

# The Study on Applicability of Semi-conductive Compound for Radioactive Source Tracing Dosimeter in NDT Field

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

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

<sup>2</sup>Research Institute for Convergence of Biomedical Science and Technology, Pusan National University Yangsan Hospital

<sup>3</sup>Korea Institute of Radiological and Medical Sciences

<sup>4</sup>Department of Medical Imaging Research Institute, Inje-university

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

Received: January 07, 2019. Revised: February 25, 2019. Accepted: February 28, 2019

## ABSTRACT

Radiation safety management is being considered very important since radioactive isotopes such as Co-60 and Ir-192 are widely used in fields such as non-destructive test(NDT). In this study, the applicability of Mercury(II) Iodide(HgI<sub>2</sub>) source for tracing system was evaluated. To make sure the unit cell sensor's reliability, we evaluated the electrical properties of the sensor made with HgI<sub>2</sub>, and then position dependence of the sensor was analyzed and compared with the dose distribution from the planning system. As a result of the evaluation, high reliability of the sensor was shown through the linearity of R-sq > 0.990 and reproducibility of CV < 0.015. In the position dependence evaluation, the maximum value was measured at the isocenter of the sensor and gradually decreased according to the distance. However, the dose distribution data from the planning system was turned out that has difference with that of the sensor up to 30%. This seems to come from the difference between single-point measuring based planning system and area measuring based sensor.

Keywords: NDT, Radiation safety management, Semi-conductive compound, Mercury Iodide, Radioactive source tracing

## I. INTRODUCTION

방사선치료 및 NDT 등 고에너지 방사선을 활용하는 분야에서는 작업자에 대한 방사선 안전관리를 가장 중요하게 여기고 최우선 사항으로 고려하며, 이를 위해 열 형광 선량계와 광 자극 형광 선량계 등의 개인 선량계를 활용하고 있다. 한편 해당 분야에서 널리 사용되는 Co-60 또는 Ir-192과 같은 방사성 동위원소가 작업자의 과실이나 예기치 못한 사고로 유실되거나 누출되더라도 방사선의 특성상 작업자가 이를 인지할 수 없어 피폭 사고로

이어질 우려가 꾸준히 제기되어 왔다.<sup>[1]</sup> 하지만 이러한 사고가 발생하더라도 앞서 언급한 개인 선량계들은 즉각적인 인지가 불가능하고, 선원의 위치 확인보다는 개인의 누적피폭량 검출에 초점을 두고 있어서 작업자의 안전을 보장하는 데에 한계가 있다. 한편 고에너지 방사선의 검출을 위한 직접 방식 검출기에 활용되는 광도전성 물질로는 방사선에 대한 높은 민감도와 낮은 구동 전압의 장점이 있는 비정질 실리콘(a-Si)이 가장 일반적이지만, 해당 물질은 온도 의존성과 방사선에 의한 손상 등의 단점이 있다.<sup>[2,3]</sup> 이에 a-Si을 대체하기 위한 광도전

\* Corresponding Author: Sungkwang Park

E-mail: physicist@paik.ac.kr

Tel: +82-10-4568-3143

Address: B1F, 75, Bokji-ro, Busanjin-gu, Busan, Republic of Korea

성 반도체 화합물 연구가 다각적으로 이루어져 왔다. 이러한 화합물로는  $HgI_2$ ,  $PbI_2$ ,  $CdS$  등이 있으며, 이들은 비교적 간단하게 제작할 수 있고, 높은 원자번호로 인해 고에너지 방사선의 흡수 효율이 뛰어난 것으로 보고되고 있다.<sup>[4,5]</sup> 이에 본 연구에서는 입자 침전법(Particle In Binder method; PIB method)을 통해 광도전성 반도체 화합물인  $HgI_2$ 를 기반으로 한 Unit cell 센서를 제작하고, 이를 방사선치료 장비의 일종인 HDR Brachytherapy 장비를 통해 Ir-192 선원에 노출 시킴으로써 방사선원을 실시간으로 추적할 수 있는 시스템에 대한 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. Materials

본 연구에서는 하부 전극기관으로서 인듐 주석 산화물(Indium-Tin-Oxide; ITO)이 도포된 Glass를 사용하였다. 또한, Kojundo Chemical Laboratory 사에서 제조한 순도 99.999% 이상의 광도전성 반도체 화합물  $HgI_2$ 로 방사선 흡수층을 형성하였으며, 아이넥서스사에서 제조한 순도 99.99% 이상의 Au를 상부 전극으로 활용하였다.

