

## Calculation of Primary Electron Collection Efficiency in Gas Electron Multipliers Based on 3D Finite Element Analysis

Ho-Kyung Kim · Min-Kook Cho · Min-Ho Cheong · Cheol-Soon Shon ·  
Sung-Jin Hwang · Jong-Soo Ko · Hyo-Sung Cho\*

School of Mechanical Engineering, Pusan National University  
\*Department of Radiological Science, BAERI, Yonsei University

### 3차원 유한요소해석을 이용한 기체전자증폭기의 1차 전자수집효율의 계산

김호경 · 조민국 · 정민호 · 손철순 · 황성진 · 고종수 · 조효성\*

부산대학교 기계공학부, \*연세대학교 방사선학과 원자력기초공동연구소

(2004년 12월 27일 접수, 2005년 3월 15일 채택)

**Abstract** - Gas avalanche microdetectors, such as micro-strip gas chamber (MSGC), micro-gap chamber (MGC), micro-dot chamber (MDOT), etc., are operated under high voltage to induce large electron avalanche signal around micro-size anodes. Therefore, the anodes are highly exposed to electrical damage, for example, sparking because of the interaction between high electric field strength and charge multiplication around the anodes. Gas electron multiplier (GEM) is a charge preamplifying device in which charge multiplication can be confined, so that it makes that the charge multiplication region can be separate from the readout micro-anodes in gas avalanche microdetectors possible. Primary electron collection efficiency is an important measure for the GEM performance. We have defined that the primary electron collection efficiency is the fractional number of electron trajectories reaching to the collection plane from the drift plane through the GEM holes. The electron trajectories were estimated based on 3-dimensional (3D) finite element method (FEM). In this paper, we present the primary electron collection efficiency with respect to various GEM operation parameters. This simulation work will be very useful for the better design of the GEM.

**Key words** : Gas electron multiplier, Radiation detector, Electric field, Finite element method

**요약** - 기체전자증폭기(GEM, gas electron multiplier)는 동박이 양면으로 도포된 절연기판에 미세구멍배열을 형성한 박막으로 기존의 기체형 방사선 검출기의 미약한 방사선 신호를 증폭하기 위해 널리 사용되어지고 있다. 미세구멍 내부에 강한 전기장을 형성함으로써 이 내부로 유입되는 전자에 충분한 에너지를 전달, 전자사태를 유도하는 원리를 이용한다. 따라서 GEM의 특성은 GEM을 포함한 방사선 검출기에 인가되는 전압 즉, 전기장의 분포에 의해 결정된다. 따라서 올바른 전기장의 분포에 대해서는 신호 전자가 수집전극으로 향하지 못하고, GEM의 상·하단의 전극으로 이동, 신호의 손실을 초래할 수도 있다. 본 논문에서는 GEM의 가장 중요한 성능 지표 중 하나인 1차 전자수집효율(primary electron collection efficiency)을 계산하였다. 방사선에 의해 발생된 전자는 전기력선을 따라서만 움직인다는 가정 하에, GEM의 단위 구조에 대해 표류전극에서의 전기력선의 수에 대한 수집전극에서의 전기력선의 수의 비로 전자수집효율을 계산하였다. 전기력선의 계산은 3차원 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 본 논문에서 사용한 방법은 가장 이상적인 상황으로 국한되지만, GEM의 설계 및 최적 운전변수 도출에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

