

축자계형 진공인터럽터의 전자계 현상 해석

Analysis of the Electromagnetic Phenomena in Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field Type

하성철*, 서상현

(Sung Chul Ha* and Sang Hyun Seo)

Abstract

The purpose of this paper is analyses about in 12kV/50kA vacuum interrupter with an axial magnetic field type electrode system through the studies of electromagnetic phenomena. Vacuum interrupter is important in electric safety part. In this paper, we performed analysis of electric field, magnetic field, current density in AMF electrode using the Maxwell 3D simulation. The current distribution and magnetic field in simple models are analyzed to verify its efficiency and accuracy. In addition the validity of FEM is confirmed by performing the analyses of distribution in current density and magnetic flux density.

Key Words : VI, VCB, RMF, AMF, FEM

1. 서론

현재 국가산업발달에 따른 전력수요의 급증에 따라 전력 설비의 대용량화 및 신기술 개발의 필요성이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 그 중에서도 진공차단기는 신속한 차단능력으로 전기안전확보 및 고신뢰성 때문에 많은 산업기기에 사용이 되고 있다. 진공차단기의 가장 핵심적인 부분은 바로 VI(진공인터럽터)로서 많은 연구가 국내 기업체에서도 이루어지고 있는 실정이다. 특히 VI의 핵심 기술인 전극설계기술과 접점분석에 대한 기술력의 확보는 필수적이라고 할 수 있다. VI는 아크를 소호하는 방식에 따라서 RMF(횡자계방식)과 AMF(축자계방식)으로 분류할 수 있는데, 축자계 방식은 전류차단시의 발생하는 아크에너지를 접점표면으로 넓고 균등하게 분포시켜 소호하여 전극의 용

융을 방지하는 방식으로 횡자계 방식에 비해 차단 성능이 우수하여 40 kA 이상의 대전류 차단용으로 사용이 되고 있다. 하지만 축자계 방식은 전극 구조가 복잡하여 열이 많이 발생한다는 단점이 있다. 그래서 열역학적인 분야의 연구 또한 상당히 필요한 실정이다. 따라서 외국 제품과 같은 전기적 안전 성능을 가진 VI를 개발하기 위해서는 더욱 더 많은 연구와 실험 및 지원이 필요하다. 본 연구에서는 이 축자계형 VI의 전자계해석을 맥스웰 3D시뮬레이션으로 분석하려고 한다[1].

2. VI특성과 이론

2.1 VI특성

진공차단기는 우수한 차단 특성과 밀폐된 진공용기 안에서 소호과정이 이루어져 보수유지가 거의 필요하지 않고 접점수명이 매우 길고 우수한 절연 강도 및 고 신뢰성과 긴 수명을 가지고 있다. 또한 다른 차단기에 비해 아크시간도 최소이며 아크에너지 또한 적어 접점소모가 심하지 않는 특징이 있다. 그 기본 구조는 다음의 그림 1에 나타내었다. VI는

* : 동국대학교 전기공학과
(서울시 중구 필동 3-27)
Fax: 02-2260-3348

Corresponding Author : scha@dongguk.dgu

2003년 3월 4일 접수, 2003년 4월 7일 1차 심사완료,
2003년 4월 18일 2차 심사완료, 2003년 4월 30일 최종 심사완료

그 구조가 가동접점, 고정접점, 로드, 아크실드, 코일형태 전극, 벨로우즈로 구성되어 있다.

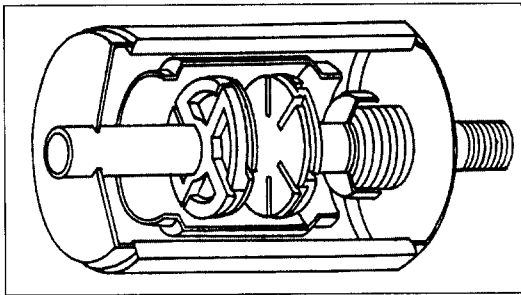


그림 1. 진공인터럽터의 기본구조.
Fig. 1. Basic construction of VI.

