

Performance Evaluation of Lead (II) Oxide Dosimeter for Digital Quality Assurance in Brachytherapy

Moo-Jae Han¹, Seung-Woo Yang¹, Sung-Kwang Park^{2,*}

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

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

Received: July 26 2021. Revised: August 30, 2021. Accepted: August 31, 2021.

ABSTRACT

In intracavitary radiotherapy, incorrect location of the source can cause excessive dose to normal tissue, so it is essential to evaluate the location accuracy of the source. In this study, basic research was performed on digital line dosimeter based on lead (II) oxide (PbO) to improve analog verification method. Therefore, a polycrystalline PbO unit cell dosimeter was manufactured and the measurement performance for Ir-192 sources was evaluated. As a result, the reproducibility satisfies the evaluation criteria of 1.5% with a relative standard deviation of 0.85%. Linearity showed excellent results with a linear coefficient of R^2 of 0.9998. In the case of distance dependence evaluation, the power function R^2 showed 0.9855 for PbO and 0.9974 for diode, and the overall average difference was 1.66% for PbO and 2.18% for diode. This study presents the basic detection performance of the polycrystalline PbO dosimeter for the Ir-192 source and can provide basic data in the field of radiation measurement.

Keywords: Semiconductor, PbO, Dosimeter, Quality assurance, Brachytherapy

I. INTRODUCTION

고선량률 (High dose rate; HDR) 근접 방사선 치료는 방사선원을 인체의 강내, 관내, 또는 조직에 직접 삽입한다. 이는 병소 부위에 선원을 인접시킴으로써 정상조직의 선량을 줄이고 종양조직에 선량을 집중시킬 수 있기 때문에, 효율적인 치료가 가능하다^[1]. 이에 임상에서는 자궁경부암, 전립선암 등 골반 내 기관의 움직임에 따른 영향을 줄이기 위해 근접 방사선 치료를 활용하고 있다. 이때 잘못된 선원의 위치는 정상조직에 과도한 선량을 유발하기 때문에 선원 위치와 체류시간 검증은 정도 관리 항목 중 필수적이다^[2,3].

선원 위치 정확성 평가는 가늌자, 필름 등을 조합하여 수행하지만, 점검자의 육안으로 결정하기

때문에 정확성이 떨어지며 정량적인 오차를 제시할 수 없다^[4-6]. 또한 필름의 경우 번짐 현상이 발생되기 때문에 눈금자와의 측정 오차를 증가시키는 원인이 된다^[6].

대표적인 반도체 선량계 실리콘 다이오드는 측정된 전하와 선량 사이에 선형 관계를 나타내기 때문에 방사선 치료 정도관리를 위한 선량계로 사용되고 있다. 하지만 방사선 손상으로부터 감도가 변화하는 단점을 가진다^[7,8]. 이에 방사선 검출기 분야에서는 CdZnTe, CZT, HgI₂, TlBr 등 이를 대체할 수 있는 다양한 후보 광도전체 물질 연구가 이루어지고 있다^[9,10].

이 중 lead (II) oxide (PbO)는 높은 유효원자번호 ($Z_{\text{eff}} = (82+8)/2 = 45$)와 밀도 ($\rho = 9.53 \text{ g/cm}^3$)를 가지며, 밴드갭 에너지가 2.68 eV로 방사선에 대한

* Corresponding Author: Sung-Kwang Park

E-mail: physicist@paik.ac.kr

Tel: +82-51-890-8749

Address: 75, Boji-ro, Busanjin-gu, Busan, 47392 Korea

흡수효율이 높은 물리적 특성을 가진다^[11,12].

한편 입자침전법 증착 방식은 대면적 증착에 용이하고 제조 방식이 비교적 간단하기 때문에 단가를 낮출 수 있는 장점이 있다^[9]. 반면 단결정 물질과 비교하였을 때, 계측 민감도와 안정성이 떨어질 수 있지만, 영상 검출기 분야의 문헌에서 활용 가능성에 대한 결과가 보고되었다^[13].