### 2. Fabrication

본 연구에서 사용된 Unit cell 센서는 증착 면적의 제어가 쉽고 제조공정이 비교적 간소하여 Touch Panel Screen과 Solar Cell의 제조에 널리 활용되고 있는 Screen Printing을 통해 PIB method로 제작되었다. Fig. 1은 Unit cell 센서의 제작공정을 나타내고 있다.

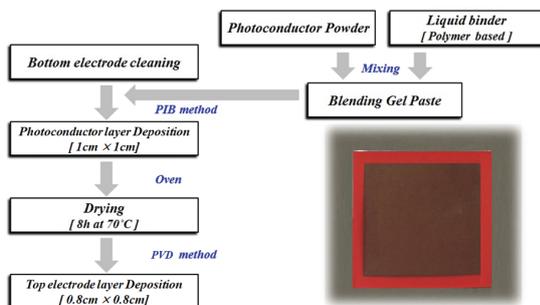


Fig. 1. Fabrication process for Unit cell sensor.

시편의 제작을 위해, ITO glass 상에  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  면적의 격벽을 형성하고, powder 형태의  $HgI_2$ 와 고분자 기반 액상 binder를 4:1 비율로 혼합한 paste를 격벽 영역 내에 Screen printing으로 도포하였다. 이후, 오븐에서  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 8시간 건조과정을 거쳐 방사선 흡수층을 형성하였으며, 이때 흡수층의 두께는  $150 \text{ }\mu\text{m}$ 를 기준으로 오차범위  $\pm 5\%$ 를 만족하도록 하였다. 이후 물리적 증기 증착법으로  $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$  면적에 Au를 증착함으로써 상부 전극을 형성하였다.

### 3. Measurement

본 연구에서는 Unit cell 센서의 감마 선원에 대한 반응특성 평가를 위하여 Keithley사의 6517A Electrometer를 통하여  $1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 의 구동전압을 인가하고, Teledyne LeCroy사의 Wavesurfer 510 Oscilloscope로 신호를 수집 및 측정하였다. Fig. 2는 Unit cell 센서의 감마 선원에 대한 반응특성을 확인하기 위한 실험 구성의 개략도이다.

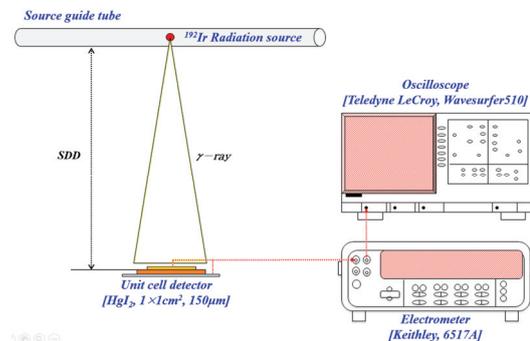


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

정확한 실험을 위한 센서의 신뢰도 검증절차로서 선형성과 재현성 평가를 진행하였고, 인제대학교 부산백병원에 설치된 Nucletron사의 microSelectron-HDR Brachytherapy 장비 내의 약  $300 \text{ keV}$ 의  $\gamma$ -선을 방출하는 Ir-192 선원의 위치의존성을 평가하였다.

#### 3.1 Linearity

선형성은 조사된 선량과 검출기의 출력 신호의 비례관계를 나타내는 지표이며, 단계적인 선량의 증가에 따른 신호의 변화추세를 통해 평가한다. 본 연구에서는 Unit cell 센서의 선량 변화에 따른 선

형성을 검증하기 위하여, 제작된 센서에 0.1 Gy부터 10 Gy까지 점진적으로 증가하는 흡수선량을 조사하고, 그에 따른 출력 신호의 변화를 평가하였다.

