

# The Study on Filling Factor of Radiation Shielding Lead-free Sheet Via Screen Printing Method

Sang-Sik Kang,<sup>1</sup> Ah-Rim Jeong,<sup>2</sup> Su-Min Lee,<sup>2</sup> Seung-Woo Yang,<sup>2</sup> Kyo-Tae Kim,<sup>3</sup> Ye-Ji Heo,<sup>4</sup> Ji-Koon Park<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radiation Fusion Technology, International University of Korea

<sup>2</sup>Department of Radiological Science, International University of Korea

<sup>3</sup>Software Education Institute, Inje University

<sup>4</sup>Department of Medical Imaging Research Institute, Inje University

Received: October 15, 2018. Revised: November 23, 2018. Accepted: November 30, 2018

## ABSTRACT

In many previous studies, monte carlo simulation is used to produce lead-free shielding sheet, and the possibility of radiation shielding capability and weight reduction is presented. But it is difficult to simulation for binder and micro-pores because of In fact it does not provide sufficient information necessary for the commercialization process. Therefore, in this paper, the results of radiation shielding capability corresponding to filling factor was presented by using the screen printing method to provide information on gel-paste required for the commercialization process. In this study, the geometric setup for evaluate of radiation shielding ability was designed to comply with IEC 61331-1:2014 and KS A 4025. In addition, radiation irradiation conditions were 100 kVp filtered with 2.0 mmAl total filtration was applied according to KS A 4021 standard. In this study, Pb 1270  $\mu\text{m}$ , BaSO<sub>4</sub> 3035  $\mu\text{m}$ , Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1849  $\mu\text{m}$  and WO<sub>3</sub> 2631  $\mu\text{m}$  were analyzed based on ten value layer. Additionally, the filling factor was analyzed as BaSO<sub>4</sub> 38.6%, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 27.1%, WO<sub>3</sub> 30.15%. However, in the case of applying low-temperature high-pressure molding in the future, it is expected that the radiation shielding capability can be sufficiently improved by reducing the porosity while increasing the filling factor.

Keywords: Lead-free shielding sheet, binder, radiation shielding capability, filling factor

## I. INTRODUCTION

최근 환자의 해부학적 구조와 질병에 대한 정보를 조기에 확보하기 위해 방사선 이용이 증가하면서 불필요한 산란 방사선의 차폐를 위한 방호 용구의 중요성이 대두되고 있다. 이를 위해 이용되는 의료용 방호 용구는 IEC (International Electrotechnical Commission)에서 국제적인 표준 규격으로서 제시하고 있다.<sup>[1,2]</sup> 현 임상에서 방사선을 차폐하기 위하여 광범위하게 이용되고 있는 방사선 차폐 소재는 납이다. 하지만, 납은 중금속으로 분류되어 관리되는 소재로써 다양한 위험성과 유해성이 알려져 있다.

이에 다양한 선도 그룹에서는 납과 유사한 차폐 능력과 경량화를 목표로 인체에 무해한 무연 (Lead-free) 차폐재 연구에 많은 시간과 재원을 투자하고 있다.<sup>[3-5]</sup>

이러한 무연 차폐재를 제작하기 위해 이용되는 공법은 분말 형태의 방사선 차폐 소재와 가공성 개선을 위한 액상 바인더를 교반함으로써 겔 페이스트를 제조 후 가압·가열을 통해 시트 형태로 제작하는 압축 성형 공법이 광범위하게 활용되고 있다.<sup>[6]</sup> 이 때, 액상 바인더는 고분자 폴리머로서 그 종류가 다양하지만 일반적으로 방사선 차폐 소재에 비해 낮은 원자번호와 밀도를 가진다. 이는 공