이에 본 연구에서는 기존 아날로그 정도관리 기술을 개선시키기 위한 line 선량계의 선형연구로써, 기초 성능평가에 중점을 두었다. 이를 위해 unit cell PbO 선량계를 제작하였으며, 선원 조사조건에 따른 검출 성능을 평가하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. Fabrication of PbO dosimeter

본 연구에서는 PbO 선량계의 성능을 평가하기 위해 unit cell 선량계를 제작하였다. Fig. 1은 unit cell 선량계의 제작 모식도를 보여준다.

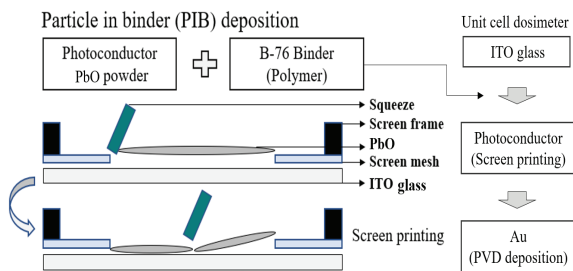


Fig. 1. Fabrication schematic diagram of unit cell dosimeter.

제작에 사용된 원료는 순도 99.999%의 PbO (Kojundo Chemical Laboratory Inc., Japan) 물질을 사용하였고, PIB 증착을 위한 바인더 용액은 폴리머 바인더 (polyvinyl butyral, PVB)를 사용하였다.

Unit cell 선량계의 하부전극층은 indium tin oxide glass를 활용하였으며 이물질 제거를 위해 30분간 초음파 공정을 수행하였다. 광도전체층 제작은 three roll mil 공정을 통해 물질과 바인더를 3:1 비율로 혼합하였다. 이후 1 cm x 1 cm 크기와 150 μm 두께로 형성된 틀에 screen printing 증착 방법으

로 물질을 도포하였다. 표면 균일도는 ±5%를 만족하기 위해 30 분간 석정반 상에 균일하게 유지하였고, 70 °C에서 8 시간 동안 오븐 공정을 수행하였다. 상부전극은 순도 99.999% 금 (Au wire, Sigma Aldrich Inc., U.S.A.)을 사용하였으며, 물리기상증착법으로 0.8 cm x 0.8 cm 크기로 증착하였다. 이 후 형성된 상부전극의 wire는 은(Ag paste)을 사용하였다.

2. Measurement setup

본 연구에서는 고선량률 근접치료 장비 (Nucletron microSelectron, Sweden)를 사용하였으며, 치료계획 시스템 (PLATO 14.26, Sweden)을 사용하여 이리듐 (Iridium; Ir-192) 선원의 조사조건을 설정하였다. Fig. 2는 측정 설정의 모식도를 보여준다.

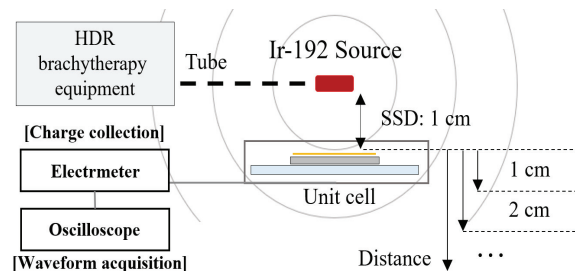


Fig. 2. Measurement setup schematic diagram of unit cell dosimeter.

제작된 선량계는 일렉트로미터 (Keithley, 6517A, U.S.A.)를 사용하여 1 V/μm 전압을 인가하였다. 이후 오실로스코프 (LeCroy 62Xi, U.S.A.)를 사용하여 방사선 신호의 파형을 획득하였으며, ACQ 소프트웨어 (Biopac, Acqknowledge 4.2, Canada)를 사용하여 획득된 파형의 전하량을 산출하였다. Table 1은 측정 시 설정된 조사조건을 보여준다.

