

## GEM 검출기에서 Ion Feedback 현상의 이해와 최소화 연구

### How to Reduce the Ion Feedback in GEM

박세환, 강상묵, 김용균  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

GEM(Gas Electron Multiplier) 검출기내에서 전자 사태에서 발생한 양이온이 Drift판으로 feedback하는 현상은 GEM photomultiplier 연구를 위하여 최소화되어야 한다. GEM에서 Ion Feedback 현상을 drift field, transfer field, GEM 인가 전압의 비균일, 유효 전하 증폭, 검출기내 가스 종류를 변화시키면서 측정하였다. Ion feedback은 drift field와 검출기내의 유효 증폭에 민감함이 측정되었다. Ion Feedback에 대한 간단한 모델을 만들고 실험 결과와 비교하였다. Ion Feedback을 감소시키기 위하여 TPC에서 연구되고 있는 Ion Gating 방법의 도입을 시도하고 있다. Maxwell과 Garfield 계산을 통하여 Drift 판과 GEM 사이에 전선을 놓고 고전압을 인가할 경우 Ion Feedback이 감소하는 결과를 얻었다. 최적의 설계 조건을 얻기 위하여 전선 사이의 간격, 인가 전압, 전선과 GEM 사이의 간격을 변화시키면서 Ion feedback의 변화를 계산하였다.

#### Abstract

The feedback of positive ions in Gas Electron Multiplier(GEM) has to be suppressed to reduce the photocathode degradation in GEM photomultiplier and to prevent the field distortion in a time projection chamber(TPC). The ion feedback dependency on the drift electric field, the transfer field, the asymmetry in the voltages across the GEM, and the effective gain was measured in various gases. The ion feedback is sensitive to the drift field and the effective gain. A model prediction of the ion feedback in multiple GEM was compared with the measurement. The ion gating method, which is being studied in TPC, is introduced to reduce the ion feedback in GEM. With Maxwell and Garfield calculation, we obtained the reduction of the ion feedback by placing the wires between the drift plate and the GEM. We calculated the dependency of the ion feedback with respect to the bias voltage on the wire, the distance between the wires, and the distance between the wire and the GEM.

## 1. 서 론

가스형 검출기를 보다 널리 상용화하기 위해서는 밀봉형 가스 검출기의 노화 현상을 해결해야 한다. 일반적으로 쓰이는 소광 기체(quenching gas)를 함유한 가스를 챔버내에 채울 경우 시간이 지남에 따라 가스 성분이 변하는 현상이 나타난다. 이를 해결하기 위하여 아르곤 등의 불활성 기체만을 사용할 경우 전자 사태시 발생하는 이차적 광자와 이온 때문에 전하증폭이 상당히 낮다는 단점이 보고되고 있다.

GEM(Gas Electron Multiplier)은 스위스 고에너지 연구소 CERN의 Sauli에 의하여 도입된 이후<sup>1)</sup> 넓은 응용의 가능성으로 인하여 많은 주목을 받고 있는 검출기이다. GEM 검출기는 기존의 핵, 입자 물리학에서 주로 연구되어 오고 있는 가스 검출기 기술과 반도체 공정 기술의 결합에 의한 산물이다. 특히 전자사태가 GEM hole 내부의 공간적으로 매우 한정된 영역에서 일어나기 때문에 이차적 이온과 광자의 효과를 상당히 줄일 수 있다. 따라서 불활성 기체만을 챔버에 채운 상태에서도 GEM을 이용하여 전자 사태를 일으킬 경우 상당히 높은 전하증폭이 보고 되고 있다.

최근에는 기존의 PMT(Photo Multiplier Tube)를 대체할 수 있는 밀봉형 GEM Photomultiplier의 연구가 선진 연구기관을 중심으로 활발히 연구되고 있다. 즉 입사하는 광자에 대하여 광-전자 전환판과 GEM에 의한 전하 증폭부를 두어서 광자를 측정할 수 있는 장치이다. 근래에는 자외선 감지에 대한 연구가 이루어지고 있으며 이를 확장한 가시광선 감지에 대한 연구도 시도되고 있다. GEM Photomultiplier는 기존의 PMT에 비하여 광자의 입사지점에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 가격이 저렴하고, 자기장하에서도 PMT에 비하여 안정적으로 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그러나, GEM hole에서 발생한 양이온이 전기장을 따라서 올라와서 광전판과 충돌하게 되고 이로 인한 광전판의 노화 현상이 지적되고 있다. 따라서, GEM에서 Ion Feedback을 구체적으로 이해하고 이를 최소화할 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어져야 한다.

