

진공차단부 대전류 아크 해석: (D)축방향 자기장

황정훈[†] · 이종철* · 최명준** · 권중록** · 김윤제***

Simulation of High-current Vacuum Arcs: (D)Axial Magnetic Field

Jung-Hoon Hwang, Jong-Chul Lee, Myung-Jun Choi, Jung-Lock Kwon and Youn-Jea Kim

Key Words: 자기유체역학 (Magnetohydrodynamics), 복합수치해석 (Multidisciplinary Numerical Modeling), 열플라즈마 (Thermal Plasma), 진공차단부 (Vacuum Interrupter), 축자계 (Axial Magnetic Field)

Abstract

The vacuum interrupter (VI) is used for medium-voltage switching circuits due to its abilities and advantages as a compact and environmental friendly circuit breaker. In general, the application of a sufficiently strong axial magnetic field (AMF) permits the arc to be maintained in a diffused mode to a high-current vacuum arc. A full understanding of the vacuum arc physics is very important since it can aid to improve the performance of vacuum interrupter. In order to closely examine the vacuum arc phenomena, it is necessary to predict the magnetohydrodynamic (MHD) characteristics by the multidisciplinary numerical modeling, which is coupled with the electromagnetic and hydrodynamic fields, simultaneously. In this study, we have investigated the electromagnetic behaviors of high-current vacuum arcs for two different types of AMF contacts, which are coil-type and cup-type, using a commercial finite element analysis (FEA) package, ANSYS. The present results are compared with those of MAXWELL 3D, a reliable electromagnetic analysis software, for verification.

기호설명

A	자기벡터포텐셜
A_{eff}	유효아크면적 [m^2]
B	자속밀도 [T]
D	전속밀도 [C/m^2]
E	전계세기 [V/m]
H	자계세기 [A/m]
I	전류 [A]
J	전류밀도 [A/m^2]
l_{ac}	접점간극 거리 [m]
θ	위상각 [rad]
μ_r	비투자율 ($\mu_r = \mu / \mu_0$)

1. 서론

진공차단기 (Vacuum circuit breaker: VCB)는 절연 매질로 진공을 이용하여 고장전류 발생시 이를 신속하게 차단시켜 전력계통 및 계통 내의 주요 기기들을 보호하는 장치로서 중전압 (medium voltage) 회로의 단락 전류 (short circuit current) 차단에 널리 이용되어 왔다⁽¹⁾. 최근에는 산업의 발전과 더불어 전력 수요의 지속적인 증가에 따라 전력계통의 부하 급증으로 전력용 기기들은 대용량화, 고전압화 되어가는 추세이므로 전력용 시스템을 구성하는 차단기 및 단로기 등 개폐 보호 장치의 특성 개선과 성능 향상을 위해 진공 아크 현상에 대한 연구의 중요성이 증대되고 있다⁽²⁾. 또한 전 세계적으로 환경 문제에 대한 관심이 고조되고 대전류, 고전압용으로 사용되는 회로 차단기에 대한 친환경적 요구가 증가함에 따라 대용량 이면서 동시에 안전성과 신뢰성이 우수한 소형화 기기로의 개발이 중요한 목표로 대두되고 있다.

[†] 성균관대학교 대학원

* 강릉대학교 기계자동차공학부

** 현대중공업(주) 기계전기연구소

*** 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@skku.edu

TEL : (031)290-7485 FAX : (031)290-5889

이러한 목표에 부합하는 진공차단기 설계를 위해서는 차단 성능을 결정하는 대전류 진공 아크 플라즈마 (high-current vacuum arc plasma)의 자기유체역학적 (Magnetohydrodynamic: MHD) 현상에 대한 정밀한 해석이 매우 중요하다⁽³⁾.

