

중자계방식 진공인터럽터 개발에 관한 연구

김성일\*, 박홍태, 안희일, 서정민  
LG산전 전력연구소

A Study on the Development of Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field type

Sung-Il Kim\*, Hong-Tae Park, Hee-Il Ahn, Jung-Min Seo  
Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems Co.Ltd.

**Abstract** - In this paper, described that study on the distribution and characteristics of axial magnetic field by mathematical analysis and experiment for axial magnetic field type vacuum interrupter that important part on vacuum circuit breaker. And, it was shown that inspected results of arc shape at breaking the current by typical axial magnetic field type model and new axial magnetic field type model.

여기서,  $H(x,y,z)$ 는 공간의 각 점에서 크기와 방향을 갖는 벡터량,  $\omega$ 는 주파수이며  $\theta(x,y,z)$ 는  $\omega t = 0$ 에서 최대값을 가지는 코사인 파형의 변화량이다. 모든 값들은 같은 주파수를 가지므로 시변 자계는 페이서로 저장된다.

해석모델의 특성에 맞게 AC전류원과 경계조건을 주면 아래와 같은 식을 이용하여 계산되어진다.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon E$$

1. 서 론

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

현재 대전류 차단이나, 사고전류의 차단에 있어서 절연매질을 진공으로 하는 진공차단기의 수요가 크게 늘어난 실정에 있다. 이는 진공차단기가 고차단용량, 고신뢰성, 장수명 등의 잇점을 가지고 있기 때문이다. 이러한 진공차단기에 있어서 가장 핵심적인 부품은 진공인터럽터라는 진공밸브를 포함하는 전극구조체이다. 이러한 진공인터럽터 중에서도 접점 사이에 중자계가 인가되는 중자계방식 진공인터럽터는 차단성능 면에서 우월한 위치를 차지하고 있다. 특히, 진공인터럽터의 접점사이에 인가되는 중방향 자계는 차단성능의 향상에 큰 영향을 미친다. 따라서, 상하 두접점 사이에 어느정도의 자계를 어떤 분포로 인가하는가는 진공인터럽터 설계에 있어서 가장 중요한 인자가 되고 있다. 본 논문에서는 이러한 중자계방식 진공인터럽터를 개발함에 있어서, 현재 사용되고 있는 단극방식의 전극과 현재 개발중인 다극방식의 전극모델을 이용하여 와전류를 고려한 수치해석을 통한 자계분포 및 잔류자계 분포를 파악하고, 실제로 구현한 모델을 이용하여 자계분포를 측정하였다. 또한, 대전류 차단시 발생하는 아크를 관측하기 위하여, 착탈식 진공 챔버를 이용한 차단실험과 고속카메라를 이용한 아크관측을 실시하였다.

여기서

H : 자계

J : 전류밀도, 전류밀도 J는 유도전계 E와  $J = \sigma E$ 의 관계가 있다

E : 유도전계

B : 자속밀도,  $B = \mu_r \mu_0 H$ 의 관계를 이용하여 계산됨

$\mu_r$  : 비투자율

$\mu_0$  : 자유공간의 투자율

자계는 아래 수식에 의한 깊이(skin depth) 만큼 투과가 가능하다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu_0 \mu_r}}$$

$\omega$  : 각주파수,  $2\pi f$ 와 같다

$\sigma$  : 도체의 도전율

$\mu_r$  : 비투자율

$\mu_0$  : 자유공간의 투자율,  $4\pi \times 10^{-7} H/m$ 과 같음

전류는 도체의 표면에 거의 집중되므로, skin depth를 지나면 급격히 감소한다. 위의 식에서와 같이, skin depth는 주파수가 증가함에 따라 작아진다.

2. 본 론

2.1 유한요소법에 의한 수치해석

전자계해석용 상용프로그램인 EMAS v4.1을 이용하여 단극 및 다극 중자계방식 전극의 수치해석을 통하여 전류 차단시 접점 사이에 인가되는 중자계의 세기 및 분포를 확인하였다.

2.1.1 이론 및 해석모델

와전류를 고려한 자계해석은 AC전류와 (경계조건에 따라 표시되는) 외부 시변자계에 의해 자계를 계산한다. 초기에 계산되어지는량은 자계강도 H이고, 전류밀도 J나 자속밀도 B는 이 자계강도 H에 의해 자동으로 계산된다. 또, 힘, 에너지, 손실, 임피던스와 같은 값들은 이러한 기본적인 계들의 값으로부터 구해지는 값들이다. 자계는 아래와 같은 형태로 가정할 수 있다.

