

Assessment of Radiation Shielding Ability of Printing Materials Using 3D Printing Technology: FDM 3D Printing Technology

Hongyeon Lee, Donghyun Kim*

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

Received: November 30, 2018. Revised: December 26, 2018. Accepted: December 31, 2018

ABSTRACT

3D printing technology is expected to be an innovative technology of the manufacturing industry during the 4th industrial revolution, and it is being used in various fields including biotechnology and medical field. In this study, we verified the printing materials through Monte Carlo simulation to evaluate the radiation shielding ability of the raw material using this 3D printing technology. In this paper, the printing materials were selected from the raw materials available in a general-purpose FDM-based 3D printer. Simulation of the ICRU phantom and the shielding system was carried out to evaluate the shielding effect by evaluating the particle fluence according to the type and energy of radiation. As a result, the shielding effect tended to decrease gradually with increasing energy in the case of photon beam, and the shielding effect of TPU, PLA, PVA, Nylon and ABS gradually decreased in order of materials. In the case of the neutron beam, the neutron intensity increases at a low thickness of 5 ~ 10 mm. However, the effective shielding effect is shown above a certain thickness. The shielding effect of printing material is gradually increased in the order of Nylon, PVA, ABS, PLA and TPU Respectively.

Keyword : 3D Printing Technology, Monte Carlo Simulation, Radiation shield

I. INTRODUCTION

의료 분야 내 방사선의 이용은 질병의 진단 및 치료를 위해 다양하게 활용되고 있으며, 의학 기술의 발달과 장비의 보급으로 인해 방사선의 이용은 매년 증가하고 있는 추세이다.

그러나 이러한 방사선의 이용은 다양한 이점이 있는 반면, 방사선 피폭이라는 큰 문제를 항상 수반하고 있다. 방사선의 피폭은 결정적 혹은 확률적 영향을 통해 인체 장애를 일으킬 가능성이 존재하며, 사용하는 방사선의 종류 및 에너지에 따라 그 위험도는 다르다.

이러한 방사선을 이용함에 있어 방사선 방호는 필수적이며, 사용하는 방사선의 종류 및 특성에 따라 적절한 차폐물질의 사용이 필요하다. 현재 의료 분야 내 일반적으로 알려진 차폐물질 중 납은 원자번호

와 밀도가 높고 가공성이 좋으며 경제적인 이유로 과거에서부터 많이 이용되어 왔다.^[1]

현재 납을 통해 상용화되어 이용되는 차폐기구로는 납 방호복(Lead apron), 납 안경(lead glasses), 이동형 납 차폐체(Portable radiation shield) 등이 있으며, 업무 분야에 따라 다양한 형태로 이용되고 있다. 이러한 차폐기구는 대다수 수입제품으로 기존 제작방식인 절삭 가공을 통해 제작 후 보급되고 있어 비용이 고가이다.

또한, 납 재질의 경우 개인용 방호 장비로서 무거우며, 중금속인 특성상 납 중독 등의 환경적인 문제점으로 기존의 납을 대체하고자 연구가 현재 활발하게 이루어지고 있다.^[2,3]

최근 기존의 절삭 가공방식이 아닌 적층 제조(Additive manufacturing)기술을 이용한 3D 프린팅(3D printing) 기술은 기존의 산업적 응용을 넘어서

* Corresponding Author: Donghyun Kim

E-mail: dhkim@cup.ac.kr

Tel: +82-010-2079-1133

현재 세계적으로 3차 제조업의 혁명을 주도할 차세대 기술로 주목받고 있다.^[4]

3D 프린트 기술은 제작하고자 하는 형상을 얇은 단면으로 나누고 이 단면을 한 층씩 순차적으로 적층하여 3차원 형상을 제작하는 기술이다.^[5]

3D 프린터의 조형기술 방식에는 재료의 특성과 형태에 따라서 액체, 분말, 고체 기반으로 분류할 수 있고, 현재에는 정밀성 및 효율성이 높은 선택적 레이저 소결 조형(Selective laser sintering, SLS), 압출 적층 조형(Fused deposition model, FDM) 방식의 3D 프린터가 전 세계 시장에서 제품들의 주류를 형성하고 있다.^[6]

그중 압출 적층 조형(FDM)은 플라스틱 종류 등 열가소성 물질의 필라멘트를 노즐에서 녹여 얇은 실 형태로 층을 쌓아 물체를 제작하는 방식으로 현재 범용 3D 프린터로 많이 이용되고 있다.

현재 국내에서도 이러한 3D 프린트를 이용한 의료 분야 내 활용에 관한 연구가 많이 이루어지고 있는 추세이며, 본 연구에서는 FDM 방식의 범용 3D 프린터를 이용하여 의료 분야에서 활용할 수 있는 방사선 차폐기구로의 제작 가능성을 평가하고자 하는 것에 목표가 있다.

