

## SF<sub>6</sub>가스 방전 특성의 유한요소해석

### A Finite Element Analysis on the discharge characteristics of SF<sub>6</sub> gas

현정수\*, 최승길\*, 심재학\*, 강형부\*\*

Jung-soo Hyun, Seung-kil Choi, Jae-hak Shim, Hyung-boo Kang

#### Abstract

In this paper, the corona discharge in SF<sub>6</sub> gas used as insulating material in lots of high voltage equipment, is simulated by finite element method with Flux-Corrected Transport(FCT) method. By application of proposed method, the negative corona discharge characteristics in needle to plane electrode is analyzed with time step. For the accuracy of analysis, the secondary electron emission by photon and ion are also considered as well as townsend first ionization and electron attachment. The calculated results show that the electric field intensity between anode and ion group is decreased as times go-by according to field distortion by those space charge. Accordingly the electron density is decreased strongly by the attachment effect of SF<sub>6</sub> gas so that the corona discharge becomes extinguished abruptly.

**Key Words(중요용어)** : needle to plane electrode(침대 평판 전극), finite element method (FEM, 유한요소법), SF<sub>6</sub>(6불화황)

#### 1. 서론

고도의 경제성장에 의한 전력 수요의 급증으로 전력 계통이 점차 고전압화, 대용량화되는 추세에 따라 차단기, 개폐기, 변성기 등의 전력 기기에서 발생할 수 있는 방전 현상의 정량적, 체계적인 해석에 의한 규명이 요구된다. 특히 코로나 방전은 각종 전기 기기에서 전극의 형상 및 전극 구조에 의해 전계의 불평등이 심한 곳에서 자주 발생하는 절연파괴 현상의 일종으로, 기기의 절연 성능에 중대한 영향을 미치게 되므로 전력 계통의 신뢰성 향상을 위해서는 무엇보다도 먼저 코로나 방전 현상의 정확한 이해를 통해 방전을 억제하는 것이 절대적으로 필요하다. 반면에 이와 같이 부정적인 측면의 코로나 방전과는 달리 최근에는 심각한 환경오염 문제를

해결하기 위해 코로나 방전을 긍정적인 측면으로 이용한 집진 및 유해 가스 처리 장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 코로나 방전 현상은 전극 사이의 전자 및 양·음 이온 등 하전입자의 거동에 의해 좌우되므로, 코로나 방전 현상을 해석적으로 규명하기 위해서는 하전입자의 증배 및 감쇄를 지배하는 전리, 재결합, 부착 등의 요인들에 의한 코로나 방전 특성의 시간 진전에 따른 변화를 살펴볼 필요가 있다.

방전 현상의 해석법으로는 일반적으로 유체법과 입자법이 이용되고 있는데, 입자법은 각 하전입자를 하나의 개별 입자로 취급하여 방전시 발생하는 모든 입자를 추적하는 미시적인 방법으로, 정확한 해석은 가능하나 계산 시간이 길고 입자밀도가 큰 경우에는 모든 하전입자를 추적하는 것이 불가능하므로 아직까지는 저기압 영역의 해석에 국한하여 시행되고 있다. 반면 유체법은 하전입자의 거동을 일종의 유체의 흐름으로 가정하여 해석하는 방법으로, 방전 메커니즘을 국부적으로 정확히 해석할 수는 없으나 비교적 계산 시간이 짧고 시간의 진전에 따른 전류밀도, 전계분포 및 하전입자의

\* : 한양대학교 전기공학부  
(서울시 성동구 행당동, FAX: 02-2297-1569  
E-mail : hyuneum@hymail.hanyang.ac.kr)

\*\* : 한양대학교 전자전기공학부  
1999년 7월 23일 접수, 2000년 1월 25일 심사완료

분포 등 방전의 전체적인 흐름을 손쉽게 파악할 수 있는 장점을 지닌다<sup>1)</sup>.

유체법을 지배하는 연속방정식은 대류항이 지배하는 형태이므로, 공간적 변화가 매우 커서 지배방정식을 저차의 방법으로 풀면 수치확산이 생기고, 고차의 방법을 사용하면 수치진동이 발생하여 해가 음의 값이 나오는 경우가 있다.

