

GEM을 중심으로한 기체형 검출기 연구



· 박세환 ·
한국원자력연구소
박사 후 연수생



· 김용균 ·
한국원자력연구소
선임연구원

1. 서론

기체형 검출기는 방사선이 검출기내의 기체를 통과할 때 발생하는 하전입자를 전기장을 이용하여 수집함으로써 입사 방사선의 에너지, 입사위치, 입사방향, 방사선 선량 등에 대한 정보를 얻는 검출 센서이다. 방사선이 검출기 내를 지나가게 되면 방사선의 경로를 따라서 이온과 전자쌍이 만들어지게 되며 이를 수집하면 전기적 신호를 얻을 수 있다. 이때 하전입자 쌍의 형성은 방사선과 원자의 직접적인 반응에 의하여 생성되거나 방사선과 반응하여 높은 에너지를 얻은 전자에 의한 간접적 반응으로 생성된다.

19세기 방사선의 발견과 더불어 기체형 검출기에 대한 연구는 계속되어 왔는데 초기의 대표적인 검출기로는 SWPC(Single Wire Proportional Counter)를 들 수 있다. 1968년에 Charpak[1]에 의하여 발명된 MWPC(Multi-Wire Proportional Chamber)는 기체형 검출기 역사에 새로운 전기를 마련하였다. 이 기체형 검출기는 여러 개의 anode wire가 평행하게 위치한 구조로써 이온화된 전자가 가장 가까이에 있는 wire로 전기장에 의하여 가속되며 전자가 wire 가까이 접근함에 따라 강한 전기장에 의하여 전자사태를 일으키게 된다. 이 과정을 통하여 전자에 의한 시그

널은 오직 하나의 wire에만 일어나게 되어 전자가 발생한 위치에 대한 정보를 얻을 수 있다. 평행한 wire를 수직으로 여러 방향으로 위치하여 전자가 발생한 위치에 대한 이차원 또는 삼차원 공간적 정보를 얻을 수도 있다. 이 검출기는 수백 m의 공간적 분해능, 높은 에너지 분해능을 지니고 있으며, kHz/mm²의 입사 방사선능 영역에서 작동되고 넓은 검출면적에 대하여 효과적으로 동작할 수 있음이 확인되었다. MWPC는 중간 에너지와 고에너지 영역의 핵물리학 및 입자물리학 실험에서 널리 쓰여 왔다.

MWPC 검출기를 기초과학 실험 이외의 여러 방면에서 응용하고자 하는 시도도 꾸준히 병행되고 있는데 특히 격자 회절 실험, beta chromatography 등에서 사용되고 있다. MWPC를 이용한 X-선 디지털 방사선 영상장비는 BINP의 Novosibirsk 그룹[3]에 의하여 발명된 이후에 현재 병원에서 쓰이고 있다.

MWPC의 이와 같은 성공에도 불구하고 이 가스형 검출기의 성능에는 몇 가지 제한이 있다. 이 검출기가 가진 두개의 방사선 궤적의 공간적 분해능은 ~1mm 정도로 제한되며 고선량 입사 방사선에는 효율적으로 동작하지 않음이 확인되고 있다. 이를 개선하기 위한 시도가 계속되어 왔으며 대표적인 검출기로 MSGC(Micro-Strip Gas Chamber)를 들 수 있다.



그림 1. MWPC로 측정된 어린이의 엉덩이 부근 영상[2].

MSGC는 Oed[4]에 의하여 발명된 한 단계 더욱 발전된 가스형 검출기로서 얇은 anode와 cathode strip이 절연된 substrate위에 수 백 μm 의 pitch를 두고서 교대로 놓여진 구조이다. 발생된 전자는 전기장에 의하여 strip을 향하여 이동하게 되며 anode와 cathode사이의 강한 전기장에 의하여 전자는 전자사태를 발생하게 된다. 전자는 접지된 anode로 이동하며 양이온은 음극으로 대전된 cathode로 이동한다. 이 때 cathode와 anode사이가 가깝기 때문에 전하의 수집은 빠른 시간 안에 이루어지게 된다. 따라서 고선량 입사 방사선 환경에서 동작할 수 있게 된다.