Table. 1 Measurement condition

RI source	Ir-192
Radiation energy	Approximately 370 keV
Dose rate	0.294 Gy/s
Radiation dose	0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 3, 5, 8, 10 Gy
SSD	1 ~ 12 cm (distance : 0.25 cm)

3. Evaluation

본 연구에서는 PbO 선량계의 성능을 평가하기 위해 재현성, 선형성, 거리의존성을 측정하고 이를 다이오드 (S2744, Hamamatsu Inc., Japan)와 비교하였다.

재현성 평가의 경우 1 Gy 선량을 반복적으로 10 회 조사하였고, 첫 번째 조사에서 얻은 신호를 기준으로 정규화 하였다. 평가기준은 IAEA Technical Report Series No. 398 (TRS 398)에서 권고하고 있는 95% 신뢰구간에서 표준편차 1.5% 이내를 기준으로 평가하였다^[14-16]. 본 연구에서는 상대표준편차 (Relative Standard Deviation; RSD)를 산출하였으며, 사용된 Eq. (1)은 다음과 같다.

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

이때, X_i 는 측정값이며, X_{ave} 는 산술 평균값이며, 측정횟수 n 을 설정하였다.

선형성 평가의 경우, 선량을 0.1 ~ 10 Gy로 점차적으로 증가시켜 조사하였고, 1 Gy를 기준으로 정규화 하였다. 이후 선형회귀분석 결과로부터 나타나는 결정계수 (R^2)를 diode와 비교하였고, 평가 기준은 0.9990 이상으로 설정하였다. 이러한 선형함수는 다음과 같은 Eq. (2)을 가진다.

$$Q = aD + b \quad (2)$$

이는 단위 선량 (D) 당 생성되는 전하량 (Q)의 크기를 가진다. 이에 본 연구에서는 선형함수의 기울기 (a)를 통해 민감도를 비교하였다.

거리의존성 평가의 경우, 선원표면간거리 (source to surface distance; SSD)를 1 ~ 12 cm까지 0.25 cm 단위로 증가시켜 1 Gy 선량을 조사하였다. 측정 결과는 최소거리 1 cm을 기준으로 정규화 하였다. 방사선원의 세기는 거리에 따라 거리역자승법에 비례하여 감소되는 경향을 보인다. 그러므로 Ir-192의 세기는 다음과 Eq. (3)을 가진다.

$$Q = 100d^a \quad (3)$$

이는 백분율 세기 100%를 기준으로 정규화된 세기 (Q)는 거리 (d)에 따라 거듭제곱함수의 기울기 (a)로 나타난다. 거리역자승 법칙에 따른 Ir-192 세기 변화의 이론적 수치는 a가 -2에 가까워야 한다^[17]. 그러므로 본 연구는 거듭제곱회귀분석 결과로써 a를 통해 경향성을 분석하고, R^2 를 제시하였다.

III. RESULT

1. Reproducibility

본 연구는 PbO 선량계의 구동 안정성을 제시하기 위해 재현성을 평가하였다. Fig. 3은 PbO 선량계와 diode의 재현성 결과를 보여준다.

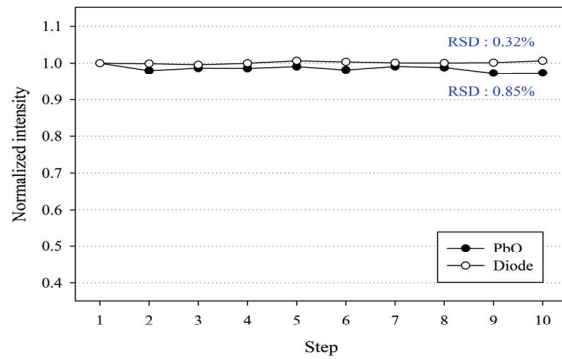


Fig. 3. Reproducibility of PbO dosimeter and diode at irradiation Ir-192 source.

