

Evaluation of Shielding Performance of Polymer-Tungsten Composites in High-Energy Electron Beam Therapy

Dong Hwan Kim¹, Yong In Cho^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer Center

²Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholic University of Pusan

Received: December 04, 2024. Revised: December 27, 2024. Accepted: December 31, 2024.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the clinical applicability of polymer composites as potential substitutes for conventional tungsten shields and low-melting-point lead alloys in high-energy electron beam therapy for the eye. Using monte carlo simulation, the shielding effectiveness of ocular adnexa was assessed. The results showed that PLA+W composites achieved shielding performance comparable to tungsten and lead alloys at thicknesses of 4 mm for 6 MeV electron beams and 6 mm for 9 MeV electron beams. PMMA+W composites demonstrated higher shielding effectiveness than lead alloys at 2 mm thickness for 6 MeV electron beams, achieving a shielding rate of 90.3% in the sensitive volume of the lens, comparable to that of tungsten shields. For 9 MeV electron beams, PMMA+W composites exhibited slightly lower shielding effectiveness at 2 mm thickness but achieved equivalent performance to tungsten shields at 4 mm thickness. Polymer composites, through adjustments in material composition and thickness according to electron beam energy, are considered viable alternatives to conventional shielding materials. Additionally, they hold potential for the development of patient-specific shielding devices as effective radiation protection materials.

Keywords: Monte carlo simulation, Lens shield, polymer materials, electron beam therapy

I. INTRODUCTION

고에너지 전자선은 표면과 인접한 특정 깊이 에너지를 전달하는 특성으로 표재성 종양 치료에 효과적인 방법이다^[1]. 방사선 치료의 주요 목적은 처방선량을 종양에 집중적으로 전달하고, 주변 정상조직에는 최소한의 선량을 전달하여 종양을 제거하는 것이다. 광자선 치료에서는 다엽 콜리메이터(Multi Leaf Collimator, MLC)를 사용하여 정상조직을 보호하는 반면, 전자선은 고 원자번호 물질과의 상호작용을 통해 발생하는 제동복사선으로 다엽 콜리메이터 사용이 제한되며, 제작형 차폐체 사용이 필수적이다^[2]. 일반적으로 사용되는 저용융점 납 합금(Lipowitz Metal, 50% bismuth, 27% lead,

13% tin, 10% cadmium)은 용융점이 70°C로 비교적 낮아 특정 부위에 맞춤 제작이 용이하다. 그러나 제작 과정에서 발생하는 납과 카드뮴의 유해가스는 작업자의 건강에 심각한 위험을 초래할 수 있으며, 제작 시 개인 보호 장비 착용과 적절한 환기 시스템이 요구된다^[3,4]. 텅스텐은 유독성이 낮고 높은 밀도와 방사선 차폐 성능이 우수한 장점이 있지만, 안구 방사선 치료에서는 사용이 제한적이다. 환자의 수정체 및 안구 부속기관은 방사선에 매우 민감하며, 개인별로 크기가 상이하여 방사선 치료 시 매우 정밀한 차폐 설계가 필요하다^[5]. 하지만 텅스텐은 약 3422°C의 높은 용융점으로 인해 맞춤형 제작 공정이 복잡하며, 이에 따라 제작비용이 증가할 수 있다. 또한, 높은 밀도로 인해 차폐체의 무게가

* Corresponding Author: Yong In Cho

E-mail: yicho@cup.ac.kr

Tel: +82-10-8725-9669

증가하여 임상에서 개인 맞춤형 차폐체를 제작하는데 한계가 있다.

최근 연구에서는 폴리머 소재가 기존 차폐체의 대체 물질로서 주목받고 있다^[6,7]. 폴리머는 경량성, 기계적 강도 및 가공 용이성이 뛰어나며, 무연 복합재로서 처리 및 폐기 과정에서 안전한 환경을 제공할 수 있다^[8]. 생분해성 폴리머인 PLA(Polylactic Acid)는 낮은 용융점과 높은 정밀도로 3D 프린팅에 적합하며, 다양한 형태의 차폐체 제작에 사용된다. PMMA(Polymethyl Methacrylate)는 아크릴 소재로서 경량성과 내구성이 뛰어나고, 용이한 성형 및 비용 효율성으로 다양한 응용 분야에 활용되고 있다. 폴리머 복합재는 혼합되는 물질에 따라 다양한 종류의 방사선 차폐체 제작에 유용하다^[9-11]. Adeli 연구팀은 에폭시-붕소 카바이드 복합재를 제작하여 열중성자 플루언스를 측정함으로써 중성자 감쇠 특성에 미치는 영향에 대해 보고하였으며^[12], Aygun 연구팀은 몰리브덴 분말을 첨가한 폴리머를 사용하여 파라핀 및 콘크리트와의 차폐 성능을 비교 분석하였다^[13]. 또한, 텅스텐(W), 비스무트(Bi), 탄탈륨(Ta) 등의 금속 물질을 혼합한 폴리머는 엑스선 및 감마선 감쇠에도 효과적인 것으로 보고되고 있다^[14]. 의료 분야에서는 전자선 치료 시 효과적으로 차폐할 수 있는 소재에 대한 요구가 증가하고 있으나, 고에너지 전자선에 대한 폴리머 복합재 연구는 아직 미흡한 실정이며, 추가적인 차폐 성능 평가에 관한 연구가 필요하다.

