

Gas Electron Multiplier (GEM)형 방사선 검출기의 성능평가 및 노화특성에 관한 연구

Performance Assessment and Aging Study on Gas Electron Multiplier (GEM) Type Radiation Detector

한상호 · 강희동

방사선 과학 연구소
대구광역시 북구 산격동 1370 경북대학교

요 약

기체형 방사선 검출기로서 기체증폭 특성이 우수하고 방전에 강한 구조를 지닌 GEM에 대한 전기장 모의실험과 기체증폭특성, 노화특성 등을 조사하였다. 실효 전하이득을 증가시키기 위해서 표류영역과 수집영역의 전기장 구성을 최적화 하였으며, 원기둥형 GEM에서 최고 3×10^3 정도의 기체증폭도를 얻었다. 전자의 수집효율을 높이기 위해서 수집전기장의 세기를 10 kV/cm까지 증가시켜 70% 이상의 효율을 얻을 수 있었다. 또한 모의실험과 기체증폭특성을 측정 한 결과 GEM은 구멍이 작고, 절연층의 두께가 두꺼울수록 높은 전하이득을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 사용된 18 μ m 두께의 Closed GEM은 전자사태 영역에서 전기장이 세고, 바닥전극에서의 이득손실이 없어서 낮은 인가전압 하에서도 동작이 가능했다. 이중원뿔형 GEM은 절연체 표면에 축적된 이온으로 인해 방사선 노출 초기에 전하이득이 20% 증가하였으나, 원기둥형 GEM을 이용하여 위 문제를 제거하였다. 또한 장시간의 방사선 노출(10 mC의 전하충격)에서도 불과 수% 정도의 이득감소현상을 보였다.

Abstract

We performed field simulations and measurements for gas multiplication and aging tests to characterize Gas Electron Multiplier(GEM) which has a large avalanche gain and is very robust with respect to spark damage as a gas radiation detector. The field configuration in the drift and collection region was optimized to get the higher effective charge gain and maximum gas multiplication of 3×10^3 was obtained with the cylindrical GEM. The collection efficiency increased with collection field and an efficiency above 70% could be reached with $E_{coll} = 10$ kV/cm. Furthermore, the simulation results and measurements indicate that the smaller in the hole size and thicker in thickness of the insulator, the higher charge gain becomes. The Closed GEM in this study was able to operate at lower voltages because there is no loss of avalanche electrons to the bottom GEM electrode and the electric field strength in the avalanche region is higher. With the double conical GEM, the gain increased by 20% at the initial irradiation due to the charging by avalanche ions accumulating on the surface of the insulator, but such a problem was eliminated by using cylindrical GEM. And, Long-term test show that the GEM gain decreased only a few percent under large radiation doses(charge accumulation of 10 mC).