진공차단기 내의 고장전류 차단부인 진공차단부 (Vacuum Interrupter: VI)는 한 쌍의 전극 (electrode) 과 금속 실드 (metal shield), 벨로우즈 (bellows), 그리고 세라믹 절연체 (ceramic insulator)로 구성되며, 접점 전극의 간극 (interelectrode gap)에서 발생하는 아크 플라즈마를 진공 중으로 급속하게 확산시켜 접점 전극 표면에 주입되는 아크 에너지를 최소화함으로써 신속하게 아크를 소호하는 진공차단기의 핵심 부품이다. 따라서 진공차단기의 성능 향상을 위해 진공차단부에서 아크를 효과적으로 제어함으로써 차단 가능한 전류의 용량을 증대시키거나, 진공절연 기술 개발에 의한 소형화, 고전압화를 달성하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다⁽⁴⁾.

진공차단기는 사고전류를 차단하는 목적을 가지므로 진공차단부 설계에 있어 대전류 차단 성능이 매우 중요한 요소이다. 접점전극 표면이 평면인 평판전극의 경우 아크 집중에 의해 대전류 차단 성능에 한계가 있으며, 대략 10 kA 정도에서 아크 집중이 발생하고 양극점 (anode spot) 형성으로 전극이 용융되어 결과적으로 소호부의 성능을 저하시키는 요인이 되는 것으로 알려져 있다⁽⁵⁾. 따라서 양극점의 형성을 최소화함으로써 차단 가능한 전류의 용량을 증대시킬 수 있다. 이를 위한 한 가지 방법은 전극에 횡방향 자기장 (Transverse Magnetic Field: TMF)을 발생시켜 얻어지는 로렌츠 힘에 의해 아크 기둥 (arc column)이 전극 표면에서 지속적으로 운동하게 하여 아크 집중을 방해하고 이를 통해 전극의 과도한 용융을 방지하는 것이다⁽⁶⁾. 또 다른 접근으로는 접점전극 간극에 형성되는 아크와 평행한 축방향 자기장 (Axial Magnetic Field: AMF)을 통해 아크 에너지를 전극 표면에 균일하게 분포시킴에 따라 아크 집중이 일어나는 전류의 한계치를 증가시키는 방법이 있다^(7,8). 많은 연구자들에 의해 접점 간극에 균일한 AMF가 발생된 경우 충분한 대전류 하에서도 확산아크 모드 (diffused arc mode)가 유지될 수 있으며, 이 경우 아크 전류와 전압의 관계는 AMF 강도에 따라 결정된다는 사실이 밝혀졌다⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾.

본 연구의 최종적인 목적은 진공차단부에서 발생하는 플라즈마의 물리적 현상을 파악하기 위하여 국소열평형 (Local Thermodynamic Equilibrium: LTE)에 기반을 둔 유체 모델 (fluid model)을 전자기 모델 (electromagnetic model)과 연계 (coupling)하여 전자기-열유동의 다중 물리계 (multiphysics)를 동시에 계산할 수 있는 복합수치해석 기법 (multi-disciplinary numerical analysis method)을 개발하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 두 가지 다른 형상의 AMF 전극에 대하여 유한요소법 (Finite Element Method: FEM)을 적용한 전자계 해석을 수행하여 전극 형상 및 접점 간극 변화에 의한 AMF 강도 변화를 계산하고, 그 결과를 전자계 해석에 널리 사용되며 비교적 정확한 예측이 가능한 것으로 알려진 MAXWELL 3D의 결과와 비교·검증하였다. 또한 접점전극 표면의 AMF 분포에 따른 유효 아크 면적 (effective arc area: A_{eff})의 변화에 대해 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 모델 및 격자계

전극 형상에 따른 전자계 특성을 해석하기 위해 사용된 두 가지 AMF 전극 모델을 Fig. 1에 나타내었다. 진공차단부를 구성하는 한 쌍의 AMF 전극은 전류의 통로가 되는 코일부의 형상에 따라 그 유형이 결정된다. 본 연구에서는 Yanabu 등⁽¹²⁾에 의해 제시된 coil-type 전극 (Fig. 1(a))과 현재 상용되고 있는 cup-type 전극 (Fig. 1(b))의 두 가지 형상을 선택하였다. 두 경우 모두 전극의 직경은 84 mm로 동일하며 접점 간극 갭 (l_{ac})은 10 mm로 고정하였다.

