

A Study on the Physical Characteristics of Photoconductors for Photon Counting based X-ray Sensor Application

Ji Koon Park, Si Cheol Noh, Il Hong Choi, Bong Jae Jung, Sang Sik Kang

Department of Radiological Science, International University of Korea

광계수형 기반의 X선 영상센서 적용을 위한 광도전체 물성 연구

박지균, 노시철, 최일홍, 정봉재, 강상식

한국국제대학교 방사선학과

Abstract

Digital X-ray imaging devices using a TFT based flat panel array has been used in medical field. But, recently, lots of research on the photon counting sensor has been reported. In this study, we evaluated the physical properties of the photoconductor by suggesting the standard and testing method for quantitative performance evaluation of photon counting x-ray imaging sensor. First, we measured the leakage current and the sensitivity of photon counting x-ray imaging sensor and we evaluated the characteristic of rising time for determining the signal shaping time. In addition, the set-up study was conducted on the basis of the IEC 62220-1-2 recommendations to define the number of incident photons per unit area. And the efficiency of the charge collection was also evaluated. As a result, the characteristic was measured as 200 pA/mm² of the leakage current, 7 μC/cm²R of the X-ray sensitivity, and 0.765 μs of the rising time.

Key Words : photon counting, photoconductor, x-ray sensor, charge collection efficiency

요약

현재까지 TFT 기반의 평판형 어레이를 이용한 디지털 X선 영상장치가 이용되어 왔다. 그러나, 최근 광계수형 센서 기술에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 광계수형 X선 영상 센서의 정량적 성능 평가를 위한 기시법 제시를 통해 광도전체 물질의 물성을 평가하였다. 먼저 광계수형 X선 영상 센서의 검출물질인 광도전체의 누설전류 및 X선 민감도 측정을 수행하였으며, 신호 정형 시간 결정을 위한 상승시간 특성을 평가하였다. 또한 광도전체에 입사하는 단위면적당 포톤수를 정의하기 위해 IEC 62220-1-2 권고안을 바탕으로 셋업 연구를 수행하였으며, 이를 바탕으로 전하수집효율을 평가하였다. 그 결과 광도전체 층의 누설전류는 200 pA/mm², X선 민감도는 7 μC/cm²R 이며, 상승 시간은 0.765 μs으로 평가되었다.

중심단어 : 광계수, 광도전체, 엑스선 민감도, 전하수집효율

I. INTRODUCTION

X선 의료영상 기술은 기존의 필름/스크린 기반의 아날로그 기술에서 현재 디지털 X선 검출기 기반의 디지털 의료영상 기술로 급격히 변화하고 있다^{[1][2]}. 현재의 디지털 검출기 기술은 전기적 신호 변환방식에 따라 직접방식 검출기와 간접방식 검출기로 구분되고 있다. 인체를 투과한 X선 영상정보를 비정질 셀레늄과 같은 광도전체를 이용하여 직접 전기적신호로 검출하여 영상신호로 이용하는 방식을 직접방식이라 하며, CsI(Tl)과 같은 섬광물질을 이용하여 인체를 투과한 X선 영상정보를 가시광선으로 변환한 후, 이를 전기적 신호로 검출하는 방식을 간접방식이라 한다^{[3][4]}. 하지만 이러한 직/간접 방식의 디지털 검출기 기술은 검출기 단위 화소내에 입사한 X선 강도에 비례한 전기적 신호를 영상신호로 변환하는 신호 적분형 검출 기술이라 할 수 있다. 최근 이러한 디지털 X선 검출기 기술은 기존의 단위 화소내에 입사한 X선 총 강도에 비례한 전기적 신호를 화소값으로 적용하는 적분신호 기반에서 현재는 화소내에 입사한 개개의 X선 포톤을 계수화하여 영상화하는 포톤 카운팅 기반 기술로의 많은 연구가 수행되고 있는 실정이다^[5]. 하지만 기존의 전하적분 기반 기술의 X선 검출물질 특성 연구와는 달리 포톤 카운팅 기반의 검출물질의 기본 물성 평가를 위해서는 다른 연구방법론을 제시하여야 한다^{[5][6]}. 이는 실제 검출센서의 신호검출용 ASIC 설계에 있어 노이즈 레벨 선정, 검출신호량의 증폭, 선별기 레벨 선정, 데이터 획득시의 스위칭 주파수 선정 등을 위한 검출물질에서의 특성 평가가 적절히 수행되어야 한다. 이에 본 연구에서는 포톤 카운팅 기반 검출기 개발을 위한 검출물질에서의 기본 특성 평가를 수행하였다.