Ion Feedback에 대해서는 이전에 한 장과 여러 장의 GEM에서 연구가 이루어졌다.<sup>2,3)</sup> 이러한 연구로부터 도출된 결론 중 흥미로운 사실은 Ion Feedback이 가스의 종류와 가스 압력에 무관하다는 것이다. 그러나 이전 실험에서 사용된 기체의 종류가 한정되어 있으므로 보다 다양한 기체 상태 아래에서 이 현상에 대한 연구를 필요로 하고 있다.

본 연구실에서는 GEM 가스 검출기를 제작하였으며 이를 이용한 전하 증폭을 관측하였다. 또한 MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)와 MSGC(Micro Strip Gas Chamber)를 GEM과 같이 사용하여 그 결과를 발표한 바가 있다. 또한 X-선을 이용한 영상화에 대한 기초적 연구를 수행한 바가 있다. 이러한 경험을 바탕으로 GEM에서 Ion Feedback에 대한 보다 세밀한 이해를 실험적, 이론적으로 시도하였으며 이를 줄일 수 있는 방안으로 제시되고 있는 Ion Gating을 위한 설계를 시뮬레이션을 통하여 행하였다.

## 2. Ion Feedback의 실험적 측정

50  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가진 Kapton에 금속면의 지름이 60  $\mu\text{m}$ 이며, 반응 면적이  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  이고, GEM hole 간의 pitch가 100  $\mu\text{m}$ 인 두장의 GEM을 이용하여 실험을 행하였다. 두 장의 GEM(GEM1, GEM2)을 stainless steel 챔버안에 2 mm의 간격을 두고 위치한 후 그 위에 3 mm의 간격을 두고 알루미늄 마일라로 만든 drift plate를 두었다. 가스 챔버는 밀봉인 상태에서 검출 기체를 흘리도록 하였다.  $^{55}\text{Fe}$  방사선원으로부터 발생하는 5.9 keV X-선을 이용하여 실험을 행하였으며 X-선은 0.5 mm의 베릴륨 창을 통하여 drift plate에 입사하도록 하였다. drift plate, 두 장의 GEM의 위 면과 아래 면 각각에 고전압이 인가되도록 하였다. 실험 장치의 개념도는 그림 1에 표시하였다. GEM2의 바닥면을

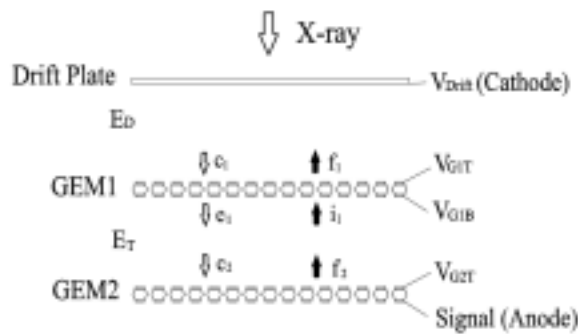


그림 1 실험 장치 개념도

통하여 전하 증폭된 전류를 전류계를 통하여 기록하였으며(anode 신호), drift plate를 통하여 이온 되먹임에 의한 전류(cathode 신호)를 측정하였다. 고순도의 아르곤과 이산화탄소 혹은 질소(99.999 %)를 흘려주면서 실험을 행하였다. 가스의 종류, 각 전기장의 세기, GEM 인가 전압의 세기를 변화시키면서 anode와 cathode 시그널의 크기를 측정하였다. 검출기의 유효 증폭(effective gain)은 anode 시그널을 초기의 이온화에 의하여 발생한 전류로 나누어서 구하였다. Ion feedback 비는 cathode 전류의 크기를 anode 전류의 크기로 나누어서 구하였다. 이 때 초기 이온화에 의하여 발생한 전류는 drift 영역을 이온 검출 상태로 둔 후에 측정을 통하여 결정하였다.

