

<원저>

실리콘 혼합 차폐체의 개발과 성능비교

정회원¹⁾·민정환²⁾¹⁾백석문화대학교 방사선학과·²⁾신구대학교 방사선학과

Development and Performance Comparison of Silicon Mixed Shielding Material

Hoi-Woun Jeong¹⁾·Jung-Whan Min²⁾¹⁾Department of Radiological Science, Baekseok culture University²⁾Department of Radiological Technology, Shingu University

Abstract A shield was made by mixing materials such as bismuth(Bi) and barium(Ba) with silicon to evaluate its shielding ability. Bismuth was made into a shield by mixing a bismuth oxide(Bi_2O_3) colloidal solution and a silicon base and applied to a fibrous fabric, and barium was made by mixing lead oxide(PbO) and barium sulfate(BaSO_4) with a silicon curing agent and solidifying it to make a shield. The test was conducted according to the lead equivalent test method for X-ray protective products of the Korean Industrial Standard. The experiment was conducted by increasing the shielding body one by one from the test condition of 60 kVp, 200 mA, 0.1sec and 100 kVp, 200 mA, 0.1 sec. At 60 kVp, 2 lead oxide-barium sulfate shields, 2 bismuth oxide 1.5 mm shields, and 5 bismuth oxide 0.3 mm shields showed shielding ability equal to or higher than that of lead 0.5 mm. At 100 kVp, 2 lead oxide-barium sulfate shields and 2 bismuth oxide 1.5 mm shields showed shielding ability equal to or higher than that of lead 0.5 mm. It was confirmed that when using 2 pieces of lead oxide-barium sulfate and 1.5 mm of bismuth oxide, respectively, it has shielding ability equivalent to that of lead. Bismuth oxide and lead oxide-barium sulfate are lightweight and have excellent shielding ability, thus they have excellent properties to be used as an apron for radiation protection or other shielding materials.

Key Words: Radiation shielding, Radiation Protection, Lead, Barium, Bismuth

중심 단어: 방사선 차폐, 방사선 방호, 납, 바륨, 비스무트

1. 서론

우리나라는 의료 기술이 발전함에 따라 의료 현장에서 사용되는 진단용 방사선 발생장치의 수는 해마다 증가하고 있어 2021년도에는 총 99,745여대에 이르고 있다[1]. 진단용 방사선 발생장치가 증가하는 것만큼 방사선의 사용 빈도는 증가할 것이고 이러한 과정에서 발생하는 환자, 보호자 및 방사선 작업 종사자에게 발생할 수 있는 불필요한 피폭을 최소화하는 것도 매우 중요한 문제이다. 방사선 피폭을 최소화하기 위해 사용되는 주된 차폐체는 납(Pb)이나 납을 주된 재료로 하는 것들이다. 납은 높은 원자번호(82)로 방사

선의 차폐능력이 우수하고 여러 물질로 가공이 우수한 장점을 가지고 있어 방사선 피폭 방어용 차폐체로 제작되어 많이 사용되고 있다[2]. 그러나 방사선 방어용 앞치마(lead apron)는 무게가 무거워 장시간 착용 시 근골격계에 질환을 초래할 수 있다[3,4]. 또한 납은 카드뮴, 수은, 비소 등과 같이 인체에 유해한 중금속으로 분류되어 있고, 과도한 노출 시 납 중독 등의 문제를 일으킬 수 있다[5,6].

이런 납을 대신할 방사선 피폭 방어용 차폐체를 제작하려면 차폐체는 엑스선 투과성이 낮으며, 의료영상을 검사하는데 있어서 최소한의 얇은 두께에도 강도가 있고 가벼워야 한다[7]. 이에 본 연구에서 납을 대신할 물체로 바륨(Ba)과

Corresponding author: Hoi-Woun Jeong, Department of Radiological Science, Baekseok Culture University, 1 Baekseokdaehak-ro, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungcheongnam-do, 310651, Republic of Korea / Tel: +82-41-550-2266 / E-mail: hwjeong@bscu.ac.kr

Received 12 May 2023; Revised 21 May 2023; Accepted 30 May 2023

Copyright ©2023 by The Korean Journal of Radiological Science and Technology

비스무트(bismuth; Bi)를 선택하였다. 바륨은 위생과 공해 면에서 문제가 없는 친환경 소재이고 바륨의 화합물인 황산 바륨은 밀도가 4.5 g/cm^3 로 매우 크고 제조 방식과 배합 방식에 따라 다양한 특성을 나타낼 수 있는 특징이 있어 방사선의 차폐체 중 납의 대체제로 사용되고 있다[8]. 비스무트는 원자번호 83으로 납보다 커서 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]. 본 연구는 바륨과 비스무트 등의 소재를 실리콘으로 혼합하여 방사선 차폐체를 만들어 그 차폐 능력을 평가하고자 하였다.