\* Corresponding Author: Ji Koon Park

E-mail: radiopjk@iuk.ac.kr

Tel: +82-55-751-8301

극적으로 광전흡수의 발생 효율이 낮아지므로 방사선 차폐 능력에 악영향을 미친다. 그러므로 상층 관계에 있는 방사선 차폐 능력과 가공성을 동시에 개선하기 위한 겔 페이스트의 최적화 연구는 매우 중요하다. 하지만, 압축 성형 공법을 통한 겔 페이스트 최적화 연구는 많은 시간과 재원의 손실이 수반된다. 이에 기존 선행 연구에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 이론적인 연구를 바탕으로 방사선 차폐 능력과 경량화에 대한 가능성을 제시하고 있으나 바인더 및 미세 기공에 대한 구현이 어렵기에 제품화 공정에 필요한 정보를 충분히 제공하지 못하는 실정이다. 이에 본 연구에서는 제품화 전, 겔 페이스트의 최적화를 위한 기초 연구로서 스크린 프린팅 공법을 이용하여 무연 차폐재를 제작하였고 방사선 차폐 능력을 평가하였다. 또한, 객관적인 분석을 위해 납이 포함된 에이프런 제품과 비교/분석하였다.

## II. EXPERIMENTAL AND METHODS

본 연구에서는 무연 차폐재를 제작하기 위하여 두께 및 크기 그리고 형태의 제어가 용이한 스크린 프린팅 공법을 이용하였다.<sup>[7]</sup> 이 때, 방사선 차폐 소재는 BaSO<sub>4</sub> (1 ~ 4 μm, Alfa Aesar Inc., USA), Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (10 μm, Sigma-Aldrich Inc., USA), WO<sub>3</sub> (<20 μm, Sigma-Aldrich Inc., USA)를 이용하였다.

### 1. Fabrication of lead-free shielding sheet

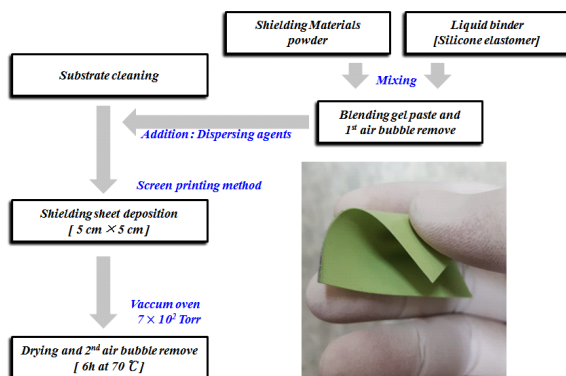


Fig. 1. Fabrication process of lead-free shielding sheet via screen printing method.

본 연구에서는 무연 차폐재를 스크린 프린팅 공법으로 제작하기 위해 분말 상태의 방사선 차폐 소

재를 실리콘 기반 액상 바인더에 교반하여 겔 페이스트를 제조하였다. 이 때, 방사선 차폐 소재와 실리콘 바인더는 3:1의 중량비로서 혼합하였으며, 균일도를 개선하기 위한 소련 공정을 위해 톨밀 공정을 수행하였다. 또한, 겔 페이스트의 교반 시 포함된 공기를 제거하기 위해  $7 \times 10^2$  Torr 환경에서 기포 제거 공정을 수행하였다. 제작된 겔 페이스트를 원단의 기본 형태인 시트 형태로 제조하기 위하여 세척된 이형필름 상단에 스크린 프린팅 공법을 통해 면적  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 로 도포하였다. 이후  $7 \times 10^2$  Torr 환경에서 70 °C 6시간 동안 오븐에서 건조하였다. Fig. 1은 스크린 프린팅 공법을 통한 무연 차폐 시트의 제조 공정을 나타내었다.

### 2. Evaluation of radiation shielding capability

본 연구에서는 방사선 차폐 능력을 평가하기 위하여 방사선 검출기 (XR-sensor, IBA Co., Germany)를 이용하였으며, 실험 환경은 IEC 61331-1:2014와 KS A 4025에 부합하도록 설계하였다.

#### 2.1 Geometrical set up

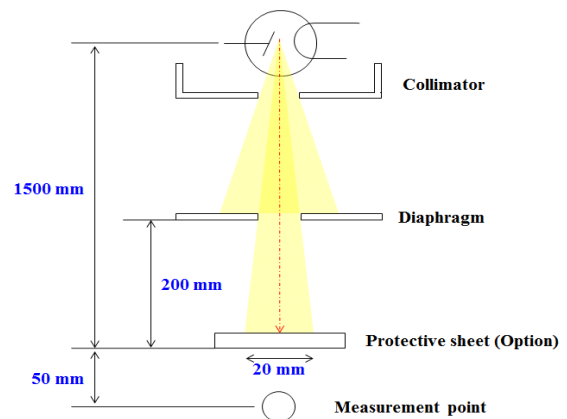


Fig. 2. Schematic diagram of geometrical setup for evaluation of radiation shielding capability.