II. MATERIALS AND METHOD

본 연구에서는 포톤 카운팅 기반 디지털 X선 검출기 개발을 위한 기초 연구로써 광도전체 물질인 PbO, PbI₂, HgO, CdTe 네가지 후보물질을 제작하여 누설전류, X선 민감도, 양자효율을 각각 평가하여 후보물질을 선정하였으며, 선정된 후보 광도전체에 대해 신호

상승 및 감쇠시간 및 전하수집효율을 평가하였다. 또한 하나의 픽셀내에 입사되는 X선 광자수를 추정함으로써 실제 검출기의 포톤 계수 효율을 평가하기 위한 기초 자료를 설계하였다.

1. 누설전류 측정 및 X선 민감도 측정

단위 화소내에 입사되는 X선 광자에너지에 의해 발생하는 전기적 신호량의 크기는 매우 작으므로 누설전류의 영향으로 검출기의 신호대 잡음비를 감소시켜 영상의 화질에 큰 영향을 초래할 수 있으므로 방사선 검출기 제작시에는 반드시 낮은 누설전류를 필요로 한다. 이에 본 연구에서는 제작된 검출물질에 인가되는 전압에 따른 누설전류를 측정하였다. 측정시 암상태를 유지하여 인가전압의 변화를 0.2 V/μm에서 1 V/μm까지 0.2 V/μm 간격으로 측정을 하였으며, 측정된 값의 신뢰성 확보를 위해 총 10 회의 시험을 반복하여 평균값으로 평가하였다. X선 민감도 측정은 X선 조사시에 인가전압의 변화에 따른 광전류를 측정하였다. Fig 1과 2는 누설전류 측정 및 X선 민감도 측정도를 나타내고 있다.

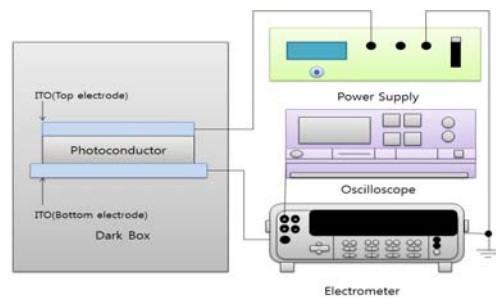


Fig. 1. Schematic diagram for leakage current measurement of photoconductor films.

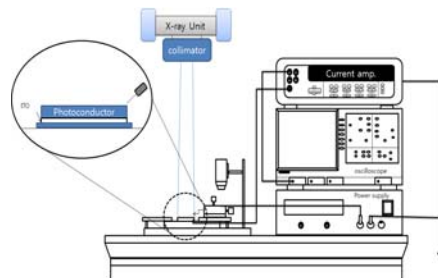


Fig. 2. Schematic diagram for X-ray sensitivity measurement of photoconductor films.

2. 양자효율 측정

광도전체 층에서의 X선 광자에 의해 실제 전기적 신호로 변환되는 비율은 광도전층 내에서의 X선 흡수율에 의존하게 되며, 이는 X선 광자에너지와 검출물질의 두께의 함수로 표현할 수 있으며, 동일 에너지 대역에서는 적정 두께 이상에 대해 일반적으로 포화특성을 나타내게 된다. 양자효율 측정을 통해 실제 X선 광자에너지에 대해 검출물질의 두께를 최적화할 수 있다. 본 연구에서는 후보물질로 선정된 CdTe 물질에 대해 유방촬영장치의 사용 에너지 대역인 25~35 kVp 범위에서 MCNPX 시뮬레이션을 통해 두께의 최적화를 수립하였으며, 이를 통해 제작된 CdTe 시편을 이용하여 양자효율을 평가하였다.

