

# Study on the Applicability of Semiconductor Compounds for Dose Measurement in Electron Beam Treatment

Seungwoo Yang,<sup>1</sup> Moojae Han,<sup>1</sup> Yohan Shin,<sup>1</sup> Jaehoon Jung,<sup>1</sup> Yunseon Choi,<sup>2</sup> Heunglae Cho,<sup>2</sup>  
Sungkwang Park<sup>2,\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: December 12, 2019. Revised: February 25, 2020. Accepted: February 28, 2020

## ABSTRACT

In this study, it was intended to replace the existing plane parallel ionization chamber, which requires cross-calibration in electron beam treatment. The semiconductor compounds HgI<sub>2</sub> was fabricated as detector, and the characteristics of HgI<sub>2</sub> detector for the 6, 9 and 12 MeV electron beam was analyzed in the linear accelerator. It was also intended to evaluate the possibility of substitution with existing detectors and their applicability as electron beam dosimetry and to use them as a basic study of the development of electronic beam dosimeter. As a result of reproducibility, RSD was 0.4246%, 0.5054%, and 0.8640% at 6, 9, and 12 MeV energy, respectively, indicating that the output signal was stable. As a result of the linearity, the R<sup>2</sup> was 0.9999 at 6 MeV, 0.9996 at 9 MeV, and 0.9997 at 12 MeV showed that the output signal is proportional to HgI<sub>2</sub> as the dose is increased. The HgI<sub>2</sub> detector of this study is highly applicable to electron beam measurement, and it may be used as a basic research on electron beam detection.

Keywords: Radiation therapy, Electron, Detector, Semi-conductive compound, Mercury(II) Iodide

## I. INTRODUCTION

방사선치료에서 전자선은 비장이 짧고 피부에 미치는 영향이 커서 표재성 종양 치료에 많이 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 전자선 치료는 정확한 치료 및 불필요한 피폭을 막아 정상조직을 보호하기 위해 선량 정도 관리(Quality Assurance; QA)프로그램 수행을 통해 정확한 선량을 측정할 필요가 있다.<sup>[2]</sup> 이에 전자선 치료 분야에서는 국제원자력기구(International Atomic Energy; IAEA)나 미국의학물리학회(American Association of Physicist in Medicine; AAPM)에서 발행한 프로토콜을 적용하여 흡수선량을 평가하고 있다.<sup>[3,4]</sup> IAEA TRS-398(Technical Report Series No. 398, 2000)에서는 R<sub>50</sub> ≤ 4 g/cm<sup>2</sup> 저에너지 전자선에서는 평행평판형이온함을 사용하여 선량을 측정할 것을

권고하고 있으며, 고에너지 전자선 선량 측정에서는 원통형이온함을 기준으로 평행평판형이온함을 교차 교정하여 사용할 것을 권고하고 있다.<sup>[3]</sup>

이러한 TRS-398에서는 선질보정인자가 수록되어 있지 않으면 프로토콜을 직접 적용하는 것이 힘든 문제점을 가지고 있다. 또한, 전자선에서 측정을 권고하는 평행평판형이온함은 선량 경사도와 입자플루언스의 교란을 최소화하고, 불확도를 줄이는데 원통형이온함보다 기하학적 구조상으로 유리하지만, 교차교정법에 의한 평행평판형이온함의 사용은 추가적인 측정단계와 복잡한 수식으로 인하여 측정 시 오차가 큰 문제점을 가지고 있다.<sup>[5-7]</sup>

치료 방사선 분야에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 디지털 기반의 diode 선량계를 통한 측정이 이루어졌지만, 온도 의존성, 낮은 흡수효율, 방

