

Fabrication of Bendable Gd₂O₂S:Tb Intensifying Screen and Evaluation of Fatigue Properties

Ji-Koon Park,¹ Sung-Woo Yang,¹ Je-Hoon Jeon,¹ Joo-Hee Kim,² Ye-Ji Heo,³
Sang-Sik Kang,¹ Kyo-Tae Kim^{3,*}

¹Department of Radiological Science, International University of Korea

²Department of Emergency and Disaster Management, Inje University

³Department of Biomedical Engineering, Inje University

Received: November 23, 2017. Revised: December 25, 2017. Accepted: December 31, 2017

ABSTRACT

In this study, it was expected that long-term stability against external mechanical external force could be secured if the phosphor layer had ductility. In this study, a bendable Gd₂O₂S:Tb sensitized paper was fabricated by screen printing method and the image uniformity was evaluated through RMS analysis and histogram analysis to investigate the effect of fatigue accumulation due to long-term external force and repetitive external force. As a result, the dominant pixel area is maintained constant and the relative standard deviation is less than 10% for the long-term external force. However, for the repetitive external force, the dominant pixel area is divided into three areas and the image uniformity is adversely affected. Based on these results, it is suggested that the curved surface detector can be applied by securing the mechanical stability against the existing radiation sensitized paper. However, further studies are needed to apply it to the flexible detector. As a result, flexible radiation sensitizers can be applied to various curved surfaces, and it is expected to be applicable to various fields such as nuclear medicine, medical treatment, and industrial fields in the future.

Keywords: Radiation intensifying screen, CMOS X-ray detector, Image uniformity, Root mean square, Histogram

I. INTRODUCTION

의료 분야에서 디지털 방사선 영상 기술은 낮은 방사선량으로 고품질의 의료영상을 확보하기 위한 형광체 기반의 방사선 검출기에 대한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. 현 임상에서 광범위하게 이용되는 검출기는 일반적으로 물리적 진공 증착 기술을 바탕으로 박막형 형광체로 제작됨에 따라 평판형 구조를 갖는다. 하지만, 이는 외부 외력에 약한 특성을 가지므로 기계적 안정성에 대한 문제가 지속적으로 제기되고 있다.^[1] 이러한 문제점을 해결하기 위하여 입자형 형광체에 대한 관심이 대두되고 있다. 이는 박막형 형광체에 대비하여 외부의

기계적 외력에 안정적인 특성을 가지지만 취성을 가지므로 아직까지 불충분하다.^[2,3] 하지만, 지금까지 발광 효율의 개선을 위한 관점에서 대부분의 연구가 이루어졌으며^[4-7], 기계적 안정성에 대한 연구는 미비한 실정이다.^[8,9] 그러므로 본 연구에서는 기계적 안정성을 개선하기 위한 방안으로써 연성에 주목하였다.

연성은 사전으로 물질에 탄성한계를 넘는 외력을 주었을 때 물체가 파괴되지 않고 소성변형하며 외력을 견디어 내는 성질로써 정의되며 일반적으로 균열이 발생되지 않고 내구성을 유지시킬 수 있는 재료의 성질로 알려져 있다. 이러한 연성을 형광체 층이 가질 수 있다면 외부의 기계적 외력에

* Corresponding Author: Kyo-Tae Kim

E-mail: radiokkt09@naver.com

Tel: +82-10-6820-1367

대하여 장기간 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대하였다.

이에 본 연구에서는 두께 및 크기 그리고 형태의 제어가 용이한 스크린 프린팅 공법을 통하여 유연한 Gd₂O₂S:Tb 증감지를 제작하였다.^[10,11] 또한, 장기적인 외력과 반복적인 외력에 의한 피로누적에 따른 영향을 고찰하고자 영상 균일도를 평가하였다.

