

Evaluation of Shielding Performance of Tungsten Containing 3D Printing Materials for High-energy Electron Radiation Therapy

Yong-In Cho¹, Jung-Hoon Kim¹, Sang-Il Bae^{2,*}

¹Department of Radiological Science, Catholic University of Pusan

²Department of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer Center

Received: October 10, 2023. Revised: October 27, 2023. Accepted: October 31, 2023.

ABSTRACT

This study compares and analyzes the performance of a shield manufactured using 3D printing technology to find out its applicability as a shield in high-energy electron beam therapy. Actual measurement and monte carlo simulations were performed to evaluate the shielding performance of 3D printing materials for high-energy electron beams. First, in order to secure reliability for the simulation, a source term evaluation was conducted by referring to the IAEA's TRS-398 recommendation. Second, to analyze the shielding performance of PLA+W (93%), a specimen was manufactured using a 3D printer, and the shielding rate by thickness according to electron beam energy was evaluated. Third, the shielding thickness required for electron beam treatment was calculated through a comparative analysis of shielding performance between PLA+W (93%) and existing shielding bodies. First, as a result of the evaluation of the source term through actual measurement and simulation, the TRS-398 recommendation was satisfied with an error of less than 1%, thereby securing the reliability of the simulation. Second, as a result of the shielding performance analysis for PLA+W (93%), 6 MeV electron beams showed a shielding rate of more than 95% at 3.12 mm, and 15 MeV electron beams showed a shielding rate of more than 90% at 10 mm thickness. Third, through simulations, comparative analysis between PLA+W (93%) materials and existing shields showed high shielding rates within the same thickness in the order of tungsten, lead, copper, PLA+W (93%), and aluminum. 6 MeV electron beams showed almost similar shielding rates at 5 mm or more and 15 MeV electron beams. Through this study in the future, it is judged that it can be used as basic data for the production and application of shielding bodies using PLA+W (93%) materials in high-energy electron beam treatment.

Keyword: Electron beam therapy, 3D printing technology, Radiation shield, PLA+W, Monte carlo simulation

I. INTRODUCTION

방사선치료(Radiation therapy) 중 고에너지 전자선 치료(Electron therapy)는 특정 깊이에서 급격히 선량을 전달하는 특성을 이용한다. 이는 피부암과 같은 표재성 종양에 치사선량을 전달하고 정상조직에는 선량을 최소화하는 목적으로 사용되는 치료법이다^[1]. 이러한 목적을 달성하기 위해 종양의 크기와 위치, 환자의 체형을 고려하여 정상조직을

차폐할 적절한 차폐체가 필요하다^[2].

전자선 치료 시 사용되는 차폐체는 전자선과의 상호작용으로 인한 제동복사와 이차 전자 발생을 고려하여 고 원자번호의 얇은 차폐체를 사용한다^[3]. 일반적으로 전자선 치료에 이용되는 차폐체는 대부분 저용융점 금속인 Lipowitz Metal(50% Bismuth, 27% lead, 13% tin and 10% cadmium)을 사용한다. 차폐율은 납보다 낮지만^[4], 용융점이 70°C로 가공이 쉽고, 목적하는 부위에 맞게 제작이 가능한 장

* Corresponding Author: Sang Il Bae

E-mail: herose7777@naver.com

Tel: *** - **** - ****

Address: Department of Radiation Oncology, Dongnam Institute of Radiological & Medical Sciences Cancer center, 40, Jwadong-gil, Jangan-eup, Gijang-gun, Busan, Republic of Korea

점이 있다^[5]. 하지만 납과 카드뮴 성분을 포함하고 있어 금속을 녹이는 과정에서 발암물질이 공기 중으로 방출된다고 알려져 있으며^[6,7], 취급 시 보호용구와 환기시설이 필수적으로 요구된다^[8].

3D 프린팅은 4차 산업혁명을 대표하는 핵심기술 중 하나로 3차원적인 데이터와 필라멘트를 활용하여 입체물을 프린팅하듯 제조하는 기술을 의미한다. 3D 프린팅의 장점은 독특한 형상의 제작이 쉽고, 생산 시 과도한 재료 사용 및 낭비 요소가 없어 각 제품 간 완성도가 높다는 것이다^[9]. 이 기술은 의료분야에서 개인 맞춤형 의료용품의 개발에 활용되고 있으며, 방사선치료에서는 Bolus와 보조기구 등의 제작 연구에 적용되고 있다^[10]. 인체 조직과 유사한 3D 프린팅 물질을 사용하여 제작된 Bolus는 기존 Bolus에 비해 피부표면의 선량 분포가 균일한 것으로 보고되었다^[11].

