

# Preliminary Test of 3D Printed Plastic Scintillators for Proton Beam

Sung-Hwan Kim\*

Department of Radiological Science, Cheongju University

Received: October 25, 2022. Revised: November 29, 2022. Accepted: November 30, 2022.

## ABSTRACT

In this study, a scintillation resin for 3D printing was fabricated with 1.0 wt% of PPO organic scintillator, 5.0 wt% of MMA, and commercial acrylic resin. Using the scintillation resin, 3D-shaped plastic scintillator radiation sensors were successfully fabricated quickly and inexpensively with a commercial 3D DLP printer. The 3D printed plastic scintillator has a good dose-output linearity of R-square 0.998 was obtained in the range of 1 to 10 nA of beam current of the 45 MeV proton beam. The developed 3D plastic scintillator has low light output, so there is a limit to its use in low-dose-rate gamma-ray or X-ray dosimetry. However, it was confirmed that the tissue equivalent material could be usefully used for measuring high energy or high dose rates radiation, such as proton beams and ultra-high dose rate beams.

Keywords: Dosimetry, Plastic Scintillator, Proton, 3D Printer, Tissue Equivalent

## I. INTRODUCTION

3D 프린팅은 물체의 단면을 한 층씩 쌓아가면서 3차원 물체를 출력하는 것으로서 1892년 J.E. Blather가 3D 지도 제작방식을 특허 출원한 것이 그 시작이라고 알려져 있다<sup>[1]</sup>. 1981년 나고야시 공업연구소에서 H. Kodama가 처음으로 3D 프린터 시제품을 출시한 이후 많은 기술적 진보가 있었다. 2013년 오바마 대통령이 3D 프린터의 잠재력에 대하여 언급하였고, 이즈음 주요 특허 기간이 만료됨에 따라 산업 전 분야로 확대되면서 현재 4차 산업혁명의 핵심 아이콘이 되었다. 3D 프린터는 바이오<sup>[2]</sup>, 의료<sup>[3]</sup>, 산업<sup>[4]</sup>, 교육<sup>[5]</sup>, 우주<sup>[6]</sup> 등 사회 전 분야에 폭넓게 활용되고 있다. 3D 프린팅 기법으로 FDM (fused deposition modeling), SLA (stereolithography), DLP (digital light processing), SLS (selective laser sintering) EBM (electron beam melting) 등이 있으며<sup>[7]</sup>, 소재 또한 플라스틱, 금속, 세라믹, 종이, 바이오, 식품 등 매우 다양한 소재가 사용되고 있다<sup>[8]</sup>. 한편, 3D 프린터를 활용하여 방사선 계측기로 사용하기

위한 연구 또한 수행되고 있으며<sup>[9,10]</sup>, 주로 플라스틱 섬광체 소재로 비닐톨루엔 레진들이 이용되고 있다. 이 레진들은 상용 3차원 프린터 아크릴 계열의 레진에 비하여 방사선 센서로서 광출력이 큰 장점은 있지만, 광중합 특성이 좋지 않아서 전용 프린터를 같이 개발한 경우도 있다<sup>[11]</sup>.

본 연구에서는 상용 레진을 이용하여 상용 3D 프린팅에 적용할 수 있는 섬광체 레진을 개발하였다. 개발된 섬광체 레진을 사용하여 3D 프린터로 플라스틱 섬광체를 출력한 후 고에너지 양성자 빔에 대한 활용 가능성을 조사하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

3D 프린팅 플라스틱 섬광체는 경제성과 제작의 용이성을 고려하여 기존 상용으로 사용되고 있는 DLP 방식의 3D 프린터와 상용 레진을 활용하였다. DLP 3D 프린터는 자외선을 이용한 광중합반응을 이용한 프린터로 섬광에 대하여 투명한 3D 구조를 만들기 쉽고, 광중합이 레진 안에서 이루어지므로 대기 중 산소에 의한 영향이 없으며, 충전율을 100%로

\* Corresponding Author: Sung-Hwan Kim E-mail: kimsh@cju.ac.kr Address: 298, Daesungro Cheongju, Choongcheongbukdo