**중심어** : 기체전자증폭기, 방사선 검출기, 전기장, 유한요소법

## 서론

일반적으로 입사 방사선을 검출하기 위한 기체형 방사선 검출기는 기체가 충전된 평행판 구조를 가지고 있다. 외부의 고전압전원공급기(high voltage power supply)를 통해 평행판 중 한 면은 음극으로, 그리고 반대 면은 양극으로 설정되며, 따라서 입사된 방사선이 전리작용(ionization)에 의해 기체분자를 양이온과 전자로 전리시키게 되면, 양이온은 음극으로 전자는 양극으로 이동, 외부의 회로에 전류가 유도되는 원리를 이용함으로써 방사선을 검출할 수 있게 된다. 기체 내에서의 전자는 양이온에 비해 매우 빠르게 움직일 수 있기 때문에 주로 전자에 의해 유도된 신호만을 이용한다. 특히 양극을 픽셀(pixel) 구조로 혹은 스트립(strip) 형태의 전극을  $x$ ,  $y$  방향으로 직교하는 구조로 제작함으로써 방사선의 위치 검출 혹은 영상 획득이 가능하게 된다. 이와 같은 구조에서는 미세한 픽셀 혹은 스트립 양극 주위에 강한 전기장이 형성되기 때문에 이들로 끌려오는 전자는 전기장으로부터 에너지를 얻어 주변의 기체분자를 추가적으로 전리시킬 수 있으며, 이 현상은 미세 양의 전극 주변에서 기하급수적으로 불어나 궁극적으로는 매우 높은 전기신호를 출력하게 된다. 이 현상을 기체전자증폭(gas electron multiplication)이라 한다. 하지만, 미세 양극 주변에서의 기체전자증폭은 방전(discharge), 스파크(spark) 등의 강한 전기적 충격을 야기할 수 있으며, 결국에는 미세 양극을 파괴하게 된다[1]. 이와 같은 전기적 충격 현상을 막기 위한 방법으로는 기체전자증폭을 미세 양극에서부터 멀리 떨어진 곳에서 유발시키는 방법(charge preamplification method)이 있으며[2], 이를 구현하기 위해 기체전자증폭기(GEM; Gas Electron Multiplier)가 개발되었다[3].

GEM은 미세구멍배열(micro-hole array)이 형성된 박막으로써, 연성인쇄회로기판(FPCB: Flexible Printed Circuit Board)의 소재인 양면 동박적층판(CCL: Copper Clad Laminate)을 반도체 제작공정의 일부인 습식 식각법(wet etching method)을 이용하여 주로 제작되어진다. GEM은 기존의 기체형 방사선 검출기의 평행판 사이에 위치시켜 사용하게 되는데, 음극 면과 GEM 사이의 공간을 표류영역(drift region), 그리고, GEM과 양극 면 사이의 공간을 수집영역(collection region)이라 부른다. 이는 표류영역에서 방사선에 의한 기체분자의 전리작용을 일으키고, 궁극적으로 양극 면에서 전

자를 수집하기 때문이다. 따라서 음극 면은 표류전극(drift electrode) 그리고 양극 면을 수집전극(collection electrode)이라 부른다.

GEM의 양면 박막에 적절한 전위차를 형성시키면, 평행판 사이에 형성된 전기장에 의한 전기력선은 GEM의 미세구멍배열 사이로 통과하게 될 것이며, 미세구멍 내부에는 기체전자증폭을 야기할 수 있는 강한 전기장이 형성될 것이다. GEM의 동작원리를 간단하게 표현한 스케치를 Fig. 1에 나타내었다. 만약 적절하지 못한 전위차를 표류전극, 수집전극, 그리고 GEM 상·하단에 인가하게 되면, 미세구멍 내부에 충분한 전기장이 형성되지 않거나, 혹은 전기력선의 일부가 GEM의 상·하단 또는 미세구멍 벽면으로 향하여 표류영역 및 미세구멍 내부에서 형성된 전자가 수집전극으로 향하지 못하고 결국 방사선 신호의 일부를 손실하는 결과를 초래하게 될 것이다. 이처럼 GEM의 사용에 있어서는 방사선 신호의 수집효율과 관련하여 4군데의 전극에 인가하는 전위차의 값이 매우 중요하다.

본 논문에서는 각 전극에 인가하는 전압의 변화에 따른 1차 전자수집효율(primary electron collection efficiency)을 예측하여, 최적의 GEM의 운전변수(operation parameter)를 도출하고자 한다. 전자수집효율은 표류전극에서의 전기력선의 수에 대한 수집전극에서의 전기력선의 수의 비로 예측될 수 있으며, 전기력선의 궤적은 전자이동궤적(electron trajectory)으로 예측될 수 있다. 이를 위하여 GEM 내부에서의 전기장 해석이 필수적이다. 해석적인 해를 구하기는 매우 어렵기 때문에 3차원(3D: 3-dimensional) 유한요소법(finite element method)을 이용하였다.

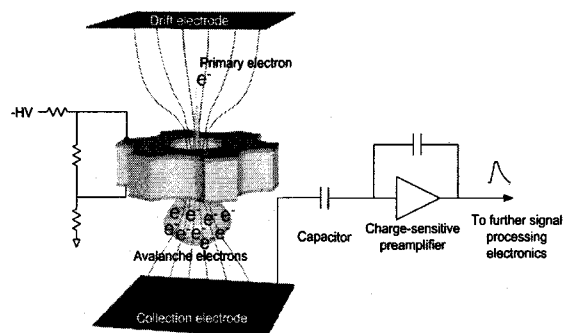


Fig. 1. Principle of GEM operation as a charge preamplifying device in a gaseous detector.

