

Feasibility Study of Phosphor Particle Blended Hybrid Dosimeter for Quality Assurance in Radiation Therapy

Yohan Shin,¹ Moojae Han,¹ Jaehoon Jung,² Heunglae Cho,³ Sungkwang Park^{3,*}

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

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

³Department of Radiation Oncology, Busan Paik Hospital, Inje University

Received: May 07, 2019. Revised: June 27, 2019. Accepted: June 30, 2019

ABSTRACT

In the field of radiotherapy, the Quality Assurance(QA) procedure to verify the safety of treatment is considered to be very important. However, due to various problems of the conventional dosimeters used for the QA, researches on these dosimeters have been actively carried out to replace them. In this study, to maximize the sensitivity by visible light(VL) emitted from phosphors, blended hybrid sensors were fabricated by blending various weight percent(wt%) of Gd₂O₂S:Tb which is a phosphor with excellent fluorescence efficiency into PbI₂. Then, the electrical properties to high energy radiation from the blended sensors and the pure PbI₂ sensor were compared and evaluated. As a result of the sensitivity evaluation, the sensor of 3wt% showed the highest value with more than 40% difference from the other sensors, and gradual decreasing in sensitivity was observed with increasing wt% except for the sensor of 3wt%. Also, in the reproducibility evaluation, the pure PbI₂ sensor exhibited a large variation in coefficient of variation(CV)>0.015, while all the blended sensors showed CV<0.015.

Keywords: Radiation therapy, Quality Assurance, Photoconductor, phosphor, Lead(II) Iodide, Hybrid

I . INTRODUCTION

종양에 대한 방사선치료 분야에서는 Quality Assurance (QA)가 매우 중요한 사항으로 여겨지며, 이를 위한 정확한 선량의 계측이 가능한 선량계의 운용이 필수적이다. 이는 곧 QA에 있어 치료 방사선에 대한 정확한 계측이 가능한 선량계가 매우 중요함을 의미하며, 이러한 QA를 위한 선량계로는 Ionization chamber와 Si diode 등이 널리 쓰이고 있다. 그러나 위 선량계들은 각각 복잡한 측정 절차와 제한된 부피로 인한 측정의 한계, 방사선에 의한 검출 물질의 성능 변화 등의 문제를 가지고 있다.^[1,2] 이에 해당 문제를 해결하기 위한 다각적인 선량계 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 여기에는 방사선 에너지를 전기 에너지로 변환하는 광도전성 물질에 대한

연구도 포함된다. 그중에서도 대표적인 광도전성 물질인 Lead(II) Iodide(PbI₂)는 상대적으로 낮은 leakage current를 가짐에 따라 전기적 안정성을 인정받고 있으나, 민감도 또한 상대적으로 낮아 개선이 필요할 것으로 여겨진다.^[3] 이에 본 연구에서는 형광체가 소량 혼합된 PbI₂ 기반의 sensor들을 제작함으로써 PbI₂의 민감도를 향상 및 방사선치료 분야의 QA 선량계로서의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 형광체는 흡수한 방사선 에너지를 일정한 파장을 가지는 Visible light(VL) 에너지로 재방출하는 특성을 바탕으로 방사선의 간접방식 검출기에 사용되는 물질이며, 이는 Y₂O₃:Eu, Gd₂O₂S:Tb, CaWO₄ 등을 포함한다. 또한, 제작된 Blended hybrid sensor 들과 Pure PbI₂ sensor의 고에너지 광자선에 대한 반응특성을 비교함으로써 그 유효성을 평가하였다.

* Corresponding Author: Sungkwang Park

E-mail: physicist@paik.ac.kr

Tel: +82-10-4568-3143

II. MATERIALS AND METHODS

1. Materials

본 연구에서는 sensor의 제작을 위하여 Indium Tin Oxide(ITO)가 도포된 Glass를 하부 전극기관으로 사용하였다. 또한, Kojundo Chemical Laboratory사에서 제조한 순도 99.99% 이상의 광도전성 반도체 화합물 PbI_2 로 방사선 흡수층을 증착하였으며, Blended hybrid sensor에 첨가된 형광체로는 Sigma-Aldrich사의 순도 99.99%를 갖춘 $Gd_2O_2S:Tb$ 를 사용하였다. 이는 높은 밀도와 우수한 light yield를 바탕으로 뛰어난 형광효율을 가지므로, 본 연구의 목적인 VL에 의한 추가적인 전하량 생성에 적합하다.^[4] 또한, 상기 방사선 흡수층 상부에는 아이넥서스사에서 제조한 순도 99.99% 이상의 Au로 상부 전극을 증착하였다.