3D 프린팅으로 제작한 차폐체는 Lipowitz Metal을 대체할 수 있는 차폐체로 평가되며, 제작 재료에 대한 연구가 이뤄지고 있다^[12-14]. 3D 프린팅 재료 중 차폐체로 활용할 수 있는 물질은 필라멘트의 주성분인 PLA(PolyLactic Acid)나 ABS(Acrylonitrile Butadiene Styrene)에 텅스텐, 납 등 원자번호가 높은 원소를 함유시킨 물질이다. 최근 차폐체로 사용 가능한 3D 프린팅 소재의 지속적인 개발을 통해 금속 함량을 높인 새로운 물질들이 개발되고 있다. 하지만, 지속적으로 개발되는 새로운 차폐 물질에 관한 연구는 미비한 실정이다.

이에 본 연구에서는 몬테카를로 기반의 모의실험과 실측을 통해 3D 프린팅 물질인 PLA에 텅스텐(Tungsten, W)이 함유된 차폐체와 기존의 차폐 물질 간의 차폐 성능을 비교 분석하고자 한다. 이를 통해 전자선 치료 시 정상조직 차폐를 위한 환자 맞춤형 차폐체로의 적용을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

1. 몬테카를로 전산모사(Monte Carlo Simulation)

몬테카를로 전산모사는 난수를 이용한 무작위적 표본 추출을 통해 통계적으로 문제를 해결하는 방

법이다^[15]. 본 연구는 선원형 평가와 차폐 성능 평가를 위하여 MCNP6(Monte Carlo N-Particle ver. 6)을 활용하였다. 모사된 장치의 구성요소는 Fig. 1과 같다. 선형가속기는 ELEKTA사의 infinity 모델을 선정하였고, 실제 실험 환경과 동일하게 일차 콜리메이터, 악판(Jaw), 다엽 콜리메이터, 어플리케이터와 물 팬텀을 모사하였다.

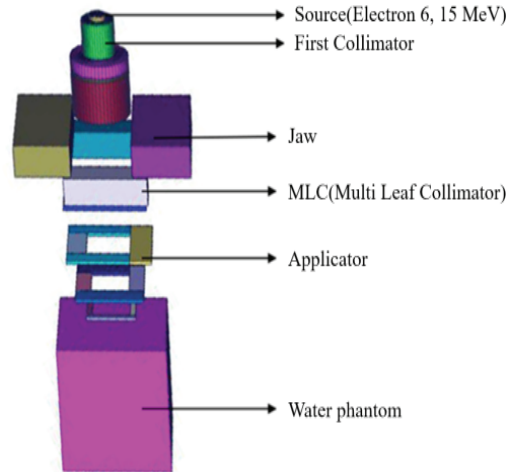


Fig. 1. Geometric structure of linear accelerator in simulation

2. 3D 프린팅 차폐 시편 제작

3D 프린팅을 활용한 차폐체의 차폐 성능 평가를 위해 현재 상용화된 3D 프린팅 물질인 PLA에 텅스텐을 93% 함유한 Rapid 3D shield 사의 Rapid 3D shield 텅스텐 필라멘트($\rho=7.8 \text{ g/cm}^3$, tensile strength = 23.3 MPa)로 차폐 시편을 제작하였다. 차폐 시편 제작을 위해 CAD(Computer aided design)를 활용하여 차폐 시편을 디자인하고, 출력은 FFF(Fused Filament Fabrication) 방식의 3D 프린터를 사용하였다. 3D 프린팅 출력 조건은 Table 1과 같이 설정하였고, 크기는 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$, 두께는 1, 2, 3, 5, 10 mm의 차폐 시편을 각각 출력하였다.

Table 1. Manufacture set-up

Model	Cubicon Style
Process	Fused Filament Fabrication
Temperature (°C)	245
Filament	PLA + W (93%)
Specific Gravity (g/cm^3)	7.51
Nozzle Size (mm)	1.75

3. 실험 방법

3.1. 고에너지 전자선(6 MeV, 15 MeV)의 선원향 평가

6 MeV, 15 MeV 전자선의 선원향 평가를 위하여 모의실험과 실측의 심부선량백분율(Percentage Depth Dose, PDD)을 측정하였다. 최대선량지점(D_{max})의 깊이와 D_{max}에 절반의 선량이 전달되는 깊이인 R₅₀을 비교 분석하였다. 실험 조건은 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA) TRS(Technical Report Series)-398의 권고를 참조하였다^[16]. 실험은 선원-표면 간 거리(Source Surface Distance, SSD) 100 cm 지점에 물 팬텀(40 cm × 40 cm × 40 cm)을 위치시키고 조사야(field size)는 10 cm × 10 cm으로 설정한 후 6 MeV, 15 MeV의 전자선을 조사하였다.

심부선량 백분율을 측정하기 위해 실측에서는 PTW사의 Semiflex Ionization Chamber(Type 31010)를 이용하여 전하량을 산출하였다. 모의실험에서는 F6 Tally를 이용하여 단위 질량당 축적된 에너지 분포(MeV/g)를 획득하였다. 모의실험의 모의 추정 횟수는 10⁷번 반복 시행하였으며, 불확도(uncertainty)는 5% 미만으로 신뢰성을 확보하였다.