II. EXPERIMENTAL METHODS

1. Fabrication of Bendable Gd₂O₂S:Tb screen

본 연구에서는 스크린 프린팅 공법을 이용하고자 광학적 특성이 우수한 광학 소재 중 하나인 PET 필름을 기판로 사용하였다. 이 후, Gd₂O₂S:Tb 파우더(2.5 μm, Phosphor Tech 社, USA)를 실리콘 계열의 바인더에 교반하여 제조한 페이스트를 세척된 기판의 상단에 도포하였다. 이 때 면적은 CMOS X-ray 검출기의 검출 영역을 고려하여 5 cm × 5 cm 를 설정하였으며, 두께는 250 μm로 제어하였다. 마지막으로 도포 후, 40 °C 12시간 동안 오븐에서 건조하였다. 스크린 프린팅 공법을 이용한 유연한 Gd₂O₂S:Tb 증감지 제조 공정을 Fig. 1과 같이 나타내고 있다.

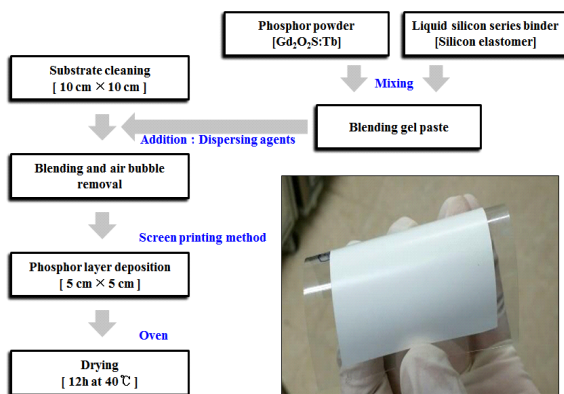


Fig. 1. Fabrication process of bendable Gd₂O₂S:Tb intensifying screen using screen printing method.

2. Geometrical setup

본 연구에서는 제작된 증감지에 대한 영상 균일도 특성을 평가하기 위하여 CMOS X-ray 검출기

(Shad-o-Snap 1024, Rad-ikon Imaging Crop., USA)를 통해 X-ray 영상을 획득하였다. X-ray 영상을 획득하기 위하여 표준 방사선 선질에 대한 국제 규격을 바탕으로 RQA 5의 방사선 조건을 설계하였다.

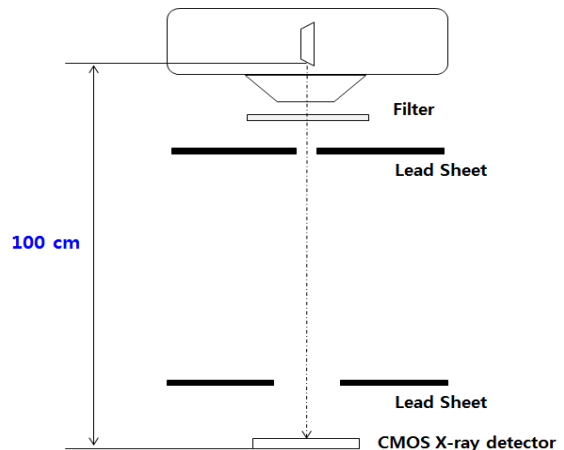


Fig. 2. Schematic diagram of geometrical setup for measurement

X-ray 영상을 획득하기 위한 실험 모식도를 Fig. 2와 같이 나타내고 있다. RQA 5 선질 조건을 설정하기 위하여 본 연구에서는 관전압 71 kVp에서 규정된 21 mmAl의 필터에 1.5 mmAl를 추가함으로써 총 부가필터 22.5 mmAl을 이용하였다. 또한, 방사선 선량을 결정하기 위하여 본 연구에서는 조사야 크기의 절환을 고려하여 관전류 100 mA로 설정하였으며, 조사시간의 경우 CMOS X-ray 검출기의 셔터 On/Off 시간을 고려하여 500 ms를 설정하였다.

3. Evaluation of uniformity properties

본 연구에서는 CMOS X-ray 검출기에서 획득된 X-ray 영상에 대한 영상 균일도를 평가하기 위하여 Octave 소프트웨어 (Octave ver. 4.0.2, Free Software Foundation Inc., USA)를 이용하였다. 또한, X-ray 영상은 TIFF 포맷으로 획득하였으며 2차 광자 외에 환경적 요인에 의하여 경계부에서 발생할 수 있는 왜곡을 제거하기 위하여 중심에서 90%를 관심 영역으로 설정하였다. 이 후, 설정된 ROI를 바탕으로 영상 균일도를 정량적으로 평가하기 위하여 평균 제곱근 (Root Mean Square, 이하 RMS)과 픽셀 값 분포에 대한 히스토그램을 분석하였다. RMS는 방

