

Development and Feasibility Evaluation of CsPbBr₃ Dosimeter for Brachytherapy

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: May 09, 2022. Revised: June 24, 2022. Accepted: August 31, 2022.

ABSTRACT

In brachytherapy, a radiation source is inserted into the body to kill tumor tissue. Therefore, it is important to accurately measure the location of the source and the dose distribution. In this study, a dosimeter that can be used for brachytherapy was developed using CsPbBr₃ which is cheaper than the existing detector materials and has a simpler manufacturing process. The CsPbBr₃ dosimeter performance was evaluated by analyzing reproducibility, linearity, and distance dependence in ¹⁹²Ir source. As a result of reproducibility evaluation, the RSD was 1.36%, which satisfies the standard value of 1.5%. As a result of the linearity evaluation, the R² value was 0.9993, which satisfies the standard R² of 0.9990. The distance dependence evaluation showed a signal value that decreased exponentially as the distance increased. The evaluation results show that the CsPbBr₃ dosimeter satisfies the evaluation criteria and can be used as a brachytherapy quality assurance dosimeter.

Keywords: Brachytherapy, Dosimeter, Radiation, Perovskite, CsPbBr₃

I. INTRODUCTION

근접방사선치료는 전립선암, 자궁경부암, 식도암, 유방암 등의 질병을 치료하는데 사용되며, 방사선을 신체 외부에서 조사하는 외부방사선 조사법과 달리 방사선이 방출되는 방사성동위원소를 신체 내부에 직접 삽입하기 때문에 정상조직에는 피해를 최소화하면서도 종양조직에만 국부적으로 방사선을 조사하는 것이 가능하다^[1,2]. 이러한 치료계획과 동일한 치료를 위해서는 치료계획과 동일한 선량 분포를 구현하여 정확한 선량을 전달할 필요가 있게 된다^[3-6].

현재 임상에서는 우물형 계수기(Well count)를 사용하여 선량을 확인하고 F/S (Film/Screen) 시스템을 사용하여 선원 거주 위치와 선량분포를 측정하고 있지만, 선량과 선원 거주 위치, 선량분포를 한 번

에 측정할 수는 없으며, 필름의 경우에는 실시간 판독이 어렵고 번짐 현상으로 인한 측정 오차가 발생할 수 있다는 문제점까지 가지고 있다^[6-8].

이에 방사선 검출기 분야에서는 이를 대체할 수 있는 다양한 검출기 연구가 이루어지고 있다^[5,6]. 이 중, CsPbBr₃ 물질은 할로겐화물 이온이 포함되어 있기 때문에 방사선을 효율적으로 흡수할 수 있으면서도 제조 공정이 간단하여 기존 검출기를 대체할 수 있는 물질로써 연구되고 있다^[9,10].

본 연구에서는 기존 근접방사선치료용 선량계 기술을 개선시키기 위한 선행연구로써, CsPbBr₃ 물질을 사용하여 선량의 세기를 측정하면서도 선원의 위치와 선량분포를 동시에 측정할 수 있는 상대선량계(relative dosimeter)를 제작하였으며, 제작된 CsPbBr₃ 선량계의 성능을 검증하고 근접방사선치료용 선량계로 적용가능한지 평가하기 위하여 선

* Corresponding Author: Sung-Kwang Park E-mail: Physicist@paik.ac.kr

Tel: +82-51-890-8749

원 조사조건에 따른 기초 성능평가를 수행하였다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. Fabrication CsPbBr₃ Dosimeter