3.2. 3D 프린팅 시편의 차폐 성능 평가

3D 프린팅으로 제작한 PLA+W(93%) 시편의 두께에 따른 차폐 성능 평가를 위한 기하학적 조건은 Fig. 2와 같다. 첫 번째, 실측 방법은 6 MeV, 15 MeV 전자선에 대한 조사야는 10 cm × 10 cm으로 설정하고, SSD 100 cm 지점에 물과 99% 등가 물질인 Solid Blue Phantom을 위치시켰다. 차폐율 평가를 위해 팬텀 중앙 지점에 3D 프린팅 시편을 위치시켰으며, 팬텀 표면 아래 전자선 측정 전리함(PTW, Advanced Markus Chamber, Type 34045)을 이용하였다. 차폐율은 시편의 두께(non, 1, 2, 3, 5, 10 mm)에 따른 전하량을 측정하여 Eq. (1)을 통해 산출하였다.

$$Shielding\ ratio(\%) = \frac{R_{without\ shield} - R_{with\ shield}}{R_{without\ shield}} \quad (1)$$

R : 조사선량

두 번째, 모의실험 방법은 실측 방법과 동일한 기하학적 조건을 모사하였으며, F6 Tally를 사용하여 3D 프린팅 시편의 두께에 따라 축적된 전자선의 에너지 분포 평가를 통해 차폐율을 산정하였다. 모의실험 내 모의 추정 횟수(nps)는 10⁷번 반복 시행하였으며, 불확도(uncertainty)는 5% 미만으로 신뢰성을 확보하였다.

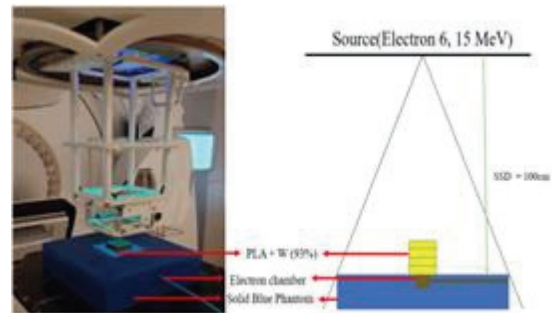


Fig. 2. Measurement conditions for 3D printing materials in a linear accelerator

3.3. 3D 프린팅 차폐체와 기존 차폐체 간 성능 비교

3D 프린팅으로 제작한 PLA+W(93%) 차폐체의 차폐 성능을 비교 분석하기 위해 비교 대상으로 텅스텐(Tungsten, W), 납(Lead, Pb), 구리(Copper, Cu), 알루미늄(Aluminium, Al)을 선정하였으며, 세부정보는 Table 2와 같다. 모의실험을 통해 차폐 성능을 비교하였으며, 앞선 실험과 동일한 기하학적 조건으로 차폐체의 물성 변화 및 두께(1, 3, 5, 10 mm)에 따른 차폐율을 산정하였다. 모의실험 내 모의 추정 횟수는 10⁷번 반복 시행하였으며, 불확도(uncertainty)는 5% 미만으로 신뢰성을 확보하였다.

Table 2. Density of 3D printed shielding materials and existing shielding materials

Shielding Materials	Density(g/cm ³)
PLA+W(93%)	7.51
Tungsten	19.25
Lead	11.34
Copper	8.96
Aluminium	2.7

III. RESULT

1. 고에너지 전자선(6 MeV, 15 MeV)의 선원향 평가

본 연구에서 사용한 고에너지 전자선(6 MeV, 15 MeV)의 선원향 평가를 위해 실측에서는 심부선량 백분율 측정을 통해 D_{max} 와 R_{50} 지점의 깊이를 평가 하였으며, 동일한 기하학적 조건 내 모의실험 결과와 비교 분석하였다. 그 결과, Table 3과 같이 D_{max} 깊이는 Fig. 3, 4와 같이 6 MeV에서 1.1 cm, 15 MeV에서 2.8 cm으로 모의실험과 실측이 동일한 결과를 나타내었다. R_{50} 지점의 깊이는 6 MeV에서 모의실험 2.45 cm, 실측 2.43 cm으로 0.82 %의 오차를 보였으며, 15 MeV의 경우 모의실험 5.98 cm, 실측 5.99 cm으로 0.16 %의 차이를 보였다.