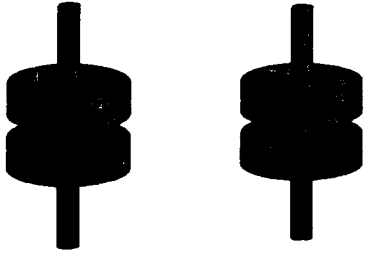
$$H(x,y,z,t) = H(x,y,z) \cos(\omega t + \theta(x,y,z))$$

표 1. 부분별 물질특성

	물질명	도전율(S/m)	비투자율
코일전극	OFHC	5.8E7	1
주전극	OFHC	5.8E7	1
접점	CuCr	2.2E7	1
지지판	SUS	1.1E6	1
아크	ARC	2800	1

그림 1은 수치해석을 위해 모델링한 전극의 형상을 나타낸다. 그림 1(a)는 단극 중자계방식 전극모델이고, 그림 1(b)는 다극 중자계방식 전극모델을 모델링한 것이다. 각 모델의 전극 중심에는 직경 10mm의 아크부가

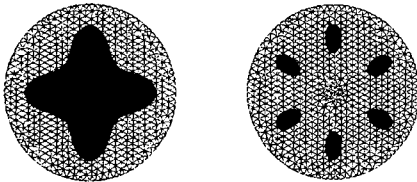
존재한다. 표 1은 전극모델 각각의 부분의 물질특성을 나타낸다.



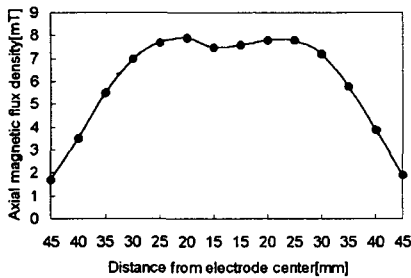
(a) 단극 종자계전극 모델 (b) 다극 종자계전극 모델  
그림 1. 종자계전극 해석모델

### 2.1.2 해석 결과

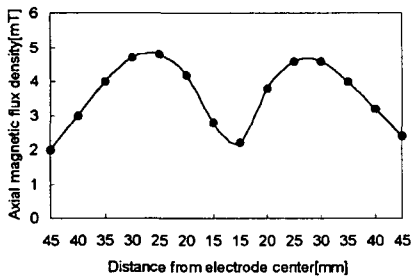
해석모델에 1000Arms의 사인 반파를 입력하였다. 그림 2는 전류피크에서 전극중심의 종방향 자속밀도분포를 나타낸다. 그리고, 그림 3은 종방향 자속밀도가 높은 영역에서 전극중심으로부터 거리에 따른 자속밀도의 분포를 나타낸다.



(a) 단극 종자계전극 모델 (b) 다극 종자계전극 모델  
(어두운 곳 5mT/kA이상) (어두운 곳 4mT/kA이상)  
그림 2. 전류피크에서 전극중심의 종방향 자속밀도 분포



(a) 단극 종자계전극 모델



(b) 다극 종자계전극 모델

그림 3. 전극중심으로부터 거리에 따른 종방향 자속밀도 분포

## 2.2 종방향 자속밀도의 측정

### 2.2.1 측정 방법

그림 4는 종자계방식 전극의 종방향 자속밀도 분포 및 크기 측정을 위한 실험장치를 나타낸다. 여기서 프로브 홀더는 상하좌우 및 회전운동이 가능한 구조이다. 그리고, 그림 5는 자속밀도 측정 설비의 배치도를 나타낸다. AC전류원을 이용하여 250Arms, 60Hz의 전류를 인가하고, 상하 전극을 통한 전류의 통전을 위하여 직경 10mm의 무산소동 핀을 접점의 중앙에 삽입하였다.

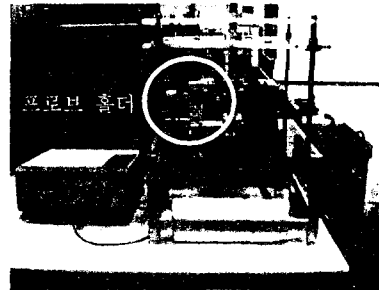
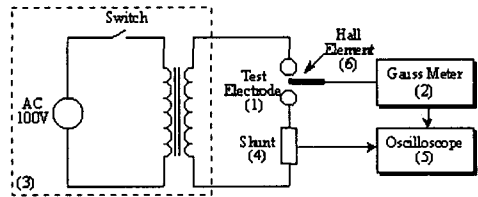


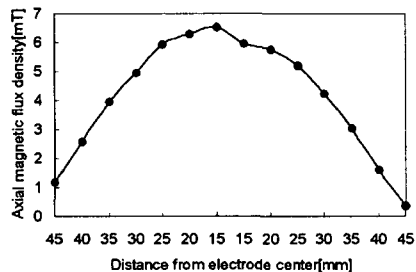
그림 4. 종방향 자속밀도 측정용장치



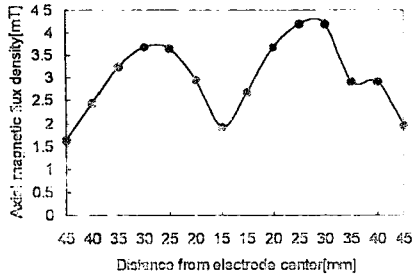
- (1) 종자계방식 전극
  - (2) 자계측정을 위한 Gauss Meter
  - (3) 전류전원 장치
  - (4) 전류 측정을 위한 Shunt
  - (5) 오실로 스코프
  - (6) 축방향 자계의 측정을 위한 자계프로브
- 그림 5. 종방향 자속밀도 측정설비 배치도

### 2.2.2 측정 결과

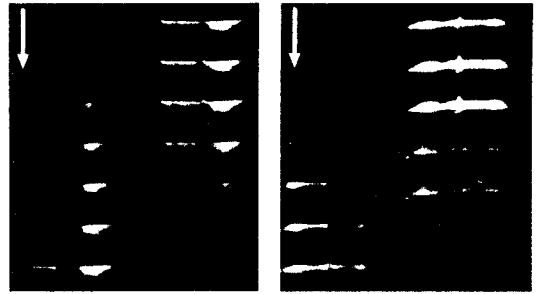
그림 6은 피크영역에서 전극중심으로부터 거리에 따른 종방향 자속밀도의 분포를 나타낸다.



