

A Study on the Application of PbI₂ Dosimetry for QA in the Electron Beam Therapy

Seungwoo Yang,¹ Moojae Han,¹ Jaehoon Jung,¹ Yunseon Choi,² Heunglae Cho,² Sungkwang Park^{2,*}

¹Department of Radiation Oncology, Collage of Medicine, Inje University

²Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: July 06, 2020. Revised: October 20, 2020. Accepted: October 31, 2020

ABSTRACT

Electron beam have many factors that affect dose distribution, so even if identical settings are used, they should be identified and used for radiation treatment, and the effects on the structures in the body are sensitive, making it difficult to investigate uniform dose distribution on tumors. In this study, a dosimeter was produced using PbI₂ which is a photoelectric material, and electrical characteristics were analyzed for 6, 9, and 12 MeV electronics in linear accelerators. The reproducibility test results showed that RSD were 1.1215%, 1.0160%, and 0.05137% respectively at 6, 9, and 12 MeV energies, indicating that the output signals were stable. The linearity evaluation results showed that the R² values of the reliability indicator for straight line trend lines were 0.9999, 0.9999, and 0.9994, respectively, at 6, 9, and 12 MeV, to confirm that the output signal was proportional to PbI₂ as dose increased. The PbI₂ dosimeter in this study is judged to be highly applicable to electromagnet measurement and is thought to be able to be used as a basic study of electron detector through photoelectric material.

Keywords: Radiation therapy, Electron, Detector, Semi-conductive compound, Lead Iodide

I . INTRODUCTION

전자선은 비정이 짧기 때문에 일정 깊이를 투과하면 선량이 급격히 감소하는 특징이 있다. 이러한 특징은 정상 장기가 표적체적을 넘어 내부에 위치하는 경우, 정상조직을 보호하면서도 종양조직에는 계획된 선량을 조사할 수 있어 피부암, 유방암, 두경부암 등의 표재성 종양 치료에 많이 이용되고 있다.^[1-4]

이러한 전자선의 에너지와 물리적인 특성을 직접 측정하기에는 이론적, 실험적으로 대단히 어렵다. 전자선은 인체 조직 내에서 투과깊이가 증가함에 따라 에너지가 연속적으로 감소하고, 이로 인해 산란선이 증가하여 깊이이온곡선과 깊이선량곡선이 일치하지 않는 특징을 가지고 있다. 또한 전자선 선량분포에 영향을 주는 인자가 매우 많고, 체

내 구조물에 영향에도 민감하게 반응하여, 동일한 설정이라도 장치가 다를 경우, 장치마다 그 특성을 파악하여 방사선 치료에 이용해야한다.^[5]

이러한 전자선이지만 방사선치료의 성격상 정상 조직에는 최소한의 피해를 주면서 종양조직에는 의도한 선량을 조사해야 한다. 그렇기 위해서는 환자에게 조사되는 방사선량을 정확히 측정할 수 있어야 한다.

Lead(II) Iodide(PbI₂)는 방사선 에너지를 전기 에너지로 변환할 수 있는 광도전체 물질이다. 높은 원자량(Zpb-82, ZI-53)으로 방사선 흡수 계수가 높고, 일함수가 4.9 eV로 전자-정공 쌍의 형성에너지가 낮으며, 빠른 반응속도와 상대적으로 낮은 잡음 특성을 가지고 있어, 방사선 검출을 위한 반도체 선량계로 사용 및 연구되고 있는 물질이다.^[6-8]

본 연구에서는 광도전체 물질인 PbI₂를 사용하여

* Corresponding Author: Sungkwang Park

E-mail: Physicist@paik.ac.kr

Tel: +82- 10-4568-3143

Address: Bokji-ro, Busanjin-gu, Busan, 47392 Korea

전자선 선량 측정에 적합한 선량계를 제작하고자 하였다. 그리고 선형가속기에서 조사되는 전자선에 대한 전기적 반응특성을 분석하여 전자선 선량계로써 적용 가능한지에 대하여 평가하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. PbI₂ 선량계 제작

먼저 선량계의 하부전극을 형성하기 위하여 인듐 주석 산화물 (Indium-Tin-Oxide; ITO)을 유리위에 도포하였다. 하부 전극 위에 가로세로 1 × 1 cm²의 틀을 형성하고 그 위에 PbI₂와 바인더를 4:1로 혼합하여 screen printing 방법으로 도포하였다. 그리고 오븐에서 70 °C, 8 시간 동안 방사선 흡수층을 건조시켰다. 건조된 방사선 흡수층에 상부 전극을 형성하기 위해 금을 0.8 × 0.8 cm² 면적으로 증착시켜 선량계 제작을 마무리하였다.