1961년 GE사가 15kV, 차단전류 12 kA 차단기를 제품화하는 것에 성공하였다. 그 후 차단용량을 증대시키는 연구를 하여 20 kA를 차단할 수 있게 되었지만 아무리 전극 지름을 크게 하여도 63~100 kA를 차단하는 것은 어려운 점이 발생하여 새롭게 축자계형태의 방법이 고안되었다. 즉 접점과 같은 방향으로 자계를 가하면 아크 에너지가 외부 방향으로 확산됨을 방지하여 아크 에너지와 아크 전압이 낮아지게 하는 방식이 도입되었다[2,3].

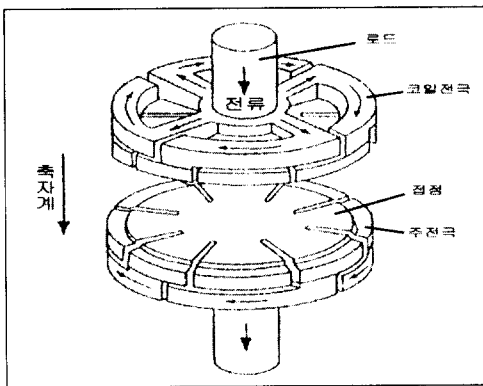


그림 2. 축자계 전극.
Fig. 2. Axial magnetic field electrodes.

VI에서 핵심이 되는 전극부분의 구성은 접점, 주전극, 코일전극, 그리고 로드로 구성되었고 그림에서 전류가 코일전극을 따라 돌면서 축방향 자계가

생성되어 아크 에너지를 효과적으로 제어하는 것을 알 수 있다.

2.2 이론

맥스웰 3D 전자계 해석의 기초가 되는 맥스웰방정식의 기본 식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

또한 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ 은 맥스웰 방정식에 포함되어 있는 양들을 연관지어 주는 보조 식들이다.

맥스웰 방정식으로부터 전계해석은 식(2.3)을 이용하여 맥스웰 3D시뮬레이션에서 계산하였다. 여기서, D는 전속밀도이며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.5)$$

식(2.5)을 식 (2.3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}) = \rho \quad (2.6)$$

여기서 $\vec{E} = -\nabla \psi$ 를 식 (2.6)에 대입하면 식(2.7)과 같이 된다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \psi) = -\rho \quad (2.7)$$

여기서 ψ 는 전기스칼라포텐셜[V]이고 ϵ_r 은 비유전율, ϵ_0 은 진공중의 유전율[F/m], μ 는 투자율[H/m], σ 는 도전율[s/m]이다.

정자계해석에서는 자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 도입한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2.8)$$

정자계문제에서는, 식(2.72)의 $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 를 제외한 다음 식을 취한다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.9)$$

또한 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ 이므로 이 식에다 식 (2.8)을 대입하면 $\vec{H} = \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A}$ 가 된다. 즉 정자계의 기초방정식은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (2.10)$$

하지만 시변시의 자계와 자속밀도의 계산은 시간미분항이 들어가기 때문에 맥스웰의 기초방정식 중에서 시간에 따른 변위전류를 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) &= \vec{J}_0 + \vec{J}_e \\ &= \vec{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\vec{J}_e = -\sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (2.12)$$

여기서 \vec{J}_0 는 강제전류밀도[A/m²], \vec{J}_e 는 와전류밀도[A/m²]이다.

3. 전자계해석 시뮬레이션 방법

진공인터럽터의 차단 성능에 결정적인 영향을 미치는 대전류 아크모드를 효과적으로 제어할 수 있는 유일한 방법은 축자계를 이용하는 것이다. 진공아크에 평행한 자계를 인가하는 축자계 방식은 아크전압을 감소시켜 양극으로 입력되는 아크에너지를 최소화시킨 방법으로 보통 30 V 전, 후의 적은 전압이다. 본 연구에서 시뮬레이션 한 모델은 정격전압 12 kV이고 접점은 직경이 80 mm, 전극은 100 mm, 두께는 4 mm이고 전극간 갭은 10 mm로 설정하였다. 입력전류는 60 Hz, 50 kA로 하였다. 그림 3은 접점간의 간격이 10 mm인 진공차단기 접점의 모델링으로 아크주의 지름은 4mm이다. 그리고 접점의 성분은 현재 진공차단기에서 많이 사용이 되는 CuCr을 사용하였고 Cr이 25%로 함유된 것으로 결정하였다.