이에 본 연구는 몬테카를로 전산모사를 활용하여 안구의 고에너지 전자선 치료 상황을 모사하고, 폴리머 복합재와 기존 차폐 물질을 대상으로 전자선 에너지에 따른 차폐체 두께 변화가 안구 부속기관의 선량 감소에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 통해 전자선 치료 시 정상조직을 보호할 수 있는 환자 맞춤형 차폐체로서 적용 가능성에 대해 평가하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 전자선 치료에 대한 전산모사

몬테카를로 방법은 난수를 사용하여 확률적 문

제를 해결하는 통계적 기법으로, 변수의 불확실성을 고려하여 시뮬레이션을 반복 수행함으로써 결과를 예측 및 분석할 수 있다. 선행 연구에서는 안와림프종에 대한 전자선 치료 시 안구 부속기관의 선량평가와 텅스텐 차폐체의 두께 변화에 따른 차폐 효과를 평가하였다^[15]. 본 연구는 MCNPX(Monte Carlo N-Particle Extended 2.5.0)를 활용하여 선행 연구에서 모사된 의료용 선형가속기 및 안구의 수학적 모델을 기반으로 차폐 물질 변화에 따른 차폐 성능 평가를 수행하였다. 모사된 의료용 선형가속기는 Elekta 사의 Infinity 모델이며, MIRD 팬텀을 기반으로 모사한 안구 모델은 Fig. 1에 나타내었다.

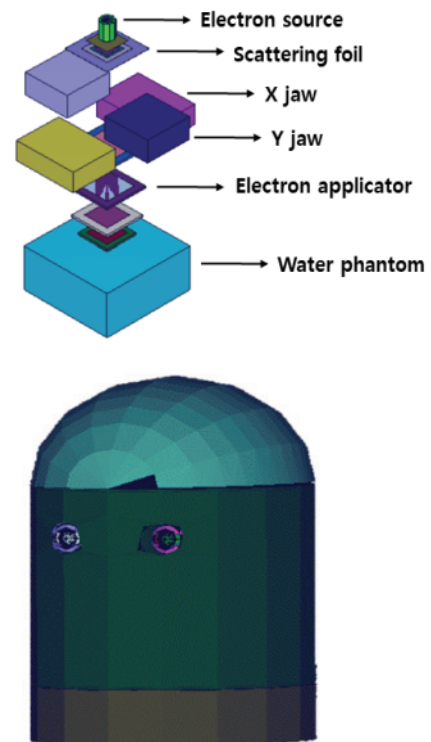


Fig. 1. Linear accelerator and MIRD head phantom simulated using MCNPX.

2. 폴리머 차폐 물질 선정

임상에서 사용되는 납 합금과 텅스텐의 차폐 성능 비교를 위해 두 가지 폴리머 복합재를 선정하였다. 첫 번째, Rapid 3D shield사에서 제공하는 폴리락티드-텅스텐(Polylactic acid+Tungsten, PLA+W) 복합재는 3D 프린팅으로 상용화된 물질이며 텅스텐 비율과 밀도를 동일하게 모사하였다. 두 번째, 폴리

메틸메타크릴레이트-텅스텐(Poly methyl methacrylate+Tungsten, PMMA+W) 복합재로 금속의 질량 비율에 따른 밀도는 Eq. (1)을 사용하여 계산하였다. 복합재의 밀도는 방사선 차폐 효과의 최적 텅스텐 비율을 혼합한 연구 결과를 바탕으로 산출되었으며, 납 합금, 텅스텐 및 폴리머 복합재의 밀도와 원소 조성비는 Table 1에 나타내었다^[16].

$$\rho_{comp} = \frac{\rho_{metal} \cdot \rho_{polym}}{\rho_{metal} - f_m(\rho_{metal} - \rho_{polym})} \quad (1)$$

- ρ_{comp} : 복합 재료의 밀도
- ρ_{metal} : 금속(W)의 밀도
- ρ_{polym} : 폴리머(PMMA)의 밀도
- f_m : 금속(W)의 질량 백분율