### 3.2 Reproducibility

재현성은 동일 선량에 대한 출력 신호의 안정성을 나타내는 지표로, 동일 선량을 연속·반복적으로 조사하여 그에 대한 출력값의 편차를 기준으로 평가한다. 본 연구에서는 Unit cell 센서의 isocenter로부터 수직으로 1 cm 지점에 Ir-192 선원이 위치하도록 한 후, 1 Gy의 흡수선량을 10회 반복조사하여 획득한 데이터를 기반으로 재현성을 평가하였다.

### 3.3 Position dependence

위치의존성은 일정한 에너지의 방사선을 방출하는 선원과 센서와의 거리(Source to Detector Distance; SDD)의 변화에 따른 출력 신호의 변화를 나타내는 것으로, 선원과과의 거리에 대한 민감도를 의미한다. 본 연구에서는 Ir-192 선원을 센서의 isocenter로부터 0.1 cm씩 이동시키며 총 25개 지점에서 1 cm를 기준으로 1 Gy에 해당하는 동일 선량을 조사하였다. 이때, SDD 증가에 따라 변화하는 출력 신호를 바탕으로 위치의존성을 평가하였으며, Planning system인 Plato(ver. 13.1) S/W 상의 선량 분포도와 상관계수에 대하여 고찰하였다.

## III. RESULT

### 1. Linearity

Fig. 3은 0.1 ~ 10 Gy의 흡수선량 변화에 따른 선형성 평가결과를 나타내고 있다.

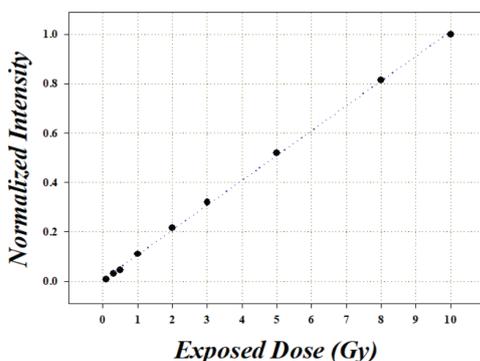


Fig. 3. Linearity of Unit cell sensor from 0.1 to 10 Gy.

평가결과, 전체 구간에서 직선형 추세선의 신뢰도 지표인 R-sq는 0.9993으로 나타났으며, 선량에 따라 민감한 반응을 보임으로써 제작된 센서가 조사된  $\gamma$ -선의 선량에 정비례함을 확인하였다.

## 2. Reproducibility

Table 1은 해당 과정을 통해 나타난 Unit cell 센서의 재현성 평가결과를 나타내고 있다.

Table 1. Reproducibility of Unit cell sensor at 1 Gy

	Signal ( $\mu\text{C}$ )	Sensitivity ( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	Normalized value
1	45.5821	71.222	1
2	45.3952	70.93	0.9959
3	45.2676	70.7306	0.9931
4	45.0032	70.3175	0.9873
5	44.8847	70.1323	0.9847
6	44.6522	69.7691	0.9796
7	44.5519	69.6124	0.9774
8	44.3605	69.3132	0.9732
9	44.1918	69.0497	0.9695
10	43.9776	68.715	0.9648
SD	0.5054	0.7896	0.0111
CV		0.0113	

평가결과, 연속적인 10회 반복조사에 의한 재현성은 조금씩 감소하는 추세를 보였다. 정밀분석 결과, 검출된 신호의 최솟값은 최댓값에 대하여 96.48%에 해당하였으며, 전체 데이터에 대한 변동계수(Coefficient of Variation; CV)는 1.1%인 것으로 나타났다.

### 3. Position dependence

Fig. 4는 Brachytherapy planning system과 제작된  $\text{HgI}_2$  센서를 통해 획득한 신호를 변화추세를 비교한 것이다.

평가결과, 선원이 isocenter에서 멀어짐에 따라 두 데이터 모두 곡선형으로 감소하는 추세를 보였다. 반면 각 데이터는 상호 간에 최대 30%의 큰 오차

를 보였다. 또한, 센서로부터 획득한 데이터는 isocenter로부터 약 6.5 cm 떨어진 지점에서 최댓값의 50% 값이 측정되었으며, 약 9.5 cm 지점에서 25% 값이 측정됨에 따라 Planning system으로부터 획득된 데이터보다 낮은 값을 나타냈다.