본 연구에서는 방사선 차폐 능력을 평가하기 위하여 방사선 발생장치 (E7252X, Toshiba Co., Japan)에서 1500 mm 하단에 무연 차폐재 (Protective sheet)를 위치하였다. 또한, 입사되는 방사선에 의해 발생하는 산란선을 제거하기 위하여 조리개 (diaphragm)를 무연 차폐재 상단 200 mm에 설치하였으며, 방사선량을 측정하기 위한 방사선 검출기

(Measurement point)는 무연 차폐재 하단 50 mm에 설치하였다. 마지막으로 방사선에 대한 표준 선질에 대한 구현을 위하여 KS A 4021 규격을 준용하여 X선 콜리메이터 하단에 알루미늄 재질의 부가 필터 (Aluminum HVL attenuator set, Purity : 99.5%, Germany) 1.5 mmAl을 설치하였다. 이 때, KS A 4021에 따르면 50 kVp는 총 여과 1.5 mmAl, 70 kVp 이상에서 총 여과 2.0 mmAl로 규정하고 있다. Fig. 2는 방사선 차폐 능력을 평가하기 위한 실험 모식도를 나타내었다.

본 연구에서는 방사선의 조사 면적을  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  설정하였다. 또한, X선 선질을 결정하는 1차적 요소인 관전압은 100 kVp, 선량은 X선 튜브의 부하를 최소화하기 위하여 100 mA, 0.05 sec로 설정하였다.

## 2.2 Experimental methods

본 연구에서는 무연 차폐재에 대한 방사선 차폐 능력을 평가하기 위해 방사선 검출기에서 측정된 흡수선량을 바탕으로 방사선 차폐 효율을 분석하였다. 이 때, 방사선 차폐 효율은 다음의 수식으로 도출하였다.

$$\eta = ((D_{\text{without}} - D_{\text{with}}) / D_{\text{without}}) \times 100 \quad (1)$$

$\eta$ 는 방사선 차폐 효율을 의미하고,  $D_{\text{without}}$ 은 무연 차폐재가 없을 때 측정된 흡수선량을 의미하며,  $D_{\text{with}}$ 은 무연 차폐재가 있을 때 측정된 흡수선량을 의미한다. 이 때,  $D_{\text{without}}$ 은 초기 방사선량,  $D_{\text{with}}$ 은 투과된 방사선량으로 해석할 수 있다. 즉, ' $D_{\text{without}} - D_{\text{with}}$ '는 초기 방사선량에서 투과된 방사선량을 제외한 것이므로 무연 차폐재에서 흡수된 방사선량으로서 해석하였다. 또한, 본 연구에서는 측정된 흡수선량에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 25회 반복 측정을 수행하였으며, 이에 대한 평균값을 활용함으로써 방사선 차폐 효율을 도출하였다. 또한, 객관적인 비교/분석을 수행하기 위하여 납이 포함된 에이프런 상용화 제품을 활용하였다. 이후, 두께에 대하여 산출된 방사선 차폐 효율을 정량적으로 분석하기 위해 Octave S/W (Octave Ver. 4.0.2, Free Software Foundation Inc., USA)에서 제공하는 보간

법을 적용하여 단위 두께 당 방사선 흡수 효율의 변화에 대한 보간을 수행하였다. 이 때, 방사선 차폐 능력에 대한 평가 지표로서 십가층 (Ten value layer, 이하 TVL)을 활용하였다. TVL은 차폐재를 투과한 방사선량이 초기 방사선량에 1/10로 저감되는 차폐재 두께로서 90%의 방사선 차폐 능력을 의미한다.

