

A Study on the Non-Toxic Compound-based Multi-layered Radiation Shielding Sheet and Improvement of Properties

Ye Ji Heo,¹ Seung u Yang,² Ji Koon Park^{1,*}

¹Department of Radiological Science, International University of Korea

²Department of Radiation Oncology, Collage of medicine, Inje University

Received: February 04, 2020. Revised: April 27, 2020. Accepted: April 30 2020

ABSTRACT

Most of radiation protection clothing is made of lead with excellent radiation shielding because it has excellent process ability and economic efficiency and has a high atomic number. However, lead is classified as a hazardous heavy metal, and there is a risk of lead poisoning. Recently, research to replace lead has been actively conducted. In this study, a research on a shielding sheet with improved physical properties while maintaining the radiation shielding ability equivalent to that of conventional materials by mixing two materials that are harmless to the human body, such as BaSO₄ and Bi₂O₃, and a silicone material binder Was performed. For comparison evaluation with the existing lead shielding sheet, the shielding rate was evaluated using a 40 degree shielding sheet having the highest porosity. As a result, it was analyzed that the shielding rate was superior to 9 % or more at the same thickness. In addition, as a result of studies to improve the physical properties of the shielding sheet, it was analyzed that the shielding sheet mixed with BaSO₄/nylon/Bi₂O₃ was the best.

Keywords: Radiation shielding, Barium sulfate, Bismuth(III)oxide, Multi layer

I. INTRODUCTION

1895년 W. C. Roentgen이 X-ray를 발견한 이후 의료방사선은 진단 및 치료 등의 의료영역에서 널리 사용되어왔다. 이러한 방사선은 잠재적 위험성에도 불구하고, 영상의학의 발전과 국민의 건강에 대한 관심증가로 인해 방사선 장비의 사용 빈도는 증가하고 있다.^[1] 2016년 질병관리본부에서는 2011년 대비 의료기관의 수는 19.6 %, X-선 장치의 수는 17 % 증가되었다고 발표하였으며, 흉부방사선 촬영을 기준으로 2010년 대비 2016년 34 % 건수가 증가하였음을 발표하였다. 이러한 의료분야에서의 방사선 피폭은 인공 방사선 피폭 중 약 95 %를 차지하고 있어 피폭선량 관리 및 방사선 피폭 경감에 각별한 관심이 필요한 실정이다.^[2]

방사선 방호의 원칙으로는 시간, 거리, 차폐가 있

지만 정형화된 촬영 방법과 원내 시설로는 한계가 있어 대부분의 피폭선량을 감소시키는 방안을 방사선 앞치마로 대표되는 방사선 방호복이다. 방사선 앞치마 등의 방사선 방호복은 식품의약품안전처의 고시에 맞추어 의무적으로 방사선 발생장치에 구비되어 있어야 하며, 방사선 촬영 시 항상 착용해야 하는 보조 장비이다. 이러한 방사선 방호복의 대부분은 가공성과 경제성이 매우 우수하고 높은 원자번호를 갖고 있어 방사선 차폐가 우수한 납으로 제작된다.

하지만 납은 유해 중금속으로 분류되어 납중독 등의 위험이 있으며, 착용 시 중량감 및 불편함 등이 매우 크고, 장시간 착용한 사람은 근·골격계에 이상을 초래하기도 하기 때문에 반드시 차폐복 등의 착용이 바람직한 상황에서도 착용에 어려움을 가진다. 또한, 납 자체의 중량으로 인해 형태 유지

* Corresponding Author: Ji Koon Park

E-mail: improve24@naver.com

Tel: +82- 10-9316-7931

에 어려움이 있으며 처지거나 접했을 때 실금이 발생해 미량의 누설 방사선이 유입될 수 있으므로 방사선 차폐 효율을 저하시키는 요인이 될 수 있으므로 이를 방지하고자 주기적인 손상 여부를 확인하여야 하며, 보관 시에도 차폐복의 무게를 견딜 수 있는 별도의 장치가 필요하다.^[3-5]