본 연구에서는 대면적 제작에 유리하면서도 적은 공정비용으로 선량계 제작이 가능한 입자침전법(Particle In Binder; PIB)을 사용하여 선량계를 제작하였다. 입자(powder type)와 바인더(binder)를 혼합하는 PIB 공정으로 선량계를 제작하기 위하여 CsBr (Merck, Sigma-Aldrich, 미국) 전구체와 PbBr₂ (TCL, Tokyo Chemical Industry, 일본) 전구체를 다이메틸설폭사이드(dimethyl sulfoxide; DMSO) 용액에 각각 용해한 후 교반 및 건조시켜 분말 형태의 CsPbBr₃를 준비하였으며, 제조된 CsPbBr₃ 분말에 폴리비닐부티랄(polyvinyl butyral, PVB) 기반의 바인더를 혼합하였다. 이후 1 cm × 1 cm로 형성된 틀에 screen printing으로 도포하고 70°C 온도에서 8시간 동안 건조하여 선량계를 제작하였다. 이때 하부 전극은 indium tin iodide(ITO)가 도포된 유리를 사용하였으며 상부전극은 99.999% 순도의 금(Sigma Aldrich Inc. 미국)을 물리적 기상 증착(Physical vapor deposition; PVD) 공정으로 증착하여 형성하였다.

2. Experimental Set-up

본 연구에서는 고선량을 근접방사선 장비(microSelectron, Ncletron, 네덜란드)의 ¹⁹²Ir 선원을 사용하여 제작된 CsPbBr₃ 선량계의 성능을 평가하였다. ¹⁹²Ir 선원은 반감기 74.2일이며, 평균에너지 380 keV를 가진 선원으로 3.41 × 10¹⁴ Bq/g의 높은 비방사능을 가지고 있어서 근접방사선치료용 선원으로 사용되고 있다. Fig. 1은 제작된 CsPbBr₃ 선량계의 실험 설정을 보여준다.

방사선이 제작된 CsPbBr₃ 선량계에 조사되었을 때 발생하는 전자-정공쌍(Electron-Hole Pair; EHP) 신호로 획득하기 위하여 전위계 (Keithley 6517B, Keithley, 미국)와 오실로스코프 (WaveSurfer 510, Teledyne LeCroy, 미국)를 CsPbBr₃ 선량계 전극에 연결시키고 μm 두께당 1 V의 전압을 인가하였다. 그리고 연결된 오실로스코프를 통하여 방사선이

조사되었을 때의 파형 및 신호를 획득하였다. 이때, 선원의 위치는 CsPbBr₃ 선량계 상부 1 cm 로 고정하였다.

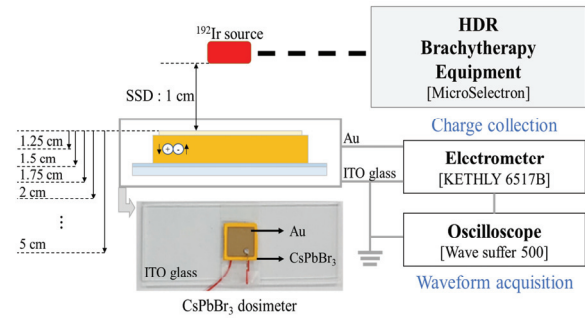


Fig. 1. Measurement setup of CsPbBr₃ dosimeter.

3. Dosimeter Parameter Evaluation

본 연구에서는 제작된 CsPbBr₃ 선량계의 성능을 평가하기 위해 각각의 조사조건으로 방사선이 조사되었을 때의 누적된 전하량을 측정하여 재현성, 선형성, 거리의존성을 분석하였다.

재현성을 평가하기 위하여 1 Gy 선량을 10회 반복 조사하여 신호를 측정하였으며, 첫 번째 조사에서 측정된 신호를 기준으로 신호를 정규화하고 상대표준편차(relative standard deviation; RSD)를 도출하였다. 평가기준은 IAEA Technical Report Series No. 398 (TRS 398)에서 권고하고 있는 95% 신뢰구간에서 표준편차 1.5% 이내를 기준으로 하였다^{5,6)}.

선형성을 평가하기 위하여 선량계 상부 1 cm로 선원의 위치를 고정시키고 선량을 0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1, 3, 8, 10 Gy로 조사하여 신호를 획득하였다. 이후 선형성을 선형 회귀 분석을 통한 결정계수(coefficient of determination; R²)로 분석하여 평가하였다. 평가기준은 M. J, Han 논문 등에서 평가기준으로 설정한 0.9990 이상의 R²로 설정하였다^{5,6)}.

거리의존성을 평가하기 위하여 선원표면간거리(source to surface distance; SSD)를 1 cm에서 5 cm까지 0.25 cm 씩 간격을 증가시키면서 1 Gy 씩 선량을 조사하였을 때 측정되는 신호 변화를 분석하였다.