Table 1. Composition and density of shielding materials

Material	Component	Elemental ratio (wt%)	Density (g/cm ³)
Lipowitz Metal	Bi, Pb, Sn, Cd	Bi(50%), Pb(27%), Sn(13%), Cd(10%)	9.67
Tungsten	W	W(100%)	19.25
PLA + W(93%)	C, H, O, W	C(3.5%), H(0.4%), O(3.1%), W(93%)	7.8
PMMA + W(97%)	C, H, O, W	C(1.8%), H(0.24%), O(0.96%), W(97%)	13.21

3. 대체 물질의 차폐 성능 평가

본 연구에서는 폴리머 복합재의 차폐 성능 평가를 위해 납 합금, 텅스텐을 비교 대상으로 선정하였다. 차폐 성능 평가는 안구 부속기관의 수정체의 민감 영역(Sensitive volume), 비민감 영역(Insensitive volume), 전방(Anterior chamber), 유리체(Vitreous body), 각막(Cornea), 눈꺼풀(Eyelid)로 여섯 가지 영역을 세분화하여 흡수선량을 평가하였다. 전자선 에너지는 6 MeV와 9 MeV로 설정하였고, 조사 조건은 SSD 100 cm 거리에서 10 cm × 10 cm 조사야로 좌측 안구를 대상으로 조사하였다. 차폐체의 두께는 2 ~ 8 mm 범위로 선정하여 안구 전면부에 배치하였다. 모의실험은 F6 Tally를 사용하여 단위 질량당 축적된 에너지 분포(MeV/g)를 획득하였으며, 흡수선량(fGy) 단위로 변환했다. 몬테카를로 전산

모사의 모의 추정횟수(nps)는 10⁷번 반복 수행하였고, 결과에 대한 불확도(uncertainty)는 5% 미만으로 확인되었다.

III. RESULT

1. 폴리락티드-텅스텐(PLA+W)의 차폐 성능 평가

안구의 전자선 치료 시 폴리머 복합재에 대한 차폐 성능을 평가하기 위해 전자선 에너지와 차폐체 두께 증가에 따른 안구 부속기관의 선량 분포를 비교 분석하였다. PLA+W 복합재의 차폐 성능 평가 결과, 6 MeV 전자선 조사 시 두께에 따른 차폐율은 Table 2와 같다. 2 mm 두께에서는 폴리락티드-텅스텐의 밀도가 텅스텐과 저용융점 납 합금에 비해 낮아 안구 부속기관별 차폐율이 약 60% 수준으로 나타났으며, 다른 두께와 비교했을 때 다소 낮은 차폐 성능을 나타내어 전자선 에너지에 대한 충분한 차폐 효율을 보이지 못했다. 하지만 4 mm 두께에서는 수정체의 민감 영역, 비민감 영역, 전방 영역의 차폐율이 크게 향상되었으며, 6 mm 이상의 두께에서는 차폐율 증가폭이 약 1% 이내로 미미한 수준을 보였다.

9 MeV 전자선 조사 시 두께에 따른 차폐율은 Table 3과 같다. 6 MeV 전자선에 비해 2 mm 두께에서 전반적으로 차폐율이 낮게 나타났으며, 4 mm 두께에서도 최대 5% 이상의 차폐 성능의 저하를 보였다. 6 mm 이상의 두께에서는 수정체의 민감 영역, 비민감 영역, 전방 영역에서 차폐율이 증가하는 양상을 나타내었으며, 6 MeV 전자선에 비해 더 높은 차폐 성능을 보였다.

Table 2. Shielding efficiency of PLA+W by thickness and ocular structures for 6 MeV electron beam

Tissue	PLA+W(93%)			
	2 mm W	4 mm W	6 mm W	8 mm W
Sensitive of lens	61.9%	89.5%	89.9%	90.5%
Insensitive of lens	65.2%	83.8%	84.7%	84.8%
Anterior chamber	60.0%	85.3%	86.6%	86.2%
Vitreous body	55.4%	60.0%	61.0%	61.3%
Cornea	34.4%	42.1%	43.0%	43.5%
Eyelid	23.1%	28.9%	28.9%	29.1%

Table 3. Shielding efficiency of PLA+W by thickness and ocular structures for 9 MeV electron beam

Tissue	PLA+W(93%)			
	2 mm W	4 mm W	6 mm W	8 mm W
Sensitive of lens	45.0%	85.0%	92.8%	93.7%
Insensitive of lens	50.8%	85.2%	92.4%	92.4%
Anterior chamber	36.3%	82.6%	91.8%	91.4%
Vitreous body	42.6%	54.8%	56.7%	57.1%
Cornea	18.8%	33.2%	36.2%	36.9%
Eyelid	10.3%	20.9%	22.5%	23.2%

