

Structural Design of Digital Radiography Detector using Hybrid Method for the Improvement of Response Property by X-ray

Kyo-Tae Kim*, Moo-Jae Han*, Jin-Seon Kim*, Ye-Ji Heo*, Kyung-Min Oh*, Ji-Koon Park**, Sang-Hee Nam*

Dept. of Biomedical Engineering, Inje University*, Dept. of Radiological Science, International University of Korea**

X-ray 반응 특성 개선을 위한 Hybrid형 디지털 방사선 검출기의 구조 설계

김교태*, 한무재*, 김진선*, 허예지*, 오경민*, 박지균**, 남상희*

인제대학교 의용공학과*, 한국국제대학교 방사선학과**

Abstract

Digital radiography is divided into the direct method using photoconductor and indirect method using phosphor based on the principles in acquiring the image information, but both have different advantages and disadvantages. Therefore, this study conducted a preliminary research on the structure of the hybrid detector that combined phosphor and photoconductor to improve the sensitivity of X-ray. As a result, when the tube voltage was adjusted at 30ms of exposure time, the direct structure displayed an overall excellent sensitivity, but at the exposure time of 50ms or more, the hybrid structure displayed a better outcome. This seems to have enough research value considering that various clinical examinations usually include 50ms or more exposure time.

Keywords : Digital radiation detector, Structural design, Hybrid, Photoconductor layer, Phosphor layer

요약

디지털 방사선촬영 기술은 영상 정보를 획득하는 원리에 따라 광도전체를 이용하는 직접 방식과 형광체를 이용하는 간접 방식으로 구분되지만, 모두 다양한 장단점을 내포하고 있다. 이에 본 연구에서는 X-ray 민감도를 개선하고자 형광체 및 광도전체를 병용한 Hybrid형 검출기의 구조에 대한 기초 연구를 수행하였다. 실험 결과, 조사 시간을 30 ms로 고정하고 관전압을 변화할 경우 전체적으로 직접 방식의 구조에서 우수한 민감도가 나타났으나, 조사 시간이 50 ms 이상에서는 Hybrid 구조의 경우가 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 임상에서 다양한 검사를 수행할 경우에 일반적으로 50 ms 이상의 조사시간을 이용한다는 점에서 충분한 연구적 가치를 가질 것으로 사료된다.

중심단어 : 디지털 방사선 검출기, 구조 설계, 하이브리드, 광도전층, 형광층

I. INTRODUCTION

방사선 학문은 이학을 기반으로 공학과 의학을 접목한 융합 학문으로써, 복합적인 발전을 통해 점차 진문화되어 가고 있다. 최근에는 첨단 기기들을 활용한 의료 영상 융합 기술을 개발하고자 다양한 연구들이 이루어지며, X-ray를 이용한 디지털 상수용체(Image receptor; IR)의 분야에서는 저선량의 고품질 영상을 위하여 누설전류 저감화 및 민감도 향상을 목적으로 지속적인 연구가 이루어지고 있다^{[1]-[3]}. 이러한 디지털 방사선촬영 기술은 영상 정보를 획득하는 원리에 따라 광도전체(Photoconductor)를 이용하는 직접 방식과 형광체(Phosphor)를 이용하는 간접 방식으로 구분된다.

직접 방식의 경우 우수한 검출 효율 및 공간 해상력을 가지지만^{[4],[5]}, 변환 효율이 낮아 물질 두께에 따라 높은 인가전압을 공급해야하고^[6], 누설전류 저감을 위하여 절연층 공정을 수행하여야 한다^{[7]-[9]}. 반면에 간접 방식의 경우 저선량을 통한 영상 구현이 가능하지만 빛 산란에 의하여 낮은 해상력을 가진다^[10]. 그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 형광체 및 광도전체를 병용한 Hybrid형 구조가 제시되었다.

Hybrid형 구조는 방사선 감도를 높이기 위한 형광층과 높은 검출 효율을 가지는 광도전층을 병용함으로써 기존의 직접 검출기와 비교하여 보다 높은 전기적 신호를 획득할 수 있다. 이는 얇은 박막 형태로 두께를 제어하여 고전압 인가에 의한 문제를 해결할 수 있음을 의미한다. 또한 수광 소자에 비해 비저항이 높기 때문에 누설전류(Leakage current) 저감 및 높은 충전율(Fill factor)의 이점을 가진다. 이에 본 연구에서는 형광체와 광도전체를 병용한 Hybrid형 구조의 검출기를 제작함으로써 다양한 검사를 수행하고 있는 임상에서의 적용 가능성을 민감도를 기준으로 고찰하고자 한다.