사선학 분야에서 입상도를 표현하기 위한 용어으로써 통계학적 관점에서 표준편차를 의미한다. 그러므로 본 연구에서는 2차 광자에 의해 형성된 영상의 균일도를 평가하기 위하여 RMS 분석을 활용하였다. RMS는 다음의 수식을 통하여 산출하였다.^[12]

$$RMS = ((\sum (X_i - X_{Ave})^2) / n)^{0.5}$$

X_i 는 설정된 ROI 내 각 픽셀 값을 의미하고, X_{Ave} 는 설정된 ROI에 대한 픽셀 값의 평균을 의미하며, n 은 설정된 ROI의 픽셀 수를 의미한다. 설정된 ROI는 894×894 의 배열을 가지며 픽셀 수는 799236이다. 이러한 RMS 분석을 바탕으로 상대적 표준 편차 (Relative Standard Deviation, 이하 RSD)를 도출함으로써 평가 지표로 이용하였으며 평가 기준을 10%로 설정하였다. 또한, 본 연구에서는 2차 광자에 의해 형성된 방사선 영상의 픽셀 값 산포 정도를 확인하기 위하여 설정된 ROI의 히스토그램을 분석하였다.

4. Fatigue properties

본 연구에서는 증감지의 피로누적에 대한 특성을 평가하기 위하여 반복적인 외력을 받았을 경우와 장시간 외력을 받았을 경우를 가정하여 피로누적을 수행하였으며 이에 따른 영상 균일도를 평가하였다.

반복적인 외력의 경우 극한 조건에서의 피로누적을 구현하기 위하여 60 cycle/min 속도로 10 - 10000번에 대하여 굽힘 시험을 수행하였고, 장시간 외력은 12시간 동안 3시간 단위로 제어하였다.

III. RESULT AND DISCUSSION

1. Evaluation of uniformity properties

본 연구에서 제작된 유연한 $Gd_2O_2S:Tb$ 증감지의 영상균일도 평가하고자 피로누적을 가하지 않았을 때의 RMS 분석 및 히스토그램을 평가하였다.

RMS 분석을 수행한 결과, 평균값은 324.86으로 분석되었으며 RMS는 29.19로 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 RSD는 약 9%로써 설정된 10% 이내를 만족하

는 것으로 평가하였다. 또한, X-ray 영상을 형성하는데 기여하는 픽셀 값의 산포 분포를 히스토그램을 통하여 분석하였다. 픽셀값에 대한 히스토그램을 표준화하여 Fig. 3와 같이 나타내고 있다. 히스토그램을 분석한 결과, 영상을 형성하는데 지배적인 픽셀 값은 322로써 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 RMS 분석에서 산출된 평균값과 1% 이내의 오차가 나타났다.

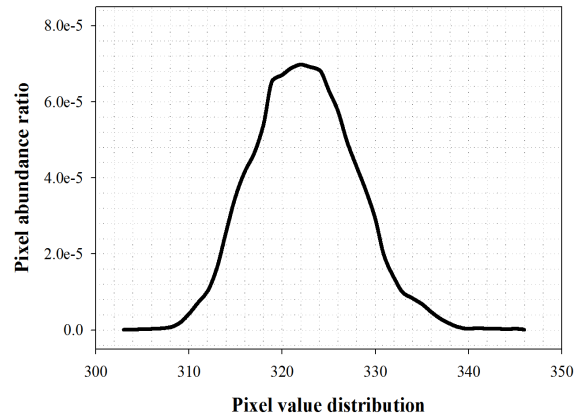


Fig. 3. Histogram curve for pixel abundance ratio

2. Evaluation of fatigue properties

본 연구에서는 제작된 유연한 $Gd_2O_2S:Tb$ 증감지에 대한 피로누적 특성에 대한 평가를 위하여 반복적인 외력과 장기적인 외력에 대한 피로누적을 가하였으며 이에 대한 RMS, 히스토그램 분석을 수행하였다. 반복적인 외력에 대한 피로누적에 따른 RSD의 변화를 Fig. 4와 같이 나타내고 있다. 반복적인 외력에 대한 RMS 분석을 수행한 결과, 평균값은 - 18.5 ~ - 9.5 %의 차이가 발생하는 것으로 분석되었으며 RMS는 47.8 ~ 170.3%의 차이가 분석되었다. 이러한 결과를 바탕으로 RSD는 12.6 - 25.5%로 분석되었으며 10% 이내를 유지하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 반복적인 외력을 통한 피로누적에 따른 히스토그램의 변화를 Fig. 5와 같이 나타내고 있다.

