

Evaluation of Shielding Performance of 3D Printer Materials for High-energy Electron Radiation Therapy

Chang-Woo Oh^{1,2}, Sang-Il Bae², Young-Min Moon², Hyun-Kyoung Yang^{1,3,*}

¹Department of Artificial Intelligence Convergence, Pukyong National University of Graduate School

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

³Department of Electrical, Eelectronics and Software, Pukyong National University

Received: October 18, 2022. Revised: November 15, 2022. Accepted: November 30, 2022.

ABSTRACT

To find a 3D printer material that can replace lead used as a shield for high-energy electron beam treatment, the shielding composites were simulated by using MCNP6 programs. The Percent Depth Dose (PDD), Flatness, and Symmetry of linear accelerators emitting high-energy electron beams were measured, and the linear accelerator was compared with MCNP6 after simulation, confirming that the source term between the actual measurement and simulation was consistent. By simulating the lead shield, the appropriate thickness of the lead shield capable of shielding 95% or more of the absorbed dose was selected. Based on the absorption dose data for lead shield with a thickness of 3 mm, the shielding performance was analyzed by simulating 1, 5, 10, and 15 mm thicknesses of ABS+W (10%), ABS+Bi (10%), and PLA+Fe (10%). Each prototype was manufactured with a 3D printer, measured and analyzed under the same conditions as in the simulation, and found that when ABS+W (10%) material was formed to have a thickness of at least 10mm, it had a shielding performance that could replace lead with a thickness of 3mm. The surface morphology and atomic composition of the ABS+W (10%) material were evaluated using a scanning electron microscope (SEM) and an energy dispersive X-ray spectrometer (EDS). From these results, it was confirmed that replacing the commercialized lead shield with ABS+W (10%) material not only produces a shielding effect such as lead, but also can be customized to patients using a 3D printer, which can be very useful for high-energy electron beam treatment.

Keyword: Electron therapy, Shielding block, 3D printing, Monte carlo simulation, MCNP6

I. INTRODUCTION

방사선 치료(Radiation therapy) 중 고 에너지 전자선 치료(Electron therapy)는 주변 정상장기에 들어가는 선량을 최소화하면서 피부에 가까운 종양조직에 치사선량을 조사하여 종양을 치료하는 목적으로 사용되는 치료법이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 종양의 특성을 고려한 환자 맞춤형 방사선 치료계획(Treatment planning)과 이를 구현하는 고난도 빔 조사기술을 필요로 한다¹⁻⁶. 정확한 선량 조

사를 위해서는 종양의 종류와 크기, 위치, 환자 체형에 따른 적절한 고정용구, 선량차폐체(Radiation shielding device)와 같은 다양한 치료 보조 장치가 필요하다⁷⁻¹⁰.

기존의 선량차폐체 소재는 주로 납(Lead, Pb), 텅스텐(Tungsten, W) 등이 사용되고 있다. 납은 저 용융점 납물질을 사용하여 주물(Casting)방식으로 제작하며, 제작이 용이하지만 정형화된 틀 안에서만 제작이 가능하며 납 자체의 유독성 때문에 인체에 유해하다. 텅스텐은 유독성은 낮지만 밀링(Milling)을 통해 제작하여야 하기 때문에 정밀한 제작 공정

* Corresponding Author: Hyun-Kyoung Yang E-mail: hkyang@pknu.ac.kr Tel: +82-51-629-6868
Address: 908, Hanmir, Yongdang Campus, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-gu, Busan, Republic of Korea

이 어렵고 가격이 비싼 단점이 있다^[11-13].

4차 산업혁명 중 의료분야의 3D 프린팅 기술은 인체 모델, 개인 맞춤형 의료용품 개발 등에 활용되고 있다. 가장 대중적으로 사용되고 있는 용융적층방식(FDM; Fused Deposition Modeling)의 3D 프린터는 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (poly Lactic Acid), TPU (Thermoplastic Polyurethane) 등의 재료를 일정한 온도의 열로 녹여 한 층씩 적층시켜 형상을 만들어 내는 방식이다. 근래에는 이들 재료 내에 비스무트(Bismuth, Bi), 철(iron, Fe), 텅스텐(Tungsten, W) 등의 원자번호 및 밀도가 높은 물질의 보강재를 도입하여 기능성 재료를 구현하고자 하는 연구가 활발히 일어나고 있다^[14-19].

본 연구에서는 차폐체의 차폐성능을 검증하기 위하여 몬테카를로 법을 사용하는 MCNP6 (Monte Carlo N-Particle Extended ver. 6.2) 프로그램을 사용하여 모의 모사를 진행하였다. 몬테카를로 법은 무한에 가까운 수를 이용하여 미지의 방정식이나 적분의 해를 찾는 통계적 방법으로 방사선분야의 계측, 선량측정, 차폐 분야 등에 널리 활용되고 있다^[20-27]. 또한 FDM 방식으로 3D 프린팅이 가능한 방사선 차폐용 물질의 사용을 위해 W, Bi, Fe 보강재가 첨가된 필라멘트를 이용하여 기존의 납 차폐물질과 비교한 후, 차폐성능을 모의 모사와 실측을 바탕으로 평가하고 적정두께를 알아보려 한다.

