

## 안전차단을 위한 축자계형 진공인터럽터의 전자계 현상 해석

- Analysis of the electromagnetic phenomena in vacuum  
interrupter with axial magnetic field type for Safety break -

서 상 현 \*

Seo Sang Hyun

### 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 for the possess of Safety break. 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.

**Key words(중요용어) :** VI(진공인터럽터), AMF(축자계방식), 유한요소법(FEM)

### 1. 서 론

진공차단기는 신속한 차단능력으로 전기안전확보 및 고신뢰성 때문에 많은 산업기기에 사용이 되므로 그 중에서도 가장 중요한 접점부분인 진공인터럽터에 대한 전자계 해석을 통해 차단 능력의 향상과 새로운 고성능, 안전화, 소형화 제품을 만들 수 있다. 진공차단기는 최초로 1926년 미국 캘리포니아 공과대학에서 40(kV), 900(A)의 제품을 연구하여 발표하였으나 당시의 진공기술은 극히 낮아 제품화는 실패하였다. 그 후 1961년 GE사가 정격전압 15(kV), 차단전류 12(kA) 차단기를 제품화 하는 것에 성공하였다.<sup>1,2)</sup> 하지만 아무리 전극 지름을 크게 하여도 40~100(kA)를 차단하는 것은 어렵다는 문제점이 발생하여 1975년에 GE사에서 기존의 횡자계 방식에서 새롭게 축자계형태의 방법이 고안되었다.

즉 접점과 같은 방향으로 자계를 가하면 아크 에너지가 외부방향으로 확산됨을 방지하여 아크 에너지와 아크전압이 낮아지게 하는 축자계 방식이 도입되었다.

\* 동국대학교 전기공학과

이 축자계의 방법으로 기존의 횡자계보다 높은 차단능력의 전극들이 설계되기 시작했다. 1995년에는 일본 도시바에서 축자계를 이용하여 100(kA)의 대전류를 차단하는 실험에 성공하였고 현재는 더 높은 전류의 차단기술이 연구되고 있다. 현재 차단기의 전자계 해석은 대체적으로 분석이 미진한 상태이고 특히 안전 차단을 위한 VI의 핵심 기술인 전극설계기술과 접점분석에 대한 기술력의 확보는 필수적이라고 할 수 있다. VI는 현재 축자계방식을 주로 사용하고 있는데, 축자계 방식은 전류차단시의 발생하는 아크에너지를 접점표면으로 넓고 균등하게 분포시켜 소호하여 전극의 용융을 방지하는 방식으로 차단능력이 우수하여 대전류 차단용으로 사용이 되고 있다. 즉 접점과 같은 방향으로 자계를 가하면 아크 에너지가 외부방향으로 확산됨을 방지하여 아크 에너지와 아크전압이 낮아지게 하는 것이다. 하지만 축자계 방식은 전극구조가 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 먼저 전극샘플을 설계, 제작하고 축자계형 진공인터럽터의 특성을 분석하기 위한 기본적인 전자계 해석과 그 설계의 유효함을 확인하기 위해 맥스웰 3차원 시뮬레이션으로 축자계 분포를 확인한다. 또한 설계된 전극을 실험장치에 장착하여 자속밀도, 전류 및 아크전압을 측정하므로써 축자계 진공 인터럽터의 특성을 해석한다.

## 2. 기본 이론

### 2.1 VI구조

진공차단기는 우수한 차단 특성과 밀폐된 진공용기 안에서 소호과정이 이루어져 보수 유지가 거의 필요하지 않고 접점수명이 매우 길고 우수한 절연강도 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 그 구조가 가동접점, 고정접점, 로드, 아크실드, 코일형태 전극, 벨로우즈로 구성되는 VI에서 핵심이 되는 전극부분의 구성은 접점, 주전극, 코일전극, 그리고 로드로 구성되었고 그림 2에서 전류가 코일전극을 따라 돌면서 축방향 자계가 생성되어 아크 에너지를 효과적으로 제어하는 것을 알 수 있다.