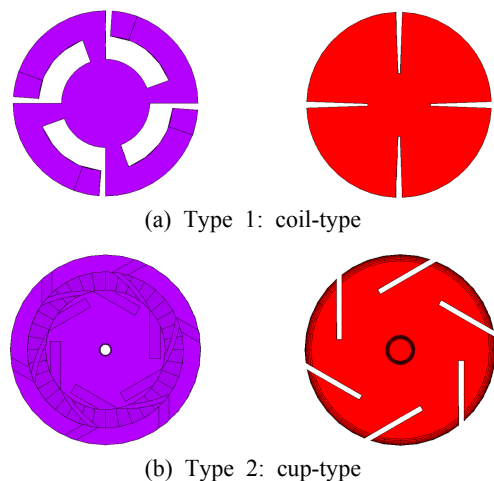


Fig. 1 Configurations of the AMF electrodes

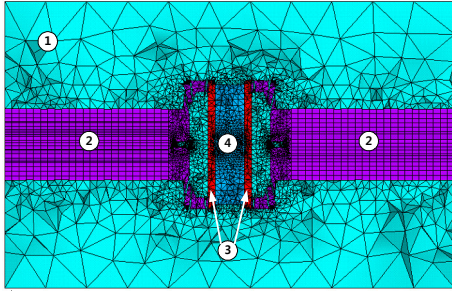


Fig. 2 Finite elements of the modelled VI

또한 고장 전류로 30 kA_{rms}, 60 Hz의 전류를 인가하여 교류 반주기에 대해 자체해석을 수행하였다. 해석에 사용된 진공차단부의 격자계와 각 부분의 물성 (도전율, 투자율)을 Fig. 2 및 Table 1에 나타내었다. 전류의 흐름에 따라 점점 간극에서 발생되는 초기 아크 플라즈마의 직경은 점점전극의 직경과 동일하며, 일정한 도전율 (σ)을 가진 동질의 원통형 도체로 가정하여 격자계를 구성하였다. 전체적으로 정렬격자와 비정렬격자의 혼합격자계 (hybrid grid systems)를 구성하였으며, Type 1은 약 14만개, Type 2의 경우는 컵 모양의 코일부 형상이 비교적 복잡하므로 조밀격자 (fine grid)를 적용하여 약 38만개의 요소 (element)를 생성하였다.

2.2 해석이론 및 방법

축자계형 진공차단부의 전자계 현상은 다음과 같은 3차원 비정상상태 맥스웰 방정식 (Maxwell's equations)에 의해 표현될 수 있다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\partial B / \partial t \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

여기서, H 는 자계세기 (magnetic field intensity), J 는 전류밀도 (current density), D 는 전속밀도 (electric flux density), E 는 전계세기 (electric field intensity), B 는 자속밀도 (magnetic flux density)이다.

전류의 시간적 변화에 의한 시변자계의 영향으로 발생하는 와전류의 영향을 고려하면 식 (1)은 다음과 같아진다.

$$\nabla \times H = J_0 + J_e, J_e = \sigma E_e \quad (4)$$

여기서, E_e 는 전자유도에 의한 와전류를 흐르게 하는 전계로 다음과 같이 전위 포텐셜 ϕ 의 함수로 정의된다.