II. MATERIALS AND METHODS

선형가속기는 ELEKTA사의 Infinity 모델을 모의 모사하였다. 국제원자력기구(International atomic energy agency, IAEA)의 TRS (Technical Report Series)-398 권고에 따라서 모의 모사 조건을 물 팬텀(40 cm x 40 cm x 40 cm)을 0.1 cm의 간격으로 관심영역을 지정한 후, SSD (Source Surface Distance) 100 cm 지점에 Field size를 10 cm x 10 cm로 설정한 후, 6 MeV 전자선을 조사하여 PDD (Percentage Depth Dose) 및 Profile을 산출하였다. 단위 질량 당 흡수 선량을 산출하는 Tally F6를 사용하였으며 실험의 오차를 5% 이내로 줄이기 위하여 10⁸번 반복 실험을 진행하였다.

선형가속기와의 선원향의 비교평가를 위해 실제

선형가속기의 PDD 및 Profile을 측정하였다. 실측 역시 물 팬텀(40 cm x 40 cm x 40 cm), SSD (Source Surface Distance) 100 cm 지점에 Field size를 10 cm x 10 cm로 설정한 후 Semiflex Ionization Chamber (Type 31010) 위치시키고 전하량을 측정하였다.

6 MeV 에너지의 전자선을 차폐하기 위해 필요한 납의 두께를 분석하고 대체할 소재를 찾기 위해 3D 프린터 소재를 MCNP6에 입력하여 두께를 분석하였다. 그 소재들의 조성은 Table 1과 같다.

Table 1. Information of 3D printing materials in FDM type

Materials Composition	Specific Gravity (g/cm ³)
ABS + Tungsten C ₃ H ₃ N + C ₄ H ₆ + C ₂ H ₃ + W(10%)	4.0
ABS + Bismuth C ₃ H ₃ N + C ₄ H ₆ + C ₂ H ₃ + Bi(10%)	2.7
PLA + Iron C ₃ H ₄ O ₂ + Fe(10%)	2.4

분석한 두께를 참조하여 소재별로 시제품을 3D 프린터로 출력하였다. 3D 프린터의 제원과 제작 조건은 Table 2와 같다.

Table 2. 3D printer specifications and sample manufacturing temperature

Specifications	Samples	Manufacturing Temperature[°C]
Y-tech, TT uniform 460 mm [L] x 360 mm [W] x 750 mm [H]	ABS + Tungsten(10%)	240
	ABS + Bismuth(10%)	230
Fused Filament Fabrication [FFF]	PLA + Iron(10%)	240

그리고, 제작한 시제품의 제작 재현성을 확인하기 위하여 주사전자현미경(SEM, JEM-2100F, JEOL)을 이용하여 입자크기 및 분포를 확인하고, 차폐체를 구성하고 있는 원소조성을 확인하기 위하여 에너지 분산 X-선 스펙트럼(EDS)을 주사전자현미경에 부착된 에너지 분산 분광기(Oxford Ltd.)로 측정하여 분석하였다.

3D 프린팅한 시제품의 차폐율을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 Blue Phantom 표면에 Advanced Markus Chamber (Type 34045)를 삽입하고 SSD (Source Surface Distance) 100 cm 지점에 Field size 를 10 cm × 10 cm로 설정한 후 3D 프린팅한 시제품을 위치시켜 6 MeV 전자선을 100MU 조건으로 빔을 조사하여 두께별 전하량을 측정하였다.

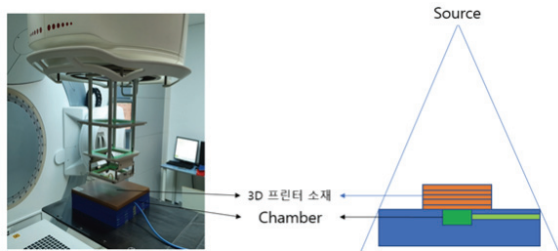


Fig. 1. Measurement conditions for 3D printing materials in a Linear accelerator.

III. RESULT

의료용 선형가속기의 6 MeV 에너지를 분석하기 위해서 먼저 MCNP 프로그램에서의 모의실험 결과와 실제 측정값을 분석하였다. 모의실험과 실제 측정값의 PDD를 비교하기 위하여 3D 프린터 소재의 모의 실험과 실제 측정값을 Fig. 2에 나타내었다.

비교 결과 모의실험에서 나타난 PDD곡선과 실제 측정값이 잘 일치하는 것을 확인하였다. 모의 실험과 실제 실험 시의 선형가속기의 선원형을 비교하기 위하여 두 실험의 Electron beam profile을 분석하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 두 실험의 데이터를 비교한 결과, 1.3 cm의 D_{max} 깊이에서 측정선량이 일치함을 보여 모의실험과 실제 선형가속기의 선원형이 일치했음을 확인할 수 있었다^[28].

납의 6 MeV 에너지를 가지는 1차 전자 차폐를 위한 최소두께를 구하고자 MCNP 모의 실험과 실제 측정을 비교하여 분석하였으며, 이를 Fig. 4에 나타내었다.