출력이 가능한 장점이 있어서 본 연구에서는 DLP 프린터 (Anycubic Photon M3 Max, Anycubic Co.) 를 사용하여 플라스틱 섬광체를 출력하였다. 이 프린터는 84개의 평면 LED (light emitting diode) 광원을 이용하여 최대 13.6인치 크기에 분해능이  $6,480 \times 3,600$  픽셀을 가진다. 레진은 상용 투명 아크릴 레진 (Acryl resin pro, Anycubic Co.) 를 사용하였으며, 이 레진의 밀도는  $1.1 \text{ g/cm}^3$ , 점도는  $70 \text{ mPa}\cdot\text{s}$  그리고 경도 79 (shore D) 이었다. 아크릴 레진에 유기섬광체로 PPO (2,5-Diphenyloxazole,  $\text{C}_{15}\text{H}_{11}\text{NO}$ , 99.9%, Sigma-Aldrich Co.) 1.0 wt%와 PPO를 아크릴 레진에 균일하게 혼합하기 위하여 5.0 wt% MMA (Methyl methacrylate,  $\text{CH}_2\text{C}(\text{CH}_3)(\text{CO}_2\text{CH}_3)$ , 99%+, Sigma-Aldrich Co.)을 추가하여 섬광체 아크릴 레진을 제작하였다. PPO는 대표적인 유기섬광체로 플라스틱 섬광체에 흔히 사용되는 물질이며, 섬광체의 발광 파장 범위는  $330 \sim 440 \text{ nm}$  이다<sup>[12]</sup>. 3D 프린팅 시 출력 파라미터로 슬라이스 두께는  $50 \mu\text{m}$ , 조사시간은 3초, 오프타임 시간은 2초로 설정하였다. 프린팅된 슬라이스 간에 단차를 없애기 위하여 안티-얼라이징 기능을 활성화하였으며, 최종 출력된 플라스틱 섬광체는 순도 99% 알콜로 세정하여 섬광체 센서를 제작하였다.

3D 프린팅을 위한 플라스틱 섬광체 모델링은 Autodesk사의 123D Design (ver. 2.2.14)을 이용하여 설계하여 PLT 파일을 작성하였다. 제작된 PLT 파일은 Anycube Photon Workshop (ver 2.1.30 RC17)로 3D 프린터에서 출력할 수 있도록 3D 프린팅용 슬라이스 파일을 제작하였다. Fig. 1은 3D 플라스틱 섬광체 센서의 제작 순서도이다.

Fig. 2는 제작된 3D 플라스틱 섬광체의 특성을 평가하기 위해 구성한 데이터 측정시스템의 블록도이다. 출력된 플라스틱 섬광체는 직경 5 mm 인 광케이블 (Edmond Optics. Co.) 의 끝에 부착한 후 검은색 테이프를 이용하여 외부 빛을 차단하였다. 이때 광출력의 감소를 줄이기 위하여 플라스틱 섬광체는 흰색 테플론 테이프로 5회 감쌌다. 플라스틱 섬광체가 결합된 광케이블의 반대쪽 끝은 광전자증배관 (R269, Hamamatsu Co.) 과 결합한 후 방사선 검출 신호를 데이터 획득장치 (PicoScope 3206D,

Pico Technology Co.) 로 측정하여, 그 결과를 분석하였다. 3D 프린터로 출력된 플라스틱 섬광체는 한국원자력의학원 (KIRAMS) 의 MC50 사이클로트론의 45 MeV 양성자 빔에 대하여 활용 가능성을 평가하였다.

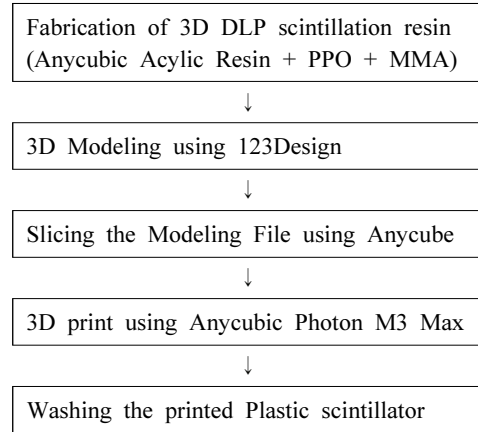


Fig. 1. Process of 3D plastics scintillators using 3D DLP printer.

