

## Research of Efficiency for Gas Electron Multiplier Detector to Monitor Low Energy Gamma-Ray and Beta-Ray

Soonhyouk Lee\*, Jae Hoon Jung\*, Rena Lee<sup>†</sup>

\*Medical Research Institute, Ewha Womans University, <sup>†</sup>Department of Radiation Oncology, School of Medicine, Ewha Womans University, Seoul, Korea

Radiation monitoring is one of the most important process in all places where radioactive material is used including hospital. In this preliminary study, we made GAS electron multiplier (GEM) detector and acquired relative efficiencies in order to see if GEM detector can be useful in radiation monitoring system. The relative efficiency was acquired by using the ratio of GEM detector efficiency to CdTe detector efficiency. The relative efficiency of 72% and 4% was acquired for beta-ray and gamma-ray respectively.

**Key Words:** GEM detector, Efficiency

### 서 론

가스 전자 증폭기(gas electron multiplier, GEM)는 가스 이온화 검출기(gaseous ionization detector)의 일종으로서 CERN의 Fabio Sauli에 의해서 처음으로 제안되었다.<sup>1)</sup> GEM은 여러 개의 작은 구멍(hole)으로 구성된 GEM 평판(foil)을 이용하여 기존의 가스 이온화 검출기 보다 뛰어난 전자 증폭(electron multiplication) 능력을 가지고 있다. 고전압이 인가된 GEM 평판의 구멍 안에서는 강한 비 균질의 전기장이 생성되며, 구멍으로 이동한 표류전자(drift electron)는 고밀도의 전기장에서 대량의 전자사태(electron avalanche)를 발생시킨다. 또한, 대부분의 전자사태가 일어나는 GEM 평판의 두께는  $\sim 70 \mu\text{m}$  정도로 작고, 평판의 면적을 원하는 크기로 제작할 수가 있으며, 제조 단가도 저렴하기 때문에 방사선 검출 장치를 비롯하여 의료용 방사선 영상장치까지 다양한 분야에 응용할 수가 있다.<sup>1,2)</sup>

방사선 검출기로서의 GEM 검출기는 베타선(Beta-ray)이

나 감마선(Gamma-ray) 등을 측정하는 환경 방사선 검출기나 라돈 검출기, 중성자 검출기 등으로 활용되고 있고,<sup>1,3)</sup> 제조 단가나 제작의 용이성 때문에 병원에서 방사선 치료 시 방사선 선량 측정용으로 사용되는 다이오드 검출기,<sup>4)</sup> 이온 전리함, 열형광 선량 측정기(thermoluminescent dosimeter)<sup>5)</sup> 등을 대체할 수 있는 검출기로서 활용이 가능하다. 또한, 입사한 방사선에 의해서 생성된 1차 전자(primary electron)는 바로 밑에 위치하고 있는 구멍을 통하여 전자 증폭이 일어나기 때문에 전자 수집 전극을 직접 CCD 센서와 연결하면 성능이 우수한 의료용 방사선 영상 장치로의 활용이 가능하다.<sup>6,7)</sup> 이러한 이유 때문에 GEM 검출기는 현재 많은 관심과 주목을 받고 있다.

GEM 검출기의 성능을 결정짓는 가장 중요한 요소 중의 하나는, 전자 증폭을 통해서 얻어지는 전자의 유효 이득(effective gain)이다. 전자의 유효 이득을 최대화하기 위해 GEM 검출기의 기하학적인 인자와 물리적인 요소에 대한 특성 분석들이 많은 연구를 통해서 이루어졌다.<sup>8-10)</sup> 그러나 다양한 응용분야에 GEM 검출기를 효과적으로 이용하기 위해서는 이러한 GEM 검출기의 유효 이득에 관한 연구뿐만 아니라 검출기의 효율(efficiency)과 같은 검출기의 성능 특성 분석이 함께 이루어져야 한다.

GEM 검출기의 효율은 GEM 평판 양단 전압, 수집 전기장(collection electric field), 표류 전기장(drift electric field), 혼합 가스 비율, 적용된 GEM 평판의 개수 등 다양한 요소에 의해서 영향을 받지만 같은 조건에서도 검출기의 구조에 따라서 많은 변화를 보인다. 이러한 여러 가지 요인들에

This work was supported by the Nuclear Power Core Technology Development Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 201315-10400050).