1. 서론

현재 반도체공정 기술 발전에 힘입어 여러 가지 형태의 기체용 방사선검출기 개발이 고에너지 물리학 분야를 중심으로 활발히 진행중이며, 의료진단, 생명공학 등 응용과학분야 발전에도 파급효과가 클 것으로 기대 된다. 특히 1987년 A.Oed가 검출기 제작에 광리소그라피 공정기술(photolithographic technique)을 제안한 이래로 Microstrip Gas Chamber (MSGC), Microgap Gas Chamber (MGC) 등 고 계수율, 고 위치분해능을 갖춘 미세전극형 검출기 개발이 이어졌으나, 이들은 기체 내에서 발생할 수 있는 스파크에 의해 쉽게 전극이 손상되는 단점을 지니고 있다[1,2]. 반면 1996년 F.Sauli에 의해 개발된 Gas Electron Multiplier (GEM)는 얇은 절연체 판(대개 kapton) 양면에 금속박막이 입혀져 있고 매트릭스 배열의 구멍이 밀집한 형태로써 스파크에 잘 견디면서, 고 계수율과 우수한 위치분해능을 가진 차세대 방사선 위치검출기로 연구되고 있다[3]. GEM의 구멍은 대개 습식식각(그림 1, 2(a))이나 레이저(그림 2(b))를 이용하여 뚫는 데, 그 지름은 보통 40 ~ 120 μm 이며, 각 구멍의 간격은 140 ~ 200 μm 정도이다. 이 GEM의 양쪽 전극에 적절한 전압을 인가하면 구멍 내부에 강한 쌍극자 마당(dipole field)이 형성되며, 그림 3의 표류영역(drift region)내에서 입사 방사선에 의해 이온화된 전자는 이 곳을 통과하면서 전자사태에 의해 증폭되어 수집전극(collection electrode)에서 수집된다. 한편, GEM의 특징으로서 절연체의 두께를 증가시킬수록 구멍 내에서의 전자사태가 전개되는 경로가 길어져 보다 큰 전하이득을 얻을 수 있는 데, 연구 초기단계에서는 검출기의 기체증폭도(즉, 전하이득)를 증가시키기 위해 수집전극 대신에 MSGC로써 2차 증폭을 하였으나, 각 전극의 전기장의 세기와 관련한 GEM의 특성이 알려지고, 이와 더불어 공정기술이 진보함에 따라 현재는 GEM 자체의 기체증폭도가 10^4 까지 보고되고 있다[4]. 또한 기존의 미세전극형 검출기와는 달리 전자만이 신호형성에 기여하므로 고속신호를 얻을 수 있고, 인접한 음전극에서 전파된 양이온에 의한 신호감쇠 현상을 피할 수 있다. 그러나 전체 전극간의 전기장 구성이 최적화 되지 않으면 구멍을 통과하며 전자사태를 겪은 전자의 일부는 수집전극 대신 GEM의 바닥전극(bottom electrode)으로 끌려갈 수 있기 때문에 실제 GEM의 기체증폭도는 그 만큼 감소하게 된다.

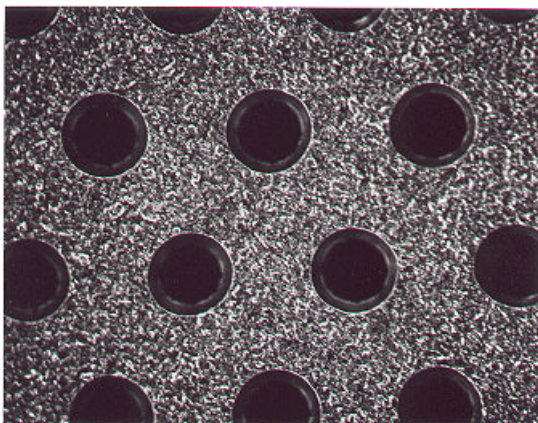


Fig. 1. Optical microscope photograph of a double conical GEM

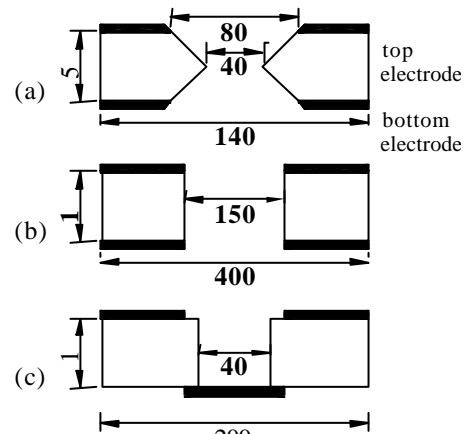


Fig. 2. Cross-sections of the GEMs having double conical holes(a) and cylindrical holes(b) and a closed GEM