PbI₂는 Kojundo Chemical Laboratory사에서 제조된 순도 99.999 %의 물질을 사용하였다.

2. 실험 장치 set-up

본 연구에서는 인제대학교 부산백병원에 설치되어있는 선형가속기(LINAC ix. RapidArc)를 사용하여 선량계의 전자선 반응특성을 분석하였다.

전자선이 조사 될 때, 제작된 PbI₂ 선량계는 electron-hole pair를 생성한다. 이 때, Keithley사의 6517A electrometer로 방사선 흡수층 두께 당 1V의 전압을 인가하면서 LeCroy사의 wavesurfer510 oscilloscope로 신호 파형을 획득하였다. 마지막으로 ACQ(Biopac, Acqnowledge 4.2, canada) program을 사용하여 획득된 신호 파형을 조사된 시간에 대하여 적분하여 전하량을 산출하였다.

Fig. 1은 PbI₂ 선량계의 전기적 반응특성을 분석하기 위한 실험 개략도이다. PbI₂ 선량계 상부에는 Slab Phantom을 Build-up material로 위치시켜 각 에너지에 해당하는 D_{max} depth를 설정하였다. 6 MeV에서 1.3 cm, 9 MeV에서 2 cm, 12 MeV에서 2.5 cm 두께로 설정하고, SSD는 Slab Phantom 표면에서부터 100 cm로 설정하였다.

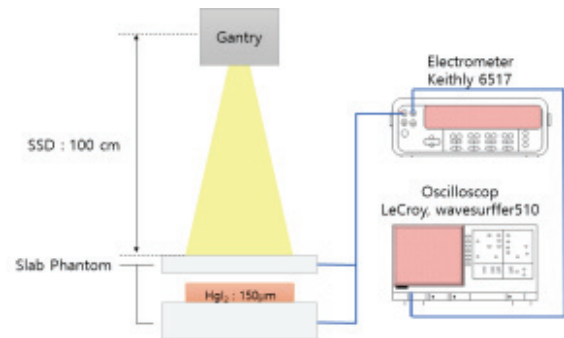


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set up.

3. PbI₂ Reproducibility

출력 신호의 안정성을 분석하기 위하여 Dose Rate를 400 MU/min으로 고정하고 동일선량 50 MU를 10회 반복 조사하였다. 획득된 신호를 기반으로 상대 표준 편차 (Relative Standard Deviation; RSD)를 산출하였고, 이를 통해 재현성을 분석하였다. 평가기준은 선량계 연구에서 자주 사용되고 있는 95 % 신뢰구간 RSD 1.5% 이하를 기준으로 평가하였다.^[8-9] RSD는 식(1)로 산출하였으며, X_i 은 측정값이며, X_{ave} 은 산술 평균값이다.

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

4. Linearity

선형성은 조사된 선량과 선량계의 출력 신호의 비례관계를 나타내는 것으로서 본 연구에서는 Dose Rate를 400MU/min으로 고정하고 선량을 1, 10, 50, 100, 300, 500 MU 단계적으로 높이면서 조사하여 선량계에서 신호를 획득하였다. 획득된 신호는 결정계수(coefficient of determination; R²)를 사용하여 회귀식의 적합한 정도로 선량계의 선형성을 평가하였다. 결정계수는 적합도가 높을수록 1에 근접한 값이 나타난다.

III. RESULT

1. Reproducibility

Fig. 2는 PbI₂ 선량계에 동일 선량 50 MU를 10회 반복 조사하였을 때의 재현성 결과를 보여주고 있다.

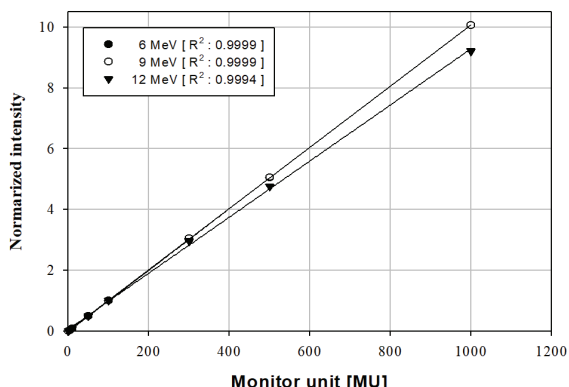


Fig. 2. Reproducibility of PbI₂ detector at 50MU.