따라서 본 연구에서는 이와 같은 저차 또는 고차 방법에 의한 해석 오류를 방지하기 위해 저차해와 고차해를 적절히 병용하여 해를 얻는 FCT 알고리즘을 이용하여 연속방정식을 해석하였다. 해석기법으로는 또한 다양한 전극 형상에 대해 유동적으로 대처 가능하고, 방전 특성의 변화 양상이 현저할 것으로 예상되는 영역을 국부적으로 세분함으로써 전체 해석 모델에 대한 요소 수를 감소시켜 계산 시간을 단축시킬 수 있는 유한요소법을 이용하였다. 또한, 채널반경을 일정하다고 가정하여 계산하는 1차원 해석과는 달리 스트리머의 채널반경을 일정하다고 가정하지 않는 2차원 해석을 함으로써 방전 특성을 보다 더 정확하게 해석하였다<sup>2)</sup>. 코로나 방전현상의 해석 모델로는 대표적인 불평등 전계 분포를 갖는 침대평판 전극을 이용하였으며, 전극간의 절연 매질로는 대표적인 부성기체로 부차 특성에 의해 절연능력이 우수하여 대부분의 전력저동기기에쓰이고있는 SF<sub>6</sub> 가스를 사용하였다. SF<sub>6</sub> 가스에서의 방전은 질소나 아르곤 등 다른 기체와는 달리 전자와 중성 기체의 부차에 의해 방전 특성이 크게 좌우된다. 이에 본 연구에서는 일반적인 방전 현상 해석시 사용되는 전자의 충돌전리, 전자와 중성 기체의 부차 작용뿐만 아니라, 광자 및 양이온에 의한 2차 전리도 고려하여 해석의 정밀도를 높이고자 하였으며, 시간의 흐름에 따라 변화하는 전자 밀도 분포, 양·음이온 밀도 분포 및 전극 사이를 흐르는 전류 밀도의 변화를 계산하였다.

## 2. 지배 방정식

코로나 방전 해석을 위한 지배 방정식은 식(1)~(4)와 같이 전자, 양이온, 음이온의 밀도에 대한 연속방정식과 Poisson 방정식으로 구성된다.

$$\frac{d\rho_e}{dt} = -\nabla \cdot (\rho_e W_e) + \rho_e a |W_e| + S + \nabla^2 (D\rho_e) - \rho_e \eta |W_e| - \rho_e \rho_+ \beta \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_+}{dt} = \nabla \cdot (\rho_+ W_+) + \rho_+ a |W_e| + S - \rho_e \rho_+ \beta - \rho_- \rho_+ \beta \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_-}{dt} = -\nabla \cdot (\rho_- W_-) + \rho_e \eta |W_e| - \rho_- \rho_+ \beta \quad (3)$$

$$\nabla^2 \Phi = -\frac{e}{\epsilon} (\rho_+ - \rho_e - \rho_-) \quad (4)$$

$$E = -\nabla \Phi \quad (5)$$

여기서,  $W_e, W_+, W_-$  와  $\rho_e, \rho_+, \rho_-$ 는 각각 전자, 양이온, 음이온에 대한 드리프트 속도와 밀도이며,  $a, \eta, \beta$ 는 전자의 충돌 전리 계수, 부차계수, 재결합 계수를 나타낸다. 또한,  $D$ 는 전자의 확산 계수,  $S$ 는 광전리에 의한 하전 입자 생성항,  $\epsilon$ 은 유전율,  $\Phi$ 는 전위,  $e$ 는 전자의 전하량을 나타낸다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1. 해석 과정

본 연구에서는 코로나 방전의 시간의 진전에 따른 방전 특성 변화를 규명하기 위해 먼저 해석 영역을 삼각 요소로 분할 하여 기본적인 절점, 요소 등의 데이터를 추출한 후, 그림 1과 같은 순서에 의하여 해석을 수행하였다.

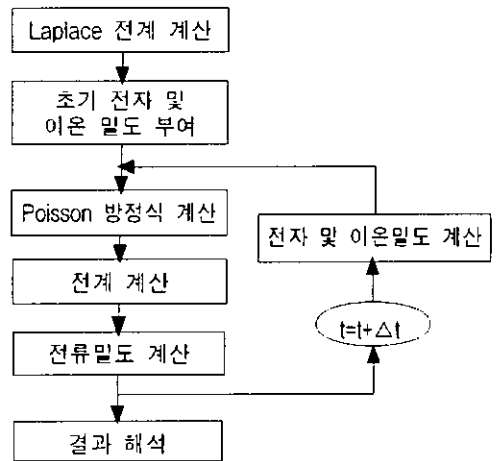


그림 1 수치 해석 순서도  
Fig. 1 Flow chart of numerical analysis

### 3.2 FCT 알고리즘

서론에서 언급하였듯이 코로나 방전과 같이 특성이 급변하는 유체 해석시 발생 하는 계산 오류를 방지하기 위해 본 연

구에서는 FCT(Flux-Corrected Transport)법을 다음과 같은 순서로 적용하여 해석하였다.