일반적으로 MSGC는 $106/\text{mm}^2$ 정도의 입사 방사선량에서도 동작하므로 $104/\text{mm}^2$ 이하의 입사 선량에서 작동하는 MWPC에 비하여 고선량 하에서 동작할 수 있음이 알려져 있다. 또한 MSGC의 공간적 분해능은 $30\mu\text{m}$, 두개의 track의 공간적 분해능은 $400\mu\text{m}$ 정도이다. 이 검출기의 장기간 안정적 동작 특성, 자기장 내에서의 동작 가능성 등으로 인하여 기초 물리학 실험 이외에도 X-선 분광학, 디지털 라디오그래피 등의 다양한 분야에서 활용되고 있다.

MSGC의 단점은 입사하는 방사선에 의하여 이온화가 많이 되는 경우에 나타난다. 고전압인가시 스

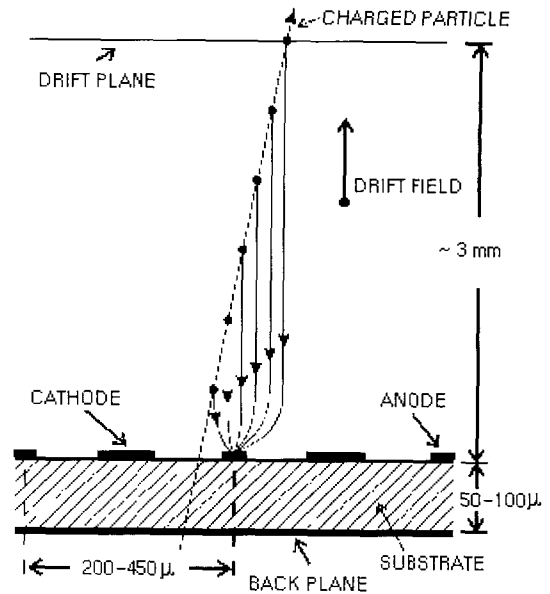


그림 2. MSGC 가스 검출기의 개략도.

파크가 발생할 경우 전극이 녹아버려서 이후 검출기를 사용할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 스파크를 방지하기 위해서는 동작 전압을 낮추게 되고 따라서 최대 전하이득이 제한되게 된다. 또한 전자사태에 의하여 발생한 전하들이 극판에 쌓이게 되면 전기장이 교란되어 동작이 불안하게 되며 노이즈가 증가하는 현상이 나타나기도 한다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 DLC(Diamond-Like Carbon) 극판을 사용하거나 Pestov 유리나 같은 전도성 물질을 사용하여 기판의 표면저항을 저하하기 위한 연구가 수행되고 있다.

2. Micropattern 기체형 검출기 등장과 GEM

최근에는 사진식각기술 등의 반도체 공정기술과 기체형 검출기 제작 기술을 접목한 새로운 형태의 검출기들이 많이 만들어지고 있다. S.F. Biagi[5]에 의하여 도입된 Microdot 가스형 검출기는 MSGC의 새로운 변형이라 할 수 있다. 이 검출기는 MSGC의 선형 anode와 cathode 구조를 원형으로 바꾼 형태이다.

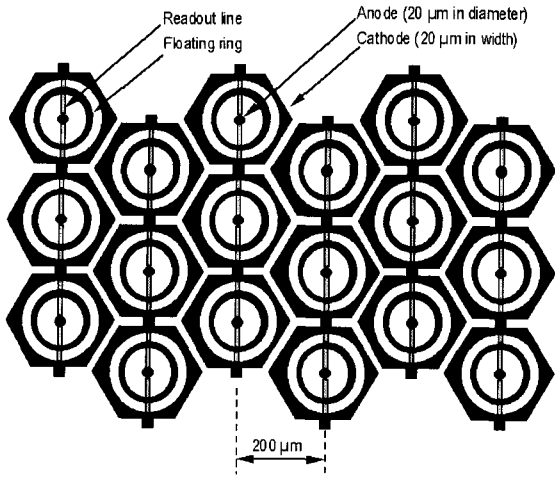


그림 3. Microdot 검출기.

육각형 격자구조를 가진 동일한 cell이 배열되어 있으며 각 cell은 중앙에 anode가 위치하고 그 주위를 원형 cathode가 둘러싼 형태이다. 각 cathode는 서로 연결되어 있으며, anode는 substrate 안쪽의 readout bus를 통하여 시그널을 전송하게 된다. 이 검출기는 10° 정도의 높은 gain에서도 방전이 일어나지 않는 특성을 보인다.