2 실험 방법

검출기의 전반적인 특성을 측정하기 위한 개략도가 그림 3에 나타나있으며, 본 연구에 사용된 GEM은 CERN, Louisville Univ. 그리고 U.C. Berkeley의 LBNL에서 제작되었다. GEM은 표류전극(drift electrode)과 수집전극(collection electrode)으로부터 각각 4.0, 1.7mm 간격으로 띄워져 있다. 검출기체로 불연성 기체인 Ar/CO₂(70%/30%)를 사용하였으며, 기체에 1차 이온화를 유도할 방사선 선원으로 ⁵⁵Fe와 구리과녁(copper target)을 지닌 엑스선 발생기를 이용하였다. 기존에는 각 전극에 독립적으로 전원을 공급하였으나, 검출 동작 중에 발생할 수 있는 방전으로부터 GEM을 안전하게 보호하기 위해서 저항으로 전압분배 회로망을 구성하였다[5]. 수집전극은 접지 되어 있으며 표류전극에는 따로 전원을 공급하였다. 표류전극에 인가되는 전압과 GEM의 두 전극에 흐르는 전류변화를 감시할 수 있도록 1μF 축전기, 10MΩ 저항, 그리고 고압용 계전기를 설치하였다. 또한 기체 이득을 측정할 수 있도록 수집전극에 전류측정기(picoammeter)를 연결하였고, 0.1MΩ 저항을 통해서 GEM에 인가된 전압을 측정하였다. 본 연구에 사용된 GEM의 누설전류는 동작전압에서 0.1nA 내외로 그 저항이 수천 1000 GΩ 이상을 나타내었고, 이로 인해 측정오차를 줄일 수 있었으며 전력손실도 매우 적었다.

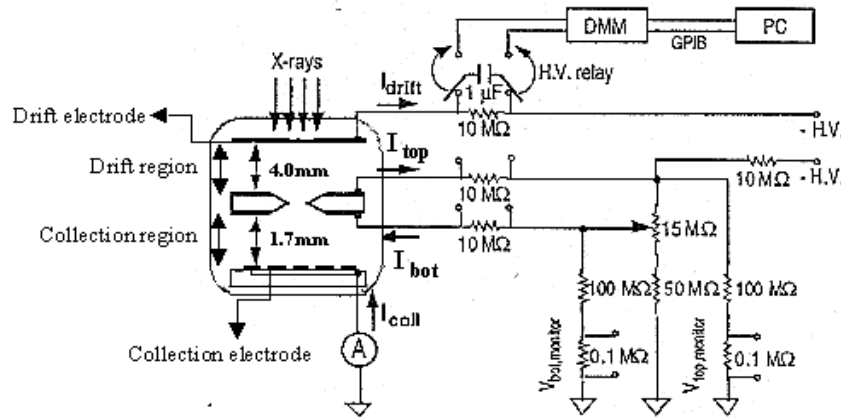


Fig. 3. Schematic diagram of the experimental setup. A H.V distribution network with resistors was used for safe powering to GEM electrodes.

3 전기장 모의실험

본 검출기의 동작특성을 효율적으로 연구하기 위하여 기체의 증폭특성 실험에 앞서, 전기장 전용의 상용 프로그램인 MAXWELL[6]을 이용하여 사용된 GEM에 대한 전기장 모의 실험을 수행하였다. 먼저, 전기장 세기에 대한 결과로서 그림 4는 GEM의 구멍 중심에서, 그림 5는 GEM 표면 위로 0.5 μm 떨어진 위치에서 계산되었다. [A]와 [B]는 그림 2의 (a),(b)에 해당되고, [C]는 절연체 두께가 125μm인 Closed GEM이다. 표류전기장과 수집전기장의 세기가 5 kV/cm이고 GEM의 인가전압이 500 V일 때 구멍 내에서의 전기장은 2.5 MV/m 이상으로, 전자사태를 발생시킬 수 있는 충분한 조건이 갖춰져 있음을 알 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 일반적으로 전극 모서리 부분의 전기장은 전자사태 영역에서 보다 훨씬 커서 전기방전의 주 요인이 된다. GEM 표면에 전도성 코팅을 하면 모서리 부분에서의 전기장 밀집을 줄이고, 절연체 표면의 전하축적 현상도 제거할 수 있을 것이다.