\* Corresponding Author: Sungkwang Park

E-mail: Physicist@paik.ac.kr

Tel: +82-10-4568-3143

Address: Busan Paik Hospital, Inje University, Bokji-ro, Busan

사선 조사에 따른 물리적 손상으로 인한 성능저하와 같은 문제점으로 반복적인 교정이 필요한 단점이 있다.<sup>[8]</sup>

한편 X선에 대한 검출연구는 CdTe, CdZnTe, PbI<sub>2</sub>, HgI<sub>2</sub> 등 다양한 광도전성 반도체 화합물이 여러 에너지 대역에서 평가가 이루어져 왔다. 그중 HgI<sub>2</sub>는 상대적으로 높은 유효 원자 번호( $Z_{\text{eff}}$ : 63)와 전자 밀도( $N_{\text{el}}$ :  $2.5 \times 10^{23}$  electrons/g)를 가져 우수한 전자수집효율을 나타내기 때문에 진단영역에서 많은 연구가 선행되어왔다. 또한, 최근에는 방사선치료, 산업 검출 분야 등에서도 고에너지 X선에 대한 연구가 활발히 이루어지고 실정이다.<sup>[9,10]</sup> 하지만 전자선의 경우, 환자 위치, gentry 구성으로부터 발생하는 산란에 따른 선량 오차가 크게 발생 될 수 있음에도 불구하고 광도전성 반도체 화합물을 이용한 전자선 선량계에 대한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 입자침전법(Particle-in Binder; PIB)으로 제작이 용이한 광도전성 반도체 화합물인 HgI<sub>2</sub>를 선량계로 제작하고 평가하였다.

본 연구에서는 자체 제작한 HgI<sub>2</sub> 선량계를 선형 가속기에서 조사되는 저 에너지 및 고에너지 전자선에 대한 반응특성을 평가함으로써 해당 물질의 전자선 검출에 대한 기초연구를 수행하고자 하였다. 또한, 이를 바탕으로 교차교정이 필요한 기존 평행평판형이온함의 대체가능성과 전자선 선량계로서의 적용가능성을 평가하고자 하였다.

## II. MATERIAL AND METHODS

### 1. HgI<sub>2</sub> 선량계 제작

본 연구에서는 Kojundo Chemical Laboratory 사에서 제조된 순도 99.999%의 광도전체 물질 HgI<sub>2</sub>를 사용하여 방사선 흡수층을 제작하였다. 인듐 주석 산화물(Indium-Tin-Oxide; ITO)이 도포된 glass 상에  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 의 면적의 격벽을 형성한 이후 HgI<sub>2</sub>와 바인더를 4:1로 혼합하고 screen printing으로 제작하였다. 이후 오븐에서 70°C에 8시간 동안 건조시켰다. 상부 전극은 금을  $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$  면적으로 방사선 흡수층 상부에 증착시켜 형성하였다.

### 2. 실험 장치 set-up

제작된 선량계의 전자선 반응특성은 인제대학교 부산백병원에 설치되어있는 선형가속기(LINAC\_ix. RapidArc)를 사용하여 얻었다. 제작된 HgI<sub>2</sub> 선량계는 전자선 조사 시 electron-hole pair를 생성하는데, 이때 Keithley사의 6517A electrometer로 1 V/ $\mu\text{m}$  구동 전압을 인가하고, LeCroy사의 wavesurfer510 oscilloscope 사용하여 신호 파형을 획득하였다. 획득된 신호 파형은 ACQ(Biopac, Acqnowledge 4.2, canada) program을 사용하여 조사된 시간에 대하여 적분된 전하량을 획득하였다. 이때 전하량으로 입력된 각 data는 단위 면적당 sensitivity를 제시하기 위해 전극면적인  $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$ 를 적용하여 산출하였다.

Fig. 1은 전자선의 반응특성을 확인하기 위한 실험 개략도이다. 본 연구에서 사용된 6, 9, 12 MeV 전자선에 대하여 하부에 10 cm 두께의 slab phantom을 위치시키고 상부에는 각 에너지의  $D_{\text{max}}$  depth를 설정하기 위하여 6 MeV에서 1.3 cm, 9 MeV에서 2 cm, 12 MeV에서 2.5 cm 두께의 Slab Phantom을 Build-up material로 형성하였다. 이후 SSD는 100 cm로 설정하였다.

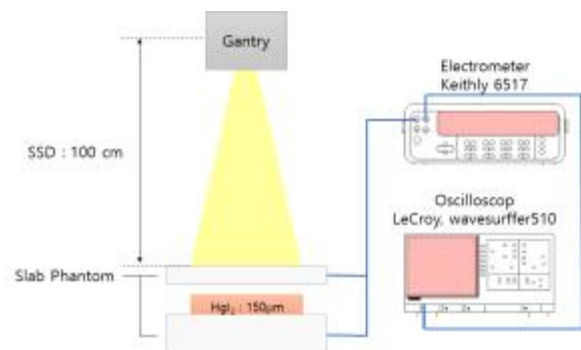


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup.