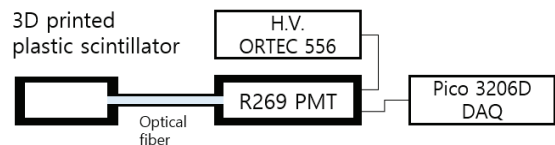


Fig. 2. Block diagram of measurement system.

### III. RESULT AND DISCUSSION

#### 1. 3D 프린팅 플라스틱 섬광체 센서 제작

Fig. 3에서는 3D 프린팅 플라스틱 섬광체의 제작 과정을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 123D Design으로 모델링한 플라스틱 섬광체의 도면으로 직경 5 mm, 길이 1 cm 의 원기둥 모양과 단면적  $5 \times 5 \text{ mm}^2$ , 길이 1 cm 의 직육면체 모양으로 각각 8개씩 설계하였다. 원기둥 모양 섬광체는 현재 방사선 치료시 선량측정에 표준으로 사용되고 있는 파머형 전리함을 기준으로 하였다. Fig. 3(b)는 설계된 PLT 파일을 DLP 프린터에 적용하기 위하여 Anycube Photon Workshop로 만든 슬라이스 단면이다. Fig. 3(c)는 Anycubic Photon M3 Max DLP 프린터로 출

력하고 있는 사진이며, Fig. 3(d)는 최종 결과물이다. 사용된 레진의 총량은 3.5 ml 이었으며, 출력에 소요된 시간은 50분 36초이었다. 3D 프린팅 된 플라스틱 섬광체의 표면은 미세한 요철구조로 빛에 대해 불투명한 특성을 보였지만 중합면을 포함한 섬광체 내부는 투명하게 출력되었기 때문에 섬광체와 광케이블 접합면에서 빛이 흡수되는 현상은 나타나지 않았다. 플라스틱 섬광체는 중합 과정에서 산소에 노출될 경우 중합분자구조에 산소분자가 포함되어 섬광체의 광출력 저하에 큰 영향을 미친다<sup>[13]</sup>. Fig. 3에서 적용한 DLP 3D 프린팅은 광중합면이 레진의 바닥에서 자외선에 의해 이루어지므로 출력과정 중에 자연스럽게 공기 중의 산소와 차단되어<sup>[14]</sup> 섬광체 중합에 장점이 있다.

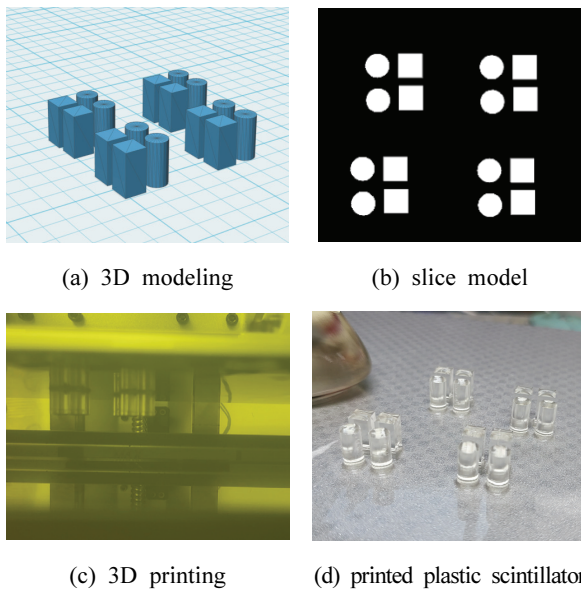


Fig. 3. Process of 3D printed plastic scintillators using a commercial DLP 3D printer.

Fig. 4는 플라스틱 섬광체를 사용하여 제작한 방사선 센서의 사진이다. Fig. 4(a)는 3D 프린팅된 플라스틱 섬광체의 사진이고, Fig. 4(b)는 플라스틱 섬광체와 직경 5 mm의 광케이블에 광학적으로 결합한 모습이다. 결합면은 광손실을 최소화하기 위하여 빛에 대하여 투명한 3D 프린팅 시 광중합되는 면으로 결정하였다. 또한 결합면에서의 광학적 손실을 최대한 줄이기 위하여 접착면에 광학그리스를 사용하여 광결합하였다. Fig. 4(c)는 방사선 검출

