

The Study on Design of Semiconductor Detector for Checking the Position of a Radioactive Source in an NDT

Kyo-Tae Kim,¹ Joo-Hee Kim,² Moo-Jae Han,¹ Ye-Ji Heo,¹ Ki-Jung Ahn,³ Sung-Kwang Park^{3,*}

¹Department of Biomedical Engineering, Inje University

²Department of Emergency and Disaster Management, Inje University

³Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: June 06, 2017. Revised: June 15, 2017. Accepted: June 30, 2017

ABSTRACT

In the non-destructive inspection field, we invest a lot of time and resources in developing the radiation source system to ensure the safety of the workers. However, the probability of accidents is still high. In order to prevent potential radiation accidents in advance, it is necessary to directly verify the position of the radiation source, but the research is still insufficient. In this study, we developed a monitoring system that can detect the position of the radiation source in the source guide tube in the gamma-ray irradiator. The characteristics of the radiation detector are estimated by monte carlo simulation. As a result, the radiation detector for Ir-192 gamma-ray energy was analyzed to have secondary electron equilibrium at 150 μ m regardless of the semiconductor material. Also, it is expected that the gamma ray response characteristic is the best in HgI₂. These results are expected to be used as a basis for determining the optimal thickness of the radiation detector located in the detection part of the future monitoring system. In addition, when developing a monitoring system based on this, radiation workers can easily recognize the danger and secure safety, as well as prevent and preemptively respond to potential radiation accidents.

Keywords: Non-destructive inspection, Gamma-ray projector, Radioactive source, Solid-state detector, Semiconductor materials

I. INTRODUCTION

최근 국민 소득 수준이 점차적으로 향상됨에 따라 기초적인 삶을 유지하기 위한 생리적 욕구에서 안전에 대한 욕구로 확장됨에 따라 전 세계적으로 범국가적 안전관리체계를 구축하고 있으며 더 나아가 범세계적 안전규제강화 형태로 나타나고 있다. 이에 비파괴검사 (Non-destructive inspection, 이하 NDT) 분야에서는 감마선을 이용하여 내부 결함을 영상화하는 감마선 검사법을 광범위하게 이용하고 있다. 또한, 작업자들의 안전을 확보하기 위해 방사선원에 대한 시스템 개발에 많은 시간과 재원을 투자하고 있다. 과거 방사선원을 원격 조작할 수 있는 ‘자동 원격 조사 제어기’의 개발을 통해 방사선작업자의 안전을 확보하는데 있어 큰

기여를 하였으나 아직까지 사고 발생률은 높은 실정이다.^[1,2] 이와 같은 방사선에 대한 잠재적 사고를 미연에 방지하는 근본적인 방안은 방사선원의 위치를 직접적으로 검증하는 것이다. 이에 산업 분야에서는 별도의 방사선 검출기를 이용하고 있다.^[3] 하지만, 이는 갑자기 발생할 수 있는 방사선 사고를 선제적으로 대응할 수 없을 뿐만 아니라 시스템 대형화로 인해 NDT 분야에 적용이 어려운 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 감마선조사기에 선원 가이드 튜브에서 방사선원의 위치를 감지할 수 있는 모니터링 시스템 개발을 위한 선행연구로써 MC 시뮬레이션을 통해 방사선 검출기에 대한 특성을 모의 추정하였다.

II. EXPERIMENTAL METHODS

* Corresponding Author: Sung Kwang Park E-mail: physicist@paik.ac.kr Tel: +82-51-890-8749
Address: Busan Paik Hospital, 75 Bokji-ro, Busanjin-gu, Busan-si, 47392, Republic of Korea

1. Design of the geometry

본 연구에서는 전 세계적으로 검증된 방사선 수송 모의 코드인 MCNP (Los Alamos National Laboratory, USA Ver.X) 코드를 이용하여 감마선에 대한 방사선 검출기의 특성을 모의 추정하였다. 또한, 감마선 검사법에 대한 환경을 구현하고자 상용화된 NDT 제품을 참고하여 방사선원, 선원 가이드 튜브, 방사선 검출기를 Fig. 1과 같이 모델링함으로써 MC 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, MC 시뮬레이션에서 설정한 기하학적 조건을 Table 1에 나타내었다.