**방 법**

**기체전자증폭기의 모델링**

GEM은 절연체의 두께 (~50  $\mu\text{m}$ ), 양면의 각 동박적층판의 두께 (1~5  $\mu\text{m}$ ), 미세구멍의 직경 (50~100  $\mu\text{m}$ ), 미세구멍과 구멍사이의 간격(pitch) (100~200  $\mu\text{m}$ ) 등 그 구조가 매우 다양하다[4,5]. 본 논문에서는 전기장 시뮬레이션을 위해 절연체 두께 50  $\mu\text{m}$ , 양면의 각 동박적층판의 두께 1  $\mu\text{m}$ , 미세구멍의 직경 70  $\mu\text{m}$ , 미세구멍과 구멍사이의 간격 140 $\mu\text{m}$  등 가장 전형적인 GEM의 구조로 모델링 하였다. 실제적으로는 양면 습식 식각에 의해 미세구멍벽면의 구조가 양면원뿔구조(double conical)이나 본 논문에서는 간단히 원통형(cylindrical)으로 가정하였다. 미세구멍배열은 사각배열(square array)과 벌집배열(honeycomb or hexagonal array) 중에서 가장 널리 활용되는 벌

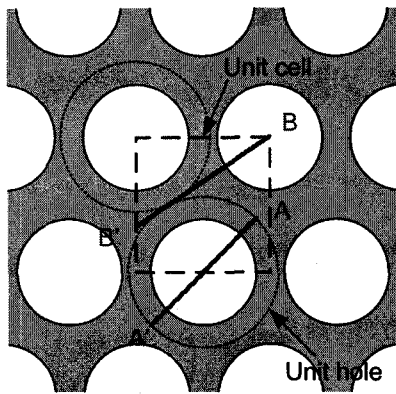


Fig. 2. Modeling of the GEM for the FEM simulation.

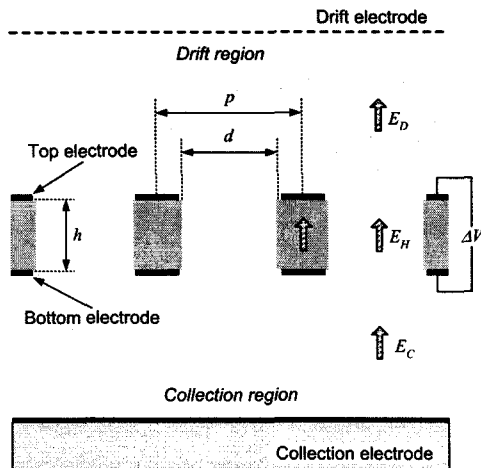


Fig. 3. Definition of the simulation parameters.

Table 1. Description of the GEM simulation parameters.

기호	단위	설 명
$p$	$\mu\text{m}$	미세구멍간의 간격
$d$	$\mu\text{m}$	미세구멍의 직경
$h$	$\mu\text{m}$	절연기판의 두께
$\epsilon$		절연기판의 유전율
$\Delta V$	V	GEM 상·하단 인가전압
$E_S$	kV/cm	절연기판 내의 전기장의 세기
$E_H$	kV/cm	미세구멍 내의 전기장의 세기
$E_D$	kV/cm	표류영역에서의 전기장의 세기
$E_C$	kV/cm	수집영역에서의 전기장의 세기

집배열로 가정하였으며, 시뮬레이션의 계산효율을 높이기 위해, 즉 GEM의 한 피치 내에서의 특성을 모두 기술할 수 있는 반면, 유한요소해석에서 계산속도에 큰 영향을 미치는 유한요소망(mesh)의 수를 줄임으로써 계산시간을 최소화할 수 있도록 Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 하나의 단위셀(unit cell)을 취하도록 모델링 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 모델링한 GEM의 단면도 및 전기장 시뮬레이션을 위한 여러 가지 운전변수의 정의를 보여준다(운전변수에 대한 설명은 Table 1 참조). GEM의 몸체에 해당하는 절연기판(insulating substrate)은 대부분 polyimide 계열로 만들어 지는데 본 논문에서는 유전율(dielectric constant)을 3.6으로 가정하였다.