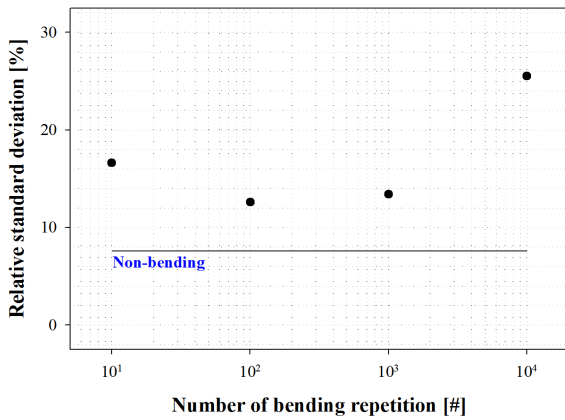


Fig. 4. Fatigue properties investigated via bending repetition.

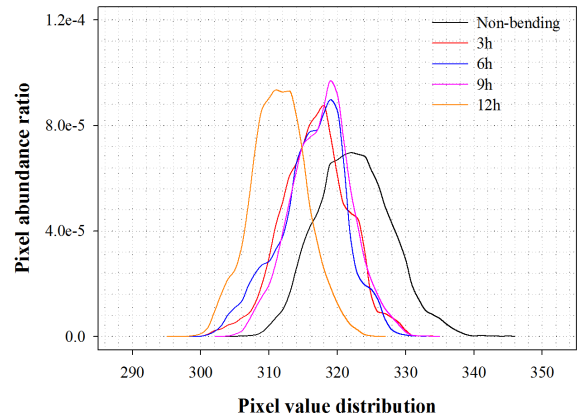


Fig. 7. Histogram curve of pixel abundance ratio via bending time.

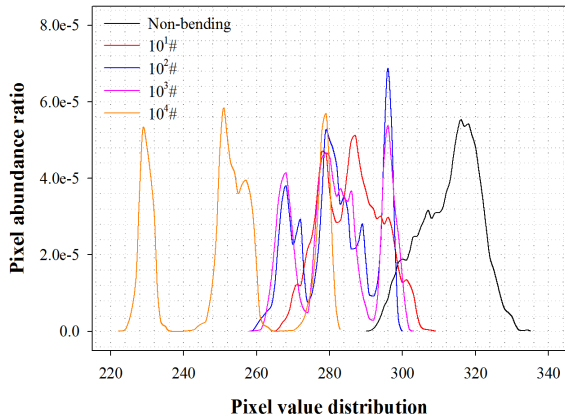


Fig. 5. Histogram curve of pixel abundance ratio via bending repetition.

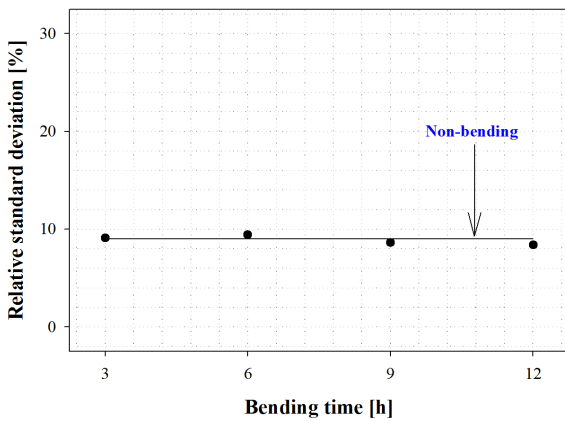


Fig. 6. Fatigue properties investigated via bending time.