### 3. Reproducibility

재현성은 동일 선량에 출력 신호의 안정성을 나타내는 것으로서 동일 선량 50 MU에서 10회 반복 조사하여 측정하였다. 측정된 신호량을 기반으로 출력값의 상대 표준 편차 (Relative Standard Deviation;

RSD)로 나타내어, 선량계 연구에서 재현성 평가 기준으로 사용되고 있는 95% 신뢰구간 RSD 1.5% 이하를 기준으로 평가하였다.<sup>[11,12]</sup> RSD는 (1)로 산출하였으며,  $X_i$ 은 측정값이며,  $X_{ave}$ 은 산술 평균값이다.

$$RSD(\%) = \left[ \frac{\{\sum (X_i - X_{ave})^2 / n\}^{0.5}}{X_{ave}} \right] \times 100 \quad (1)$$

#### 4. Linearity

선형성은 조사된 선량과 선량계의 출력 신호의 비례관계를 나타내는 것으로서 1, 10, 50, 100, 300, 500 MU 단계적인 선량의 증가에 따른 신호의 변화 추세를 평가하였다. 평가에는 결정계수(coefficient of determination;  $R^2$ )를 사용하여 평가하였다. 결정계수는 회귀식의 적합한 정도를 측정하는 척도로서, 적합도가 높을수록 1에 근접한 값이 나타난다.

### III. RESULT

#### 1. Reproducibility

Fig. 2는 HgI<sub>2</sub>의 선량계의 재현성 측정 결과를 나타내고 있다.

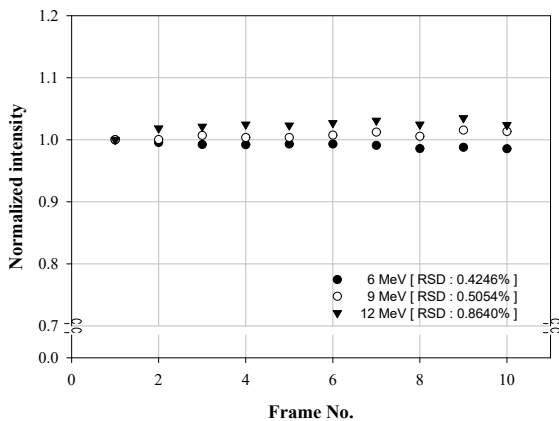


Fig. 2. Reproducibility of HgI<sub>2</sub> detector at 50MU.

연속적인 10회 반복조사에 의한 재현성을 평가한 결과, RSD는 6 MeV 에너지에서 0.4246%, 9 MeV 에너지에서 0.5054%, 12 MeV 에너지에서 0.8640%로 나타났다. 이는 모든 경우에서 평가 기준을 만족

하는 RSD 1.5% 이하를 충족시키는 결과이다.

#### 2. Linearity

Fig. 3은 1~1000 MU의 선량 변화에 따른 선형성 평가결과를 나타내고 있다.

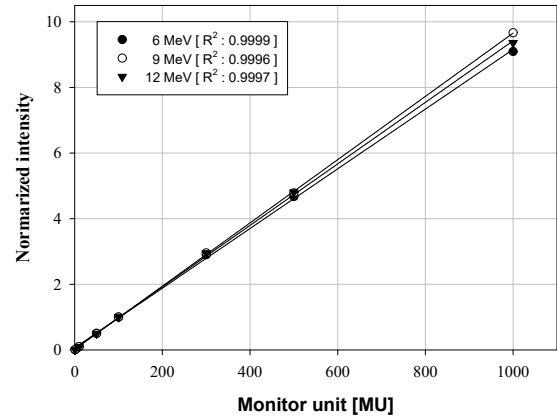


Fig. 3. Reproducibility of HgI<sub>2</sub> detector at 50MU.

