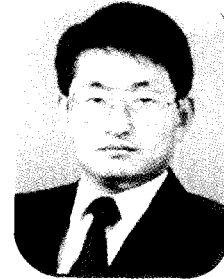


## 방사선 영상 획득용 픽셀 검출기의 현황 및 전망



· 김호경 ·  
경희대  
임피던스영상기술 연구센터 연구원



· 조규성 ·  
한국과학기술원  
원자력 및 양자공학과 부교수

### 1. 서론

방사선 응용분야에 있어서 픽셀 검출기(Pixel Detector)의 역할은 첫째, 입사한 방사선 자체의 위치를 검출하는 위치 검출용, 둘째, 방사선이 투과한 사물의 내부영상을 검출하는 영상 획득용 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 위치 검출용으로서의 대표적인 예로는 고 입자물리 실험을 위한 충돌기 내부의 추적장치(Tracking Device)를 들 수 있으며, 영상 획득용으로는 의료영상 및 산업용 비파괴 영상 획득을 위한 디지털 영상센서를 들 수 있다. 두 역할에 있어

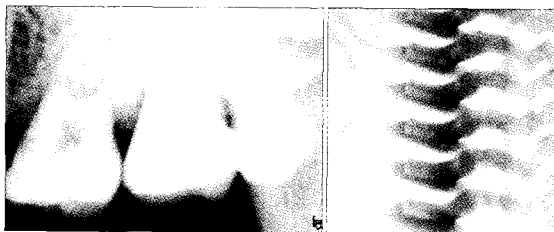


그림 1. 픽셀 검출기를 이용하여 획득한 의료 및 산업용 비파괴 영상의 예. (a) 섬광체+광섬유다발+CCD를 이용하여 획득한 치아 영상. (b) 섬광체+렌즈+CMOS를 이용하여 획득한 PCB 기판 영상.

서 픽셀 검출기 자체의 동작원리 및 구성 등에는 큰 차이점이 없다.

본 논고에서는 최근 디지털 라디오그래피(Digital Radiography)로 널리 알려진 방사선 영상 획득용 픽셀 검출기의 동작 원리, 기술 현황, 그리고 전망에 대해 논하고자 한다. 그림 1은 픽셀 검출기를 이용하여 획득한 의료 및 산업용 비파괴 영상의 예를 보여준다.

### 2. 픽셀 검출기의 원리

방사선을 인간이 인지하는 신호(일반적으로, 전기신호)로 변환하는 것을 방사선 검출이라 한다. 따라서, 방사선과 검출 매질간의 상호작용 중 전리작용을 이용하여 매질내 전자-이온쌍 혹은 전자-정공쌍을 생성시켜 이로부터 전기신호를 유도하게 된다. 이때, 일반적으로 입사한 방사선의 에너지를 직접적으로 전자-이온쌍 등의 전기신호를 유도하는 것을 직접변환방법, 검출 매질로 섬광체(scintillator) 등을 이용하여 입사 방사선의 에너지를 빛으로 전환 후 이를 다시 광센서를 통해 전기신호로 유도하는 것을 간접변환방법이라 한다. 직접 및 간접변환방법에 대

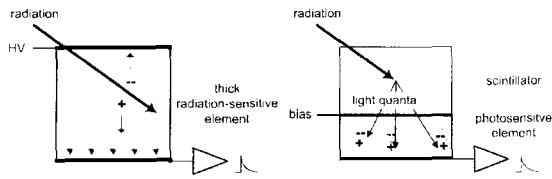


그림 2. 방사선 검출원리 (a) 입사한 방사선의 에너지를 직접적으로 신호전하로 변환하는 직접변환방법. (b) 섬광체를 이용하여 입사한 방사선의 에너지를 빛으로 변환 후 이를 광센서를 통해 전기신호로 변환하는 간접변환방법.

한 대표적인 검출 매질로는 각각 광도전체(photoconductor) 그리고 섬광체를 들 수 있다. 특히, 간접변환방법에 있어서는 섬광체에서 발생한 빛을 검출하기 위해 반드시 광센서가 뒤 따른다. 그림 2는 상술한 내용을 개념적으로 보여주고 있다.