**유한요소법을 이용한 시뮬레이션**

3차원 유한요소법의 적용을 위해서 상용 전산 코드 Maxwell™ (Ansoft, Pittsburgh, US)을 사용하였다. GEM의 절연기판인 polyimide의 비저항( $> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ )이 매우 크기 때문에 시뮬레이션은 정전조건(electrostatic mode)하에서 수행되었다. Fig. 4는 3차원 GEM의 단위 셀에 대한 모델링 및 유한요소망을 구현한 Maxwell™의 사용자인터페이스(GUI: Graphic User Interface)를 보여준다.

GEM의 최적 동작변수를 결정하기 위하여 GEM의 인가전압을 500 V로 고정하고, 표류영역에서의 전기장 세기  $E_D$ 와 수집영역에서의 전기장 세기  $E_C$ 를 0~10 kV/cm까지 변화시키면서 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다.

**1차 전자수집효율의 계산**

실제로 전자가 기체내부의 전기력선을 따라 음

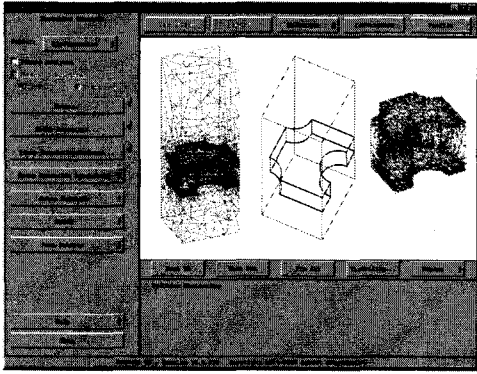


Fig. 4. Maxwell™ GUI for the FEM simulation showing the 3D GEM model with finite element meshes.

직일 때는 확산(diffusion), 기체분자와의 산란(scattering) 등으로 인해 그 궤적이 전기력선과 일치하지는 않는다. 하지만 본 논문에서는 문제를 간단히 하기 위하여, 확산 및 산란 등을 고려하지 않았다. 즉, 전자의 움직임은 전기력선을 따라서 움직인다고 가정하였다. 그러므로 1차 전자수집효율은 표류전극에서 출발한 전자가 GEM의 구멍을 통과하여 수집전극에 도달한 비로 정의할 수 있으며, 이는 곧 다음과 같이 전기력선 수(flux)의 비로 나타낼 수 있다[4,5].

$$\eta = \frac{\Phi_C}{\Phi_D} \quad (1)$$

여기서,  $\eta$  전자수집효율  
 $\Phi_D$  표류전극에서 출발한 전기력선 수  
 $\Phi_C$  수집전극에 도달한 전기력선 수

Maxwell™로부터 시뮬레이션을 통해 전기장의 3차원 분포를 획득한 후 이 데이터를 이용하여 전자의 이동궤적을 예측하였다. 계산 알고리즘은 다음의 식으로 간단히 표현될 수 있다[4,5].

$$\vec{r}_n = \vec{r}_{n-1} + \frac{\vec{E}_{n-1}}{|\vec{E}_{n-1}|} \times \Delta \quad (2)$$

여기서,  $\vec{r}_{n-1}$  전자의  $n-1$ 번째 위치  
 $\vec{r}_n$  전자의  $n$ 번째 위치  
 $\vec{E}_{n-1}$   $n-1$ 번째에서의 전기장 벡터  
 $|\vec{E}_{n-1}|$   $n-1$ 번째에서의 전기장 세기  
 $\Delta$  전자의 이동간격

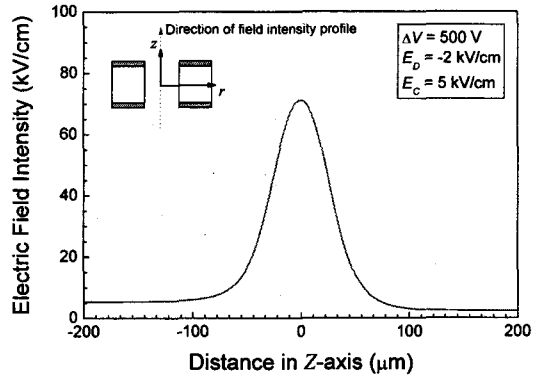


Fig. 5. Electric field intensity in the GEM hole.