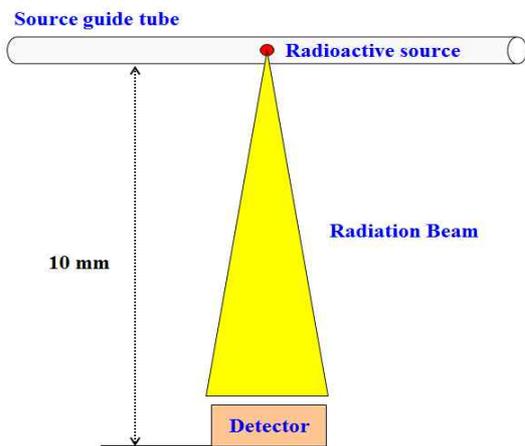


Fig. 1. Schematic diagram of designed of the geometrical model in for MC simulation.

Table 1. Conditions of geometry setup at MC simulation.

Note	Shape	Geometrical condition
Radiation source	Point	-
Source guide tube ^(a)	Tube	2250 mm × φ 10 mm
Source guide tube ^(b)	Tube	2250 mm × φ 13.3 mm
Radiation dosimeter ^(c)	Cube	10 × 10 × T mm ³

- (a) Source guide tube의 내경으로써 직경 10 mm로 설계함.
- (b) Source guide tube의 외경으로써 Ir-192의 반가층으로 알려져 있는 Tungstem 3.3 mm을 고려하여 설계하였음.
- (c) T는 두께를 의미한다.

방사선원은 산업 분야에서 감마선 이용을 위해 사용하는 감마선원 중 방사선 사고가 많이 발생하는 것으로 보고되고 있는 Ir-192를 선정하였다.^[4] 선원 가이드

튜브는 텅스텐으로 구성된 방사선을 차폐할 수 있는 관으로써 방사선원의 이동 경로 역할을 수행한다. 이때, 두께는 Ir-192에 대한 초기 강도를 50%로 감쇠할 수 있는 반가층의 두께를 설정하였다. 또한, Ir-192 선원에서 1 m 떨어져 있는 거리에서 조사선량율은 0.48 R/hr로 보고되었다. 방사선 검출기는 반도체 소재로 구성된 고체 검출기으로써 방사선원에서 방출된 감마선과 상호작용하여 흡수선량을 측정하는 역할을 수행한다.^[5] 일반적으로 고에너지 영역에서 방사선을 검출하기 위하여 이용되는 반도체 소재는 대표적으로 Si (Z = 14)이 있다. 이는 낮은 원자번호로 인하여 광전효과의 발생 효율이 적어 두꺼운 두께로 제작이 요구됨에 따라 두꺼운 두께로 제작되어야 하는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 유효원자번호가 상대적으로 높은 반도체 소재로써 HgI₂, PbI₂, PbO를 선정하였다. Table 2는 MC 시뮬레이션에 이용된 반도체 소재의 기본적 특성을 나타내고 있다.^[10]

Table 2. Basic properties of semiconductor materials.

Note	HgI ₂	PbI ₂	PbO
Effective Atomic number	64.9	66.1	76.7
Molar mass [g/mol]	454.4	461.01	223.20
Density [g/cm ³]	6.36	6.16	9.53
Work-function [ip/eV]	4.2	7.68	14.8

2. Design of the radioactive source

본 연구에서 방사선원은 선원 가이드 튜브 내부에 점선원으로써 구현하고 Ir-192에서 발생하는 감마선에 에너지를 정의하였다. 또한, 방사선원에서 방출된 광자들의 모의수송을 정의하기 위하여 Mode P를 이용하였고, ERG는 Ir-192에서 방출하는 감마선의 평균 에너지 300 keV를 단일 광자 에너지로써 정의하였다.