1. LEC 계산 : 저차의 방법을 이용하여 'low-order element contribution'을 계산한다.
2. HEC 계산 : 고차의 방법을 이용하여 'high-order element contribution'을 계산한다.
3. AEC 정의 : 'antidiffusive element contributions'를 정의한다.

$$AEC=HEC-LEC$$

4. 저차해를 구한다.

$$U^l = U^n + \sum_{el} LEC = U^n + \Delta U^l$$

5. 아래의 6번째 단계에서 계산될 해  $U^{n+1}$ 이 extrema를 갖거나  $U^l$ 이나  $U^n$ 이 되지않도록 AEC를 제한하거나 수정한다<sup>3)</sup>.

$$AEC^c = C_{el} AEC, 0 \leq C_{el} \leq 1$$

6. 해를 갱신한다.

$$U^{n+1}U^l + \sum LEC = U^n + \Delta U^l$$

### 3.3 유효요소 정식화

#### 3.3.1 연속방정식의 수치해법

식(1)과 같은 전자의 연속방정식에 시간에 대한 후퇴 차분법을 적용하면 식(6)이 얻어지며, 전자 밀도  $\rho_c$ 를 보간 함수를 사용하여 근사화하면 식(7)이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\rho_c^{i+\Delta t} - \rho_c^i}{\Delta t} = & -\nabla \cdot (\rho_c^{i+\Delta t} W_c) \\ & + \rho_c^{i+\Delta t} a |W_c| + S \\ & + \nabla^2 (D\rho_c^{i+\Delta t}) - \rho_c^{i+\Delta t} \eta |W_c| \\ & - \rho_c^{i+\Delta t} \rho' + \beta \end{aligned} \quad (6)$$

$$\rho_c = \sum_{i=1}^3 N_{ic} \rho_{ic} \quad (7)$$

이 때, 축대칭 원통 좌표계에서는  $\theta$  방향에 대한  $\rho_c$ 의 변화는 없으므로,  $\frac{d\rho_c}{d\theta} = 0$ ,  $\int d\theta = 2\pi$ 이며,  $r$ 을 식(8)과 같

이 요소절점의 좌표로 표현할 수 있다<sup>4)</sup>.

$$r = \sum_{k=1}^3 N_{kc} r_{kc} \quad (8)$$

따라서, 식(6)을 Galerkin Method에 의해 정식화하면 식(9),식(10)으로 나타낼 수 있다<sup>5)</sup>.

$$\begin{aligned} I_j = & \sum_{e=1}^{element} I_{jc} \\ = & 2\pi \int_V \{ \rho_c^{i+\Delta t} + \Delta t \nabla \cdot (\rho_c^{i+\Delta t} W_c) \\ & - \Delta t \rho_c^{i+\Delta t} a |W_c| - \Delta t S \\ & - \Delta t \nabla^2 (D\rho_c^{i+\Delta t}) + \Delta t \rho_c^{i+\Delta t} \eta |W_c| \\ & + \Delta t \rho_c^{i+\Delta t} \rho + \beta - \rho_c^i \} N_j \quad r dr dz = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} I_{jc} = & [2\pi(1 - \Delta t a |W_c| + \Delta t \eta |W_c|) \\ & \times \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 r_{kc} \int_V N_{ic} N_{jc} N_{kc} dr dz \\ & + 2\pi \Delta t W_{er} \int_V N_{jc} N_{kc} dr dz \\ & + 2\pi \Delta t \sum_{i=1}^3 \left\{ W_{er} \frac{dN_{ic}}{dr} + W_{ez} \frac{dN_{ic}}{dz} \right\} \\ & \times \sum_{i=1}^3 r_{kc} \int_V N_{jc} N_{kc} dr dz \\ & - 2\pi \Delta t D \sum_{i=1}^3 \left( \frac{dN_{ic}}{dr} \frac{dN_{jc}}{dr} + \frac{dN_{ic}}{dz} \frac{dN_{jc}}{dz} \right) \\ & \times \sum_{k=1}^3 r_{kc} \int_V N_{kc} dr dz \Big] \rho_{ic}^{i+\Delta t} \\ & - \left[ 2\pi \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^3 r_{kc} \int_V N_{ic} N_{jc} N_{kc} dr dz \right] \rho_{ic}^i \\ & - 2\pi \Delta t S \sum_{k=1}^3 r_{kc} \int_V N_{jc} N_{kc} dr dz \end{aligned} \quad (10)$$

#### 3.3.2 Poisson 방정식의 수치해법

식(4)의 Poisson 방정식을 전절과 같은 과정을 통하여 정식화하면 식(11) 같이 표현할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$\begin{aligned} \Phi_{jc} = & [2\pi \Delta t \sum_{i=1}^3 \left( \frac{dN_{ic}}{dr} \frac{dN_{jc}}{dr} + \frac{dN_{ic}}{dz} \frac{dN_{jc}}{dz} \right) \\ & \times \sum_{k=1}^3 r_{kc} \int_V N_{kc} dr dz \Big] \Phi_{ic} \\ & + 2\pi \Delta t \frac{e}{\epsilon} (\rho_+ - \rho_c - \rho_-) \\ & \times \sum_{k=1}^3 r_{ic} \int_V N_{jc} N_{kc} dr dz \end{aligned} \quad (11)$$