이를 사전적으로 검증하고자 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 전산모사를 통해 FDM 방식의 3D 프린터에서 사용 가능한 원료에 대한 차폐효과를 평가하여, 3D 프린팅 기술을 이용한 차폐기구 제작 연구에 관한 기초자료를 제공하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHOD

1. 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation)

몬테카를로 시뮬레이션을 통한 전산모사를 위해 로스알라모스 국립연구소에서 개발된 이후 세계적으로 검증된 프로그램인 MCNPX(Monte Carlo N-Particle eXtended, ver 2.5.0)을 이용하였다.

1.1 ICRU slab phantom

과거 국제방사선단위측정위원회(ICRU)는 외부 방사선에 대한 피폭 모니터링을 위해 측정 가능한 실용량에 대한 개념을 제시했다. 그 중 개인선량당

량은 ICRU tissue로 구성된 phantom 내 10mm, 3mm, 0.07 mm 깊이 아래 측정된 선량을 각각 전신 $H_p(10)$, 수정체 $H_p(3)$, 사지 $H_p(0.07)$ 에 대한 선량 당량으로 정의하였다.^[7] 본 연구에서는 모의피폭체로서 ICRU에서 정의한 ICRU slab phantom의 구성성분(ICRU tissue, O 76.2%, C 11.1%, H 10.1%, N 2.6%), 기하학적 크기($30 \times 30 \times 15$ cm), 밀도 1 g/cm^3 를 토대로 모사했다.

1.2 Radiation Type and Energy

방사선의 종류 및 에너지에 따른 차폐 효과를 평가하기 위해 입자(particle)는 광자(photon), 중성자(neutron)에 대해 평가하였다. 광자의 경우 진단용 X선에서 사용하는 저 에너지 영역(10, 20, 40 keV)과 중성자의 경우 ICRP Pub. 60의 방사선 가중치에 근거하여 10 keV, 100 keV, 2MeV, 20MeV로 선정하여, 각각의 선원 항(source specification)을 정의하였다.^[8]

1.3 3D Printer Type & Materials

일반적으로 3D 프린팅 과정은 제작하고자 하는 물체의 설계 도면을 만드는 3D 모델링 단계, 재료를 한 층씩 쌓아 올려 모형을 실제로 만들어내는 프린팅 단계, 제작된 모형의 지지대를 제거하고 표면을 매끄럽게 마무리 처리하는 후처리의 세 가지 단계로 설명할 수 있다.^[9] 본 연구에서는 압출 적층 조형의 3D 프린팅 방식을 이용한 원료의 차폐 효과를 평가하고자 현재 범용으로 사용되는 3D 프린터 중 상용화된 제품(MyD, P250, 대건테크)은 Fig. 1과 같으며, 이에 대한 세부정보를 수집하였다.

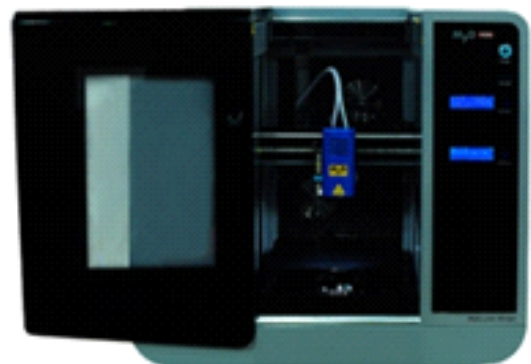


Fig. 1. FDM type 3D Printer(MyD, P250).

3D 프린트의 최대 조형 크기는 가로 240mm, 세로 200mm, 높이 250mm이고 출력속도는 30~200 mm/sec이다. 노즐 크기는 0.4mm이며, 적층 두께는 최소 100 μ m ~ 최대 300 μ m까지의 정밀도를 갖추고 있다.

사용 가능한 재질로는 노즐에 삽입이 용이한 필라멘트 형태로 플라스틱 계열인 PLA(poly lactic acid)를 포함한 TPU(Thermoplastic Poly Urethane), ABS (Acrylonitrile-butadiene-styrene), PVA(Polyvinyl Alcohol), Nylon(Polyamides) 등이 가능하며, 원료의 구성 및 비중에 대한 정보를 Table 1에 제시하였으며, 이러한 정보를 토대로 차폐 재질을 모사했다.

Table 1. Information of FDM 3D printer materials

| Materials | Composition | Specific gravity(g/cm ³) |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|
| PLA(Poly Lactic Acid) | C ₃ H ₄ O ₂ | 1.24 |
| TPU(Thermoplastic Poly Urethane) | C ₃ H ₄ O ₃ CO | 1.1 |
| ABS(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) | C ₃ H ₃ N+C ₄ H ₆ +C ₂ H ₃ | 1.04 |
| PVA(Polyvinyl Alcohol) | CH ₂ (CH)(OH) | 1.24 |
| Nylon(Polyamides) | C ₁₀ H ₂₀ (CO) ₂ (NH) ₂ | 1.2 |

2. 모의실험을 이용한 차폐효율 평가방법

FDM 방식의 3D 프린트에서 사용 가능한 각 재질에 대한 방사선 차폐 효과를 평가하고자, 선원의 발생지점으로부터 100cm 거리에 ICRU slab phantom을 위치시킨 후 전면부에 30 × 30 × d (thickness) cm 크기의 차폐체를 모사했다. 이에 대한 자세한 그림과 사양은 Fig. 2에 제시하였다. 첫 번째로, 차폐체 미사용 시 방사선의 종류 및 에너지에 따라 ICRU slab phantom 아래 10mm, 0.07 mm 지점인 H_p(10), H_p(0.07)에 대한 입자 플루언스를 획득하였다. 두 번째로, 프린팅 원료에 따른 차폐 효과를 평가하기 위해 동일한 방사선장 내 모사한 차폐체의 두께(5~25mm) 증가에 따른 입자 플루언스를 획득하였으며, 차폐체 미사용 시 방사선 강도를 기준으로 차폐율(%)을 평가하였다.

