

A Study on the Feasibility of Lead(Pb) Iodide and $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ Overlapping Sensors in Gamma Source Conditions using FLUKA Simulation

Seung-Woo Yang¹, Yoon-Hee Park², Ji-Koon Park³, Ye-Ji Heo^{3,*}

¹Department of radiation Oncology, Collage of medicine, Inje University

²Interdisciplinary Program in Biomedical Engineering, College of Medicine, Chungbuk National University

³Department of Radiological Science, International University of Korea

Received: July 08, 2022. Revised: August 16, 2022. Accepted: August 31, 2022.

ABSTRACT

Non-Destruction Test (NDT) is a method to check internal defects without destroying the product. Among them, radiographic testing (RT) uses high-energy radiation, so it is very important to prevent radiation exposure of workers. Therefore, in this study, a radiation sensor structure that improves radiation detection performance compared to the existing PbI_2 and can immediately detect accidents in RT was presented. For evaluation, the conversion efficiency was analyzed in the gamma ray source through FLUKA simulation. PbI_2 with overlapping $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ presented in this study showed a higher radiation sensitivity from 1.22 to 3.22 times than that of non-overlapping PbI_2 . This indicates that the presented sensor is suitable for use as a radiation sensor for source detection in RT.

Keywords: PbI_2 , $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$, FLUKA simulation

I. INTRODUCTION

방사선투과검사는 산업현장에서 제품의 안정성과 품질을 보증하기 위해 사용된다. 비파괴검사(NDT; Non-Destruction Test)는 제품의 기능을 손상시키거나 물리적으로 파괴하지 않고 내부의 결함을 검사하기 때문에 산업현장에서 내부 결함을 확인하기 위해 사용된다. 그중 방사선투과검사는 대상물의 물질 구성과 두께에 따라 다르게 감약되는 방사선의 강도를 가시화하여 제품의 내부 결함을 나타내는 검사 방법이다.

방사선투과검사는 고에너지 방사선을 사용하기 때문에 방사선피폭으로 인한 위험성이 항시 존재하게 된다. 그렇기 때문에 방사선투과검사를 진행할 때에는 방사선작업종사자들의 안전을 확보하는 것이 매우 중요하다. 하지만 대부분의 방사선투과

검사가 발주업체 사업장에서 이루어지기 때문에 일정치 않은 작업환경으로 인하여 일정량의 방사선 피폭에 지속적으로 노출될 수밖에 없다. 또한, 방사선작업종사자의 부주의와 장비의 노후화로 인한 제거기 고장으로 방사선 피폭 사례가 보고되고 있다^[1-4].

이에 방사선작업종사자들은 개인 피폭선량을 측정할 수 있는 개인 선량계를 사용하고 있다. 현재 임상은 필름배지, 열형광선량계(TLD), 유리선량계(PLD), 광자극발광선량계(OSLD) 등의 선량계들이 주선량계로써 주로 사용되고 있다.

하지만 이러한 선량계들은 사고가 발생하더라도 즉각적인 대처가 힘든 문제점이 있다. 현재 임상에서 사용되는 선량계들은 개인 피폭선량에 초점이 맞추어져 있어서 사고가 발생하여도 즉각적으로 파악하기가 힘들기 때문이다^[4].

* Corresponding Author: Ye-Ji Heo

E-mail: improve24@naver.com

Tel: +82-55-751-8303

이에 방사선투과검사 시에 선원 누출이나 고장으로 인하여 사고가 발생하여도 즉각적으로 파악할 수 있는 방사선 센서의 필요성이 요구된다. 방사선 센서는 방사선투과검사 장비나 주변기기에 부착하는 보조선량계로 사용되어 선원이 누출되거나 고장으로 인하여 방사선이 누설될 때를 즉각적으로 확인할 수 있어서 방사선작업종사자들의 안전을 확보할 수 있다.

한편, Lead(II) Iodide(PbI₂)는 방사선 검출에 사용되는 광도전체 물질로써 방사선 센서를 만들기에 적합한 물질이다. PbI₂는 높은 원자번호(Z_{Pb} = 82, Z_I = 53)와 밀도(6.16 g/cm³)로 방사선 검출효율이 다른 방식의 검출기보다 우수하고 안정성이 높다. 또한, 낮은 누설 전류 밀도를 가지고 있기 때문에 광도전체 기반의 반도체 검출기 소재로 널리 사용되고 있다^[5,6].