II. 실험기기 및 방법

1. 실험기기 및 재료

실험에는 진단용 방사선 발생장치(CLASCAN, LISTEM, KOREA), 반도체 선량계(MagicMax, IBA Dosimetry GdlfmbH, Germany), 산화비스무트 차폐체와 산화납황산바륨 차폐체, 차폐율 측정용 순도 99%의 가로 100 mm, 세로 100 mm, 두께 0.5 mm의 납판을 사용하였다.

2. 차폐체의 제작

1) 산화비스무트 차폐체

산화비스무트(Bi_2O_3)를 10~100 nm 크기의 나노 입자를 만든 다음 50,000 ppm 이상 혼합 분산하여 콜로이드 용액으로 제작하였다. 이것을 실리콘 베이스 고무와 콜로이드 용액을 20%와 80%의 비율로 혼합한 다음 섬유성 포(fabric)위에 도포를 하고 경화시키는 과정을 통해 차폐체를 제작하였다[8]. 이러한 과정을 통해 두께 0.16 mm의 차폐체 5장, 0.3 mm의 차폐체 5장, 1.5 mm의 차폐체 3장을 제작하여 실험에 적용하였다.



(a) Thickness 0.16 mm (b) Thickness 0.3 mm (c) Thickness 1.5 mm

Fig. 1. Shield material of Bi_2O_3 cloth

2) 산화납-황산바륨 차폐체

실리콘베이스에 경화제, 산화납(PbO), 황산바륨(BaSO_4)을 각각 45%, 5%, 15%, 35%의 비율로 혼합한 다음 아크릴로 제작한 틀에 부어 넣은 후 24시간을 상온에서 고형화를 거쳐 두께 1.6 mm의 차폐체를 5장 만들어 실험에 적용하였다[10].



Thickness 1.6 mm

Fig. 2. Shield material of $\text{PbO}+\text{BaSO}_4$

3. 차폐율 측정 실험

1) 차폐율 측정 실험

본 연구의 실험방법은 한국산업표준의 X선 방호용품류의 납당량 시험방법에 관련된 고시 내용을 참고하였다[11]. 차폐율 측정을 위한 실험에서 과전압은 60 kVp와 100 kVp, 관전류는 200 mA, 조사시간은 0.1 sec를 사용하였다. 방사선발생장치의 고유필터는 2.2 mmAl(알루미늄 당량)이며 100 kVp의 관전압을 적용하여 실험할 때 0.2 mmCu(구리 당량)의 부가필터를 추가하여 총 여과 0.25 mmCu 이상을 확보하였다. 실험의 기하학적 구조는 X선 방호용품의 납당량 시험방법 중 좁은 빔을 사용할 때의 시험방법과 동일하게 구현하여 시행하였다.

Table 1. Shielding material size, weight, density(ρ)

Shielding material	Size	weight(g)	$\rho(\text{g/cm}^3)$
Pb	100 mm × 100 mm × 0.5 mm	56.2	11.34
$\text{PbO}_3+\text{BaSO}_4$	100 mm × 100 mm × 1.6 mm	60.8	1.85
$\text{Bi}_2\text{O}_3(1.5 \text{ mm})$	100 mm × 100 mm × 1.5 mm	55.0	2.69
$\text{Bi}_2\text{O}_3(0.3 \text{ mm})$	100 mm × 100 mm × 0.3 mm	3.2	2.78
$\text{Bi}_2\text{O}_3(0.16 \text{ mm})$	100 mm × 100 mm × 0.16 mm	8.3	1.98

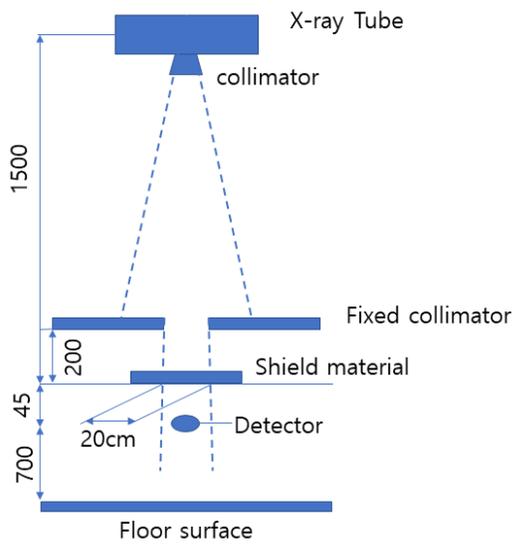


Fig. 3. Geometric method of shielding material test

최초 차폐체가 없는 상태에서 선량을 측정하고 각각의 차폐체를 한 장씩 증가시켜가면서 투과 후 선량을 측정하였다. 차폐 능력을 평가하기 위해 납판도 동일한 검사 조건에서 선량을 측정하였다. 선량 측정은 각각의 검사 조건마다 10회를 실시하고 그 평균을 기록하였다.

2) 투과율 측정 실험

차폐율 측정 실험과 동일한 기하학적 구조로 실험을 시행하였다. 실험의 검사 조건은 실제 검사 조건이 포함된 60 kVp, 80 kVp, 100 kVp, 120 kVp의 네 가지 관전압을 사용하였다. 관전류는 200 mA, 조사시간은 0.1 sec를 사용하였다. 각각의 검사 조건에서 차폐체를 한 장씩 증가시켜가면서 선량을 측정하였고 각각의 검사마다 10회 반복 실험을 하여 평균값을 기록하였다.