III. RESULT

1. Reproducibility

본 연구는 동일조사에 대한 CsPbBr₃ 선량계의 출력 신호 변화를 분석하고 재현성을 평가하였다.

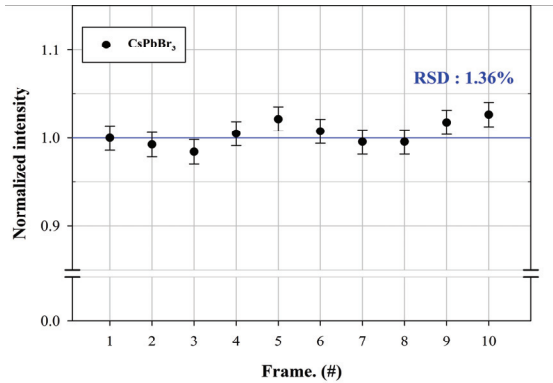


Fig. 2. Reproducibility graph of CsPbBr₃ Dosimeter.

Fig. 2은 동일조사에 대한 CsPbBr₃ 선량계의 출력 신호 재현성 결과를 보여준다. 재현성 평가 결과, RSD는 1.36%로 도출되어 평가기준 1.5% 이내를 만족하는 결과로 나타났다.

2. Linearity

본 연구는 선량 변화에 따른 출력신호 변화를 분석하고 선형성을 평가하였다.

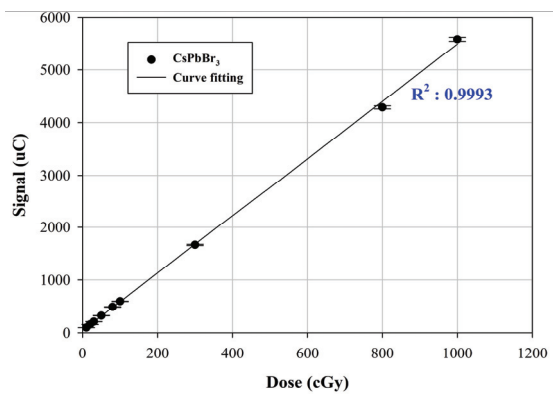


Fig. 3. Linearity graph of CsPbBr₃ Dosimeter.

Fig. 3는 점차적으로 증가하는 선량에 대한 CsPbBr₃ 선량계의 출력신호 선형성을 보여주는 그래프이다. 선형성 평가 결과, 제작된 CsPbBr₃ 선량계의 R²는

0.9993으로 평가기준으로 한 0.9990 이상의 선형성을 보여주고 있다.

3. Distance dependence

본 연구는 동일 조사조건에서 SSD 변화에 따른 출력신호를 분석하여 거리의존성을 평가하였다.

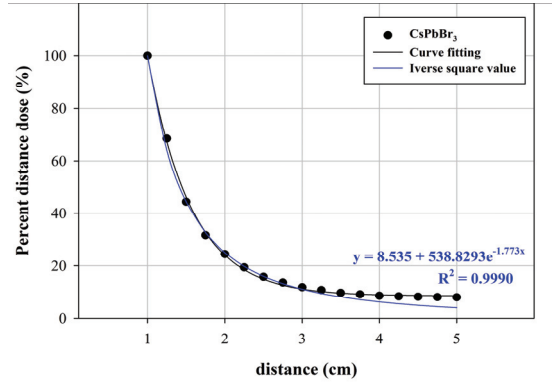


Fig. 4. Distance dependence graph of CsPbBr₃ Dosimeter.