3. Design of the radiation detector

본 연구에서는 반도체 소재에 따른 에너지 흡수효율 (Energy Absorption Efficiency, 이하 AE)의 분석을 위하여 방사선 검출기를 구현하였다. 이 때, 시뮬레이션 결과 값을 얻기 위한 Tally specification card는 F6 Tally를 통하여 방사선 검출기에서 흡수될 확률을 5 × 10⁷ 번의 샘플링을 통해 모의 추정하였다.

III. RESULT AND DISCUSSION

1. Energy absorption efficiency

본 연구에서 반도체 기반의 반도체 검출기에 대한 최적화 두께를 평가하고자 방사선 검출기의 두께에 따른 에너지 흡수효율을 평가하였다. 이 때, 기하학적 구조는 방사선 검출기 하단을 선원 가이드 튜브 표면으로부터 10 mm에 구현하였다. 또한, 방사선 검출기의 두께에 따라 산출된 에너지 흡수효율 중 가장 높은 값을 기준으로 정규화하여 Fig. 2에 나타내었다.

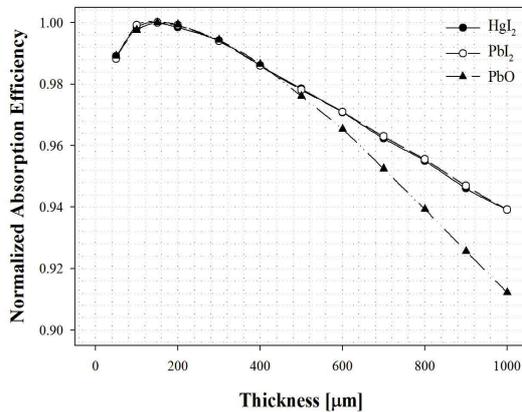


Fig. 2. Normalized absorption efficiency as a function of thickness for radiation detector.

연구 결과, 방사선 검출기의 두께가 증가함에 따라 흡수효율의 극점을 가지는 것으로 분석되었으며 이를 기준으로 추세 변화가 나타났다. 본 연구에서는 이러한 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 방사선 검출기 두께에 따른 흡수효율을 3가지 영역으로 구분하였다. 3가지 영역은 빌드 업 영역, 최대선량 (D_{max}) 지점, 꼬리부로 명명하였다.

분석 결과, 빌드 업 영역에서는 반도체 소재에 무관하게 두께가 증가함에 따라 유사한 흡수효율 증가 추세가 분석되었다. 이는 방사선 검출기에 입사하는 고에너지 방사선에 의해 발생하는 전자·정공쌍이 방사선 검출기 내부에서 모두 흡수되는 2차 전자평형이 이루어지기에 불충분한 두께이기 때문으로 사료된다. 하지만, D_{max} 는 2차 전자평형이 완벽히 이루어지는 방사선 검출기의 두께를 의미하며, 이를 본 연구에서는 방사선 검출기의 최적화된 두께로써 고려하였다. D_{max} 가 나타

나는 방사선 검출기의 두께를 분석한 결과, 반도체 소재에 무관하게 150 μm 로 분석되었다. 또한, 꼬리부에서는 반도체 소재의 물성에 따라 흡수효율의 감소 추세가 상이한 것으로 분석되었다. 특히, PbO는 다른 반도체 소재에 비해 급격한 감소 추세가 분석되었는데, 이는 방사선 상호작용에서 주요한 인자로 알려져 있는 원자번호, 밀도가 다른 반도체 소재에 비하여 높기 때문인 것으로 사료된다.

2. Gamma-ray response properties

본 연구에서는 반도체 소재에 따른 방사선 검출기의 감마선 응답 특성을 분석하기 위해 방사선 검출기 상단을 선원 가이드 튜브 표면으로부터 0 - 50 mm 거리에 구현하였고, 거리에 따라 추정된 단위 시간 당 생성되는 전자·정공 쌍을 Fig. 3에 나타내었다.