납이 2 mm 이상의 두께가 되어야만 초기선량의 95% 이상을 차폐할 수 있는 결과가 나타났다. 보수적으로 3 mm 납 두께의 흡수선량 그래프를 기준으로 하여 3D 프린터 소재를 다르게 하여 납 두께와 근사한 차폐결과를 가지는 각각의 소재의 두께를

MCNP 모의실험으로 분석하였다.

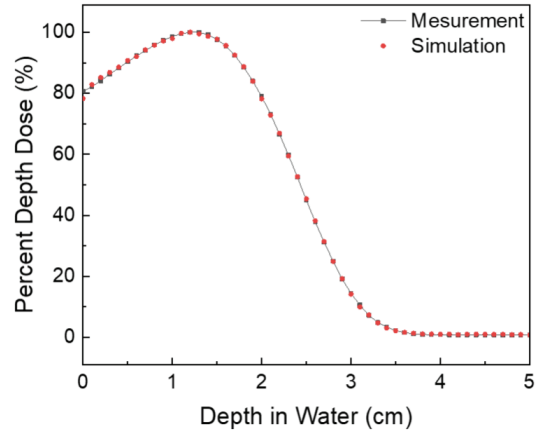


Fig. 2. Analysis of PDD. (Percent Depth Dose)

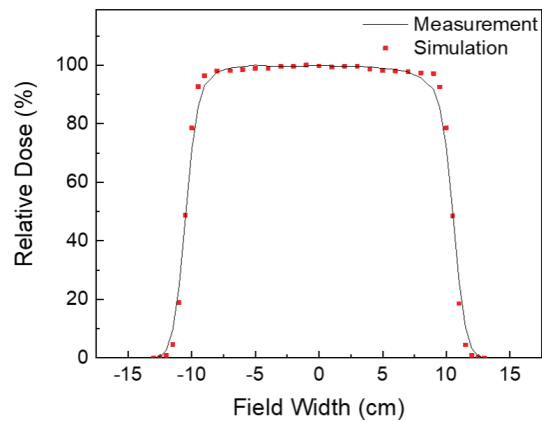


Fig. 3. Analysis of electron beam profile.

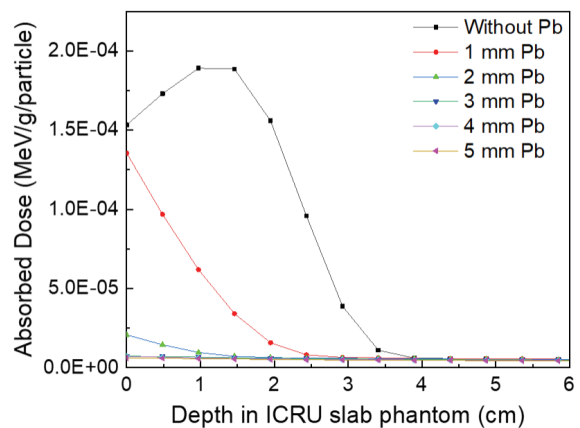


Fig. 4. Absorbed dose curve according to lead thickness.

Fig. 5는 ABS + W(10%) 소재의 MCNP 모의실험 결과이다. ABS + W(10%) 소재는 두께가 10 mm 이상일 때 납 3 mm 두께와 같은 차폐성능을 보였다.

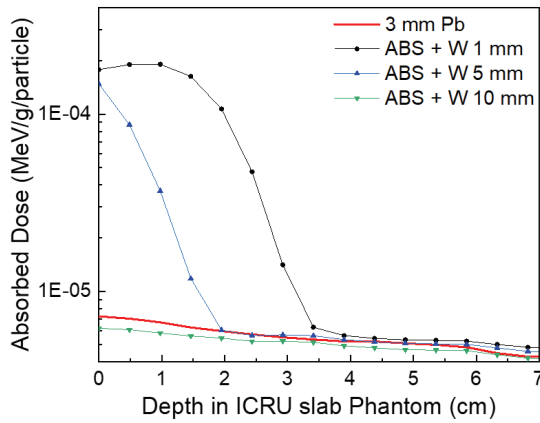


Fig. 5. Absorbed dose curve by thickness of ABS + W(10%) compared to 3 mm lead.

Fig. 6은 ABS + Bi(10%) 소재의 MCNP 모의실험 결과이다. ABS + Bi(10%) 소재는 두께가 15 mm 일 때 납 3 mm 두께와 같은 차폐성능을 보였다.

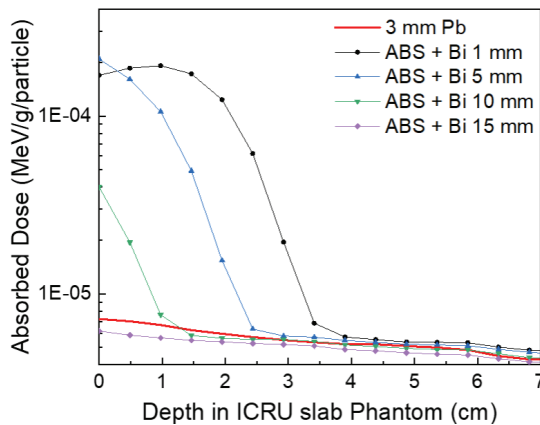


Fig. 6. Absorbed dose curve by thickness of ABS + Bi(10%) compared to 3 mm lead.

