

# Evaluation of Angle Dependence on Positional Radioisotope Source Detector using Monte Carlo Simulation in NDT

Moojae Han,<sup>1,2</sup> Seunguk Heo,<sup>3</sup> Yohan Shin,<sup>1,2</sup> Jaehoon Jung,<sup>3</sup> Kyotae Kim,<sup>4</sup> Yeji Heo,<sup>2</sup> Deukhee Lee,<sup>5</sup> Heunglae Cho,<sup>5</sup> Sungkwang Park<sup>2,5,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Radiation Oncology, Collage of Medicine, Inje University

<sup>2</sup>Department of Medical Imaging Research Institute, Inje university

<sup>3</sup>Research for Conveergence of Biomedical Science and Technology, Pusan National University Yangsan Hospital

<sup>4</sup>Korea Institute of Radiological and Medical Sciences

<sup>5</sup>Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: February 07, 2019. Revised: February 26, 2019. Accepted: February 28, 2019

## ABSTRACT

Radiation sources used in the field of industrial non-destructive pose a risk of exposure due to ageing equipment and operator carelessness. Thus, the need for a safety management system to trace the location of the source is being added. In this study, Monte Carlo Simulation was performed to analyse the angle dependence of the unit-cell comprising the line-array dosimeter for tracking the location of radiation sources. As a result, the margin of error for the top 10% of each slope was 5.90% at 0°, 8.08% at 30°, and 20.90% at 60°. The ratio of the total absorbed dose was 83.77% at 30° and 53.36% at 60° based on 0°(100%) and showed a tendency to decrease with increasing slope. For all gradients, the maximum number was shown at 30° No. 9 pixels, and for No. 10, there was a tendency to drop 7.24 percent. This study has shown a large amount of angle dependence, and it is estimated that the proper distance between the source and line-array dosimeters should be maintained at a distance of not less than 1 cm to reduce them.

Keywords: positional source detector, angle dependence, Monte Carlo Simulation, FLUKA

## I. INTRODUCTION

산업 비파괴 검사(Nondestructive testing; NDT)의 목적은 대상에 물리적인 손상을 입히지 않으면서 내부 결함의 이미지를 통해 제품의 품질을 평가하는 것이다. 최근 산업 NDT 분야에서는 방사성동위원소(Radioisotope; RI) 선원을 사용하는 자동 원격 검사 제어기기의 오작동과 근로자의 부주의로 인해 선원이 노출되는 많은 사건들이 보고 되어왔다.<sup>[1]</sup> 이때 노출된 선원은 5 mm 이내 작은 크기를 가지기 때문에 위치를 확인하기 어렵다. 또한 노출된 사실을 모르고 방치할 경우 누적되는 피폭 선량

으로 인해 더 큰 위험이 발생할 수 있다. 그러므로 NDT 피폭 사고를 예방하기 위한 방사선원 안전관리시스템 개발 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 감마선 촬영의 안전성을 위한 RI 선원의 위치 검증은 필수적인 요소로 자리 잡고 있다.<sup>[2,3]</sup>

현재 RI 선원의 위치를 식별하는 프로젝터는 모니터링 시스템을 포함하고 있으며 이는 방사선을 가시광선으로 변환하는 형광체 기반 필름의 빛을 포착하는 검출기로 구성된다.<sup>[4]</sup> 그러나 이러한 유형의 모니터링 시스템에는 탐지기의 부피가 크기 때문에 많은 움직임이 수반되며 시간이 오래 걸리고 비용이 높은 단점이 있다. 반면 반도체 선량계