Table 1 Material properties of each component

Components	Materials	σ (S/m)	μ_r
① Vacuum	Air	1.0E-9	1.0
② Conductor & Electrode	Cu	5.8E+7	
③ Contact plate	CuCr	1.276E+7	
④ Arc column	Arc	1.0E+4	

$$E_e = -\partial A / \partial t - \nabla \phi \quad (5)$$

따라서 비정상 상태의 와전류를 포함한 자기벡터 포텐셜에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times (\nu \nabla \times A) = J_0 - \sigma (\partial A / \partial t) - \sigma \nabla \phi \quad (6)$$

여기서, ν 는 자기저항율 (magnetic reluctivity), σ 는 도전율 (electric conductivity), ϕ 는 전위 (electric potential)이며, J_0 는 외부로부터의 입력 전류밀도 (input current density)를 각각 나타낸다.

진공차단부 내의 시간에 따른 전자계 특성을 해석하기 위해 상용 FEM 코드인 ANSYS를 사용하였으며, 계산 조건은 다음과 같다. 두 접점 사이의 거리 (l_{ac}) 10mm를 유지한 상태에서 전류 전도부의 한쪽 면에는 30 kA_{rms}, 60 Hz의 시간에 따라 변화하는 교류 전류를 인가하였고, 다른 한쪽 면에는 접지 (ground) 조건 ($\phi = 0 V$)을 적용하였다. 해석 영역의 외부 면에는 모든 자유도 (degree of freedom)를 구속하기 위해 자속 평행 (magnetic flux parallel, $A_z = 0$) 조건을 부여하였다. 계산에는 JGC (Jacobi Conjugate Gradient) solver가 사용되었으며, 그 수렴 기준은 1.0E-9로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 자계 해석 결과 검증

본 연구에서 계산된 자계 해석 결과 (축자계 강도)의 신뢰성을 검증하기 위해 동일한 모델 (cup-type, $l_{ac} = 20 mm$)에 대하여 전자계 해석 범용 코드인 MAXWELL 3D를 통해 계산된 결과와 함께 Fig. 3에 도시하였다. 그래프 상의 곡선들은 시간의 함수인 위상각 ($\theta = \omega t$)에 따른 AMF 밀도 변화를 나타내며, 적용된 과도 전류는 다음과 같다.

$$I(t) = 30000 \sqrt{2} \cos(\omega t) [A] \quad (7)$$

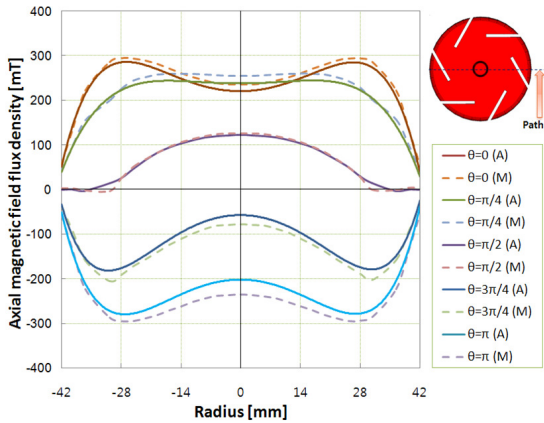


Fig. 3 Validation of calculated results
(A): ANSYS E-MAG, (B): MAXWELL 3D

따라서 Fig. 3을 살펴보면 교류의 반주기 동안 총 두 번의 최대전류 ($I_p=42.4$ kA at $\theta=0, \pi$)와 한 번의 전류 영점 ($I_0=0$ kA at $\theta=\pi/2$)이 나타난다. 전체적으로 전극의 반경에 따른 AMF 밀도 분포의 경향뿐만 아니라 정량적인 수치에 있어서도 좋은 일치성을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 전류 영점에서의 결과는 거의 정확히 일치하는데 비해 나머지 경우에는 본 계산 결과가 약간 작은 값을 예측하는 것을 볼 수 있다. 이는 본 계산에 적용된 과도 (transient) 해석의 지배방정식과 MAXWELL 3D에서 다루는 지배방정식의 차이에서 비롯된 결과로 판단된다.