PLA+W 복합재와 텅스텐 및 저용융점 납 합금과의 차폐율 비교 분석 결과는 Fig. 2와 같이, 6 MeV 전자선 조사 시 2 mm 두께에서 수정체의 민감 영역의 차폐율은 61.9%로 텅스텐과 저용융점 납 합금에 비해 각각 28.5% 와 16.2% 낮은 차폐율을 나타내었다. 수정체의 비민감 영역에서는 65.2%로 텅스텐 대비 18.6%, 저용융점 납 합금 대비 9.8% 낮은 차폐율을 보였다. 전방 영역의 차폐율은 60%로 텅스텐 대비 26.7%, 저용융점 납 합금 대비 13.9% 낮았으며, 유리체 영역은 55.4%로 각각 4.8%, 3.1%, 각막 영역은 34.4로 8%와 4.3%, 눈꺼풀 영역은 23.1로 4.9%와 2.4% 낮은 차폐율을 보였다. 4 mm 두께에서는 텅스텐과 비교하여 모든 안구 부속기관에서 차폐율 차이가 3% 이내로 줄었으며, 6 mm 이상의 두께에서는 텅스텐 차폐체와 저용융점 납 합금과 동등한 차폐 성능을 나타내었다.

9 MeV 전자선의 차폐율 비교 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 2 mm 두께에서는 모든 안구 부속기관에서 차폐율이 50% 이하로 나타나 차폐 효율이 낮은 것으로 확인되었다. 4 mm 두께에서는 수정체의 민감 영역의 차폐율이 85.0%로 텅스텐과 저용융점 납 합금에 비해 각각 7.6%와 8.0% 낮은 성능을 보였다. 수정체의 비민감 영역에서는 차폐율이 85.2%로 각각 7.5%와 6.4% 낮았으며, 전방 영역에서는 82.6%로 각각 9.8%와 7.9% 낮은 결과를 나타내었다. 유리체 영역에서는 54.8%로 1.8%와 1.1%, 각막 영역에서는 33.2%로 2.9%와 2.2%, 눈꺼풀 영역에서는 20.9%로 1.6%와 1.1%의 낮은 차폐율을 보였다. 6 mm 두께에서는 텅스텐 및 저용융점 납 합금

과의 차폐율 차이가 2% 이내로 확인되었으며, 8 mm 두께에서도 유사한 차폐 성능을 나타내었다.

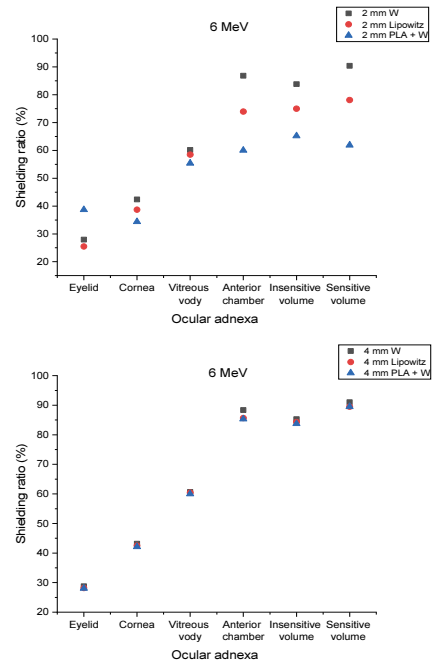


Fig. 2. Comparison of shielding efficiency of PLA+W, tungsten, and lipowitz metal at 2 mm and 4 mm thickness.

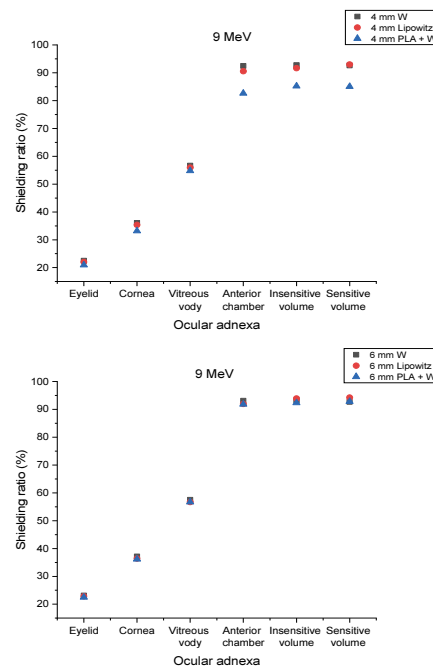


Fig. 3. Comparison of shielding efficiency of PLA+W, tungsten, and lipowitz metal at 4 mm and 6 mm thickness.