Received 29 April 2014, Revised 9 May 2014, Accepted 13 May 2014

**Correspondence:** Rena Lee (renalee@ewha.ac.kr)

Tel: 82-2-2650-5337, Fax: 82-2-2654-0363

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

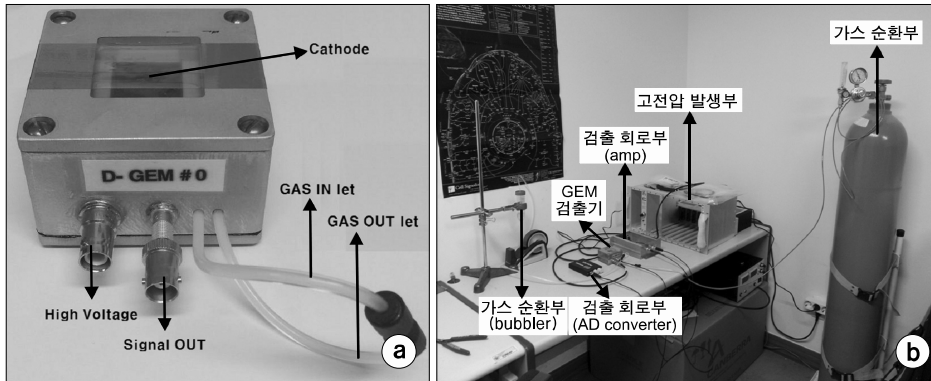


Fig. 1. (a) GEM detector, (b) GEM detector system.

의한 영향을 최소화하기 위해서는 상대적인 효율을 구하는 것이 효과적일 수 있다.<sup>8-10)</sup>

본 연구에서는 방사선 모니터링 장치로서의 GEM 검출기를 제작하고, 방사선원(radiation source)인 Sr-90와 Cs-137를 이용하여 베타선과 감마선에 대한 GEM 검출기의 효율을 구하기 위해, 반도체 검출기인 CdTe에 대한 상대적 효율을 구하여 방사선 감시 장치로서의 GEM 검출기의 가능성을 검사 하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. GEM 검출기

Fig. 1은 본 연구를 위해서 제작된 GEM 검출기와 전체 시스템이다. 전체 시스템은 GEM 검출기, 검출 회로 부, 고전압 발생 부, 가스 순환 부 등으로 구성된다. 검출 회로 부는 증폭기(amp)와 아날로그 디지털 변환기(AD converter)로 구성되며, 검출 회로 부는, GEM 검출기에서 발생된 신호를 전하-감응 증폭기(charge-sensitive amp)와 형태 증폭기(shaping amp)를 통해서 약 4  $\mu$ s의 펄스폭을 갖는 신호로 변환시키고 아날로그 디지털 변환기를 통하여 디지털 신호로 변환시킨 후 컴퓨터로 전송하여 GEM 검출기에서 발생된 펄스를 카운트 하였다. 전하-감응 증폭기와 형태 증폭기는 A225 증폭기(Amptek, USA)를 사용하였고 디지털 변환하여 컴퓨터로 전송하는 장치로는 MCA8000D (Amptek, USA)를 사용하였다. 고전압 발생 부는 3106D (Canberra, USA)를 사용하여 -2000 V의 전압을 발생시켰고, 가스 순환 부는 아르곤(Ar)과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)의 비율을 80 : 20으로 혼합한 가스와 거품기(bubbler)를 통해서 이온화된 가스를 방출시키는 순환 구조로 구성하였다.

내부에는 2개의 GEM 평판을 사용하여 이중(double) GEM 구조를 이룬다. 이중 GEM 검출기는 Fig. 2와 같이 포류

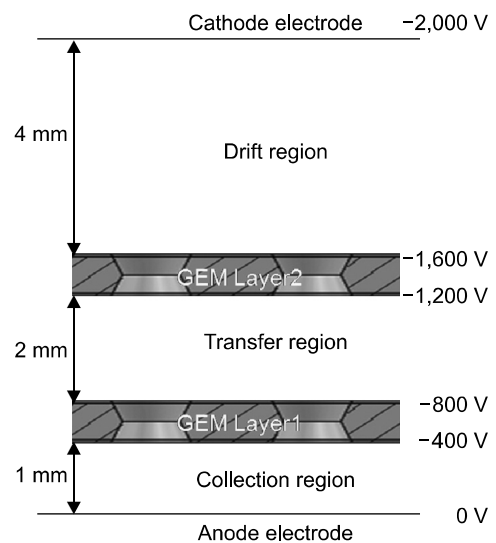


Fig. 2. GEM 검출기 내부 구조.