\* Corresponding Author: Sungkwang Park

E-mail: physicist@paik.ac.kr

Tel: +82-10-4568-3143

는 방사선에 의해 발생하는 전하를 수집하는 방식으로 방사선 검출에 상업적으로 사용되고 있으며, 두께가 얇고 민감하며 반응 시간이 빠른 장점을 가진다. 이에 RI 선원의 위치 확인을 위한 광도전체 기반의 array 검출기의 unit-cell 성능 평가항목으로 재현성, 선형성, 거리의존성에 대한 평가가 이루어지고 있다.<sup>[5,6]</sup> 하지만 microSelectron-HDR Ir-192 시뮬레이션 비교 연구에 따르면, 선원으로부터 15 cm 간격에 대하여 10,000에서 40까지 scale로 표현되는 등전량 수치에서, 선원으로부터 1 cm 거리의 선량은 공기에서 5% ~ 7%의 오차를 보인다.<sup>[7]</sup> 이에 선원으로부터 1 cm 내외의 실측 실험은 급격한 등전량 분포변화를 보이기 때문에 결과에 대한 신뢰성을 나타내기 어려운 문제점이 있다.

한편 광도전체 물질 중 요소드화수은(Mercury (II) Iodide; HgI<sub>2</sub>)은 비교적 높은 신호발생효율을 가짐으로써 거리에 따라 달라지는 신호 특성을 분석하기에 용이한 장점을 나타낸다.<sup>[8,9]</sup> 이에 본 연구에서는 주사기에 적용할 수 있는 HgI<sub>2</sub> unit-cell 선량계의 각도의존성을 분석하기 위한 기초연구로써, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 사용된 tool은 유럽원자핵공동연구소(CERN)에서 개발한 FLUKA(FLUkuie rende KAskade)<sup>[10]</sup>를 활용하였다. FLUKA는 현재 다양한 물리모델을 적용하고 있으며 그에 따른 정확도가 입증되었다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. Experimental method

FLUKA를 포함한 대부분의 방사선 몬테카를로 시뮬레이션은 기하학적 설계, 선원 정보, scoring, 결과 분석 단계를 거쳐야 한다. 기하학적 설계는 가장 기본적으로 수행하여야 할 항목으로 방사선 노출 및 조사 환경을 실제와 같게 모델링 하는 것이다. 이에 본 연구에서는 RI 선원의 위치 검증을 위한 line-array 선량계에 포함되는 unit-cell 선량계에 대한 각도의존성 평가를 위한 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 이후 해당 모델을 FLUKA 코드에 동일하게 기하학적 설계를 수행하였다. Fig. 1은 각도의존성 평가를 위한 도식화된 시뮬레이션 모델

이다. 설계된 unit-cell 선량계는 1 cm × 1 cm 로 구성하였으며, 구간별 선량분포의 정량적인 평가를 위해 0.1 cm × 0.1 cm의 pixel 단위로써 총 100개의 pixel로 세분화하였다. 이때 unit-cell 선량계의 두께는 수 MV 단위의 고에너지 선량을 계측할 수 있는 최소두께인 200 μm 로 구성하였다.<sup>[5]</sup>

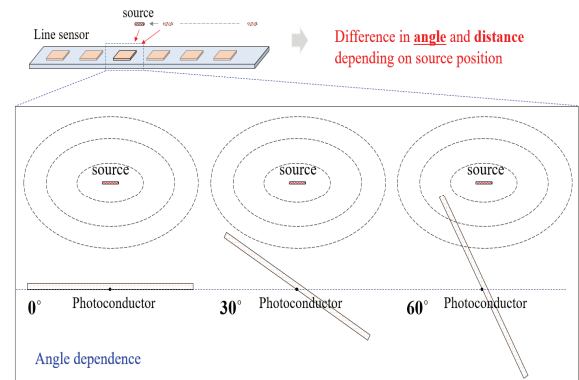


Fig. 1. Monte Carlo Simulation modeling.