### 3.3.3 전류밀도 계산

코로나 방전에 의해 전극간에 흐르는 전류밀도는 전자 및 양·음 이온 밀도, 드리프트 속도를 이용하여 식(12)의 Sato 방정식으로 계산하였다<sup>7)</sup>.

$$I = \frac{e}{V} \int_0^d [(N_+ W_{+r} - N_e W_{er} - N_- W_{-r}) E_L + (N_+ W_{+z} - N_e W_{ez} - N_- W_{-z}) E_T] dr dz \quad (12)$$

여기서  $e$ 는 전자의 단위 전하량,  $V$ 는 인가전압,  $d$ 는 전극 사이의 거리이다.

## 4. 해석모델과 결과 및 고찰

### 4.1. 해석모델

그림 2는 본 연구에서의 해석 모델인 침을 음극으로 한 침대 평판 전극이다. 침의 직경은 0.05 cm, 전극간 거리는 0.5 cm이다. 유한요소 해석을 위한 요소분할은 전계의 집중에 의해 코로나 방전의 물리적 특성의 변화가 급변할 것으로 예견되는 침부근을 국부적으로 세밀하게 하여, 해석 시간의 단축 및 계산 정밀도 향상을 도모하고자 하였으며, 자연 경계 영역인 SF<sub>6</sub> 가스 영역을 충분히 넓게 해석 영역에 포함시켜 오차를 최소화 하고자 하였다. 본 연구에서 사용된 SF<sub>6</sub> 가스의 방전 파라메타들은 R. Morrow의 데이터<sup>8)</sup>를 이용하였다.

본 해석에 이용된 요소망은 총 절점 수 3935개, 요소 수

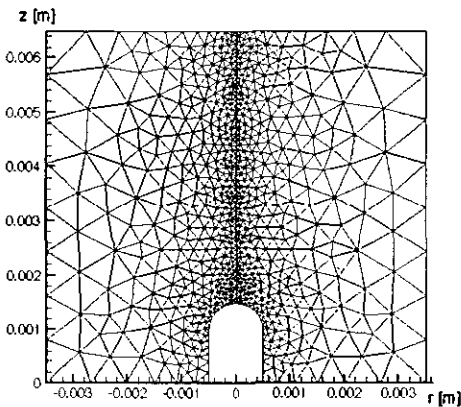


그림 2 유한 요소 분할도 (요소수 7465개)  
Fig. 2 Finite element discretization (7465 elements)

7465개로 구성되어 있다. 음극 인가전압은 -3 kV, 음극과 양극과의 점점 간격은 5 mm이며, SF<sub>6</sub>가스의 밀도는 몬테카를로법을 이용하여 해석한 기존의 논문<sup>9)</sup>과 같은 조건인  $2.12 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 로 가정하였다.

### 4.2 결과 및 고찰

본 연구에서 초기전자는 침부근을 중심으로 분포시켰다. 실제적으로 방전에 관여하는 초기전자는 전계가 강한 침부근의 전자이며, 후술하는 그림 4의 데이터를 중심으로  $\alpha - \eta$  값이 양의 값을 갖는 부분에 위치시켰다. 또한, 1차전리, 2차전리, 부착 및 재결합은 전계에 따른 함수로 고려하였고<sup>10)</sup>,

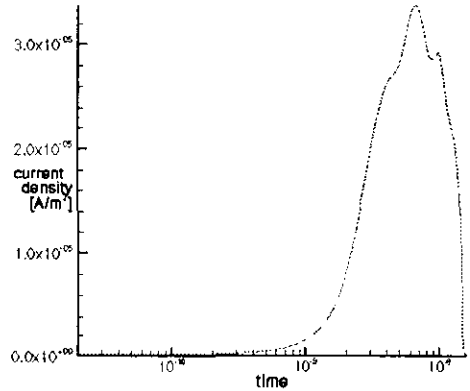


그림 3. 전극간에 흐르는 전류밀도 변화  
Fig. 3. Variation of current density between electrodes

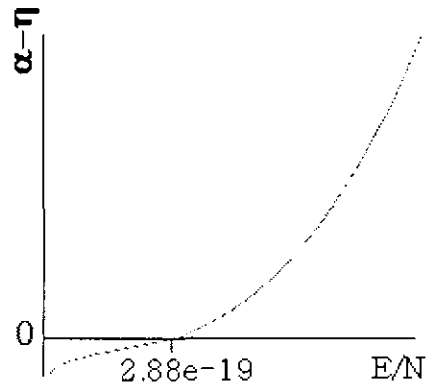


그림 4. 전계의 세기에 대한  $\alpha - \eta$   
Fig. 4.  $\alpha - \eta$  versus electric field intensity