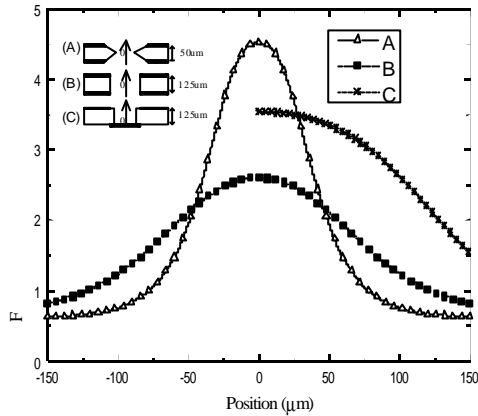


Fig. 4. Calculation of the field strength along the central line through the hole.

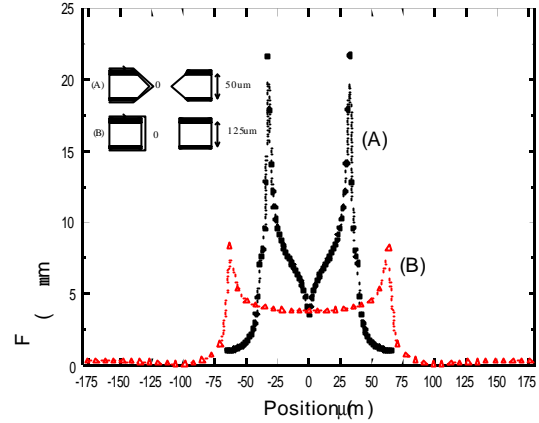


Fig. 5. Calculation of the field strength along a path line $2 \mu\text{m}$ above the GEM surface.

그림 6은 서로 다른 두 표류전기장 하에서 표류전기력선의 경로에 대한 모의실험으로 (a)는 표류전기장의 세기가 5 kV/cm 그리고 (b)는 15 kV/cm 이며, 이때 수집전기장은 5 kV/cm 로 고정시켰다.

그림 6,7에서 나타난 것처럼 수집전기장보다 표류전기장이 세어지면 일부 표류전기력선은 수집전극 대신 GEM의 바닥전극으로 향하기 시작하는 데, 15 kV/cm 의 표류전기장에서는 약 60%의 표류전기력선 손실이 발생하였다. 그러므로, 수집전기장의 세기가 표류전기장보다 커지면 수집효율이 증가할 것으로 예측된다. 수집효율을 증가시키기 위한 다른 방법은 그림 2 (c)에서처럼 수집영역을 없애고 GEM의 바닥 면에 신호검출 전극을 배치한 Closed GEM 형태이다. 이러한 구조에서는 전자들이 바닥전극으로 손실될 염려가 없으며, 모의실험 결과에서 나타난 바와 같이 구멍 내의 평균 전기장이 기존의 열린(open) GEM보다 크기 때문에 더 높은 전하이득을 기대할 수 있다.

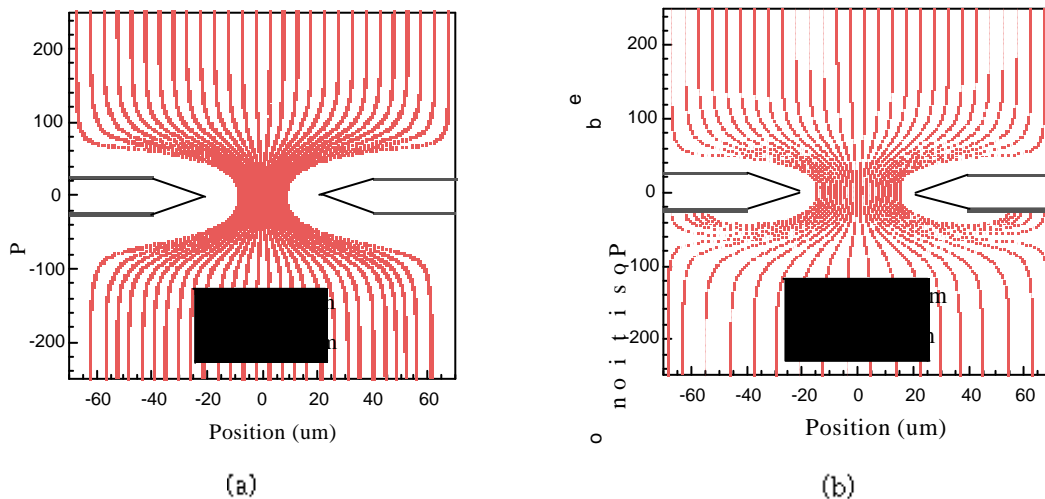


Fig. 6. Electric field maps for two different drift fields of (a) 5 kV/cm and (b) 15 kV/cm , at a fixed collection field of 5 kV/cm and the GEM voltage of 500 V . Only field lines that start at the drift plane are drawn. Some drift field lines in (b) terminate on the bottom electrode.