이러한 문제점들도 인해 최근에는 납이 아닌 다양한 물질로 무납 차폐 시트에 대한 연구가 이루어지고 있으므로 본 연구에서는 인체에 무해한 Barium sulfate ($BaSO_4$)와 Bismuth(III)oxide (Bi_2O_3) 두 가지 화합물질과 실리콘 재질의 바인더를 혼합하여 차폐 시트를 개발하고 기존과 동등한 방사선 차폐능력을 유지하면서도 물리적 특성이 개선된 차폐 시트에 대한 연구를 수행하고자 하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. 공극률 분석

차폐 시트 내의 기포는 방사선이 투과될 수 있는 공간을 생성시켜 방사선 차폐율 저감 시킬 수 있는 요인으로 작용한다. 이러한 기포는 공극률로 수치로 나타내며 온도와 상관관계가 있다. 이에 다양한 온도로 제작된 차폐 시트로 공극률을 분석하고 제작에 최적화된 온도를 설정하였으며 아래의 수식 1로부터 공극률을 산출하였다. 산출된 값은 30 °C 부터 10 °C 간격으로 온도 증가에 따른 차폐 시트를 제작한 후 각 온도에 따른 air gap rate로써 분석하였다.

$$\text{공극률(PV)} = V_{\text{air}}/V = (VD_m D_p - W_m D_p - W_p D_m) / VD_m D_p \quad (1)$$

- V : Volume of shielding sheet
- V_p : Volume of shielding material
- V_f : Volume of shielding sheet layer
- V_{air} : Air volume of the shielding sheet layer
- D_m : Density of shielding materials
- D_p : Binder density
- W_p : Binder weight
- W_m : Weight of shielding materials

2. 실리콘 방사선 차폐 시트 제조 및 공극률 분석

2.1 다층 구조 기반의 방사선 차폐 시트 제조

본 연구에서는 수 백 μm 단위로 두께 조절이 용이한 입자침전법(Particle-in Binder; PIB)방식을 사용하여 방사선 차폐 시트를 제조하였다. 차폐물질은 $BaSO_4$ (1 ~ 4 μm , Alfa Aesar Inc., USA), Bi_2O_3 (10 μm , Sigma-Aldrich Inc., USA)를 사용하였다.

실리콘 엘라스토머 기반 바인더와 경화제를 혼합한 후 차폐물질과 중량비 1 : 4로 교반하여 gel-paste 상태로 제조하였다. 이후 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 의 면적의 격벽을 형성한 glass 상에 교반된 액상을 도포한 후, 40 °C 온도에서 12시간 동안 건조하였다.

2.2 섬유층 방사선 차폐 시트 제조

내구성 증가를 위하여 단일층 방사선 차폐시트 내부에 nylon으로 이루어진 섬유층을 형성하였다.

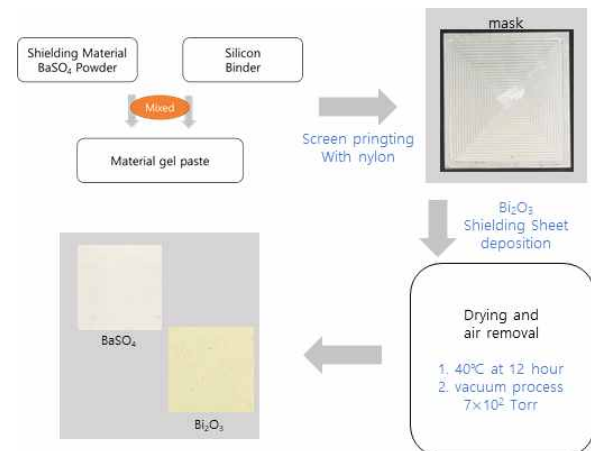


Fig. 1. Schematic of fabrication process of shielding sheet.

Fig. 1.은 섬유층이 삽입된 방사선 차폐 시트 제작 과정을 모식도로 나타내었다. $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 면적의 격벽을 형성시킨 후, 입자침전법 (Particle-in Binder; PIB)방식을 이용하여 $BaSO_4$ 물질과 nylon이 결합된 섬유층을 만들고 이후 Bi_2O_3 물질을 하단에 도포하여 다층구조의 방사선 차폐시트를 제작하였다.

