

Verification of Shielding Materials for Customized Block on Metal 3D Printing

Kyung-Hwan Jung¹, Dong-Hee Han¹, Jang-Oh Kim², Hyun-Joon Choi³, Cheol-Ha Baek^{1,2,*}

¹Department of Medical Health Science, Kangwon National University, Korea

²Department of Radiological Science, Kangwon National University, Korea

³Department of Radiation Oncology, Wonju Severance Christian Hospital, Yonesi University, Korea

Received: January 26, 2023. Revised: February 24, 2023. Accepted: February 28, 2023.

ABSTRACT

As 3D printing technology is used in the medical field, interest in metal materials is increasing. The Department of Radiation Oncology uses a shielding block to shield the patient's normal tissue from unnecessary exposure during electron beam therapy. However, problems such as handling of heavy metal materials such as lead and cadmium, reproducibility according to skill level and uncertainty of arrangement have been reported. In this study, candidate materials that can be used for metal 3D printing are selected, and the physical properties and radiation dose of each material are analyzed to develop a customized shielding block that can be used in electron beam therapy. As candidate materials, aluminum alloy ($d=2.68\text{ g/cm}^3$), titanium alloy ($d=4.42\text{ g/cm}^3$), and cobalt chromium alloy ($d=8.3\text{ g/cm}^3$) were selected. The thickness of the 95% shielding rate point was derived using the Monte Carlo Simulation with the irradiation surface and 6, 9, 12, and 16 energies. As a result of the simulation, among the metal 3D printing materials, cobalt chromium alloy ($d=8.3\text{ g/cm}^3$) was similar to the existing shielding block ($d=9.4\text{ g/cm}^3$) in shielding thickness for each energy. In a follow-on study, it is necessary to evaluate the usefulness in clinical practice using customized shielding blocks made by metal 3D printing and to verify experiments through various radiation treatment plan conditions.

Keywords: Metal 3D printing, Electron beam, Shielding block, Immobilization device

I. INTRODUCTION

보건복지부의 암 통계에 따르면 갑상선암, 폐암, 위암, 유방암 등의 순서로 발병되고 있으며, 이외에도 피부암, 췌장암, 담낭 및 기타 담도 관련 암 등 다양한 사례가 보고되고 있다. 이 중 유방암과 피부암의 경우 피부 표면으로부터 깊이가 얇은 표재성 암으로 분류되고 있다^[1].

표재성 암을 치료하기 위해서는 종양의 종류, 병변의 위치, 형태 및 크기, 기능과 미용상의 측면, 환자의 상태 등을 고려하여 단순 절제, 냉동요법, 방사선 치료 등을 단독 또는 병용하여 치료를 진행하고 있다^[2,3].

현재 방사선 암 치료는 영상유도방사선치료(Image guided radiation therapy, IGRT), 세기조절방사선치료(Intensity modulated radiation therapy, IMRT), 정위적 방사선치료(Stereotactic body radiation therapy, SBRT), 양성자치료(Proton therapy), 입자선치료(Particle beam therapy) 등이 이루어지고 있으며 특히 입자선치료 중 표재성 암을 치료하기 위해서는 전자선을 이용하는 것이 가장 적합한 치료 방법의 하나로 보고되고 있다^[4]. 암 치료에 이용되는 전자선 에너지 범위는 6 - 20 MeV이며 주로 5 cm 이내 깊이의 종양 치료에 이용되고 있다. 적용 대상은 피부 및 입술 종양, 유방암의 흉벽 조사야 치료, 임파절에 대한 추가 조사, 두경부 종양 치료 등이 있으며 종양용적에

* Corresponding Author: Cheol-Ha Baek

E-mail: baekch100@gmail.com

Tel: +82-33-540-3380

Address: 346, Hwangjo-gil, Dogye-eup, Samcheok-si, Gangwon-do, Republic of Korea

균등한 선량 분포와 심부 조직에 최소선량을 전달할 수 있다⁵⁻⁶⁾.