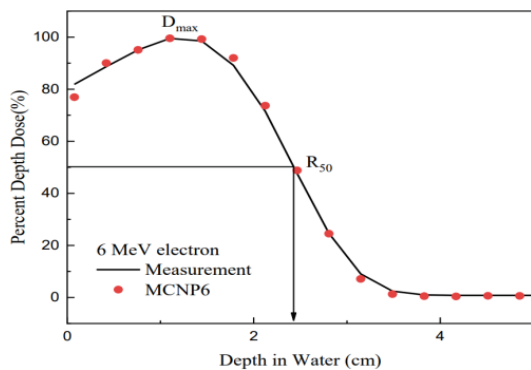


Fig. 3. Percentage depth dose curves for 6 MeV electron beams in water phantom

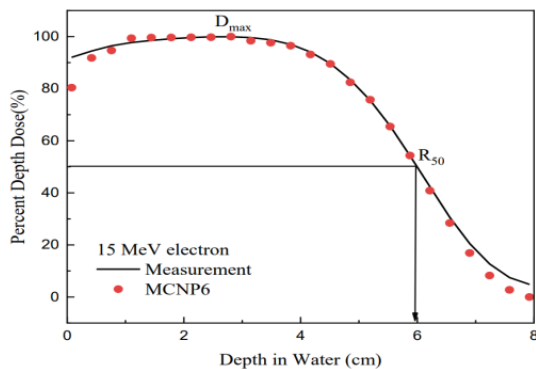


Fig. 4. Percentage depth dose curves for 15 MeV electron beams in water phantom

Table 3. Comparison of R_{50} between MCNP6 and measurement method

Energy	Method	D_{max} (cm)	R_{50} (cm)	Difference
6 MeV	MCNP6	1.10	2.45	0.82 %
	Measurement	1.10	2.43	
15 MeV	MCNP6	2.80	5.98	0.16 %
	Measurement	2.80	5.99	

2. PLA+W(93%) 시편 두께에 따른 차폐 성능 평가

3D 프린터로 출력한 PLA+W(93%) 시편의 두께에 따른 차폐율을 모의실험과 실측을 통해 비교 분석하였고, 결과는 Fig. 5와 같다. 6 MeV 전자선에 대해 50%, 90% 차폐율을 나타내는 시편 두께는 각각 실측 1.19 mm, 2.81 mm, 모의실험 1.21 mm, 2.80 mm 두께로 평가되었다. 실측과 모의실험 간 차폐율의 오차율은 각각 1.68%, 0.35%를 나타내었다.

15 MeV 전자선에 대한 50% 차폐율을 나타내는 시편 두께는 실측 2.70 mm, 모의실험 2.87 mm로 평가되었으며, 오차율은 6.29%를 나타내었다. 차폐율 90%의 시편 두께는 실측 7.36 mm, 모의실험에서의 최고 차폐율은 89.2%로 오차율은 확인할 수 없었다.

종합적인 평가 결과, 실측과 모의실험의 수치가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였다. 6 MeV 전자선 대한 차폐율은 3.12 mm 이상 두께에서 95% 이상이었으나, 15 MeV 전자선에 대한 차폐율은 모든 두께에서 95% 미만이었다.