시 발생하는 섬광을 반사시켜 광케이블로 보내기 위하여 플라스틱 섬광체를 반사율이 높은 테플론 테이프로 5회 둘러싼 사진이며, Fig. 4(d)는 외부 빛을 완전히 차단하기 위하여 검정색 테이프로 광차폐한 방사선 센서의 최종 사진이다. 기존 플라스틱 섬광체는 육면체, 원기둥, 판형 등 모양이 정형화되어 사용되고 있는 반면, 3D 프린터를 사용함으로써 비정형 모양의 섬광체 제작이 가능하다. 플라스틱 섬광체는 조직등가물질로 방사선치료시 종양이나 인접한 정상조직 등 불규칙한 모양의 섬광체 센서를 제작하여 직접적인 용적선량 측정에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

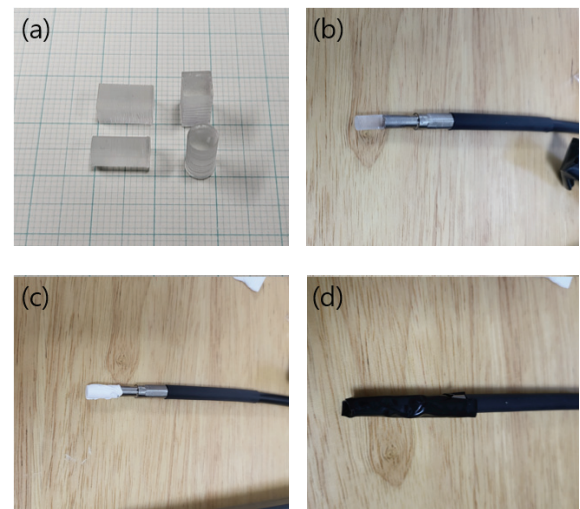


Fig. 4. Process of 3D printed plastics scintillation sensors, (a) 3D printed plastics scintillators, (b) plastics scintillator attached on the optical cable, (c) light reflect using teflon tape, and (d) light shield using black tape.

## 2. 플라스틱 섬광체의 양성자 빔에 대한 반응 특성

Fig. 5는 제작된 3D 프린팅 플라스틱 섬광체의 활용 가능성을 평가하기 위하여 한국원자력연구원 MC-50 사이클로트론의 45 MeV 양성자 빔에 대하여 특성 평가를 시행하고 있는 사진이다. 45 MeV 에너지 양성자 빔 전류를 1, 2, 5 및 10 nC로 변화하면서 제작된 방사선 센서의 출력을 측정하여 선량에 대한 출력의 선형성을 평가하였다. GEANT4 몬테카를로 시뮬레이션 결과 45 MeV 양성자 빔의 빔 전류가 1 ~ 10 nC 때 선량율은 3.8 ~ 38 Gy/s 이었다.

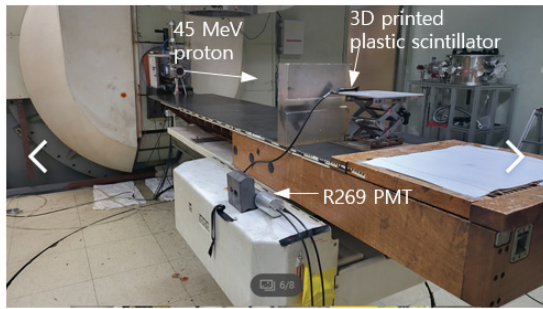


Fig. 5. Experimental setup for characterization of the 3D printed plastic scintillator in KIRAMS.

Fig. 6은 45 MeV 양성자 빔의 빔 전류를 (a) 1 nC, (b) 2 nC, (c) 5 nC 및 (d) 10 nC 으로 변화하면서 측정한 결과이다. 광전자증배관에 (-) 고전압을 인가하였기 때문에 측정 신호가 Fig. 6에서 보는 바와 같이 (-)값으로 측정되었다.