MICROMEGAS 검출기는 readout 전극위에 얇은 금속 mesh가 위치한 형태로서 mesh와 전극간의 간격은 50에서 100m 정도이다[6]. 규칙적으로 위치한

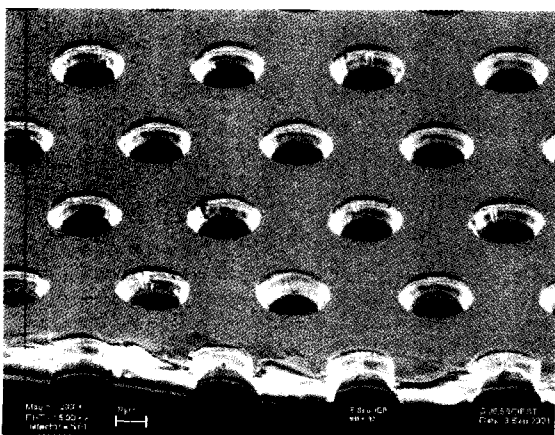


그림 4. GEM의 사진.

지지대가 mesh와 전극간의 일정한 간격을 유지하고 있다. 강한 전기장이 mesh와 전극간에 형성되며 방사선에 의하여 발생한 전자는 강한 전기장에 의하여 전자사태를 일으키게 된다.

Lemonnier 등에 의하여 발명된 CAT 검출기는 절연판에 작은 구멍이 배열되고 절연판 뒷면에는 금속막이 위치하여 cathode로 작용하며 절연판 아래에는 금속판이 위치하여 anode로 동작하는 구조이다[7]. 이러한 구조에서 anode와 cathode 사이의 등전위선은 절연판의 구멍 근처를 제외한 영역에서는 절연판과 평행하지만 구멍 근처에서는 등전위선이 anode 바깥쪽으로 돌출하여 전기적 렌즈와 같은 작용을 하게 된다. 깔대기 모양으로 형성된 전기장에 의하여 입사 방사선과 반응하여 만들어진 전자가 모여져서 구멍의 중심축을 따라서 anode쪽으로 이동하게 된다. 이러한 전기장 설계로 인하여 전하 이득이 초기 발생한 전자의 위치와 무관한 특성을 지닌다. 따라서 입사한 방사선의 에너지 분해능이 크게 향상될 수 있는 큰 장점을 지니고 있다. 또한 이 전기장 설계는 효율적으로 전자를 포집함으로써 높은 검출효율을 나타낼 수 있다.

1996년 유럽에 위치한 고에너지 물리 연구소인 CERN의 Saui에 의하여 개발된 GEM(Gas Electron

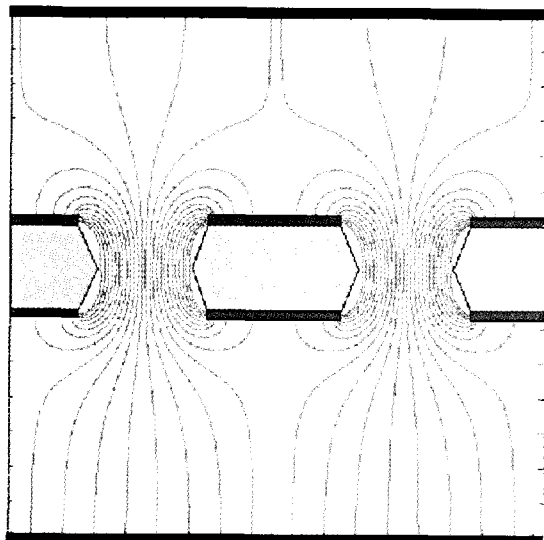


그림 5. GEM에 걸린 전기장.