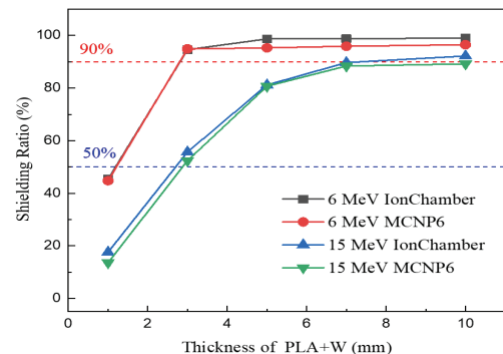


Fig. 5. Shielding ratio according to thickness of PLA + W

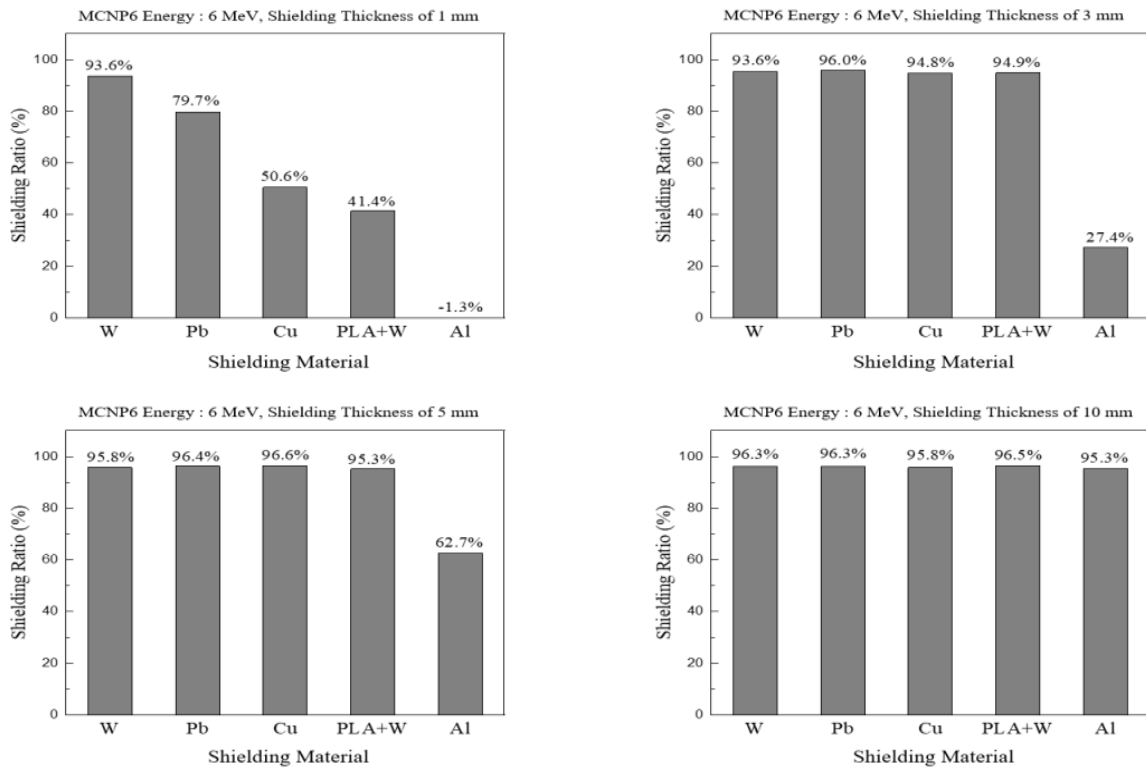


Fig. 6. Comparative evaluation of shielding effect by thickness of shielding material for 6 MeV electron beam using MCNP6

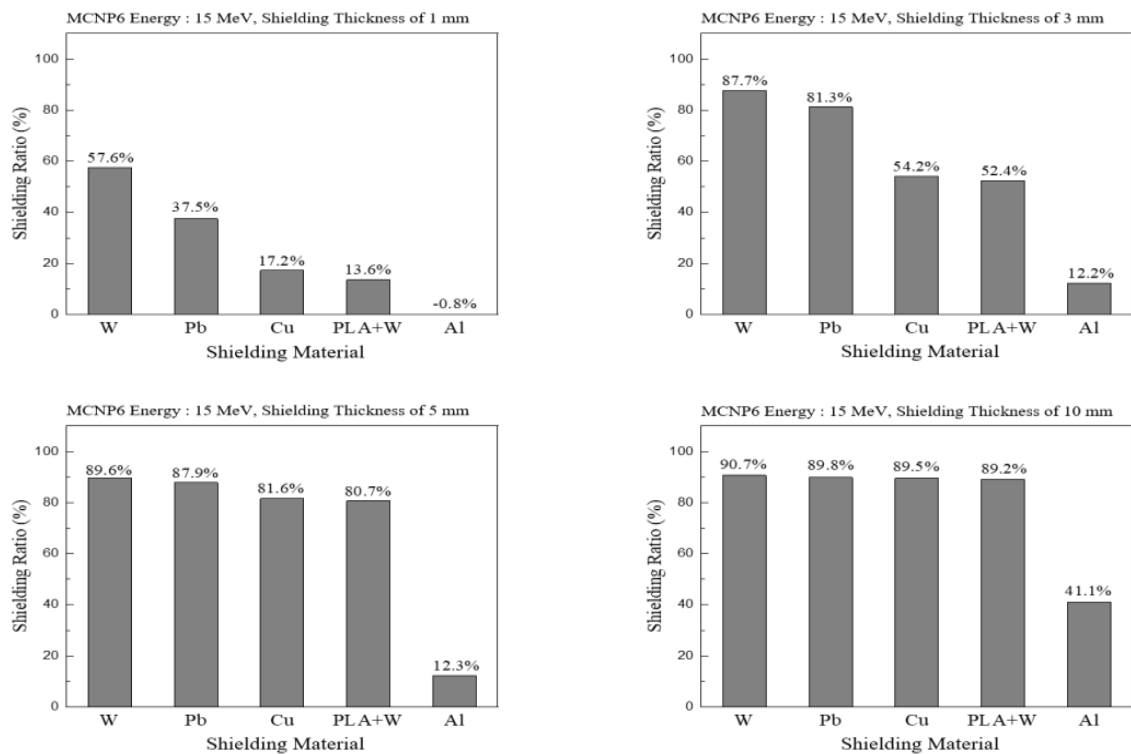


Fig. 7. Comparative evaluation of shielding effect by thickness of shielding material for 15 MeV electron beam using MCNP6

3. 3D 프린팅 차폐체와 기존 차폐체 간 성능 비교

모의실험을 통해 PLA + W(93%)와 기존 차폐체 간 차폐 성능을 비교 분석하였다. 첫 번째, 6 MeV 전자선에 대한 차폐체의 두께별 차폐율은 Fig. 6과 같다. 1 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 41.4%, 텅스텐 93.6%, 납 79.7%, 구리 50.6%, 알루미늄 -1.3%로 평가되었으며, 텅스텐, 납, 구리, PLA+W, 알루미늄 순서로 높은 차폐율을 나타내었다. 3 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 94.9%, 텅스텐 93.6%, 납 96.0%, 구리 94.8%, 알루미늄 27.4%로 평가되었으며, 납의 경우 95% 이상의 차폐율을 나타내었다. 5 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 95.3%, 텅스텐 95.8%, 납 96.4%, 구리 96.6%, 알루미늄 62.7%로 평가되었으며, 알루미늄을 제외한 모든 차폐체에서 95% 이상의 차폐율을 나타내었다. 10 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 96.5%, 텅스텐 96.3%, 납 96.3%, 구리 95.8%, 알루미늄 95.3%로 평가되었으며, 모든 차폐 물질에서 95% 이상의 차폐율을 나타내었다.