## III. RESULT

### 1. Fabrication of lead-free shielding sheet

본 연구에서는 방사선 차폐 능력을 평가하기 위하여 면적  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ , 두께 200  $\mu\text{m}$ 의 사각형 시편을 제작하였다. 이 때, 납이 포함된 상용화된 Apron의 시편은 약 400  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. Fig. 3은 스크린 프린팅 공법을 이용하여 제작된 시편을 나타내었다.

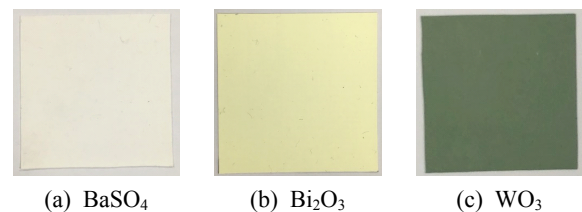


Fig. 3. Fabricated specimen for evaluation of radiation shielding capability.

### 2. Evaluation of radiation shielding capability

본 연구에서는 방사선 차폐 능력을 평가하기 위해 차폐재 시편을 3000  $\mu\text{m}$  이상 제어하여 흡수선량을 실제 측정하였으며, Octave S/W에서 제공하는 보간법을 통해 100  $\mu\text{m}$  단위로 방사선 차폐 효율을 분석하였다. 이 때, 방사선 조사 조건은 1.5 mmAl에 의해 필터링된 100 kVp의 X선 선질을 이용하였고, 선량은 100 mA, 0.05 sec로 설정하였다. Fig. 4는 차폐재 두께에 따른 방사선 투과율을 나타내었다.

측정된 흡수선량을 바탕으로 방사선 투과율을 산출한 결과, 상용화된 Apron이 가장 높은 방사선 차폐 능력이 나타났고 제작된 시편은  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{WO}_3$ ,  $\text{BaSO}_4$  순으로 나타났다. 또한, TVL를 기준으로 분석한 결과, Pb 1270  $\mu\text{m}$ ,  $\text{BaSO}_4$  3035  $\mu\text{m}$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  1849  $\mu\text{m}$ ,  $\text{WO}_3$  2631  $\mu\text{m}$ 에서 근사한 값으로 분석되

었다. 또한, TVL 두께의 시편에 대한 질량을 측정 한 결과, Pb 11.818 g, BaSO<sub>4</sub> 17.567 g, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14.838 g, WO<sub>3</sub> 18.934 g으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 밀도를 산출하면 Pb 3.72 g/cm<sup>3</sup>, BaSO<sub>4</sub> 2.32 g/cm<sup>3</sup>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3.21 g/cm<sup>3</sup>, WO<sub>3</sub> 2.87 g/cm<sup>3</sup>으로 분석 되었다.

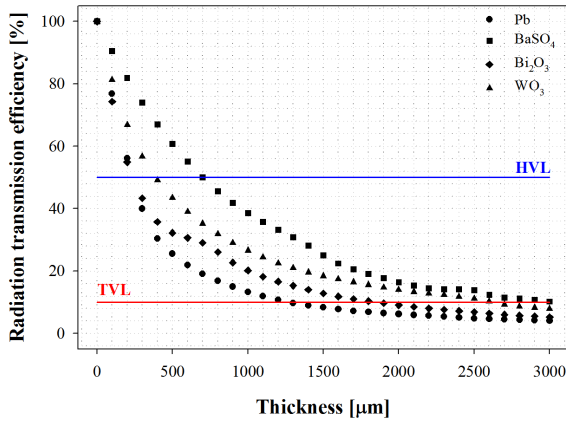


Fig. 4. Radiation transmission efficiency as a function of thickness.

#### IV. DISCUSSION

본 연구에서는 제품화 공정 전, 젤 페이스트의 최적화를 위한 기초 연구로서 스크린 프린팅 공법을 이용하여 무연 차폐재를 제작하고 방사선 차폐 능력을 평가하였다. 그 결과, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, WO<sub>3</sub>, BaSO<sub>4</sub> 순으로 방사선 차폐 능력이 우수하였으며 무연 차폐재의 밀도가 높은 추세와 동일하게 분석되었다. 또한, 방사선 차폐 소재의 밀도와 더불어 액상 실리콘 바인더의 밀도를 고려하면 제품화 공정에 필요한 방사선 차폐 소재의 부피비를 이론적으로 산출할 수 있다. 이에 본 연구에서는 충전율에 대한 분석을 위해 다음과 같이 가정하였다.