Multiplier)은 wet etching 기술을 이용한 검출기이다 [8]. GEM은 매우 정밀하게 만들어진 구멍을 가진 다층막 포일이다. 50 μ m 두께를 가진 Kapton 막의 양쪽에 구리로 된 얇은 금속막이 입혀져 있으며 이 금속막은 전극으로 이용된다. 판 위의 구멍은 photolithographic patterning 후에 화학적 식각법에 의하여 만들어진다. 절연체의 상단과 하단에 각각 전압을 인가하게 되면 구멍 위쪽과 아래쪽의 전기장은 전기력선이 분산되어 전기장의 밀도가 약해지지만 구멍 내부에서만 강한 밀도의 전기장이 형성된다. 구멍으로 이끌린 전자는 구멍 내에서 강한 전기장에 의하여 전자사태를 일으키게 된다. 구멍 내부의 전기장의 밀도는 인가하는 상단과 하단에 전압의 세기, 구멍의 기하학적 구조 등에 의하여 결정되게 된다. GEM의 상단에 drift plate를 두고 하단에 수집전극을 위치시키므로 우수한 성능을 지닌 기체형 검출기가 만들어진다. 여러 장의 GEM을 연속적으로 위치시킴으로써 높은 증폭을 얻거나, GEM과 MSGC 등의 다른 기체형 검출기를 연속적으로 위치함으로써 동일한 전하 이득을 얻기 위하여 낮은 전압에서도 검출기를 동작할 수 있으므로 보다 안정적으로 검출기를 사용할 수 있다.

GEM을 이용하는 대형 입자물리실험으로는 B-meson의 CP violation을 측정하기 위한 Desy Hamberg에서 이루어지는 HERA-B 실험[9], CERN에서 진행되고 있는 DIRAC 실험[10] 등을 들 수 있다.

GEM이 다른 가스형 검출기에 비하여 우수한 점은 구조가 간단하고 만들기가 쉬워서 제작 비용을 줄일 수 있다. 검출기 동작 중 발생할 수 있는 전기적 스파이크에 의한 검출기 손상에 상당히 강한 특성을 보인다. 또한 전자 사태가 일어나는 지점이 차폐되어 있으므로 가스형 검출기를 장기간 사용함으로써 발생하는 노화현상을 다른 검출기에 비하여 줄일 수 있고 입사한 방사선이 반응을 일으킨 위치를 보다 정밀하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 또한 전자만이 신호의 형성에 기여하므로 빠른 전기 신호를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그리고, 검출기 신호를 얻는 부분과 신호를 증폭시키는 부분을 분리할 수 있어서 보다 안정된 동작 특성을 얻을 수 있다.

3. GEM 검출기를 이용한 다양한 응용 연구

입자물리실험용 방사선 검출기로 개발된 GEM은 기초 과학 연구 이외에도 다양한 방면으로 쓰임을 넓혀가고 있다.

GEM과 MSGC를 결합하여 X-선 라디오그래피가 시도되고 있다. 전통적인 X-선 라디오그래피의 경우 영상의 구현과 저장이 같은 도구위에서 구현되게 되며 어느 일정량 이상의 광자는 더 이상 영상에 구현되지 않는 포화 현상을 나타낸다. 따라서 상당히 다른 양의 X-선이 입사한 경우라도 시각적으로 구분하기가 힘든 경우가 발생한다. 그러나 디지털 영상 기술을 이용할 경우 이러한 포화 현상을 극복할 수 있다. GEM과 MSGC를 이용하고 Xe과 메탄 가스를 4기압에서 운용하여 포유류에 대한 디지털 영상을 CERN에서 보고한 바가 있다[11].

자기장 핵융합로 진단장비로서 X-선 검출기 GEM이 시도되고 있다. 핵융합로 주변은 중성자, 감마선 등의 강한 방사선과 전기적 noise로 인하여 융합로내의 상태에 대한 진단 장비개발에 많은 어려움이 있



그림 6. GEM으로 구현한 박쥐 영상[11].

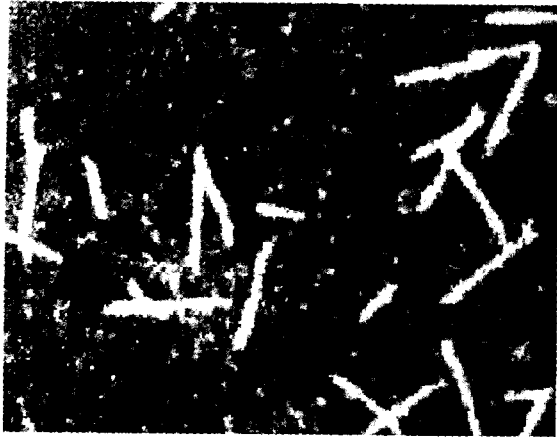


그림 7. GEM과 CCD를 이용하여 얻은 중성자에 의한 양성자와 삼중수소 궤적[13].