하지만 PbI₂ 물질은 상기의 장점에도 불구하고 민감도가 비교적 낮은 문제점을 가지고 있다. 그래서 이를 위한 해결책이 필요하다^[7].

본 연구는 PbI₂ 물질에 증감지로 자주 이용되는 Terbium이 도핑된 Godolinium oxysulfide (Gd₂O₂S:Tb)를 PbI₂에 결합시켜 민감도가 낮은 문제점을 개선할 수 있는 새로운 구조의 센서를 제시하고자 하였다. 그리고 방사선투과검사에서 선원 누출 사고 등이 발생하였을 때, 위험을 바로 감지할 수 있는 방사선 센서로 적용 가능한지를 평가하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

실제 방사선을 이용한 실험을 진행하기에는 장비와 차폐시설 사용이 제한적이다. 그래서 본 연구는 FLUKA 전산 모사(FLUKA 2021.2.6. version)를 사용하여 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂의 개선 정도를 평가하였다.

1. 방사선원 설정

Gd₂O₂S:Tb이 결합된 PbI₂의 개선 정도를 분석하기 위하여 방사선투과검사에서 자주 쓰이는 ¹⁹²Ir 감마선원을 전산 모사에 사용하였다. ¹⁹²Ir 선원의

방사능은 행정규칙인 방사선 안전관리 등의 기술기준에 관한 규칙'에 명시된 '야외 방사선투과검사에서의 사용 기준인 「¹⁹²Ir 0.74 TBq이하에 상응하는 방사성동위원소」를 기준으로 0.74 TBq로 설정하였다^[8]. 실험에 사용된 ¹⁹²Ir 선원 조건을 Table 1에 나타내었으며, 선원 조건은 E. T. Park 등의 "Dose evaluation of the man adjacent to an implanted patient during the prostate cancer brachytherapy(2016)" 논문에서 제시한 조건을 사용하였다^[9].

Table 1. Physical Characteristics of ¹⁹²Ir

¹⁹² Ir	E (KeV)	Frequency (%)
E1	317	83
E2	468	48
E3	604	9
Average	372	

2. 방사선 검출 물질 설정

감마선원에서의 개선 정도를 분석하기 위하여 Gd₂O₂S:Tb와 PbI₂가 겹쳐진 센서와 순수한 PbI₂로 이루어진 센서를 각각 구현하여 전산 모사를 진행하였다. 전산 모사에 사용된 Gd₂O₂S:Tb와 PbI₂의 물성을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Material Properties

Material	Composition	Density (g/cm ³)
Lead(II) Iodide	PbI ₂	6.16
Godolinium oxysulfide:Tb	Gd ₂ O ₂ S:Tb	7.34

이때, 선원과의 거리와 물질 두께에 따라 센서에 방사선이 에너지를 전달하는 정도가 달라지기 때문에 PbI₂의 두께는 각각 150, 200, 250, 300 μm로 설정하고 선원과 물질간의 거리는 1, 2, 3, 4, 5 cm로 다양하게 설정하여 전산 모사를 진행하였다.

이때, Gd₂O₂S:Tb의 두께는 200 μm로 설정하였다.

Fig. 1은 방사선 검출 성능을 특정하기 위하여 나타낸 실험 방법을 나타낸 모식도이다.

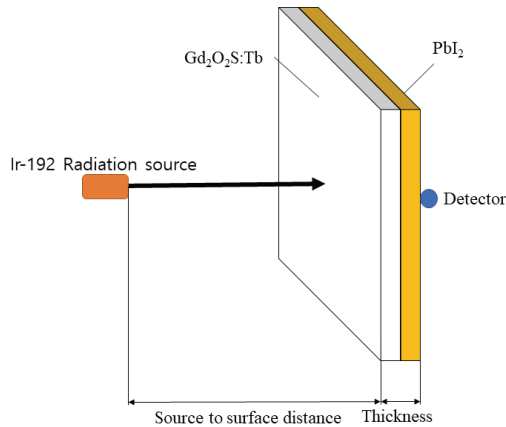


Fig. 1. Sketch of FLUKA simulated geometry.