2. Fabrication

본 연구에서는 형광체로부터 방출되는 VL에 의한 PbI_2 에서의 추가적 전리 및 이를 통한 민감도 개선을 목적으로, 방사선 흡수층에 미량의 $Gd_2O_2S:Tb$ 를 첨가하였다. Fig. 1은 Blended hybrid sensor의 구조 및 메커니즘, 제작과정을 개략적으로 나타낸 것이다.

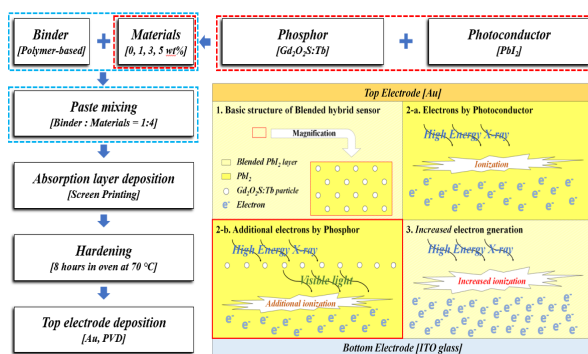


Fig. 1. Schematic diagram for structure and mechanism of Blended hybrid sensors including fabrication process.

위와 같은 민감도 개선의 목적을 달성하기 위하여, 증착 면적의 제어 및 제조공정이 비교적 간편하고 간소하여, Solar Cell 및 Touch Panel Screen 등의 제조 시에 자주 쓰이고 있는 Screen Printing과

입자침전법(Particle-In-Binder; PIB)으로 제작되었다. 각 sensor는 ITO glass를 하부 전극기관으로 활용하였으며, ITO 증착면 상부에 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 면적의 격벽을 형성하였다. 이후, powder 형태의 방사선 흡수층 구성물질과 고분자 기반 액상 binder를 4:1의 비율로 혼합하여 paste 상태로 조제하고, 상기된 격벽 면적 내에 Screen printing으로 충전하였다. 이때, 각 sensor에 $Gd_2O_2S:Tb$ 를 0, 1, 3, 5의 다양한 weight percent(wt%)로 각기 다르게 혼합함으로써 blended hybrid sensor와 pure PbI_2 sensor를 준비하였다. 준비된 Paste 상태의 방사선 흡수층을 고형화하기 위하여, 오븐 내에서 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 8시간의 건조과정을 거쳐 방사선 흡수층을 형성하였다. 이때 흡수층의 두께는 $150 \text{ }\mu\text{m}$ 를 기준으로 오차범위 $\pm 5\%$ 를 만족하도록 하였다. 이후 물리적 증기 증착법으로 흡수층 상부에 $0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$ 면적의 Au를 증착함으로써 상부 전극을 형성하였다.

3. Measurement

본 연구에서는 6 MV 에너지의 광자선에 대한 Pure PbI_2 sensor 및 다양한 wt%의 Blended hybrid sensor의 전기적 반응특성 평가를 하고자 하였다. 이를 위해, Keithley사의 6517A Electrometer로 1 V/ μm 의 구동전압을 sensor에 인가하고, Teledyne LeCroy사에서 제조한 Wavesurfer510 Oscilloscope로 출력되는 신호를 수집하여 그 값을 측정하였다. Fig. 2는 6 MV 광자선에 대한 제작된 sensor들의 반응특성을 확인하기 위한 실험 구성 개략도이다.

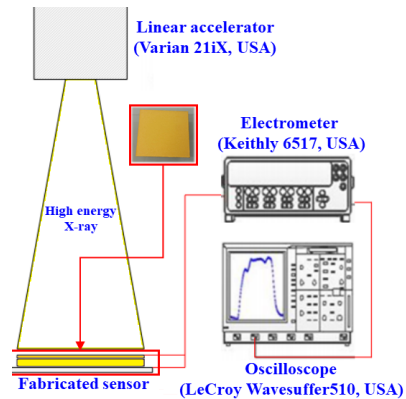


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental set up.

상기 장비 및 구성을 토대로, 각 sensor의 인제대

학교 부산백병원에 설치된 Varian 사의 21iX LINA의 6 MV 광자선에 대한 민감도와 재현성을 평가하였다.

3.1 Sensitivity

민감도는 실험 대상인 sensor가 주어진 조건에 대한 출력 신호의 크기를 평가하는 지표로, 방사선에 대한 직접 방식 sensor의 경우 일반적으로 단위면적당 전하생성량(nC/cm^2)을 산출하여 상대평가한다. 본 연구에서는 제작된 각 sensor에 대하여 400 MU/min의 선량율과 6 MV의 에너지를 가지는 광자선을 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 의 field size와 100 cm의 SSD를 두고 각 sensor에 100 MU씩 조사하였으며, 이때 sensor의 전면에 해당 에너지의 build-up region 형성을 위하여 1.5 cm의 slab phantom을 두었다. 이후, 이러한 실험조건으로 획득한 데이터를 상부 전극의 면적($0.8 \times 0.8 \text{ cm}^2$)에 대한 민감도로 산출하여 상호 비교·평가하였다.