임의의 위치에서의 전기장 벡터는 주변의 정육면체 꼭지점에 해당하는 8군데의 Maxwell™의 데이터로부터 계산된다. 이때, 임의의 위치에서 각 꼭지점간의 거리의 역수를 이용하여 가중치(weighting factor)를 추가하였다.

### 결과 및 고찰

GEM은 미세구멍 내부에서 전자증폭을 유도하는 장치이며, 전자증폭도는 GEM의 특성 중 가장 중요한 요소이다. 따라서 미세구멍 내부에서의 전기장의 세기를 살펴보는 것이 중요하다. Fig. 5는 GEM의 미세구멍 내부 중앙을 따라 전기장의 세기를 계산한 결과이다. 시뮬레이션 조건은  $\Delta V = 500$  V,  $E_D = -2$  kV/cm,  $E_C = 5$  kV/cm 이며, 이는 전형적인 GEM 동작을 위한 운전조건이다.

GEM의 미세구멍 내부 영역에서는 전기장의 세기가 45 kV/cm 이상이며, 최대값은 중앙에 위치하며 약 70 kV/cm이다. 일반적으로 전자증폭은 전기장의 세기가 10 kV/cm 이상에서 발생되며 [6], 따라서, 주어진 조건에서는 충분히 전자증폭을 유도할 수 있다.

Fig. 6은 3차원 유한요소해석 결과 데이터를 바탕으로 전자의 이동궤적을 계산한 결과이다. Fig. 6(a)는 Fig. 2에서 나타내어진 직선 AA'에 대한 GEM의 단면에 대해 전자이동궤적(혹은 전기력선) 및 등전위선을 자세하게 계산한 결과이다(조건:  $\Delta V = 500$  V,  $E_D = -4$  kV/cm,  $E_C = 5$  kV/cm). 결과에서 알 수 있듯이 표류영역에서 생성된 전자는 모두 수집전극으로 향하며, 특히 GEM 상·하단의 전위차에 의해 형성된 전기장은 표류전극 및 수집전극에서 형성된 전기장을 GEM의 미세

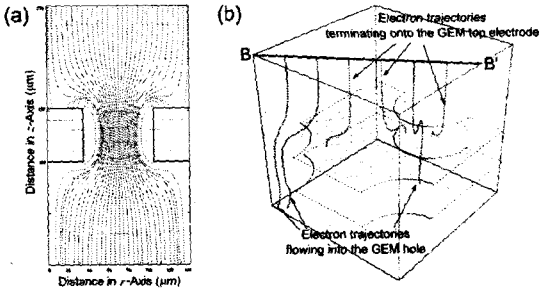


Fig. 6. (a) Electron trajectories along AA' and (b) BB' as shown in Fig. 2.

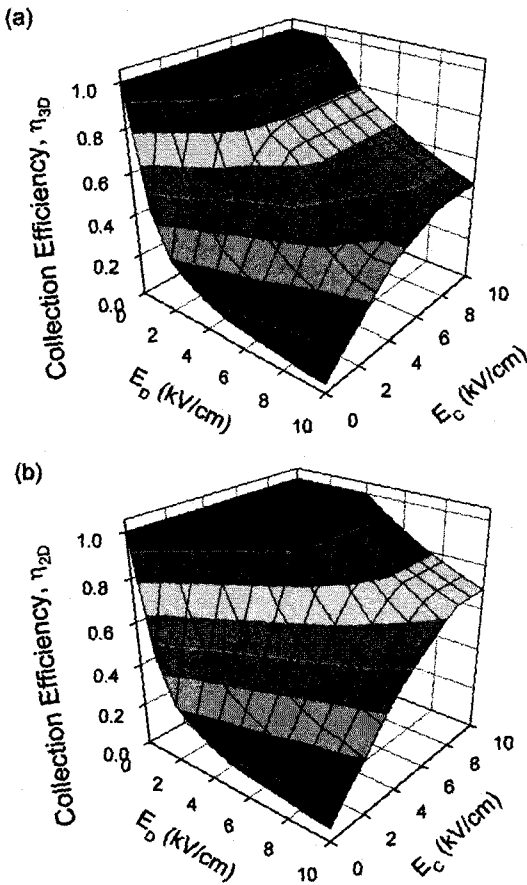


Fig. 7. Primary electron collection efficiencies with respect to a variety of drift and collection field intensities calculated by (a) 3D and (b) 2D finite element methods.