선형가속기 시설을 활용한 전자선 치료는 정상 조직에 대한 불필요한 피폭을 차폐하거나 종양에 최대 방사선량을 전달하기 위해 다양한 보조용구를 사용한다⁷⁾. 종류로는 쉐기필터, 다엽콜리메이터, 보상체, 블루스, 차폐블록 등이 이용되고 있으나 이 중 작업종사자에 의해 수작업으로 제작되는 것은 차폐블록이다^{8,9)}. 차폐블록의 경우, 저용융점 납합금을 녹여 종양의 모양을 반영한 주물 형태의 틀에 부어 제작한다. 저용융점 납합금은 용융점이 70°로 낮고, 비스무트 50%, 납 26.7%, 주석 13.3%, 카드뮴 10%의 구성성분을 갖는다¹⁰⁾. 하지만, 공장실 내 작업종사자의 중금속 오염도에 관한 고찰 연구에 따르면 작업종사자가 저용융점 납합금을 다루는 과정 중 발생하는 분진 및 발연은 인체에 위해를 주기 때문에 중금속 노출에 대한 심각성이 보고되고 있다¹¹⁾.

금속 3D 프린팅은 기존 절삭가공 방식과 차별화된 금속분말 등을 이용한 적층 가공 방식으로 설계의 자유도가 높고, 금형이 필요하지 않으며, 수 μm 단위 수준의 정밀한 조형이 가능한 특징이 있다¹²⁾. 미국재료시험협회 표준화 위원회에서는 7가지 공정을 적층 제조로 정의하고 있다¹³⁾. 금속 관련 공정은 레이저 빔의 열에너지로 직접 금속 분말을 녹여 증착하는 고에너지 직접 조사방식과 일정한 면적을 가진 분말 층을 레이저의 선택적 열에너지로 융합시키는 분말 적층 방식이 있다^{14,15)}. 의료분야에서는 인체의 뼈나 의료 보조용구 연구에 활용됨에 따라 금속 재료에 대한 관심이 높아지고 있다^{16,17)}.

본 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션 툴을 이용하여 방사선 치료 시 전자선 차폐블록을 대체하기 위한 다양한 금속 3D 프린팅 재료에 대한 물리적 특성 분석 및 방사선 차폐 성능평가를 시행하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 금속 재료

금속 3D 프린팅 재료는 각 금속분말의 기계적 강도, 방사선 저항성, 화학적 안정성, 무독성 등과 같은 물리적 특성을 참고하여 밀도 기준에 따라 3가지 재

료를 선정하였고 각 물성정보는 Table 1과 같다¹⁷⁾.

2. 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo Simulation)

결과 비교검증 및 신뢰성 확보를 위해 몬테카를로 시뮬레이션 코드인 Monte Carlo N-Particle Extended (MCNP)와 Geant4 Application for Tomographic Emission (GATE)를 이용하였다. Figure 1은 시뮬레이션 도구를 이용하여 설계한 모식도이다. 전자선 에너지 6, 9, 12, 16 MeV, 선원-표면 간 거리 100 cm, 조사야 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 로 설계하여 성능평가를 실시하였다.

Table 1. Information according to metal material compositions and density

Material	Composition	Density
Aluminium alloy (LaserForm® AlSi10Mg)	Al 87.22%, Si 11.00%, Mg 0.45%, Fe 0.55%, Cu 0.03%, Mn 0.35%, Ni 0.05%, Zn 0.10%, Pb 0.05%, Sn 0.05%, Ti 0.15%	2.68
Titanium alloy (LaserForm® Ti Gr5)	Ti 88.10%, N 0.03%, C 0.08%, H 0.012%, Fe 0.25%, O 0.13%, Al 6.5%, V 4.5%, Y 0.005%	4.42
Cobaltchrome ally (LaserForm® CoCr)	Co 61.32%, Cr 30%, Mo 6.00%, Ni 0.1%, Fe 0.50%, C 0.02%, Si 1.00%, Mn 1.00%, Cd 0.02%, Be 0.02%, Pb 0.02%	8.3
Lipowitz metal (Cerrobend)	Bi 50%, Pb 26.7%, Sn 13.3%, Cd 10%	9.4