3. 방사선 차폐 시트의 차폐능 평가

방사선 차폐율 실험은 [KSA4025] X 선 방호용

품류의 납당량 시험방법 규격을 준용하여 진행되었다.^[6]

본 실험에 사용된 방사선 발생 장치는 40 - 150 kVp의 X선 관전압 출력 범위를 갖는 UD150L-30E (동강의료기(주), Korea) Model과 교정이 완료된 Ion chamber (XR-sensor, IBA Co., Germany) 계측 장비를 사용하였다. 실험 과정은 Fig. 2의 모식도에서 제시한 바와 같이 방사선 발생장치에서 차폐 시트까지 거리를 150 cm로 설정하였으며, 차폐 시트 상단 20 cm에 산란선 제거를 위한 조리개를 설치하였다. 이후 검출기를 차폐 시트 하단 5 cm에 위치시키고, 조사 면적을 2 cm × 2 cm 관전압은 100 kVp, 조사선량은 10 mAs로 고정시키고 진행하였다.

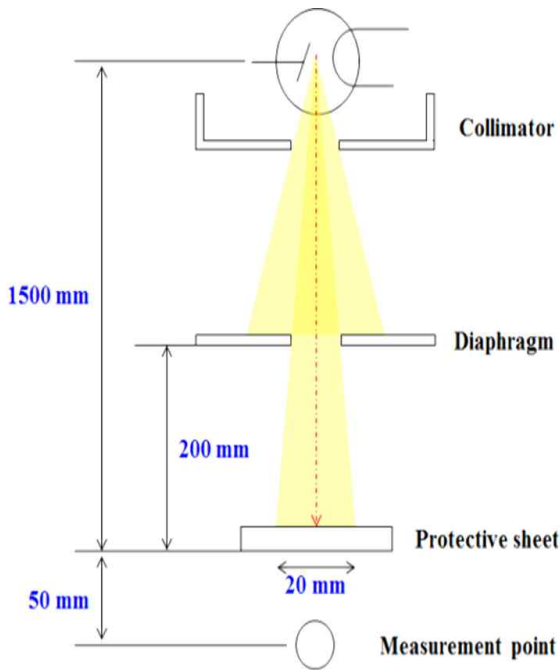


Fig. 2. Schematic diagram of geometrical experimental set-up.

방사선 차폐율은 다음의 수식으로 산출하였다.

‘Dwithout - Dwith’는 차폐 시트에서 흡수된 선량으로 초기 방사선량에 대한 차폐 시트에서 흡수된 선량의 비이며 수식 (2)를 적용하여 방사선 차폐율을 산출하였다. 측정 횟수는 각각의 선량 값에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 25회 반복 측정 후 평균 값으로 평가하였다. 차폐율에 대한 평가는 상용화된 납치마의 소재인 Lead Oxide (PbO) 시트와

비교 분석 하였다.

$$\eta = \left(\frac{D_{without} - D_{with}}{D_{without}} \right) \times 100 \quad (2)$$

η : radiation shielding ability

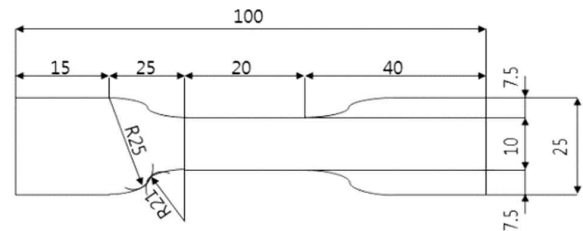
D_{with} : Radiation dose was shielding the sheet passes through the shield

$D_{without}$: Irradiated dose in the absence of shielding material, Initial radiation dose

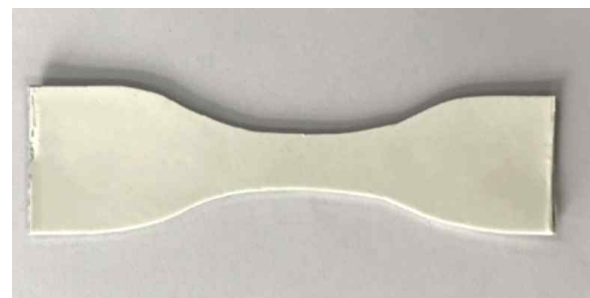
4. 방사선 차폐 시트의 인장 강도와 신장률 평가 및 유연성 평가 방법

4.1 인장 강도 및 신장률 평가

방사선 차폐 시트의 신축성을 분석하고자 ‘KS M 6782 가황 또는 열가소성 고무 인장응력 특성 측정 방법’ 규격에 제시된 아령 2호형 규격으로 실험 시편을 제작하였다.