구멍 내부로 집중시키며, 미세구멍 내부의 전기장의 세기를 강화시키는 역할을 하고 있다. 등전위선은 전기력선과 수직으로 형성되는 데 개념적으로 정전렌즈(electrostatic lens) 역할을 한다고 할 수 있다. 이와 같은 결과는 GEM 미세구멍 구조

의 rz symmetric 성질을 이용하여 즉, Fig. 2에서 나타내어진 unit hole에 대한 2차원 시뮬레이션을 수행하여도 거의 같은 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 세 개의 unit hole들이 서로 접할 경우 그 사이의 영역은 2차원 시뮬레이션으로는 해석할 수 없으며, 결국 그 영역 위에서의 전자이동은 알 수가 없다[4,5]. Fig. 6(b)는 2차원 시뮬레이션으로 해석 불가능한 영역을 가로지르는 직선 BB'에 대한 GEM의 단면에 대해 전자이동학적 일부를 3차원으로 계산한 결과이다. 이와 같은 해석은 3차원 시뮬레이션의 중요함을 강조한다.

Fig. 7(a)는 다양한  $E_D$  및  $E_C$ 에 대해 3차원 시뮬레이션을 수행 후 1차 전자수집효율을 계산한 결과이다. 전체 결과를 살펴보면,  $E_D$ 가 낮고,  $E_C$ 가 높은 영역에서 높은 전자수집효율을 보임을 알 수 있다.  $E_D$ 가 높으면 표류영역의 전자가 GEM의 상단 전극으로 도달하기 때문에 전자수집효율이 낮아지며, 이와 같은 현상은  $E_D$ 가 높을수록 더욱 심화된다. 반면,  $E_C$ 가 낮으면 GEM 미세구멍을 통과한 전자는 수집전극에 도달하기 전에 이동 거리가 짧은 GEM 하단 전극으로 이동, 도달하게 된다. 하지만, 2 kV/cm 이상에 대해서는 거의 변화가 없다. 즉, 1차 전자수집효율은 수집영역에서의 전기장 세기보다는 표류영역에서의 전기장 세기의 변화에 크게 의존하며, 이는 곧 GEM의 하단 전극에서의 전자신호 손실보다 상단 전극에서의 손실이 훨씬 큼을 시사한다. 그러므로 높은 전자수집효율을 얻기 위해서는  $E_D$ 는 낮고  $E_C$ 는 높은 영역에서 GEM을 동작시켜야 함을 알 수 있다. 1차 전자수집효율에 대한 2차원 시뮬레이션 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 낮은  $E_D$  및  $E_C$ 에 대해서는 3차원 시뮬레이션 결과와 일치하나, 높은  $E_D$  및  $E_C$  ( $\geq 4$  kV/cm)에 대해서는 3차원 시뮬레이션 결과보다 높은 1차 전자수집효율을 보여 주고 있다. 이는 전술한 바와 같이, 2차원으로는 해석 불가능한 영역에서의 전자의 거동 때문이며, 실제적으로는 GEM의 상단 전극으로 도달하기 때문에 발생하는 수집전극에서의 1차 전자수집효율의 저하를 2차원 시뮬레이션은 반영하지 못하고, 궁극적으로 과대 평가하는 결과를 나타내고 있다.

토 의

GEM에서의 전자증폭 및 전자수집효율은 기하학적 구조와 전기장 분포에 의해 결정된다. 시뮬

레이션 결과에 의하면 미세구멍에서 높은 전기장 세기를 얻기 위해서는 미세구멍의 크기가 작을수록, 그리고 절연기판의 두께가 두꺼워야 함을 알 수 있었다. 절연기판이 두꺼워지면, 전자증폭이 전개되는 경로가 길어지기 때문에 전기장의 세기의 증가의 원인 외에 추가의 전자증폭의 증가가 예상된다. 하지만, 미세구멍의 크기가 작을수록, 그리고 절연기판의 두께가 증가할수록 높은 전자증폭과 더불어 무거운 기체 양이온의 수가 역시 비례해서 증가하게 될 것이며, 이들은 미세구멍을 빠져나가지 못하고 절연기판 벽면에 부착되어 궁극적으로는 미세구멍의 내부의 전기장의 변화를 야기할 것이며, 따라서 출력신호의 시간에 따른 변화를 초래할 것이다. 그러므로 최적의 GEM 구조에 대한 연구는 이와 같은 양이온의 절연기판 벽면으로의 누적(surface charging-up)을 고려해서 연구되어야 할 것이다.