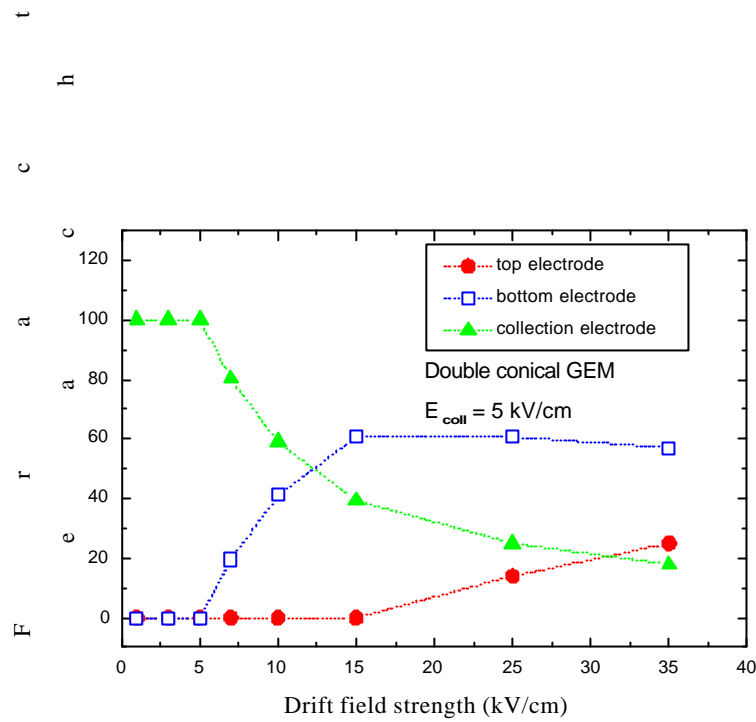


Fig. 7. Fraction of drift lines reaching each electrode as a function of drift field strength. The GEM voltage was 500 V in this simulation.

4 결과 및 고찰

그림 8은 GEM의 인가전압에 따른 검출기체의 절대전하이득을 보여준다. 본 실험에 이용된 GEM의 표류전기장과 수집전기장의 세기는 각각 4 kV/cm, 6 kV/cm로 고정하였다. 전자사태에서 발생한 양이온들은 표류전극과 GEM의 상단전극(top electrode)으로 이동하는 반면에, 전자들은 수집전극뿐 만 아니라 GEM의 바닥전극에서도 검출되기 때문에 절대 전하이득은 이 두 전극의 전류 변화를 측정하고, 이와 동시에 X-선의 계수율(1.02×10^6 counts/sec)을 측정함으로써 구할 수 있다. 즉 검출기체인 Ar/CO₂(70%/30%)에서 구리과녁 엑스선 발생기의 단일 X-선 광자 당 생성되는 초기 이온화에 의한 전자-이온쌍의 수가 대략 210 정도이고, 따라서 절대전하이득은 $(I_{coll} + I_{bot}) / [(1.02 \times 10^6) \cdot (210e-)]$ 에서 구할 수 있다. 여기서 I_{coll} 은 수집전극에서 측정된 전류이고, I_{bot} 은 GEM의 바닥전극에서 검출된 전류이다. 전하이득을 제한하는 요인은 전자사태에 수반되는 스파크가 아니라, 주로 GEM에 인가된 고전압에 의한 GEM 내부의 불안정한 누설전류이며, 두 가지 열린 GEM에서 이득의 최고치는 3000까지 관측되었다. 위 그림에서 보는 바와 같이 기체층폭 특성은 구멍의 간격, 크기, 절연체의 두께 등 GEM의 기하학적 구조에 전적으로 의존하는 데, 일반적으로 동일 인가전압 하에서는 구멍이 작을수록, 절연체의 두께가 얇을수록 전하이득이 크지만 최고 인가전압이 절연체의 두께에 비례하므로 적절한 두께를 지니는 것이 유리하다. Closed GEM은 절연체의 두께가 얇기 때문에 다른 GEM들 보다 낮은 인가전압에서 동작하지만 충분한 전하이득을 얻기 위해서는 두꺼운 절연체의 제작이 필요하다. 표류전기장과 GEM의 인가전압을 각각 5 kV/cm, 500 V으로 고정시켰을 때 수집전기장의 세기에 따른 수집효율이 그림 9에 나타나 있다. 여기서 수집효율이란 전자사태에서 형성된 전체 전자에 대한 수집전극의 전자 검출 비 $[I_{coll} / (I_{coll} + I_{bot})]$ 로 정의된다. 수집전기장의 세기가 증가할수록 수집전극으로 향하는 전자의 비가 점차 증가하며, 수집전기장의 세기가 10 kV/cm에 이르면 수집효율은 70%이상이 된다. 그리고 전자사태 영역의 전기장도 약간 강화되어 전체 전자 수가 조금 증가한다.