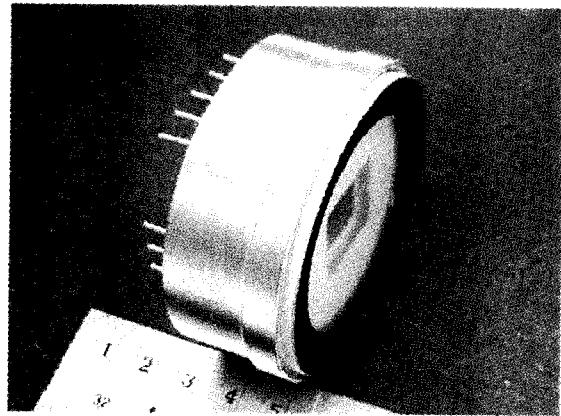


그림 8. 밀봉형 GEM 검출기.

다. GEM은 높은 선량 아래에서도 비교적 안정적으로 동작한다는 강점이 있으므로 GEM을 이용하여 용합로에서 발생하는 X-선 영상을 얻음으로써 용합로 내의 상태를 진단할 수 있는 장비의 개발이 이루어지고 있다[12].

GEM을 이용한 중성자 검출기 개발 역시 현재 진행 중이다. 일반적으로 중성자는 전하를 가지지 않기 때문에 물질내의 전자와 거의 반응을 하지 않는다. 따라서 일반적으로 중성자를 검출하는 방법은 중성자와 반응성이 높은 핵종이 포함된 물질을 검출장치 전단에 두어서 중성자와 반응하여 발생하는 하전입자를 측정함으로써 중성자를 측정하는 간접적인 방법이 이용된다. 중성자 검출에 많이 이용되는 핵종으로는 ^3He , ^{10}B , ^6Li 등을 들 수 있다. GEM의 우수한 공간 분해능을 이용하여 ^3He 기체와 GEM을 이용한 중성자 영상화에 대한 시도가 이루어지고 있다. ^3He 와 CF_4 혼합 기체를 사용하고 중성자와 헬륨기체와의 반응에 의하여 생성되는 하전입자가 기체 검출기 내에서 만드는 영상을 CCD를 이용하여 측정할 수가 있다[13]. 여러 장의 GEM을 겹쳐서 검출기를 설계할 수 있다는 점을 이용하여 중성자의 검출효율이 높은 기체형 검출기 개발도 이루어지고 있다. GEM의 아래 윗 면에 고체 중성자 전환물질을 코팅한 후에 여러 장의 GEM을 겹쳐 놓음으로써 중성자의 검출효율을 크게 증가시킬 수 있다. 일반적으로 ^{10}B 을 GEM

에 증착하는 방법이 시도되고 있다[14].

GEM 검출기를 이용한 자외선과 가시광 영역에서 반응하는 Photo Multiplier의 개발 역시 현재 활발히 연구되고 있는 분야이다. 일반적으로 가스형 검출기 내에는 불활성 가스를 사용한다. 이때 검출기내에서 발생하는 전자사태로 인하여 이온과 광자가 발생하게 되는데, 이들이 검출기 내벽과 충돌함으로써 에너지를 가진 전자를 발생하게 된다. 이 전자가 방사선에 의한 신호 이외의 간접적 신호를 발생하고 전하 이득에 제한을 준다. 이를 줄이기 위하여 일반적으로 불활성 가스와 더불어 quenching 가스를 사용하게 되는데, 밀봉형 검출기로 장기간 사용 시 가스 성분 바뀌어서 검출기의 특성이 변하는 문제가 발생하게 된다. GEM 검출기는 전자사태가 일어나는 지점이 구멍내부로 한정되게 되므로 전자 사태에 의하여 발생하는 이온이나 광자의 검출기내의 투과성이 떨어지는 성질을 가지고 있다. 따라서 불활성 가스만으로도 안정적으로 높은 전하 이득을 얻을 수 있음이 보고되고 있다. 이를 이용하여 밀봉형 Photo-Multiplier의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이 경우 GEM Photo Multiplier는 제작비용이 저렴하고 위치 분해능을 가지며 자기장에 거의 무관하게 동작하는 장점을 지니게 된다. 현재 자외선을 전자로 전환하기 위한 CsI 전환막과 GEM을 결합한 검출기의 개발과 가시광선 영역의 기체형 검출기 개발이 활발히 이루어지고 있다[15].