(a) Schematic diagram of Dumbbell 2 second model



(b) Fabricated dumbbell type 2 specimen

Fig. 3. Two arc-shaped dumbbell specimens.

Fig. 3은 아령 2호형 시편의 제작도를 나타내었으며 ‘KS P 6023 진료용 X선 방호앞치마’ 규격에 준용하여 평가를 진행하였다. 제작된 시험편의 양 끝을 단단히 고정시키고 인장 시험기를 이용하여

시험 길이와 힘의 변화를 관찰하여 인장강도와 신장률을 구하였다.^[7]

4.2 유연성 평가

유연성 평가 시편의 형태 및 Protocol은 KS M ISO 5979 (고무 또는 플라스틱으로 코팅된 천 규격)에서 준용하였으며 유연성 평가 크기(15 cm × 10 cm 직사각형 형태)는 차폐 시트 평가에 적합하도록 재정립한 후 평가를 수행하였다. 평가 시편 10 cm의 한쪽 끝 1 cm를 바닥에 테이프를 사용하여 고정시킨 후 고정되지 않은 다른 한쪽 끝을 잡고 고정되어있는 곳으로 말아 접고, 굽혀진 곳의 바닥으로 부더의 높이를 측정하였다. 측정 횟수는 총 5회 수행하였으며 평균값으로 부더 그 값이 낮을수록 유연성이 우수한 것으로 평가하였다.

III. RESULT

1. 공극률 평가

공극률 평가를 위한 차폐 시트 제작 시 30 °C 이하에서는 차폐물질과 혼합된 실리콘 엘라스토머가 경화 되지 않는 특성을 나타내었으므로 본 연구에서는 40 °C부터 10 °C 간격으로 온도를 증가하여 평가를 수행한 결과 Fig. 4와 같이 도출되었다.

측정결과, 공극율의 비율은 건조온도 40 °C에 0.96 %, 50 °C에서 1.13, 60, 70, 80 °C로 증가 시 1.13, 2.77, 4.31, 6.34 %로 온도 증가에 따른 공극률이 점차 증가하는 것으로 평가되었다.

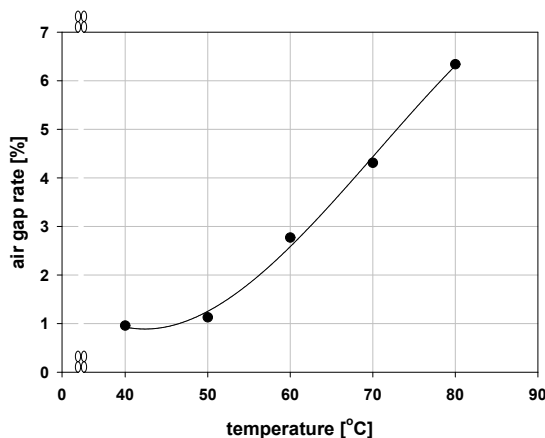


Fig. 4. Porosity graph according to drying temperature.

2. 차폐율 평가

BaSO₄ 250 μm에 Bi₂O₃ 시트의 두께를 증가시켜 가며, 동일두께의 PbO 시트와의 차폐율을 비교한 결과 Fig. 5과 같이 분석되었다.

특히 두께 800 μm 기준으로 비교 분석한 결과 본 연구에서 제작된 BaSO₄/Bi₂O₃ 다층 구조 차폐 시트의 차폐율이 94.53 %로 상용화된 PbO 시트의 차폐율 84.70 % 보다 약 9.83 % 우수한 것으로 평가되었다.