두 번째, 15 MeV 전자선에 대한 차폐체의 두께별 차폐율은 Fig. 7과 같다. 1 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 13.6%, 텅스텐 57.6%, 납 37.5%, 구리 17.2%, 알루미늄 -0.8%로 평가되었으며, 텅스텐, 납, 구리, PLA+W, 알루미늄 순서로 높은 차폐율을 나타내었다. 3 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 52.4%, 텅스텐 87.7%, 납 81.3%, 구리 54.2%, 알루미늄 12.2%로 평가되었으며, 차폐체 간 차폐율은 모든 두께에서 동일한 경향의 대소 관계를 보였다. 5 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 80.7%, 텅스텐 89.6%, 납 87.9%, 구리 81.6%, 알루미늄 12.3%로 평가되었다. 10 mm 두께에서의 차폐율은 PLA+W 89.2%, 텅스텐 90.7%, 납 89.8%, 구리 89.5%, 알루미늄 41.1%로 평가되었으며, 텅스텐을 제외한 모든 물질의 차폐율은 90% 미만으로 나타났다.

IV. DISCUSSION

고에너지 전자선 치료는 특정 깊이에서 집중적인 선량 전달이 이루어지는 전자선의 특성을 이용한 치료법으로 정상조직의 방호를 위한 차폐가 중

요하다. 4차 산업혁명 중 3D 프린팅 기술은 의료분야에서 환자 맞춤형 의료용품 개발에 활용되고 있으며^[17], 방사선치료 분야의 3D 프린팅 기술을 접목한 연구가 활발히 이루어지고 있다^[18]. 하지만, 지속적으로 개발되는 차폐 물질에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 FFF 방식 3D 프린터를 이용하여 최근 개발된 PLA에 텅스텐을 93% 함유한 필라멘트로 제작한 차폐체의 성능을 평가하고, 기존 차폐 물질과의 비교 분석을 수행하고자 하였다.

본 연구의 결과에 따르면, 첫 번째, 선원항 평가는 실측과 모의실험에 대한 오차가 1% 미만으로 평가되었다. IAEA TRS-398은 R_{50} 오차를 2% 미만으로 권고하고 있으며, 권고를 만족하는 실험 결과로 모의실험에 대한 신뢰성을 확보하였다.

두 번째, 3D 프린터를 이용해 출력한 PLA+W (93%) 시편에 대한 차폐 성능 평가 결과를 통해 6 MeV 전자선에서 3.12 mm 두께가 95%의 차폐율을 보였으며, 15 MeV 전자선에서 10 mm 두께가 92.2%의 차폐율을 나타낸다는 것을 확인하였다. 과거 오창우 등^[19]의 연구에서는 6 MeV 전자선에 대해 ABS+W(10%), ABS+Bi(10%), PLA+Fe(10%) 소재에 대한 차폐효과를 분석하였으며, 각각 10 mm 두께가 납 3 mm와 유사한 성능으로 95% 이상의 차폐율을 나타낸다고 보고하였다. 그에 반해 본 연구에서는 기존 연구에 나타난 3D 프린팅 차폐체의 두께보다 2배 이상 얇은 두께로 비슷한 차폐 성능을 나타냈다. 이는 필라멘트 물질에 함유된 금속물의 함량 차이에 따른 결과인 것으로 생각되며, 금속물 함량이 높고, 전자밀도가 높은 물질일수록 차폐율이 비례하여 증가한 것으로 분석된다.

세 번째, 모의실험을 통해 PLA+W(93%) 재료와 기존 텅스텐, 납, 구리, 알루미늄 차폐체 간 차폐 분석을 통해 차폐체의 원자번호와 밀도에 비례한 차폐율을 나타내었으나, 일정 두께 이상에서는 각 차폐체 간 차폐율의 차이가 다소 미미하였다. 이는 전자선의 에너지에 따른 포화 현상에 기인한 것으로 사료된다.

이승훈 등^[20]의 연구에 따르면, 전자선 치료 시 차폐체의 두께가 두꺼울수록, 원자번호가 낮을수록

산란전자의 발생이 증가하므로 임상적인 측면에서 최대한 얇고 고 원자번호의 차폐체가 적절하다고 제시하고 있다. 또한 전자선 치료 시 환자의 치료 부위에 맞는 적절한 차폐체가 요구되므로 제작의 용이성 또한 고려되어야 한다.