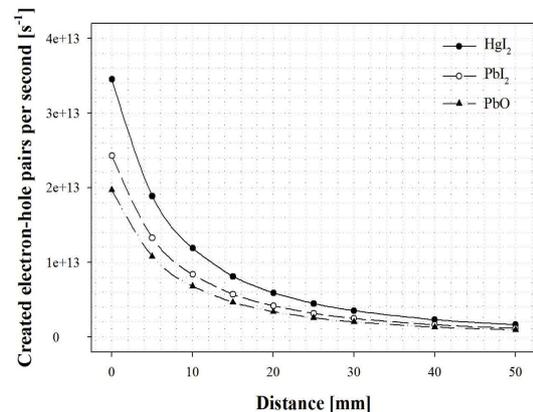


Fig. 3. Created charge as a function of distance between source guide tube and radiation detector.

연구 결과, 반도체 소재와 무관하게 방사선 검출기와 선원 가이드 튜브의 거리가 증가함에 따라 단위 시간 당 생성되는 전자·정공 쌍은 지수함수 적으로 감소하는 것으로 나타났다. 특히, HgI₂를 2차 전자평형이 이루어지는 150 μm 로 구현 시 에너지 흡수효율이 약 2.4%로 낮지만 감마선 응답 특성은 가장 우수한 것으로 분석되었다. PbI₂는 약 2.4%, PbO는 4.72%로 나타났다. 이러한 결과는 HgI₂가 PbO에 비해 상대적으로 유효원자번호와 밀도가 낮기 때문에 광전효과의 발생이 적은 것으로 분석하였다. 반면, PbI₂의 경우 물리적인 물성이 HgI₂와 유사하기 때문에 에너지 흡수효율의 결과도 유사한 것으로 사료된다. 하지만, 감마선 응답

특성은 1개의 전자·정공 쌍을 생성하기 위하여 요구되는 에너지로 정의되는 일함수가 중요하므로 다른 반도체 소재에 비하여 낮은 HgI₂가 가장 우수하였다.

IV. CONCLUSION

NDT 분야에서는 방사선원에 대한 잠재적 사고를 미연에 방지하기 위하여 방사선원의 위치를 직접적으로 검증하는 것이 중요하다. 이에 본 연구에서는 방사선원의 위치를 감지할 수 있는 모니터링 시스템의 개발을 위한 선행연구로서 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 방사선 검출기에 대한 감마선 응답 특성을 모의 추정하였다. 연구 결과, Ir-192의 감마선 에너지에 대한 2차 전자평형이 이루어지는 방사선 검출기의 두께는 반도체 소재에 무관하게 150 μm로 유사하지만, 반도체 소재의 원자번호, 밀도와 같은 물리적 성질에 따라 꼬리부의 변화가 나타났으며, 감마선 응답 특성은 거리가 증가함에 따라 지수함수 적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 차후 모니터링 시스템의 검출부에 위치하는 방사선 검출기의 최적화 두께와 더불어 검출부의 기하학적 위치를 결정하는데 있어 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017R1A2B4007511).