- (i) 방사선 차폐 소재의 입자 형태는 구형이며 동일한 입자 크기로서 균일한 분포를 가진다.
- (ii) 무연차폐재를 구성하는 중량비는 제작 시 이용된 중량비가 일정하게 유지된다.

이러한 가정들은 이론적으로 다양한 변수를 고려해야하는 충전율의 계산을 모델링하기 위해 제안되었다. (i)은 소련 공정에 의해 방사선 차폐 소재가 분쇄됨에 따라 다양한 입자 크기와 형태를 가지게 된다. 이는 방사선 차폐 소재에 대한 부피 산

출을 어렵게 만드는 요인이므로 이를 배제하기 위하여 제안되었다. 또한, (ii)은 건조 공정에서 액상 형태의 실리콘 바인더에 포함된 수분과 다양한 구성 성분이 아웃개싱 됨에 따라 무연 차폐재의 중량비가 변할 가능성이 있다. 이는 바인더에 대한 부피 산출을 어렵게 하므로 이를 배제하기 위해 제안되었다. Table 1은 방사선 차폐 소재의 충전율에 대한 산출을 위한 물리적 특성을 나타내고 있다. 이 때, 바인더의 밀도는 1.056 g/cm<sup>3</sup>이다.

Table 1. Calculated of physical properties

Note	BaSO <sub>4</sub>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WO <sub>3</sub>
particle density (g/cm <sup>3</sup> )	4.5	8.9	7.16
particle size (μm)	4	10	20
specimen volume (cm <sup>3</sup> )	7.59	4.63	6.58
particle volume (cm <sup>3</sup> )	2.93	1.25	1.98
binder volume (cm <sup>3</sup> )	4.66	3.38	4.6

충전율은 차폐재 내부에서 방사선 차폐 소재가 전체 부피에서 차지하는 비율로서 정의되므로 BaSO<sub>4</sub> 38.6%, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 27.1%, WO<sub>3</sub> 30.15%로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 젤 페이스트의 제작 시 바인더 및 미세 기공에 대한 부피비가 60 ~ 73%를 차지한다는 것을 확인하였다. 이 때, 미세 기공은 무연 차폐재에서 X선의 직접적인 누설에 관여하는 요소로서 궁극적으로 투과율을 높이는 인자로 알려져 있다.<sup>[8]</sup> 그러므로 젤 페이스트 제조 시 방사선 차폐 소재에 대한 배합 비율을 높일 수 있는 방안과 더불어 미세 기공을 낮출 수 있는 방안에 대한 다각적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

#### V. CONCLUSION

본 연구에서는 제품화 공정에 요구되는 젤 페이스트에 대한 정보를 제공하기 위해 스크린 프린팅 공법을 활용하여 충전율에 따른 방사선 차폐 능력에 대한 결과를 제시하였다. 이에 본 연구 결과는 제품화 공정 시 금형 온도와 냉각 시간을 제시하였으며 젤 페이스트 제조 시 방사선 차폐 소재에 대한 배합 한계를 성공적으로 제시하였다. 또한, 충전율에 따른 방사선 차폐 능력을 제시하였지만, 이는

차후 저온고압 성형을 적용한다면 충전율의 증가를 통한 방사선 차폐 능력의 개선이 충분히 가능할 것으로 기대된다. 하지만 무연 차폐재에서 X선의 직접적인 누설에 관여하는 미세 기공에 대한 부피를 정량적 지표인 기공률로서 분석하지 못하였다. 그러므로 차후 연구에서는 이에 대한 다각적인 방안이 검토되어야 할 것으로 사료된다.