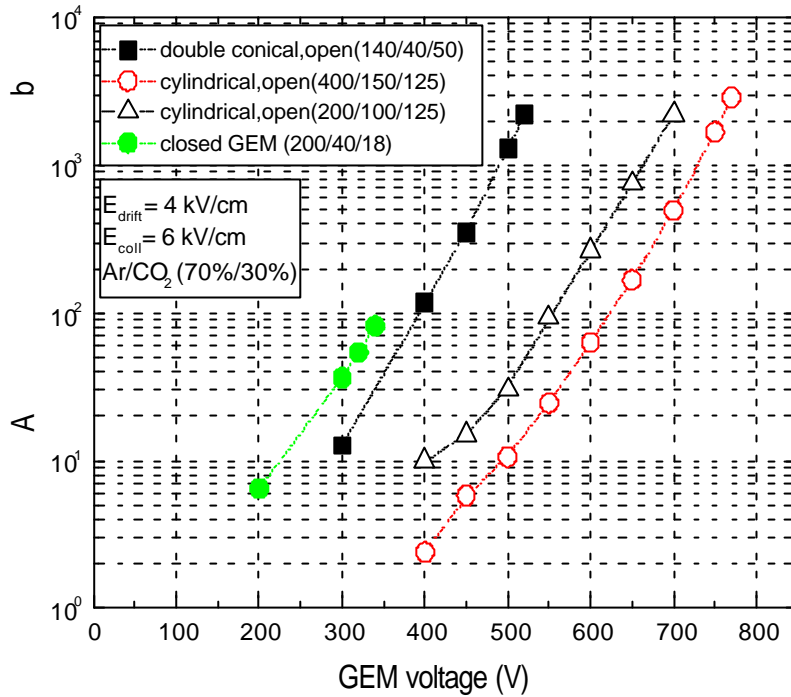


Fig. B. Dependence of absolute gain for the closed GEM and open GEMs having different hole diameters and thickness.

출력신호의 크기에 영향을 미치는 또 다른 요인은 투명도(transparency)인 데, 이것은 초기 이온화 전자가 GEM 구멍을 투과할 확률을 일컫는 용어이다. 투명도는 전체 GEM의 면적 당 차지하는 구멍의 면적 비와 표류영역의 전기장 세기에 의존한다. 그림 10에서는 수집전류의 최고 치에 대해서 정상화된(normalized) 수집전류($I_{col}/I_{col,max}$)를 표류전기장의 세기에 따라 나타내었다. 표류전기장 세기가 약하면 초기 이온화에 의한 전자-이온쌍들의 운동 에너지가 작아서 재결합(recombination)되는 비율이 증가하는 반면, 전기장이 너무 세어지면 표류전기력은 GEM의 상부전극으로 향하기 때문에 출력신호는 감소하게 된다. 본 실험의 결과에 의하면 표류전기장의 세기가 3 kV/cm 부근에서 최고 값을 나타내었고, 10 kV/cm에서는 최고 수집전류의 70% 정도로, 이전의 Pisa 그룹의 실험결과와 거의 동일하다[7].