평가결과, MU가 증가함에 따라 HgI<sub>2</sub>에서 생성되는 신호량이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 각 에너지 구간에서 직선형 추세선의 신뢰도 지표  $R^2$ 값은 6 MeV에서 0.9999, 9 MeV에서 0.9996, 12 MeV에서 0.9997로 나타나 1에 근접한 값으로 제시되었다.

### IV. DISCUSSION

재현성 평가결과, 평가 기준인 RSD는 각 에너지에 대하여 최대 0.864%로 나타났다. 이는 HgI<sub>2</sub> 선량계에 대한 타 논문에서 재현성의 평가 기준으로 제시한 95% 신뢰구간에서의 1.5% 이하의 RSD를 만족하는 결과이다.<sup>[13]</sup> 이를 바탕으로, 제작된 HgI<sub>2</sub> 선량계가 일정한 선량에 대해 안정적인 출력을 내는 것으로 판단하였다.

선형성 평가결과, 직선형 추세선의 신뢰도 지표  $R^2$ 은 6, 9, 12 MeV에서 각각 0.9999, 0.9996, 0.9997로 나타났다. 이는 HgI<sub>2</sub> 선량계에 대한 타 논문에서 선형성 평가의 지표로 제시한  $R^2 > 0.9990$ 을 만족하는 결과로, 제작된 HgI<sub>2</sub> 선량계의 출력 신호가 선량에 정비례하는 것으로 판단하였다.<sup>[14]</sup> 본 연구결

과는 고에너지 전자선에서 교차교정이 필요한 기존 평행평판형이온함 비교하였을 때, 6, 9, 12 MeV 에 다양한 에너지 범위에서 안정적인 출력을 나타내어 전자선 선량계로서의 적용가능성이 높음을 나타내었다.

전자선은 피부에 큰 영향을 끼치기 때문에 정확한 선량 측정이 요구된다. 하지만 전자선은 산란에 따른 영향이 커서 정확한 측정이 어려운 문제점을 가지고 있다. 그러므로 본 연구는 고에너지 전자선의 정확한 측정을 위해 비교적 민감도가 우수한  $HgI_2$  선량계에 대한 평가를 수행했다는 점에서 큰 의미를 가진다.

추후 연구에서는  $HgI_2$  선량계의 전자선 측정 시 산란에 따른 영향을 분석하고 기존 선량계와 비교 평가 하고자 한다. 또한,  $HgI_2$  물질 이외에 광도전성 반도체 화합물을 사용하여 선량계를 제작 및 비교 평가하여 전자선 선량을 보다 정확하게 측정할 수 있는 선량계 제작이 가능할 것으로 사료된다.

## V. CONCLUSION

본 연구에서는  $HgI_2$  물질을 사용하여 선량계를 제작하였고, 이에 대한 전기적 특성에 대한 신뢰도를 선형성과 재현성의 지표로 평가하여, 교차교정 없이 저에너지 고에너지 전자선 출력의 정확한 평가가 가능한 선량계 적용 가능성을 평가하였다.

평가결과 RSD 1.5% 이내의 재현성과 0.9990이상의  $R^2$  값의 선형성을 나타냄으로써 높은 신뢰도를 확보하였다. 본 연구의  $HgI_2$  선량계는 전자선 측정의 선량계로 적용가능성이 매우 높은 것으로 판단된다. 또한, 전자선 검출에 대한 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (No. NRF-2019R1A2B5B01004126).