Tally specification card는 f5 tally를 이용하여

ICRU slab phantom 내 10mm 지점 내 도달하는 반경 5 μ m ring detector 내 입사된 입자 플루언스 (particle/cm²)를 구분하여 획득했다. 모의실험 내 반복횟수(nps)는 10⁷번 추정하였으며, 신뢰성 확보를 위해 통계적 불확도(uncertainty)는 3% 이내로 유지했다.

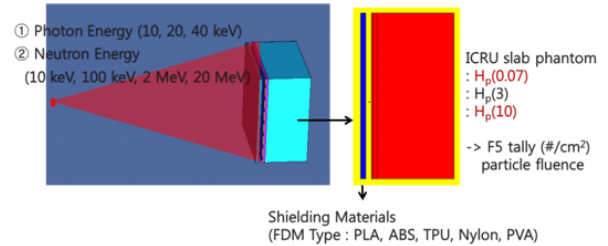


Fig. 2. Simulating model for shielding effect evaluation of 3D printing materials.

III. RESULT

1. 광자선의 에너지별 프린팅 원료에 따른 차폐효과

현재 범용으로 사용되는 FDM 방식의 3D 프린터에서 사용 가능한 PLA, ABS, PVA, Nylon, TPU 등의 원료의 방사선 차폐 효과에 대해 평가하고자 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 전산모사를 수행하였다.

첫 번째로, ICRU phantom 아래 10mm의 전신에 대한 선량평가 지점을 기준으로 저 에너지 광자선에 대한 평가 결과, 차폐두께 증가에 따라서 광자 플루언스가 점차적으로 감소하는 양상을 보였으며, 10 keV 광자선의 경우, 차폐두께 증가에 따라 각 재질별로 ABS 46.4~95.5%, PLA 40.4~99.9%, PVA 32.5~99.6%, Nylon 24.3~98.5%, TPU 44.2~100.0%의 차폐 효과를 보였다. 20 keV 광자선의 경우, ABS 22.0~54.6%, PLA 28.7~72.0%, PVA 26.5~68.2%, Nylon 23.7~62.3%, TPU 29.6~72.8%의 차폐 효과를 나타내었다.

40 keV 광자선의 경우, ABS 1.4 ~ 18.7%, PLA 3.8 ~ 26.1%, PVA 3.8 ~ 24.9%, Nylon 3.3 ~ 21.8%, TPU 2.7 ~ 23.4%의 차폐 효과를 나타내었으며, 광자선 에너지의 증가에 따라 프린팅 원료의 차폐 효과가 상당 부분 감소하는 경향성을 보였다.

이에 대한 자세한 그림과 사양은 Fig. 3에 제시하였다.