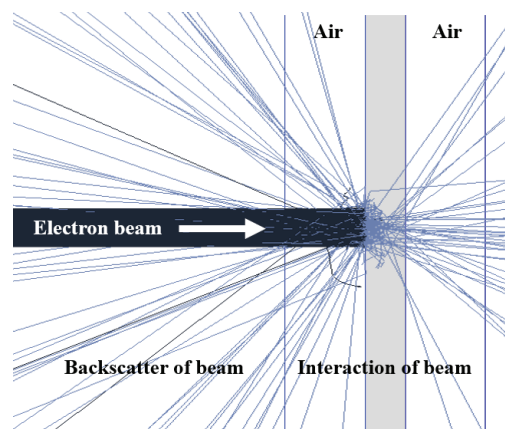


Fig. 1. Penetration geometry using Monte Carlo Simulation.

3. 차폐성능평가

차폐율 성능평가 분석을 위해 방사선 투과율 약 5%를 보이는 각 재료의 두께를 에너지별로 획득하고자 하였다. 미국의학물리학회에서는 전자선 차폐에 필요한 최소한의 순수 납 두께가 전자선 입사에너지(MeV)의 1/2 mm 법칙을 따른다고 보고하고 있다. 하지만 저용융점 납합금의 경우, 순수 납과 동일한 차폐력을 나타내기 위해서는 납보다 20%의 두께가 추가로 요구되며 Eq. (1)은 다음과 같다^[18].

$$T_{Pb} = 1/2 E(MeV) \tag{1}$$

$$T_{Lipowitz's, metal} = 1.2 T_{Pb}$$

T_{Pb} : 순수 납의 두께(mm)

$T_{Lipowitz's metal}$: 저용융점 납합금의 두께 (mm)

III. RESULT & DISCUSSION

금속 3D 프린팅에 사용되는 금속 재료별 물리적 특성을 분석하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 투과율 5% 이내의 방사선 차폐 성능평가를 실시하였다. 전자선 에너지 6, 9, 12, 16 MeV에 대해 저용융점 납합금의 이론적인 두께는 각각 3.6, 5.4, 7.2, 9.6 mm로 보고되며 GATE와 MCNP 환경에서 기하학적 구조를 설계하여 시뮬레이션을 실시하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 각 전자선 에너지에 대해 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm의 결과값을 통해 전산모사 도구의 활용 가능성을 확인하였다.

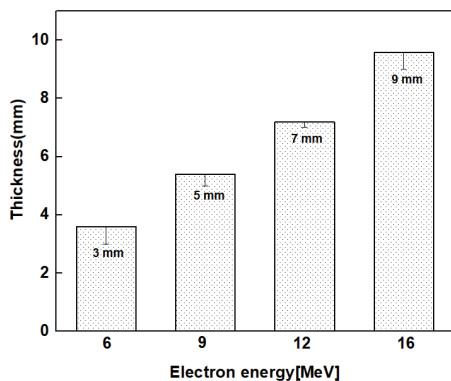


Fig. 2. Thickness in Lipowitz's metal with Theory and Monte Carlo Simulation.

Table 2는 6 MeV에 대한 금속 재료의 투과율 5% 이내 두께를 나타내었다. 전자선 차폐를 위해서는 알루미늄 합금, 티타늄 합금, 코발트 크롬 합금 순으로 12.1, 7.2, 3.8 mm의 두께가 필요하며, 두 시뮬레이션의 오차는 3.3%, 3.4%, 3.0%로 나타났다.

