

The Study on Design of lead monoxide based radiation detector for Checking the Position of a Radioactive Source in an NDT

Ki-Jung Ahn*

Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: August 10, 2017. Revised: August 19, 2017. Accepted: August 31, 2017

ABSTRACT

In recent years, the automatic remote control controller of the gamma ray irradiator malfunctions, and radiation workers are continuously exposed to radiation exposure accidents. In the non-destructive testing field, much time and resources are invested in establishing a radioactive source monitoring system in order to prevent potential incidents of radiation. In this study, the gamma-ray response properties of the lead monoxide-based radiation detector were estimated through monte carlo simulation as a previous study for the development of a radioactive source location monitoring system that can be applied universally to various non-destructive testing equipment. As a result of the study, the optimized thickness of the radiation detector varies according to the gamma-ray energy emitted from the radioactive source, and the optimized thickness gradually increases with increasing energy. In conclusion, the optimized thickness of the lead monoxide-based radiation detector was 200 μ m for the Ir-192, 150 μ m for the Se-75 and 300 μ m for the Co-60. Based on these results, the appropriate thickness of lead monoxide-based radiation detector considering secondary-electron equilibrium was evaluated to be 300 μ m for general application. These results can be used as a basic data for determining the appropriate thickness required in the radiation detector when developing a radiation source location monitoring system for universal application to various non-destructive testing equipment in the future.

Keywords: Non-destructive inspection, Gamma-ray projector, Radioactive source, Solid-state detector, lead monoxide

I. INTRODUCTION

NDT (Non-destructive inspection)의 목적은 제품에 대한 모양이나 기능을 변화시키지 않고 내부에 존재하는 결함을 영상화함으로써 품질을 검증하는 것이다. 최근, 감마선 조사기의 자동 원격 조사 제어기가 오동작하여 방사선작업종사자가 방사선 피폭 사고가 지속적으로 보고되고 있다.^[1] 이러한 산업재해는 하인리히의 법칙에 따르면 보고되고 있는 방사선 피폭 사고 보다 더 많은 잠재적 사고의 위험성이 있을 가능성이 있다. 이러한 방사선에 대한 잠재적 사고를 미연에 방지하는 근본적인 방안

은 방사선원의 위치를 직접적으로 검증하는 것이다.^[2,3] 이에 NDT 분야에서는 방사선에 대한 잠재적 사고를 미연에 방지하기 위한 방사선원 모니터링 시스템 구축에 많은 시간과 재원을 투자하고 있다. 하지만 아직까지 다양한 NDT 장비에 범용적으로 적용할 수 있는 방사선원 위치 모니터링 시스템은 기술적 어려움으로 개발되지 못하고 있으며 이에 대한 개발의 필요성은 점차 증가하고 있다. 이에 본 연구에서는 방사선원에서 방사되는 감마선을 통하여 위치를 검출할 수 있는 산화납 (Lead monoxide, 이하 PbO) 기반 방사선 검출기를 개발하기 위한 선행 연구로써 몬테카를로 (Monte Carlo, 이하 MC) 시뮬레이션을 수행하였다.

* Corresponding Author: Ki Jung Ahn

E-mail: 103803@paik.ac.kr

Tel: +82-51-890-6691

II. EXPERIMENTAL METHODS

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 방사선원, 선원 가이드 튜브, 방사선 검출기를 Fig. 1과 같이 모델링함으로써 MC 시뮬레이션을 수행하였다.^[4] 또한, MC 시뮬레이션에서 설정한 기하학적 조건을 Table 1에 나타내었다.

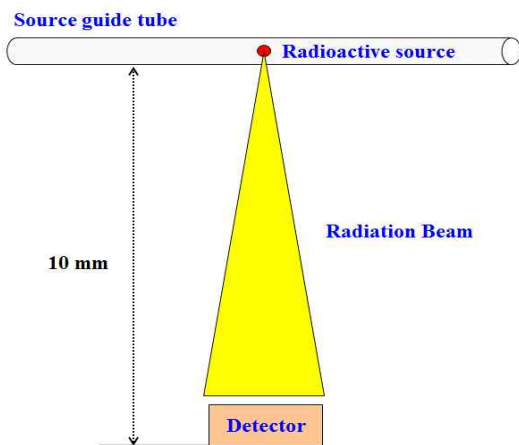


Fig. 1. Schematic diagram of designed of the geometrical model in for MC simulation.