역(drift region), 전송 영역(transfer region), 그리고 수집 영역(collection region)으로 나뉜다. 외부에서 -2000 V의 전압을 걸고, 저항으로 구성된 전압분배 회로를 이용하여 각각의 영역에 -1 kV/cm<sup>2</sup>, -2 kV/cm<sup>2</sup>, -4 kV/cm<sup>2</sup>의 전기장이 인가되도록 하였다. 2개의 GEM 평판 양단에는 모두 -400 V가 인가되도록 하였다.

방사선이 입사되는 GEM 검출기의 유효면적은 2.5×2.5 cm이고, 검출기 창은 65  $\mu$ m 두께의 캡톤(kapton)으로 둘러싸인 70  $\mu$ m 두께의 구리(Cu)로 된 음전극(cathode)으로 구성된다.

### 2. CdTe 검출기

제작된 GEM 검출기와의 상대적 효율을 비교하기 위하여 CdTe 검출기인 X-100R (Amptek, USA)와 data acquisition module인 PX4 (Amptek, USA)를 이용하여 방사성 동위원소

에서 나오는 펄스신호의 개수를 검출하였다.

### 3. 방사선원

방사선원으로는 판(disc) 형태의 방사성 동위원소를 사용하였으며, 베타선원(Beta-ray source)인 Sr-90 (Spectrum Techniques, USA)과 감마선원(Gamma-ray source)인 Cs-137 (Spectrum Techniques, USA)이 사용되었다. Sr-90은 0.1  $\mu$ Ci의 방사능과 28.8년의 반감기를 가지며 Cs-137은 0.1  $\mu$ Ci의 방사능과 30.17년의 반감기를 갖는다.

### 4. 분석방법

두 방사선원의 방사능(activity)이 작기 때문에 방사선원은 두 검출기 모두 검출기 창의 중심점에서 0.5 cm 위치시켜 300초간 10회씩 측정하였다. 배경잡음(background noise)에 대한 영향을 줄이고자 방사선원을 제거하고 동일하게 300초간 측정하여 방사선원 측정값에서 빼주었다.

베타선원의 경우 에너지 스펙트럼이 연속적으로 분포하기 때문에 효율은 총에너지 최대 효율(full energy peak efficiency) 대신 총 효율(total efficiency)을 구하였고 감마선원도 같은 총 효율로 구하였다. 총 효율은 수식 (1)과 같이 측정된 스펙트럼의 총 개수( $N_{Total}(E)$ )에 대한 방사선원에서 나오는 광자(photon) 개수( $S(E)$ )의 비율로 구한다.<sup>11)</sup>

$$\epsilon_{Total}(E) = \frac{N_{Total}(E)}{S(E)} \quad (1)$$

방사선원에서 나오는 광자의 개수( $S(E)$ )는 검출기 구조에 영향을 받기 때문에, 본 연구에서는 구조에 대한 영향을 최소화 하고자, 수식 (1)을 이용한 상대적 효율 계산식인 수식 (2)를 이용하였다. CdTe 검출기는 측정하고자 하는 에너지의 검출 효율이 알려져 있고, 수식 (2)는 이러한 알려진 CdTe 검출기의 효율을 이용하여 CdTe의 스펙트럼의 총 개수에 대한 GEM 검출기의 스펙트럼 총 개수의 비를 구함으로써 상대적인 검출 효율을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{Total}(E_s) &= \left( \frac{N_{Total}(E)_g}{S(E)_g} / \frac{N_{Total}(E)_{CdTe}}{S(E)_{CdTe}} \right) \times \epsilon_{CdTe}(E_s) \\ &= \frac{N_{Total}(E)_g}{N_{Total}(E)_{CdTe}} \times \epsilon_{CdTe}(E_s) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_{Total}(E_s)$ 는 측정 에너지에 대한 상대적 총 효율,  $N_{Total}(E)_g$ 는 GEM 검출기에서 측정된 스펙트럼의 총 개수,  $N_{Total}(E)_{CdTe}$ 는 CdTe 검출기에서 측정된 스펙트럼의 총 개수, 그리고  $\epsilon_{CdTe}(E_s)$ 는 측정하고자 하는 에너지의 CdTe 검출기 효율이다.