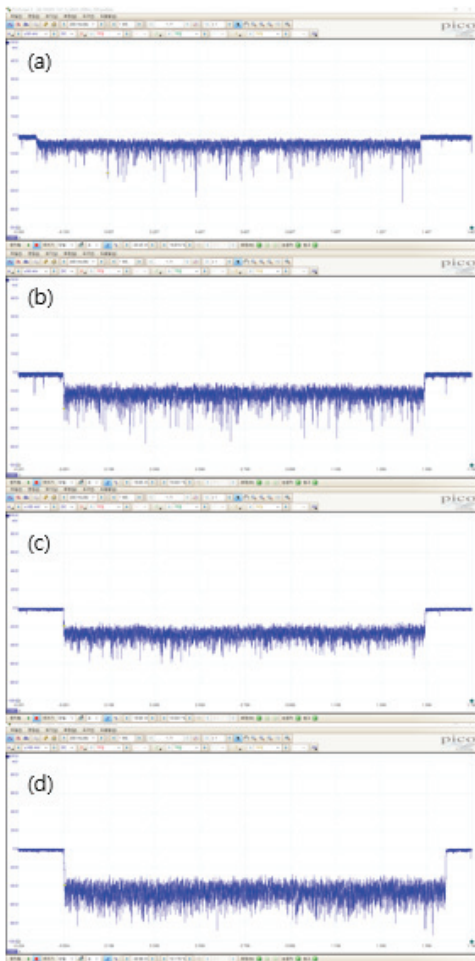


Fig. 6. Measured data for 45 MeV proton beams (a) 1 nC, (b) 2 nC, (c) 5 nC and (d) 10 nC in KIRAMS using 3D printed plastic scintillators.

양성자 빔을 각각 2초씩 조사하였으며, 빔이 조사되는 동안 측정값의 평균값으로 Fig. 7과 같이 빔 전류 측정값의 선형성을 평가하였다. 실험 범위 내에서 R제곱값이 0.993으로 우수한 직선성을 보였다. 상용 플라스틱 섬광체에 비하여 그림 6에서 보는 바와 같이 광출력이 적어서 저선량을 감마선이나 X선 선량 측정에 활용하기에는 제한이 있지만, 고에너지 또는 고선량을 방사선 측정은 무난히 사용할 수 있는 것으로 판단된다. 특히 최근 많은 관심을 가지고 있는 선량을 40 Gy/s 전후의 초고선량을 방사선치료 (flash radiotherapy)에도 충분히 사용할 수 있는 것으로 판단된다.

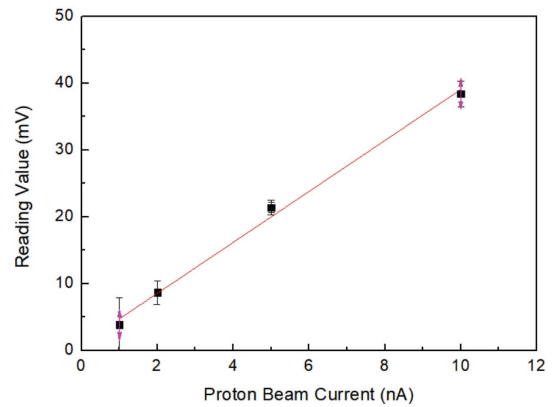


Fig. 7. Linearity of outputs of the 3D printed plastic scintillators as a function of proton beam currents

#### IV. CONCLUSION

본 논문에서는 상용 3D 프린터와 레진에 PPO 유기 섬광체를 첨가하여 간편하고 저렴하게 임의의 3D 모양의 플라스틱 섬광체 방사선 센서를 성공적으로 제작하였다. 제작된 플라스틱 섬광체 센서로 45 MeV 양성자 빔에 대하여 특성을 평가한 결과 우수한 선량 대 출력 직선성을 확인하였다. 비록 상용 섬광체에 비하여 광출력이 낮지만 고에너지 양성자나 고선량을 방사선 측정, 용적선량 측정 등에 충분한 활용가능성을 확인하였다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2021학년도 청주대학교가 지원하는 해외파견(연구년)으로 연구되었음.