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,c)	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 Tungsten 3.3 mm을 고려하여 설계하였음.

(c) T는 두께를 의미한다.

Table 2. Basic properties of radioactive source.

Note	Se	Ir	Co
mass number	75	192	60
Gamma Energy [MeV]	0.215	0.38	1.25
Half-Life [day]	120	74	1920
Rhm [R·m ² /Ci·h]	0.203	0.48	1.32

MC 시뮬레이션에 사용된 방사선원은 비파괴산업분야에서 감마선의 이용을 위하여 주로 사용되는 방사선원 중 Ir-192, Se-75, Co-60를 선정하였다.^[5] Table 2는 MC 시뮬레이션에 이용된 감마선원에 대한 기본적 특성을 나타내고 있다. 선원 가이드 튜브는 측정 대상물에 방사선원을 이동 시킬 때 방사되는 방사선의 강도를 감쇠시키면서도 이동 경로의 역할을 수행한다. 또한, Ir-192의 초기 강도를 50%로 감약시킬 수 있는 두께 3.3 mm의 텅스텐 재질로 설계하였다. 방사선 검출기는 반도체 소재로 구성된 고체 검출기으로써 방사선원에서 방출된 감마선과 상호작용하여 흡수선량을 측정하는 역할을 수행한다.^[6-10] 일반적으로 이상적인 방사선 검출기를 개발을 위해서는 검출기의 소형화, 신호의 재현성, 방사선에 대한 빠른 응답 시간, 방사선량에 대한 선형성 등이 요구된다.^[11] 검출기의 소형화는 부피 효과에 기인하여 발생할 수 있는 신호의 오차를 최소화하기 위하여 요구되고, 신호의 재현성은 측정된 신호에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 요구되며, 빠른 응답 시간은 지속적으로 입사되는 광자를 실시간으로 측정하기 위해 요구된다. 본 연구에서 이용된 PbO는 다른 타 반도체 소재에 비하여 높은 바이어스 영역에서 낮은 누설전류와 높은 분해능을 가지는 특성을 나타낼 뿐만 아니라 입사되는 광자에 대하여 빠른 응답특성을 가지는 것으로 보고되고 있다.^[12] 이에 본 연구에서는 PbO로 구성된 방사선 검출기를 구현하였고 방사선원에 따른 감마선 응답 특성을 모의 추정하였다. 이 때, MC 시뮬레이션에 사용된 PbO는 유효원자번호 76.7, 원자밀도 9.53 g/cm³으로 설정하였다.

2. Design of the radioactive source

본 연구에서 방사선원은 선원 가이드 튜브 내부에 점선원으로써 구현하고 방사선원에서 발생하는

감마선 에너지를 정의하였다. 또한, 방사선원에서 방출된 광자들의 모의수송을 정의하기 위하여 Monte P를 이용하였고, 에너지는 Table 2에서 제시된 방사선원에 대한 단일 광자로써 정의하였으며 광자의 발생 시간은 감마상수 (Rhm)을 고려하여 제어하였다.

3. Design of the radiation detector

본 연구에서는 방사선원에서 노출되는 방사선 에너지에 대한 상대적인 흡수선량 (Relative Absorption Dose)의 분석을 위하여 방사선 검출기를 구현하였다. 이 때, 시뮬레이션 결과를 얻기 위한 Tally specification card는 F6 Tally를 통하여 방사선 검출기에서 흡수될 확률을 5×10^7 번의 샘플링을 통해 모의 추정하였다.