연속적인 10회 반복조사에 의한 재현성을 평가한 결과, RSD는 6 MeV 에너지에서 1.1215%, 9 MeV 에너지에서 1.0160%, 12 MeV 에너지에서 0.05137%로 나타났다. 이는 RSD 1.5% 이하의 값으로 제안한 평가 기준을 만족하는 결과이다.

2. Linearity

Fig. 3은 1~1000 MU 조사된 선량에 따른 선량계의 출력 신호값의 그래프로 선형성 평가결과를 나타내고 있다.

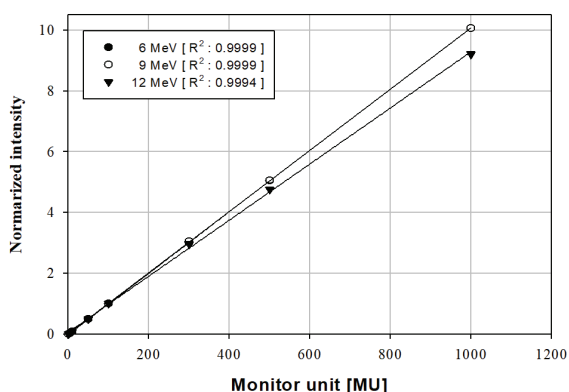


Fig. 3. Linearity of PbI₂ detector at 50MU.

평가결과, 직선형 추세선의 신뢰도 지표 R₂값은 6 MeV, 9 MeV, 12 MeV에서 각각 0.9999, 0.9999, 0.9994로 나타나 1에 근접한 값으로 나타났다. 선량이 증가함에 따라 PbI₂에서 생성되는 출력에 비례하여 증가하는 우수한 선형성을 확인할 수 있었다.

IV. DISCUSSION

재현성 평가결과, 각 에너지 6, 9, 12 MeV에 대하여 RSD값은 1.1215%, 1.0160%, 0.05137%로 전자선의 에너지가 낮을수록 재현성이 저하되었다. 이는 에너지 변화에 따른 산란선과 에너지 특성 변화에 의한 것으로 사료된다.

산란선의 에너지 강도는 원자번호의 제공에 비례하고 운동에너지에 반비례한다.^[10] 또한, Electron PDD 그래프에서 확인할 수 있듯이 에너지가 높아질수록 D_{max}를 포함한 build-up region이 비교적 완만해진다. 이러한 특징은 build-up material로 Slap pantom을 이용한 본 실험에서는 오차를 증가시키는 요인으로 작용하여, 저에너지에서는 build-up region의 급격한 기울기 변화로 오차에 따른 신호를 불안정하게 만들고, 반대로 고에너지에서는 완만한 기울기와 줄어든 산란선으로 오차에 대한 영향이 상대적으로 적어 안정적인 출력신호가 유지되는 것으로 판단되어진다. 하지만 그 차이는 매우 미세하여 6, 9, 12 MeV 에너지에서 RSD값은 최대 1.1215%로 제작된 PbI₂선량계는 6, 9, 12 MeV 각 에너지에서도 안정적인 출력을 내는 것으로 나타났다.^[11]

선형성 평가결과, R²은 6, 9, 12 MeV에서 각각 0.9999, 0.9999, 0.9994로 나타났다. 이는 타 논문에서도 선량계 선형성 평가의 지표로 제시하고 있는 R² > 0.9990을 만족하는 결과로, 제작된 PbI₂ 선량계의 선형성이 우수한 것으로 판단하였다.^[12] 본 연구결과는 PbI₂ 선량계가 다양한 범위의 전자선 에너지 6, 9, 12 MeV에서 안정적인 출력을 나타내어 전자선 치료를 위한 선량측정 QA 선량계로서의 적용가능성이 매우 높은 것으로 사료된다.

전자선은 피부에 큰 영향을 끼치기만 산란에 따른 영향이 커서 정확한 측정이 어려운 문제점을 가지고 있다. 본 연구는 6, 9, 12 MeV 전자선의 정확한 선량 측정을 위해 민감도가 우수한 PbI₂ 선량계에 대한 평가를 수행했다는 점에서 큰 의미를 가진다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 PbI₂ 선량계를 제작하였고, 이에 대한 안전성을 선형성과 재현성의 지표로 평가하여, 전자선 선량계의 적용가능성을 평가하였다.