## Reference

- [1] J. E. Blanthier, "Manufacture of contour relief maps", US patients, US473901A, 1892.
- [2] D. Taniguchi, K. Matsumoto, R. Machino, Y. Takeoka, A. Elgalad, Y. Taura, S. Oyama, T. Tetsuo, M. Moriyama, K. Takagi, M. Kunizaki, T. Tsuchiya, T. Miyazaki, G. Hatachi, N. Matsuo, K. Nakayama, T. Nagayasu, "Human lung microvascular endothelial cells as potential alternatives to human umbilical vein endothelial cells in bio-3D-printed trachea-like structures", *Tissue and Cell*, Vol. 63, pp. 101321, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tice.2019.101321>
- [3] U. L. Lee, S. H. Yun, H. Lee, H. L. Cao, S. H. Woo, Y. H. Jeong, T. G. Jung, C. M. Kim, P. H. Choung, "Osseointegration of 3D-printed titanium implants with surface and structure modifications", *Dental Materials*, Vol. 38, No. 10, pp. 1648-1660, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2022.08.003>
- [4] J. Persad, S. Roche, "Multi-material 3D printed electronic assemblies: A review", *Results in Engineering*, Vol. 16, pp. 100730, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100730>
- [5] W. W. Chien, M. J. da Cruz, H. W. Francis, "Validation of a 3D-printed human temporal bone model for otology surgical skill training", *World Journal of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery*, Vol. 7, No. 2, pp. 88-93, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wjorl.2020.12.004>
- [6] W. J. O'Hara, V. M. Kish, M. J. Werkheiser, "Turn-key use of an onboard 3D printer for international space station operations", *Additive Manufacturing*, Vol. 24, pp. 560-565, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.029>
- [7] K. R. Ryan, M. P. Down, C. E. Banks, "Overview of 4D and 3D printed smart and advanced materials and their applications." *Chemical Engineering Journal*. Vol. 403, pp. 126162, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126162>
- [8] <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/3d-printing-materials-market-1295.html>
- [9] Ł. Kapłon, D. Kulig, S. Beddar, T. Fiutowski, W. Górska, J. Hajduga, P. Jurgielewicz, D. Kabat, K. Kalecińska, M. Kopeć, S. Koperny, B. Mindur, J. Moroń, G. Moskal, S. Niedźwiecki, M. Silarski, F. Sobczuk, T. Szumlak, A. Rucińskiah, "Investigation of the light output of 3D-printed plastic scintillators for dosimetry applications", *Radiation Measurements*. Vol. 158, pp. 106864, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2022.106864>
- [10] G. Zhang, D. Carloni, Y. Wu, "3D printing of transparent YAG ceramics using copolymer-assisted slurry", *Ceramics International*, Vol. 46, No. 10, pp. 17130-17134, 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.247>
- [11] S. M. Lee, J. B. Son, D. G. Kim, J. B. Choi, Y. K. Kim, "Characterization of plastic scintillator fabricated by UV LED curing machine", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 929, No. 11, pp. 23-28, 2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2019.03.048>
- [12] Y. Zhang, Z. Y. Yu, X. Y. Li, Z. Y. Deng, L. J. Wen, "A complete optical model for liquid-scintillator detectors", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 967, No. 1. 163860. 2020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2020.163860>
- [13] D. Horstmann, U. Holm, "Fluorescence quenching of plastic scintillators in oxygen," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 41, No. 1-2, pp. 395-400, 1993. [http://dx.doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90077-8](http://dx.doi.org/10.1016/0969-806X(93)90077-8)
- [14] Y. Wang, X. Li, Y. Chen, C. Zhang, "Strain rate dependent mechanical properties of 3D printed polymer materials using the DLP technique", *Additive Manufacturing*, Vol. 47, pp. 102368, 2021. <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102368>

## 3D 프린팅 플라스틱 섬광체의 양성자 빔에 대한 적용

김성환

청주대학교 방사선학과

### 요 약

본 연구에서 상용 아크릴 기반 레진에 PPO 유기섬광체 및 MMA를 각각 1 wt% 및 5 wt% 첨가하여 3D 프린팅이 가능한 섬광체 레진을 제작하였다. 개발된 섬광체 레진을 사용하여 상용 3D DLP로 간편하면서도 저렴하게 3D 모양의 플라스틱 섬광체 방사선 센서를 성공적으로 제작할 수 있었다. 제작된 센서는 45 MeV 양성자 빔의 빔 전류 1 ~ 10 nA 범위에서 R제곱값이 0.998로 우수한 선량 대 출력 직선성을 보였다. 개발된 3D 플라스틱 섬광체는 광출력이 낮아서 저선량을 감마선이나 X선 선량 측정에 활용하기에는 제한이 있지만, 조직등가물질로서 인체흡수선량을 직접 측정할 수 있기 때문에 양성자 빔, 초고선량을 빔 등 고에너지 또는 고선량을 방사선 선량 측정에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.

중심단어: 선량평가, 플라스틱 섬광체, 양성자, 3차원 프린터, 조직등가

### 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김성환	청주대학교 방사선학과	교수