차폐 물질에 관한 연구에 따르면^[21-23], 텅스텐은 밀링을 통한 제작 방식으로 고가이며 정밀한 제작이 어렵고, 납의 경우 다른 두 물질에 비해 낮은 녹는점을 가지지만 제작 과정에서 공기 중으로 발암 물질을 방출하는 독성을 가진다. 또한 본 연구에서 평가한 차폐체의 녹는점을 비교해 보면, PLA+W (93%) 245 °C, 텅스텐 3,415 °C, 납 327 °C, 구리 1,085 °C로 PLA+W는 상대적으로 낮은 온도에서도 제작이 용이한 장점이 있다. 본 연구를 통해 차폐율, 두께, 낮은 유지보수비용, 발암물질의 접촉 최소화 등을 고려하면 6 MeV 전자선 치료 시 PLA+W(93%)는 Lipowitz Metal을 대체할 수 있는 소재로서 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구의 제한점은 15 MeV 전자선에 대한 95% 이상 차폐 두께에 대해 산정하지 못한 부분으로 이는 추가적인 연구를 통해 보완할 필요가 있을 것으로 생각된다. 또한 기존 전자선 차폐블럭 제작 과정과 비교하여 3D 프린터를 이용한 차폐체 제작은 상대적으로 시간이 수배 이상 소요될 것으로 보이며, 추후 차폐 블록에 대한 실증 연구가 필요할 것이다. 향후 본 연구를 통해 고에너지 전자선 치료 시 환자 맞춤형 3D 프린팅 차폐체 제작 및 적용을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 실측과 모의실험을 통해 고에너지 전자선에 대한 3D 프린팅 물질의 차폐 성능 분석을 수행하였다. 6 MeV 전자선에 대해 PLA + W(93%) 3.12 mm가 95% 이상의 차폐율을 나타내었고, 15 MeV 전자선은 10 mm 두께에서 92.2%의 차폐율을 나타내는 것을 확인하였다. 또한 기존 차폐체 간의 비교 분석을 통해 전자선 에너지에 따른 두께별 차폐율에 대해 정량적으로 제시하였다. 추후 본 연구를 통해 고에너지 전자선 치료 시 PLA+W (93%) 재료를 이용한 차폐체 제작 및 적용을 위한 기초자

료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2023년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음

Reference

- [1] Radiation Therapy Technology Research Group, "Radiation Therapeutics", 6th edition, Cheonggu Cultural History Publishing Co., pp. 399-416, 2022.
- [2] V. Vyas, L. Palmer, R. Mudge, R. Jiang, A. Fleck, B. Schaly, E. Osei, P. Charland, "On bolus for megavoltage photon and electron radiation therapy", Medical Dosimetry, Vol. 38, No. 3, pp. 268-273, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2013.02.007>
- [3] S. H. Lee, K. T. Kwak, J. K. Park, Y. S. Gim, S. Y. Cha, "The Study of Dose Change by Field Effect on Atomic Number of Shielding Materials in 6 MeV Electron Beam", The Journal of the Korean Society for Radiotherapeutic Technology, Vol. 25, No. 2, pp. 145-151, 2013.
- [4] G. J. Kim, "A Study on the Lead(Pb) Shield Thickness per Electron Beam Energy in Radiotherapy", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 16, No. 6, pp. 719-725, 2022. <http://doi.org/10.7742/jksr.2022.16.6.719>
- [5] M. Kamal, ABEBT. Dawod, A. S. Waqlan, "Radiation Interactions With Cerrobend Metal Rapidly Solidified From Melt", International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS, Vol. 12, No. 05, pp. 34-42, 2012.
- [6] A. Sigel, H. Sigel, R. K. Sigel(Eds.), "Cadmium: from toxicity to essentiality", Dordrecht, The Netherlands:: Springer, Vol. 11, pp. 588, 2013.
- [7] 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126474>
- [8] J. S. Lee, "Evaluation of emission rates of hazardous materials from 3D printing work place and research for its reduction method", Ajou University, Master of