3.2 접점전극 표면에서 AMF 밀도 분포

서로 다른 두 가지 형상에 따른 접점전극 표면에서의 AMF 분포 특성을 최대 전류 (I_p)와 전류 영점 (I_0)의 경우로 구분하여 각각 Figs. 4와 5에 도시하였다. 최대 전류 (Fig. 4)에서 Type 1의 경우에는 국부적으로 약 345 mT의 최대 자속밀도를 나타내지만 외부로 갈수록 급격히 감소되는 불균일한 분포를 볼 수 있다. 이에 비해 Type 2에서는 약 505 mT의 최대 자속밀도와 함께 비교적 균일한 분포를 보이며, 전극 중심으로부터 외곽에 걸쳐 평균적으로 더 높은 값을 나타낸다. AMF의 크기와 함께 분포의 균일도 (uniformity) 또한 차단부의 차단 성능을 결정하는 중요한 인자이므로 보다 큰 AMF를 균일하게 분포시킬 수 있는 전극의 형상을 찾는 것은 진공차단부의 성능 향상을 위한 중요한 설계 변수가 될 것이다.

전류 영점 (Fig. 5)의 순간에 나타나는 잔류 자계 (residual magnetic field)는 최대 약 107~168 mT를 나타내며, 중심에서 최대치를 나타내고 외곽으로

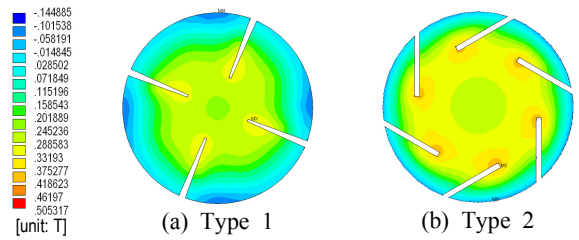


Fig. 4 The distributions of AMF flux density on the contact plate at current peak (I_p)

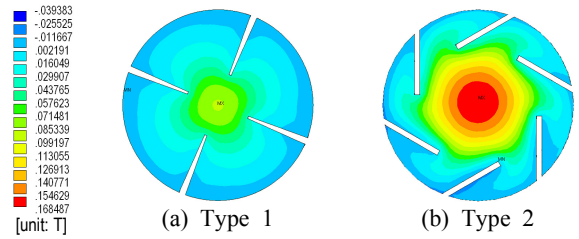


Fig. 5 The distributions of AMF flux density on the contact plate at current zero (I_0)

갈수록 감소되는 동일한 분포 경향을 보인다. 잔류 자계 값이 큰 경우 아크가 소호된 이후 남아있는 플라즈마가 진공 중으로 확산되는 것을 방해하여 아크 재점화 (reignition) 및 절연회복강도 (dielectric recovery strength) 저하로 인한 접점 표면의 용융 및 증발의 원인이 된다. 따라서 잔류 자계를 최소화하는 것은 AMF 전극의 차단 성능을 향상시키는 한 가지 방법이 될 수 있다.

3.3 접점 간극에서 AMF 밀도 분포

두 가지 형상에 대해 접점 간극 중앙 단면에서의 시간의 함수인 위상각 ($\theta = \omega t$)에 따른 AMF 밀도 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 그래프에서 최대 전류

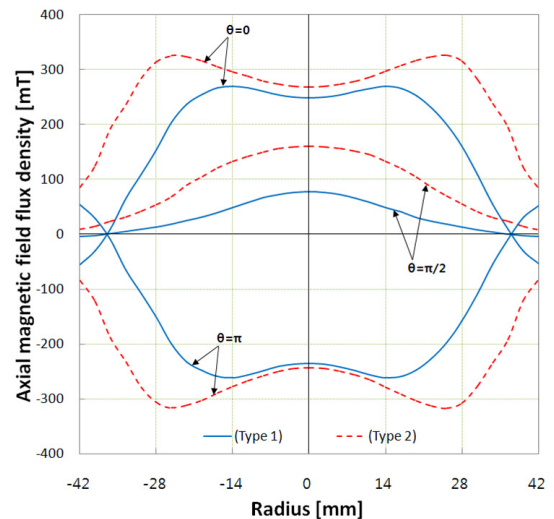


Fig. 6 The distribution of transient AMF on the intermediate plane of the interelectrode gap