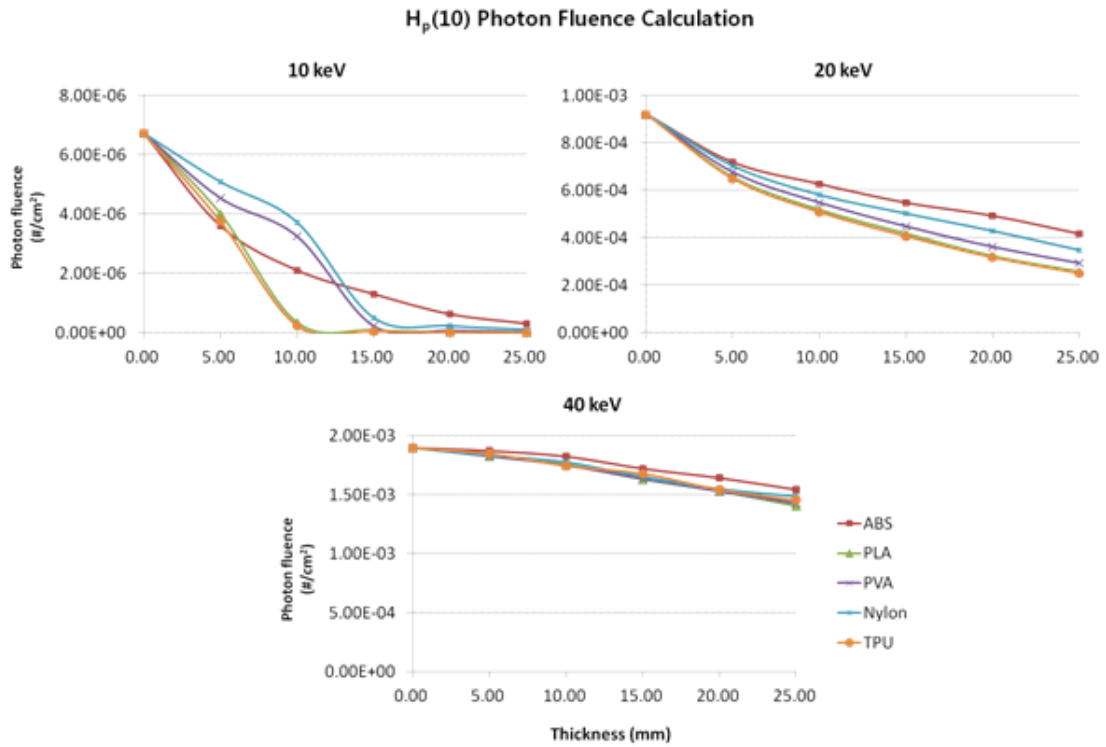


Fig. 3. H_p(10) Photon fluence according to shielding materials and thickness.

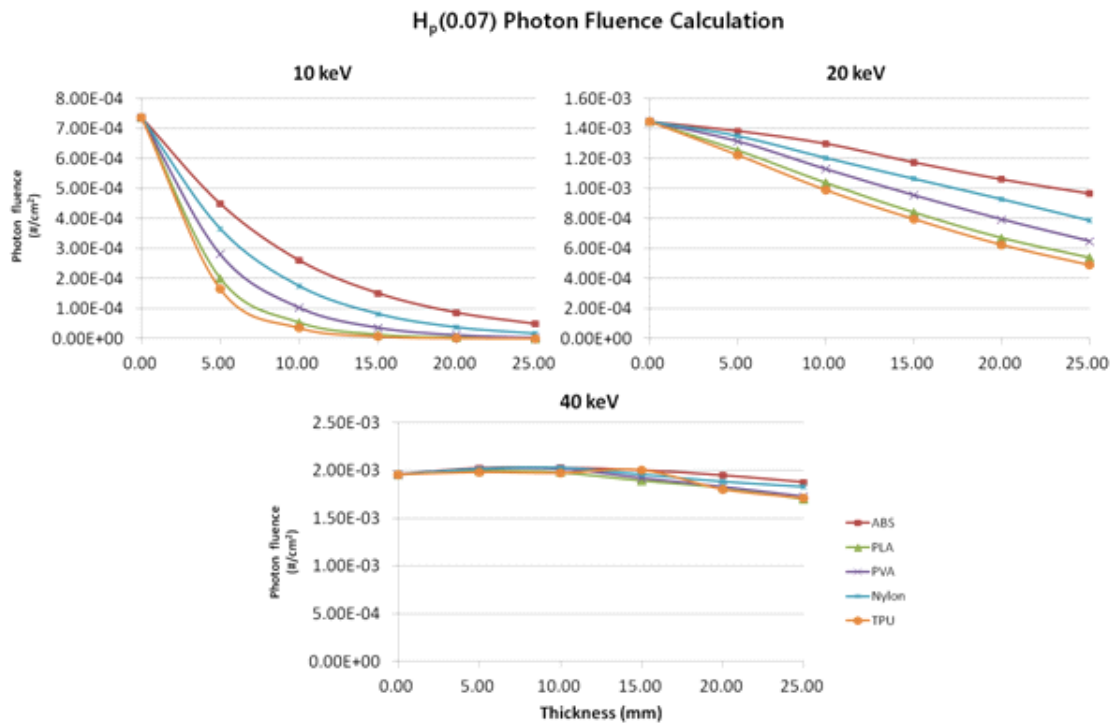


Fig. 4. H_p(0.07) Photon fluence according to shielding materials and thickness.

두 번째로, ICRU phantom 아래 0.07 mm의 사지에 대한 선량 평가지점을 기준으로 저 에너지 광자선에 대한 평가 결과, 10 keV 광자선의 경우, 차폐두께 증가에 따라 각 재질별로 ABS 39.1~93.3%, PLA 72.8~99.9%, PVA 61.9~99.4%, Nylon 50.3~97.7%, TPU 77.5~100.0% 차폐 효과를 보였다. 20 keV 광자선의 경우, ABS 4.4 ~ 33.2%, PLA 13.3~62.7%, PVA 9.1 ~ 55.2%, Nylon 6.6 ~ 45.4%, TPU 15.4~66.0%를 나타내었다. 40 keV 광자선의 경우, ABS -3.4 ~ 4.2%, PLA -1.9 ~ 13.3%, PVA -2.8 ~ 11.7%, Nylon -3.1 ~ 6.6%, TPU -1.2 ~ 12.7%를 나타내었으며, 앞선 결과와 동일하게 광자 에너지의 증가에 따라 프린팅 원료의 차폐 효과가 감소되는 양상을 보였다. 이에 대한 자세한 그림과 사양은 Fig. 4에 제시하였다.