재현성 결과 RSD는 PbO에서 0.85%, diode에서 0.32%를 보임으로써 RSD 1.5% 이내를 모두 만족하였다. PbO는 diode에 비해 0.53% 높은 RSD를 보였다.

2. Linearity

본 연구는 조사선량에 따른 정확성을 확인하기 위해 선형성을 평가하였다. Fig. 4는 점차적으로 높아지는 조사선량에 따른 선형성 결과를 보여준다.

선형성 결과 PbO 선량계와 diode는 R^2 이 0.9990 이상으로 우수한 성능을 보였다. 선형 함수 기울기 a를 통해 민감도를 비교하였을 때, PbO에서 0.0010, diode에서 0.0604로 diode에서 높은 결과를 보였다.

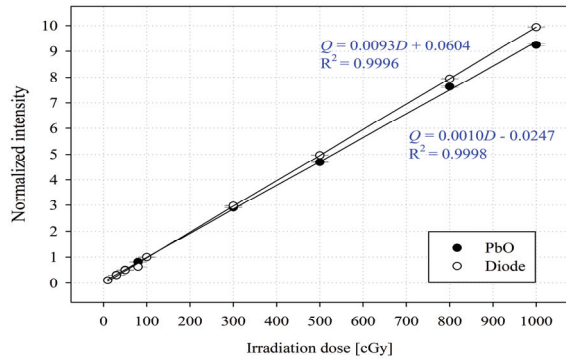


Fig. 4. Linearity of PbO dosimeter and diode at irradiation Ir-192 source.

3. Distance dependence

본 연구는 거리의존성을 평가하기 위해 SSD를 점차적으로 증가시켜 조사하여 반응 특성을 평가하였다. Fig. 5는 조사간격에 따른 반응 특성을 보여준다.

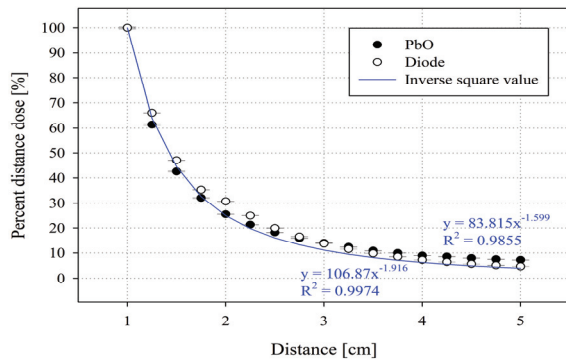


Fig. 5. Distance dependence of PbO dosimeter and diode at irradiation Ir-192 source.

거리 의존성 결과, 약 5% 이내의 세기를 기준으로 1 ~ 5 cm 거리에 대한 거듭제곱함수의 R²을 산출하였다. 그 결과 R²은 PbO에서 0.9855, diode에서 0.9974를 보였다. 이는 선원 거리가 가까워짐에 따라 거듭제곱함수의 산출값과 유사한 결과를 보였다.

이때 거듭제곱함수의 산출값과 비교하였을 때, 전체 평균차이는 PbO에서 1.66%, diode에서 2.18% 차이를 보였다.

IV. DISCUSSION

본 연구는 ICR의 선원 위치 정확성 평가를 위한 다결정 PbO 선량계의 반응특성을 제시하기 위해 재현성, 선형성, 거리의존성을 평가하였다.

재현성 평가결과는 반복적으로 조사되는 빔에 대하여 신호가 점차적으로 감소하는 추세를 보였으며, diode에 비해 저조한 특성을 보였지만, 평가 기준 1.5% 이내를 만족하였다. 이때 diode는 6 MV 광자선 에너지에서 보고된 RSD와 유사한 결과를 보였다^[9].

선형성 평가결과는 두 선량계에서 R²이 0.9990 이상으로 평가 기준을 만족하였다. 단위 선량 당 측정되는 전하량의 선형 기울기로 비교한 민감도는 PbO 선량계에 비해 diode에서 우수한 특성을 보였다. 이에 line 선량계 구축 시, PbO 선량계는 diode에 비해 선량세기 차이를 통한 위치 분석 가능 범위가 낮을 수 있다.