4. 국내 GEM 연구 소개

방사선 검출을 위하여 기체형 검출기가 차지라는 비중이 매우 크기 때문에 국내에서도 기체형 검출기에 대한 연구는 대학과 연구소를 중심으로 꾸준히 이루어지고 있다. 아직은 수요에 맞는 기체형 검출기 제작기반이 국내에 완전히 자리 잡지는 못했지만 몇몇 연구 성과들은 자체 기술력을 바탕으로 성공적인 결과들을 보여주고 있다.

GEM에 대한 국내 연구는 이제 도입 초기로서 검출기의 특성에 대한 연구와 그 응용의 가능성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그 중 한국원자력연구소에 위치한 본 실험실에서는 기체 소멸로 인한 성능저하를 방지하기 위하여 기체 유동형 챔버를 제작하고 GEM과 MWPC, 또는 MSGC 등을 연속적으로 위치하여 GEM에 의하여 증폭된 신호를 처리하도록 하였다. 한 장에서 세장의 GEM을 이용하여 인가하는 전압을 변화시키면서 전자수집효율, 전하분할에 대한 연구를 진행하였다[16]. 또한 기체의 종류를 변화시키면서 동작 특성의 변화를 측정하였고 특히 순수 아르곤 환경 아래에서 한 장의 GEM을 가지고 103의 증폭도를 얻을 수 있었다. 아르곤에 소량의 CF4를 첨가할 경우 방사선에 의한 전자 증폭에 의하여 가시광에서 적외선에 이르는 영역의 파장이 발생한다는 사실을 바탕으로 하여 X-선 영상화에 대한 연구가 이루어졌다. “Fe에서 발생하는 5.9keV X-선

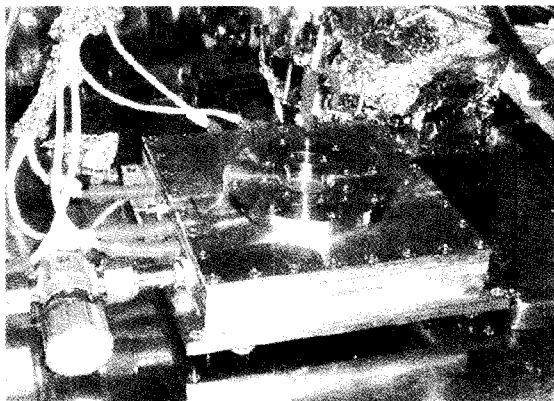


그림 9. 한국원자력 연구소에서 제작된 GEM 가스형 검출기 챔버.

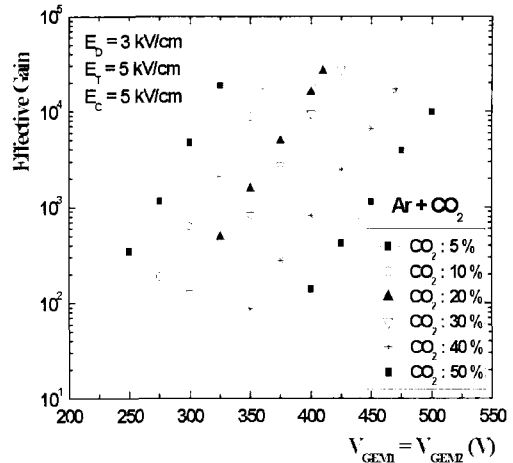


그림 10. 두장의 GEM에 의하여 얻은 유효 이득.

을 이용하기 위하여 0.5mm 두께의 Be창을 제작하였으며 세 장의 GEM을 연속적으로 위치하여 유효 전하 이득을 높였고, 발생하는 가시광선을 CCD를 이용하여 영상을 얻었다. 현재 X-선 검출기로서 GEM 검출기의 성능 향상에 힘쓰고 있으며 이 검출기를 이용한 다양한 응용에 관심을 기울이고 있다.

특히 GEM 검출기에 고체 중성자 전환 물질을 코팅하고 여러 장의 GEM을 연속적으로 사용할 경우 중성자 검출효율을 크게 높일 수 있다는 점을 바탕으로 한 고효율 중성자 검출기로서의 GEM에 대한 연구가 추진 중이다. 또한 밀봉형 기체 검출기로서의 GEM 개발에 깊은 관심을 가지고 있다. 장기간 밀봉된 상태로 사용하기 위해서는 전자사태에 의해서 발생하는 이온이 전기장을 따라 올라가서 광전판과 충돌하는 Ion Feedback 효과를 최대한 줄이는 것이 중요한 고려사항이다. 이를 위하여 전기장과 가스의 종류를 변화시키면서 유효 이득에 대한 Ion Feedback 변화를 측정하였으며 이를 간단한 모델 결과로 설명하였다.