2. 폴리메틸메타크릴레이트-텅스텐(PMMA+W)의 차폐 성능 평가

PMMA+W 복합재의 두께별 차폐율 결과는 Table 4에 나타내었다. 6 MeV 전자선 조사 시 2 mm 두께에서 수정체 민감 영역의 차폐율이 90% 이상으로 높은 차폐 성능을 보였다. 이는 PMMA+W 복합재의 밀도가 PLA+W와 저용융점 납 합금에 비해 상대적으로 높아, 동일한 두께에서도 더 높은 차폐 성능을 보인 것으로 판단된다. 또한, 수정체의 비민감 영역과 전방 영역에서도 83% 이상의 차폐율을 보여 우수한 차폐 성능을 확인하였다. 차폐 두께가 4 mm 이상으로 증가함에 따라 수정체의 비민감 영역과 전방 영역의 차폐율은 더욱 향상되었으며, 8 mm 두께에서 안구 부속기관별 최대 차폐율을 나타내었다.

Table 4. Shielding efficiency of PMMA+W by thickness and ocular structures for 6 MeV electron beam

Tissue	PLA+W(93%)			
	2 mm W	4 mm W	6 mm W	8 mm W
Sensitive of lens	90.3%	90.6%	91.1%	91.4%
Insensitive of lens	83.2%	84.7%	85.6%	86.3%
Anterior chamber	84.4%	87.0%	87.4%	88.1%
Vitreous body	59.8%	60.4%	61.0%	61.5%
Cornea	41.4%	42.4%	43.2%	43.9%
Eyelid	27.4%	28.6%	29.1%	29.7%

Table 5. Shielding efficiency of PMMA+W by thickness and ocular structures for 9 MeV electron beam

Tissue	PLA+W(93%)			
	2 mm W	4 mm W	6 mm W	8 mm W
Sensitive of lens	73.1%	92.9%	94.1%	94.5%
Insensitive of lens	79.4%	92.5%	92.8%	93.1%
Anterior chamber	73.9%	91.4%	92.9%	93.1%
Vitreous body	52.6%	56.2%	56.7%	57.4%
Cornea	31.1%	35.6%	36.4%	36.9%
Eyelid	19.0%	22.3%	22.9%	23.3%

9 MeV 전자선 조사 결과는 Table 5와 같다. 2 mm 두께에서는 안구 부속기관별 차폐율이 80% 미

만으로 나타나 전자선 에너지에 대한 효과적인 차폐 성능을 보이지 못했다. 그러나 4 mm 두께에서는 차폐율이 최대 93%로 증가하여 개선된 차폐 성능을 보였다. 6 mm 두께에서는 차폐율 증가하는 경향을 보였으며, 8 mm 두께에서는 6 mm와 유사한 수준의 차폐율을 나타내었다.

PMMA+W 복합재의 차폐율 비교 분석 결과는 Fig. 4와 같다. 6 MeV 전자선 조사 시 2 mm 두께에서 저용융점 납 합금에 비해 수정체의 민감 영역에서 90.3%의 차폐율을 보여 16.2% 높은 차폐 성능을 나타내었다. 수정체의 비민감 영역에서는 83.2%로 8.2%, 전방 영역에서는 84.4%로 10.5%의 차이를 보였다. 유리체는 59.8%로 1.3, 각막은 41.4%로 2.7%, 눈꺼풀은 27.4%로 1.9%의 차폐율 차이를 나타내었다. 반면, 텅스텐 차폐체의 경우 모든 안구 부속기관이 2% 이하의 차이를 나타내어 동등한 차폐 성능을 보이는 것으로 확인하였다. 4 mm 두께에서는 텅스텐 차폐체와 저용융점 납 합금 모두 동일한 차폐 성능을 나타내었으며, 차폐체 두께가 증가함에 따라 유사한 양상을 보였다.

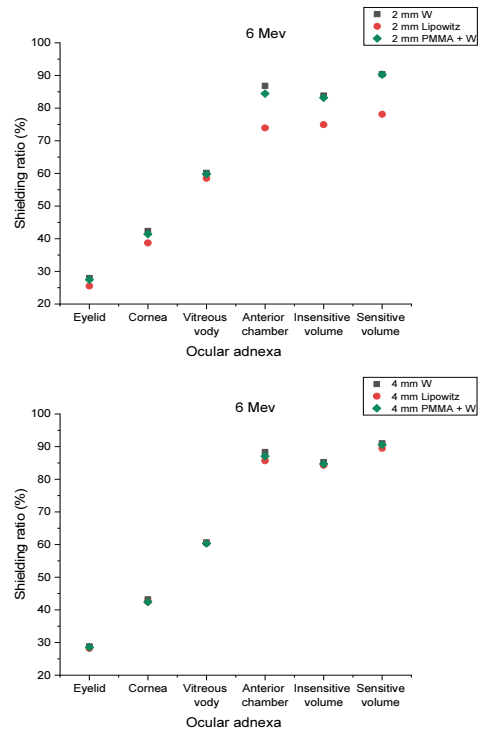


Fig. 4. Comparison of shielding efficiency of PMMA+W, tungsten, and lipowitz metal at 2 mm and 4 mm thickness.