그림 11은 이중원뿔형 GEM과 원기둥형 GEM에 대한 단시간 이득변화로서, 전자의 경우 0.8 mC의 전하축적 시간동안 약 20%의 전하이득 증가현상이 나타났다. 이러한 현상은 이온들이 GEM 구멍 내의 절연층 위에 쌓이면서 전자사태 영역의 전기력을 중심부로 밀어내어 전기장의 세기가 증가하기 때문이다. 이러한 문제점은 도핑한 무결정실리콘(doped amorphous silicon)[8] 등으로 GEM 표면을 전도성 코팅을 하면 제거할 수 있으며, 절연체 표면이 드러나지 않는 원기둥형 GEM에서는 위 현상을 발견할 수 없었다.

이중원뿔형 GEM을 이용한 장시간 이득변화(long-term gain stability)를 그림 12에 나타내었다. X-선 노출 직후의 초기 전하이득 증가는 절연 층 표면의 이온축적에 의한 것이다. 그리고, 전체 전하축적 시간에 걸쳐 전하이득 감소는 겨우 수 % 정도로서 방사선으로 인한 노화특성이 아주 우수함을 알 수 있었다.

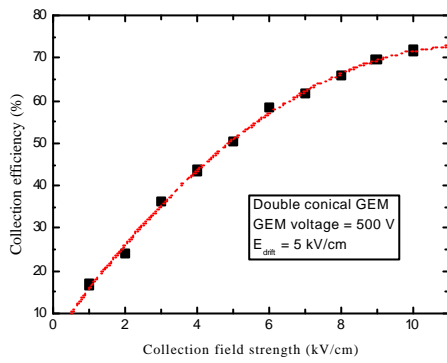


Fig. 9. Collection efficiency as a function of collection field strength for the double conical GEM.

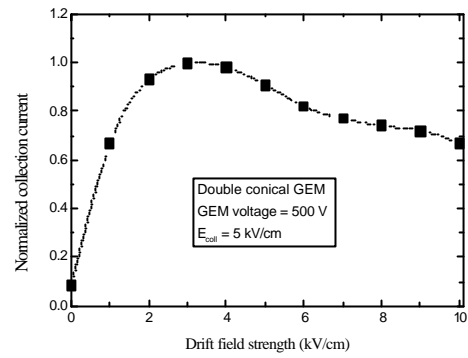


Fig. 10. Transparency dependence of the drift field strength, values normalized to the maximal value of collection current.

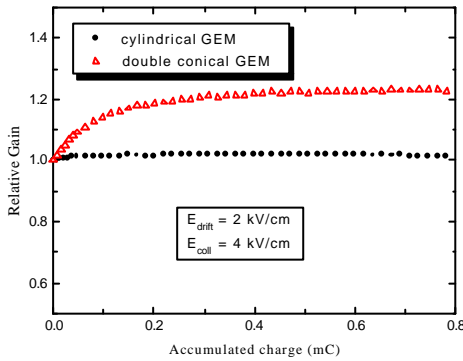


Fig. 11. Initial time dependence of the gas gain for the GEMs having double conical holes and cylindrical holes, due to charge deposit on the insulating surface within the amplification holes.

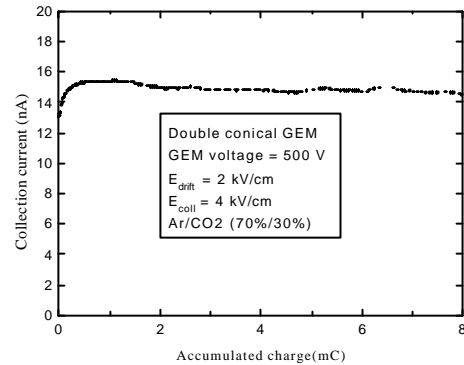


Fig. 12. Long time gain shift for the double conical GEM with a gain decrease of only a few percent.