III. 결과

1. 차폐율 측정

60 kVp 관전압에서 차폐체가 없는 경우 10회의 평균 선량은 388.9 μ Gy이다. 0.5 mmPb의 차폐체를 투과한 선량은 15.8 μ Gy이다. 산화납-황산바륨 차폐체를 1장부터 5장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 61.9, 14.4, 4.0, 1.3, 0.4 μ Gy으로 나타났다. 산화비스무트 1.5 mm 차폐체를 1장부터 3장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 22.2, 5.2, 1.5 μ Gy으로 나타났다.

산화비스무트 0.3 mm 차폐체를 1장부터 5장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 143.2, 68.8, 36.9, 21.3, 13.0 μ Gy으로 나타났다. 산화비스무트 0.16 mm 차폐체를 1장부터 5장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 328.9, 283.4, 246.1, 214.7, 188.9 μ Gy으로 나타났다<Table 2>.

100 kVp 관전압에서 차폐체가 없는 경우 10회의 평균 선량은 62.15 μ Gy이다. 0.5 mmPb의 차폐체를 투과한 선량은 91.6 μ Gy이다. 산화납-황산바륨 차폐체를 1장부터 5장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 190.5, 89.0, 48.1, 28.3, 17.6 μ Gy으로 나타났다. 산화비스무트 1.5mm 차폐체를 1장부터 3장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 123.4, 41.7, 17.0 μ Gy으로 나타났다. 산화비스무트 0.3 mm 차폐체를 1장부터 5장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 427.2, 316.4, 243.0, 189.7, 151.7 μ Gy으로 나타났다. 산화비스무트 0.16 mm 차폐체를 1장부터 5장까지 증가시키면서 투과 후 선량을 측정하였더니 각각 586.6, 555.3, 526.4, 499.7, 475.5 μ Gy으로 나타났다<Table 3>.

2. 차폐율 비교 분석

차폐율을 비교하기 60 kVp와 100 kVp를 비교하였다. 한국산업표준의 X선 방호용품류의 납당량 시험방법에서는 100 kVp만이 권장되고 있지만 많이 사용되는 관전압 범위인 60 kVp도 추가적으로 분석하였다. 차폐율 비교 분석을 위해 기준은 가장 많이 사용되는 방사선 방어용품이며, 다른 실험에서 비교 기준으로 한 납 0.5 mm를 기준으로 차폐율 비교 분석을 하였다[8,10].

60 kVp일 때 10회 조사선량은 평균 388.9 μ Gy이고 납 0.5 mm를 투과한 선량은 15.8 μ Gy로 차폐율은 95.9%로 산출되었다. 동일 조건에서 산화납-황산바륨 차폐체 2장을 투과한 선량은 14.4 μ Gy로 차폐율이 96.3%이기에 2장 이상을 사용해 납 0.5 mm과 동등하거나 그 이상의 차폐 특성이 나타났다. 산화비스무트 1.5 mm 차폐체 2장을 투과한 선량은 5.2 μ Gy로 차폐율이 96.3%이기에 2장 이상을 사용해 납 0.5 mm과 동등하거나 그이상의 차폐 특성이 나타났다. 산화비스무트 0.3 mm 차폐체 5장을 투과한 선량은 13.0 μ Gy로 차폐율이 96.6%이기에 5장 이상을 사용해 납 0.5 mm과 동등하거나 그 이상의 차폐 특성이 나타났다. 산화비스무트 0.16 mm 차폐체 5장을 투과한 선량은 188.9 μ Gy로 차폐율이 51.4%이기에 납 0.5 mm와 동등한 차폐 능력을 나타내기에는 적합하지 않았다.

Table 2. Average dose and rate of shielding material at 60 kVp (unit : μGy)

	Non	0,5 mmPb		1	2	3	4	5
60 kVp	388.9	15.8 (95.9%)	PbO ₃ +BaSO ₄	61.9 (84.1%)	14.4 (96.3%)	4.0 (99.0%)	1.3 (99.7%)	0.4 (99.9%)
			Bi ₂ O ₃ (1.5 mm)	22.2 (83.9%)	5.2 (96.3%)	1.5 (98.9%)		
			Bi ₂ O ₃ (0.3 mm)	143.2 (63.2%)	68.8 (82.3%)	36.9 (90.5%)	21.3 (94.5%)	13.0 (96.6%)
			Bi ₂ O ₃ (0.16 mm)	328.9 (15.4%)	283.4 (27.1%)	246.1 (36.7%)	214.7 (44.8%)	188.9 (51.4%)

Table 3. Average dose and rate of shielding material at 100 kVp (unit : μGy)