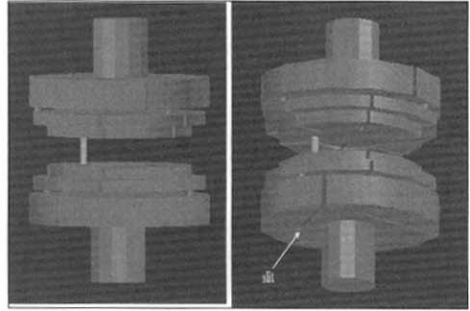


그림 3. 전극의 3D 렌더링 모습.
Fig. 3. 3D Rendering of electrode.

그림 4는 32776개의 사각 매쉬를 한 접점의 모습으로 주로 슬릿부근과 아크주 부근에서 더 많은 매쉬가 이루어 졌다. 매쉬가 많을수록 해석결과는 자세히 나오지만 계산속도가 매우 느려지므로 매쉬량을 적절히 선택하여 계산하여야 한다.

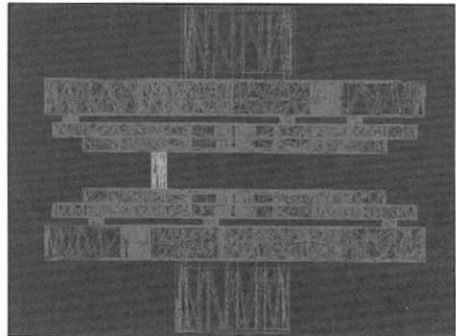


그림 4. VI전극의 매쉬수.
Fig. 4. Mesh of VI electrode.

다음 표 1은 각 전극부의 재질과 도전율을 나타낸 것으로 전극부와 접점은 CuCr(Cr25%)로 구성되었고 아크는 도전율이 균일한 원통으로 가정하여 해석하였다. 아크주의 재질은 도전율이 상당히 적은 값인 2.8E3 s/m로 설정하였는데 이는 일반적으로 진공아크를 구성하고 있는 플라즈마의 도전율이 전극부 및 접점의 도전율에 비해 매우 낮기 때문에 실제 해석결과에 미치는 영향은 적다고 할 수 있다.

표 1. 전극 구성 성분.

Table 1. The element of electrode composition.

전극부	재료	도전율(s/m)	투자율
전극부, 접점	CuCr(Cr25%)	2.2E7	1
아크부	Arc Plasma	2.8E3	1

4. 시뮬레이션 결과

그림 5는 접점간 간격이 10 mm인 전극의 전계 해석을 앞쪽에서 본 모습으로 전극의 표면에 나타난 전계만을 나타내었다. 상부전극에서 전극봉 부분의 전계는 1.9E4 V/m이고 코일 전극을 통해 접점으로 갈수록 전계의 분포가 더욱 더 증가함을 확인 할 수 있었다. 접점부분의 전계는 1.2646E6 V/m으로 높은 전계가 접점의 표면에 골고루 분포하였다. 하지만 슬릿부분 주위에서는 전계의 분포값이 6E5 V/m으로 적게 나타났다.

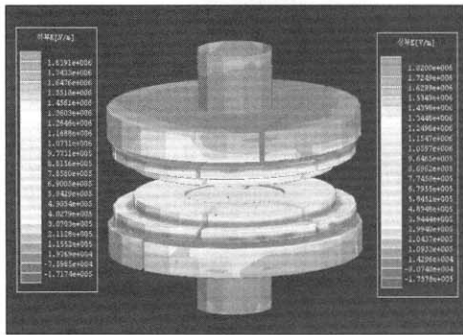


그림 5. 전계 해석.
Fig. 5. Analysis of electric field.