5. 결론

이중 원뿔형과 원기둥형의 구멍을 가진 GEM의 유효 전하이득을 높이기 위해 전기장 모의실험을 수행하였으며, 수집전기장과 표류전기장의 세기에 따른 동작특성 및 기체증폭도의 시간 의존성을 측정하였다. 표류전기장을 국소 영역(구멍 내부)에 밀집시킴으로써 그 곳에 강한 전기장이 형성되는 데, 구멍을 통과하며 전자사태로 증폭된 전자들은 표류영역과 수집 영역에 인가된 전기장세기의 구성비에 따라 수집효율의 의존성을 보여준다. 수집전극에서 70%이상의 고효율을 보장하기 위해서는 수집전기장의 세기가 10 kV/cm 이상 되어야 하는데, 본 연구에서는 불연성 기체인 Ar/CO₂(70%/30%)를 이용하여 10³이상의 유효 전하이득을 얻을 수 있었다. GEM의 바닥전극으로 향하는 전자로 인한 전하이득 손실을 근원적으로 없애기 위해 고안된 Closed GEM은 절연체의 두께가 18 μ m 밖에 되지 않아 인가전압을 높일 수 없었지만, WELL 검출기에서처럼 두께를 50 μ m 이상 증가시키는 방법이 후속의 연구과제로 대두되고 있다[9,10]. 입사 방사선에 대한 초기의 이득변화는 이중 원뿔형 GEM에서만 20% 정도의 증가추세를 보였으나, 이는 표면전하에 의한 영향으로 사료되어 최근에는

carbon이나 amorphous silicon 등으로 GEM의 표면을 전도성 코팅 처리를 함으로써 시간에 따른 이득의 안정성을 확보하는 방법이 보고되고 있다[11]. 본 연구를 통해 관찰된 GEM은 구조적으로 스파크에 강하면서도 기체증폭도가 크고 높은 방사선량에서도 노화현상이 거의 발생하지 않았다.

참고문헌

1. A. Oed, "Position-Sensitive Detector with Microstrip Anode for Electron multiplication with Gases," *Nucl. Instr. Meth, A* **263**, 351-359(1988).
2. F. Angelini, R. Bellazzini, A. Brez, M.M. Massai, R. Raffo, "The Micro-Gap Chamber," *Nucl. Instr. Meth, A* **335**, 69-77(1993).
3. F. Sauli, "GEM: A New Concept for Electron Amplification in Gas Detector," *Nucl. Instr. Meth, A* **386**, 531-534(1997).
4. R. Bouclier, W. Dominik, M. Hoch, J. -C, Labbe, G. Million, "New Observations with the Gas Electron Multiplier (GEM)," *Nucl. Instr. Meth, A* **396**, 50-66(1997).
5. F. Sauli, private communication.
6. Maxwell Electric Field Simulator, Ansoft Corporation, Pittsburgh, PA 15219, USA
7. R. Bellazzini, "What is the Real Gas Gain of a Standard GEM?," Submitted to Elsevier Preprint, March 30, 1998.
8. H.S. Cho, "Performance of Microstrip Gas Chambers with Conductive Surface Coating of Doped Amorphous Silicon Carbide (a-Si:C:H)," *Nucl. Instr. Meth, A* **401**, pp. 125-134(1997).
9. R. Bellazzini, M. Bozzo, A. Brez, "The WELL detector," *Nucl. Instr. Meth, A* **423**, pp.125-134 (1999).
10. W.K. Pitts, M.D. Martin, S. Belolipetskiy, "Development and Operation Of Laser Machined MicroWell Detectors," Submitted to *Nucl. Instr. Meth, A*(1999)
11. S. Beirle, U. Werthenbach, G. Zech, T. Zeuner, "Carbon coated gas electron multipliers," *Nucl. Instr. Meth, A* **423**, pp. 297-302 (1999).