거리의존성 평가 결과는 선원 거리가 가까워짐에 따라 거듭제곱함수와 유사한 경향을 보였고, 전체 평균오차는 PbO에서 1.66%, diode에서 2.18%를 보였다. 이러한 측정결과는 거리역자승 법칙에 따라 낮아지는 선원의 세기변화와 유사하기 때문에 거리에 따른 profile을 비교함으로써 선량계를 검증할 수 있음을 의미한다.

이때 PIB 증착법을 이용한 다결정 물질은 간단한 제조공정을 가지기 때문에 상업적으로 단가를 낮출 수 있는 장점을 가진다. 본 연구는 TRS 398 보고서 권고되는 기준에 맞춰 PbO 성능을 평가하였다^[16,17]. 이에 본 결과는 임상에서 사용할 수 있는 QA 선량계로써 활용가능성을 제시한다.

하지만 이를 상업화하기 위해서는 pixel resolution 평가와 더불어 고체 선량계가 가지는 에너지 의존성, 선량률 의존성에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다. 또한 산화물질은 산화로 인해 선량 변화를 초래한다. 그러므로 이를 방지하기 위한 보호층 연구가 이루어져야 한다. 본 연구 결과는 후보 광도전체 물질에 대한 검출기 연구로써 방사선을 이용하는 모든 분야에 기초 자료를 제공한다.

V. CONCLUSION

본 연구는 HDR 근접치료의 선원 위치 정확성 평가를 위한 디지털 line 선량계의 필요성과, PbO 선량계의 기초 성능을 제시하였다. PbO 선량계는 각 평가항목의 기준을 만족하였으며, diode와 유사한 성능을 보였다. 추후 다양한 평가가 이루어진다면, 상업적으로 접목할 수 있는 최적화된 디지털 QA 시스템 구축이 가능할 것이다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (No. NRF-2020R1F1A1072898).

Reference

- [1] S. Nag, "High Dose Rate Brachytherapy: Its Clinical Applications and Treatment Guidelines", *Technology in cancer research & treatment*, Vol. 3, No. 3, pp. 449-455, 2004. <http://dx.doi.org/10.1177/153303460400300305>
- [2] K. J. Lee, S. H. An, R. N. Lee, "Monte Carlo Evaluation for the Effect of Positional Inaccuracy of Source on Patient's Dose in High-Dose-Rate Brachytherapy", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 55, No. 6, pp. 2361-2365, 2009. <http://dx.doi.org/10.3938/jkps.55.2361>
- [3] K. Yogo, A. Matsushita, Y. Tatsuno, T. Shimo, S. Hirota, M. Nozawa, S. Ozawa, H. Ishiyama, H. Yasuda, Y. Nagata, K. Hayakawa, "Imaging Cherenkov emission for quality assurance of high-dose-rate brachytherapy", *Scientific reports*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-10, 2020. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-020-60519-z>
- [4] R. Nath, L. L. Anderson, J. A. Meli, A. J. Olch, J. A. Stitt, J. F. Williamson, "Code of practice for brachytherapy physics: report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56. American Association of Physicists in Medicine", *Medical Physics*, Vol. 24, No. 10, pp. 1557-1598, 1997. <https://doi.org/10.1118/1.597966>
- [5] J. Venselaar, J. Perez-Calatayud, "A practical guide to quality control of brachytherapy equipment, ESTRO booklet No. 8", Brussels: European Society for Therapeutic Radiology and Oncology, 2004.
- [6] M. D. C. Evans, S. Devic, E. B. Podgorsak, "High dose-rate brachytherapy source position quality assurance using radiochromic film", *Medical Dosimetry*, Vol. 32, No. 1, pp. 13-15, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meddos.2006.10.001>
- [7] Z. Li, "Radiation damage effects in Si materials and detectors and rad-hard Si detectors for SLHC", *Journal of Instrumentation*, Vol. 4, No. 3, pp. 3011, 2009. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/4/03/P03011>
- [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. <http://dx.doi.org/10.1118/1.2924219>
- [9] K. T. Kim, Y. J. Heo, M. J. Han, K. M. Oh, Y. K. Kim, 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, pp. 3024, 2017. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/12/04/C04024>
- [10] U. N. Roy, G. S. Camarda, Y. Cui, R. Gul, G. Yang, J. Zazvorka, V. Dedic, J. Franc, R. B. James, "Evaluation of CdZnTeSe as a high-quality gamma-ray spectroscopic material with better compositional homogeneity and reduced defects", *Scientific reports*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7, 2019. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-43778-3>
- [11] M. Simon, R. A. Ford, A. R. Franklin, S. P. Grabowski, B. Menser, G. Much, A. Nascetti, M. Overdick, M. J. Powell, D. U. Wiechert, "PbO as direct conversion x-ray detector material", In *Medical Imaging 2004: Physics of Medical Imaging*, Vol. 5368, pp. 188-199, 2004.
- [12] O. Semeniuk, O. Grynko, G. Decrescenzo, G. Juska, K. Wang, A. Reznik. "Characterization of polycrystalline lead oxide for application in direct conversion X-ray detectors", *Scientific reports*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-09168-3>
- [13] M. Schieber, A. Zuck, H. Gilboa, G. Zentai, "Reviewing polycrystalline mercuric iodide x-ray