9 MeV 전자선 조사 시 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 2 mm 두께에서 저용융점 납 합금보다 높은 차폐율을 보였으나, 텅스텐 차폐체에 비해 최대 17% 낮은 차폐율을 보여 PLA+W 복합재와 동일하게 효과적인 차폐 성능을 나타내지 못했다. 4 mm 두께에서는 텅스텐 차폐체 및 저용융점 납 합금과 같은 두께로 동등한 차폐 성능을 보였으며, 6 mm 두께에서도 유사한 경향을 확인하였다.

특히, PMMA+W 복합재는 8 mm 두께에서 모든 차폐 물질 중 가장 높은 차폐 성능을 나타내었다.

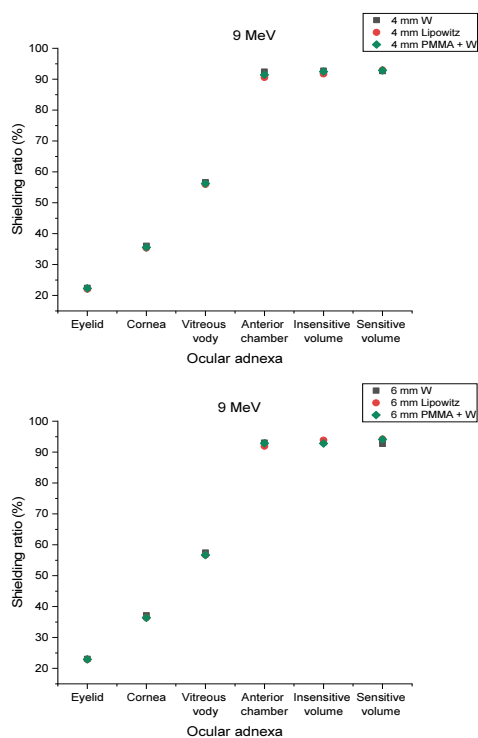


Fig. 5. Comparison of shielding efficiency of PMMA+W, tungsten, and lipowitz metal at 4 mm and 6 mm thickness.

IV. DISCUSSION

앞서 선행연구에서 텅스텐 차폐체가 수정체 규격에 맞추어 제작된 경우, 산란선으로 인해 수정체와 전방 영역에서 높은 선량을 유발하여 95% 차폐율을 달성하지 못하였다. 이에 본 연구는 텅스텐 차폐체와 유사한 90% 이상의 차폐율을 목표로 PLA+W 복합재와 PMMA+W 복합재의 차폐 성능을 비교 분석하였다.

PLA+W 복합재는 6 MeV와 9 MeV 전자선 조건에서 2 mm 두께 적용 시 텅스텐 차폐체 및 저용융점 납 합금 대비 차폐 성능이 다소 낮게 평가되었다. 특히, 9 MeV 전자선 조사에서는 4 mm 두께에서도 수정체의 민감 영역, 비민감 영역, 전방 영역에서 차폐 성능이 기준치에 미치지 못하였다. 그러나 6 mm 이상의 두께에서는 텅스텐 차폐체와 약 2% 이내의 차이를 보이며 유사한 차폐 성능을 나타내었다. 이는 PLA+W 복합재의 혼합물질 함량 및 밀도가 텅스텐 차폐체와 저용융점 납 합금에 비해 상대적으로 낮아 전자선 차폐를 위한 추가적인 두께 보상이 필요함을 시사한다.

PMMA+W 복합재는 6 MeV 전자선 조건에서 2 mm 두께만으로도 저용융점 납 합금에 비해 우수한 차폐 성능을 보였으며, 텅스텐 차폐체와 유사한 차폐율을 나타내어 대체물질 중 가장 뛰어난 차폐 성능을 보였다. 9 MeV 전자선 조건에서는 2 mm 두께에서 텅스텐 차폐체에 비해 최대 17% 낮은 차폐율을 나타내었으나, 두께가 증가함에 따라 차폐율 차이가 1% 이내의 오차 범위로 줄어들며 동등한 성능을 보였다. 이는 PMMA+W 복합재가 고에너지 전자선에 대해 상대적으로 높은 차폐 효율을 나타내며, 전자선 에너지에 따른 적절한 두께 조정 시 저용융점 납 합금 및 텅스텐 차폐체를 효과적으로 대체할 수 있는 물질임을 시사한다.