II. RESEARCH AND RESULT

본 연구에서 Hybrid형 구조의 검출기를 제작하기 위하여 X-ray 조사 시 형광층에서 발생하는 가시광을 흡수시키기 위한 HgI₂ 광도전층 상부에 18%의 고유 발광 효율을 가진 Gd₂O₂S:Tb을 형광층으로 형성하였다.

이 때 각 층의 형성 방법은 생산 수율이 뛰어나고 두께 및 형태 제어가 용이하여 다양한 박막 공정에 이용되고 있는 입자침전법 (Particle-in-Binder; PIB) 공법을 이용하였다. Fig. 1은 PIB 공법에 대한 모식도를 나타내고 있다.

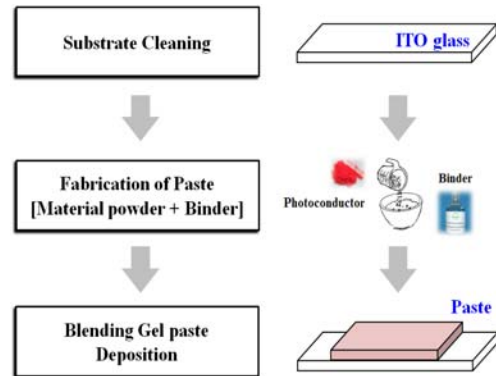


Fig. 1. Producing process of Particle-in-Binder method.

2.1 Fabrication of Hybrid structure

2.1.1 Fabrication of photoconductor layer

본 연구에서는 PIB 공법을 이용하고자 산화인듐 (Indium tin oxide; ITO)이 코팅된 glass(corning glass, 10 Ω/cm², 0.7t)을 기판(Substrate)으로 사용하였다. 이 후 HgI₂ 파우더(99.999% 5N, 고순도 Co., Japan)를 폴리머 계열의 바인더에 교반하여 제조한 페이스트를 세척된 기판의 상단에 도포하였다. 이 때 면적은 5 cm × 5 cm, 두께는 200 μm로 제어하였다. 제작된 광도전층 상단 중앙부에 전자-정공 쌍에 의한 유도 전하를 수집하기 위한 상부전극으로써 3N 금을 면적 3 cm × 3 cm로 물리적 증기 증착법(Physical vapor deposition; PVD)을 이용하여 증착하였다.

2.1.2 Fabrication of phosphor layer

본 연구에서는 PIB 공법을 이용하고자 플레서블 필름을 기판으로 사용하였다. 이 후 Gd₂O₂S:Tb 파우더 (Phosphor-technology Co., England)를 바인더에 교반하여 제조한 페이스트를 세척된 기판의 상단에 도포하였다. 이 때 면적은 광도전층과 동일하게 제어하였고, 두께는 100 μm로 제어하였다.

2.1.3 Integration

제작된 형광층을 광도전층 상단 중앙부에 증착된 상부전극(Top electrode)에 겹치지 않도록 하기 위하여 중앙부의 면적 $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 을 제거하였다. 이 후 투명 접착제를 이용하여 광도전층과 형광층을 통합하였다.

2.2 Measurement of property for unit-cell

2.2.1 Reproducibility

시편의 신뢰성을 확인하기 위하여 재현성 평가를 수행하였다. 재현성 평가의 수행을 위해 사용한 선질(Radiation quality)은 RQA 3 조건으로, 이를 위하여 부가 여과(Additional filtration) 10 mmAl에 부합하는 부가 여과판 14 mmAl을 설치하였고 반가층(Half value layer; HVL) 4.0 mmAl에 부합하는 53 kVp로 고정하였다^[11]. 또한 관전류(Tube current) 및 조사 시간(Exposure time)을 100 mA로 고정하여 각 시편의 전기적 신호를 측정하였다. 이 후 조사 시간 변화에 따른 측정 신호를 바탕으로 변동계수(Coefficient of variation; CV)를 산출하여 시편의 신뢰성을 확인하였고, 신뢰성이 확보되는 구간의 X-ray 조사 조건에서 민감도 실험을 수행하였다. 또한 신뢰성 있는 조사 조건의 확인 후, X-ray 진단 영역인 40 kVp ~ 120 kVp를 20 kVp 간격으로 측정함으로써 관전압에 따른 신뢰성 여부를 평가하였다. 이 때 변동계수는 다음의 수식으로 도출하였다.

$$CV = [\sum\{(X_i - X_{\text{Ave}})^2 / (n - 1)\}^{0.5} / X_{\text{Ave}} \dots (1)$$

즉, X_i 는 I번째의 전기적 신호 측정치를 의미하고, X_{Ave} 는 전기적 신호 측정치의 평균값을 의미하며, n 은 측정 횟수를 의미하는데 5 회 이상을 권고하고 있다.