픽셀 검출기관, 간단히 말하자면, 직접변환이든 혹은 간접변환이든 개개의 검출 매질을 2차원으로 배열한 것이며, 이를 통해 방사선 신호의 위치분포를 측정, 영상화한다. 참고로 pixel이란 picture element의 준말로 화소를 의미하며, 결국 개개의 검출 매질이 픽셀을 구성하게 된다.

픽셀로부터 외부로 신호를 끌어내는 방법으로는 charge transferring 그리고 matrix addressing 등 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그림 3(a)에서 보여진 바와 같이 방사선 에너지 흡수의 결과로 생성된 전하를 한 픽셀에서 이웃한 픽셀로 순차적으로 전달하여 외부로 신호를 추출하는 방법을 charge transferring 방법이라고 하며, 전하결합형소자(CCD : Charge-Coupled Device)가 대표적인 예이다. Matrix addressing 방법의 경우는 일종의 전기적인 스캐닝 방법이라 할 수 있다. 이를 위해 각 픽셀은 방사선 검출 매질 영역외에 픽셀과 외부 신호선과의 연결을 위한 스위칭 트랜지스터가 필요하다. 그림 3(b)에서 알 수 있듯이 픽셀 검출기의 배열에 있어서 한 열씩 순차적으로 스위칭 트랜지스터를 구동하기 위한 전기적인 전압신호가 인가되면, 해당 픽셀들의 스위칭 트랜지스터에 의해 외부 신호선과 연결이 되며, 따라서, 한 칼럼씩 전기신호가 외부신호로 유도되어진다. 근래의 a-Si TFT 기술을 이용한 평판형 픽셀 검출기 및 CMOS 영상센

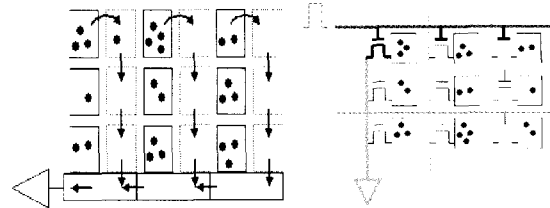


그림 3. 픽셀로부터 외부신호처리회로로 신호를 끌어내는 방법. (a) Charge transferring 방법. (b) Matrix addressing 방법.

서의 경우가 matrix addressing 방법을 통한 신호추출의 예이다.

이렇게 외부로 추출된 2차원 방사선 신호분포는 컴퓨터 메모리에 저장되어지며, 궁극적으로는 모니터 혹은 프린터를 통해 영상의 형태로 출력되어지거나, 통신망을 통해 필요로 하는 곳으로 전달된다.

### 3. 기술 현황 및 문제점

전술한 바와 같이 현재의 픽셀 검출기의 기술은 방사선 검출방법에 따라 직접변환 및 간접변환 등으로 나뉘어지며, 간접변환방법에 있어서 섬광체와 광센서의 결합방식에 따라 다시 직접결합과 간접결합 등으로 나뉠 수 있다. 섬광체와 광센서의 직접결합을 위해서는 빛의 굴절율을 고려한 optical grease 등을 흔히 이용하며, 경우에 따라서는 섬광체를 광센서 위해 직접 성장시키는 방법도 사용되고 있다. 간접결합에서는 주로 렌즈, 광섬유다발 등이 사용되어진다.

간접결합방식에 있어서 결합효율은 픽셀 검출기의 민감도와 밀접한 관계가 있으며, 궁극적으로는 최종 영상의 화질에 큰 영향을 미치므로 설계시 매우 중요한 파라미터 중 하나이다. 한 예를 들어본다면 다음은 렌즈의 결합효율을 나타내는 가장 간단한 식이다[1].

$$\eta \approx \frac{\tau}{4F^2(m+1)^2}$$

여기서  $\tau$ 는 렌즈의 투과율,  $F$ 는  $f$ -number, 그리고  $m$

은 축소율이다. 식에서 알 수 있듯이 축소율이 크면 클수록 렌즈의 결합효율은 기하급수적으로 감소하게 된다. 이처럼 결합효율의 손실에도 불구하고 결합방식을 채택하게 되는 경우는 광센서의 크기가 보고자 하는 대상체보다 작거나 혹은 광센서에 대한 방사선 영향을 줄이기 위해서이다.