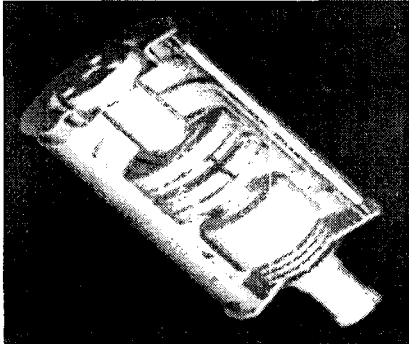


그림 1. 진공인터럽터의 기본구조  
Fig 1. Basic construction of VI

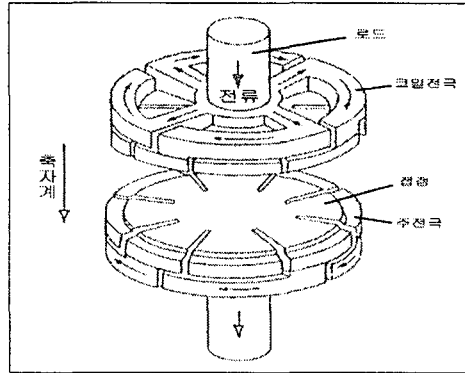


그림 2. 축자계 전극  
Fig 2. Axial magnetic field electrodes

## 2.2 유한요소법과 맥스웰방정식

유한요소법은 1930년대에 개발된 매트릭스 이론을 사용하여 1960년대에 영국과 미국에서 개발되었으며 이론화 및 상용화가 된 것은 컴퓨터의 발전이 이루어진 1970년대 이후이다. 이러한 유한요소법은 공학과 물리학에서 많이 사용되었으며 컴퓨터 하드웨어의 발전과 더불어 급속히 발전하였다. 유한요소법은 초기에는 복잡한 구조물의 응력 해석을 위해 개발되었으나, 그 후 발전을 거듭하여 연속체 역학 분야 등 광범위한 분야에서 사용되고 있다. 구조물에 대해 요소의 공통되는 점, 선 및 면 등에서 여러 가지 경계조건을 사용하여 수식을 만들고, 이를 이용해 구조물 전체에 대한 연립 대수 방정식을 만들어 해를 구한다. 공통되는 점이나, 선, 면이 많아질수록 연립방정식이 커지게 되어 해를 구하는데 많은 계산이 필요하게 되었고, 이러한 특징으로 인하여 유한요소법은 컴퓨터의 발전속도와 비례하여 발전하였다. 일반적으로 유한요소법의 장점은 기하학적 형상, 하중 및 경계조건 등에 제한이 없고 여러 가지 복합재료로 이루어진 연속체에도 적용이 가능하다. 또한 물성치 및 거동의 비선형도 적용이 가능하고 응력 해석, 진동, 열, 유동해석 등 공학의 모든 분야에서 활용이 가능하다. 하지만 결과의 신뢰성 평가는 경험이 필요하고 국부 응력 해석 시에는 일반적으로 모델링이 어렵다. 그리고 대형구조물인 경우 높은 컴퓨터의 성능이 필요하다. 실제구조물을 유한요소법을 이용하여 해석하기 위해서는 이상구조물로 치환하여야 하는데 이 과정에서 해석하는 사람의 엔지니어링에 대한 전반적인 지식과 경험이 필요하다. 간단한 형상을 가지는 구조물의 경우 사용자가 직접 절점과 요소를 정해주면 되지만 대개의 해석하고자 하는 구조물은 매우 복잡한 형상을 가지게 된다. 이러한 복잡한 구조물은 직접 절점과 요소를 찾는 것 보다 선, 면, 입방체로 이루어진 기하학적 모델을 먼저 구현한 후에 절점과 요소를 생성시키는 식으로 모델링하고 유한요소해석을 위한 요소와 절점 생성이

끝나면 요소의 물성치, 구속조건, 하중조건과 같은 해석조건을 입력한다. 위의 과정을 거쳐 완성된 유한요소 모델은 수치해석과정을 통해 해석이 수행되며 해석 결과를 후 처리과정을 통해 구조물의 변위, 응력 및 안정성 등을 평가한다.

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

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.1}$$

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2.4}$$

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.

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \tag{2.5}$$

식(2.5)을 식 (2.3)에 대입하면 다음과 같다.

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

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

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \phi) = -\rho \tag{2.7}$$

여기서  $\phi$ 는 전기스칼라포텐셜[V]이고  $\epsilon_r$ 은 비유전율,  $\epsilon_0$ 은 진공중의 유전율[F/m],  $\mu$ 는 투자율[H/m],  $\sigma$ 는 도전율[s/m]이다.

정자계해석에서는 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$ 를 도입한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{2.8}$$

정자계문제에서는, 식(2.2)의  $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 를 제외한 다음 식을 취한다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{2.9}$$

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.