RI 선원의 경우 설계된 unit-cell 선량계의 중심점을 기준으로 1 cm 간격을 두었으며, 조사각도는 0°, 30°, 60° 로 설정하였다. Table 1과 Fig. 2는 FLUKA 코드에서 구현한 Ir-192 선원에 대한 정보를 나타내고 있다.<sup>[11]</sup>

Table 1. Source term (Ir-192)

RI Info.	Z (Atomic Number)	77
	A (Mass Number)	192
	Energy	Approximately 300 KeV
RI Size	Type	Cylinder
	Diameter	0.65 mm
	Length	3.60 mm
RI Shield	Material	AISI316L steel
	Diameter	0.90 mm
	Length	4.50 mm

Scoring을 위해 unit-cell 선량계(HgI<sub>2</sub>, 1 cm × 1 cm)를 USBIN card를 이용하였으며, unit-cell 선량계의 전체 흡수선량 분포를 얻기 위해, scoring type을 선량으로, 10 × 10 binning 하여 1 mm × 1 mm size로 100개의 흡수선량(GeV/g)을 얻도록 설계하였다.

Scoring Data는 수송 결과의 신뢰도 확보를 위해 statistical errors를 5% 이내로 설정하였고, statistical errors를 5%로 도출하기 위해 0°의 NPS(Number of Particles)는  $5 \times 10^6$ 으로, 30° 및 60°의 NPS는  $1 \times 10^7$ 로 설정하였다.

Ir-192의 Photon flux와 unit-cell 선량계와의 흡수 선량(GeV/g)과의 상관관계는 아래의 Eq. (1)에 의해 계산되며, 동일선량 비교를 목적으로 하기 때문에 시간은 모두 동일한 조건으로 고려하지 않았다.

$$A \left( \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right) \times B \left( \frac{10^9 \text{eV}}{\gamma} \right) \times C \left( \frac{\text{cm}^2}{\text{g}} \right) \times D \left( \frac{1000\text{g}}{\text{kg}} \right) \quad (1)$$

A : Photon flux

B : Gamma Source energy

C : Mass absorption coefficient

D : refraction coefficient

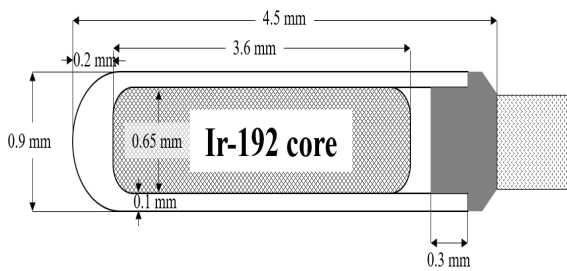


Fig. 2. Diagram of Ir-192 source.

## 2. Evaluation method

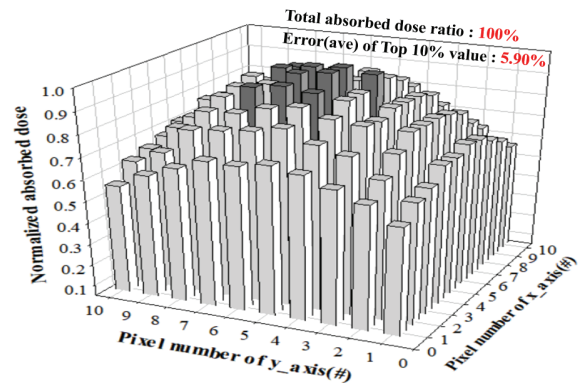
본 연구에서는 고정된 Ir-192 선원에 대하여 unit-cell 선량계의 중심축을 기준으로 기울기 0°, 30°, 60°에 대한 흡수선량 분포도 제시하였으며, 각 기울기에 흡수선량 수치를 비교하였다. 분포도 분석의 경우, 각각의 기울기 결과의 최대 수치를 기준으로 정규화 하였다. 또한 선량분포가 높은 영역에서의 크기 변화를 나타내기 위해 상위 10%에 속하는 분포에 대하여 오차율을 제시하였다. 또한 모든 기울기에 대한 총 흡수선량 값을 제시하기 위해 0°의 총 흡수선량 기준으로 정규화 하였다. 각 기울기의 수치비교는 unit-cell 선량계 중앙에 위치하는 x축을 기준으로 모든 각도에 대한 수치를 나타내었

으며, 가장 높은 흡수선량 수치를 나타내는 30°의 No.9 pixel 수치를 기준으로 정규화 하였다.