Cheraghi 등^[17]은 폴리디메틸실록산(PDMS) 매트릭스에 산화비스무트(Bi_2O_3)와 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)로 폴리머 복합재를 제작하고, 이를 활용하여 고에너지 전자선에 대한 차폐 성능을 분석하였다. 연구 결과, 9 ~ 20 MeV 에너지 범위에서 전자선의 70% 이상을 효과적으로 차폐하였으며, 동일한 면 밀도를 갖는 알루미늄 대비 약 34%의 중량 절감 효과를 확인하였다. 이는 고 원자번호 물질을 혼합한 폴리머 소재가 전자선 차폐에 효과적임을 시사하며, 본 연구 결과와 상응하는 결과를 나타내었다.

폴리머 소재의 차폐체는 차폐 성능뿐만 아니라 경량성과 가공성 측면에서 기존 텅스텐 차폐체 및 저용융점 납 합금 대비 우수한 장점을 제공한다. 또한, 3D 프린팅 기술을 활용한 환자 맞춤형 설계

는 방사선 치료의 효율성 향상에 기여할 수 있다. 그러나 전자선 에너지 증가에 따른 차폐 성능의 저하와 같은 한계점을 고려해야 하며, 이를 보완하기 위해 적절한 두께 조정과 정밀한 설계가 요구된다. 본 연구의 제한점으로는 전자선 에너지를 6 MeV와 9 MeV로 한정하였으며, 전산모사 결과만을 분석하였다는 점이 있다. 또한, 안구 부속기관을 대상으로 한 연구로 다른 신체부위나 조건에서의 적용 가능성은 검토하지 않았다. 향후 연구에서는 다양한 복합 물질의 조성과 비율에 따른 차폐체를 제작하여 차폐 성능 변화를 평가하고 이를 비교 분석하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 몬테카를로 전산모사를 활용하여 전자선 치료 시 폴리머 복합재를 적용한 차폐 성능을 기존 텅스텐 차폐체 및 저용융점 납 합금과 비교 분석하였다. 연구 결과, PLA+W 복합재는 전자선 에너지 조건에 따라 6 MeV에서는 4 mm 이상의 두께, 9 MeV에서는 6 mm 이상의 두께를 적용할 경우 안구 부속기관별 차폐율이 기존 차폐체와 유사한 성능을 보였다. PMMA+W 복합재는 6 MeV 전자선에서 2 mm 두께만으로도 수정체의 민감 영역에서 90% 이상의 차폐율을 나타내어 우수한 차폐 성능을 보였으며, 9 MeV 전자선에서는 4 mm 두께에서 안구 부속기관별 차폐율이 기존 차폐체와 동등한 성능을 나타내었다. 폴리머 복합재는 경량성과 가공성 측면에서도 기존 텅스텐 차폐체에 비해 뛰어나 환자 맞춤형 제작을 위한 대체물질로 고려될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 텅스텐 혼합 비율에 따라 차폐체의 두께와 크기가 증가할 수 있으며, 이로 인해 전자선과의 상호작용으로 발생하는 제동복사의 영향과 차폐체 제작 시 구조적 안정성을 함께 고려해야 한다. 따라서 안구 부속기관에 대한 선량을 고려한 차폐체 설계가 필요하며, 안와 림프종의 방사선 치료 시 수정체를 포함한 안구 부속기관의 방사선 방호와 선량 저감을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 2024년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음

Reference

- [1] A. Pashazadeh, A. Boese, M. Friebe, "Radiation therapy techniques in the treatment of skin cancer: an overview of the current status and outlook", *Journal of Dermatological Treatment*, Vol. 30, No. 8, pp. 831-839, 2019. <https://doi.org/10.1080/09546634.2019.1573310>
- [2] K. R. Hogstrom, "Treatment planning in electron beam therapy", *The Role of High Energy Electrons in the Treatment of Cancer*, Vol. 25, pp. 30-52, 1991. <https://doi.org/10.1159/000429576>
- [3] A. Sigel, H. Sigel, R. K. Sigel, "*Cadmium: from toxicity to essentiality*", Dordrecht, The Netherlands, Springer, Vol. 11, pp. 588, 2013.
- [4] Y. Meng, C. Tang, J. Yu, S. Meng, W. Zhang, "Exposure to lead increases the risk of meningioma and brain cancer: A meta-analysis", *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, Vol. 60, pp. 126474, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126474>
- [5] C. Lee, J. Prisciandaro, C. Fox, C. Lee, "SU-E-T-308: Monte Carlo Assessment of the Dosimetric Characteristics of Tungsten Eye Shield on the Various Eye Structures under Oblique Incidences of Electron Beam", *Medical Physics*, Vol. 38, No. 6, pp. 3558-3558, 2011. <https://doi.org/10.1118/1.3612259>
- [6] C. V. More, Z. Alsayed, M. S. Badawi, A. A. Thabet, P. P. Pawar, "Polymeric composite materials for radiation shielding: a review", *Environmental Chemistry Letters*, Vol. 19, pp. 2057-2090, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01189-9>
- [7] S. Nambiar, J. T. Yeow, "Polymer-composite materials for radiation protection", *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 4, No. 11, pp. 5717-5726, 2012. <https://doi.org/10.1021/am300783d>
- [8] M. Almurayshid, Y. Alsalim, F. Aksouh, R. Almsalam, M. ALQahtani, M. I. Sayyed, F.