그림 6은 하부접점만을 평면도상으로 본 것으로 접점이 접촉하는 부분에 많은 전계가 집중되었고 그 값은 1.3E6 V/m이었다. 아크를 가두는 효과를 내는 중앙의 홀 부분에는 이보다 적은 값인 1E6 V/m정도의 전계가 나타났다. 하지만 와전류 감소를 위해 생성한 슬릿부의 전계는 6E5 V/m으로 접점의 접촉면보다 전계가 적게 나타나는 현상이 있음을 확인하였다.

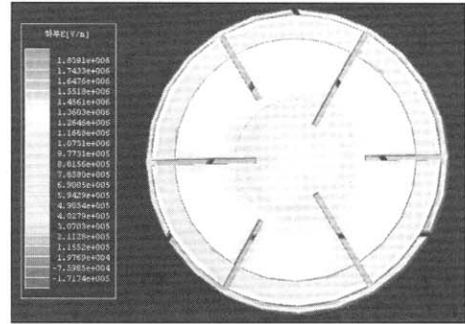


그림 6. 평면에서의 전계 해석.
Fig. 6. Analysis of electric field at plane.

그림 7은 간격 10 mm일 때의 전계분포를 수평면에서 본 것으로 접점과 전극의 좌측모서리 부분 쪽으로 국부적인 전계분포가 발생하였다. 전계는 특성상 평평한 부분보다 모서리 쪽으로 주로 집중이 되는데 이는 열전달이 모서리 쪽에서는 잘 되지 않기 때문이다. 그림 7에서도 이러한 전계집중 현상이 나타났고 또한 접점의 접촉부분에도 높은 전계가 나타났다.

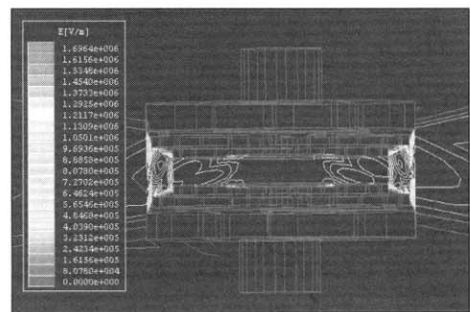


그림 7. 공간부에서의 전계 해석.
Fig. 7. Analysis of electric field at space.

축자계형 전극에 대전류가 인가되면 접점 내에 와전류가 생긴다. 이는 축자계의 자속밀도를 감소시키고 잔류자계를 생성시킨다. 때문에 접점의 두께와 슬릿 설계가 상당히 중요하다. 접점의 두께를 크게 하면 보통은 차단능력이 커진다고 생각하겠지만 오히려 표피두께의 증가로 축자계를 약화시켜 아크 확산을 막지 못하여 접점의 용융으로 차단실패에 이른다[5,6]. 그림 8은 자계 해석을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 디스크형 전극상의 슬릿 부근에서 비교적 높은

자속밀도 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 전극의 연결부에서의 자계값은 1.2E6 A/m으로 높게 나타났다.

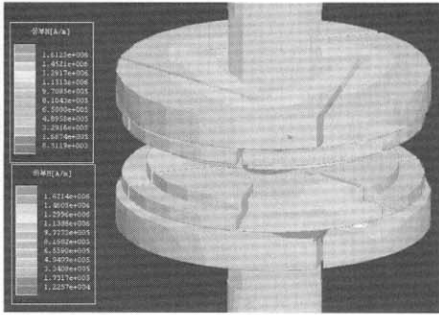


그림 8. 자계 해석.
Fig. 8. Analysis of Magnetic field.