Fig. 7은 PLA + Fe(10%) 소재의 MCNP 모의실험 결과이다. PLA + Fe(10%) 소재는 두께가 15 mm 일 때 납 3 mm 두께와 같은 차폐성능을 보였다.

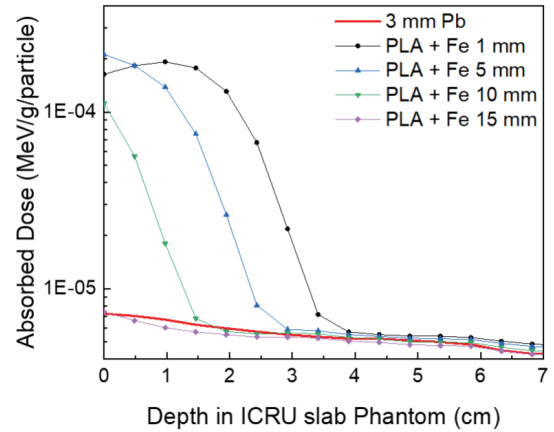


Fig. 7. Absorbed dose curve by thickness of PLA + Fe(10%) compared to 3 mm lead.

Fig. 8은 3가지 소재별 10 mm 두께와 납 3 mm 두께를 비교하여 차폐성능을 알아보기 위한 MCNP 모의실험결과이다. ABS + W(10%) 소재의 두께가 10 mm 일 때 납 3 mm 두께와 근사한 차폐성능을 보였다.

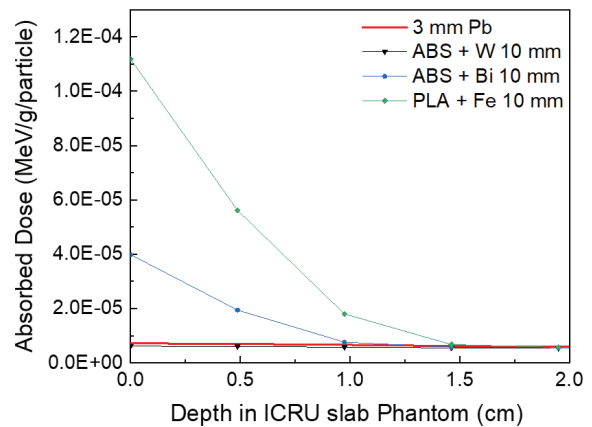


Fig. 8. Absorbed dose curve by 10mm of ABS+W(10%), ABS+Bi(10%), and PLA+Fe(10%) compared to 3 mm lead.

분석결과, ABS + W(10%) 소재가 가장 최소한의 두께인 10 mm로 납 3 mm 두께를 대체할 수 있었다. ABS + W(10%) 소재가 납 차폐체를 대체할 수 있는 최적의 소재로 판단되어 ABS + W(10%) 소재로 만든 시제품의 제작 재현성을 분석하기 위하여 주사전자현미경 분석과 EDS 스펙트럼을 분석하였다.

Fig. 9는 ABS + W(10%) 소재의 주사전자현미경 분석 사진이다. ABS + W(10%) 소재로 만든 시제품의 금속입자(Tungsten, W)는 구형의 표면형상을 가지고 있으며, 평균입자크기가 1 ~ 3 mm 이며 ABS 소재인 플라스틱과 엉켜 있는 형상을 띄고 있음을 확인하였다.

ABS + W(10%) 차폐체의 내부에 존재하는 구형 입자와 기타 물질의 원소조성을 분석하기 위하여 EDS 스펙트럼을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

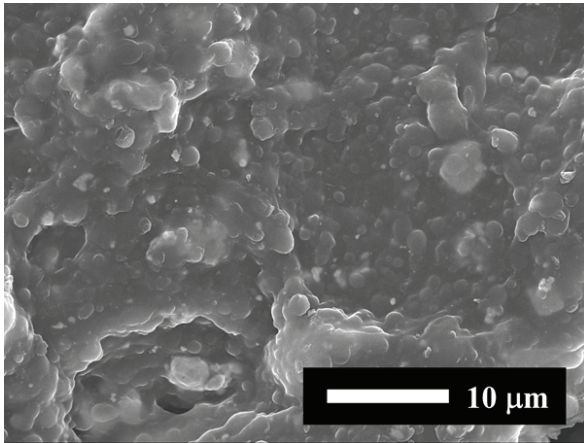


Fig. 9. SEM image of ABS+W(10%) sample.