이러한 방법으로 300초씩 10회에 걸쳐서 상대적 검출 효율을 구하고 그 평균값을 구하였다.

## 결 과

Table 1과 Table 2는 Cs-137과 Sr-90을 이용해서 측정한

Table 1. Sr-90의 상대적 검출 효율.

| CdTe*            |              |                  | GEM                 |             |                     |                 |
|------------------|--------------|------------------|---------------------|-------------|---------------------|-----------------|
| Count            | Background   | Net count        | Count               | Background  | Net count           | 상대적 검출효율        |
| 10,927 $\pm$ 309 | 115 $\pm$ 25 | 10,812 $\pm$ 304 | 129,048 $\pm$ 2,088 | 90 $\pm$ 11 | 128,958 $\pm$ 2,091 | 71.6 $\pm$ 2.65 |

Sr-90의 평균적인 상대적 검출효율 71.6 $\pm$ 2.65 (mean $\pm$ s.d.)

\*CdTe의 540 KeV영역의 검출효율 6%

Table 2. Cs-137의 상대적 검출 효율.

| CdTe*              |             |                    | GEM                |             |                    |                 |
|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|-----------------|
| Count              | Background  | Net count          | Count              | Background  | Net count          | 상대적 검출효율        |
| 82,974 $\pm$ 3,292 | 110 $\pm$ 7 | 82,864 $\pm$ 3,292 | 52,401 $\pm$ 1,461 | 91 $\pm$ 14 | 52,310 $\pm$ 1,467 | 3.79 $\pm$ 0.18 |

Cs-137의 평균적인 상대적 검출효율 3.79 $\pm$ 0.18 (mean $\pm$ s.d.)

\*CdTe의 660 KeV영역의 검출효율 6%

GEM 검출기의 상대적인 효율을 구한 값을 보여주고 있다. 감마선원인 Cs-137에 대해서 배경잡음을 제거하고 GEM 검출기로 측정된 개수에 대한 평균은  $52,310 \pm 1,467$ 이고 CdTe 검출기의 평균은  $82,864 \pm 3,292$ 이다. Cs-137에서는 662 keV의 감마선이 방출되며, CdTe 검출기 제조회사인 Amptek에서 제공하는 600 keV 근방에서의 검출기의 감마선 효율은 약 6%이다. 이 값을 바탕으로 GEM 검출기의 평균 상대적 효율을 구하면  $0.038 \pm 0.002$  정도가 나와서 약 4% 정도의 검출 효율을 나타냈다.

베타선원인 Sr-90에 경우는 배경잡음을 제거하고 GEM 검출기로 측정된 개수에 대한 평균값을 계산하면  $129,314 \pm 1,551$  이고, CdTe로 측정된 평균값은  $10,756 \pm 265$ 이 나왔다.

Sr-90은 약 546 KeV의 에너지가 나오고 이 에너지 대역의 CdTe 검출기의 효율은 약 6% 이다. 이 값을 바탕으로 GEM 검출기의 평균 상대적 효율을 구하면  $0.722 \pm 0.021$  정도가 나와서 약 72% 정도의 검출 효율을 나타냈다.

## 고찰 및 결론

CERN에서 입자물리 실험을 위해서 개발된 GEM 검출기는, 높은 전자 증폭률, 저비용 대비 고성능, 그리고 다양한 형태의 검출기 설계 가능성 등으로 인해서 폭넓은 분야에서 주목받고 있다.

본 연구에서는 이러한 GEM 검출기의 장점을 이용해서 방사선 모니터링 시스템을 개발하고, 감시 대상인 감마선과 베타선에 대해 GEM 검출기의 성능 평가의 주요 지표인 검출기 효율을 측정하여 GEM 검출기의 방사선 감시 시스템에 대한 가능성을 보고자 하였다.

감마선과 베타선 각각의 입자에 대해서 GEM 검출기의 총에너지 효율을 구하는 데 있어서, CdTe 검출기에 대한 상대적 총에너지 효율로써 측정하고 분석하였다.

Cs-137은 Ba-137로 붕괴하는 과정에서 연속분포를 가지는 514 keV (94.7%)의 베타 입자와 662 keV (85.1%)의 감마선 그리고 32 keV 근처에서 소량의 엑스선이 혼합되어 방출된다. 그렇기 때문에 방사선원으로 Cs-137을 사용했을 경우는 최대 효율(peak efficiency) 보다는 총 효율을 계산하는 것이 적합한 선택으로 보인다.