본 논문에서는 전자의 산란 및 확산 등을 고려하지 않았다. 만약 낮은  $E_D$ 로 운전할 경우 표류 영역에서 발생된 1차 전자는 전기력선을 따른 진행보다는 산란 및 확산 등에 의해 횡방향으로도 진행(transversal motion)을 할 것이며, 결국에는 GEM의 미세구멍에 도달하기 전에 상단 전극에 도달하게 될 것이다[7]. 즉, 아주 낮은  $E_D$ 로 동작시킬 때는 전자의 확산 및 충돌로 인한 전자의 GEM 상단 전극으로의 손실로 인해 전자수집효율이 낮다가,  $E_D$ 가 증가할수록 전자의 전기력선을 따른 운동이 횡방향 운동에 비해 점차 커져 전자수집효율이 증가할 것이다. 전자수집효율은 최대값에 도달했다가  $E_D$ 가 더욱 증가하게 되면 전기장의 영향에 의해 다시 GEM의 상단 전극으로 도달하는 전자의 증가에 의해 전자수집효율이 감소하는 경향을 보이게 될 것이다. 따라서 최적의 GEM 운전변수의 도출을 위해서는 전자의 산란 및 확산 등을 고려한 시뮬레이션이 수행되거나, 혹은 실험이 수반되어야 할 것이다. 하지만, 본 논문에서 수행한 방법은 간단한 방법을 통해 정성적으로 GEM의 최적 동작변수의 결정을 잘 설명할 수 있으며, 실제 제작 및 실험에 앞서 다양한 GEM의 기하학적 구조 및 동작변수에 대해 타당한 성능예측을 제공할 수 있다.

## 결 론

본 논문에서는 이론적인 방법을 통해 기체형 방사선 검출기 신호증폭을 위해 널리 활용되고

있는 GEM의 최적 운전변수에 대해 알아보았다. 1차 전자수집효율이 최대일 때의 운전변수를 본 연구에서는 최적값으로 설정하였다. 3차원 유한요소법을 적용, GEM에서의 전기장 해석을 수행하였으며, 이를 통해 전자기동계적을 계산하였다. 단위 셀의 표류전극에서 출발한 전자의 이동계적을 추적하여 수집전극으로 도달한 비율을 토대로 전자수집효율을 예측하였으며,  $E_D$ 가 낮고,  $E_C$ 가 높은 영역에서 높은 전자수집효율을 보임을 알 수 있었다. 추후 전자의 기체 내 산란 및 확산을 고려한다면, 보다 명확하고, 단일한 값의 운전변수를 도출할 수 있을 것이다. 본 논문에서 수행된 이론적 방법은 간단하지만 GEM의 설계 및 운전 에 매우 유용하다고 사려 된다.

## 감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2004-003-D00485), 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. H.S. Cho, W.S. Hong, N. Palaio, J. Kadyk, K.B. Luk, V. Perez-Mendez, K.S. Joo and J. Vujic, "Spark damage studies of microgap gas chambers with various anode strip metals," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 44(3), 635-639(1997)
2. H.K. Kim, G. Cho, D.K. Kim and H. Cho, "Gas electron multiplier made by deep-etch X-ray lithography," *J. Kor. Phys. Soc.*, 40(5), 812-819(2002)
3. F. Sauli, "GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors," *Nucl. Instr. Meth. A*, 386, 531-534(1997)
4. M.K. Cho, M.H. Cheong, H.K. Kim, S.J. Hwang, J.S. Ko and H. Cho, "Electric field simulation of gas electron multipliers with various geometries," *Bulletin of the Korea Physical Society*, 22(2), 373(2004)
5. M.K. Cho, H.K. Kim, M.H. Cheong, S.J. Hwang, J.S. Ko and H. Cho, "Finite element analysis of electric field properties in gas electron multipliers," *Proc. of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, 1143-1144 (2004)

6. G.F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, John Wiley & Sons(2000)
7. R. Bellazzini, A. Brez, G. Gariano, L. Latronico, N. Lumb, G. Spandre, M.M. Massai, R. Raffo and M.A. Spezziga, "What is the real gas gain of a standard GEM ?," *Nucl. Instr. Meth. A*, 419, 429-437(1998)