Fig. 10-(a)에서 차폐체 전체의 spectra를 측정된 결과, 차폐체에서 탄소(C), 산소(O), 텅스텐(W) 입자가 검출되었으며, 구성비율이 중량비로 83.0, 4.74, 12.3%인 것을 확인하였다. Fig. 10-(b)의 구형 입자에 대한 EDS spectra를 측정된 결과, 차폐체 전체의 결과보다 텅스텐의 함량이 12.1%로 증가한 것을 확인하였으며, 이를 통해 구형의 입자가 텅스텐 입자임을 확인하였다. 또한 Fig. 10-(c)에서 기타 물질의 spectra를 측정된 결과, 탄소의 중량비율이 전체에 비해 96.1%로 높게 나온 것을 확인하였으며, 이를 통해 기타물질이 ABS 소재의 플라스틱인 것으로 판단된다.

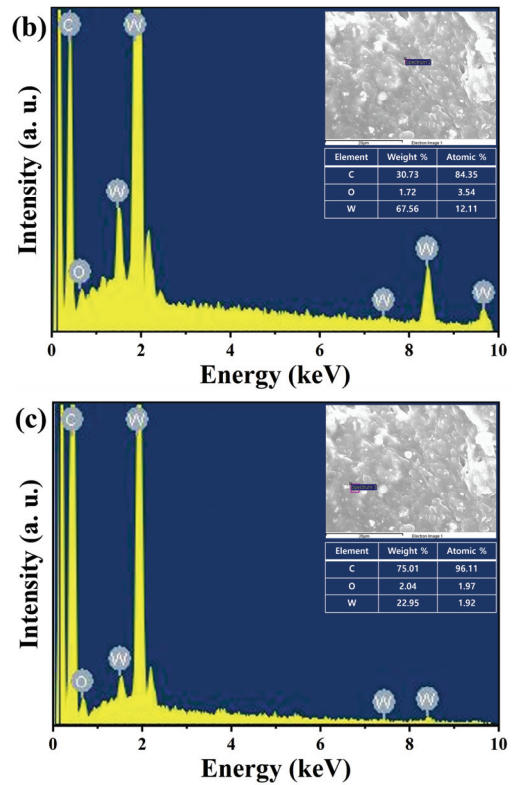
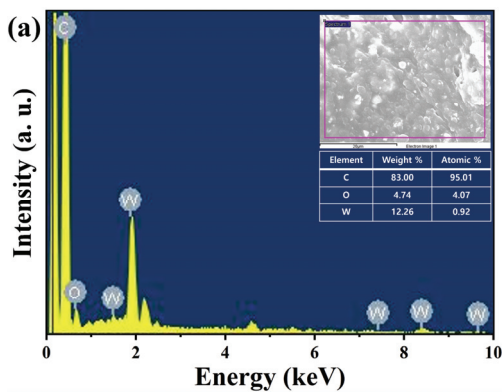


Fig. 10. EDS spectra measured for (a) the whole, (b) spherical particles, and (c) other substances in ABS+W(10%) sample.

Fig. 11은 ABS + W(10%) 소재에 실제 6 MeV 에너지를 조사하여 두께에 따른 실제 차폐성능을 비교평가 한 것이다. MCNP 모의실험 결과와 실제 차폐 실험결과가 비교적 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 두께가 7 mm 이상일 때 97% 이상 차폐되어 지는 것으로 나타났다.

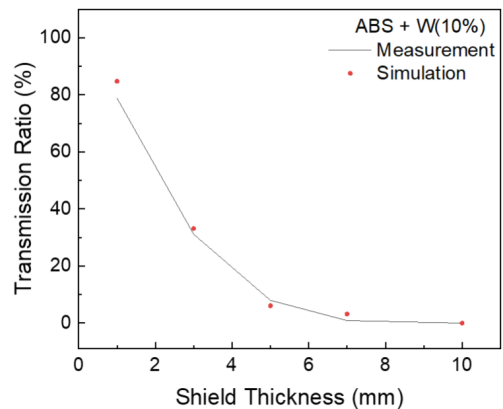


Fig. 11. Comparison of the shielding ratio between measurement and simulation of ABS + W(10%).

추가적으로 소재의 텨스텐(W) 함량에 따른 차폐율의 변화를 알아보기 위해 시판되어지고 있는 ABS + W 소재의 텨스텐(W) 함량에 따른 차폐결과를 모의실험을 통해 비교하였고 그 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

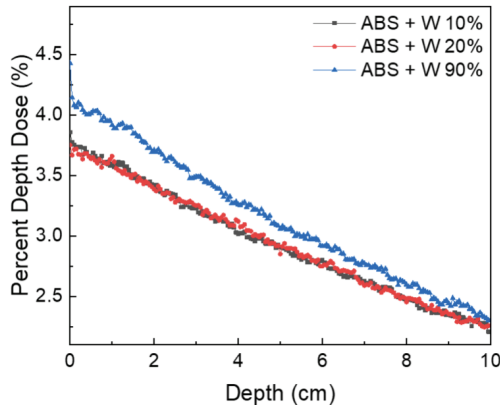


Fig. 12. Comparison of the shielding ratio between ABS + W(10%), ABS + W(20%) and ABS + W(90%).

IV. DISCUSSIONS

본 연구는 고 에너지 전자선 치료시 사용되는 납 차폐체를 대체하는 소재를 찾고자한 연구이며, 실측과 MCNP 모의실험을 이용하여 데이터를 검증하였다.