2.2.2 Sensitivity

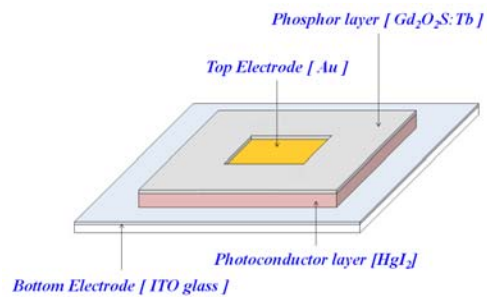
시편의 민감도(Sensitivity) 측정을 수행하기 위하여 구동전압의 인가는 Electrometer (6517A, Keithley Co., USA)를 사용하였고 파형 획득을 위하여 Oscilloscope (62Xi, LeCroy Co., USA)를 사용하였다. 이 때 관전압 및 조사 시간에 따른 민감도 변화를 확인하고자 관전류는 재현성 평가와 동일하게 설정하고 조사 조건 및 관전

압 영역은 신뢰성이 확보되는 조사 조건을 이용하였다.

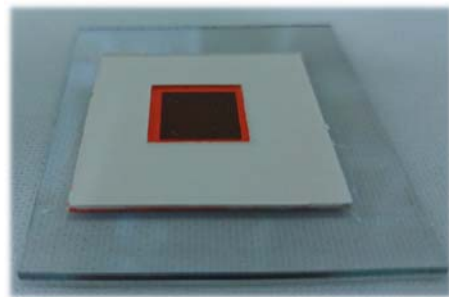
III. RESULT AND DISCUSSION

3.1 Fabrication of Hybrid structure

Hybrid형 시편 제작 결과, 면적은 $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 제작되었고 광도전층의 두께는 $200\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$ 이내로 제작되었다. Fig. 2는 최종 제작된 Hybrid형 Unit-cell의 단면도를 나타내고 있다.



(a) Diagram of Sample



(b) Fabrication of Sample

Fig. 2. Unit cell for Hybrid.

3.2 Measurement of property for unit-cell

3.2.1 Reproducibility

본 연구에서 민감도 실험 전 시편의 신뢰성을 확인하기 위하여 변동계수가 가장 낮은 시편을 선별하였다. 이 때 X-ray 조사 조건은 RQA 3 조건하에서 관전압 53 kVp, 관전류 100 mA를 고정하고 조사 시간을 25 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms 변화에 따라 측정하였으며 0.05를 기준으로 조사 시간에 따른 신뢰성 여부를 평가하였다.

실험 결과, 두 가지 방식의 unit-cell에서는 조사 시간이 증가함에 따라 재현성이 우수해지는 동일한 특성을 가진다. 이 때 Hybrid형 unit-cell의 경우 변동계수가 0.008 ~ 0.046 까지 나타나는 것으로 확인되었고, 직접 방식 unit-cell의 경우 0.003 ~ 0.015 까지 나타났다. 이러한 결과는 전체적으로 우수한 재현성을 가지지만 25 ms 미만에서의 결과는 신뢰할 수 없을 것으로 사료된다.

이에 본 연구에서는 X-ray 조사 조건을 25 ms 이상으로 선정하였다. 또한 신뢰성 있는 조사 조건 중 30 ms를 설정한 후 X-ray 진단 영역인 40 kVp ~ 120 kVp를 20 kVp 간격으로 측정하여 0.05를 기준으로 관전압에 따른 신뢰성 여부를 평가하였다.

실험 결과, Hybrid형 unit-cell의 경우 40 kVp에서 변동계수가 0.068로 나타나 신뢰성이 낮은 것으로 나타났다. 하지만 60 kVp ~ 120 kVp에서는 0.009 ~ 0.020 까지 나타나는 것으로 확인되었고, 직접 방식 unit-cell의 경우 0.008 ~ 0.022 까지 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 40 kVp를 제외한 X-ray 진단 영역을 X-ray 조사 조건으로 선정하였다.