3. 감마선원 검출 성능 분석

Gd₂O₂S:Tb이 결합된 PbI₂의 개선 정도를 분석하기 위하여 감마선원에서의 검출 성능을 분석하였다. 검출 성능은 공기에서 투과된 측정량을 기준으로 방사선 검출 센서에서 투과된 측정량을 방사선 변환 효율로 산출하여 감마선원 검출 성능을 분석하였다. 방사선 변환효율은 방사선이 센서에 에너지를 전달한 정도를 나타내며, 전달된 에너지만큼의 신호가 측정되기에 이를 검출성능의 지표로 사용하였다. 변환효율을 산출하기 위하여 방사선 검출 센서 뒤 한 점에서 USRTRACK code를 사용하여 cell flux(#/cm²)를 측정하였다. 각 물질의 변환효율 다음과 같은 Eq. (1)을 통하여 산출하였다.

$$\text{변환효율 (\%)} = \frac{D_{\text{air}} - D_{\text{material}}}{D_{\text{air}}} \quad (1)$$

D_{air} : 공기 투과 이후의 측정량 (#/cm²)

D_{material} : 물질 투과 이후의 측정량 (#/cm²)

이후 Gd₂O₂S:Tb이 결합된 PbI₂의 검출 성능과 순수한 PbI₂를 비교하여 개선정도를 평가하였다.

III. RESULT

본 연구에서 제시한 Gd₂O₂S:Tb이 결합된 PbI₂의 개선 정도를 평가하기 위하여 전산 모사를 통하여 감마선원 변환효율을 산출하고 감마선원 검출 성능을 분석하였다.

Table 3은 순수한 PbI₂ 물질에서의 방사선 변환효율을 나타낸다. 선원과의 거리가 1 cm이고 물질의 두께가 150 μm에서 300 μm까지 50 μm 씩 두께가 증가할 때, 순수한 PbI₂의 ¹⁹²Ir 감마선원 변환효율은 각각 0.41%, 0.79%, 1.00%, 1.61%의 변환효율이 제시되었다. 2 cm에서 각각 0.68%, 0.96%, 0.76%, 1.45%의 변환효율이 제시되었다. 3 cm에서 각각 0.78%, 1.06%, 0.82%, 1.34%의 변환효율이 제시되었다. 4 cm에서 각각 0.81%, 1.13%, 0.93%, 1.33%의 변환효율이 제시되었다. 5 cm에서 각각 0.72%, 1.20%, 1.06%, 1.41%의 변환효율이 제시되었다.

Table 3. Radiation conversion efficiency of PbI₂

Distance from source	Material Thickness (μm)	Radiation conversion efficiency (%)
1 cm	150	0.41
	200	0.79
	250	1.00
	300	1.61
2 cm	150	0.68
	200	0.96
	250	0.76
	300	1.45
3 cm	150	0.78
	200	1.06
	250	0.82
	300	1.34
4 cm	150	0.81
	200	1.13
	250	0.93
	300	1.33
5 cm	150	0.72
	200	1.20
	250	1.06
	300	1.41

Table 4는 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂에서의 방사선 변환 효율을 나타내고 있다. Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂물질의 두께가 150 μm에서 300 μm로 50 μm 씩 두께가 증가하고 선원과의 거리가 1 cm일 때의 감마선원 변환효율은 각각 1.36%, 1.76%, 1.98%, 2.63%로 제시되었다. 2 cm에서 각각 1.56%, 1.89%, 1.73%, 2.45%의 변환효율이 제시되었다. 3 cm에서 각각 1.32%, 1.18%, 1.68%, 2.27%의 변환효율이 제

시되었다. 4 cm에서 각각 1.04%, 1.62%, 1.59%, 2.12%의 변환효율이 제시되었다. 5 cm에서 각각 0.88%, 1.40%, 1.49%, 2.00%의 변환효율이 제시되었다.