위 결과를 바탕으로 각 재질별 차폐 효과는 TPU 재질의 경우 상대적으로 가장 높은 차폐 효과를 보였으며 PLA, PVA, Nylon, ABS 순으로 점차적으로 감소되는 경향을 보였다. $H_p(10)$, $H_p(0.07)$ 지점에서의 광자선 속 강도에 대한 평가를 통해 프린팅 원료의 경우 사지 선량보다 심부선량에 대한 차폐 효과가 조금 더 높게 나타났다. 또한, 광자선 에너지 증가에 따라, 40 keV 광자선의 경우 차폐체 5mm 두께 내에서 사지 선량을 증가시켜 차폐 효과가 오히려 저하되는 결과를 보였다.

2. 중성자의 에너지별 프린팅 원료에 따른 차폐효과

FDM 프린팅 원료에 대한 중성자에 대한 차폐 효과를 평가하고자 앞서 선정한 10 keV, 100 keV, 2 MeV, 20 MeV 에너지에 대해 프린팅 원료별 두께에 따른 차폐효과를 산정하였다. 첫 번째로, ICRU phantom 아래 10mm의 전신에 대한 선량 평가지점을 기준으로 평가한 결과, 10 keV 중성자의 경우, ABS는 -7.4~23.0%, PLA 2.6~46.5%, PVA 4.6~54.4%, Nylon 4.7~56.4%, TPU 1.8 ~ 33.1%의 차폐 효과를 보였다. 100 keV의 중성자의 경우, ABS는 2.3~45.9%, PLA 0.9~43.7%, PVA 2.6~52.3%, Nylon 0.0~54.8%, TPU 1.1~29.2%의 차폐 효과를 나타내었다. 2 MeV 에너지의 속중성자의 경우, ABS는 -5.1 ~ 16.1%, PLA -12.5 ~ 36.1%, PVA -10.7 ~ 45.9 %, Nylon -6.8 ~ 29.5%, TPU -12.3 ~ 19.6%로 5~10 mm 두께 이내에서 중성자 선속이 반대로 증가되는 경향을 보였으나, 이후 증가된

두께에서는 유효한 차폐 효과를 나타내었다. 20 MeV 에너지의 초고속 중성자의 경우, 선정한 두께 내 모든 재질에서 선속이 증가된 것으로 나타나 차폐 효용성이 거의 없는 것으로 평가되었다. 이에 대한 자세한 그림과 사양은 Fig. 5에 제시하였다.

두 번째로, ICRU phantom 아래 0.07 mm의 사지 선량 지점을 기준으로 중성자 에너지를 평가한 결과, 10 keV 중성자의 경우, ABS는 -8.0 ~ 39.1%, PLA -9.6 ~ 32.0%, PVA -8.9 ~ 42.4%, Nylon -8.8 ~ 44.5%, TPU -7.6 ~ 19.6%의 차폐 효과를 보였다. 100 keV의 중성자의 경우, ABS는 -11.0 ~ 32.8%, PLA -11.6 ~ 30.1%, PVA -11.3 ~ 40.0%, Nylon -12.2 ~ 42.4%, TPU -9.8 ~ 15.0%의 차폐 효과를 나타내었다. 2 MeV 에너지의 속중성자의 경우, ABS는 -18.3 ~ 3.1%, PLA -27.0~20.5%, PVA -26.6~31.7 %, Nylon -19.4~13.9%, TPU -24.9 ~ 3.3%로 앞선 결과와 동일하게 재질별로 5~10 mm 두께에서 선속이 반대로 증가되는 경향을 보였으나 이후 두께에서는 유효한 차폐 효과를 나타내었다. 20 MeV 에너지의 초고속 중성자의 경우, 선정한 두께 내 모든 재질에서 중성자 선속이 증가되어 차폐 효용성이 거의 없는 것으로 평가되었다. 이에 대한 자세한 그림과 사양은 Fig. 6에 제시하였다.

위 결과에 따라 3D 프린팅 원료 중 Nylon의 경우 100 keV 이하의 중성자선 에너지에 대해 가장 높은 차폐 효과를 나타내었으며, 그 외 원료의 경우 PVA, PLA, ABS, TPU 순서로 점차 낮아지는 경향을 보였다. 또한, 중성자의 에너지 증가에 따라 차폐 효과는 점차적으로 감소되는 양상을 보였고, 2 MeV 이상의 고속 중성자에서는 5~10 mm 두께 이내에서 오히려 중성자 선속이 증가되어 차폐 효과가 떨어지는 경향을 나타내었다.

IV. DISCUSSION

3D 프린팅 기술은 복잡한 형상을 적층 제조 기법을 통해 생산하는 제조기술 중 하나로, 3D CAD (computer-aided design) 기반으로 디자인된 3차원 물체를 3D 프린터를 이용하여 제작하는 것을 말한다. 관련 기술에 대한 특허가 만료됨에 따라 다양한 분야에 적용되고 있으며, 그중 의료 및 바이오 생체 분야의 경우 제조기술의 특성상 활용 가치가 높다고 평가되고 있다.