또 다른 중요한 설계 파라미터 중의 하나는 픽셀의 개구율(fill factor)이다. 앞 절에서도 언급하였듯이 일반적으로 외부 신호전달선, 스위칭 트랜지스터 등에 의해 픽셀 전 영역이 방사선에 혹은 빛에 민감하지는 않다(그림 4 참조). 이처럼 한 픽셀에 대해 방사선 혹은 빛에 민감한 부분의 크기 비를 개구율이라 하며, 픽셀 검출기의 민감도는 개구율에 비례하게 된다. 개구율은 charge transferring 방법에 비해 matrix addressing 방법을 채택하고 있는 픽셀 검출기가 나쁘며, 궁극적으로는 제작공정기술이 이를 좌우한다. 특히, 고분해능을 위해 미세한 픽셀 디자인일수록 개구율에 대한 효과는 더욱 분명해진다. 그림 5는 지금까지 발표된 대표적인 평판형 픽셀 검출기의 개구율 측정치와 현재 제작공정기술을 바탕으로 계산한 결과를 보여준다. 평판형 픽셀 검출기의 경우 액

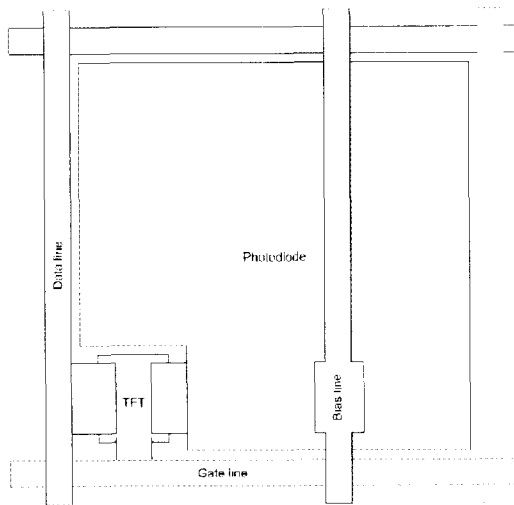


그림 4. 픽셀 디자인의 예. 하나의 픽셀은 방사선 혹은 빛에 민감한 영역(여기서는 포토다이오드)과 외부 신호처리회로와의 연결을 위한 스위칭 트랜지스터 및 연결선, 그리고 픽셀에 전압을 인가하기 위한 바이어스선 등으로 구성.

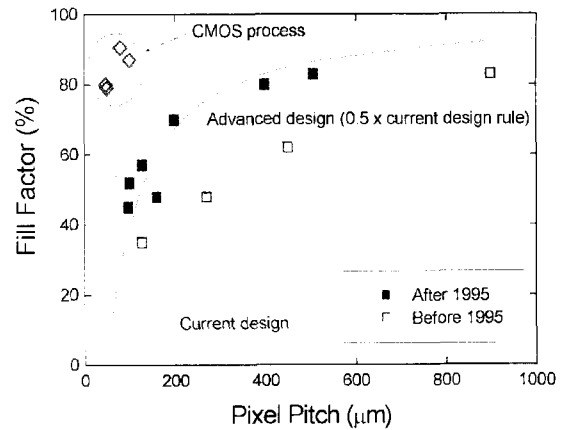


그림 5. 픽셀의 다양한 크기에 대한 개구율의 측정치 및 계산식.

정 디스플레이용 박막트랜지스터(TFT : Thin-Film Transistor) 어레이 기술을 바탕으로 하고 있다. 따라서, 픽셀내의 신호증폭과 같은 개구율에 의한 민감도 손실 보정이 없는 한은 TFT 기술로는 100μm 이하의 고분해능 설계가 쉽지 않다.