3. 입사 플루언스 추정을 위한 빔 선질 셋업

포톤 카운팅 검출기의 단위 화소내에 입사하는 포톤에 대한 포톤 계수 효율을 측정하기 위해서는 단위 화소내에 입사하는 광자수에 대한 추정이 반드시 필요하다. 실제 단위 화소내에 입사되는 X선 광자수를 측정하는 것은 불가능하므로 IEC 62220-1-2에서 규정한 단위면적당 입사플루언스를 적용시킴으로써 추정할 수 있다. IEC 62220-1-2의 RQA-M2에 의하면 단위 면적(mm²)당 입사 광자수는 실제 실험시 조사되는 공기커마에서 4981개 정도의 입사플루언스를 나타내게 되므로, 본 연구에서는 Fig 3. 에서와 같이 RQA-M2에서 규정하는 관전압을 기준으로 서로 다른 핀홀을 투과한 후 이온 챔버에서 측정되는 선량을 환산하여 단위 면적당 입사되는 포톤의 개수를 측정하였다^[7]. 사용된 핀홀의 직경은 10 μm, 30 μm, 100 μm를 사용하였으며 측정은 다음의 순서로 시행하였다. 먼저 유방촬영 장치의 X선관 중심선속과 이온 챔버의 중심을 일치시킨 후 핀홀의 중심과 이온 챔버의 중심이 일치하도록 배치하고 핀홀이 움직이지 않도록 고정시켰다. 핀홀의 중심 부분을 제외한 면적은 납을 이용하여 차폐시켜야 하며, 이때 핀홀에 입사되는 X선 조사야는 최소한이 되도록 설정하였다. IEC 62220-1-2 디지털 X선 영상장치에서 규정된 1mm² 당 단위 μGy 당 입사 Photon 수를 핀홀을 통과하여 측정된 선량을 이용하여, 핀홀 면적당 μGy 당 입사 광자 수를 산출하였다.

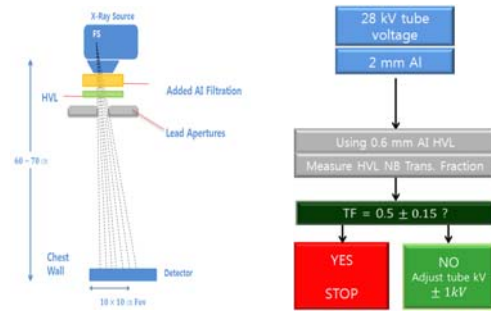


Fig. 3. Schematic diagram of RQA3 - M2 experiment procedure.

4. 신호상승시간 및 신호감쇄시간 측정

단위 화소내 연속해서 입사하는 X선 광자를 개별적으로 검출하기 위해서는 실제 X선 광자에너지에 의해 발생하는 전기적 신호의 붕괴시간이 짧을수록 연속한 광자에 의한 신호 분해능이 우수하게 되며, 이는 회로 설계시 데이터 획득 시간 선정 및 신호정형시간의 주요한 요소가 된다. 신호 상승 및 감쇠시간의 측정은 Fig 4. 에서와 같이 시스템을 구성한 후 정확한 실험을 위해 암상태를 유지하면서 X선 조사시 검출물질에서 실제 생성된 신호 파형을 측정하였다.

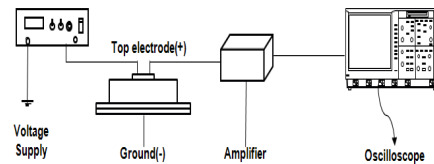


Fig. 4. Block diagram for signal decay time measurement.

이를 통해 상승시간은 신호의 노이즈 레벨에서 최대 신호까지의 시간으로 측정하였으며, 감쇠시간은 상승시간 측정시의 최대 신호에서 1/e로 감소하는 시간으로 평가하였다.