	Non	0,5 mmPb		1	2	3	4	5
100 kVp (0.2 mmCu filter)	621.5	91.6 (85.3%)	PbO ₃ +BaSO ₄	190.5 (69.3%)	89.0 (85.7%)	48.1 (92.3%)	28.3 (95.4%)	17.6 (97.2%)
			Bi ₂ O ₃ (1.5 mm)	123.4 (80.2%)	41.7 (93.3%)	17.0 (97.3%)		
			Bi ₂ O ₃ (0.3 mm)	427.2 (31.3%)	316.4 (49.1%)	243.0 (60.9%)	189.7 (69.5%)	151.7 (75.6%)
			Bi ₂ O ₃ (0.16 mm)	586.6 (5.6%)	555.3 (10.7%)	526.4 (15.3%)	499.7 (19.6%)	475.5 (23.5%)

100 kVp일 때 10회 조사선량은 평균 621.5 μGy 이고 납 0.5 mm를 투과한 선량은 91.6 μGy 로 차폐율은 85.3%로 산출되었다. 동일 조건에서 산화납-황산바륨 차폐체 2장을 투과한 선량은 89.0 μGy 로 차폐율이 85.7%이기에 2장 이상을 사용해 납 0.5 mm과 동등하거나 그 이상의 차폐 특성을 나타낸다. 산화비스무트 1.5 mm 차폐체 2장을 투과한 선량은 41.7 μGy 로 차폐율이 93.3%이기에 2장 이상을 사용해 납 0.5 mm과 동등하거나 그 이상의 차폐 특성을 나타낸다. 산화비스무트 0.3 mm 차폐체 5장을 투과한 선량은 151.7 μGy 로 차폐율이 75.6%이기에 납 0.5 mm와 동등한 차폐 능력을 나타내기에는 적합하지 않았다. 산화비스무트 0.16 mm 차폐체 5장을 투과한 선량은 475.5 μGy 로의 차폐율이 23.5%이기에 납 0.5 mm와 동등한 차폐 능력을 나타내기에는 적합하지 않았다.

3. 투과율

산화납-황산바륨 차폐체 1.6 mm를 사용했을 때 감약율은 60 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량은 137.9 μGy 에서 차폐체 1.6 mm를 사용 후 22.2 μGy 로 16.1%가 투과되었다. 80 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 295.7 μGy 에서 차폐체 1.6 mm를 사용 후 70.2 μGy 로 23.8%가 투과되었다. 100 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 479.4 μGy 에서 차폐체 1.6 mm를 사용 후 146.7 μGy 로 30.6%가 투과되었

다. 120 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 678.6 μGy 에서 차폐체 1.6 mm를 사용 후 242.1 μGy 로 35.7%가 투과되었다<Table 4>[Fig 4].

산화비스무트 1.5 mm 차폐체를 사용했을 때 투과율은 60 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량은 137.9 μGy 에서 차폐체 1.5 mm를 사용 후 2.7 μGy 로 2.0%가 투과되었다. 80 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 295.7 μGy 에서 차폐체 1.5 mm를 사용 후 19.5 μGy 로 6.6%가 투과되었다. 100 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 479.4 μGy 에서 차폐체 1.5 mm를 사용 후 57.6 μGy 로 12.0%가 투과되었다. 120 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 678.6 μGy 에서 차폐체 1.5 mm를 사용 후 99.9 μGy 로 14.7%가 투과되었다<Table 5>[Fig 5].

산화비스무트 0.3 mm 차폐체를 사용했을 때 투과율은 60 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량은 137.9 μGy 에서 차폐체 0.3 mm를 사용 후 61.6 μGy 로 44.7%가 투과되었다. 80 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 295.7 μGy 에서 차폐체 0.3 mm를 사용 후 161.2 μGy 로 54.5%가 투과되었다. 100 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 479.4 μGy 에서 차폐체 0.3 mm를 사용 후 290.8 μGy 로 60.7%가 투과되었다. 120 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 678.6 μGy 에서 차폐체 0.3 mm를 사용 후 436.3 μGy 로 64.3%가 투과되었다<Table 6>[Fig 6].

Table 4. Transmission through PbO₃+BaSO₄ 1,6 mm

(unit : μGy)

kVp	Number of sheet (thickness, mm)						
	0 (0,0 mm)	1 (1,6 mm)	2 (3,2 mm)	3 (4,8 mm)	4 (6,4 mm)	5 (8,0 mm)	
60	137.9 (100,0%)	22,2 (16,1%)	5,2 (3,7%)	1,5 (1,1%)	0,5 (0,3%)	0,2 (0,1%)	
80	295,7 (100,0%)	70,2 (23,8%)	25,2 (8,5%)	11,5 (3,9%)	5,8 (2,0%)	3,1 (1,1%)	
100	479,4 (100,0%)	146,7 (30,6%)	66,5 (13,9%)	36,6 (7,6%)	21,5 (4,5%)	13,3 (2,8%)	
120	678,6 (100,0%)	242,1 (35,7%)	120,5 (17,8%)	68,2 (10,1%)	41,2 (6,1%)	26,1 (3,8%)	