### Acknowledgement

본 연구는 한국국제대학교 연구기금(2018)과 한국연구재단 중견연구자지원 사업(No. 2017R1A2B4009249)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### Reference

- [1] International Electronical Committee, "Protective devices against diagnostic medical X-radiation Part 1: Determination of attenuation properties of materials," IEC Report 61331-1, 2014.
- [2] International Electronical Committee, "Protective devices against diagnostic medical X-radiation Part 3: Protective clothing, eyewear and protective patient shields," IEC Report 61331-3, 2014.
- [3] S. C. Kim, K. T. Kim, J. K. Park, "Barkum compounds through Monte Carlo simulation compare the performance of medical radiation shielding analysis," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 7, No. 6, pp. 403 - 408, 2013.
- [4] S. S. Kang, K. T. Kim, 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.
- [5] J. K. Park, I. H. Choi, H. H. Park, S. W. Yang, K. T. Kim, S. S. Kang, "Design of Double Layer Shielding Structure using Eco-friendly Shielding Materials," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 10, No. 8, pp. 559-563, 2016.
- [6] S. C. Kim, M. W. Park, "Development of radiation shielding sheet with environmentally-friendly materials; II Evaluation of barum, tourmaline, silicon polymers in the radiation shielding sheet," Journal of radiological science and technology, Vol. 34, No. 2,

pp. 141-147, 2011.

- [7] D. K. Kim, K. T. Kim, J. E. Park, J. Y. Hong, J. S. Kim, K. M. Oh, S. H. Nam, "Evaluation of High Absorption Photoconductor for Application to Auto Exposure Control Sensor by Screen Printing Method," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 9, No. 2, pp. 67-72, 2015.
- [8] K. S. Chon, "Monte Carlo simulation for Radiation Protection Sheets of Pb-Free," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 11, No. 4, pp. 189-195, 2016.

# 스크린 프린팅 공법을 통한 방사선 무연 차폐 시트에 관한 연구

강상식,<sup>1</sup> 정아림,<sup>2</sup> 이수민,<sup>2</sup> 양승우,<sup>2</sup> 김교태,<sup>3</sup> 허예지,<sup>4</sup> 박지균<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>한국국제대학교 방사선융합기술연구소

<sup>2</sup>한국국제대학교 방사선학과

<sup>3</sup>인제대학교 소프트웨어교육원

<sup>4</sup>인제대학교 의료영상연구소

## 요 약

많은 선행 연구에서는 무연 차폐재를 제작하기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 방사선 차폐 능력과 경량화에 대한 가능성을 제시하고 있다. 하지만, 이는 바인더 및 미세 기공에 대한 구현이 어렵기에 제품화 공정에 필요한 정보를 충분히 제공하지 못하는 실정이다. 이에 본 연구에서는 제품화 공정에 요구되는 겔 페이스트에 대한 정보를 사전에 제공하기 위하여 스크린 프린팅 공법을 활용하여 충전율에 따른 방사선 차폐 능력에 대한 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 방사선 차폐 능력을 평가하기 위해 IEC 61331-1:2014와 KS A 4025에 부합하도록 실험 환경을 설계하였으며, 방사선 조사 조건은 KS A 4021 규격을 준용하여 총 여과 2.0 mmAl로 여과된 100 kVp를 이용하였다. 본 연구 결과, TVL를 기준으로 Pb 1270  $\mu\text{m}$ , BaSO<sub>4</sub> 3035  $\mu\text{m}$ , Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1849  $\mu\text{m}$ , WO<sub>3</sub> 2631  $\mu\text{m}$ 에서 근사한 값으로 분석되었다. 또한, 충전율은 BaSO<sub>4</sub> 38.6%, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 27.1%, WO<sub>3</sub> 30.15%로 분석되었다. 하지만, 차후 저온고압 성형을 적용한다면 충전율을 높이면서도 기공률을 낮춤으로서 방사선 차폐 능력의 개선이 충분히 가능할 것으로 기대된다.

중심단어: 무연 차폐 시트, 바인더, 방사선 차폐 능력, 충전율

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	강상식	한국국제대학교 방사선융합기술연구소	교수
(공동)	정아림	한국국제대학교 방사선학과	학생
	이수민	한국국제대학교 방사선학과	학생
	양승우	한국국제대학교 방사선학과	학생
	김교태	인제대학교 소프트웨어교육원	연구원
	허예지	인제대학교 의료영상연구소	연구원
(교신)	박지균	한국국제대학교 방사선융합기술연구소	교수