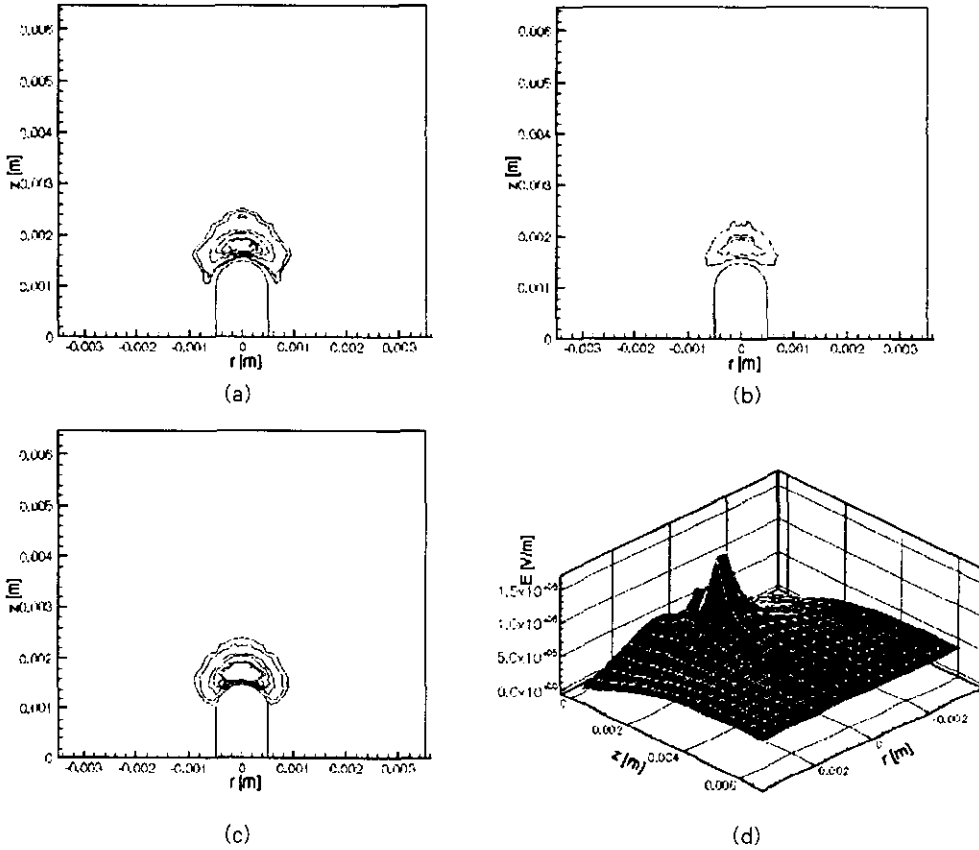


그림 5.  $t=2.6$  ns에서의 입자 분포  
 (a) 전자밀도분포 (b) 음이온밀도분포 (c) 양이온밀도분포 (d) 전기장분포  
 Fig. 5 distribution at  $t=2.6$  ns  
 (a) electron density (b) negative ion density (c) positive ion density (d) electric field

광전리는 저밀도의 플라즈마를 방전 공간 내에 고르게 분포시키는 방법<sup>11)</sup>을 이용하여 계산하였다.

그림 3은 시간의 변화에 따른 전류밀도를 나타낸 것이다. 그림을 보면 방전개시 단계에서는 극히 적은 전류가 흐르다가 급증하는 양상을 보이며, 약 4.5 ns에서 전류밀도가 최대치에 이르고, 이후 급속히 방전이 소멸하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 질소와 같은 부착특성이 없는 기체의 시간에 따른 전류밀도의 변화특성<sup>11)</sup>에 비해 상대적으로 급속히 방전이 소멸하는 이유는 SF<sub>6</sub> 가스의 부착 계수가 커서 방전에 의해 생성된 전자를 쉽게 부착하여 이동도가 낮은 음이온을 형성하므로 방전에 중요한 역할을 하는 전자가 소멸되기 때문으로 사료된다.

부여한 조건이 일치하지는 않아 정량적으로 정확한 비교는

할 수 없지만 그림에서 전류가 급상승하여 빠르게 소멸해 가는 현상과 peak치가 여러 개 나타나는 현상은 기존의 Monte-Carlo법을 이용한 결과<sup>9)</sup>와 실험에 의한 결과<sup>10)</sup>를 비교하여 보았을 때 유사한 경향을 보이는 것으로, 이는 SF<sub>6</sub> 가스의 방전 파라메타가 환산전계 값에 따라 연속적인 값을 갖는 것이 아니라 환산전계 값의 영역에 따라 매우 불연속적인 경향을 보이므로 이 같은 현상이 나타나는 것으로 보인다. 이와 같은 현상은 SF<sub>6</sub> 가스의 고유한 특성으로 이에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 생각된다.