Table 3은 9 MeV에 대한 금속 재료의 투과율 5% 이내 두께를 나타내는 결과이다. 알루미늄 합금, 티타늄 합금, 코발트 크롬 합금 순으로 18.5, 11.0, 5.8 mm의 두께가 필요하였으며, 두 시뮬레이션의 오차는 2.8%, 3.4%, 3.5%로 나타났다.

Table 4는 12 MeV에 대한 결과로 알루미늄 합금, 티타늄 합금, 코발트 크롬 합금 순으로 24.7, 14.7, 7.8 mm의 두께가 필요하였으며, 두 시뮬레이션의 오차는 2.3%, 3.4%, 3.9%로 나타났다.

Table 5는 16 MeV에 대한 금속 재료의 투과율 5% 이내 두께를 나타내는 결과이다. 순서대로 33.1, 20.0, 10.5 mm의 두께가 필요하였으며, 두 시뮬레이션의 오차는 2.4%, 3.1%, 3.5%로 나타났다.

이러한 결과값을 통해 방사선 차폐의 물리적 이론에 따라 금속 재료의 밀도가 높아질수록 차폐 두께가 감소하며 차폐효과가 향상됨을 확인하였으며, 각 에너지에 따른 평균오차는 3.2%, 3.2%, 3.2%, 3.0%로 두 시뮬레이션의 정량적인 상호검증을 통해 전산 도구의 신뢰성을 높일 수 있었다.

본 연구 결과값을 토대로 다양한 3D 프린팅 금속 재료를 선정하여 실제 실험을 바탕으로 임상에서의 유용성 검증 평가 및 금속 재료로 인한 2차 산란선 평가를 확인하기 위한 실험적 검증을 실시할 예정이다.

Table 2. The thickness and error rate for a penetration rate of 5% based on each material in 6 MeV

Materials	Aluminium alloy (LaserForm® AlSi10Mg)	Titanium alloy (LaserForm® Ti Gr5)	Cobaltchrome ally (LaserForm® CoCr)
Thickness(mm)	12.1	7.2	3.8
Penetration rate(%)	MCNP	4.9	4.6
	GATE	1.6	1.2
Error rate(%)	3.3	3.4	3.0

Table 3. The thickness and error rate for a penetration rate of 5% based on each material in 9 MeV

Materials	Aluminium alloy (LaserForm® AlSi10Mg)	Titanium alloy (LaserForm® Ti Gr5)	Cobaltchrome ally (LaserForm® CoCr)
Thickness(mm)	18.5	11.0	5.8
Penetration rate(%)	MCNP	4.8	4.4
	GATE	2.0	1.0
Error rate(%)	2.8	3.4	3.5

Table 4. The thickness and error rate for a penetration rate of 5% based on each material in 12 MeV

Materials	Aluminium alloy (LaserForm® AlSi10Mg)	Titanium alloy (LaserForm® Ti Gr5)	Cobaltchrome ally (LaserForm® CoCr)
Thickness(mm)	24.7	14.7	7.8
Penetration rate(%)	MCNP	4.8	4.9
	GATE	2.5	1.5
Error rate(%)	2.3	3.4	3.9

Table 5. The thickness and error rate for a penetration rate of 5% based on each material in 16 MeV

Materials	Aluminium alloy (LaserForm® AlSi10Mg)	Titanium alloy (LaserForm® Ti Gr5)	Cobaltchrome ally (LaserForm® CoCr)
Thickness(mm)	33.1	20	10.5
Penetration rate(%)	MCNP	5.0	4.6
	GATE	2.6	1.5
Error rate(%)	2.4	3.1	3.5

IV. CONCLUSION

선형가속기 시설을 활용한 전자선 치료 시 정상 조직에 대한 불필요한 피폭을 차폐하기 위해 표재성 종양의 모양에 맞춰 저용용점 납합금을 통해 차폐블록이 제작되고 있다. 하지만 구성성분으로부터 야기되는 중금속 노출 및 오염에 대해 작업종사자의 건강에 대한 심각성이 보고되고 있다.