3.2 Reproducibility

재현성은 동일 선량에 대한 각 sensor의 출력 안정성을 나타내는 지표이며, 일정한 선량을 연속적·반복적으로 조사함에 따른 출력 신호의 변화량 편차를 기준으로 평가한다. 이를 위하여, 본 연구에서는 제작된 각 sensor에 대하여 민감도 평가방법에 기술한 바와 같은 조사조건으로 각 sensor 당 10회씩 조사하고, 이를 통해 획득한 데이터를 기반으로 재현성을 평가하였다.

III. RESULT

1. Sensitivity

Fig. 3는 Pure PbI_2 sensor 및 1, 3, 5 wt%의 Blended hybrid sensor들에 대한 민감도 평가결과이다.

평가결과, 민감도의 평가지표인 단위면적당 전하생성량은 3 wt%에서 약 $45.53 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 으로, 타 sensor들보다 최소 40% 이상 높게 나타났다. 반면, Pure PbI_2 sensor를 포함한 다른 비율의 sensor들은 평균적으로 약 $25.5 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 를 기준으로 하여 최대 편차가 약 $1.5 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 로 나타나 유의미한 차이를 보이지 않았다.

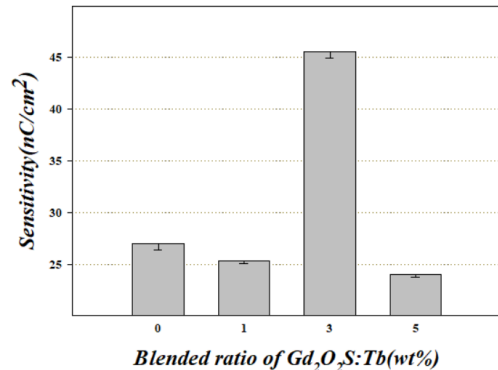


Fig. 3. Sensitivity of fabricated sensors including 0 to 5 wt% of $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$.

2. Reproducibility

Table 1.은 제작된 sensor들에 대하여 동일 조건의 6 MV X-ray를 10회 반복조사할 때의 재현성 평가결과를 나타내고 있다.

Table 1. Reproducibility of each sensor at 100 MU

#	Blended ratio of $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ (wt%)			
	0%	1%	3%	5%
1	1	1	1	1
2	0.989787	0.996237	0.997367	0.992571
3	0.985845	0.991848	0.980918	0.988682
4	0.983586	0.989494	0.979202	0.98743
5	0.983318	0.984737	0.976857	0.983656
6	0.981668	0.979926	0.974858	0.983434
7	0.977827	0.977644	0.971999	0.982985
8	0.943454	0.977383	0.964812	0.973698
9	0.93965	0.976061	0.962857	0.970725
10	0.92148	0.971124	0.954591	0.96336
SD	0.024653	0.009087	0.013565	0.010271
CV	0.025398	0.00923	0.013894	0.010452

평가결과, 모든 sensor에서 연속적인 10회 반복조사에 대하여 출력 신호가 조금씩 감소하는 추세가 나타났다. 특히, Pure PbI_2 sensor에서는 검출된 신호의 최솟값이 최댓값에 대하여 92.15%에 해당하였으며, 그 변동계수(Coefficient of Variation; CV)가 약 0.025로 상대적으로 크게 나타났다. 한편, 최댓값에 대한 최솟값은 Blended hybrid sensor의 경우

1wt%에서는 97.11%, 3wt%에서 95.46%, 5wt%에서 96.34%로 나타났다.

IV. DISCUSSION

민감도 평가결과, 3wt%의 $Gd_2O_2S:Tb$ 를 포함하는 Blended hybrid sensor에서 타 sensor들보다 최소 40% 이상 큰 값을 가지는 민감도가 측정되었다. 이는 3wt%를 전후로 광도전성 물질의 wt% 감소에 의한 전하량 감소와 형광체 입자로부터의 VL에 의한 추가적 ionization 간의 최적화가 이루어졌기 때문으로 사료되며, 첨가된 $Gd_2O_2S:Tb$ 가 치료영역 에너지의 광자선에 대한 PbI_2 의 민감도 개선에 유효성이 있음을 의미한다. 또한, 1wt% 및 5wt%에서 Pure PbI_2 sensor보다 더 낮은 민감도가 나타난 것은 본 연구와 유사한 형태로 산화물이 첨가된 광도전성 물질 기반 sensor에 대한 타 논문의 민감도 변화 추세와 유사성을 가진다.^[5]