- Environmental Engineering, pp. 31-36, 2018.
- [9] B. G. Chung, "3D Printing : A New Industrial Revolution?", Vol. 2, No. 1, pp. 1-11, 2019. <https://doi.org/10.22788/2.1.1>
- [10] J. H. Kim, D. H. Lee, "Evaluation of Bolus Applicability through Dose Evaluation According to 3D Print Materials", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 13, No. 2, pp. 241-245, 2019. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.2.241>
- [11] K. Park, S. Park, M. J. Jeon, J. H. Choi, J. W. Kim, Y. J. Cho, W. S. Jang, Y. S. Keum, I. J. Lee, "Clinical application of 3D-printed-step-bolus in post-total-mastectomy electron conformal therapy", Oncotarget, Vol. 8, No. 15, pp. 25660-25668, 2017. <http://dx.doi.org/10.18632/oncotarget.12829>
- [12] K. H. Jung, D. H. Han, J. O. Kim, H. J. Choi, C. H. Baek, "Verification of Shielding Materials for Customized Block on Metal 3D Printing", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 17, No. 1, pp. 25-30, 2023. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2023.17.1.25>
- [13] H. M. Jang, J. Yoon, "Usefulness Evaluation and Fabrication of the Radiation Shield Using 3D Printing Technology", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 13, No. 7, pp. 1014-1024, 2019. <http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.7.1015>
- [14] P. Dudek, "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements, Archives of metallurgy and materials", Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 58, No. 4, pp. 1415-1418, 2013. <http://dx.doi.org/10.2478/amm-2013-0186>
- [15] D. P. Kroese, T. Brereton, T. Taimre, Z. I. Botev, "Why the Monte Carlo method is so important today", WIREs Computational Statistics, Vol. 6, No. 6, pp. 386-392, 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/wics.1314>
- [16] IAEA, "Implementation of the International Code of Practice on Dosimetry in Radiotherapy (TRS 398) : Review of testing results", IAEA TECDOC Seires, No. 1455, pp. 49-63, 2005.
- [17] S. Y. Lim, "Convergence of 3D printing technology in the medical field, science and technology policy", Science and Technology Policy Institute, Vol. 25, No. 7, pp. 10-13, 2015. <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO201571748953146>
- [18] R. Song, W. Li, "3D printed customized bolus for intensity-modulated radiotherapy in a patient with nasal radiotherapy", International Journal of Radiation Research, Vol. 21, No. 1, pp. 153-157, 2023. <http://dx.doi.org/10.52547/ijrr.21.1.21>
- [19] C. W. Oh, S. I. Bae, "Evaluation of Shielding Performance of 3D Printer Materials for High-energy Electron Radiation Therapy", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 16, No. 6, pp. 687-695, 2022. <http://doi.org/10.7742/jksr.2022.16.6.687>
- [20] S. H. Lee, S. Y. Cha, S. Y. Lee, "Aluminum, Copper and Lead as Shielding Materials in 6 MeV Electron Therapy", International Journal of Contents, Vol. 14, No. 2, pp. 457-466, 2014. <http://dx.doi.org/10.5392/JKCA.2014.14.02.457>
- [21] P. J. Arrazola, T. Özel, D. Umbrello, M. Davies, "Recent advances in modelling of metal machining processes", Cirp Annals-Manufacturing Technology, Vol. 62, No. 2, pp. 695-718, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.006>
- [22] Statista, "Market Value of Tungsten in The United States from 2014 to 2025(in Million U.S. Dollars)", Statista Inc., 2019. From URL; <https://www.statista.com/statistics/1012872/us-market-value-tungsten/>
- [23] A. Carocci, A. Catalano, G. Lauria, M. S. Sinicropi, G. Genchi, "Lead Toxicity, Antioxidant Defense and Environment", Reviews of environmental contamination and toxicology, Vol. 238, pp. 45-67, 2016. https://doi.org/10.1007/398_2015_5003

고에너지 전자선 치료 시 텅스텐 함유 3D 프린팅 물질의 차폐 성능 평가

조용인¹, 김정훈¹, 배상일^{2*}

¹부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

²동남권원자력의학원 방사선종양학과

요 약

본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 활용하여 제작한 차폐체의 성능을 비교 분석하여, 고에너지 전자선 치료 시 차폐체로서의 적용 가능성에 대해 알아보고자 한다. 고에너지 전자선에 대한 3D 프린팅 재료의 차폐 성능 평가를 위해 실측과 몬테카를로 기반의 모의실험을 수행하였다. 첫 번째, 모의실험에 대한 신뢰성 확보를 위해 IAEA의 TRS-398 권고를 참조하여 선원량 평가를 수행하였다. 두 번째, PLA+W (93%) 재료에 대한 차폐 성능 분석을 위해 3D 프린터를 이용하여 시편을 제작하였고, 전자선 에너지에 따른 두께별 차폐율을 평가하였다. 세 번째, PLA+W (93%)와 기존 차폐체 간 차폐 성능 비교 분석을 통해 전자선 치료 시 필요한 차폐 두께를 산정하였다. 연구 결과, 첫 번째, 실측과 모의실험을 통한 선원량 평가 결과, 1% 이내의 오차로 TRS-398 권고를 만족하여 모의실험에 대한 신뢰성을 확보하였다. 두 번째, PLA+W (93%)에 대한 차폐 성능 분석 결과, 6 MeV 전자선은 3.12 mm에서 95% 이상의 차폐율을 나타냈고, 15 MeV 전자선은 10 mm 두께에서 90% 이상의 차폐율을 나타내었다. 세 번째, 모의실험을 통해 PLA+W (93%) 재료와 기존 차폐체 간 비교 분석을 통해 동일 두께 내에서 텅스텐, 납, 구리, PLA+W (93%), 알루미늄 순서로 차폐율이 높은 결과를 나타내었으며, 6 MeV 전자선은 5 mm 이상, 15 MeV 전자선은 10 mm 이상 두께에서 거의 유사한 차폐율을 나타내었다. 향후 본 연구를 통해 고에너지 전자선 치료 시 PLA+W (93%) 재료를 이용한 환자의 맞춤형 차폐체 제작을 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

중심단어: 전자선 치료, 3D 프린팅 기술, 방사선 차폐체, PLA+W, 모의실험

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	조용인	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	조교수
(공동저자)	김정훈	부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과	교수
(교신저자)	배상일	동남권원자력의학원 방사선종양학과	방사선사