베타 방사선원의 경우도 546 keV 베타입자와 2,274 keV 베타 입자가 연속 스펙트럼을 이루어 방출하기 때문에 최대(peak) 에너지에 대한 효율 보다는 본 연구에서와 같이 총에너지에 대한 효율을 구하는 것이 바람직하다.

Cs-137과 Sr-90은 각각 감마선원과 베타선원으로 알려져

있기 때문에, 본 연구에서도 한 방사성동위원소에 대해서 한 종류의 방사선이 나올 가정하였다. 하지만, Cs-137의 경우는 베타입자와 감마선이 혼합 되어 있기 때문에 향후 스펙트럼 분석을 통하여 베타 입자와 감마선에 대한 보정이 필요하며, 베타에 대한 GEM 검출기의 상대적 효율 계산에 있어서, 비교 대상인 CdTe 검출기의 효율이 감마선에 대한 값이기 때문에 베타입자에 특화된 검출기를 활용한 보정도 계산되어야 한다.

또한 섬광체(scintillator) 등을 음전극에 활용하여 한 종류의 방사선에만 효율이 높은 기존의 연구에서 더 나아가서 베타선과 감마선 모두 효율이 좋은 멀티 채널(multi channel) GEM 검출기의 연구가 필요하다.

그러나 이번 연구의 목적이 방사선 모니터링 시스템에 대한 GEM 검출기의 적용에 대한 적합성을 보고자 하였기 때문에, 이번 연구 결과는 검출기 성능 특성의 주요 요소인 검출기 효율 측면에서 GEM 검출기의 성능이 다른 방사선 검출기와 비교해 보았을 때 문제가 없음을 보여주었다.

## References

1. 박인규: 방사선 검출기와 국제연구. 물리학과 첨단 기술. 25-30 (2011)
2. Simon Frank: Commissioning of the GEM Detectors in the COMPAS Experiment. Diploma Thesis. Physik Department, Technische Universität München (2011)
3. Buzulutskov A: Radiation detectors based on gas electron multipliers (Reviews). Instrum Exp Tech 50(3):287-310 (2007)
4. 박정원, 신정욱, 김진성 등: 전립선암에 대한 양성자치료에서 금마커에 의한 방사선 선량분포의 영향. 의학물리 21(3):291-297 (2010)
5. 전경수, 오영기, 백종근 등: 이온전리함 및 TLD 법을 이용한 multi-detector computed tomography의 흡수선량 및 체표면 선량 평가. 의학물리 24(1):35-40 (2013)
6. Tsyganov Edward, Antich Peter, Parkey Robert, et al: Gas electron multiplying detectors for medical applications. Nucl Instru and Meth 597(2):257-265 (2008)
7. Fraga F, Margato L, Fetal S, et al: Luminescence and imaging with gas electron multipliers. Nucl Instru and Meth 513(1):379-387 (2003)
8. Fabio Sauli: Development and applications of the gas electron multiplier. Nucl Instru and Meth 513(1):115-119 (2001)
9. Peskov V, Fonte R, Danielsson M, et al: The study and optimization of new micropattern gaseous detectors for high rate applications. IEEE Trans Nucl Sci 48(4) (2001)
10. Yong HS, IG Kim, Hie HC, et al: Energy resolution of a single GEM detector. Journal of the Korean Physical Society 55(6):2366-2371 (2009)
11. Lepy Marie-Christine: Detection efficiency, IAEA-ALMERA Technical Visit. (2010)

## 낮은 에너지 감마선과 베타선 모니터링을 위한 Gas Electron Multiplier 검출기의 효율성에 대한 연구

\*이화여자대학교 의과연구소, <sup>†</sup>이화여자대학교 의과대학 이대목동병원 방사선종양학교실

이순혁\* · 정재훈\* · 이레나<sup>†</sup>

병원을 포함해서 방사선 물질을 사용하는 모든 사업장에서 방사선 물질의 모니터링은 방사선 안전에 가장 중요한 요소의 하나이다. 본 연구는 방사선 모니터링 시스템에 있어서 GEM 검출기의 활용 가능성을 알아보기 위한 선행 연구로서, GEM 검출기를 제작하고 CdTe 검출기와의 상대적 효율을 구한 결과, 베타와 감마선에 대한 평균 상대 효율이 각각 72%와 4%로서 매우 우수한 성능을 나타냄을 보였다.

---

중심단어: GEM 검출기, 효율