그림 9는 자계의 세기를 벡터도를 이용해서 나타낸 것으로 로드부쪽은 횡자계가 나타났지만 코일 전극을 통해서 주전극, 그리고 접점 쪽으로 축자계가 나타났다. 특히 상부접점과 하부접점사이의 축자계가 생성이 됨을 확인함으로써 본 전극이 강한 축자계를 형성하여 아크 플라즈마를 전극 표면에 고르게 퍼지게 하여 소호 시킨다는 예상을 할 수 있다. 하지만 접점 중앙 쪽으로는 강한 축자계가 생성이 되었지만 접점의 외부로 가면 횡자계도 조금 나타났는데 이는 복잡한 전류경로에 의해 전류의 방향이 수직인 부분이 있기 때문이다. 즉 전류분포의 영향으로 횡자계도 조금은 생성이 된다. 아크가 발생하면 그 반경이 상당히 크게 발생하는데 축자계에 의해 더 이상 아크가 국부적인 집중이 되지 않고 아크 에너지가 소호 되는 형태이다. 횡자계는 아크가 옆쪽으로 힘을 받아 아크에너지의 집중화가 되어 전극이 쉽게 용융된다.

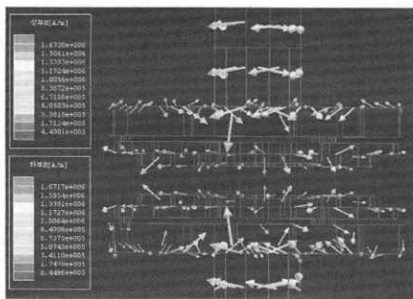


그림 9. 자계 벡터도.
Fig. 9. Vector of magnetic field.

그림 10은 접점의 하부 쪽에서 자속밀도 분포를 본 것으로 전류의 통과 경로인 접착부 쪽으로 큰 자계가 생성이 되어 있다. 이 값은 접점의 표면 쪽으로 올라오면 감소한다. 축자계가 형성되는 코일 전극의 접착부의 자속밀도는 0.6 T의 자계가 형성되지만 주전극과 접점으로 오면 그 값이 0.2 T로 떨어진다. 축자계는 접점의 중앙부와 전극의 바깥부분쪽에서는 적은 값을 나타내고 있는데 아크가 중앙부분과 접점의 바깥라인부분에서 발생하지 않도록 설계를 해야 할 것이다.

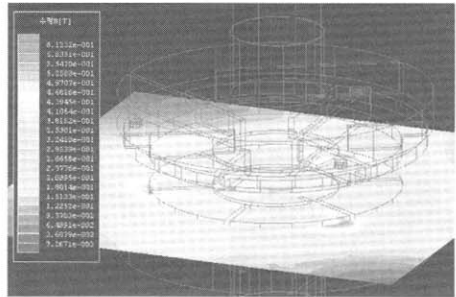


그림 10. 수평면으로 자른 자속밀도.
Fig. 10. Magnetic flux density in cut of horizontal plane.

그림 11은 전류밀도의 분포를 나타낸 것으로 코일전극과 주전극을 연결하는 부분에 전류밀도가 주로 집중이 되었고 그 값은 3.2E8[A/m²]이다. 전류밀도가 수평방향으로 진행되면서 많은 집중화현상이 나타났고 이로 인해 축자계의 증가가 이루어짐을 확인하였다.

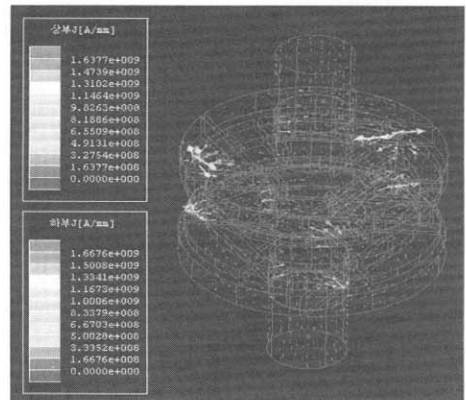


그림 11. 전류밀도 분포.
Fig. 11. Distribution of current density.