($I_p=42.4$ kA at $\theta=0, \pi$)에서의 두 곡선은 거의 대칭적인 형상을 나타내며 반경 방향의 중앙부에 움푹 파인 형상을 볼 수 있는데, 이는 전류의 통로가 되는 코일부의 형상에 의해 발생하는 와전류의 영향으로 판단된다. 전체적으로는 Type 1에 비해 Type 2에서 더 큰 AMF 밀도를 나타내므로 Type 2의 경우에 보다 높은 전류 하에서도 확산아크 모드를 유지할 수 있을 것으로 예측된다.

또한 Fig. 6에서 전류 영점 ($I_0=0$ kA at $\theta=\pi/2$) 순간에 나타나는 잔류 자계가 Type 2의 경우에 더 크게 분포함을 알 수 있다. 고장 전류 발생시 아크를 통한 전류는 전류가 영점을 지나는 짧은 순간에 전극 표면의 손상을 최소화하며 완벽하게 차단되어야 하고, 전류 영점 이후에 재점화 되지 않아야 한다. 이를 위해 양극의 활동에 의한 양극 점의 발생을 억제할 수 있도록 잔류 자계를 최소화할 수 있는 AMF 전극의 적절한 형상을 도출하는 연구가 요구된다.

3.4 아크유효면적 (effective arc area: A_{eff})

Schulman⁽¹³⁾ 등의 실험 결과에 따르면 집중 아크 모드 (constricted arc mode)에서 확산 아크 모드 (diffused arc mode)로 전환되는 임계 AMF 값은 다음 식과 같이 결정된다.

$$B_{crit} \geq 3.9(I_p - a) \text{ [mT]} \quad (8)$$

여기서, I_p 는 최대 전류 (kA), a 는 경험적인 값 ($a=9$)으로 사용되는 특정 상수이다. 위의 식에 따르면 임계 B_{crit} 는 약 130 mT로, 전극 표면에서 AMF 강도가 임계값 이상인 영역을 뜻하는 아크 유효면적 (A_{eff})의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 두

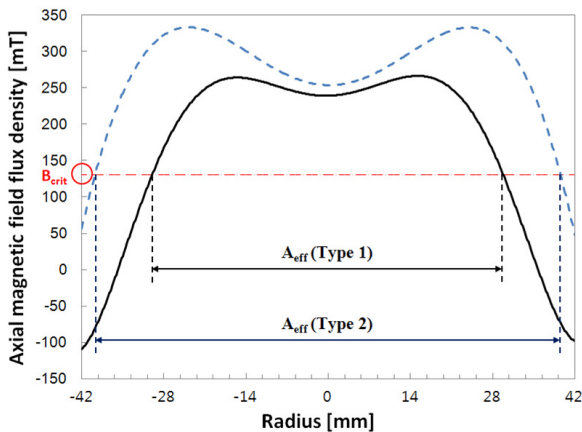


Fig. 7 Variation of the effective arc area (A_{eff}) with AMF flux density on the contact surface