실험 결과 첫째, 3 mm 납의 흡수선량 데이터를 기준으로 하여 ABS + W(10%), ABS + Bi(10%), PLA + Fe(10%) 소재들의 1, 5, 10, 15 mm 두께별로 모의실험으로 분석한 결과 3가지의 소재 모두 10 mm 두께 이상에서 유의미한 차폐성능을 나타내는 것을 확인하였다.

둘째, 3가지의 소재를 5 cm × 5 cm 크기로 3D 프린터를 사용하여 시제품을 제작한 뒤, 모의 실험과 같은 조건으로 선형가속기에서 Advanced Markus Chamber(Type 34045)로 측정하여 분석한 결과 10 mm 두께의 ABS + W(10%) 소재가 납 3 mm 차폐성능을 대체할 수 있는 최소두께를 가지는 것을 확인하였다. 텨스텐 소재의 경우 다른 소재보다 전자선에 대한 차폐효과가 높게 나타났다. Jang, D.^[29]의 연구에서 텨스텐의 전자밀도가 납보다 약 1.7배가 높아 차폐율이 높은 것으로 나타나 있으며,

본 연구에서는 텨스텐의 전자밀도가 비스무트보다 1.97배, 철보다 2.46배 높기 때문에 사료된다.

셋째, 3D 프린터로 출력된 시제품의 제작재현성과 원소조성을 알아보기 위하여 Abd Mutalib, M.,^[30] 연구에서 제시한 이론에 따라 주사전자현미경(SEM)과 EDS 스펙트럼을 촬영하여 분석한 결과, 제작된 ABS+W(10%)의 재현성이 높은 것으로 사료된다.

넷째, ABS+W소재의 텨스텐 함량을 변화시켜 분석한 결과 텨스텐 함량이 10%와 20%의 차폐에 따른 흡수선량은 거의 같게 나타났으며 오히려 텨스텐 함량을 90%로 높였을 때 차폐가 더 잘 되는 것이 아닌 흡수선량이 증가하는 것을 확인하였다. F. M. Khan,^[1]등에 따르면 소재의 밀도가 높아짐에 따라 방사선과 물질과의 상호작용에 의한 제동복사의 증가로 인한 것으로 사료된다. 이에 따라 소재의 차폐성능, 가격 및 제작 용이성을 고려하면 ABS + W(10%) 소재가 적합하다고 판단된다.

V. CONCLUSIONS

본 연구에서 전자선 치료 시 차폐체로 사용되는 납을 대체할 수 있는 3D 프린터 물질을 찾기 위해 몬테카를로 시뮬레이션인 MCNP6프로그램을 사용하여 모의 모사하고 적정두께를 선정하였다.

전자선을 차폐할 수 있는 금속입자를 첨가한 여러소재들 중 ABS + W(10%) 소재가 최소 두께인 10 mm로 납 차폐체를 대체할 최적의 소재로 확인되었다.

주사전자현미경을 통해 ABS + W(10%) 시제품의 입자크기 및 분포를 확인하였고 EDS Spectra를 통해 ABS + W(10%) 시제품의 표면형상과 원소조성을 분석하여 재현성을 확인하였다.

이러한 결과를 통해 ABS + W(10%) 소재를 차폐체로 사용할 때, 상용화된 납 차폐체에 비해 무게도 훨씬 가벼울 뿐만 아니라 인체에 유해한 납을 사용하지 않을 수 있는 장점이 생긴다. 또한 ABS + W(10%) 소재는 3D 프린터를 이용하여 전자선 치료 시 환자별로 맞춤형으로 제작할 수 있어 고에너지 전자선 치료 시 선량 조사의 정확성을 향상하는 데에 매우 유용할 가능성을 확인하였다.

Acknowledgement

이 연구는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 동남권원자력의학원의 지원을 받아 수행된 연구임(50606-2022).