SF<sub>6</sub>와 같은 부성기체의 방전 기구는 광전리, 재결합 등에 의한 영향보다는 주로 충돌전리와 부착에 의해 좌우된다<sup>12)</sup>, 즉,  $\alpha - \eta$ 의 값이 양(+)이나 음(-)이나에 따라 방전이 지속 또는 소멸되는 특성을 갖게 된다.

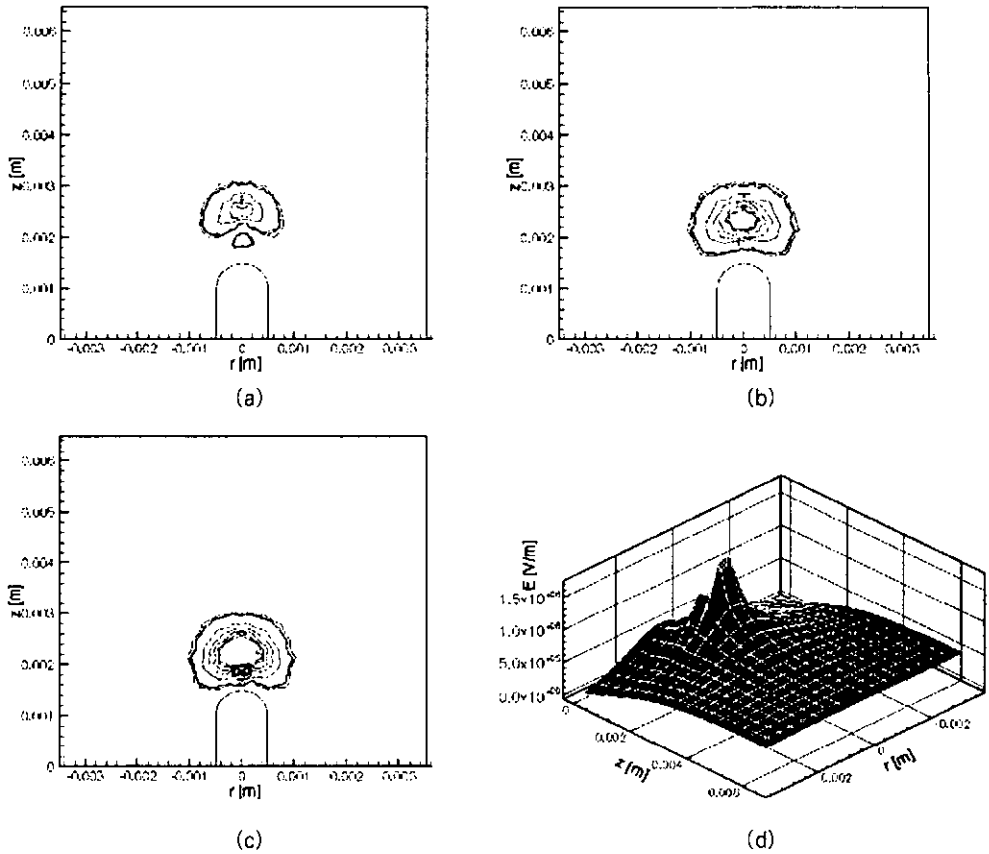


그림 6.  $t=4.5$  ns에서의 입자 분포  
 (a) 전자밀도분포 (b) 음이온밀도분포 (c) 양이온밀도분포 (d) 전계분포  
 Fig. 6. distribution at  $t=4.5$  ns  
 (a) electron density (b) negative ion density (c) positive ion density (d) electric field

그림 4는  $a-\eta$ 의 부호가 바뀌는 환산전계값을 구하기 위해 R. Morrow의  $a, \eta$ 의 데이터<sup>8)</sup>를 이용하여 전계의 변화에 따른  $a-\eta$ 의 변화를 나타낸 것이다. 전계에 대응되는  $a$ 와  $\eta$ 값을 식에 대입하여 계산한 결과 그림과 같이 1차 전리계수와 부착계수가 같아지는 환산전계값  $E/N$ 은  $2.88 \times 10^{-19}$ 이다. 즉, 이 값보다 작은 값에서는 부착계수가 1차 전리계수보다 커지게 되어 방전이 더 이상 진행하지 않게 된다.