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

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

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

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

여기서  $\vec{J}_0$ 는 강제전류밀도[A/m<sup>2</sup>],  $\vec{J}_e$ 는 와전류밀도[A/m<sup>2</sup>]이다.

### 3. 전자계해석 시뮬레이션 방법

본 연구에서 시뮬레이션한 모델은 정격전압 12kV이고 접점은 직경이 80mm, 전극은 100mm, 두께는 4mm이고 전극간 갭을 2mm로 설정하였다. 이는 차단 신호시 접점이 초기 개극과 더불어 발생하는 아크의 형성이 시작된다고 가정하였다. 입력전류는 60Hz, 50kA로 하였다. 그림 3은 접점간의 간격이 2mm인 진공차단기 접점의 모델링으로 아크주의 지름은 2mm이다. 그리고 접점의 성분은 현재 진공차단기에서 많이 사용이 되는 CuCr을 사용하였고 Cr이 25%로 함유된 것으로 결정하였다. 유한요소 해석을 위한 매쉬의 값은 25000개의 사각매쉬이고 주로 슬릿부근과 아크주 부근에서 더 많은 매쉬가 이루어 졌다. 매쉬가 많을수록 해석결과는 자세히 나오지만 계산속도가 매우 느려지므로 매쉬량을 적절히 선택하여 계산하여야 한다. 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/m]로 설정하였는데 이는 일반적으로 진공아크를 구성하고 있는 플라즈마의 도전율이 전극봉 및 접점의 도전율에 비해 매우 낮기 때문에 실제 해석 결과에 미치는 영향은 적다고 할 수 있다.

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

표1. 전극 구성 성분

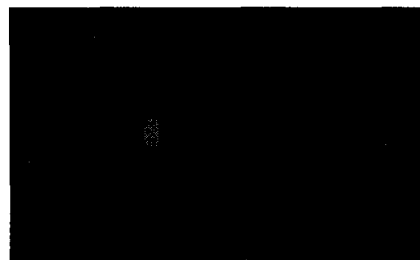


그림 3 VI전극의 매쉬수

Fig. 3 Mesh of vi electrode

### 4. 시뮬레이션 결과

그림 4는 접점간 간격이 2mm인 전극의 전계 해석을 앞쪽에서 본 모습으로 전극의 표면에 나타난 전계만을 나타내었다. 상부전극에서 코일 전극을 통해 접점으로 갈수록 전계의 분포가 더욱 더 증가함을 확인 할 수 있었다. 특히나 아크쪽에서는 많은 전계

의 집중으로 이로 인해 접점의 국부적인 용융현상이 발생하는 것을 확인하였다. 전극 전체의 전계는 접점의 표면에 골고루 분포하였다. 하지만 중앙의 슬릿부분 주위에서는 전계의 분포 값이 적게 나타났다.

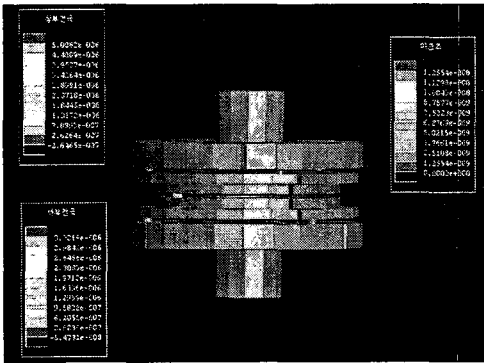


그림 4 전계해석  
Fig. 4 Analysis of electric field

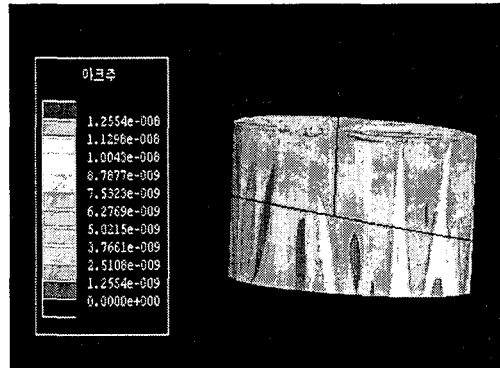


그림 5 아크주에서의 전계해석  
Fig 5 Analysis of electric field at Arc

그림 5는 아크주에서의 전계값으로 많은 전계가 집중되었고 와전류 감소를 위해 생성한 슬릿부의 전계는 접점의 접촉면보다 전계가 적게 나타나는 현상이 있음을 확인하였다. 전계는 특성상 평평한 부분보다 모서리 쪽으로 주로 집중이 되는데 이는 열전달이 모서리 쪽에서는 잘 되지 않기 때문이다.