III. RESULT AND DISCUSSION

1. Relative absorption dose

본 연구에서 방사선원에 따른 방사선 검출기의 최적화 두께를 평가하고자 상대적인 흡수선량을 평가하였다. 이 때, 기하학적 구조는 방사선 검출기 하단을 선원 가이드 튜브 표면으로부터 10 mm에 구현하였다. 또한, 방사선 검출기의 두께에 따른 산출된 흡수선량 중 가장 높은 값으로 정규화하여 Fig. 2에 나타내었다.

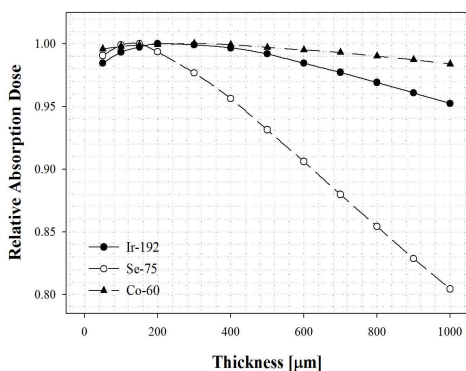


Fig. 2. Relative absorption dose as a function of thickness for radiation detector.

연구 결과, 방사선 검출기의 두께가 증가함에 따라 상대적인 흡수선량의 극점을 가지는 것으로 분석되었으며 이를 기준으로 추세 변화가 나타났다.

본 연구에서는 이러한 결과를 정량적으로 분석하기 위하여 방사선 검출기 두께에 따른 상대적인 흡수선량을 3가지 영역으로 구분하였다. 3가지 영역은 빌드 업 영역, 최대선량 (D_{\max}) 지점, 꼬리부로 명명하였다.

분석 결과, 빌드 업 영역에서는 방사선원과 무관하게 검출기의 두께가 증가함에 따라 상대적인 흡수선량이 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 방사선 검출기의 정밀한 측정에 중요한 요소 중 하나인 2차 전자평형이 이루어지지 않았다는 것을 의미한다. 반면, D_{\max} 는 2차 전자평형이 이루어지는 방사선 검출기 두께를 의미한다. 이 때, 2차 전자평형이 이루어지는 최적화 지점은 일반적으로 입사하는 감마선 에너지에 의하여 생성된 2차 전자의 최대 비정과 유사하다. 이러한 D_{\max} 가 나타나는 방사선 검출기 두께를 분석한 결과, Ir-192의 경우 200 μm , Se-75의 경우 150 μm , Co-60의 경우 300 μm 로 나타났다. 이러한 결과는 2차 전자의 최대 비정과 입사하는 감마선 에너지의 관계가 비례관계에 있으므로 이론에 부합하는 결과가 도출되었음을 알 수 있다. 또한, 꼬리부에서는 방사선 검출기가 증가함에 따라 상대적인 흡수선량의 감소 추세가 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 감마선 에너지에 의하여 결정되는 질량 에너지 흡수 계수의 차이에 기인하는 것으로 사료된다. 이는 방사선 감약 정보를 나타내는 것으로 알려져 있으며 일반적으로 에너지가 증가함에 따라 점차 감소하는 값을 가진다. 미국표준기술연구소에서는 PbO의 주성분인 Pb에 대한 질량 에너지 흡수 계수를 Fig. 3과 같이 제시하고 있다.^[13]

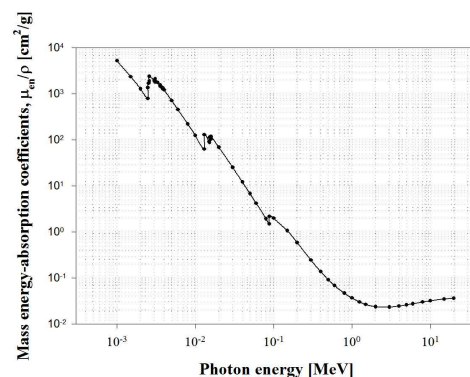


Fig. 3. Mass energy-absorption coefficients in lead.