3.2.2 Sensitivity

본 연구에서 Hybrid형 unit-cell과 직접 방식 unit-cell에서 관전압에 따른 민감도를 측정하기 위하여 관전류를 100 mA로 고정하고 재현성 특성을 바탕으로 조사 시간은 30 ms로 고정하였으며 관전압은 60 kVp ~ 120 kVp를 20 kVp 간격으로 변화시키면서 민감도를 측정하였다. Fig. 3은 관전압 변화에 따른 Hybrid형 unit-cell과 직접 방식 unit-cell의 민감도를 나타내고 있다.

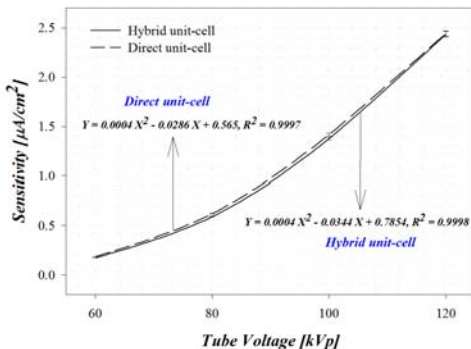


Fig. 3. Sensitivity as a function of tube voltage.

실험 결과, 관전압 변화에 따라서 2차 다항 함수 형태로 민감도가 증가하는 것으로 나타났고 Hybrid형 unit-cell 보다 직접 방식 unit-cell이 상대적으로 높은 민감도 특성이 나타났다. 직접 방식의 경우 Hybrid형 unit-cell에 대하여 60 kVp에서 약 7.7%, 80 kVp에서 5.2%, 100 kVp에서 3.1% 우수한 성능이 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 특성 변화를 두 방식의 Fit curve를 바탕으로 비교하면 민감도의 그래프 폭은 0.0004로 동일한 반면에 y절편을 의미하는 상수 값은 Hybrid형 unit-cell이 약 0.22 정도 높은 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 Hybrid형 unit-cell이 고관전압 영역에서 직접 방식 unit-cell에 비해 더 우수한 민감도 특성을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

또한 본 연구에서 조사 시간에 따른 민감도를 측정하기 위하여 관전류를 100 mA로 고정하고 재현성 특성을 바탕으로 관전압을 53 kVp로 고정하였으며 조사 시간은 25 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms로 변화시키면서 민감도를 측정하였다. Fig. 4은 조사 시간 변화에 따른 Hybrid형 unit-cell과 직접 방식 unit-cell의 민감도를 나타내고 있다.

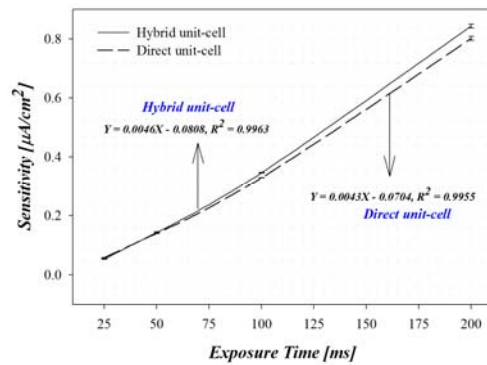


Fig. 4. Sensitivity as a function of exposure time.

실험 결과, 조사 시간 변화에 따라서 선형 함수 형태로 민감도가 증가하는 것으로 나타났고 Hybrid형 unit-cell이 25 ms에서는 직접 방식 unit-cell이 상대적으로 낮은 민감도 특성이 나타났다. 반면에 50 ms 이상에서는 Hybrid형 unit-cell이 더 높은 민감도 특성을 나타내었다. Hybrid형 방식의 경우 직접 방식 unit-cell에 대하여 50 ms에서 약 2.1%, 100 ms에서 4.88%, 200 ms에서 4.94% 우수한 성능이 나타나는 것으로 분석되었

다. 이러한 특성 변화를 두 방식의 Fit curve를 바탕으로 비교하면 그래프의 기울기를 의미하는 값을 Hybrid형 unit-cell이 약 0.0003 정도 높은 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 Hybrid형 unit-cell이 35 ms 이하에서는 직접 방식 unit-cell 보다 특성이 좋지 않으나 그 보다 장시간을 이용 시 직접 방식 unit-cell에 보다 우수한 민감도 특성을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