Table 4. Radiation conversion efficiency of Gd₂O₂S:Tb overlapping PbI₂ sensor

Distance from source	Material Thickness (μm)	Radiation conversion efficiency (%)
1 cm	150	1.36
	200	1.76
	250	1.98
	300	2.63
2 cm	150	1.56
	200	1.89
	250	1.73
	300	2.45
3 cm	150	1.32
	200	1.18
	250	1.68
	300	2.27
4 cm	150	1.04
	200	1.62
	250	1.59
	300	2.12
5 cm	150	0.88
	200	1.40
	250	1.49
	300	2.00

Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂의 개선정도를 평가하고자 순수한 PbI₂의 변환효율과 비교하여 평가하였다. 선원과의 거리가 1 cm이고 센서의 두께가 150 μm에서 300 μm로 50 μm씩 증가하였을 때, Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂의 변환효율이 순수한 PbI₂보다 각각 3.26배, 2.21배, 1.98배, 1.6배 높게 제시되었다. 2 cm에서도 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂의 변환효율이 각각 2.21배, 1.95배, 2.27배, 1.68배 높게 제시되었다. 3 cm에서도 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂가 각각 1.74배, 1.42배, 2.03배, 1.69배 변환효율이 높게 제시되었다. 4 cm에서도 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂ 변환효율이 각각 1.27배, 1.42배, 1.71배, 1.58배 높게 제시되었으며, 5 cm에서도 각각 1.22배, 1.16배, 1.40배, 1.41배 높게 제시되었다.

IV. DISCUSSION

본 연구에서 제시한 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂는 순수한 PbI₂보다 1.22배에서 최대 3.26배까지 감마선원 변환효율이 더 높게 개선될 수 있는 것으로 나타났다. 이는 본 연구에서 제시된 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂가 순수한 PbI₂보다 방사선 검출 성능이 높아 동일한 에너지 조건에서 더 많은 전자-정공 쌍을 생성하여 기존보다 큰 신호값을 생성할 수 있음을 의미한다. 또한, 이러한 결과는 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂가 기존 PbI₂를 대체하여 방사선투과검사에 방사선 검출 센서로 적용할 수 있음을 나타낸다.

본 연구 결과로부터 실제 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂센서가 제작되어 평가된다면, 방사선투과검사에 발생하는 선원누출 등의 위험을 즉각적으로 확인한 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 향상된 검출 능력으로 기존 방사선 검출 센서를 대체할 수 있을 것이며, 더 나아가 의료 및 산업 영역의 방사선 검출 분야에 추가적으로 활용 가능할 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 PbI₂물질에 Gd₂O₂S:Tb를 결합한 새로운 구조의 방사선 검출 센서를 제시하고 개선 정도를 분석하여 기존 PbI₂물질을 대체하여 방사선투과검사에 방사선 센서로 적용할 수 있을지 평가하고자 하였다. 이를 위해 FLUKA 전산 모사를 이용하여 감마선원 변환 효율을 분석하고 PbI₂와 비교 평가하여 방사선 검출 성능 개선정도를 평가하였다.

본 연구에서 제시한 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂는 순수한 PbI₂보다 더 높은 방사선 검출 성능을 나타내어 방사선투과검사 영역 방사선 센서로 PbI₂를 대체할 수 있는 것으로 평가되었다.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(NRF-2020R111A1A01074908)