이 때, Se-75에서 방사되는 방사선의 에너지의 경우 약 $0.587 \text{ cm}^2/\text{g}$, Ir-192는 약 $0.137 \text{ cm}^2/\text{g}$, Co-60는 $0.029 \text{ cm}^2/\text{g}$ 로 나타난다. 이러한 질량 에너지 흡수 계수의 값은 방사선 에너지에 따라 PbO 기반 방사선 검출기에서 흡수되는 영향을 정량적으로 표현하므로 본 연구에서 MC 시뮬레이션을 통하여 획득된 상대적인 흡수선량의 결과가 이론에 부합하는 것을 알 수 있다.

이러한 연구 결과들을 바탕으로 최적화된 방사선 검출기를 제작하기 위해서는 방사선원에서 방사되는 감마선 에너지에 대하여 2차 전자평형이 이루어지는 최대선량 지점에 부합하는 방사선 검출기의 두께 설정이 중요함을 검증하였으며 에너지가 증가함에 따라 두께가 증가한다는 것을 정량적으로 고찰하였다.

2. Gamma-ray response properties

본 연구에서는 방사선원에 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. 4에 나타내었다. 또한, 방사선 검출기 두께는 Ir-192의 경우 200 μm , Se-75의 경우 150 μm , Co-60의 경우 300 μm 로 구현하였다.

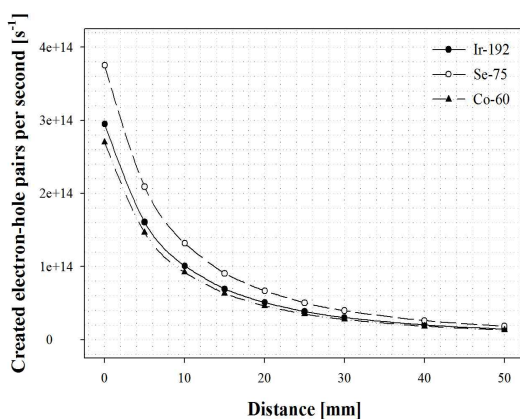


Fig. 4. Created charge as a function of distance between source guide tube and radiation detector.

연구 결과, 방사선 검출기와 선원 가이드 튜브의 거리가 증가함에 따라 단위시간 당 생성되는 전자-

정공 쌍은 지수함수 적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로써 본 연구에서 수행된 MC 시뮬레이션이 거리역자승의 법칙에 잘 부합한다는 것을 의미한다. 또한, 생성된 전자-정공 쌍의 수를 분석하면 10 mm 지점에서 Se-75의 경우 $1.32E+14$ 로 가장 높은 반면, Ir-192는 $1.01E+14$, Co-60은 $0.92E+14$ 로 분석되었다. 이러한 결과는 입사하는 방사선 에너지와 광전효과 발생효율의 관계로 설명할 수 있다. 광전효과의 발생효율의 수식은 일반적으로 Eq. (1)과 같이 정의 할 수 있다.

$$PE = Z^n \times E_r^{-3} \quad (1)$$

PE는 광전효과의 발생 효율을 의미하고 Z는 유효원자번호를 의미하며 E_r 은 입사하는 광자에너지를 의미한다. 또한, n은 비례상수로써 일반적으로 3 ~ 5승으로 알려져 있다. 이러한 수식에서 방사선 검출 물질의 유효원자번호는 76.7로 설정된 상수이므로 광전효과의 발생효율은 입사하는 광자에너지에 대하여 3승에 반비례하는 관계를 가진다. 그러므로 본 연구에서 모의 추정 결과가 이론적으로 부합하는 것으로 사료된다.

IV. CONCLUSION

비과괴산업 분야에서 이용되고 있는 NDT 장비에 의한 방사선 사고를 미연에 방지하기 위해서는 방사선원의 위치를 직접적으로 검증할 수 있는 방사선원 위치 모니터링 시스템의 개발이 중요하다. 이러한 방사선원 위치 모니터링 시스템에서 방사선 검출기는 방사선원의 위치를 검증하기 위한 핵심 소재로써 일반적으로 2차 전자평형이 이루어지는 두께인 최대선량지점 보다 방사선 검출기의 두께가 얇을 경우 측정 오차가 크기 때문에 2차 전자평형이 이루어지는 두께를 고려해야만 한다. 이에 본 연구에서는 다양한 NDT 장비에 범용적으로 적용할 수 있는 방사선원 위치 모니터링 시스템의 개발을 위한 선행연구로써 MC 시뮬레이션을 통해 PbO 기반 방사선 검출기에 대한 감마선 응답 특성을 모의 추정하였다. 연구 결과, 방사선 검출기의 최적화 두께는 방사선원에서 방사되는 감마선 에