(a) 단극 종자계전극



(b) 다극 종자계전극  
그림 6. 전극중심으로부터 거리에 따른 종방향 자속밀도 분포



(a) 단극 전극 (b) 다극 전극  
그림 9. 시간에 따른 아크 소호과정

### 2.3 대전류 차단실험

#### 2.3.1 실험 방법

그림 7은 대전류 차단실험에 사용된 착탈식 진공챔버와 고속카메라, 렌덴서 백그라운드 등의 실험사이드를 나타낸다. LC공진회로를 이용하여 28kApeak 57Hz의 전류를 인가하여 차단실험을 실시하였다.

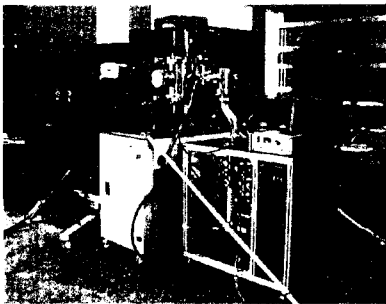
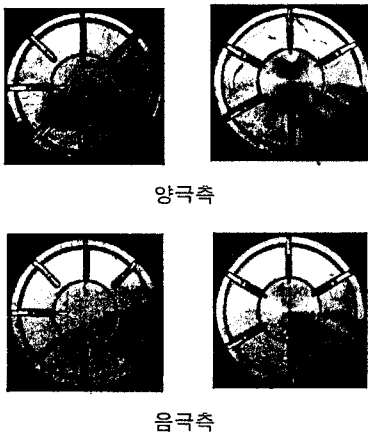


그림 7. 아크발생 실험장치

#### 2.3.2 실험 결과

그림 8은 아크발생 실험에 사용된 단극 및 다극 종자계방식 전극의 실험 후의 접점 표면 사진을 나타낸다. 그림 9는 시간의 변화에 따른 아크의 소호과정을 나타낸다.



(a) 단극 전극 (b) 다극 전극  
그림 8. 아크발생 실험 전후의 접점표면

### 3. 결 론

이상의 수치해석 및 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

- (1) 종자계방식 진공인터럽터 전극의 종자계 분포 및 세기는 수치해석 결과와 측정실험 결과가 거의 동일한 분포 및 세기를 나타내므로, 수치해석 값을 적용하여 전극의 형상설계가 가능하리라 판단된다.
- (2) 단극전극에 비하여 다극 전극의 종자계분포는 균일하지 못하고, 그 크기 또한 작으므로 이를 보완할 방법의 연구가 필요할 것으로 생각된다.
- (3) 대전류 차단시험 후의 접점상태로 보아 다극전극의 양극측 표면에 국부적인 용융흔이 많이 남아 있는 것은 자계분포의 불균일 그리고 강도와 연관이 있는 것으로 판단된다.
- (4) 고속카메라로 촬영한 아크소호 과정을 통해서도 다극 전극에서 강한 빛을 내는 프레임은 국부적인 아크의 발생을 의미하는 것으로 생각된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] S. Yanabu, E. Kaneko, E. Okumura, T. Aiyoshi, "Novel electrode structure of vacuum interrupter and its practical application", IEEE Power Engineering society Meeting, Minneapolis, 1980
- [2] M. B. Schulman, P. G. Slade, J. V. R. Herberlein, "Effect of an axial magnetic field upon the development of the vacuum arc between opening electric contacts", IEEE Trans. on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 16, No. 2, p. 180, 1993
- [3] B. Fenski, M. Lindmayer, "Vacuum Interrupters with Axial Field Contacts 3D Finite Element Simulations and Switching Experiments", XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, California, USA, July 21-26, 1996
- [4] S. Yanabu, T. Tsutsumi, K. Yokokura, E. Kaneko, "Recent technical developments in high-voltage and high-power vacuum circuit breakers", IEEE Trans. on Plasma Sci., Vol. 17, No. 5, p. 717, 1989
- [5] W. G. J. Rondeel, "The vacuum arc in an axial magnetic field", J. Phys. D, Appl. Phys., Vol. 8, 1975
- [6] Y. Sunada, N. Itoh, S. Yanabu, H. Awaji, H. Okumura and Y. Kanai, "Research and Development on 13.8kV 100kA Vacuum Circuit Breaker with Huge Capacity and Frequent Operation", CIGRE, 1986