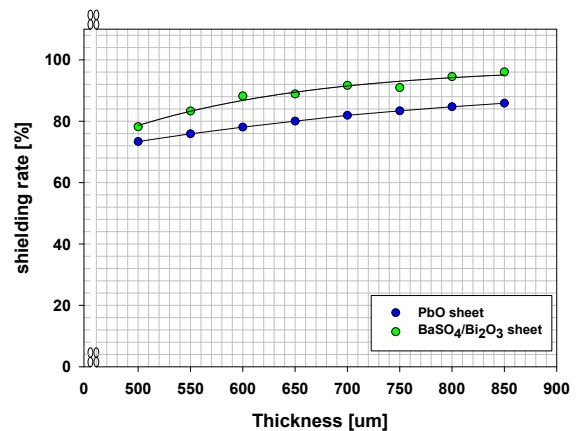


Fig. 5. Evaluation of shielding rate according to thickness change.

3. 인장강도 및 신장률, 유연성 평가

제작된 다층 구조의 방사선 차폐 시트의 파단시 인장강도 평가 결과 Fig. 6과 같이 분석되었으며 실리콘 기반의 차폐 시트의 경우 0.55 N/mm²로, BaSO₄/nylon/Bi₂O₃ 차폐 시트에서는 12.27 N/mm², PbO 차폐 시트는 0.45 N/mm²로 평가되었다. 또한 파단 시 신장률 평가 결과 단일 실리콘 기반의 차폐 시트는 30 %, BaSO₄/nylon/Bi₂O₃ 차폐 시트에서는 25 %, PbO 차폐 시트는 30 %로 나타났다.

유연성 평가 결과 실리콘 시트는 1.44 cm, BaSO₄/nylon/Bi₂O₃ 시트는 2.60 cm, PbO 시트는 1.53 cm로 실리콘 시트의 유연성이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

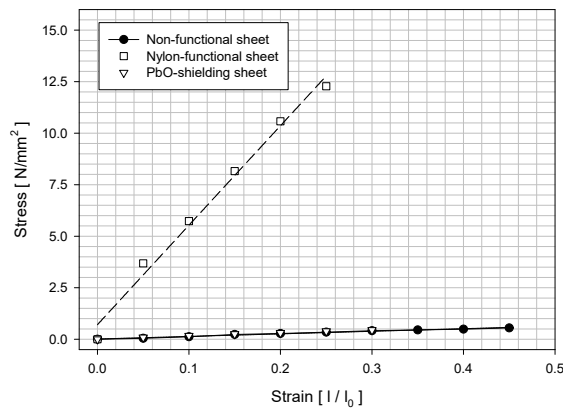


Fig. 6. Evaluation of tensile strength and elongation rate.

Table 1. Evaluation of flexibility of radiation shielding sheet

type	Silicon	BaSO ₄ /nylon/Bi ₂ O ₃	PbO
flexibility (cm)	1.44	2.60	1.53

IV. DISCUSSION

본 연구에서는 인체에 무해한 차폐 물질을 이용하여 다층 구조의 방사선 차폐 시트를 개발하고 차폐율 평가와 더불어 물리적 내구성에 대한 특성 평가를 수행하였다. 상용화된 PbO 차폐 시트와 차폐능을 비교 평가한 결과 800 μm 두께기준으로 최대 9.83 % 차폐율이 더 높은 것으로 분석되었고 인장강도는 BaSO₄/nylon/Bi₂O₃ 차폐 시트에서는 12.27 N/mm²로 가장 우수한 성능을 보였으며 이는 실리콘 차폐 시트의 약 22배, 상용화된 PbO 방사선 차폐 시트보다 약 27배 우수한 특성을 보였다. 공극률 연구결과 건조온도 40 °C에서 0.96 %로써 가장 우수한 결과를 보였으며 공극률이 낮을수록 차폐 성능이 우수한 것으로 분석되었다. 이는 차폐 시트 건조 시 액상 형태의 실리콘 바인더에 포함된 수분과 다양한 구성 성분이 온도 변화에 따라 특성이 변화되어 공극 차이가 발생한 것으로 보이며 이러한 공극 차이가 차폐 시트의 X선 누설에 관여한 것으로 사료된다. [8,9] 그러므로 본 연구 결과로부터 바인더로 사용 된 실리콘 엘라스토머의 온도 변화