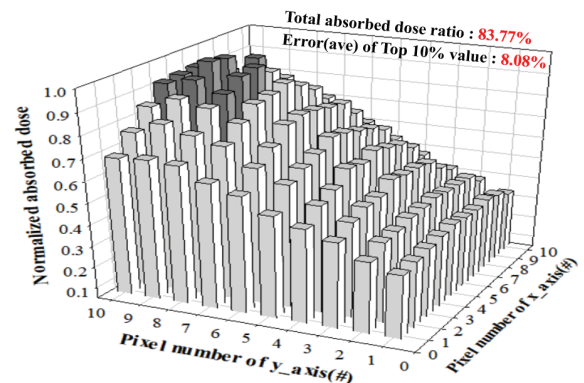
## III. RESULT

### 1. Absorbed Dose distribution

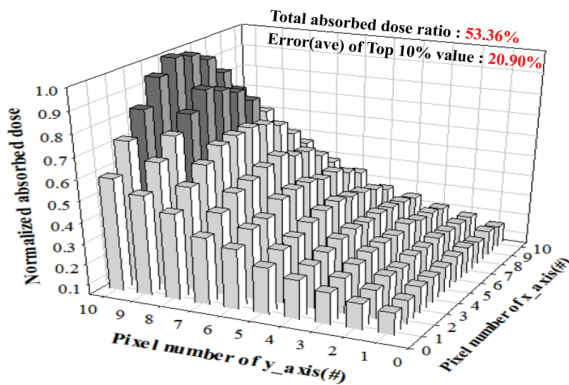
본 연구에서는 고정된 Ir-192 선원에 대하여 unit-cell 선량계의 중심축을 기준으로 기울기 0°, 30°, 60°에 대한 선량 분포도를 확인함으로써 각도의존성에 대한 경향성을 분석하였다. Fig. 3은 각 시편 기울기에 대한 분포도 결과를 나타내고 있다. (a)는 고정된 선원에 대하여 정방향인 0°를 나타내며, (b)는 30°, (c)는 60° 기울기를 나타낸다. 이때 상위 10% 수치에 대한 오차율은 기울기 0°에서 5.90%, 기울기 30°에서 8.08%로써 10% 이내 오차율을 보이며, 선원과 근접한 영역으로 이동하는 경향성을 보였다.



(a) Degree 0



(b) Degree 30



(c) Degree 60

Fig. 3. Absorbed dose distribution according to each angle.

기울기 60°의 경우, 20.90%의 오차를 나타내며 선원과 근접한 영역으로 분포도가 급격히 증가하는 경향성을 보였다. 이때 총 흡수선량의 비율은 0°(100%)를 기준으로 30°에서 83.77%, 60°에서 53.36%로 나타났으며, 고정된 선원에 대하여 unit-cell 선량계의 기울기가 증가할수록 흡수선량은 감소하는 경향성을 보였다.

2. Comparison of Absorbed Dose

본 연구에서는 각 기울기 분포에 대한 정량적 수치를 비교하기 위해 x축 No.5 pixel에 위치하는 y축의 모든 pixel 수치를 비교하였다. Fig. 4는 0°, 30°, 60°의 흡수선량에 대한 정규화된 수치를 나타내고 있다.

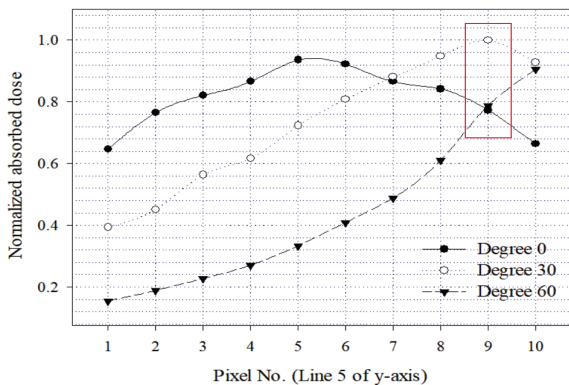


Fig. 4. Absorbed dose about line 5 of y-axis.