최근에는 CMOS 기술을 이용한 픽셀 검출기의 제작이 발표되고 있으며, 결과에서 보여지듯이 50μm 픽셀 설계임에도 불구하고 80% 수준의 개구율을 보여주고 있다.

픽셀 검출기의 성능과 관련하여 결합효율, 개구율 외에도 전하수집효율 등 다른 여러 가지 설계파라미터들이 있으나 무엇보다 중요한 것은 검출 매질의 방사선에 대한 반응도라 할 수 있다. 픽셀 검출기에 있어서 검출 매질 즉, 광도전체 혹은 섬광체가 가장 먼저 방사선과 반응을 하게 되며, 이후 생성된 신호가 옴틱스, 광센서, 신호처리회로 등을 차례로 거쳐 최종 영상으로 출력된다. 이때, 방사선 신호정보가 전달되는 과정은 비가역 과정이며, 증폭과정이 있을 경우 신호의 증폭이 있을 수 있으나 더불어 잡음이 발생되거나 혹은 외부에서 잡음이 도입되어 궁극적인 신호대 잡음비(SNR : Signal-to-Noise Ratio)는 검출 매질에서의 값보다 클 수가 없다. 따라서, 최종 영상에서의 높은 SNR값을 유지하기 위해서는 방사선 반응도가 높은 매질의 사용이 무엇보다 중요하다 [2].

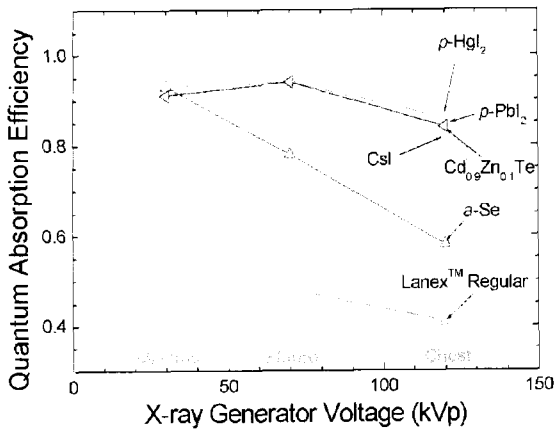


그림 6. 엑스선의 다양한 에너지에 대한 방사선 검출 매질의 에너지 흡수효율을 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산한 결과.

그림 6은 몇 가지 주요한 광도전체 및 섬광체에 대한 엑스선의 방사선 흡수효율을 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 계산한 결과이다. 엑스선 스펙트럼으로는 텅스텐에 대한 30, 70, 120kVp 등 세 종류를 사용하였으며, phosphor screen(Lanex™ Regular, Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Tb)을 제외한 모든 광도전체 및 섬광체는 모두 두께를 500 $\mu$ m로 가정하였다. 결과에서 알 수 있듯이 현재 간접변환방법의 평판형 픽셀 검출기의 검출 매질로 널리 사용되고 있는 CsI 섬광체와는 달리 직접변환방식의 비정질 셀레늄(a-Se : amorphous selenium)의 경우에는 엑스선의 에너지가 높아질수록 에너지 흡수효율이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 비정질 셀레늄의 낮은 밀도 및 원자번호에서 기인한다. 이를 극복하기 위해서는 두께를 증가시키면 해결될 수 있으나, 일반적으로 비정질 셀레늄내에서 효과적인 전하수집을 위해서는 두께 1 $\mu$ m당 10V 이상을 인가해야 하기 때문에 픽셀 및 주변신호처리회로에 전기적인 충격 등 수반되는 다른 문제점들이 있다.

최근에는 이의 극복을 위해 비정질 셀레늄을 대신하여, 높은 밀도 및 원자번호를 보유하고 흡수된 방사선 에너지에 대해 높은 전하변환효율을 지닌 신물질의 개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 대표적인 예로는 HgI<sub>2</sub>, PbI<sub>2</sub>, CdTe, CdZnTe 등을 들 수 있다 [3, 4].

