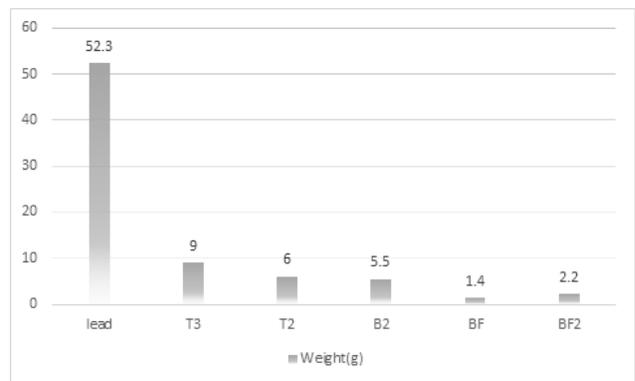


Fig. 5. Comparison of the weight of a shield with dimensions of 10 × 10 cm

Table 4. Comparison of the weight for apron

Type	Weight(g)
T3	4,752
T2	4,752
B2	4,356
BF	739.2
BF ₂	871.2

발생 시킬 수 있는 우려가 있다. 또한 납 차폐복의 장시간 착용은 납 무게로 인한 근·골격계 이상 질환의 원인이 되어 다양한 통증을 유발시키고 있어 경량화가 요구되지만 물리적 한계가 있는 상황이다. 따라서 기존의 납과 유사한 차폐 효과를 보이며 납의 한계점을 극복할 수 있는 새로운 차폐체의 임상 적용이 필요하다고 사료되며, 본 연구를 통해 신소재 차폐체인 텅스텐, 비스무스, BF의 납 대체 가능성을 비교평가 하였다.

납과 유사한 차폐율을 비교하는 실험에서 납 0.5 mm의 차폐율은 평균 97.01 %로 텅스텐 T3와 T2는 각각 8장, 11장에서 비스무스 B2는 12장, BF와 BF₂에서 각각 8장, 4장이 납

(0.5 mm)과 유사한 차폐율을 보이는 것으로 확인되었다. 이 때 각 차폐율 평가의 기준이 되는 납 차폐체는 두께 0.5 mm의 납을 사용하였는데, 납 자체의 두께에 따른 차폐율은 본 연구에 크게 의미가 없는 것으로 사료되어 0.25 mm, 0.7 mm, 1.0 mm 등 다양한 두께의 납을 모두 고려하지 않았다. 또한 텅스텐은 70~90 keV의 일정범위의 에너지 영역에서는 오히려 납보다 우수한 차폐율을 보인다고 확인되었지만 본 연구는 모든 실험에서 다양한 에너지 영역이 아닌 100 kVp로 고정된 조건만 설정하였기 때문에 텅스텐이 납보다 낮은 차폐율을 보인 것으로 사료된다.

0.5 mm의 납과 신소재 차폐체를 동일하게 10×10 cm의 크기로 제작하여 무게 비교를 진행한 결과, 납은 52.3g이었고, T2 9gT3 6g, B2 5.5g, BF 1.4g, BF₂ 2.2g으로 측정되었다. 납이 가장 무거웠고 그 다음으로 T2, T3, B2, BF₂, BF 순서로 확인되었다. 이 실험을 기반으로 신소재 차폐체를 임상에 맞게 방사선 차폐복 크기로 상품화했을 때의 무게는 T3와 T2가 4,752g으로 동일하였고, B2는 4,356g, BF는 739.2g, BF₂는 871.2g으로 순서대로 나열하였을 때 BF가 가장 가벼운 것으로 확인되었다.

실험 결과 텅스텐과 비스무스는 설정 에너지 영역에서 납보다 무게 대비 차폐율이 낮았고, 동일한 차폐율 조건이라면 상품화 되었을 때 납보다 무거워져 인체 및 환경 유해성 여부를 제외하고는 경량화 자체에 한계가 있을 것으로 분석되었다. 하지만 BF, BF₂를 이용하였을 때는 차폐율과 경량성이 모두 뛰어난 것으로 확인되어 납 앞치마의 한계점으로 여겨지던 무게의 경량화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 질적 보완 및 사용 방법에 있어서의 개선이 될 만한 연구가 이루어진다면 임상 적용의 유용성과 신소재 차폐체 활용 범위의 폭이 확대 될 수 있을 것이라 사료된다.

V. 결 론

본 연구에서 실험한 결과에 따르면 텅스텐, 비스무스, BF 중 BF가 사용된 BF, BF₂의 무게가 가장 가벼웠고 차폐율 또한 우수한 것으로 평가된다. 모든 실험은 100 kVp의 동일한 조건으로 진행되었는데, 이 영역에서 텅스텐과 비스무스는 납보다 낮은 차폐율을 보였고, 방사선 차폐복으로 상품화했을 때의 무게 또한 납보다 무거운 것으로 확인되었다. 따라서 인체 및 환경에 대한 유해성을 우선시한다면 텅스텐과 비스무스 역시 납 대체 물질로 사용될 수 있을 것이나 임상 적용 시 외부 피폭 감소와 경량화 측면까지 모두 고려할 때 BF와 BF₂의 적용이 더 유용할 것으로 사료된다.

REFERENCES

- [1] Finnerty M, Brennan, PC. Protective aprons in imaging departments: manufacturer stated lead equivalence values require validation. *European Radiology*. 2005;15(7):1477-84.
- [2] 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(1):158-66.
- [3] Raissaki M, Perisinakis, K, Damilakis J, Nicholas G. Eye-lens bismuth shielding in paediatric head CT: artefact evaluation and reduction. *Pediatric Radiology*. 2010;40(11):1748-54.
- [4] Servaes S, Zhu X. The effects of bismuth breast shields in conjunction with automatic tube current modulation in CT imaging. *Pediatric Radiology*. 2013;43(10):1287-94.
- [5] Matsuda M, Suzuki T. Evaluation of lead aprons and their maintenance and management at our hospital. *J Anesth*. 2016;30(3):518-21.
- [6] Karvatskii LM, Koval VP. Effect of molybdenum, tungsten, titanium, aluminum, and lead on the cracking of 20 steel in a medium containing hydrogen sulfide. *Soviet materials science : a transl. of Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov / Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*. 1978;14(2):213-5.
- [7] Butson M. An introduction to radiation protection in medicine. *Australasian Physics & Engineering Sciences in Medicine*. 2008;31(3):252.
- [8] Smith JR, Marsh RM, Silosky MS. Is lead shielding of patients necessary during fluoroscopic procedures? A study based on kyphoplasty. *Skeletal Radiol*. 2018;47(1):37-43.
- [9] Singh B, Chandran V, Bandhu HK, et al. Impact of lead exposure on pituitary-thyroid axis in humans. *Biometals*. 2000;13(2):187-92.
- [10] Park HH, Lee JY, Kim JH. 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.