Reference

- [1] F. M. Khan, J. P. Gibbons, *Khan's the physics of radiation therapy*, Lippincott Williams & Wilkins, 2014.
- [2] R. Baskar, K. A. Lee, R. Yeo, K. W. Yeoh "Cancer and radiation therapy, current advances and future directions", *International Journal of Medical Sciences*, Vol. 9, No. 3, pp. 193-199, 2012. <http://dx.doi.org/10.7150/ijms.3635>
- [3] K. R. Hogstrom, P. R. Almond, "Review of electron beam therapy physics", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 51, No. 13, pp. 455, 2006. <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R25>
- [4] L. Sanche "Low-energy electron therapy", *Nature Materials*, Vol. 14, pp. 861-863. 2015.
- [5] M. Łukowiak, K. Jezierska, M. Boehlke, M. Więcko, A. Łukowiak, W. Podraza, M. Lewocki, B. Masojć, M. Falco, "Utilization of a 3D printer to fabricate boluses used for electron therapy of skin lesions of the eye canthi", *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, Vol. 18, No. 1, pp. 76-81, 2017. <http://dx.doi.org/10.1002/acm2.12013>
- [6] A. S. Beddar, P. J. Biggs, S. Chang, G. A. Ezzell, B. A. Faddegon, F. W. Hensley, M. D. Mills, "Intraoperative radiation therapy using mobile electron linear accelerators: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 72." *Medical physics*, Vol. 33, No. 5, pp. 1476-1489, 2006. <https://doi.org/10.1118/1.2194447>
- [7] M. Tajiri, M. Sunaoka, A. Fukumura, M. Endo "A new radiation shielding block material for radiation therapy: A shielding block made from a new material", *Medical physics*, Vol. 31, No. 11, pp. 3022-3023, 2004. <https://doi.org/10.1118/1.1809767>
- [8] K. Kijima, H. Monzen, K. Matsumoto, M. Tamura, Y. Nishimura, "The Shielding Ability of Novel Tungsten Rubber Against the Electron Beam for Clinical Use in Radiation Therapy", *Anticancer Research*, Vol. 38, No. 7, pp. 3919-3927, 2018. <https://doi.org/10.21873/anticancer.12677>
- [9] K. Yue, W. Luo, X. Dong, C. Wang, G. Wu, M. Jiang, Y. Zha, "A new lead-free radiation shielding material for radiotherapy", *Radiation Protection Dosimetry*, Vol. 133, No. 4, pp. 256-260, 2009. <http://dx.doi.org/10.1093/rpd/ncp053>
- [10] J. E. Rodgers, "Radiation therapy vault shielding calculational methods when IMRT and TBI procedures contribute", *Journal of Applied Clinical Medical Physics*, Vol. 2, No. 3, pp. 157-164, 2001. <http://dx.doi.org/10.1120/jacmp.v2i3.2609>
- [11] K. Yangchen, S. V. Singh, H. Aggarwal, R. D. Singh, R. Siddharth, N. Mishra, S. Tripathi, "Cerrobend shielding stents for buccal carcinoma patients", *Journal of Cancer Research and Therapeutics*, Vol. 12, No. 2, pp. 1102-1103, 2016. <http://dx.doi.org/10.4103/0973-1482.144688>
- [12] A. Sharma, D. Sasaki, D. W. Rickey, A. Leylek, C. Harris, K. Johnson, J. E. A. Aviles, B. McCurdy, A. Egtberts, R. Koul, A. Dubey, "Low-cost optical scanner and 3-dimensional printing technology to create lead shielding for radiation therapy of facial skin cancer: First clinical case series", *Advances in Radiation Oncology*, Vol. 3, No. 3, pp. 288-296, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.adro.2018.02.003>
- [13] M. Tajiri, Y. Tokiya, J. Uenishi, M. Sunaoka, K. Watanabe, "New shielding materials for clinical electron beams", *Radiotherapy and Oncology*, Vol. 80, No. 3, pp. 391-393, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.radonc.2006.08.002>
- [14] S. Su, K. Moran, J. L. Robar, "Design and production of 3D printed bolus for electron radiation therapy", *Journal of applied clinical medical physics*, Vol. 15, No. 4, pp. 194-211, 2014. <http://dx.doi.org/10.1120/jacmp.v15i4.4831>
- [15] Š. Jiří, A. Michal, B. Jiří, S. Martin, H. Jiří, B. Luboš, "Use of composite materials for FDM 3D print technology", In *Materials science forum*, Trans Tech Publications Ltd, Vol. 862, pp. 174-181, 2016. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.862.174>
- [16] R. Melnikova, A. Ehrmann, K. Finsterbusch, "3D printing of textile-based structures by Fused

- Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials", In IOP conference series: materials science and engineering, IOP publishing, Vol. 62, No. 1, pp. 012018, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/62/1/012018>
- [17] K. Brookes, "3D print show", Metal Powder Report, Vol. 69, No. 1, pp. 33-35, 2014.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0026-0657\(14\)70030-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-0657(14)70030-X)
- [18] P. Dudek, "FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements", Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 58, No. 4, pp. 1415-1418, 2013.
<http://dx.doi.org/10.2478/amm-2013-0186>
- [19] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review", Polymer Testing, Vol. 69, pp. 157-166, 2018.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>
- [20] T. Goorley, M. James, T. Booth, F. Brown, J. Bull, L. J. Cox, J. Durkee, J. Elson, M. Fensin, R. A. Forster, J. Hendricks, H. G. Hughes, R. Johns, B. Kiedrowski, R. Martz, S. Mashnik, G. McKinney, D. Pelowitz, R. Prael, J. Sweezy, L. Waters, T. Wilcox, T. Zukaitis, "Initial MCNP6 release overview", Nuclear technology, Vol. 180, No. 3, pp. 298-315, 2012. <http://dx.doi.org/10.13182/NT11-135>
- [21] T. Goorley, M. James, T. Booth, F. Brown, J. Bull, L. J. Cox, J. Durkee, J. Elson, M. Fensin, R. A. Forster, J. Hendricks, H. G. Hughes, R. Johns, B. Kiedrowski, R. Martz, S. Mashnik, G. McKinney, D. Pelowitz, R. Prael, J. Sweezy, L. Waters, T. Wilcox, T. Zukaitis, "Features of MCNP6", Annals of Nuclear Energy, Vol. 87, No. 2, pp. 772-783, 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.02.020>
- [22] M. L. Fensin, M. R. James, J. S. Hendricks, J. T. Goorley, "The new MCNP6 depletion capability", Proceedings of ICAPP 2012, Chicago, USA, June 24-28, pp. 12305, 2012.
- [23] G. Hughes, "Recent developments in low-energy electron/photon transport for MCNP6", Progress in Nuclear Science and Technology, Vol. 4, pp. 454-458, 2014. <http://dx.doi.org/10.15669/pnst.4.454>
- [24] R. Antoni, L. Bourgois, "Evaluation of the new electron-transport algorithm in MCNP6.1 for the simulation of dose point kernel in water", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 412, pp. 102-108, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2017.09.026>
- [25] A. Pořkus "Evaluation of computational models and cross sections used by MCNP6 for simulation of electron backscattering", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 368, pp. 15-27, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nimb.2015.11.027>
- [26] H. G. Hughes, "Enhanced electron-photon transport in MCNP6", In SNA+ MC 2013-Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications+ Monte Carlo, EDP Sciences, pp. 03105, 2014.
- [27] B. M. Mendes, P. C. G. Antunes, I. S. L. Branco, E. d. Nascimento, B. Seniwal, T. C. F. Fonseca, H. Yoriyaz, "Calculation of dose point kernel values for monoenergetic electrons and beta emitting radionuclides: Intercomparison of Monte Carlo codes", Radiation Physics and Chemistry, Vol. 181, pp. 109327, 2021.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109327>
- [28] Andreo, P., Huq, M. S., Westermark, M., Song, H., Tiliakidis, A., DeWerd, L., & Shortt, K., "Protocols for the dosimetry of high-energy photon and electron beams: a comparison of the IAEA TRS-398 and previous international Codes of Practice", Physics in Medicine & Biology, Vol. 47, No. 17, pp. 3033, 2002.
<http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/47/17/301>
- [29] D. G. Jang, G. H. Kim, C. W. Park, "Analysis of shielding effect of lead and tungsten by use of medical radiation", Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 12, No. 2, pp. 173-178, 2018.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2018.12.2.173>
- [30] Abd Mutalib, M., Rahman, M. A., Othman, M. H. D., Ismail, A. F., & Jaafar, J. "Scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive X-ray (EDX) spectroscopy," In Membrane characterization Elsevier, pp. 161-179, 2017.

고 에너지 전자선 치료를 위한 3D 프린터 물질의 차폐 성능평가

오창우^{1,2}, 배상일², 문영민², 양현경^{1,3,*}

¹부경대학교 일반대학원 인공지능융합학과

²동남권원자력의학원 방사선종양학과

³부경대학교 전기전자소프트웨어 공학과

요 약

고 에너지 전자선 치료 시 차폐체로 사용되는 납을 대체할 수 있는 3D 프린터 소재를 찾기 위해 MCNP6 프로그램을 사용하였다. 고 에너지 전자선을 방출하는 선형가속기의 PDD(Percent Depth Dose), Flatness, Symmetry를 측정하고, MCNP6로 선형가속기를 모의 모사 후 비교하여 실측과 모의 모사와의 선원항이 일치함을 확인하였다. 납 차폐체를 모의 모사하여, 흡수선량의 95 % 이상을 차폐할 수 있는 납 차폐체의 적정 두께를 선정하였다. 3 mm 두께의 납 차폐체에 대한 흡수선량 데이터를 기준으로 하여 ABS + W(10%), ABS + Bi(10%), PLA + Fe(10%) 소재들의 1, 5, 10, 15 mm 두께 별로 모의 모사로 분석하여 차폐성능을 분석하였다. 3D 프린터로 각각의 시제품을 제작하여 모의 실험과 같은 조건으로 측정하여 분석한 결과 ABS+W(10%) 소재가 최소 10 mm 이상의 두께로 형성되었을 때, 3 mm 두께의 납을 대체할 수 있는 차폐성능을 가지는 것을 확인하였다. 주사전자현미경(SEM)과 EDS 스펙트럼을 이용하여 ABS + W(10%) 소재의 원소조성 및 표면형상을 분석하였다. 이러한 결과를 통해, 상용화 된 납 차폐체를 ABS + W(10%) 소재로 대체하면 납과 같은 차폐효과를 낼 뿐만 아니라 3D 프린터를 이용하여 환자 맞춤형으로 제작할 수 있어 고 에너지 전자선 치료에 매우 유용할 수 있음을 확인하였다.

중심단어: 전자선 치료, 전자선 차폐체, 3D 프린터, 몬테카를로 시뮬레이션, MCNP6

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	오창우	동남권원자력의학원 방사선종양학과	방사선사
(공동저자)	배상일	동남권원자력의학원 방사선종양학과	방사선사
	문영민	동남권원자력의학원 방사선종양학과	의학물리사
(교신저자)	양현경	부경대학교 전기전자소프트웨어 공학과	교수