Reference

- [1] K. T. Kim, J. H. Kim, M. J. Han, Y. J. Heo, K. J. Ahn, S. K. Park, "The Study on Design of Semiconductor Detector for Checking the Position of a Radioactive Source in an NDT", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 11, No. 3, pp. 171-175, 2017.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2017.11.3.171>
- [2] K. T. Kim, J. H. Kim, M. J. Han, S. S. Lee, Y. J. Heo, G. S. Cho, B. In. Min, H. L. Cho, K. B. Kim, S. K. Park, "Characterization of a HgI₂ Dosimeter for the Monitoring System of Position Detection of Radioactive Sources in Gamma-Ray Projector", *Science of Advanced Materials*, Vol. 12, No. 10, pp. 1502-1507, 2020.
<https://doi.org/10.1166/sam.2020.3791>
- [3] M. J. Han, S. W. Yang, Y. H. Shin, K. T. Kim, S. J. Noh, K. M. Oh, S. J. Cho, Y. S. Choi, K. J. Ahn, Ki-Jung H. L. Cho, S. K. Park, "A Mercury (II) Oxide Dosimeter for Locating the Radioactive Source in Industrial Radiography Equipment", *Science of Advanced Materials*, Vol. 12, No. 11, pp. 1702-1707, 2020.
<https://doi.org/10.1166/sam.2020.3810>
- [4] Y. H. Shin, M. J. Han, J. H. Jung, K. T. Kim, Y. J. Heo, D. H. Lee, H. L. Cho, S. K. Park, "The study on applicability of semi-conductive compound for radioactive source tracing dosimeter in NDT field", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 13, No. 1, pp. 39-44, 2019.
<https://doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.39>
- [5] R. Ahuja, H. Arwin, A Ferreira da Silva, C. Persson, J. M. Osorio-Guillén, J. Souza de Almeida, C. M. Araujo, E. Veje, N. Veissid C. An, "Electronic and Optical Properties of Lead Iodide", *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, No. 12, pp. 7219-7224, 2002. <https://doi.org/10.1063/1.1523145>
- [6] K. S. Shah, P. Bennett, M. Klugerman, L. Moy, L. Cirignano, Y. Dmitriyev, M. R. Squillante, F. Olschner, W. W. Moses, "Lead Iodide Optical Detectors for Gamma Ray Spectroscopy", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 44, No. 3, pp. 448-450, 1997. <https://10.1109/23.603688>
- [7] R. A. Street, S. E. Ready, K. Van Schuylenbergh, J. Ho, J. B. Boyce, and P. Nylen, "Comparison of PbI₂ and HgI₂ for direct detection active matrix x-ray image sensors", *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, No. 5, pp. 3345-3355, 2022.
<https://doi.org/10.1063/1.1436298>
- [8] [https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EB%B0%A9%EC%82%AC%EC%84%A0%EC%95%88%EC%A0%84%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%93%B1%EC%9D%98%EA%B8%B0%EC%88%A0%EA%B8%B0%EC%A4%80%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%B9%99/\(29,20210623\)](https://www.law.go.kr/%ED%96%89%EC%A0%95%EA%B7%9C%EC%B9%99/%EB%B0%A9%EC%82%AC%EC%84%A0%EC%95%88%EC%A0%84%EA%B4%80%EB%A6%AC%EB%93%B1%EC%9D%98%EA%B8%B0%EC%88%A0%EA%B8%B0%EC%A4%80%EC%97%90%EA%B4%80%ED%95%9C%EA%B7%9C%EC%B9%99/(29,20210623))
- [9] E. T. Park, J. H. Kim, "Dose Evaluation of the Man Adjacent to an Implanted Patient During the Prostate Cancer Brachytherapy", *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 10, No. 1, pp. 39-44, 2016.
<http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2016.10.1.39>

FLUKA 전산 모사를 통한 감마선원 조건에서의 요오드화납(II)과 Gd₂O₂S:Tb가 결합된 센서의 적용가능성 연구

양승우¹, 박윤희², 박지군³, 허예지^{3,*}

¹인제대학교 의과대학 방사선 종양학과

²충북대학교 일반대학원 학과간협동과정 의용생체공학 전공

³한국국제대학교 방사선학과

요 약

비파괴검사(NDT; Non-Destruction Test)는 제품의 기능을 손상시키거나 물리적으로 파괴시키지 않고 내부의 결함을 검사하는 방법이다. 이러한 방사선투과검사는 고에너지의 방사선을 사용하기 때문에 방사선작업종사자들의 방사선피폭을 방지하는 것은 매우 중요하다. 이에 본 연구는 PbI₂에 Gd₂O₂S:Tb를 결합하여 기존 PbI₂보다 방사선 검출성능을 더욱 향상시켜 방사선투과검사에서 선원누출 등의 사고를 즉각적으로 감지할 수 있는 새로운 구조의 방사선 센서를 제시하였다. 평가는 FLUKA 전산 모사를 통하여 감마선원에서 Gd₂O₂S:Tb 결합 전후의 변환 효율을 분석하였다. Gd₂O₂S:Tb가 결합된 PbI₂는 방사선 검출성능이 1.22배에서 3.22배까지 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 제시된 센서는 방사선투과검사 선원 감지용 방사선 센서로 적용 가능할 것으로 분석되었다.

중심단어: PbI₂, Gd₂O₂S:Tb, FLUKA 전산 모사

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	양승우	인제대학교 의과대학 방사선 종양학과	대학원생
(공동저자)	박윤희	충북대학교 일반대학원 학과간협동과정 의용생체공학 전공	대학원생
	박지군	한국국제대학교 방사선학과	교수
(교신저자)	허예지	한국국제대학교 방사선학과	연구책임자/강사