Fig. 4는 증가된 SSD에 따른 출력신호를 보여준다. 거리 의존성 평가 결과, 선원이 제작된 선량계에 가장 가까울 때, 가장 큰 신호값을 나타내며, SSD 거리에 따라 신호가 지수적으로 감소하는 경향을 보인다. 이 때, 회귀분석을 통한 곡선 적합 (Curve fitting)으로 나타나는 곡선식은 $y = 8.535 + 538.8293e^{-1.773x}$ 이며, 적합도 R²은 0.9990으로 제시되었다. 이러한 측정값을 이론적인 거리역자승법칙과 비교하였을 때, 3 cm까지는 출력신호의 감소값이 거리역자승 법칙과 유사한 경향을 보였으며, 최대 0.53%의 차이만을 보여주었다. 3 cm 보다 거리가 증가하였을 때는 차이가 신호 차이가 점점 벌어져서 4 cm의 SSD에서는 2.32%, 5 cm의 SSD에서는 4.01%의 차이가 발생하였다.

IV. DISCUSSION

본 연구는 근접방사선치료용으로 CsPbBr₃ 선량계를 제작하고 기초성능을 평가하기 위하여 재현성, 선형성, 거리의존성을 분석하였다.

재현성 평가결과는 반복적으로 조사되는 빔에 대하여 기준 1.5% 이내를 만족하였다. 이는 제작된 CsPbBr₃ 선량계의 재현성이 근접방사선치료용 선량

계로 사용하기에 적합한 것을 나타낸다^[5,6].

선형성 평가결과, 제작된 선량계에서의 R²이 0.9990 이상으로 평가 기준을 만족하였다. 이는 제작된 CsPbBr₃ 선량계가 측정되는 신호를 기준으로 선량계에 조사된 선량을 산출할 수 있음을 나타내며, 상대선량계로 활용할 경우에 근접방사선치료에서 선량전달 정도를 측정할 수 있음을 나타낸다^[5,6].

거리의존성 평가 결과, PIB 공정으로 제작된 CsPbBr₃ 선량계는 SSD가 멀어짐에 따라 측정값이 지수적으로 일정하게 감소하는 모습을 보여주었다. 이러한 측정결과는 거리역자승 법칙에 따라 낮아지는 선원의 세기변화로 인한 것이며, 3 cm의 SSD까지는 이론적인 수치와 비교하였을 때 0.53%의 차이만을 나타내었다^[5,6]. 하지만 그 이상의 거리에서는 실험 세팅 과정에서 발생하는 하드웨어적인 신호 잡음과 CsPbBr₃ 선량계 물질의 암전류로 인하여 발생한 신호 잡음 등으로 인하여 실제 이론적인 수치와 실제 측정값 사이에 차이가 최대 4.01%까지 벌어지게 되었다. 이러한 거리 의존성 결과는 근접방사선치료에서 3 cm까지는 감마선원에 대한 선량 분포를 정량적인 수치로 나타낼 수 있음을 의미하며, 선량계의 위치와 선량계에 조사된 선량의 크기를 기준으로 선원의 위치를 추적할 수 있음을 나타낸다. 하지만 3 cm 거리 이상에서 선원위치와 선량분포를 특정하기 위해서는 다수의 선량계를 추가적으로 연결하여 사용하거나 신호잡음 제거하기 위한 과정이 추가적으로 요구하게 된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 CsPbBr₃을 사용하여 선량계를 제작하였고 제작된 선량계에 대하여 재현성, 선형성, 거리 의존성을 평가하여 근접방사선치료용 선량계에 대한 기초평가를 수행하였다.

제작된 선량계는 재현성, 선형성에서 기준이상의 성능을 제시하였으며, 거리 의존성 평가에서는 3 cm까지 안정적인 계측이 가능하다고 평가되었다. 이는 제시된 CsPbBr₃ 선량계가 선량, 선원 위치 추적, 선량분포 측정을 동시에 가능한 것을 의미하며, CsPbBr₃ 선량계가 근접방사선치료용 선량계로 활용 가능한 것을 나타낸다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (NRF - 2021R1F1A1063500).