그림 2는 GEM에 인가한 전압을 변화시키면서 측정한 유효 증폭이다. 이 때 그림 1에서

$E_D$ 는 2 kV/cm,  $E_T$ 는 3 kV/cm로 크기가 고정된 상태에서 측정이 이루어졌다. 기체의 종류에 따라 같은 인가 전압 하에서도 유효 전하 증폭이 달라진다. 이 경우 측정된 Ion Feedback비는 그림 3에 나타내었다. 유효 이득이 증가할수록 Ion Feedback비가 감소함을

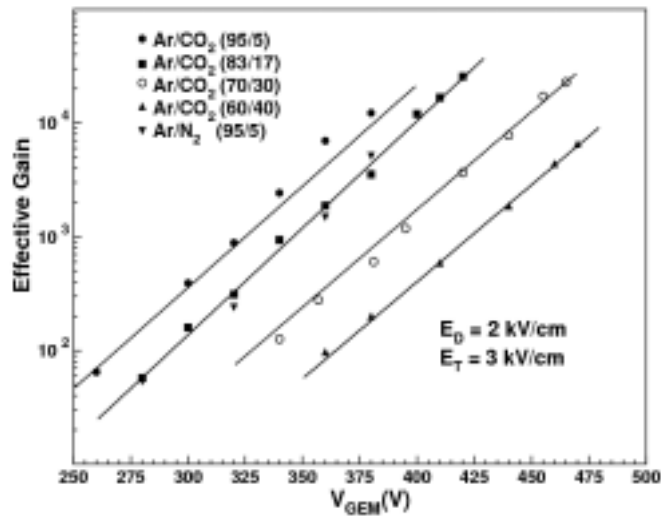


그림 2 GEM에 인가한 전압을 변화시키면서 측정한 유효 증폭.

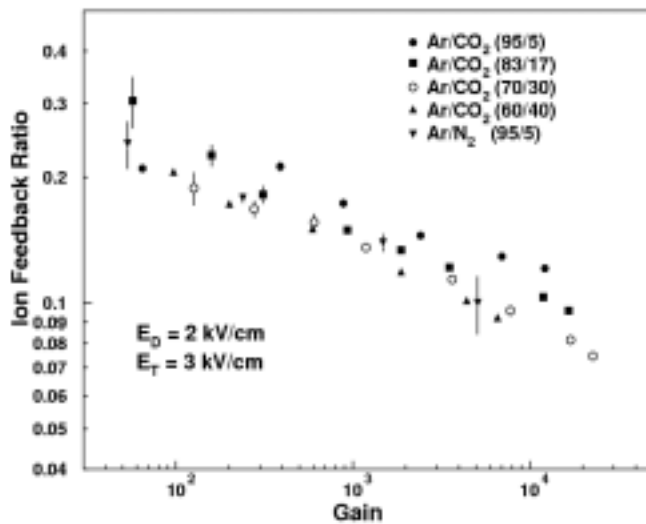


그림 3 다른 기체 조성비 아래에서 유효 이득을 변화시키면서 측정한 Ion Feedback비.

알 수 있다. 또한 이전의 결과와 동일하게 기체의 종류가 이온 되먹임 현상에 큰 영향을 주지 않음이 측정되었다. 이는 기체의 종류, 기체 압력 등에 영향을 받는 이온의 확산(diffusion)현상이 Ion Feedback 현상에 큰 영향을 끼치지 않는다는 것을 의미한다.

$E_D$ 를 변화시키면서 Ion Feedback비를 측정하였다. 역시 GEM에 인가한 전압,  $E_T$ 는 변화시키지 않으면서 측정하였다.  $E_T$ 는 3 kV/cm, GEM에 인가한 전압은 유효 이득이  $10^3$ 이 되도록 정하였다. Ion Feedback비는  $E_D$ 에 대하여 선형적으로 증가함이 측정되었다.  $E_D$ 를 증가시켜도 유효 이득은 증가하지 않음이 측정되었다. 그림 4는  $E_D$  변화에 따른

Ion Feedback비 측정 결과이다.

$E_T$ 를 변화시키면서 Ion Feedback비를 역시 측정하였다.  $E_D$ 와 GEM에 인가한 전압은 변화시키지 않으면서 측정을 행하였다. Ion Feedback비는  $E_T$ 에 거의 영향을 받지 않음이 측정되었다. 그러나 유효 이득은  $E_T$ 가 증가시키면 같이 증가함이 관측되었다.