그림 12는 상부전극부분을 평면으로 자른 다음 전극과 접점 연결부를 시작으로 전극 끝까지의 자속밀도를 2차원으로 나타낸 그래프이다. 전극연결부분의 자속밀도값은 약 0.55 T정도이고 전극 중심부분의 자속밀도값은 0.18 T로 나타났다. 접점의 크기는 80 mm이므로 접점의 접촉면 부근은 대체로 강한 축자계가 형성되고 전극의 중심과 전극의 바깥부분쪽은 자속밀도가 낮다. 주전극부분에서 나타난 축자계의 값은 0.1 T에서부터 0.55 T의 값으로 나타났다.

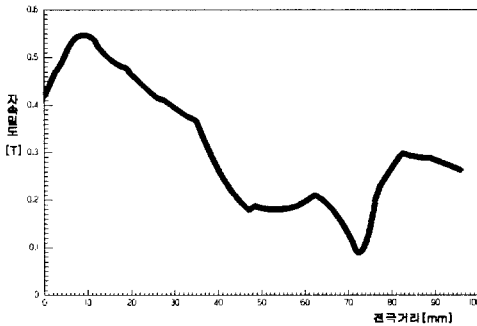


그림 12. 전극에서의 자속밀도.
Fig. 12. Magnetic density of electrode.

5. 결론

고압 진공차단기의 전기안전확보에 가장 핵심이 되는 진공인터럽터를 정격전압 12 kV, 입력전류는 50 kA, 접점직경이 80 mm, 전극이 100 mm, 두께는 4 mm, 접점간 갭은 10 mm로 설계하여 맥스웰 3D 전자계 시뮬레이션에 의해 전계, 자계, 전류밀도를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전계분포는 접점 접촉부에서는 균등하게 나타났지만 와전류 감소를 위해 생성한 슬릿 주위의 전계는 6E5 V/m로 접점의 접촉면보다 적게 나타났다.
2. 상부접점과 하부접점사이의 축자계가 생성이 됨을 확인함으로써 본 전극이 강한 축자계를 형성하여 아크 플라즈마를 전극 표면에 고르게 퍼지게 하여 소호시킨다고 예상된다.
3. 전류밀도의 분포는 대체적으로 슬릿부근에서 집중되는 현상을 확인하였다. 이로 인해 슬릿부근에서 강한 축자계가 발생이 되었다.
4. 전극의 연결부분과 접점의 접촉면 부근은 대체로 강한 축자계가 형성되었지만 전극의 중심부

분쪽은 자속밀도가 낮으므로 전극설계시 전극중심에서 아크가 발생하지 않게 하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 동국대학교 논문게재연구비 지원으로 이루어졌음.

참고 문헌

- [1] K. Watanabe, E. Kaneko, and S. Yanabu, "Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 25, No. 4, p. 609, 1997.
- [2] S. Yanabu, E. Kaneko, H. Koike, T. Tsutsumi, and T. Tamagawa, "The application of axial magnetic field electrodes to vacuum circuit breakers", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
- [3] S. Ito, Y. Takato, Y. Kawase, and T. Ota, "Numerical analysis of electromagnetic forces in low voltage AC circuit breakers using 3-D finite element method taking into account eddy currents," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, p. 2597, 1998.
- [4] 임달호, "電氣系の有限要素法", 東明社.
- [5] E. Dullni, B. Gellert, and E. Schade, "Measurement of particle and vapor density after high-current vacuum arcs by laser techniques", IEEE Trans. Plasma Science, Vol. PS-15, p. 545, 1987.
- [6] E. Dullni, B. Gellert, and E. Schade, "Dielectric recovery of vacuum arcs after strong anode spot activity," IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. PS-15, p. 538, 1987.
- [7] 하덕용, 강형부, 최승길, 최경호, "종자계형 진공 인터럽터에서 접점전극 슬릿의 영향에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 9호, p. 822, 2002.
- [8] 하성철, 전병훈, 백승권, "몬테 칼로법을 이용한 Ar기체의 전자수송계수에 관한 연구", 한국전기전자재료학회지, 8권, 6호, p. 685, 1995.
- [9] 하덕용, 강형부, "3 차원 유한요소해석을 이용한 종자계형 진공 인터럽터의 특성고찰", 전기전자재료학회논문지, 15권, 5호, p. 460, 2002.