본 연구 결과 0°는 중심 지점을 나타내는 No.5 pixel에서 최대 선량수치를 보였다. 30°는 한쪽 영역으로 흡수선량이 선형적으로 증가하며, 60°의 경

우는 2차 함수적으로 급격하게 증가하는 경향성을 보였다. 흡수선량의 최대 수치는 30°의 No.9 pixel에서 나타났으며, No.10 pixel에서 7.24% 감소된 수치를 보인다. 이는 30°의 No.9 pixel은 가장 효율적인 측정 지점을 의미한다. 0°의 No.9 pixel과 60°의 No.9 pixel은 선원과의 거리가 다르지만 유사한 흡수선량 수치를 보였다.

IV. DISCUSSION & CONCLUSION

본 연구는 RI 선원의 위치 추적을 위한 line-array 선량계의 각도의존성을 분석하기 위한 연구로써, 몬테카를로 시뮬레이션 코드 중 하나인 FLUKA 코드를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 기울기가 증가함에 따라서 선원과의 거리가 근접한 영역에서 높은 수치를 보였지만, 일정 거리에서 누설되는 선량이 발생되어 수치가 낮아지는 경향을 보였다. 선량 분포도에서 상위 10% 영역은 기울기가 높아질수록 오차가 크게 발생되며 이는 1 cm 이내 거리에서는 각도의존성의 크게 발생하는 결과를 보였다. 본 결과는 선원과 거리가 근접할수록 투과선량이 크게 발생되기 때문에 오차를 발생시키는 원인이 될 수 있으며, 선원으로부터 받아들이는 조사야 차이로 인한 결과로 사료된다. 본 연구는 선원의 위치 추적을 위한 선량계의 적정거리를 확인할 수 있는 지표로 활용될 수 있다. 이는 고선량률 근접치료계획 시스템에서 1 cm 거리를 기준으로 계획하는 것과 같이<sup>[12]</sup> unit-cell 선량계의 각도의존성을 줄이기 위해서는 1 cm 이상의 적정거리를 유지해야 하는 것으로 사료된다. 또한 line-array 선량계의 최적화를 위해 흡수선량을 높이기 위한 두께 효율성과 거리의존성에 대한 추가적인 연구가 이루어진다면, 방사선원을 이용하는 모든 분야에서 안전관리 시스템 구축을 위한 정확한 지표를 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