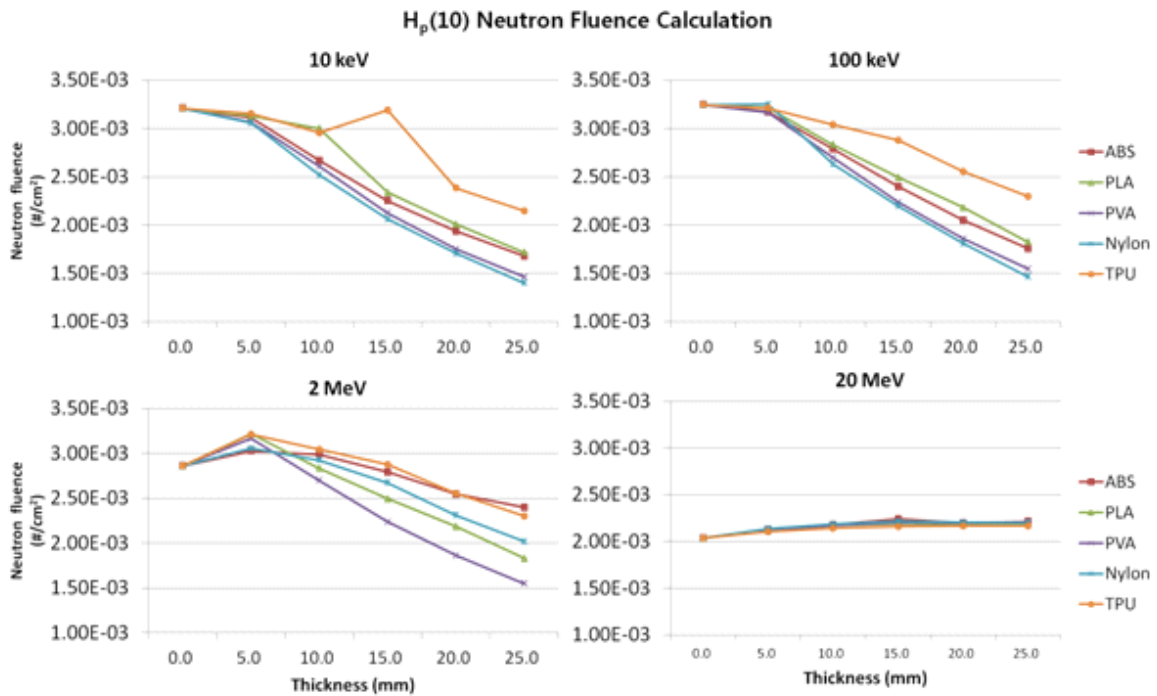


Fig. 5. H_p(10) Neutron fluence according to shielding materials and thickness.

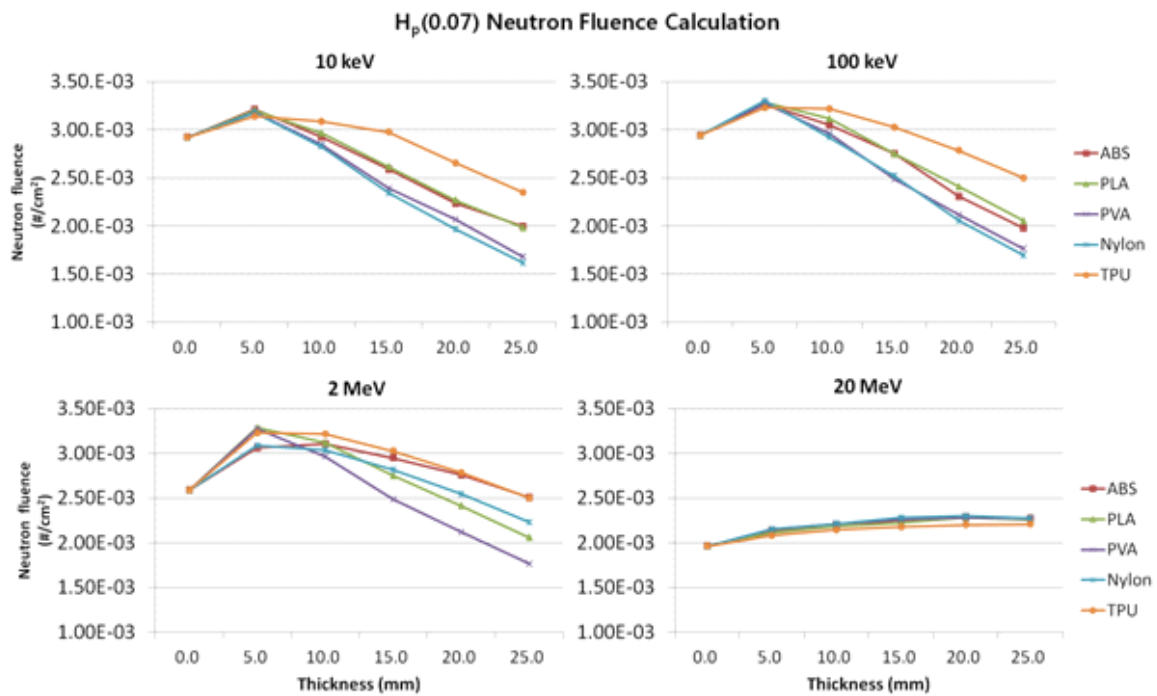


Fig. 6. H_p(0.07) Neutron fluence according to shielding materials and thickness.