히스토그램 분석 결과, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 반복적인 외력이 가해짐에 따라 peak가 1개에서 3개로 구분되는 것으로 나타났으며 이는 bending 시행 횟수가 증가함에 따라 peak의 구분이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 지속적인 외력에 대한 피로누적에 따른 RSD의 변화를 Fig. 6와 같이 나타내고 있다. 장시간 외력에 대한 RMS 분석을 수행한 결과, AD는 -4.3 ~ -2.4%의 차이가 발생하는 것으로 분석되었으며 RMS는 -11.0 ~ 0.9%의 차이가 발생하는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 RSD는 -7.0 - 1.1%로 분석되었으며 10% 이내를 만족하는 것으로 나타났다. 지속적인 외력을 통한 피로누적에 따른 히스토그램의 변화를 Fig. 7와 같이 나타내고 있다. 히스토그램 분석 결과, 반복적인 외력과 달리 지배적인 픽셀 값이 유지되는 것으로 분석되었다. 3시간의 경우 318, 12시간의 경우 311로 나타났다.

IV. DISCUSSION

반복적인 외력이 가해짐에 따라 peak가 분할될 뿐만 아니라 bending 시행 횟수가 증가함에 따라 peak의 구분이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것은 궁극적으로 방사선 영상의 영상 균일도가 감소한다는 것을 의미한다. 그러므로 반복적인 외력에 의한 피로누적이 발생하였을 경우 방사선 영상에서 왜곡이 나타날 가능성이 있을 것으로 평가된다. 반면, 지속적인 외력을 통한 피로누적의 경우 반복적인

외력과 달리 지배적인 픽셀 값이 유지되는 것으로 나타났으며 이러한 연구 결과를 바탕으로 제작된 유연한 $Gd_2O_2S:Tb$ 증감지는 취성을 가지는 기존 입자형 증감지에 대비하여 기계적 안정성을 확보하였음을 확인하였다. 하지만, 아직까지 플렉시블 검출기에 적용하기 위해서는 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그러므로 차후 연구에서는 연성에 영향을 미치는 요소인 고분자 구조의 바인더에 대한 비율에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

V. CONCLUSION

본 연구에서는 외부의 기계적 외력에 대하여 장기간 안정성을 확보하기 위한 방안으로써 연성 가능성을 포함함으로써 유연한 $Gd_2O_2S:Tb$ 증감지를 제작하였고 장기적인 외력과 반복적인 외력에 의한 피로누적에 따른 영향을 고찰하고자 영상 균일도를 평가하였다. 연구 결과, 본 연구에서 제작된 증감지는 취성을 가지는 기존 증감지에 대비하여 기계적 안정성을 확보함으로써 곡면 검출기의 적용 가능성을 제시하였다. 따라서 유연성을 가진 방사선 증감지는 다양한 곡면에 적용이 가능하기 때문에 향후 핵의학, 치료용, 산업 분야 등 적용범위도 광범위할 것으로 기대된다.

Acknowledgement

This work was supported by International University of Korea's research fund in 2017.