GEM에 동일하지 않은 전압을 인가할 경우 Ion Feedback 효과를 측정하였다.  $E_D$ 와  $E_T$ 는 고정시킨 후 동일한 유효 이득을 유지시킨 상태에서 한 쪽 GEM에 인가한 전압을 증가시키고 다른 GEM에 인가한 전압을 감소시키면서 측정을 행하였다. 그림 5는 측정의

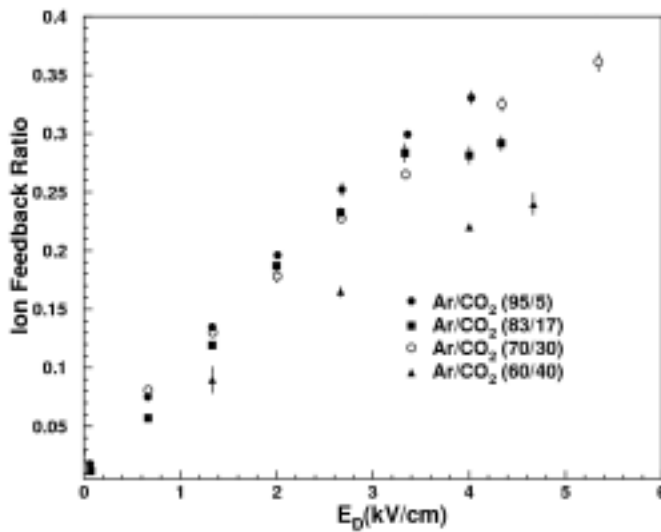


그림 4  $E_D$ 에 따른 Ion Feedback비의 변화

결과를 보여준다. 동일한 유효 이득아래에서 GEM1에 인가한 전압을 증가시킬 경우 Ion Feedback비가 증가함을 알 수 있다.

### 3. 이온 되먹임 모형 계산

전자가 GEM<sub>i</sub>의 hole로 수집될 확률을  $c_i$ 라 하고, hole내에서 실제 증폭(real gain)을  $g_i$ 라 하며, hole에서 전자가 나올 확률을  $e_i$ 라 하자. 이온이 GEM<sub>i</sub> hole에서 빠져 나올 확률을  $f_i$ 라 하고 이온이 GEM<sub>i</sub> hole로 수집될 확률을  $i_i$ 라 하면, 유효 이득  $G$ 는

$$G = c_1 g_1 e_1 c_2 g_2$$

이온 되먹임 전류  $I_D$ 는

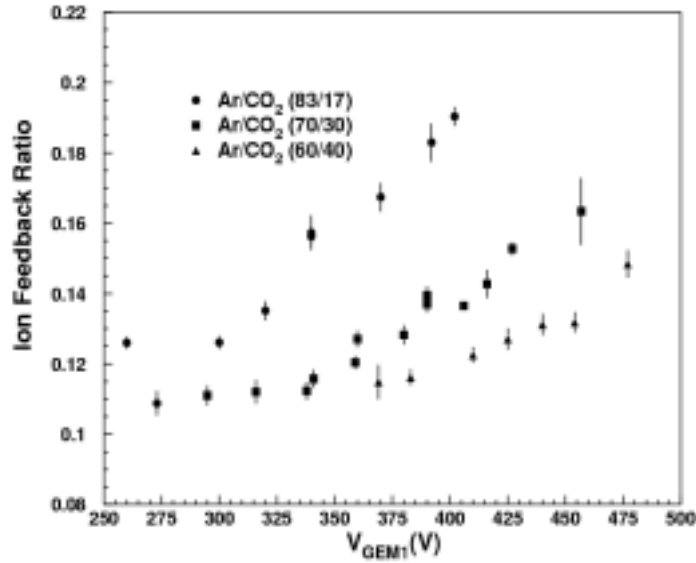


그림 5 GEM인가 전압이 동일하지 않을 경우 Ion Feedback비의 변화

$$I_D = c_1 g_1 f_1 + c_1 g_1 e_1 c_2 g_2 f_2 i_1 f_1 \quad \text{이다.}$$

따라서 Ion Feedback비( $I_D/G$ )는

$$I_D/G = f_1 \left( i_1 f_2 + \frac{1}{e_1 c_2 g_2} \right) = \left( i_1 f_2 + \frac{c_1 g_1}{G} \right)$$