그림 5는 방전 초기 단계를 지나 전류밀도가 급증한 영역인  $t=2.6$  ns일때의 전자밀도, 음이온밀도, 양이온밀도 및 전계분포를 나타낸 것이다. 이 단계에서의 전류 급증은 방전 개시 후 초기 전자의 충돌전리에 의한 전자의 급증에 기인한다. 그림에서의 등밀도선의 간격은  $2 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 이며, 최외곽

선의 밀도는  $1 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 이다. 그림을 보면 전계가 집중한 침전극 주변에서 전자, 음이온 및 양이온이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이 시간까지는 전자의 밀도가 양이온의 밀도보다 크며, 전자의 중심이 전계가 큰 침전극에 머물러 있으므로 부착에 의해 소실되는 개수가 매우 작다.

그림 6은 전류밀도가 최대값을 갖는  $t=4.5$  ns일때의 특성분포이다. 그림에서의 최외곽 등밀도선은  $7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 이고 등밀도선 사이의 간격은  $2 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 이다. 그림 5와 비교하여 보면 음이온과 양이온에 비해 이동도가 큰 전자가 양극쪽으로 보다 멀리 이동하여 분포하고 있음을 알 수 있다. 따라서 침전극 주변의 전자밀도가 감소함을 알 수 있으며, 이동도가 매우 작은 양이온이 공간전하로서 작용하여 음극 침전극과 양이온극 사이는 전계가 강해져서 안정화되는 반면 양

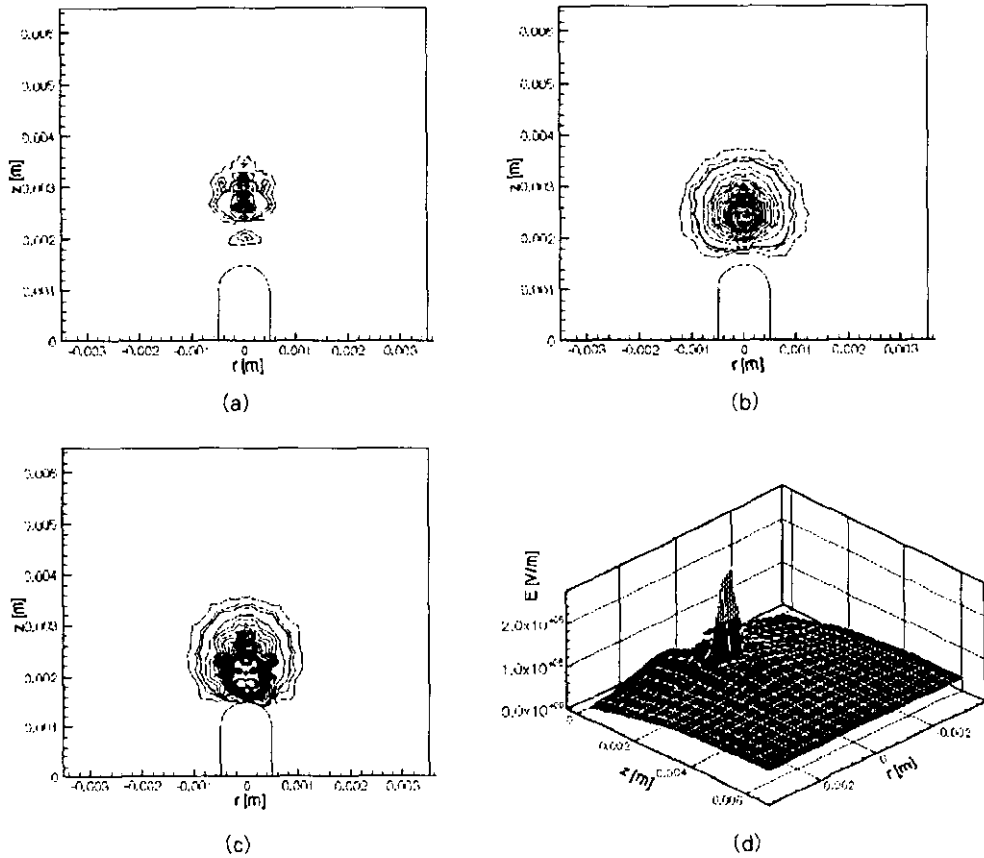


그림 7.  $t = 15.0 \text{ ns}$ 에서의 입자 분포  
 (a) 전자밀도분포 (b) 음이온밀도분포  
 Fig. 7. distribution at  $t = 15.0 \text{ ns}$   
 (a) electron density (b) negative ion density (c) positive ion density (d) electric field

이온군과 양극간은 전계가 약화되어 코로나가 신장하기 어렵게 됨을 확인할 수 있다.

또한 양극과 공간전하인 양이온군과의 전계 약화에 의해  $a - \eta$  계수가 감소하여 부착 작용이 보다 활발하게 진행됨으로써 음이온의 수는 증가하게 된다.