Table 5. Transmission through Bi₂O₃ 1,5 mm

(unit : μGy)

kVp	Number of sheet (thickness, mm)			
	0 (0,0 mm)	1 (1,5 mm)	2 (3,0 mm)	3 (4,5 mm)
60	137.9 (100,0%)	2,7 (2,0%)	0,2 (0,1%)	NA NA
80	295,7 (100,0%)	19,5 (6,6%)	4,3 (1,5%)	1,1 (0,4%)
100	479,4 (100,0%)	57,6 (12,0%)	18,1 (3,8%)	6,7 (1,4%)
120	678,6 (100,0%)	99,9 (14,7%)	32,8 (4,8%)	12,7 (1,9%)

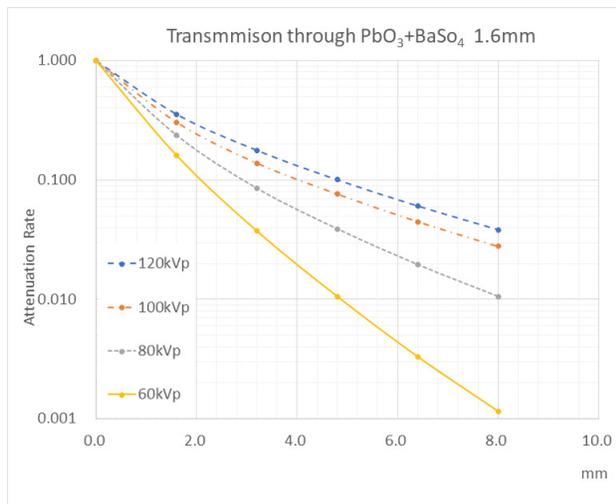


Fig. 4. Transmission through PbO₃+BaSO₄ 1,6 mm

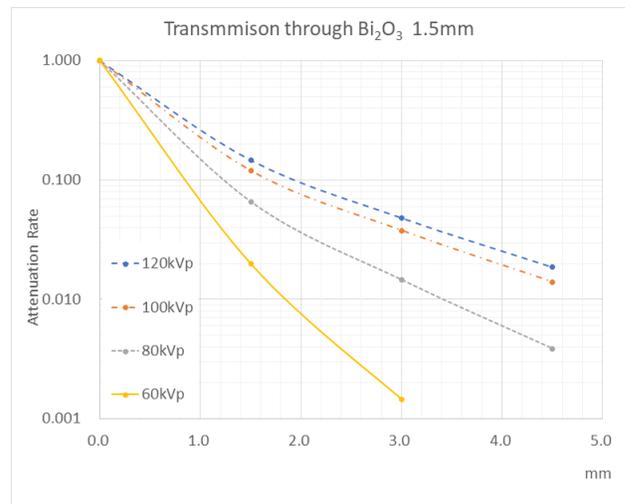


Fig. 5. Transmission through Bi₂O₃ 1,5 mm

산화비스무트 0.16 mm 차폐체를 사용했을 때 투과율은 60 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량은 137.9 μGy에서 차폐체 0.16 mm를 사용 후 119.6 μGy로 86.7%가 투과되었

다. 80 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 295.7 μGy에서 차폐체 0.16 mm를 사용 후 265.6 μGy로 89.8%가 투과되었다. 100 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 479.4 μGy에

Table 6. Transmission through Bi₂O₃ 0.3 mm

(unit : μ Gy)

kVp	Number of sheet (thickness, mm)						
	0 (0.0 mm)	1 (0.3 mm)	2 (0.6 mm)	3 (0.9 mm)	4 (1.2 mm)	5 (1.5 mm)	
60	137.9 (100.0%)	61.6 (44.7%)	31.1 (22.5%)	16.9 (12.3%)	9.7 (7.0%)	5.8 (4.2%)	
80	295.7 (100.0%)	161.2 (54.5%)	98.8 (33.4%)	65.0 (22.0%)	45.3 (15.3%)	32.4 (11.0%)	
100	479.4 (100.0%)	290.8 (60.7%)	194.7 (40.6%)	140.7 (29.4%)	108.2 (22.6%)	83.4 (17.4%)	
120	678.6 (100.0%)	436.3 (64.3%)	306.7 (45.2%)	227.6 (33.5%)	178.2 (26.3%)	140.2 (20.7%)	

Table 7. Attenuation rate by Bi₂O₃ 0.16 mm

(unit : μ Gy)

kVp	Number of sheet (thickness, mm)						
	0 (0.16 mm)	1 (0.32 mm)	2 (0.48 mm)	3 (0.64 mm)	4 (0.80 mm)	5 (0.96 mm)	
60	137.9 (100.0%)	119.6 (86.7%)	104.7 (75.9%)	92.2 (66.8%)	82.2 (59.6%)	73.2 (53.1%)	
80	295.7 (100.0%)	265.6 (89.8%)	240.4 (81.3%)	218.5 (73.9%)	199.7 (67.5%)	183.9 (62.2%)	
100	479.4 (100.0%)	439.3 (91.6%)	404.1 (84.3%)	374.6 (78.2%)	348.0 (72.6%)	326.3 (68.1%)	
120	678.6 (100.0%)	629.5 (92.8%)	585.4 (86.3%)	547.3 (80.7%)	514.5 (75.8%)	485.7 (71.6%)	