Reference

- [1] M. Spahn, "Flat detectors and their clinical applications," *European radiology*, Vol. 15, No. 9, pp. 1934-1947, 2005.
- [2] R. Schmechel, M. Kennedy and H. von Seggern, "Lu luminescence properties of nanocrystalline $Y_2O_3: Eu^{3+}$ in different host materials," *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, No. 3, pp. 1679-1686, 2001.
- [3] D. Cavouras, I. Kandarakis, A. Bakas, D. Triantis, C. D. Nomicos, G. S. Panayiotakis, "An experimental method to determine the effective luminescence efficiency of scintillator-photodetector combinations used in X-ray medical imaging systems," *the british journal of radiology*, Vol. 71, No. 847, pp. 766-772, 1998.
- [4] S. H. Cho, H. W. Lee, C. W. Moon, J. H. Kim, J. K. Park, G. R. Jeon, R. N. Lee, S. H. Nam, "Synthesis and characterization of Eu^{3+} doped Lu_2O_3 nanophosphor using a solution-combustion method," *Journal of sol-gel science and technology*, Vol. 53, No. 2, pp. 171-175, 2010.
- [5] C. M. Michail, G. P. Fountos, P. F. Liaparinos, N. E. Kalyvas, I. Valais, I. S. Kandarakis, G. S. Panayiotakis, "Light emission efficiency and imaging performance of $Gd_2O_2S:Eu$ powder scintillator under x-ray radiography conditions," *Medical physics*, Vol. 37, No. 7, pp. 3694-3703, 2010.
- [6] J. N. Kim, J. W. Shin, K. M. Oh, Y. K. Lee, S. K. Park, J. K. Park, S. H. Nam, "Optimization of Nano-Phosphor Synthesis by Including Sensitizer Doping for Medical X-Ray Imaging," *Journal of nanoscience and nanotechnology*, Vol. 13, No. 5, pp. 3455-3458, 2013.
- [7] Y. K. Lee, S. K. Park, J. W. Shin, K. M. Oh, S. U. Heo, G. S. Cho, J. Y. Kim, S. H. Nam, "Novel Method of Producing Nanoparticles for Gadolinium Scintillator Based Digital Radiography," *Journal of nanoscience and nanotechnology*, Vol. 13, No. 10, pp. 7026-7029, 2013.
- [8] I. D. Jung, M. K. Cho, S. M. Lee, K. M. Bae, P. G. Jung, C. H. Lee, J. M. Lee, S. M. Yun, H. K. Kim, S. S. Kim and J. H. Ko, "Flexible $Gd_2O_2S:Tb$ scintillators pixelated with polyethylene microstructures for digital x-ray image sensors," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, No.1, pp. 015014, 2008.
- [9] P. G. Jung, C. H. Lee, K. M. Bae, J. M. Lee, S. M. Lee, C. H. Lim, S. M. Yun, H. K. Kim and J. S. Ko, "Microdome-gooved $Gd_2O_2S:Tb$ scintillator for flexible and high resolution digital radiography," *Optics express*, Vol. 18, No. 14, pp. 14850-14858, 2010.
- [10] K. Oh, J. Shin, S. Kim, Y. Lee, S. Jeon, J. Kim and S. Nam, "The development of efficient X-ray conversion material for digital mammography," *Journal of Instrumentation*, Vol. 7, No. 2, pp. C02009, 2012.
- [11] G. Y. Choi, R. Y. Yun, Y. H. Shin, M. J. Han, K.

T. Kim, Y. J. Heo, S. H. Nam, "A study of the electrical properties of bottom electrodes for bendable sensors in diagnostic X-ray irradiation," *Biomedical Engineering Letters*, Vol. 6, No. 1, pp. 26-30, 2016.

- [12] I. H. Choi, K. T. Kim, Y. J. Heo, H. H. Park, S. S. Kang, S. C. Noh, J. K. Park, "The study of affecting image quality according to forward scattering dose used additional filter in diagnostic imaging system," *Journal of the Korean Society of Radiology*, Vol. 10, No. 8, pp. 597 - 602, 2016.

유연한 $Gd_2O_2S:Tb$ 증감지 제작 및 피로누적에 대한 영향

박지균,¹ 양승우,¹ 전제훈,¹ 김주희,² 허예지,³ 강상식,¹ 김교태^{3,*}

¹한국국제대학교 방사선학과

²인제대학교 재난관리학과

³인제대학교 의용공학과

요 약

본 연구에서는 연성을 형광체 층이 가질 수 있다면 외부의 기계적 외력에 대하여 장기간 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대하였다. 이에 본 연구에서는 스크린 프린팅 공법을 통하여 유연한 $Gd_2O_2S:Tb$ 증감지를 제작하였고 장기적인 외력에 의한 피로누적과 반복적인 외력에 의한 피로누적에 따른 영향을 고찰하고자 RMS 분석과 히스토그램을 분석을 통하여 영상 균일도를 평가하였다. 연구 결과, 지속적인 외력에 대하여는 지배적인 픽셀 영역이 일정하게 유지되면서 RSD가 10% 이내를 만족하였으나, 반복적인 외력의 경우 지배적인 픽셀 영역이 3 영역으로 분할되며 영상 균일도에 악영향을 미치며 RSD가 10% 이상으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 기존 방사선증감지에 대비하여 기계적 안정성을 확보함으로써 곡면 검출기의 적용 가능성을 제시하였으나 아직까지 플렉시블 검출기에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 이러한 결과 유연성을 가진 방사선 증감지는 다양한 곡면에 적용이 가능하므로 향후 핵의학, 치료용, 산업 분야 등과 같은 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

중심단어: 방사선증감지, CMOS X-ray 검출기, 영상 균일도, 평균제곱근, 히스토그램