그림 7은 전류밀도가 최대인 점을 지나 소멸해 가는 영역인  $t = 15 \text{ ns}$ 일때의 특성분포를 나타낸 것이다. 그림에서의 최외곽 등밀도는  $8 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 이고, 등밀도선 사이의 간격은  $2 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$ 이다. 그림 6의 최대전류밀도인 시점과 비교해보면 전계가 상대적으로 약한 영역에서 부착효과에 의해 상당히 많은 전자가 소실되고, 침전극 주변을 보면 보다 많은 양이온 공간전하가 형성되어 코로나 방전이 급속도로 소멸되어 감을 알 수 있다.

최대 전계값을 갖는 침전극의 선단부에서의 전계값은  $t = 2.5 \text{ ns}$ ,  $t = 4.5 \text{ ns}$ ,  $t = 15 \text{ ns}$  일 때 각각  $1.5 \times 10^6 \text{ [V/m]}$ ,  $1.9 \times 10^6 \text{ [V/m]}$ ,  $5.9 \times 10^6 \text{ [V/m]}$ 로, 시간의 진전에 따른 공간전하 효과에 의해 음극 침전극과 공간전하 양이온간의 전계가 강화됨을 수치로서 확인할 수 있다.

이상과 같이 FEM과 FCT를 병용하여 얻어진 수치해석의 결과로부터  $\text{SF}_6$  가스는 부착 특성이 우수하여 빠른 시간내에 코로나 방전을 소멸시킬 수 있음을 알 수 있으며, 본 해석 모델과 같이 침이 음극인 부극성 코로나의 경우에는 시간의 진전에 따라 공간전하에 의한 효과가 점점 커지게 되어 양극 주변과 음극 주변의 전계 감소 및 강화로 인해 방전 특성이 크게 좌우됨을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서는 FCT 알고리즘을 적용한 유한요소 프로그램을 개발하여 물리적 특성 변화가 심한 SF<sub>6</sub> 가스의 부극성 코로나 방전 현상의 시간에 따른 진전과정을 규명하였다. 대표적인 불평등 전계 모델인 침대 평판 전극의 코로나 방전 시뮬레이션을 통해 SF<sub>6</sub> 가스는 부착특성이 우수하여 SF<sub>6</sub> 가스가 뛰어난 절연 능력을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 본 해석모델과 같은 부극성 코로나의 경우에는 시간이 경과하면 양이온군에 의한 공간전하 효과에 의해 음극과 양이온 사이는 전계가 강화되어 코로나가 안정화 되는 반면 양극과 음이온 사이는 전계가 약화되어 코로나의 진전이 억제됨을 알 수 있었다.

국부적인 코로나 방전 현상을 보다 정확히 해석하기 위해서는 넓은 범위의 전계에 대한 수송계수의 고려가 필요하며, 본 논문에서 제시한 기법을 적용하여 정극성 코로나와의 비교 연구도 수행되어야 할 것으로 생각된다.

## 참 고 문 헌

[1] 심재학, "코로나 및 유사스파크 방전 현상에 대한 시뮬레이션," 한양대학교 박사학위논문, 1999.  
 [2] 민웅기, 김형석, 이석현, 한송엽, "FEM-FCT 기법을 이용한 코로나 방전 시뮬레이션에 대한 연구," Trans. KIEE, Vol. 48C, No.3, Mar. 1999.  
 [3] R. Lohner, K. Morgan, J. Peraire and M. Vah-

dati, "Finite Element Flux-Corrected Transport(FEM-FCT) for the Euler and Navier-Stokes Equations," Int. J. for Numerical Methods in Fluids, Vol. 7, pp. 1093-1109, 1987.  
 [4] 林達鎬, 電氣系の有限要素法, 東明社, 1986.  
 [5] Zienkiewicz, The Finite Element Method, William Clowes & Sons, 3rd Edition, 1977.  
 [6] Matthew, N. O Sadiku, Numerical Technique in Electromagnetics, CRC Press, 1992.  
 [7] N. Sato, "Discharge Current Induced by the Motion of Charged Particles," J. Phys. D., Vol. 13, pp. L3-L5, 1980.  
 [8] R. Morrow, "A Survey of the Electron and Ion Transport Properties of SF<sub>6</sub>," IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 14, No.3, pp. 234-239, 1986.  
 [9] Janifen Liu, G. R. Govinda Raju, "Simulation of Corona Discharge Negative Corona in SF<sub>6</sub>," IEEE Trans. Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No.3, 1994.  
 [10] R. J. Van Brunt and D. Leep, "Characterization of Point-plane Corona Pulses in SF<sub>6</sub>," J. Appl. Phys., Vol. 52, pp. 6588-6600, 1981.  
 [11] S. K. Dhali, "Two dimensional studies of streamers in gases," J. Appl. Phys., Vol. 62, pp. 4696-4707, 1987.  
 [12] 田春生, 放電高電壓工學, 東明社, 1998.