Reference

- [1] M. Eman, "Dose Assessment for Some Industrial Gamma Sources with an Application to a Radiation Accident", *Open Journal of Modeling and Simulation*, Vol. 1, No. 1, pp. 4-11, 2014.
- [2] G. T. Joo, J. S. Shin, D. E. Kim, J. H. Song, S. H. Cho and H. K. Chang, "Development of Automatic Remote Exposure Controller for Gamma Radiography", *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 22, No. 5, pp. 490-499, 2002.
- [3] K. J. Lee, J. I. Yun, B. G. Park, S. Kim, B. S. Lee, "Evaluation of luminance performance of scintillating film for monitoring the position of a radioactive source in an NDT apparatus", *Journal of Radiological Science and Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 13-17, 2005.
- [4] T. Istvan and V. Katalin, "Radiation Accidents: Occurrence, Types, Consequences, Medical Management, and the Lessons to be Learned", *Central European Journal of Occupational and Environmental Medicine*, Vol. 7, No. 1, pp. 3-14, 2001.
- [5] K. M. Oh, M. S. Yoon, M. W. Kim, S. H. Cho, S. H. Nam, J. K. Park, "Radiation detector materials development with multi-layer by hetero-junction for the reduction of leakage current", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 3, No. 1, pp. 9-13, 2009.
- [6] Y. K. Lee, M. S. Yon, D. H. Kim, S. L. Chun, B. D. Jung, J. G. Park, C. W. Mun, S. H. Nam, "The study of X-ray detection characteristic and fabrication photoconductor film thickness for Screen printing method", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 3, No. 2, pp. 11-16, 2009.
- [7] S. H. Jung, Y. S. Kim, Y. B. Kim, M. W. Kim, K. M. Oh, M. S. Yun, S. H. Nam, J. K. Park, "The study of PbO's sintering effect for high efficiency x-ray detection sensor", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 3, No. 3, pp. 37-40, 2009.
- [8] S. C. Noh, S. S. Kang, B. J. Jung, I. H. Choi, C. H. Cho, Y. J. Heo, J. S. Yoon, J. K. Park, "The Design and Fabrication of Conversion Layer for Application of Direct-Detection Type Flat Panel Detector", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 6, No. 1, pp. 73-77, 2012.
- [9] I. H. Choi, S. J. Noh, J. E. Park, J. K. Park, S. S. Kang, "The Fabrication and Evaluation of HgI₂ Semiconductor Detector as High Energy X-ray Dosimeter Application", *Journal of Korean Society of Radiology*, Vol. 8, No. 7, pp. 383-387, 2014.
- [10] J. E. Park, K. T. Kim, W. H. Choi, H. Lee, S. J. Cho, S. H. Ahn, J. Y. Kim, Y. K. Song, K. B. Kim, H. D. Huh, S. K. Park, "Evaluation of Fabrication Semiconductor Sensor for Verification of γ -ray Distribution in Brachytherapy", *Progress in Medical Physics*, Vol. 26, No. 4, pp. 280-285, 2015.

비파괴검사 분야에서 방사선원의 위치 확인을 위한 반도체 검출기 설계에 관한 연구

김교태,¹ 김주희,² 한무재,¹ 허예지,¹ 안기정,³ 박성광^{3,*}

¹인제대학교 의용공학과

²인제대학교 재난관리학과

³인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요 약

비파괴검사 분야에서는 작업자들의 안전을 확보하기 위해 방사선원에 대한 시스템 개발에 많은 시간과 재원을 투자하고 있으나 아직까지 사고 발생 확률은 높은 실정이다. 방사선에 대한 잠재적 사고를 미연에 방지하기 위해서는 방사선원의 위치를 직접적으로 검증하는 것이지만 아직까지 연구가 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 감마선조사기의 선원 가이드 튜브에서 방사선원의 위치를 감지할 수 있는 모니터링 시스템 개발을 위한 선행연구로써 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 방사선 검출기에 대한 특성을 모의 추정하였다. 연구 결과, Ir-192의 감마선 에너지에 대한 방사선 검출기는 반도체 소재에 무관하게 150 μm 에서 2차 전자평형이 이루어지는 것으로 분석되었으며, 감마선 응답 특성은 HgI_2 가 가장 우수할 것으로 기대된다. 이러한 결과는 차후 모니터링 시스템의 검출부에 위치하는 방사선 검출기의 최적화 두께를 결정하는데 기초자료로써 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 이를 바탕으로 모니터링 시스템을 개발 시 방사선작업종사자가 위험을 쉽게 인지하여 안전을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 잠재적인 방사선 사고에 대한 예방 및 선제적 대응이 가능함으로써 사회 안전망 구축에 기여할 수 있을 것이다.

중심단어: 비파괴검사, 감마선 조사기, 방사선원, 고체 검출기, 반도체 소재