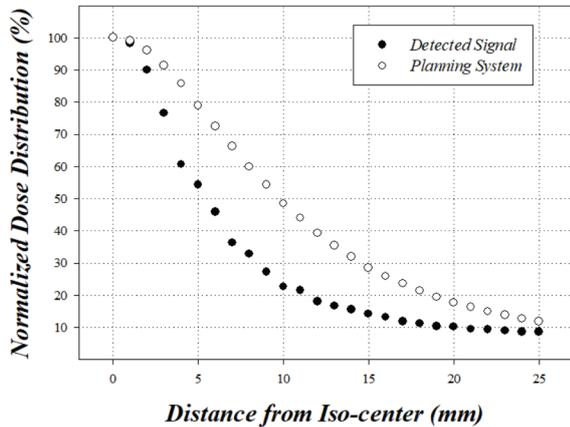


Fig. 4. Position dependence comparison between Unit cell sensor & Planning system.

#### IV. DISCUSSION

선형성 평가결과 직선형 추세선에서 나타난 0.9993의 R-sq는 제작된 센서가 조사된  $\gamma$ -선의 선량에 정비례하는 전하량을 생성함을 의미하며, 센서의 출력 신호가 선량에 비례함을 증명한다. 이는 타 논문에서 평가한 선형성 기준인  $R-sq > 0.990$ 을 만족하는 결과이다.<sup>[6]</sup>

한편 재현성 평가에서 나타난 신호의 감소추세는 다결정 구조의 물질에서 확인할 수 있는 Grain boundary에 의한 Charge trapping 현상 및 시간이 지남에 따른 Noise의 안정화에 의한 것으로 판단된다. 그러나 Charge trapping에도 불구하고 Table 1과 같이 일정한 출력을 내는 것은 해당 센서가 방사선량에 대해 충분히 균일한 신호를 출력함을 의미한다. 이는 제작된 센서가 해당 연구의 진행에 요구되는 재현성을 갖추었으며, 타 논문에서 제시한 재현성 기준인  $CV < 0.015$ 를 만족함으로써, 전기적으로 안정되었음을 증명한다.<sup>[7]</sup>

위치의존성 평가에서 나타난 곡선적 감소추세는 거리가 멀어짐에 따라 선량이 급격히 감소하는 선량의 거리 역자승 법칙에 의한 결과로 여겨진다.

또한, 센서로부터 획득한 신호는 거리변화에 따라 상대적으로 급격한 감소를 보였으며, 이로 인해 두 데이터는 최대 30%의 오차를 나타냈다. 이는 Planning system이 미소지점으로부터 데이터를 획득하는 반면, 센서는  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  넓이의 면적으로 인한 선속 변화의 영향도 받기 때문으로 사료된다. 따라서 이는 pixel의 면적축소를 통해 완화될 수 있을 것으로 사료된다. 더불어, 실험 기반의 실측값인 센서의 데이터와 Simulation 기반의 추정값인 Planning system 간의 오차도 작용한 것으로 추정된다.

#### V. CONCLUSION

본 연구는 NDT 분야에서 활용되는 동위원소 기반의 방사선 조사장치의 안전관리를 위한 것으로, 광도전성 반도체 화합물인  $\text{HgI}_2$ 의 방사선원 실시간 추적 시스템에 대한 적용 가능성을 평가하고자 하였다. 이에 선량계의 전기적 특성에 대한 신뢰도를 확인하고자 선형성 및 재현성의 평가를 우선적으로 실시하였다. 그 결과, 0.9993의 높은 R-sq 값을 가지는 선형성 및 최대 오차율 3.52%, 표준편차 1.1%의 뛰어난 재현성을 나타냄으로써 방사선에 대한 높은 신뢰도를 보였다. 이를 바탕으로 위치의존성을 평가한 결과, 제작된 센서는 선원의 위치변화에 대해 Planning system 상의 데이터보다 더욱 급격한 신호 변화를 보였다. 이는 데이터 수집 시의 기하학적 형태 차이에 의한 것으로 사료된다. 이에 따라 제작된 센서는 선원의 위치변화에 상당히 민감하며, 위치추적에 매우 뛰어난 특성을 가진 것으로 판단된다. 추후  $\text{HgI}_2$  이외의 다양한 광도전성 반도체 화합물 및 다수의 pixel을 지닌 구조의 센서에 대한 연구를 진행하는 것이 방사선원 위치추적에 대한 향상된 연구결과의 획득에 활로가 될 것으로 기대된다.

#### Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (No. 2017R1A2B4007511).

---

## Reference

- [1] K. H. Jung, C. I. Choi, A. R. Kim, K. W. Jang, M. S. Cho, W. H. Ha, S. S. Kim, M. H. Yang, *Radiation Accident*, Korea Institute of Radiological and Medical Sciences & Korea Institute of Nuclear Safety, pp. 95-129, 2014.
- [2] Z. Li, "Radiation damage effects in Si materials and detectors and rad-hard Si detectors for SLHC," *Journal of Instrumentation*, Vol. 4, No. 3, P03011, 2009. DOI: DOI10.1088/1748-0221/4/03/P03011
- [3] 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. DOI: 10.1118/1.2924219
- [4] S. S. Kang, I. H. Go, Y. H. Kwon, Y. S. Kim, W. Y. Kim, Y. H. Kim, J. M. Kim, S.K. Nah, *Radiation Therapy*, Daihakseorim, pp. 106-108, 2001.
- [5] D. M. Duggan, C. W. Coffey, "Small photon field dosimetry for stereotactic radiosurgery," *Medical Dosimetry*, Vol. 23, No. 3, pp. 153-159, 1998. DOI: 10.1016/S0958-3947(98)00013-2
- [6] K. T. Kim, Y. J. Heo, M. J. Han, K. M. Oh, Y. K. Lee, S. W. Kim, S. K. Park, "Development and evaluation of multi-energy PbO dosimeter for quality assurance of image-guide radiation therapy devices," *Journal of Instrumentation*, Vol. 12, No. 4, C04024, 2017. DOI: 10.1088/1748-0221/12/04/C04024
- [7] 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

# 비파괴 검사 분야의 방사성 동위원소 위치추적을 위한 반도체 화합물의 적용 가능성 연구

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

<sup>1</sup>인제대학교 의과대학 방사선종양학과

<sup>2</sup>양산부산대학교병원 의생명융합연구소

<sup>3</sup>한국원자력의학원

<sup>4</sup>인제대학교 의료영상연구소

<sup>5</sup>인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

## 요 약

Co-60 및 Ir-192 등의 방사성 동위원소가 비파괴 검사(Non-Destructive Test; NDT) 등의 분야에서 널리 쓰임에 따라 방사선 안전관리가 매우 중요시되고 있다. 본 연구에서는 요오드화수은(Mercury(II) Iodide; HgI<sub>2</sub>)의 선원추적 시스템 적용 가능성을 평가하였다. HgI<sub>2</sub>로 제작된 Unit cell 센서의 신뢰도 검증을 위한 전기적 특성평가를 수행한 후, 방사선에 대한 센서의 위치의존성을 분석하고, Planning system의 선량 분포와 비교하였다. 평가결과, R-sq>0.99 이상의 선형성과 CV<0.015 이하의 재현성을 보이며 신뢰도가 높은 것으로 나타났다. 또한, 위치의존성 평가에서는 센서의 isocenter에서 최댓값이 측정되었으며, 거리에 따라 점진적 감소를 나타냈다. 그러나 Planning system 상의 선량 분포 데이터와는 최대 30%의 차이를 보였는데, 센서는 단일지점으로부터 데이터를 수집하는 Planning system과 달리 면적으로부터 수집하기 때문으로 사료된다.

중심단어: 비파괴 검사, 방사선 안전관리, 반도체 화합물, 요오드화수은, 방사선원 위치추적

## 연구자 정보 이력

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