위 수식은 유효 이득을 유지하면서 GEM<sub>1</sub>과 GEM<sub>2</sub>에 인가한 전압이 동일하지 않은 경우의 측정 결과인 그림 5를 잘 설명하여 준다. 즉, GEM<sub>1</sub>에 인가한 전압이 증가할수록 Ion Feedback비는 증가한다. 이때 GEM에 인가한 전압에 대하여 전하증폭은 지수함수 형태로 증가하는데 그림 5의 형태는 이와 잘 일치하고 있다. 또한 GEM에 인가한 전압에 대한 Ion Feedback비를 설명하기 위하여 GEM에 인가한 전압에 의한  $g_i$ 의 변화가 다른 변수 변화에 비하여 상당히 크므로 다른 변수들의 GEM에 인가한 전압에 의한 영향을 무시하면

$$I_D/G = a + \frac{b}{\sqrt{G}}$$

의 형태로 나타낼 수 있다. 여기서  $a$ 와  $b$ 는 상수로 취급한다. 이 수식을 측정치와 비교한 결과는 그림 6에 나타내었다.

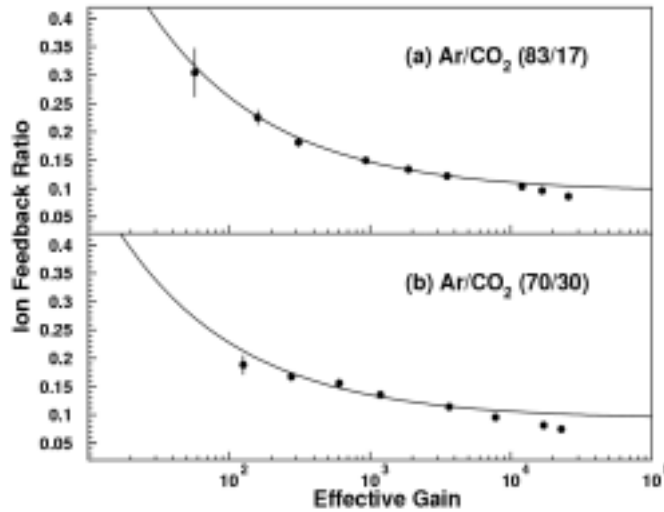


그림 6 모델의 예측과 측정에 의한 Ion Feedback비를 비교. 원은 측정으로부터 얻었으며 선은 모델에 의한 예측 결과.

#### 4. Ion Gating

이상의 연구를 통하여 Ion Feedback은 유효 이득과  $E_D$ 에 크게 의존함을 알 수 있었다. 따라서 Ion Feedback을 최소화하기 위한 전기장 설계 정보를 얻을 수 있었다. 이와 더불어 Ion Feedback을 보다 줄일 수 있는 방법을 도입하였다. 고에너지 물리 실험을 위하여 시도되고 있는 TPC(Time Projection Chamber)의 연구에서는 Drift 영역에서 이온에 의하여 전기장이 변화하게 되고 따라서 검출하고자 하는 입자의 궤적이 바뀌는 것을 최소화하기 위한 방법으로 고전압을 인가한 전선을 이용하여 이온을 제거하는 Ion Gating 법이 시도되고 있다. 이 방법을 본 실험에 적용하여 Ion Feedback을 줄이기 위한 기초 연구를 행하였다.

GEM<sub>1</sub>과 Drift 판 사이에 고전압을 인가할 수 있는 전선을 일정한 간격으로 판과 평행하게 둔다. 전선 중심의 위치에서 GEM<sub>1</sub>과 Drift 판 사이의 전압차에 의하여 생긴 전위를 전선에 인가할 경우 전선의 아래에서 생긴 전하가 전선의 위 방향으로 이동한다(Open Gate). 이 때 서서히 최초의 전위에서 일정 전선의 전위는 낮추고 그 양 옆의 전선 전위는 같은 크기로 높여 주었을 때 상대 전위가 음극으로 하전된 전선에 양전하가 모이고 상대 전위가 양극으로 하전된 전선에는 전자가 모이는지를 시뮬레이션하였다(Closed Gate). 전선에 인가한 상대 전압이 음극과 양극이므로 전선에 의한 Gate를 열었을 경우는 전자와 이온이 동시에 전선을 지나 반대 전극으로 향할 수 있고, 전선에 의한 Gate가 닫힌 경우는 전자와 이온이 전선에 잡혀서 통과하지 못하게 된다. 이를 이용하여 Gate가 열렸

을때 통과한 전자가 하단의 GEM에 도달하여 전자 사태를 일으키고 여기서 발생한 이온이 GEM을 통과하여 전선에 도달하는 시간을 계산하여 전위를 시간에 대하여 펄스 형태로 가하여 주면 Ion Feedback을 줄일 수 있다.