IV. CONCLUSION

최근 X-ray를 이용한 디지털 상수용체의 분야에서는 저선량의 고품질 영상을 위하여 누설전류 저감화 및 민감도 향상을 목적으로 지속적인 연구가 이루어지고 있다. 디지털 상수용체는 영상 정보를 획득하는 원리에 따라 광도전체를 이용하는 직접 방식과 형광체를 이용하는 간접 방식으로 구분되지만, 모두 다양한 장단점을 내포하고 있다. 이에 본 연구에서는 형광체와 광도전체를 병용한 Hybrid형 구조의 검출기를 제작함으로써 다양한 검사를 수행하고 있는 임상에서의 적용 가능성을 민감도를 기준으로 고찰하고자 한다.

실험 결과, Hybrid형 unit-cell은 저관전압 영역에서 우수한 민감도 특성을 가질 수 있을 것으로 사료되고, 35 ms를 초과할 경우 직접 방식 unit-cell에 비하여 우수한 민감도 특성을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 임상에서 다양한 검사를 일반적으로 50 ms 이상의 조사시간을 이용한다는 점에서 적용이 가능할 것으로 사료된다. 또한 장시간 X-ray를 조사하는 분야에서 민감도에 특성의 우위를 점할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만 본 연구에서 조사 시간 30 ms, 관전압 40 kVp 재현성 측정을 수행한 결과 신뢰성이 낮은 것으로 평가되었다. 그러므로 차후 연구에서는 고관전압 영역을 활용하면서 장시간 X-ray를 조사하는 투시촬영장치에서의 민감도 특성을 평가할 뿐만 아니라 영상학적 관점에서의 다각적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIP) (No. 2014R1A2A1A11052504).

Reference

- [1] Kyung-Min Oh, Min-Seok Yoon, Min-Woo Kim, et al, "Radiation detector material development with multi-layer by hetero-junction for the reduction of leakage current", JKSR, Vol 3, No 1, pp. 11 ~ 15, 2009.
- [2] Y.K. Lee, M.S. Yon, D.H. Kim, et al, "The study of X-ray detection characteristic and fabrication photoconductor film thickness for Screen printing method", JKSR, Vol. 3, No. 2, pp. 11 ~ 16, 2009.
- [3] Youn-Bin Kim, Min-Seok Yun, Min-Woo Kim, et al, "Development of Radiation Image Sensor using Heterojunction", JKSR, Vol 3, No 3, pp. 27 ~ 35, 2009.
- [4] M. schieber, H. Hermon, A. Zuck, et al, "High flux X-ray response of composite mercuric iodide detectors", Proceeding of the SPIE Conf, Vol. 3768, pp. 296, 1999.
- [5] M. schieber, H. Hermon, A. Zuck, et al, "Polycrystalline mercuric iodide detectors", Proceeding of the SPIE Conf, Vol. 3770, pp. 146, 1999.
- [6] S. H. Lee, Y. S. Kim, Y. B. Kim, et al, "A Study on Bismuth tri-iodide for X-ray direct and digital imagers", JKSR, Vol. 3, No. 2, pp. 27 ~ 31, 2009.
- [7] Sung-Ho Cho, Seong-Uk Heo, Chi-Won Choi, et al. "Properties of Polycrystalline HgI₂ Films Fabricated by Using a Particle-in-Binder Method". JKPS, Vol. 52, No. 4, pp. 1123 ~ 1127, 2008.
- [8] Kyung-Min Oh, Min-Seok Yon, Sung-Ho Cho, et al, "Laminate structure detectors for low dark current with photoconductors in digital X-ray imaging", Nucl. Instr. Meth. A, Vol. 607, No. 1, pp. 158 ~ 161, 2009.
- [9] Ji-Koon Park, In-Chan Yoon, Surim-Choi, et al, "Study on Improvement of Signal to Noise Ratio for HgI₂ Radiation Conversion Sensor Using Blocking layer", JKSR, Vol 5, No 2, pp. 97 ~ 101, 2011.
- [10] Antonuk Larry E, Yocef El-Mohri, Adam Hall, et al, "97 μm pitch, Indirect-Detection, Active Matrix, Flat-Panel Imager(AMFPI)", Proceeding of the SPIE Conf, Vol 3336, pp. 2 ~ 13, 1998.
- [11] "Medical electrical equipment - Characteristics of digital X-ray imaging devices: Determination of the detective quantum efficiency, IEC 62220-1:2003", International Electro-technical Committee; IEC, 2003.