최근 의료분야에서는 금속 3D 프린팅이 활용됨

에 따라 금속 재료에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서는 금속 3D 프린팅에 사용되는 금속 재료들의 물리적 특성을 분석하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 방사선 차폐성능평가를 진행하였다.

시뮬레이션 도구의 신뢰성을 확보하기 위해 산출된 투과율 5% 이내 지점을 저용용점 납합금의 이론적 필요두께와 비교한 결과 매우 유사한 결과값을 획득하였다. 또한, 밀도에 따른 3가지 금속 재료의 투과율 5% 이내 두께를 각각 평가하였으며, 이때 밀도가 높아질수록 차폐 두께 감소 및 차폐효과가 향상됨을 확인하였다. 본 결과를 통해 전자선 치료에서의 금속 3D 프린팅 재료의 기초자료를 확보하였고 활용 가능성을 제시하였다.

향후 후속 연구를 통해 금속 3D 프린팅을 이용한 차폐블록을 제작하여 작업종사자의 안전 확보 및 전자선 치료 과정에 도움이 될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.(2022RIS-005)

Reference

- [1] H. Sung, J. Ferlay, R. L. Siegel, M. Laversanne, I. Soerjomataram, A. Jemal, F. Bray, "Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries", CA: a cancer journal for clinicians, Vol. 71, No. 3, pp. 209-249, 2021. <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
- [2] K. T. Clebak, M. H. Mendez Miller, J. R. Croad, "Cutaneous Cryosurgery for Common Skin Conditions", American Family Physician, Vol. 101, No. 7, pp. 399-406, 2020.
- [3] N. Basset Seguin, F. Herms, "Update on the Management of Basal Cell Carcinoma", Acta Dermato-Venereologica, Vol. 100, No. 11, pp. 284-290, 2020. <https://doi.org/10.2340/00015555-3495>
- [4] 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>
- [5] K. R. Hogstrom, P. R. Almond, "Review of electron beam therapy physics", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 51, No. 13, pp. 455-489, 2006.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/r25>
- [6] S. Sen, A. Bandyopadhyay, J. K. Pal, A. K. Ghosh, A. R. Deb, "A dosimetric study of electron beam therapy vs. high-dose-rate mould brachytherapy in adjuvant treatment of non-melanoma skin carcinomas of the head and neck region", *Journal of Contemporary Brachytherapy*, Vol. 11, No. 6, pp.547-553, 2019.
<https://doi.org/10.5114/jcb.2019.90233>
- [7] S. H. Levitt, J. A. Purdy, C. A. Perez, S. Vijayakumar, *Technical Basis of Radiation Therapy: Practical Clinical Applications*, 4th Ed, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [8] T. Gauer, J. Sokoll, F. Cremers, R. Harmansa, M. Luzzara, R. Schmidt, "Characterization of an add-on multileaf collimator for electron beam therapy, " *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 53, No. 4, pp.1071-1085, 2008.
- [9] F. K. Aldawood, S. X. Chang, S. Desai, "Design and manufacture of a high precision personalized electron bolus device for radiation therapy", *Medical Devices & Sensors*, Vol. 3, pp. 1-12, 2020.
<https://doi.org/10.1002/mds3.10077>
- [10] J. A. Prudy, M. C. Choi, A. Feldman, "Lipowitz metal shielding thickness for dose reduction of 6-20 MeV electrons", *Medical Physics*, Vol. 7, No. 3, pp. 251-253, 1980. <https://doi.org/10.1118/1.594680>
- [11] J. H. Kim, G. J. Kim, S. K. Kim, S. H. Bea, "The Consideration about Heavy Metal Contamination of Room and Worker in a Workshop", *The Journal of Korean Society for Radiation Therapy*, Vol. 17, No. 2, pp. 87-94, 2005.
- [12] C. Buchann, L. Gardner, "Metal 3D printing in construction: a review of methods, research, applications, opportunities and challenges", *Engineering Structures*, Vol. 180, pp. 332-348, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>
- [13] M. D. Monzon, Z. Ortega, A. Matinez, F. Ortega, "Standardization in additive manufacturing: activities carried out by international organizations and projects", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, pp. 1111-1121, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6334-1>
- [14] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2nd Ed, Springer, Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [15] S. Vock, B. Kloden, A. Kichner, T. Weibgarber, B. Kieback, "Powders for powder bed fusion: a review", *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 4, pp. 383-397, 2019.
<https://doi.org/10.1007/s40964-019-00078-6>
- [16] Q. Yan, H. Dong, J. Su, J. Han, B. Song, Q. Wei, Y. Shi, "A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications", *Engineering*, Vol. 4, No. 5, pp. 729-742, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- [17] S. Sharma, S. A. Goel, "3D Printing and its Future in Medical World", *The Journal of Medical Research and Innovation*, Vol. 3, No. 1, pp. e000141, 2019. <https://doi.org/10.15419/jmri.141>
- [18] F. M. Khan, K. P. Doppke, K. R. Hogstrom, G. J. Kutcher, R. Nath, S. C. Prasad, J. A. Purdy, M. Rozenfeld, B. L. Werner, "Clinical electron-beam dosimetry: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 25", *Medical Physics*, Vol. 18, No. 73, pp. 73-109, 1991.
<https://doi.org/10.1118/1.596695>