detectors”, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. 53, No. 4, pp. 2385-2391, 2006.

- [14] 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. 573-557, 1999. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(98\)00068-2](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(98)00068-2)
- [15] F. M. Khan, J. P. Gibbons, *Quality Assurance, Chapter 17 of, Khan's the physics of radiation therapy*, 5th Ed., Lippincott Williams & Wilkins, pp. 371-404, 2014.
- [16] Radiotherapy, External Beam. An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water, IAEA Technical Report Series 398, Austria, 2006.
- [17] M. Zabihzadeh, A. Yaollahpour, L. Kargar, "The Effect of Tissue Heterogeneities on Dose Distribution of Iridium-192 Source in Brachytherapy", Vol. 6, No. 2, pp. 205-213, 2013.

방사선 근접치료의 디지털 정도관리를 위한 Lead (II) Oxide 선량계 성능 평가

한무재¹, 양승우¹, 박성광^{2,*}

¹인제대학교 의과대학 방사선종양학과

²인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요 약

방사선 근접치료에서 잘못된 선원의 위치는 정상조직에 과도한 선량을 유발할 수 있기 때문에 선원의 위치 정확성 평가는 필수적이다. 이에 본 연구에서는 기존 아날로그 검증방식을 개선시키기 위해 lead (II) oxide (PbO) 기반의 디지털 선량계에 대한 기초연구를 수행하였다. 이에 다결정 PbO 선량계를 제작하였고 Ir-192 선원에 대한 계측 성능을 평가하였다. 그 결과 재현성은 상대표준편차가 0.82%로 평가 기준 1.5% 이내를 만족하였다. 선형성은 선형함수 R^2 이 0.9998로 우수한 결과를 보였다. 거리 의존성 평가의 경우, 거듭제곱함수 R^2 은 PbO에서 0.9855, diode에서 0.9974를 보였고, 전체 평균차이는 PbO에서 1.66%, diode에서 2.18% 차이를 보였다. 본 연구는 다결정 PbO 선량계의 Ir-192 선원에 대한 기초 검출성능을 제시하며, 방사선 계측분야에서 기초자료를 제공할 수 있다.

중심단어: 반도체, PbO, 선량계, 정도관리, 근접치료

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	한무재	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	박사후연구원
(공동저자)	양승우	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
(교신저자)	박성광	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	부교수