Reference

- [1] G. Kertzscher, S. Beddar, "Inorganic scintillation detectors based on Eu-activated phosphors for 192Ir brachytherapy", *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 62, No. 12, pp. 5046-5075, 2017. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa716e>
- [2] Ravinder Nath, Lowell L. Anderson, Jerome A. Meli, Arthur J. Olch, Judith Anne Stitt, Jeffrey F. Williamson, "Code of practice for brachytherapy physics: Report of the AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 56", *Medical Physics*, Vol. 24, No. 10, pp. 1557-1598, 1997. <https://doi.org/10.1118/1.597966>
- [3] 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>
- [4] 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>
- [5] K. T. Kim, J. H. Kim, Y. H. Shin, M. J. Han, J. E. Park, Y.J. Heo, D. H. Lee, H. L. Cho, B. I. Min, Y. K. Oh, S. K. Park, "Feasibility study of a lead-monoxide-based dosimeter for real-time radioactive source detection in HDR brachytherapy", *Journal of Instrumentation*, Vol. 14, No. 5, pp. 05001, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/05/p05001>
- [6] M. J. Han, S. W. Yang, J. H. Jung, D. H. Lee, J. Y. Kim, S. J. Cho, K. H. Kim, C. W. Mun, H. L. Cho, S. K. Park, "Development and evaluation of a

thallium (I) bromide dosimeter for intracavitary radiotherapy quality assurance", *Journal of Instrumentation*, Vol. 17, No. 2, pp. 02010, 2022.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/p02010>

- [7] J. E. Park, K. T. Kim, W. H. Choi, H. Lee, S. J. Cho, S. H. Ahn, J. Y. Kim, Y. K. Song, K. b. Kim, H. D. Huh, S. K. Park, "Evaluation of Fabricated Semiconductor Sensor for Verification of γ -ray Distribution in Brachytherapy", *Progress in Medical Physics*, Vol. 26, No. 4, pp. 280-285, 2015.
<https://doi.org/10.14316/pmp.2015.26.4.280>
- [8] 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>
- [9] M. Bruzzi, C. Talamonti, N. Calisi, S. Caporali, A. Vinattieri, "First proof-of-principle of inorganic perovskites clinical radiotherapy dosimeters", *APL Materials*, Vol. 7, No. 5, pp. 51101, 2019.
<https://doi.org/10.1063/1.5083810>
- [10] S. Shrestha, R. Fischer, G. J. Matt, P. Feldner, T. Michel, A. Osvet, I. Levchuk, B. Merle, S. Golkar, H. Chen, S. F. Tedde, O. Schmidt, R. Hock, M. Rührig, M. Göken, W. Heiss, G. Anton, C. J. Brabec, "High-performance direct conversion X-ray detectors based on sintered hybrid lead triiodide perovskite wafers", *Nature Photonics*, Vol. 11, No. 7, pp. 736-440, 2017.
<https://doi.org/10.1038/nphoton.2017.94>

근접방사선치료용 CsPbBr₃ 선량계 제작 및 적용가능성 평가

양승우¹, 박성광^{2,*}

¹인제대학교 의과대학 방사선종양학과

²인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요약

근접방사선치료에서는 종양조직을 사멸시키기 위하여 선원을 인체 내부에 삽입하기 때문에 선원의 위치 정확성을 정확히 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 기존 사용되는 검출기 재료로 사용되는 물질보다 저렴하고 제조 공정이 간단하여 기존 물질들을 대체할 수 있는 CsPbBr₃를 사용하여 근접방사선치료용으로 사용가능한 선량계를 개발하고자 하였다. 그리고 ¹⁹²Ir 선원에서 재현성, 선형성, 거리의존성 분석하여 선량계의 기초 성능을 평가하였다. 재현성 평가 결과, RSD는 1.36%로 기준치 1.5%를 만족하였다. 선형회귀분석에 따른 선형성 평가결과, 0.9993의 R²값으로 기준치 0.9990 이상의 R²이 제시되었다. 거리의존성 평가결과 거리가 멀어짐에 따라 지수적으로 일정하게 감소하는 신호값을 확인하였다. 재현성, 선형성, 거리의존성 평가결과에 기준 이상의 성능을 제시하여 제작된 CsPbBr₃ 선량계가 근접방사선치료용 선량계로 활용 가능한 것으로 보여주었다.

중심단어: 근접방사선치료, 선량계, 방사선, 페로브스카이트, CsPbBr₃

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	양승우	인제대학교 의과대학 방사선종양학과	연구원
(교신저자)	박성광	인제대학교 부산백병원 방사선종양학과	교수