5. 전하수집효율 측정

광도전체에 입사된 X선 광자에너지에 의해 생성된 전자-정공쌍은 외부 전기장에 의해 실시간으로 수집되며, 이러한 전하수집효율은 입사 광자에 의한 신호크기 선별에 주요한 요소가 된다. 본 연구에서는 전하수

집효율 평가를 위해 검출물질에 인가전압을 50V 간격으로 변화시키면서 MCA를 통해 획득된 스펙트럼상의 최대 피크에 해당되는 채널값을 획득하고, mathematical 프로그램을 이용하여 전압에 따른 최대 피크 발생 채널에 대한 데이터를 기반으로 'FindFit'을 도출하여 그래프상에서 $\mu\tau$ (carrier life time x carrier mobility) 값 획득하였으며, 획득한 $\mu\tau$ 을 Hecht equation에 적용하여 전하수집효율을 평가하였다. 전하수집효율 측정시 실제 검출물질에 입사되는 에너지 정보가 필요하나 유방촬영장치의 X선 에너지 정보를 정확하게 알 수 없기 때문에 ^{241}Am 소스를 이용하였다.

$$\text{전하수집효율 CCE} = Q / Q_0 \text{ ----- (1)}$$

$$Q(t) = Q_0(\mu\tau Vb/d^2) \cdot [1 - \exp[-t/(\mu\tau Vb/d)]]$$

v = carrier velocity, μ = carrier mobility,

E = electric field, Vb = operating voltage bias

III. RESULT AND DISCUSSION

1. 누설전류 및 X선 민감도

후보물질 PbO, PbI₂, HgO, CdTe 네가지 시편에서의 누설전류 측정 결과는 후보물질 PbI₂에서 1 V/ μm 이하에서 약 0.06 nA/cm²으로 가장 안정적인 누설전류 값으로 나타났으나, X선 조사시의 X선 민감도는 0.6 $\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{R}(1 \text{ V}/\mu\text{m})$ 매우 낮은 값을 보였다. 이에 반해 CdTe의 경우 0.6 V/ μm 이하에서 0.5 nA/cm²로 다소 높은 누설전류로 측정되었으나, X선 민감도 특성은 1 V/ μm 에서 7 $\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{R}$ 으로 타 후보군에 비해 매우 우수한 특성을 보였다. Fig 5과 Fig 6은 전기장 인가시의 측정된 누설전류와 X선 민감도 결과를 나타내고 있다.

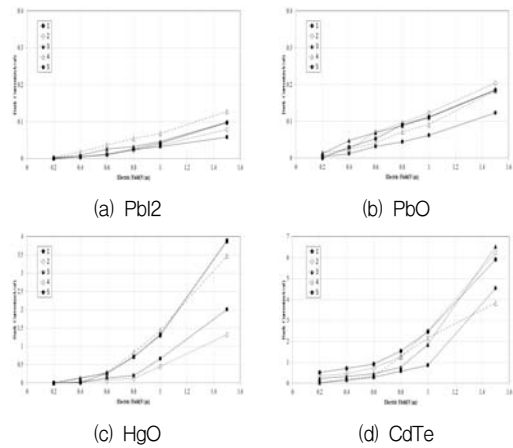


Fig. 5. Leakage currents as a function of electric field.

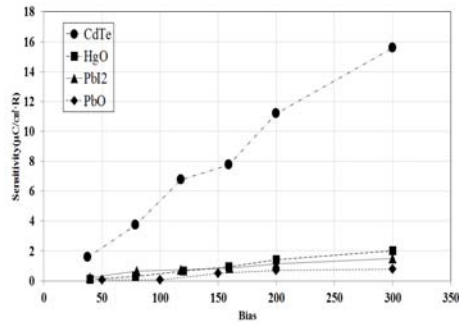


Fig. 6. X-ray sensitivity of various photoconductors as a function of electric field.