국외에서는 수술에 대한 임상 적용, 두개골 재건용 프린터, 교정기, 보청기의 제작 등으로 활용되고 있다고 보고하고 있다.^[9] 그에 반해 국내에서는 아직 시작단계에 있으며, 최근 의료 분야 내 다양한 부분에서 3D 프린트를 적용하고자 하는 연구가 이루어지고 있다. 오왕균은 FDM 방식의 3D 프린트를 이용한 쇄골 골절 모델 제작을 통해 정형외과적 수술에 대한 유용성에 대해서 평가하였고, 방사선 치료 분야에 관련하여 정상민 등은 방사선 치료 시 Customized한 Bolus의 제작, 오동렬은 방사선량 검증을 위한 팬텀 제작에 대한 연구 등이 이루어져 왔으며, 진단 분야에서도 김형균 등은 3D 프린트를 이용하여 의료영상 검사를 위한 상지 보조기구 제작 등 다양하게 적용되고 있다.^[10,11,12,13] 이에 따라 본 연구에서도 현재 일반적으로 제품화된 방사선 차폐기구가 아닌 3D 프린트를 이용한 방사선 차폐기구의 제작 가능성을 평가하고자 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 전산모사를 통한 원료 검증을 수행하고자 하였다. FDM 방식에서 사용 가능한 열가소성 플라스틱 재질의 경우 차폐두께가 증가할수록 차폐 효과는 점차적으로 향상되었으나, 납에 비해 실효원자번호와 비중이 낮아 광전효과, 콤프턴산란 등의 상호작용 발생 확률이 감소되어 차폐 효과가 떨어지는 결과를 보였고, 광자선의 에너지 증가에 따라 동일한 차폐 효과를 얻기 위해 상당한 두께가 필요할 것으로 생각된다. 그에 반해 중성자의 경우, 각 원료별로 차폐두께가 증가함에 따라 차폐 효과가 점차 증가되는 양상을 보였으나 2 MeV 이상의 고속 중성자에서는 다소 불규칙한 양상을 보였다. 이는 중성자의 에너지가 증가에 따라 핵반응을 통해 발생된 이차입자의 증가와 포획반응 이후 2차적인 감마선 방출 확률의 증가로 인해 차폐 효과가 반대의 경향을 나타낸 것으로 생각된다.

한국산업기술평가관리원에 따르면, 현재 3D 프린트에서 사용 가능한 재료는 다소 한정적이며, 제작을 위해 비용적으로 해결해야 될 사안들이 많다고 언급하고 있다.^[14] 최근 Justin Ceh 등과 Min Liang은 기존의 플라스틱 계열의 원료에 텅스텐, 비스무스 등을 첨가한 팬텀 제작 및 방사선 차폐 효과 등에 관해 연구가 이루어지고 있다.^[15,16] 이에 따라 추가적인 연구를 통해 혼합원료뿐만 아니라 3D 프린팅

형태에 따라 사용 가능한 원료에 대해서도 검증이 필요할 것으로 생각된다. 본 모의실험에서 평가한 원료를 이용한 방사선 차폐기구로의 활용을 위해서는 FDM 프린터를 통해 제작된 출력물의 성능평가가 필요하며, 원료의 시편제작을 통해 밀도, 납당량 평가 등이 추가적으로 필요할 것으로 사료된다. 추후 지속적인 연구를 통해 향후 3D 프린팅 기술의 장점인 맞춤형 제작을 접목한 차폐기구 제작에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 몬테카를로 시뮬레이션 기반의 전산모사를 통해 현재 범용으로 사용되는 FDM 방식의 3D 프린터에서 사용 가능한 원료에 대한 방사선 차폐 효과를 분석하였다. 평가한 3D 프린팅 원료 중 진단 X선 영역 내 광자 에너지에서 TPU 재질이 가장 높은 차폐 효과를 나타내었으며, PLA, PVA, Nylon, ABS 순으로 낮은 차폐 효과를 보였다. 그러나 에너지가 증가할수록 광자선에 대한 차폐 효과는 미미하였고, 일반적으로 사용되는 납과 비교하여 상대적으로 두꺼운 차폐두께가 요구된다. 이에 반해 중성자의 경우 일정 두께 이상에서 유효한 차폐 효과를 나타내어 중성자 차폐체로서 유효한 것으로 평가되었다. 향후 3D 프린팅 기술을 이용한 의료 분야 내 방사선 차폐기구 제작을 위한 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 논문은 2017년도 부산가톨릭대학교 산학협력단 연구비에 의하여 수행된 연구임.