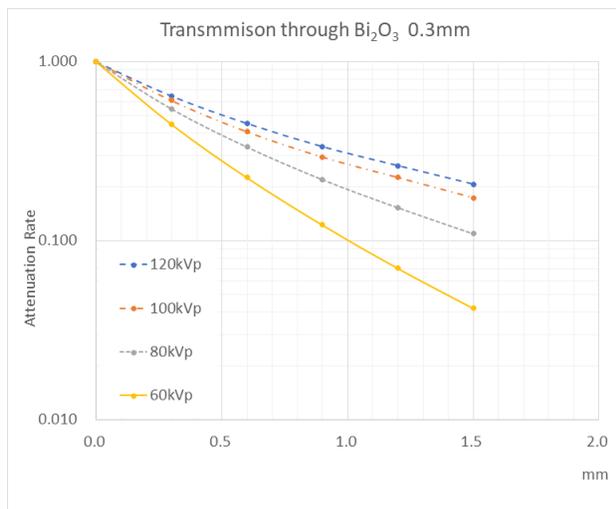


Fig. 6. Transmission through Bi₂O₃ 0.3 mm

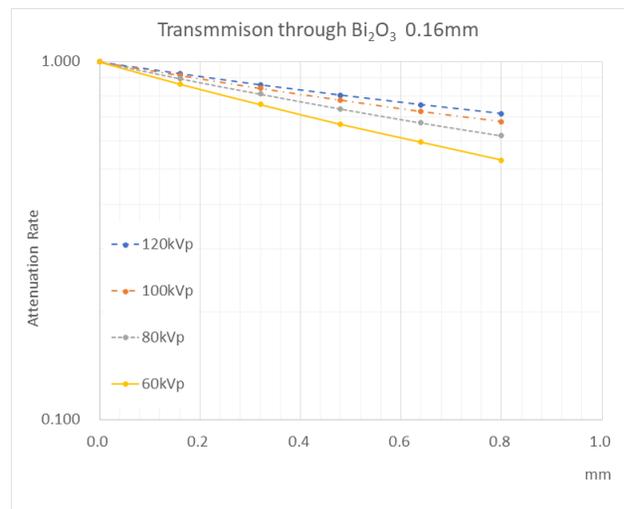


Fig. 7. Transmission through Bi₂O₃ 0.16 mm

서 차폐체 0.16 mm를 사용 후 439.3 μ Gy로 91.6%가 투과되었다. 120 kVp에서는 차폐체가 없을 때 선량 678.6 μ Gy

에서 차폐체 0.16 mm를 사용 후 629.5 μ Gy로 92.8%가 투과되었다<Table 7>[Fig 7].

Table 8. Half Vale Layer of PbO₃+BaSO₄, Bi₂O₃ 1.5 mm, 0.3 mm, 0.16 mm

Half Vale Layer (mm) \ kVp	PbO ₃ +BaSO ₄	Bi ₂ O ₃ 1.5 mm	Bi ₂ O ₃ 0.3 mm	Bi ₂ O ₃ 0.16 mm
60	0.72	0.29	0.30	NA
80	1.01	0.47	0.41	NA
100	1.27	0.60	0.51	NA
120	1.43	0.66	0.57	NA

4. 반가층(Half Vale Layer)

산화납-황산바륨과 산화비스무트 1.5 mm, 0.3 mm의 관전압별 투과율 그래프[Fig 4-6]를 적용하여 각각의 차폐체마다 관전압에 따른 반가층을 구하였다. 산화납-황산바륨 차폐체는 60 kVp에서는 0.72 mm, 80 kVp에서는 1.01 mm, 100 kVp에서는 1.27 mm, 120 kVp에서는 1.43 mm를 나타냈다. 산화비스무트 1.5 mm 차폐체는 60 kVp에서는 0.29 mm, 80 kVp에서는 0.47 mm, 100 kVp에서는 0.60 mm, 120 kVp에서는 0.66 mm를 나타내었다. 산화비스무트 0.3 mm 차폐체는 60 kVp에서는 0.30 mm, 80 kVp에서는 0.41 mm, 100 kVp에서는 0.51 mm, 120 kVp에서는 0.57 mm를 나타내었다. 산화비스무트 0.16 mm 차폐체는 최고두께에서도 감약율이 50%이상으로 나타나 반가층을 구하지 못하였다 <Table 8>.