2. 양자효율

MCNPX 전산모의 결과는 타 후보물질에 비해 CdTe가 다소 낮은 QE 값을 가지는 것으로 나타났으나 Fig 7에서 나타나듯 유방촬영장치의 에너지 대역인 25~35 kVp 범위에서 약 100 μm 두께에서 90% 이상의 양자효율로 전산모사 되었으며, 실제 제작한 140 μm 두께의 CdTe를 이용하여 측정된 결과, 100%의 QE 값으로 측정되었다.

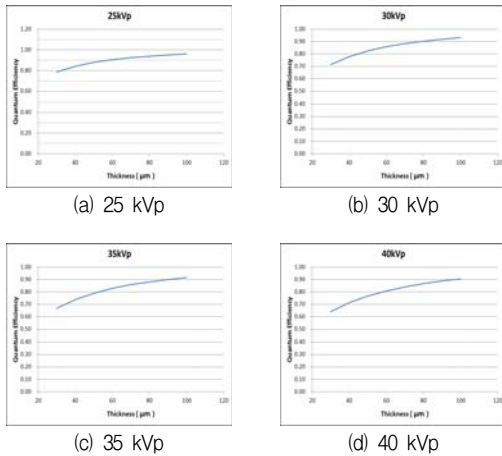


Fig. 7. Quantum efficiency as a function of CdTe film thickness at (a) 25 kVp, (b) 30 kVp, (c) 35 kVp, and (d) 40 kVp.

3. 빔 선질 셋업을 통한 핀홀 크기별 입사 광자수 추정 결과

IEC 62220-1-2, RQA-M2 Radiation quality에 의거하여 빔 선질을 설정한 결과, Table 1에 나타나듯 RQA-M2 조건에서 2 mmAl 부가필터 삽입시 이온 전리함에서 측정된 선량값은 417 mR, 0.6 mmAl 삽입시 208 mR 선량 측정결과로 RQA-M2 기준으로 설정되었으며, 이때 입사플루언스는 4981 개/mm²·μGy로 추정할 수 있다.

Table 1. RQA3-M2 Radiation Beam Quality setup

Radiation Quality No.	Added Filter	Dose (mR)	HVL (Al)	Experimental Dose
RQA3 - M2	2mmAl	417	0.6mm	208mR

또한 실제 직경 10 μm, 30 μm 및 100 μm 핀홀에서 선량값은 각각 0.112, 0.155 및 0.192 μGy로 측정되었으며, RQA-M2 기준으로 핀홀면적 당 입사광자수를 추정하면 Table 2에서 나타나듯 10 μm 핀홀의 경우 입사광자수는 4 개/mm²·μGy, 100 μm 핀홀에서의 입사광자수는 698 개/mm²·μGy로 추정할 수 있었다.

Table 2. Incident photon numbers according to pin-hole size

Radiation Quality No.	kVp	Pin-hole size	Dose [μGy]	Photon number
RQA3 - M2	28	10 μm	0.112	4
		30 μm	0.155	50
		100 μm	0.192	698

4. 신호상승시간 및 신호감쇄시간 측정 결과

Fig 8은 포톤 카운팅 계수회로의 신호 정형을 위한 정보 제공을 위해 후보물질로 선정된 CdTe 시편에서의 신호파형을 획득한 결과이다. Rising time의 경우, 획득한 출력펄스의 노이즈 레벨에서 최대 신호까지의 시간으로 상승시간으로 측정하였으며, 이는 0.765 μsec로 나타났다. 또한 획득한 출력펄스의 최대신호에서 1/e로 감소되는 데까지의 시간으로써 신호감쇠시간을 측정된 결과 약 1 μsec이었다.

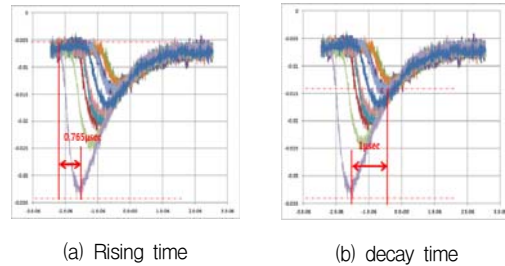


Fig. 8. Signal rising time and decay time CdTe photoconductor.