금속 3D 프린팅을 통한 맞춤형 차폐블록 제작에 사용되는 차폐 재료 검증

정경환¹, 한동희¹, 김장오², 최현준³, 백철하^{1,2,*}

¹강원대학교 보건의료과학과

²강원대학교 방사선학과

³연세대학교 원주세브란스기독병원 방사선종양학과

요 약

의료분야에 3D 프린팅 기술이 활용됨에 따라 금속 재료에 대한 관심이 높아지고 있다. 방사선종양학과에서는 전자선 치료 시 환자의 정상조직에 대한 불필요한 피폭을 차폐하기 위해 차폐블록을 사용하고 있다. 하지만, 납(Lead)과 카드뮴(Cadmium) 같은 중금속 물질의 취급, 숙련도에 따른 재현성과 배치의 불확실성 등에 대한 문제점이 보고되고 있다. 본 연구에서는 금속 3D 프린팅에 사용될 수 있는 재료별 물리적 특성 및 방사선량을 분석하여 전자선 치료 시 활용할 수 있는 맞춤형 차폐블록을 개발하고자 한다. 후보 재료는 알루미늄 합금($d=2.68\text{ g/cm}^3$), 티타늄 합금($d=4.42\text{ g/cm}^3$), 코발트 크롬 합금($d=8.3\text{ g/cm}^3$)을 선별하였다. $10 \times 10\text{ cm}^2$ 조사면, 6, 9, 12, 16 MeV 에너지로 몬테카를로 시뮬레이션을 이용하여 차폐율 95% 지점의 두께를 도출하였다. 시뮬레이션 결과, 금속 3D 프린팅 재료 중 코발트 크롬 합금($d=8.35\text{ g/cm}^3$)이 에너지별 차폐두께에서 기존 차폐블록($d=9.4\text{ g/cm}^3$)과 유사하였다. 향후 금속 3D 프린팅으로 제작한 맞춤형 차폐블록을 이용하여 임상에서의 유용성 검증 평가 및 다양한 방사선 치료계획 조건 등을 통한 실험 검증이 필요할 것으로 사료된다.

중심단어: 금속 3D 프린팅, 전자선, 차폐블록, 보조용구

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	정경환	강원대학교 보건의료과학과	대학원생(석사과정)
	한동희	강원대학교 보건의료과학과	대학원생(박사과정)
(공동저자)	김장오	강원대학교 방사선학과	연구원
	최현준	연세대학교 원주세브란스기독병원 방사선종양학과	의학물리학자
(교신저자)	백철하	강원대학교 방사선학과	부교수