너지에 따라 상이하하며 에너지가 증가함에 따라 최적화 두께가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 결론적으로 PbO 기반 방사선 검출기의 최적화 두께는 Ir-192에 대하여 200 μm , Se-75 150 μm , Co-60 300 μm 로 분석되었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 범용적으로 적용할 수 있는 PbO 기반 방사선 검출기의 두께는 300 μm 가 적절할 것으로 평가하였다. 또한, 감마선 응답 특성은 거리가 증가함에 따라 지수함수 적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 차후 다양한 NDT 장비에 범용적으로 적용하기 위한 방사선원 위치 모니터링 시스템을 개발 시 방사선 검출기에서 요구되는 적절한 두께를 결정하는데 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

Reference

- [1] S. Prakarn, *Radiological Accident in samut Prakarn*, International Atomic Energy Agency, Vienna, pp. 1-52, 2002.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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 Korean Society of Radiology*, Vol. 11, No. 3, pp. 171-175, 2017.
- [5] S. K. Park, Y. S. Ahn and D. S. Gil, "The study on Radiation source optimization for boiler tube weldments", *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 28, No. 4, pp. 9-13, 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. Almagia, M. Marinelli, E. Milani, A. Tucciarone, G. Verona-Rinati, R. Consorti, A. Petrucci, F. De Notaristefani, I. Ciancaglioni, "Synthetic single crystal diamond diodes for radiotherapy dosimetry." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. 594, No. 2, pp. 273-277, 2008.
- [12] M. Simon, R. A. Ford, A. R. Franklin, S. P. Grabowski, B. Menser, G. Much, A. Nascetti, M. Overdick, M. J. Powell and D. U. Wiechert, "Analysis of Lead oxide (PbO) layers for direct conversion X-ray detection.", *IEEE Transactions on nuclear science*, Vol. 52, No. 5, pp. 2035-2040, 2005.
- [13] <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/ElementTab/z82.html>

비파괴검사 분야에서 방사선원의 위치 확인을 위한 산화납 기반 방사선 검출기 설계에 관한 연구

안기정*

인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요 약

최근, 감마선 조사기의 자동 원격 조사 제어가 오동작하여 방사선작업종사자가 방사선 피폭 사고가 지속적으로 보고되고 있다. 이에 NDT 분야에서는 방사선에 대한 잠재적 사고를 미연에 방지하기 위한 방사선원 모니터링 시스템 구축에 많은 시간과 재원을 투자하고 있다. 이에 본 연구에서는 다양한 비파괴검사 장비에 범용적으로 적용할 수 있는 방사선원 위치 모니터링 시스템의 개발을 위한 선행연구로써 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 산화납 기반 방사선 검출기에 대한 감마선 응답 특성을 모의 추정하였다. 연구 결과, 방사선 검출기의 최적화 두께는 방사선원에서 방사되는 감마선 에너지에 따라 상이하며 에너지가 증가함에 따라 최적화 두께가 점차 증가하는 것으로 나타났다. 결론적으로 PbO 기반 방사선 검출기의 최적화 두께는 Ir-192에 대하여 200 μm , Se-75 150 μm , Co-60 300 μm 로 분석되었다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 범용적으로 적용하기 위하여 2차 전자 평형을 고려한 PbO 기반 방사선 검출기의 적절한 두께는 300 μm 로 평가되었다. 이러한 결과는 차후 다양한 NDT 장비에 범용적으로 적용하기 위한 방사선원 위치 모니터링 시스템을 개발 시 방사선 검출기에서 요구되는 적절한 두께를 결정하는데 있어 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 비파괴검사, 감마선 조사기, 방사선원, 고체 검출기, 산화납