5. 전하수집효율 측정 결과

후보물질 CdTe의 전하수집효율 측정결과, CdTe 물질의 mobility-life time은 2.69×10⁻³ cm²/V로 측정되었으며, 인가전압 증가에 따른 count(arb. unit) 수가 증가하지만 약 300 V 이상의 인가전압에서는 포화가 나타남을 확인할 수 있었으며, Fig 9에 나타난 바와 같이 전하수집효율은 약 80%로 측정되었다.

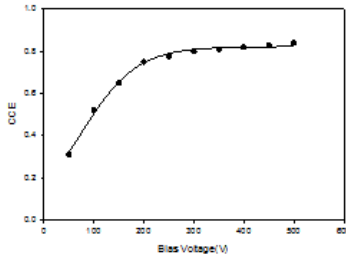


Fig. 9. Charge collection efficiency.

IV. CONCLUSION

본 연구에서는 광도전체 물질을 이용하여 광계수형 X선 영상센서를 개발하기 위한 기초연구를 수행하였다. 광계수형 영상센서는 기존의 전하 적분형 디지털 영상센서와 다른 변환물질의 물성이 요구된다. 이에 본 연구에서 제시한 CdTe 광도전체는 기존 셀레늄 방식의 검출센서에 비해 1 V/ μm 의 인가전압에서 7 $\mu\text{C}/\text{cm}^2 \cdot \text{R}$ 정도의 높은 X선 민감도를 나타내었다. 또한 제작된 140 μm 두께의 CdTe 시편의 유방촬영장치의 사용 에너지 대역인 25 ~ 35 kVp 범위에서의 양자효율은 거의 100%에 가까운 결과를 도출할 수 있었다. 광계수형 X선 영상센서의 광자검출효율 측정을 위해서는 센서 단위 화소당 입사되는 광자수의 정의가 필요하며, 이를 위해 IEC 62220-1-2에서 규정한 단위면적당 입사플루언스를 적용함으로써 추정할 수 있었으며, 그 결과 RQA3-M2 기준 적용시 100 μm 편향 사이즈 면적에 입사하는 광자수는 698 개 이었다. 개별 X선 광자 검출시 검출회로의 스위칭 주파수 설계를 위한 광도전체에서의 신호파형 분석 결과, 노이즈 레벨에서 최대 신호까지의 시간으로 0.765 μsec rising time을 도출할 수 있었다. 본 연구의 결과, CdTe 광도전체는 X선 민감도와 양자효율이 매우 우수하여 광계수형 센서 물질로 적합하였으며, 신호응답특성 또한 우수하여 향후 차세대 광계수형 기반의 디지털 X선 영상 검출기 개발을 위한 후보물질로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Reference

[1] Kyung-O KIM, "Measurement of the electrical properties of a

polycrystalline cadmium telluride for direct conversion flat panel x-ray detector", 2014 JINST, pp 1-4, 2014

[2] Kyung-O KIM, et al, "Radiation detector material development with multi-layer by hetero-junction for the reduction of leakage current", The Korean Society of Radiology, Vol 3, No 1, pp 11-15, 2009

[3] Ji-Koon Park, et al, "X-ray sensitivity of hybrid-type sensor based on CaWO4-selenium for digital X-ray imager", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol 5, No 4, pp 133-134, 2004

[4] Ji-Koon Park, et al, "Performance evaluation of a selenium based prototype digital radiation detector", J.Biomed.Eng.Res, pp 300-305, 2007

[5] Heo-Ye-Ji, et al, "A study of the photon counting sensor setup for the evaluation of the photon count efficiency, The Korean Society of Radiology Proceeding of 2012 Autumn conference. pp 177-180, 2012

[6] Fred P. Vaccaro, "Limitations of the Hecht equation encountered in measuring $\mu\tau$ products in Mercuric Iodine", Vol 50, pp 1-5, 2003

[7] IEC 62220-1-2. Medical electrical equipment-characteristics of digital X-ray imaging device. 2007