IV. 고 찰

의료기관에서 시행하는 진단용 방사선 발생장치의 경우 개인의 방사선 방호를 위해 납을 주된 차폐체로 사용한 방호복이나 보조기구를 사용하고 있습니다[12]. 하지만 납을 주재료로 사용할 경우 환경에 문제가 야기 될 수 있고 납의 특성상 열에 취약하기에 새로운 차폐물질에 대한 필요성이 증가되고 있고, 여러 연구자들이 다양한 물질로 차폐체를 제작하는 연구 및 특허출원이 진행 중이다[13-17]. 이에 본 연구에서는 납에 바륨(Ba)과 실리콘(Si) 화합물로 들어 고형화한 산화납-황산바륨(PbO₃+BaSO₄) 차폐체와 실로콘베이스 용액에 산화비스무트(Bi₂O₃) 혼합하여 도포한 천으로 만든 차폐체를 제작하였다. 이렇게 제작한 차폐체의 특징은 인체에 무해하고 물리적 성질도 매우 유연하여 물리적 자극에 쉽게 변형되거나 파손되지 않는 특성을 가지고 있다[18].

납의 밀도는 11.34 g/cm³로 매우 무거운 물질 중 하나이다. 그렇지만 본 연구를 통해 개발된 산화납-황산바륨은 밀도가 1.85 g/cm³이고 산화비스무트 중 1.5 mm의 밀도는

2.69 g/cm³이고 0.3 mm의 밀도는 2.78 g/cm³이며, 0.16 mm의 밀도는 1.98 g/cm³이다<Table 1>. 납에 비해 매우 가볍기에 이를 방사선 방어용 앞치마 같은 차폐체를 제작할 때도 가볍게 제작할 수 있을 것이다.

60 kVp의 상태에서는 산화납-황산바륨은 2장, 산화비스무트 1.5 mm 2장, 산화비스무트 0.3 mm는 5장 등을 사용하면 납 0.5 mm와 동등하거나 더 우수한 차폐 능력을 가진다. 하지만 산화비스무트 0.16 mm의 경우는 5장으로서는 납 0.5 mm의 차폐 능력을 나타낼 수 없다.

100 kVp의 상태에서는 산화납-황산바륨은 2장, 산화비스무트 1.5 mm 2장 등을 사용하면 납 0.5 mm와 동등하거나 더 우수한 차폐 능력을 가진다. 하지만 산화납비스무트 0.3 mm와 0.16 mm는 제작된 5장을 사용해서는 납 0.5 mm의 차폐능력을 나타낼 수 없다. 산화납-황산바륨과 산화비스무트 1.5 mm의 경우 차폐 능력이 좋기에 납당량 0.5 mm에 준하는 차폐를 사용하는 방사선 보호 기구 제작에 적용하면 유용할 것이다.

차폐 방어벽을 계산할 때 주당 최대 피폭한도, 선원에서 방어벽까지의 거리, 주당 최대 동작시간, 사용인자, 점유인자 등을 고려하여 사용 최대 관전압에서의 투과율을 적용하여 계산하여야 하다[20]. 본 연구에서는 다양한 검사 환경에서 적용할 수 있도록 관전압 60, 80, 100, 120 kVp의 상태에서 투과율 데이터와 반가층을 구하였다<Table 4-8>, [Fig 4-7].

납의 경우 100 kVp에서 0.23~0.28 mm 범위에서 반가층을 나타내었고 철은 1.8~2.7 mm의 반가층을 나타내었다 [19,20]. 본 연구에서 구해진 산화납-황산바륨의 반가층은 1.27 mm, 산화비스무트 1.5 mm의 반가층은 0.60 mm, 산화비스무트 0.3 mm의 반가층은 0.51 mm로 납보다는 크지만 철보다는 작은 반가층으로 나타났다. 120 kVp 이상에서도 납의 반가층은 0.28~0.31 mm이고, 철의 반가층은 2.43~3.6 mm를 나타내었다[19, 20]. 본 연구에서 구해진 산화납-황산바륨의 반가층은 1.43 mm, 산화비스무트 1.5 mm의 반가층은 0.66 mm, 산화비스무트 0.3 mm의 반가층

은 0.57 mm로 납보다는 크지만 철보다는 작은 반가층으로 나타났다.

본 연구를 통해 산화납-황산바륨, 산화비스무트 1.5 mm, 산화비스무트 0.3 mm는 납보다는 차폐체의 두께가 증가하겠지만 철보다는 얇은 차폐체로서 적용될 수 있다는 것을 확인 하였다. 이러한 재료들로 차폐 방어벽을 만든다면 친환경적인 차폐체가 될 것이다.

산화납-황산바륨의 경우 재료 전체를 혼합한 다음 고품화하는 방법으로 제작을 하였기에 얇게 제작하기는 어려운 단점을 가지고 있다. 하지만 경량이고 차폐 능력이 우수하기에 방사선 방호용 앞치마나 기타 차폐체로 활용하기에는 우수한 특성이 있다.

산화비스무트는 혼합 분산한 용액을 섬유성 포에 도포하는 방식으로 제작하였기에 얇게 제작할 수 있으나 얇을 경우 균일도가 일정하지 않을 수 있고 너무 얇게 만든 것은 차폐 능력이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 그러나 납을 전혀 사용하지 않으며 적정 두께 이상(1.5 mm)이상이 되면 차폐 능력이 우수하기에 다양한 차폐체 제작에 유용하다.