#### 4. 전망

최근 상용화에 성공하여 의료 및 산업분야에 방사선 영상 획득 장치로 널리 확대되고 있는 평판형 픽셀 검출기의 경우 액정 디스플레이 기술을 근간으로 20여년 간의 시간이 투자되었다. 이 기술을 바탕으로 보다 진일보한 성능을 기대하기 위해서는 반도체 제작공정기술의 향상이 필수적이다. 하지만, 그림 5에서 보여졌듯이 TFT 제작 기술이 향상되더라도 고분해능으로는 한계가 엿보인다. 대신 sub-micron 공정이 가능한 CMOS 공정이 주목받고 있다. 또한 기존 섬광체의 경우 빛의 퍼짐 현상으로 인하여 고분해능 응용에 문제가 지적되었으며, 이의 극복을 위해 많은 연구가 현재 수행 중에 있다. 최근 연구동향을 살펴보면, 섬광체를 픽셀로 형성하여 이를 광센서의 픽셀과 1 : 1로 결합하는 연구를 진행 중에 있다[5].

고민감도의 검출기의 제작을 위해서는 앞절에서 설명한 바와 같이 기존의 광도전체와 섬광체를 대신할 수 있는 신재료의 개발이 필요하다. 신재료에 있어서 고려되어야 할 사항으로는 흡수효율(밀도 및 원자번호가 높을수록 큼), 변환효율(즉, 흡수한 에너지를 전하 혹은 빛으로 변환), 광도전체의 경우는 생성된 전하의 이동성(mobility), 섬광체의 경우는 빛의 수집효율 등이 있다.

이외에도 신호의 증폭을 픽셀 내에서 이룰 수 있는 픽셀 내 신호증폭장치의 내장 등 픽셀 검출기의 성능 향상과 관련하여 많은 노력이 현재 기울여지고 있으며 좋은 결과가 기대되는 바이다.

#### 감사의 글

본 논문은 과기부 원자력 중장기 사업의 지원으로 수행되었음.

#### 참고 문헌

- [1] T. Yu and J. M. Boone, "Lens coupling efficiency: derivation and application under differing geometrical assumptions", Med. Phys., Vol. 24, p.

565, 1997.

[2] J. P. Bissonnette, et al., "A quantum accounting and detective quantum efficiency analysis for video-based portal imaging", Med. Phys., Vol. 24, p. 815, 1997.

[3] R. A. Street, et al., "Comparison  $PbI_2$  of  $HgI_2$  and for direct detection active matrix x-ray image sensors", J. of hys., Vol. 91, p. 3345, 2002.

[4] S. Yin, et al., "Hybrid direct conversion detectors for digital mammography", IEEE Trans. on Nucl. Sci., Vol. 46, p. 2093, 1999.

[5] P. Kleimann, et al., "An x-ray imaging pixel detector based on scintillator filled pores in a silicon matrix", Nucl. Instr. Meth. in Phys. Research A, Vol. 460, p. 15, 2001.

**성명 : 조 규 성**

❖ 학 력

- 1983년 서울대 원자핵공학과 학사
- 1985년 서울대 대학원 원자핵공학과 석사
- 1992년 캘리포니아 버클리대학 원자력공학과 박사

❖ 경 력

- 1987년-1993년 로렌스 버클리 국립연구소 연구원
- 1993년-1994년 로스알라모스 국립연구소 박사후연구원
- 1994년-1998년 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 조교수
- 2000년-현재 과학재단 방사선안전신기술연구센터 국제협력실장
- 1998년-현재 한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 부교수

· 저 · 자 · 약 · 력 · . . . . .

**성명 : 김 호 경**

❖ 학 력

- 1994년 한양대 원자력공학과 공학사
- 1996년 한국과학기술원 원자력공학과 공학석사
- 2001년 한국과학기술원 원자력공학과 공학박사

❖ 경 력

- 1996년-2001년 한국과학기술원 원자력공학과 연구원
- 1999년-2000년 로렌스 버클리 국립연구소 방문연구원
- 2001년-2003년 한국과학기술원 응용과학연구소 연구원
- 2003년-현재 경희대 임피던스영상신기술 연구센터 연구원