경우의 A_{eff} 값은 각각 Type 1은 89.8%, Type 2에서는 93.2%로 예측되었다. 그래프를 통해 결과를 비교해 보면 전극 형상에 따라 Type 2의 경우가 전극 표면에 걸쳐 평균적으로 더 큰 AMF 밀도를 보이며 결과적으로 보다 넓은 A_{eff} 를 나타내는 것을 알 수 있다. A_{eff} 가 작을수록 양극점의 생성과 함께 진공 아크는 수축되며, 이는 전극 재료의 용융·증발에 따른 형상 악화, 절연회복강도 저하, 그로 인한 차단 성능의 저하 등 여러 가지 문제점들을 수반하게 된다. 따라서 전극 표면에 발생하는 AMF를 최대화하여 A_{eff} 를 증가시킴으로써 양극 활동에 의한 영향을 최소화 할 수 있을 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 진공차단부의 차단 성능을 결정하는 중요한 인자인 대전류 아크 특성을 해석하기 위한 첫 번째 단계로 형상이 다른 두 가지 AMF 전극 시스템에 대하여 자계 해석을 수행하였으며, 계산을 통해 얻은 AMF 밀도, 아크유효면적 등의 비교를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 계산된 자계 해석 결과의 검증을 위해 전자계 해석 범용 코드의 계산 결과와 비교하였으며, 그 경향뿐만 아니라 정량적으로도 잘 일치하는 것을 확인하였다.

2) 두 가지 형상의 접점전극에 따른 AMF 밀도 분포 특성에서 cup-type의 경우에 평균적으로 보다 높은 AMF 밀도와 함께 균일한 분포를 보였으며, 잔류 자계를 최소화 할 수 있는 적절한 형상을 도출하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

3) 접점 전극 표면의 아크유효면적 (A_{eff}) 분포를 비교해 본 결과, 형상에 따라 cup-type의 경우에 넓은 A_{eff} 를 나타내었으며, A_{eff} 를 증가시킴으로써 차단 성능의 향상 및 전극 손상을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2006년 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구 (KRF-2006-511-D00066)이며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- (1) Browne, T. E., 1984, Circuit Interruption: Theory and Techniques, *Marcel Dekker, Inc., New York*, Chap. 12, pp. 459~472.
- (2) Latham, R. D., 1995, High Voltage Vacuum Insulation, *Academic Press*.
- (3) Shmelev, D. L., 2000, "MHD Model of Plasma Column of High Current Vacuum Arc," in *Proc. 19th ISDEIV*, pp. 214~217.
- (4) Ha, D. Y., Kang, H. B., Choi, S. K. and Choi, K. H., 2002, "A Study on the Effect of the Contact Electrode Slits in the Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field Type," *J. of KIEEME (in Korean)*, Vol. 15, pp. 822~829.
- (5) Kimblin, C. W., 1969, "Anode Voltage Drop and Anode Spot Formation in DC Vacuum Arcs," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 1744~1752.
- (6) Schulman, M. B., 1993, "Separation of Spiral Contacts and the Motion of Vacuum Arcs at High AC Currents," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 21, pp. 484~488.
- (7) Rondeel, W. G. J., 1975, "The Vacuum Arc in an Axial Magnetic Field," *J. Phys. D: Appl. phys.*, Vol. 8, pp. 934~942.
- (8) Schellekens, H., 1983, "The High-Current Vacuum Arc in an Axial Magnetic Field: An Experimental Investigation," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 54, pp. 144~149.
- (9) Kimblin, C. W. and Voshall, R. E., 1972, "Interruption Ability of Vacuum Interrupters Subjected to Axial Magnetic Fields," in *Proc. IEE.*, Vol. 119, pp. 1754~1758.
- (10) Agarwal, M. S. and Holmes, R., 1984, "Arcing Voltage of the Metal Vapor Vacuum Arc," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 17, pp. 757~767.
- (11) Nemchinsky, V. A., 1990, "Vacuum Arc in Axial Magnetic Field," in *Proc. XIV ISDEIV*, pp. 260~262.
- (12) Yanabu, S., Souma, S., Tamagawa, T., Yamashita, S. and Tsutsumi, T., 1979, "Vacuum Arc Under an Axial Magnetic Fields and its Interruption Ability," in *Proc. IEE.*, Vol. 126, pp. 313~320.
- (13) Schulman, M. B., Slade, P. G. and Heberlein, J. V. R., 1993, "Effective of an Axial Magnetic Field upon the Development of the Vacuum Arc Between Opening Electric Contacts," *IEEE Trans. CHMT*, Vol. 16, pp. 180~189.