V. 결론

납의 비중을 줄이면서 납과 동등한 차폐 능력을 가진 차폐체로 산화납-황산바륨과 산화비스무트 차폐체를 제작하였다. 산화납-황산바륨과 산화비스무트 1.5 mm를 각각 2장 사용할 경우 납보다 두께는 증가하지만 밀도가 작아 방사선 방어용 앞치마 등을 제작하기에 적합한 납 0.5 mm와 동등하거나 그 이상의 차폐 능력을 가졌다. 그렇지만, 산화비스무트 0.3 mm의 경우 60 kVp에서 5장을 사용하였을 때만 납 0.5 mm와 동등한 차폐 능력 나타내어 사용 범위를 제한 할 때만 차폐체로 사용이 가능하다.

산화납-황산바륨과 산화비스무트 차폐체를 차폐 방어벽으로 사용할 경우에 납보다는 두께가 증가하지만 철보다는 얇은 두께로 차폐 방어벽을 제작할 수 있다. 산화납-황산바륨과 산화비스무트 차폐체는 납보다는 방사선 차폐 능력이 떨어지지만 가공성이 우수하고 화학적으로 안정적이며 가법기에 방사선 방어용 차폐체나 차폐 방어벽을 제작하기에 적합하다. 다만 산화비스무트 차폐체는 두께에 따라 그 차폐능력이 차이가 발생하기에 차폐 목적에 적합한 차폐 능력을 확인 할 필요성은 있다.

REFERENCES

- [1] Song SK, Gil JW, Lee BY. Status of diagnostic X-ray equipment in the Republic of Korea, 2021. Public Health Weekly Report. 2022;15(51):3021-32.
- [2] Jang DG, Lee SH, Choi HS, Son JC, Toon CY, Ji YS, et al. A study on the apron shielding ratio according to electromagnetic radiation energy. Journal of Radiological Science and Technology. 2014;37(4):247-52.
- [3] Kwon YH. A study of MSDs and their policy reform for workers in healthcare and medical fields [master's thesis]. Seoul: Seoul Tech; 2009.
- [4] Matsuda M, Suzuki T. Evaluation of lead aprons and their maintenance and management at our hospital. J Anesth. 2016;30(3):518-21.
- [5] Park KY. Modification of lipoproteins by blood lead (Pb) to result skin toxicity and pro-atherogenic effect [master's thesis]. Gyeongbuk: Young-Nam Univ; 2014.
- [6] Korea Industry Society Association. Safety policy against lead poisoning. KISA, 05; 1995.
- [7] Kim SC, Kim KT, Park JK. Barium compounds through monte carlo simulations compare the performance of medical radiation shielding analysis. Journal of the Korean Society of Radiology. 2013;7(6):403-8.
- [8] Kim SC, Park MH. Development of radiation shield with environmentally-friendly materials; I : Comparison and evaluation of fiber, rubber, silicon in the radiation shielding sheet. Journal of Radiological Science and Technology. 2010;33(2):121-6.
- [9] 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.
- [10] Jang SG, Han SC, Kang SJ, Lee SS. Preliminary study for development of low dose radiation shielding material using liquid silicon and metallic compound. Journal of Radiological Science and Technology. 2017;40(3):461-8.
- [11] Korea Standard. Testing method of lead equivalent for x-ray protective devices, No. 2015-0654. KS

- A 4025; 2017.
- [12] Ngaile JE, Uiso CBS, Msaki P, Kamena R. Use of lead shields for radiation protection of superficial organs in patients undergoing head CT examinations. *Radiation Protection Dosemetry*. 2008;130(4):490-8.
- [13] Korean intellectual property office patent gazette(A), Radiation shielding fabric, Number 10-08600332; 2008.
- [14] Korean intellectual property office patent gazette(A), Radiation shielding fabric, Number 10-2009-0011082; 2009.
- [15] Choi TJ, Oh YK, Kim JH, Kim OB. Development of lead free shielding material for diagnostic radiation beams. *Medical Physics*. 2010;21(2):232-7.
- [16] Park YS, Lee JS, Dong KR. Compare shielding performance evaluation of lead alternatives. *Advanced Engineering and Technology*. 2015;8(1):79-85.
- [17] L HR. Preparation and characterization of X-ray shielding materials by tungsten-silicon composites [master's thesis]. Daegu: University of Keimyung; 2014.
- [18] Trapp JV, Kron T, Webster JG, Tabakov S, Ritenour ER, Ng KH, et al. An introduction to radiation protection in medicine. Adelaide: Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine; 2008.
- [19] Jeong HW, Kim JM, Lin SS. Broad beam transmission properties of some shielding materials for use in diagnostic radiology. *Journal of Radiological Science and Technology*. 2004;27(4):23-9.
- [20] National Council on Radiation Protection and Measurements(NCRP). Structural shielding design and evaluation for medical use of X rays and gamma rays of energies up to 10 MeV. Bethesda: NCRP; 1976.

구분	성명	소속	직위
제1저자/교신저자	정희원	백석문화대학교	부교수
공동저자	민정환	신구대학교	부교수