5. 결론

가스형 검출기는 간단한 이동형 선량계에서 고정 밀도를 요구하는 입자물리 실험에 이르기까지 다양한 방면에서 방사선을 측정하기 위한 센서로 쓰여

왔다. 최근에는 기체형 검출기의 기술과 반도체 공정 기술을 접목한 새로운 검출기들이 만들어지고 있다. 또한 이러한 기체형 검출기를 이용한 물성조사, 디지털 라디오그래피, 이동형 검출 장비 등 다양한 분야로의 활용이 이루어지고 있다. 국내에서도 몇몇 연구 기관을 중심으로 기체형 검출기 기술의 국산화와 최신 검출기 도입 및 새로운 응용을 위한 많은 시도들이 진행되고 있다. 앞으로 지금까지의 경험을 바탕으로 방사선 가스 검출기에 대한 보다 진보된 연구가 기대되고 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기 사업의 일환으로 수행되었음.

참고 문헌

[1] G. Charpak, et al, Nucl. Instr. and Meth. Vol. 62, p. 262, 1968.
 [2] A. Sharma, "Gaseous micropattern detectors: high energy physics and beyond", ICFA Inst. Bull. Vol. 22, 2002.
 [3] E. A. Babichev, et al., "Digital radiographic device, based on MWPC with improved spatial resolution", Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 323, p. 49, 1992.
 [4] A. Oed, "Position-sensitive detector with microstrip anode.....", Nucl. Inst. and Meth. A, Vol 263, p. 351, 1988.
 [5] S. F. Biagi and T. J. Jones, "The microdot gas avalanche chamber: an investigation of new geometries". Nucl. Inst. and Meth. A, Vol. 361, p. 72, 1995.
 [6] Y. Goimataris, Ph. Rebourgeard, J. P. Robert, G. Charpak, "MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments", Nucl. Inst. and Meth. A, Vol. 376, p. 29, 1996.
 [7] A. Sarvestani, et al. "Gas amplifying hole structure with resistive position encoding: A new concept for a high rate imaging pixel detector", Nucl. Inst. and

Meth. A, Vol. 419, p. 444, 1998.
 [8] F. Sauli, "GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors", Nucl. Instr. and Meth. A, Vol. 386, p. 531, 1997.
 [9] <http://www-hera-b.desy.de>
 [10] <http://dirac.web.cern.ch/DIRAC>.
 [11] F. Sauli, "Gas detectors: achievements and trends", Nucl. Inst. and Meth. A, Vol. 461, p. 47, 2001.
 [12] R. Bellazzini, G. Spandre, and N. Lumb, Nucl. Inst. and Meth. A, Vol. 478, p. 13, 2002.
 [13] F. A. F. Fraga, et al., "CCD readout of GEM-based neutron detectors", Nucl. Inst. and Meth. A Vol. 478, p. 357, 2002.
 [14] <http://www.physi.uni-heidelberg.de/groups/anp/ucn>.
 [15] A. Buzulutskov, et al. "The GEM photomultiplier operated with noble gas mixtures", Nucl. Inst. and Meth. A, Vol. 443, p. 164, 2000.
 [16] S. Han, et al. "Operation of single, GEM+MWPC, and GEM+MSGC detector", J. of Kor. Phy. Soc. Vol. 41, No. 5, p. 674, 2002, S. Han, et al. "Charge-sharing and electron-transfer characteristics of a gas electron multiplier(GEM)", J. of Kor. Phy. Soc. Vol. 40, No. 5, p. 820, 2002.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 박 세 환

❖ 학 력

- 1994년 고려대 물리학과 이학사
- 1996년 서울대 대학원 물리학과 이학석사
- 2002년 서울대 대학원 물리학과 이학박사

❖ 경 력

- 2002년-현재 한국원자력연구소 박사 후 연수생

성명 : 김 용 균

❖ 학 력

- 1985년 서울대 물리학과 이학사
- 1988년 서울대 대학원물리학과 이학석사
- 1994년 서울대 물리학과 이학박사

❖ 경 력

- 1994년-현재 한국원자력연구소 선임연구원