Reference

- [1] K. T. Kim, S. S. Kang, S. C. Noh, B. J. Jung, C. H. Cho, Y. J. Heo, J. K. Park, "Absorbed Spectrum Comparison of Lead and Tungsten in Continuous X-ray Energy using Monte Carlo Simulation," *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 6, No. 6, pp. 483-487, 2012.
- [2] M. J. Bae, H. M. Lee, "A Study on Radiation Shielding Materials for Protective Garments using

- Monte Carlo Simulation," Journal of the Korean Society for Quality Management, Vol. 43, No. 3, pp.239-252, 2015.
- [3] K. T. Kim, S. S. Kang, S. C. Noh, B. J. Jung, J. K. Park, "The Study on Design of Customized Radiation Protective Layer for Medical Radiation Dose Reduction," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 8, No. 6, pp. 333-338, 2014.
- [4] H. W. Park, "3D Printing Technology Status and Applications," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 54, No. 4, pp. 32-35, 2014.
- [5] D. S. Koo, The Developmant of Wrist Brace used 3D Printer and 3D Scanner, Department of Clothing & Textiles, The Graduate School Pusan National University, Master thesis, 2016.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- [7] S. Mattsson, M. Soderberg, "Dose Quantities and Units for Radiation Protection," In Radiation Protection in Nuclear Medicine, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 7-18, 2013.
- [8] J. Valentin, "Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q), and Radiation Weighting Factor (wR): ICRP Publication 92," Annals of the ICRP, Vol. 33, No. 4, pp. 1-121, 2003.
- [9] S. B. Choi, "Development of Application Indicators for the Fabrication of Radiotherapy Auxiliary Devices," Department of Medical imaging engineering, The Graduate School of Bio-Medical Science, Korea University, Master thesis, 2014.
- [10] W. K. Oh, "Evaluation of Usefulness and Availability for Orthopedic Surgery using Clavicle Fracture Model Manufactured by Desktop 3D Printer," Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 37, No. 3, pp. 203-209, 2014.
- [11] S. M. Jung, J. H. Yang, S. H. Lee, J. U. Kim, D. S. Yeom, "A Study on Developing Customized Bolus using 3D Printers," Korean Society for Radiation Therapy, Vol. 27. No. 1. pp. 61-71, 2015.
- [12] M. S. Kim, "Development of 3D Printing Patient-specific Phantoms for Dose Verification of Stereotactic Body Radiation Therapy Planning in Patients with Spinal Metastasis," The Graduate School of Bio-Medical Science, Korea University, Master thesis, 2016.
- [13] H. G. Kim, J. H. Yoon, S. D. Choi, "Study on 3D Printer Production of Auxiliary Device for Upper Limb for Medical Imaging Test," Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 38. No. 4. pp. 389-394, 2015.
- [14] K. Y. Jeon, J. D. Lee, S. C. Kang, "3D Printing Industry Status and Market Trend," Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, PD Issue Report, Vol. 16, No. 6, 2016.
- [15] J. Ceh, T. Youd, Z. Mastrovich, C. Peterson, S. Khan, T. A. Sasser, I. M. Sander, J. Doney, C. Turner, W. M. Leevy, "Bismuth Infusion of ABS Enables Additive Manufacturing of Complex Radiological Phantoms and Shielding Equipment," Sensors, Vol. 17, No. 3, pp. 459, 2016.
- [16] C. M. Shemelya, A. Rivera, A. T. Perez, C. Rocha, M. Liang, X. YU, C. Kief, D. Alexander, J. Stege-man, H. XIN, R. B. Wicker, E. Macdonald, D. A. Roberson, "Mechanical, Electromagnetic, and X-ray Shielding Characterization of a 3D Printable Tungsten-Polycarbonate Polymer Matrix Composite for Space-Based Applications," Journal of Electronic Materials, Vol. 44, No. 8, pp. 2598-2607, 2015.

3D 프린팅 기술을 이용한 원료에 대한 방사선 차폐능 평가: FDM 방식의 3D 프린팅 기술을 중심으로

이홍연, 김동현*

부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

3D 프린팅 기술은 4차산업 혁명 중 제조업의 혁신적인 기술로서 전망되고 있으며, 현재 바이오·의료 분야를 포함한 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서는 이러한 3D 프린팅 기술을 이용한 제작 원료에 대한 방사선 차폐능을 평가하고자 몬테카를로 전산모사를 통해 프린팅 원료에 대한 검증을 수행하였다. 현재 범용으로 사용되는 FDM 방식의 3D 프린터에서 이용 가능한 원료들을 대상으로 하였으며, ICRU phantom과 차폐체를 모의 모사한 후 방사선의 종류 및 에너지에 따른 입자 플루언스 평가를 통해 차폐 효과에 대해 분석하였다. 그 결과, 광자선의 경우 에너지 증가에 따라 차폐 효과는 점차 감소되는 경향을 보였고, 원료별 차폐 효과는 TPU, PLA, PVA, Nylon, ABS 순서로 점차적으로 낮아지는 결과를 나타냈다. 중성자선의 경우, 5~10 mm의 낮은 두께에서 반대로 선속이 증가되는 현상을 보였으나, 일정 두께 이상에서는 유효한 차폐 효과를 나타내었으며, 프린팅 원료별 차폐 효과는 Nylon, PVA, ABS, PLA, TPU 순서로 점차 낮아지는 결과를 보였다.

중심단어: 3D Printing 기술, 모의실험, 방사선 차폐

연구자 정보 이력

| | 성명 | 소속 | 직위 |
|--------|-----|-----------------------|------|
| (제1저자) | 이홍연 | 부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과 | 대학원생 |
| (교신) | 김동현 | 부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과 | 교수 |