가스 검출기내에서 등전위선과 하전 입자 궤적을 계산할 수 있는 Maxwell과 Garfield code를 이용하여 Ion Gating법의 적용 가능성을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션은 실험에서 Drift 판과 GEM1 사이의 간격에 해방하는 3 mm를 두고 두 개의 평판을 위치시킨 후 그 평판의 사이에 1 mm 간격을 두고 0.1 mm 직경을 가진 전선이 평판과 평행하게 위치하도록 하였다. 전선의 중심은 두 평판의 중심에 해당하는 한 평판에서 1.5 mm 떨어진

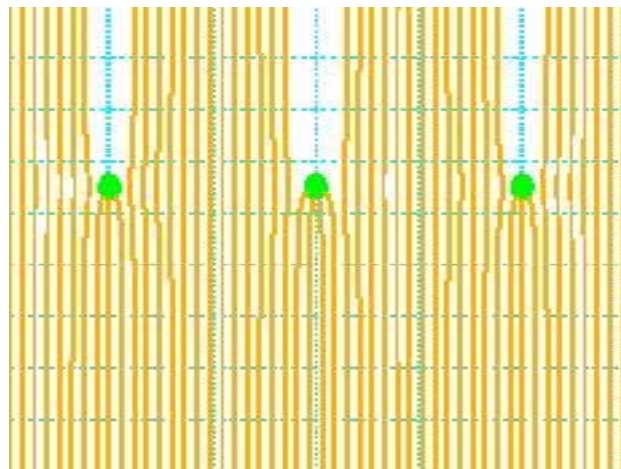


그림 7 상대적 전압을 전선에 인가하지 않았을 경우 하전 입자의 궤적. 하전 입자는 아래 판에서 출발하여 위 판으로 이동하도록 조건을 두어 계산하였다.

위치에 두었다. 위 판과 아래판 사이에는 600V의 전위차를 두었다. 상대적 전위를 전선에 인가하지 않았을 경우의 계산 결과를 그림 7에 보여 준다. 거의 모든 하전 입자가 아래판에서 출발하여 위판에 도달하지만 전선에 가까운 궤적은 전선에 잡히는 것을 알 수 있다. 상대 전위를 높여주어서 아래판에서 출발한 하전 입자가 모두 전선에 잡히는 경우는 그림 8에 나타내었다. 전선에 인가한 상대 전위가 175 V인 경우 아래판에서 출발한 모든 하전 입자가 전선에 잡히어 Gate가 닫힘을 보여준다. 이 때 하전 입자가 모이도록 표시된 전선의 양 옆 전선으로는 위판에서 출발한 하전입자가 모이게 된다.

전선의 간격을 변화시켰을 때 Gate의 동작을 확인하기 위하여 전선 간격을 2 mm, 4 mm로 변화시키면서 상대전압에 대한 하전입자 투과율의 변화를 계산하였다. 그림 9는 그 결과를 보여 준다. 예상과 같이 전선사이의 간격이 넓어질수록 Gate를 닫기 위하여 보다 높은 전압을 전선에 인가하여야 함을 알 수 있다. 또한 전선 사이 간격이 넓을수록 Gate가 열렸을때 투과율이 증가함을 알 수 있었다. 전선 사이의 간격이 1mm, Gate가 완