Acknowledgment

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

---

## Reference

- [1] P. Guide, Manual on gamma radiography, International Atomic Energy Agency PRSM 1, Austria, pp. 1-57, 1996.
- [2] E. Massoud, "Dose assessment for some industrial gamma sources with an application to a radiation accident, Open Journal of Modelling and Simulation," Vol. 2, No. 1, pp. 4-11, 2014.
- [3] G. T. Joo, J. S. Shin, D. E. Kim, J. H. Song, S. H. Choo, H. K. Chang, "Development of automatic remote exposure controller for gamma radiography," Journal of Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 22, No. 5, pp. 490-499, 2002.
- [4] 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 Technology, Vol. 28, No. 1, pp. 13-17, 2005.
- [5] K. T. Kim, J. H. Kim, M. J. Han, Y. J. Heo, S. K. Park, Characterization of a new dosimeter for the development of a position-sensitive detector of radioactive sources in industrial NDT equipment, Journal of Instrumentation, Vol. 13, No. 2, C02003, 2018. DOI:10.1088/1748-0221/13/02/C02003
- [6] Y. J. Heo, K. T. Kim, M. J. Han, C. W. Moon, J. E. Kim, J. K. Park, S. K. Park, "Development of a stable and sensitive semiconductor detector by using a mixture of lead(II) iodide and lead monoxide for NDT radiation dose detection," Journal of Instrumentation, Vol. 13, No. 3, C03023, 2018. DOI:10.1088/1748-0221/13/03/C03023
- [7] D. Terribilini, P. Manser, D. Frei, W. Volken, R. Mini, M. K. Fix, "Implementation of a brachytherapy Ir-source in an in-house system and comparison of simulation results with EGSnrc, VMC++ and PIN," Journal of Physics: Conference Series, Vol. 74, No. 1, pp. 12-22, 2007.
- [8] G. Hajdok, J. J. Battista, I. A. Cunningham, "Fundamental X-ray interaction limits in diagnostic imaging detectors: Spatial resolution," Medical Physics, Vol. 35, No. 7, pp. 3180-3193, 2008.
- [9] K. M. Oh, J. S. Kim, J. W. Shin, S. U. Heo, G. S. Cho, D. K. Kim, J. G. Park, S. H. Nam, "Improvement in pixel signal uniformity of polycrystalline mercuric iodide films for digital X-ray imaging," Japanese Journal of Applied Physics, Vol 53, No. 3, 031201, 2014. DOI:10.7567/JJAP.53.031201
- [10] <http://www.fluka.org/>
- [11] R. Herrera, *MCNP5 Monte Carlo based Dosimetry for the Nucletron Iridium-192 High Dose-rate Brachytherapy Source with Tissue Heterogeneity Corrections*, Florida, pp. 1-76, 2012.
- [12] M. Sawicki, *Treatment Planning in Brachytherapy HDR Based on Three-Dimensional Image*, Book Citation Index, London, pp. 28-61, 2017.



# 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 방사선원 위치 검출기의 각도의존성 연구

한무재,<sup>1,2</sup> 허승욱,<sup>3</sup> 신요한,<sup>1,2</sup> 정재훈,<sup>3</sup> 김교태,<sup>4</sup> 허예지,<sup>2</sup> 이득희,<sup>5</sup> 조흥래,<sup>5</sup> 박성광<sup>2,5,\*</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 의과대학 방사선종양학과

<sup>2</sup>인제대학교 의료영상연구소

<sup>3</sup>양산부산대학교병원 의생명융합연구소

<sup>4</sup>한국원자력의학원

<sup>5</sup>인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

## 요 약

산업 비파괴 분야에서 사용되는 방사선원은 장비의 노후화 및 작업자의 부주의로 인해 선원이 노출되는 사고가 발생되어 왔다. 이에 선원의 위치를 실시간으로 추적할 수 있는 안전관리 시스템의 필요성이 부각되고 있다. 이에 본 연구에서는 방사선원의 위치 추적을 위한 line-array 선량계를 구성하는 unit-cell 선량계 단위의 각도의존성을 분석하기 위해 Monte Carlo Simulation을 수행하였다. 그 결과 각 기울기에서 상위 10% 수치에 대한 오차율은 0°에서 5.90%, 30°에서 8.08%, 60°에서 20.90%의 오차율을 보였다. 총 흡수선량의 비율은 0°(100%)를 기준으로 30°에서 83.77%, 60°에서 53.36%로 나타났으며 기울기가 증가함에 따라 낮아지는 경향성을 보였다. 모든 기울기에서 최대 수치는 30°의 No. 9에서 나타났으며, No. 10에서는 7.24% 낮아지는 경향성을 보였다. 본 연구 결과 각도의존성은 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 이를 낮추기 위해서는 선원과 line-array 선량계의 적정거리는 1 cm 이상의 거리에서 유지해야 하는 것으로 사료된다.

중심단어: 선원 위치 검출기, 각도 의존성, 몬테카를로 시뮬레이션, 플루카

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	한무재	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
	허승욱	양산부산대학교병원 의생명융합연구소	연구원
	신요한	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
	정재훈	양산부산대학교병원 의생명융합연구소	연구원
(공동저자)	김교태	한국원자력의학원	연구원
	허예지	인제대학교 의료영상연구소	연구원
	이득희	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	연구원
	조흥래	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	정교수
(교신저자)	박성광	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	부교수