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.

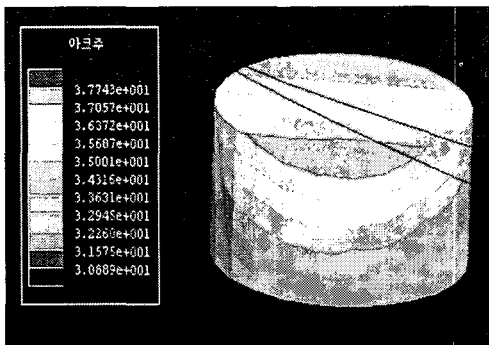


그림 6. 자계해석  
Fig. 6. Analysis of Magnetic field

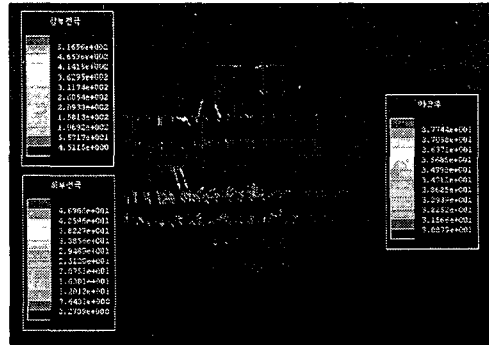


그림 7. 자계 벡터도  
Fig. 7. Vector of magnetic field

그림 6은 자계해석을 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 디스크형 전극상

의 슬릿 부근에서 비교적 높은 자속밀도 영역이 존재하는 것을 알 수 있다. 특히 아크주의 연결부에서의 자계값은  $3.7E1[A/m]$ 으로 높게 나타났다.

그림 7은 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 발생되는데 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.

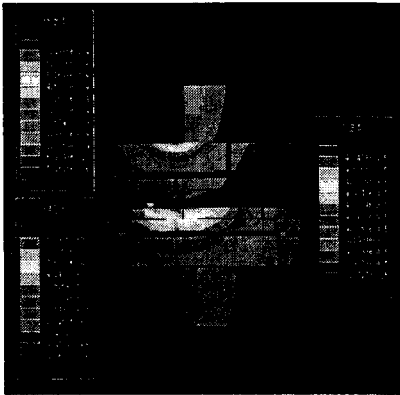


그림 8. 자속밀도 전체그림

Fig 8. Layout of Magnetic flux density

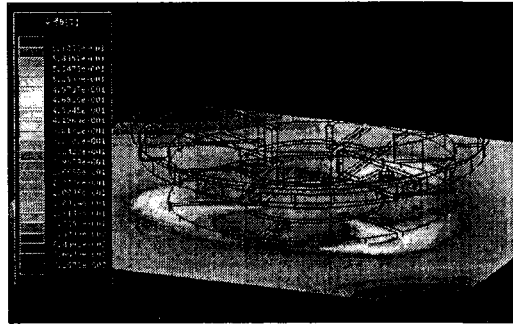


그림 9. 수평면으로 자른 자속밀도

Fig. 9. Magnetic flux density in cut of horizontal plane

그림 8은 접점의 자속밀도 전체 그림을 나타낸 것으로 전류의 통과 경로인 접촉부 쪽으로 큰 자계가 생성이 되어 있다. 이 값은 접점의 표면쪽으로 올라오면 감소한다. 축자계가 형성되는 코일전극의 접촉부의 자속밀도는  $3.6E2[T]$ 의 자계가 형성되지만 주전극과 접점으로 오면 그 값이  $5E1[T]$ 로 떨어진다. 축자계는 접점의 중앙부와 전극의 바깥부분쪽에서는 적은 값을 나타내고 있는데 아크가 중앙부분과 접점의 바깥부분에서 발생하지 않도록 설계를 해야 할 것이다.

그림 10은 전류밀도의 분포를 나타낸 것으로 코일전극과 주전극을 연결하는 부분에 전류밀도가 주로 집중이 되었고 그 값은  $3.2E8[A/m^2]$ 이다. 전류밀도가 수평방향으로 진행되면서 많은 집중화현상이 나타났고 이로 인해 축자계의 증가가 이루어짐을 확인하였다.