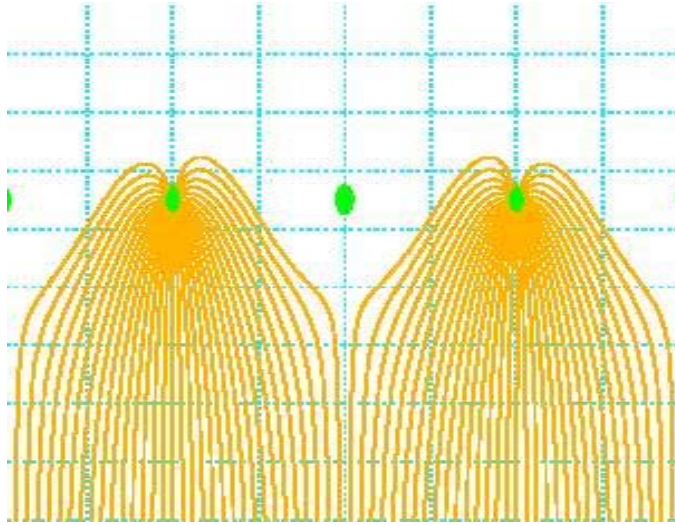


그림 8 상대 전위를 175 V 인가한 경우 아래판에서 출발한 하전 입자가 전선에 모두 포획되었다.

전히 닫히는 경우 상대 전압 175 V에서 전선 근처의 전기장은  $1.6 * 10^4$  V/cm로 전자 사태가 아직은 일어나지 않음을 알 수 있었다.

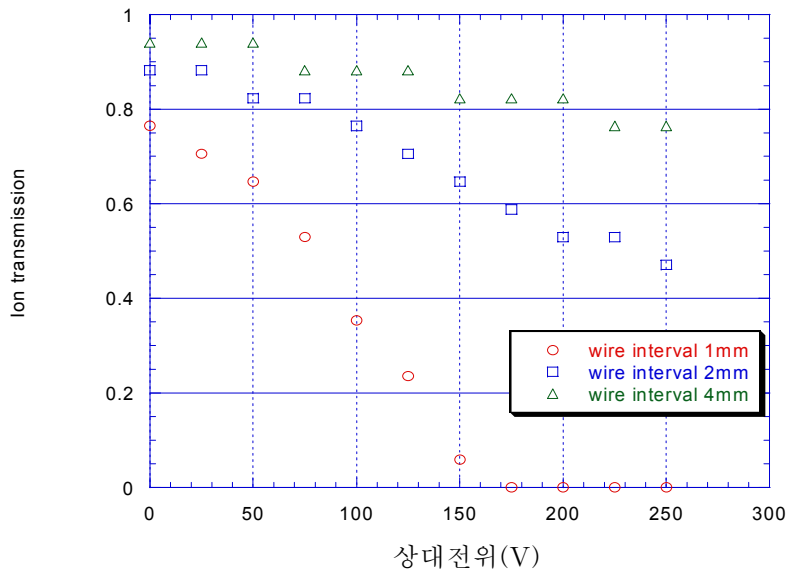


그림 9 상대 전압에 따른 투과율

Gate를 위한 전선을 아래 평면에서 1 mm, 2 mm 두었을때 동일한 상대 인가 전압에 대한 하전입자 투과율을 계산하였다. 150 V를 인가하였을때 1mm 간격과 1.5 mm 간격의 경우 6 % 정도의 근소한 차이를 보였다.

## 5. 결론

GEM에서 전자사태에 의하여 발생하는 이온이 Drift plate로 향하는 Ion Feedback 현상은 밀봉형 광자 검출기인 GEM Photomultiplier 개발을 위하여 최소화되어야 한다.  $E_D$ ,  $E_T$ , 유효 이득, GEM에 인가한 전압차를 변화시키면서 각각의 전기장이 Ion Feedback에 끼치는 영향을 측정하였다. 또한 모델 계산을 통하여 실험에 의하여 얻어진 결과를 설명할 수 있었다. Ion Feedback을 최소화하기 위하여 TPC에서 연구되어진 전선을 이용한 Ion Gating법의 가능성을 고려하였다. 전선에 인가한 상대 인가 전압, 전선 사이의 간격, 전선과 전극판 사이의 간격을 변화시키면서 하전입자 투과율을 계산함으로써 Ion Gating을 위한 적합한 실험 설계 환경을 구하였다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] F. Sauli, Nucl. Instr. Meth. A 386, 531 (1997).
- [2] A. Bondar, A. Buzulutskov, L. Shekhtman, and A. Vasiljev, Nucl. Instr. Meth. A 496, 325 (2003).
- [3] S. Bachmann, A. Bressan, L. Ropelewski, F. Sauli, A. Sharma, and D. Mohrmann, Nucl. Instr. Meth. A 438, 376 (1999).