한편 재현성 평가에서 나타난 모든 sensor에서의 출력값 감소추세는 다결정 구조의 물질에서 확인되는 Grain boundary 구조에 의한 Charge trapping 현상 및 시간에 따른 Noise 안정화에 의한 것으로 여겨진다.^[6] 특히, 이러한 현상은 Pure PbI_2 sensor에서 두드러진 것에 반해 Blended hybrid sensor들은 모두 타 논문에서 제시한 재현성 기준인 $CV < 0.015$ 를 만족함으로써, 전기적으로 안정되었음을 증명하였다.^[7] 또한, 이는 본 연구에서 최초 의도한 VL에 의한 방사선에 대한 민감도 증가 이외에도, 앞서 언급한 산화물 혼합 연구와 같이 leakage current의 저감화에도 영향을 준 것으로 사료된다.^[5]

V. CONCLUSION

본 연구는 방사선치료 안전성 검증을 위한 QA에 사용되는 선량계로서의 PbI_2 기반 sensor의 적용가능성 평가로, PbI_2 에 VL을 방출하는 형광체를 혼합함에 따른 반응특성 개선 및 이를 통한 QA 선량계에 대한 적용가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 0~5wt%의 다양한 형광체 혼합비로 sensor를 제작하였으며, 해당 sensor들의 전기적 반응특성 및 안정성을 확인하고자 민감도 및 재현성을 평가하였다.

본 연구의 결과에서 확인한 3wt% sensor의 40% 이상 높아진 민감도 및 안정적인 재현성은 방사선 치료기기의 QA를 위한 선량계에 적용하기에 적합할 것으로 판단된다. 추후 뛰어난 전기적 반응특성을 나타낸 3wt%를 기준으로 더욱 세분화한 wt%의 연구를 통해 가장 이상적이고 최적화된 혼합비를 찾을 수 있을 것이며, 이를 통해 방사선 치료기기의 QA를 위한 선량계에 대한 적용가능성 또한 높일 수 있을 것이다.

Acknowledgment

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

References

- [1] 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. 03011, 2009. DOI: 10.1088/1748-0221/4/03/P03011
- [2] 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
- [3] 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 PbI_2 and HgI_2 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
- [4] C. W. E. Eijk, "Inorganic scintillators in medical imaging", *Physics in Medicine & Biology*, Vol. 47, No. 8, pp. 85-106, 2002. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01542-0
- [5] 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. C03023, 2018. DOI: 10.1088/1748-0221/13/03/C03023

- [6] M. Z. Kabir, "Effects of charge carrier trapping on polycrystalline PbO x-ray imaging detectors," Journal of Applied Physics, Vol. 104, No. 7, pp. 074506-074509, 2008. DOI: 10.1063/1.2990765
- [7] Y. Heo, K. Kim, J. Kim, J. Kim, C. Kim, C. Mun, S. Park, "Development of Oxide-Based Lead (II) Iodide Radiotherapeutic Dosimeter for Stable Dosimetry," Science of Advanced Materials, Vol. 10, No. 7, pp. 1003-1009, 2018.

Phosphor Particle 혼합형 Hybrid 선량계의 방사선치료 Quality Assurance에 대한 적용가능성 평가

신요한,¹ 한무재,¹ 정재훈,² 조흥래,³ 박성광^{3,*}

¹인제대학교 의과대학 방사선종양학과

²양산부산대학교병원 의생명융합연구소

³인제대학교 부산백병원 방사선종양학과

요약

방사선치료 분야에서는 치료의 안전성을 검증하기 위한 Quality Assurance(QA) 절차가 매우 중요하게 여겨진다. 그러나 일반적으로 이에 사용되는 선량계들의 다양한 문제점 때문에, 이를 대체하기 위한 선량계 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 형광체로부터 방출된 visible light(VL)에 의한 Sensitivity 극대화를 위해, 뛰어난 형광 효율을 가지는 형광체인 Gd₂O₂S:Tb를 요오드화납(Lead(II) Iodide; PbI₂)에 다양한 weight percent(wt%)로 혼합한 Blended hybrid sensor를 제작하였다. 이후 Blended sensor 및 Pure PbI₂ sensor의 고에너지 방사선에 대한 반응특성을 비교 및 평가하였다. 민감도 평가결과, 3wt%는 sensor에서 타 sensor들과 40% 이상 차이나는 최댓값이 나타났으며, 이를 제외한 센서에서 wt%의 증가에 따른 점차적 민감도 감소추세를 확인하였다. 또한, 재현성 평가에서는 Pure PbI₂ sensor가 coefficient of variation(CV)>0.015의 큰 편차를 보인 반면, blended sensor는 모두 CV<0.015 이하의 결과를 보였다.

중심단어: 방사선치료, 품질 보증, 광도전체, 형광체, 요오드화납, 하이브리드

연구자 정보 이력

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