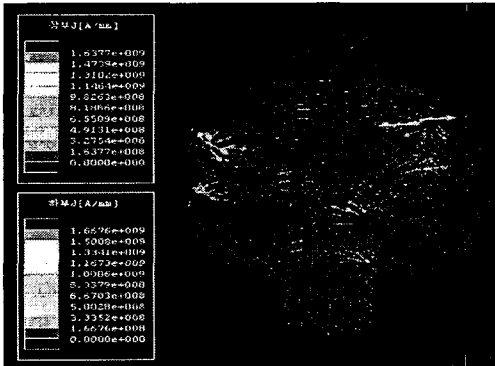


그림 10. 전류밀도 분포  
Fig. 10. Distribution of current density

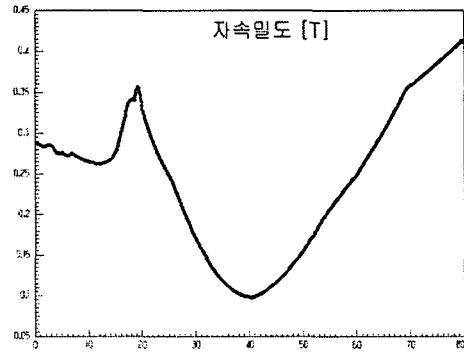


그림 11. 전극에서의 자속밀도  
Fig 11. Magnetic density of electrode

그림 11은 상부전극부분을 평면으로 자른 다음 전극과 접점 연결부를 시작으로 전극 끝까지의 자속밀도를 2차원으로 나타낸 그래프이다. 전극연결부분의 자속밀도값은 약 0.28[T]정도이고 전극 중심부분의 자속밀도값은 0.1[T]로 나타났다. 접점의 크기는 80mm이므로 접점의 접촉면 부근은 대체로 강한 축자계가 형성되고 전극의 중심쪽은 자속밀도가 낮다. 주 전극부분에서 나타난 축자계의 값은 0.1[T]에서부터 0.45[T]의 값으로 나타났다.

## 5. 결론

전기안전확보에 가장 핵심이 되는 진공차단기내의 진공인터럽터를 정격전압 12kV, 입력전류는 50kA, 접점직경이 80mm, 전극이 100mm, 두께는 4mm, 접점간 갭은 2mm, 아크주는 지름이 2mm로 설계하여 맥스웰 3D 전자계 시뮬레이션에 의해 전계, 자계, 전류밀도를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 접점 전체에서의 전계 분포는 균등하게 나타났지만 아크쪽에서의 국부적인 전계집중화로 인해 전극용융이 발생할 가능성이 있다.
2. 상부접점과 하부접점사이의 축자계가 생성됨을 확인함으로써 본 전극이 강한 축자계를 형성하여 아크 플라즈마를 전극 표면에 고르게 퍼지게 하여 소호시킨다고 예상된다. 전류밀도의 분포는 대체적으로 슬롯부근에서 집중되는 현상을 확인하였다. 이로 인해 슬롯부근에서 강한 축자계가 발생이 되었다.
3. 전극의 연결부분과 접점의 접촉면 부근은 대체로 강한 축자계가 형성되었지만 전극의 중심부분쪽은 자속밀도가 낮으므로 전극설계시 전극중심에서 아크가 발생하지 않게 하여야만 안전 차단이 성공된다고 사료된다.



## 6. 참고문헌

- [1] Kenji Watanabe, Eiji Kaneko, and Satoru Yanabu, Fellow, IEEE, "Technological Progress of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters", IEEE Trans. on Plasma Science, vol.25 No.4, pp609~616, August 1997.
- [2] S. Yanabu, E. Kaneko, H. Koike, T. Tsutsumi, 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, 2597~2600, 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, 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, 538, 1987 3248~3251, 1994.
- [7] 하덕용, 강형부, 최승길, 최경호 "종자계형 진공 인터럽터에서 접점전극 슬릿의 영향에 관한 연구", 한국전기전자재료학회논문지, 15권 9호 822~814, 2002.
- [8] 하덕용, 강형부, "3 차원 유한요소해석을 이용한 종자계형 진공 인터럽터의 특성고찰" 전기전자재료학회논문지, 15권, 5호, 460~452, 2002.

## 저 자 소 개

서 상 현 : 동국대학교 대학원 석사, 동국대학교 대학원 박사 학위 취득  
관심 분야 전기 안전, 안전경영 시스템, 소방 안전