## Reference

- [1] F. M. Khan, J. P. Gibbons, Khan's The Physics of Radiation Therapy, 5th ed, Wolters Kluwer, pp 264-274, 2014.
- [2] S. F. Kry, S. A. Smith, R. Weathers, M. Stovall "Skin dose during radiotherapy, a summary and general estimation technique," Journal of Applied Clinical Medical Physics, Vol. 13, No. 3, pp. 2012.
- [3] IAEA TRS-398 "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed dose to Water," Technical Report Series No. 398, Vienna, 2000.
- [4] AAPM Report 67, AAPM's TG-51 "Radiation Therapy Committee Task Group No. 51: Protocol for Clinical Dosimetry of High-Energy Photon and Electron Beams," Medical Physics, Vol. 26, pp. 1847-1870, 1999.
- [5] J. E. Rah, D. O. Shin, S. H. Park, H. J. Jeong, U. J. Hwang, "Study on Absorbed Dose Determination of Electron Beam Quality for Cross-calibration with Plane-parallel Ionization Chamber," Korean Society of Medical Physics, Vol. 20, No. 2, pp. 97-105, 2009.
- [6] D. H. Jeong, J. O Lee, "Determination of Quality Correction Factors for a Plane-Parallel Chamber in High Energy Electron Beams using Monte Carlo Calculation," Journal of Radiological Science and Technology, Vol. 31, No. 1, pp. 89-95, 2008.
- [7] M. Y. Kim, D. J. Rhee, Y. M. Moon, D. H. Jeong, "Determination of Beam Quality Correction Factors for the PTW-Markus Chamber for Electron Beam Qualities  $R_{50}=1.0$  and  $1.4 \text{ g/cm}^2$ ," progress in medical, Vol. 26, No. 3, pp. 178-184, 2015.
- [8] G. W. Jung, J. W. Shin, K. M. Oh, S. K. Park, J. Y. Kim, J. K. Park, S. G. Nam, "The Feasibility Study of photoconductor materials for the use of a dosimeter in Radiotherapy," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 7, No. 1, pp. 81-84, 2013.
- [9] S. Gowda, "The mass attenuation coefficients, effective atomic cross sections, effective atomic numbers and electron densities of some halides," waset journal of pioneering Medical sciences Vol. 10,

---

pp. 392, 2016.

- [10] 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, pp. e031201, 2014.
- [11] L. A. R. da Rosa, D. F. Regulla, U. A. Fill, "Reproducibility study of TLD-100 micro-cubes at radiotherapy dose level," Applied Radiation and Isotopes, Vol. 50, No. 3, pp. 573-577, 1999.
- [12] 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, C03023, 2018.
- [13] M. J. Han, J. Y. H. Shin, J. H. Jung, K. T. Kim, Y. J. Heo, H. L. Cho, S. K. Park, "A study of Curved Dosimeter for Flattening Filter Free Beam Quality Assurance Evaluation using Curved Dosimeter in Radiotherapy," Journal of the Korean Society of Radiology, Vol. 13, No. 1, pp. 119-124, 2019.
- [14] 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.

# 전자선 치료 분야의 선량 측정을 위한 반도체 화합물의 적용가능성 연구

양승우,<sup>1</sup> 한무재,<sup>1</sup> 신요한,<sup>1</sup> 정재훈,<sup>1</sup> 최윤선,<sup>2</sup> 조흥래,<sup>2</sup> 박성광<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 의과대학 방사선종양학과

<sup>2</sup>인제대학교 부산백병원 방사선 종양학과

## 요 약

본 연구에서는 전자선 치료에서 전자선 선량 측정 시 교차교정이 필요한 기존 평행평판형이온함을 대체하고자 하였다. 광도전성 반도체 화합물 HgI<sub>2</sub>를 사용하여 선량계로 제작하였으며, 선형가속기에서 6, 9, 12 MeV 전자선에 대한 HgI<sub>2</sub> 선량계의 특성을 분석하였다. 그리고 기존 선량계와의 대체가능성과 전자선 선량계로서의 적용 가능성을 평가하고 전자선 선량계 개발의 기초연구로써 활용하고자 하였다. 재현성 평가결과, RSD는 6, 9, 12 MeV 에너지에서 각각 0.4246%, 0.5054%, 0.8640%로 나타나 출력 신호가 안정적인 것을 나타내었다. 선형성 평가결과, 직선형 추세선의 신뢰도 지표 R<sup>2</sup>값은 6 MeV에서 0.9999, 9 MeV에서 0.9996, 12 MeV에서 0.9997로 나타나 선량이 증가함에 따라 HgI<sub>2</sub>에 출력 신호가 비례한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 HgI<sub>2</sub> 선량계는 전자선 측정 적용가능성이 매우 높은 것으로 판단되며, 전자선 검출에 대한 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 방사선치료, 전자선, 선량계, 반도체 화합물, 요오드화수은

## 연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	양승우	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
(공동저자)	한무재	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
	신요한	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
	정재훈	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
	최윤선	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	교수
	조흥래	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	교수
(교신저자)	박성광	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	교수