평가결과 PbI₂ 선량계 RSD 1.5% 이내 우수한 재현성과 0.9990이상의 R₂ 값의 높은 선형성을 나타내어 높은 안전성을 확보하였다. 본 연구의 PbI₂ 선량계는 전자선 측정의 선량계로 적용가능성이 매우 높은 것으로 사료되며, 전자선 검출에 대한 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

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] Y. M. Kirova, F. Campana, N. Fournier-Bidoz, R. Dendale, M. A. Bollet, A. Fourquet "Postmastectomy Electron Beam Chest Wall Irradiation in Women With Breast Cancer: A Clinical Step Toward Conformal Electron Therapy," International Journal of Radiation Oncology biology-physics, Vol. 69, No. 4, pp 1139-1144, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2007.05.007>
- [2] G. H. Perkins, M. D. Mcneese, J. A. Antolak, T. A. Buchholz, E. A. Strom, K. R. Hogstrom "A Custom Three-Dimensional Electron Bolus Technique for Optimization of Postmastectomy Irradiation," International Journal of Radiation Oncology biology-physics, Vol. 51, No. 4, pp. 1142-1151, 2011. [https://doi.org/10.1016/S0360-3016\(01\)01744-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3016(01)01744-8)
- [3] D. A. Low, G. Starkschall, S. W. Bujnowski, L. L. Wang, K. R. Hogstrom, "Electron bolus design for radiotherapy treatment planning: Bolus design algorithms," American Association of Physicists in Medicine, vol. 19, No. 1, pp. 115-124, 1992. <https://doi.org/10.1118/1.596885>
- [4] F. M. Khan, J. P. Gibbons, *Khan's The Physics of Radiarion Therapy* 5th Ed, Wolters Kluwer Publishing Co., Philadelphia, USA, pp. 264-274, 2014
- [5] A. I. Zablow, T. R. Eanelli, L. J. Sanfilippo, "Electron beam therapy for skin cancer of the head and neck," Journal of thr Sciences and Specialties of the Head and Neck, Vol. 14, No. 3, pp. 188-195, 1992. <https://doi.org/10.1002/hed.2880140305>
- [6] R. A. Street, M. Mulato, M. M. Schieber, H. Hermon, K. S. Shah, P. R. Bennett, Y. Dmitryev, J. Ho, R. Lau, E. Meerson, S. E. Ready, B. Reisman, Y. Sado, K. V. Schuylenbergh, A. I. Vilensky, A. Zuck "Comparative study of PbI₂ and HgI₂ as direct detector materials for high resolution x-ray image sensors," Journal of Medical Imaging, Vol. 4320, No.3, pp. 1-12, 2001. DOI: 10.1117/12.430858
- [7] K. S. Shah, J. C. Lund, F. Olschner, P. Bennett J. Zhang L. P. Moy, M. R.Squillante "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 353, No. 1-3, PP. 85-88, 1994,
- [8] 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, pp. 3023, 2018. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/13/03/C03023>
- [9] 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. [http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043\(98\)00068-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0969-8043(98)00068-2)
- [10] International Commission on Radiation Units and Measurements. "Radiation Dosimetry: Electrons with Initial Energies between 1 and 50 MeV." International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, DC, Report No.21, 1972.
- [11] 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.

<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.119>

- [12] 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.
<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.7742/jksr.2019.13.1.39>

전자선 치료의 선량 측정 QA를 위한 PbI₂ 선량계 적용 연구

양승우,¹ 한무재,¹ 정재훈,¹ 최윤선,² 조흥래,² 박성광^{2,*}

¹인제대학교 의과대학 방사선종양학과

²인제대학교 부산백병원 방사선 종양학과

요 약

전자선은 선량분포에 영향을 주는 인자가 많아 동일 설정이라도 사용 장비마다 그 특성을 파악하여 방사선 치료에 이용해야 하며, 체내 구조물에 영향이 민감하여 종양에 균일한 선량분포를 조사하기가 까다롭다. 본 연구에서는 광도전체인 PbI₂를 사용하여 선량계를 제작하였고, 선형가속기에서 6, 9, 12 MeV 전자선에 대한 전기적 특성을 분석하였다. 재현성 평가결과, RSD는 6, 9, 12 MeV 에너지에서 각각 1.1215%, 1.0160%, 0.5137%로 나타나 출력 신호가 안정적인 것을 나타내었다. 선형성 평가결과, 직선형 추세선의 신뢰도 지표 R²값은 6, 9, 12 MeV에서 각각 0.9999, 0.9999, 0.9994로 나타나 선량이 증가함에 따라 PbI₂에 출력 신호가 비례한 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 PbI₂ 선량계는 전자선 측정 적용가능성이 매우 높은 것으로 판단되며, 광도전체 물질을 통한 전자선 선량계의 기초연구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

중심단어: 방사선치료, 전자선, 선량계, 반도체 화합물, 요오드화납

연구자 정보 이력

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