에 따른 공극률 차이로 인해 차폐율에 영향을 미치는 것으로 분석되었으므로 차폐 효율을 개선시키기 위한 차폐 소재의 배합 연구가 다각적으로 필요할 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 기존 납 재질의 방사선 차폐 시트를 대체하고자 기능성 섬유층으로 nylon을 추가한 방사선 차폐 시트를 제작하였고, 이를 기존 상용화된 PbO 방사선 차폐 시트와 비교 평가하여 새로운 방사선 차폐체로서 제시하였다. 이에 본 연구 결과는 공극률을 저감하여 차폐 성능을 높이기 위한 다층 구조의 차폐 시트 제작 온도를 제시하였으며 인장강도 및 신장률, 유연성 평가를 바탕으로 물리적 특성을 개선시킬 수 있는 연구를 수행하였다. 하지만 유연성 평가 결과에서 실리콘이 우수한 특성을 보였으므로 차후 이를 개선할 수 있는 기능성 섬유층 소재에 대한 연구가 필요할 것으로 보이며 이를 통해 차폐 시트의 물리적 특성 개선이 가능할 것으로 기대된다. 이러한 특성 평가 결과로부터 본 연구는 무독성 방사선 차폐 시트 개발에 유용한 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 논문은 2017년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(2017R1A2B4009249).

Reference

- [1] J. G. Lee, *Principles of Radiation Protection*. Korea Association for Radiation Application, Geoseong Publishing Printing, pp. 541-93, 2016.
- [2] Korea Centers for Disease Control and Prevention (2017) Publication of Medical Radiation Occupational Radiation Statistics Statistical Yearbook.
- [3] J. I. Yoo, J. W. Koo, "Musculoskeletal Symptoms and Related Factors for Nurses and Radiological Technologists Wearing a Lead Apron for Radiation Protection," *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 16, No. 2, pp.

199-177, 2004.

- [4] Y. K. Kim, Y. L. Jang, J. M. Kim, "Improvement of the shieldability and lightweight of a radiation protective apron," *Medical Physics, Journal of radiological science and technology*, Vol. 26, No. 1 pp. 45-50, 2003.
- [5] S. C. Kim, M. H. 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. 2011.
- [6] KS P 6023 ; Medical X-ray protective aprons
- [7] KS A 4025 ; Testinng method of lead equivalent for X-ray protective Devices
- [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.
- [9] S. S. Kang, A . R. Jeong, S . M .Lee et. "The study on Filling Factor of Radiation Shielding Lead -free Sheet via Screen Printing Method", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 12, No. 6, pp. 713-717, 2018.

무독성 화합물 기반의 다층 구조 방사선 차폐 시트 개발과 특성 개선에 관한 연구

허예지,¹ 양승우,² 박지균^{1,*}

¹한국국제대학교 방사선학과

²인제대학교 의과대학 방사선 종양학과

요 약

방사선 방호복의 대부분은 가공성과 경제성이 매우 우수하고 높은 원자번호를 갖고 있어 방사선 차폐가 우수한 납으로 제작된다. 하지만 납은 유해 중금속으로 분류되어 납중독 등의 위험이 있으며, 착용 시 중량감 및 불편함 등이 크므로 최근에는 납이 아닌 다양한 물질로 차폐 시트에 대한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 인체에 무해한 BaSO₄와 Bi₂O₃ 두 화합물과 실리콘 재질의 바인더를 혼합하여 기존과 동등한 방사선 차폐능력을 유지하면서도 물리적 특성이 개선된 다층 구조의 차폐 시트에 대한 연구를 수행하였다. 연구 결과 기존의 차폐 시트와 비교하여 본 연구에서 제작된 다층 구조의 방사선 차폐 시트는 동일한 두께를 기준으로 약 9.8 % 우수한 특성을 보였으며 물리적 특성 중 인장 강도는 BaSO₄/nylon/Bi₂O₃ 차폐 시트에서 12.27 N/mm²로 가장 우수한 것으로 분석되었다.

중심단어: 방사선 차폐, BaSO₄, Bi₂O₃, 다층 구조

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	허예지	한국국제대학교 방사선학과	외래교수
(공동저자)	양승우	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	대학원생(석사)
(교신저자)	박지균	한국국제대학교 방사선학과	교수