- Almasoud, "Development of new lead-free composite materials as potential radiation shields", *Materials*, Vol. 14, No. 17, pp. 4957, 2021.
<https://doi.org/10.3390/ma14174957>
- [9] L. Seenappa, H. C. Manjunatha, K. N. Sridhar, C. Hanumantharayappa, "Gamma, X-ray and neutron shielding properties of polymer concretes", *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, Vol. 56, pp. 383-391, 2018.
- [10] Q. Chang, S. Guo, X. Zhang, "Radiation shielding polymer composites: Ray-interaction mechanism, structural design, manufacture and biomedical applications", *Materials & Design*, Vol. 233, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112253>
- [11] T. Bel, C. Arslan, N. Baydogan, "Radiation shielding properties of poly (methyl methacrylate)/colemantite composite for the use in mixed irradiation fields of neutrons and gamma rays", *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 221, pp. 58-67, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.09.014>
- [12] R. Adeli, S. P. Shirmardi, S. J. Ahmadi, "Neutron irradiation tests on B4C/epoxy composite for neutron shielding application and the parameters assay", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 127, pp. 140-146, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.06.026>
- [13] B. Aygün, T. Korkut, A. Karabulut, O. Gencil, A. Karabulut, "Production and neutron irradiation tests on a new epoxy/molybdenum composite", *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, Vol. 20, No. 4, pp. 323-329, 2015.
<https://doi.org/10.1080/1023666X.2015.1017790>
- [14] A. Bijanu, R. Arya, V. Agrawal, A. S. Tomar, V. S. Gowri, S. K. Sanghi, S. T. Salammal, "Metal-polymer composites for radiation protection: a review", *Journal of Polymer Research*, Vol. 28, No. 392, 2021.
<https://doi.org/10.1007/s10965-021-02751-3>
- [15] D. H. Kim, Y. I. Cho, "Dose Assessment of Orbital Adnexa in Electron Beam Therapy for Orbital Lymphoma", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 18, No. 3, pp. 283-292, 2024.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2024.18.3.283>
- [16] A. Das, A. Ray, T. Singh, "Tungsten-based polymer composite, a new lead-free material for efficient shielding of coupled neutron-gamma radiation fields: A FLUKA simulation study", *Physica Scripta*, Vol. 98, No. 11, 2023.
<https://doi.org/10.1088/1402-4896/acfa3e>
- [17] E. Cheraghi, A. Shaaer, S. Chen, E. Osei, J. T. Yeow, "Enhanced electron radiation shielding composite developed by well dispersed fillers in PDMS polymer", *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 211, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110994>

고에너지 전자선 치료 시 폴리머-텅스텐 복합재의 차폐성능 평가

김동환¹, 조용인^{2,*}

¹동남권원자력의학원 방사선종양학과

²부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

안구의 고에너지 전자선 치료에서 기존 텅스텐 차폐체와 저용융점 납 합금을 대체할 수 있는 폴리머 복합재의 임상적 활용 가능성을 평가하고자 하였다. 몬테카를로 전산모사를 이용하여 안구 부속기관별 차폐율 평가 결과, PLA+W 복합재는 6 MeV 전자선에서 4 mm, 9 MeV 전자선에서 6 mm 이상의 두께에서 기존 텅스텐 및 저용융점 납 합금과 유사한 차폐 성능을 보였다. PMMA+W 복합재는 6 MeV 전자선에서 2 mm 두께로도 저용융점 납 합금보다 높은 차폐율을 보였으며, 수정체의 민감 영역에서 90.3%의 차폐율로 텅스텐 차폐체와 유사한 성능을 나타내었다. 9 MeV 전자선에서는 2 mm 두께에서 다소 낮은 차폐율을 나타내었으나, 4 mm 두께에서는 텅스텐 차폐체와 동등한 차폐율을 보였다. 폴리머 복합재는 전자선 에너지에 따른 혼합물질의 비율과 두께 조절을 통해 기존 차폐체를 대체할 수 있을 것이며, 효과적인 차폐 재료로서 환자 맞춤형 차폐기구 제작으로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 몬테카를로 전산모사, 수정체 차폐, 폴리머 소재, 전자선 치료

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김동환	동남권원자력의학원 방사선종양학과	방사선사
(교신저자)	조용인	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	조교수