

진공차단부에서 발생하는 확산형 아크 수치해석

조성훈^{*,}, 황정훈^{*}, 이종철^{**}, 최명준^{***}, 권중록^{***}, 김윤제^{****}

Numerical Study on a Diffused-mode Arc within a Vacuum Interrupter

S.-H. Cho^{*,†}, J.-H. Hwang^{*}, J.-C. Lee^{**}, M.-J. Choi^{***}, J.-R. Kwon^{***} and Y.-J. Kim^{****}

Key Words : Magnetohydrodynamics(자기유체역학), Vacuum Arcs(진공아크), Finite Element Method(유한요소법), Axial Magnetic Field(축자기장)

Abstract

In order to more 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, the thermal-fluid characteristics of high current vacuum arcs were calculated by a commercial multiphysics package, ANSYS, in order to obtain Joule heat, Lorentz force and the interactions with flow variables. We assumed the diffused-mode arc within an AMF vacuum interrupter. It was found with four different currents that the temperature distributions on the anode surface are diffused uniformly without concentration in 7kA for both types (cup and coil-type). But the arc plasma transition and an increase of thermal flux density for increasing the applied current have caused the change of temperature distributions on the anode surface. We should need further studies on the two-way coupling method and radiation model for arc plasmas in order to accomplish the advanced analysis method for multiphysics.

1. 서론

중전압 개폐 회로 (medium voltage switching circuit) 차단장치로서 폭넓게 적용되고 있는 진공차단부 (Vacuum Interrupter, VI) 는 환경 친화적이라는 장점으로 적용 분야가 확대되고 있다. 진공차단기 (Vacuum Circuit Breaker, VCB)는 차단용량 36kV/50kA 중전압 영역에서 60% 이상의 시장 점유율을 나타내고 있으며, 개폐장치 시스템의 콤팩트화가 가능하기 때문에 초고압 영역에의 적용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 축방향 자기장 (Axial Magnetic Field, AMF) 전극을 적용한 진공차단부는 전력회로의 개폐 과정에서 접점 전류 경로 및 흐름에 의해 발생하는 자기장의 축방향 성분 크기에 따라 진공 아크의 확산을 유도하여 접점에 미치는 열적 부하를 감소시킴으로써 우수한 차단 성능과 수명을 보장할 수 있다. 따라서 AMF 전극 시스템은 접점 표면의 용융 (erosion) 및 증발 (evaporation)을 감소시킴으로써 기존보다 큰 대전류 영역에서의 진공차단기 적용이 가능하다. 진공차단부가 적용된 전력 회로 차단 과정에서 주요 관심사는 접점 분리 시 접점 사이에서 발생하는 아킹 현상 (arcing phenomena)이며, 발생된 아크 플라즈마는 보통 10kA 이상의 대전류 차단과정에서는 핀치 효과 (pinch effect)에 의해 접점의 특정 부분에 집중되는 수축 현상이 발생된다. 수축된 아크 (constricted arc)로 인해 특히 양극에서 일어나는 접점 재료의 과도한 용융은 차단 성능을 저하시키는 주요 요소가 될 수 있다.

결과적으로 진공차단부의 차단 성능을 향상시키기 위하여 진공 아크의 물리적 현상에 대한 깊은 이해가 무엇보다 중요하다. 이러한 진공 아크 현상에 대해 보다 깊이 접근하기 위하여 전자계-열유동의 복합 물리계 (multiphysics)를 연계하여 동시에 계산할 수 있는 복합수치해석 기법 (multidisciplinary numerical analysis method)을 통해 진공 아크의 자기유체역학적 (magnetohydrodynamic, MHD) 특성을 예측하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 개발된 복합수치해석 기법 [1,2] 을 바탕으로 코일형 및 컵형 코일 전극을 갖는 두 가지 다른 형상의 모델에 대하여 동일 조건 하에서 아크 전류 크기에 따른 접점 간 아크 플라즈마의 열유동 특성을 고찰하기 위하여 각각 7, 15, 30, 50kArms에 해당하는 교류 전류를 적용한 열유동 해석 결과를 도시하여, 진공차단부에서 발생하는 확산형 아크를 수치해석 하는 것을 본 연구의 목표로 할 수 있다.

2. 수치 해석

2.1 지배방정식

전자계 현상의 수치 해석을 위한 기본 방정식은 다음과 같은 Maxwell 방정식으로 표현된다 [4].

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

* 성균관대학교 대학원, skkuakela@skku.edu
** 강릉대학교 기계자동차공학부, jcllee01@kangnung.ac.kr
*** 현대중공업(주) 기계전기연구소, result98@hhi.co.kr
**** 성균관대학교 기계공학부, yjkim@skku.edu

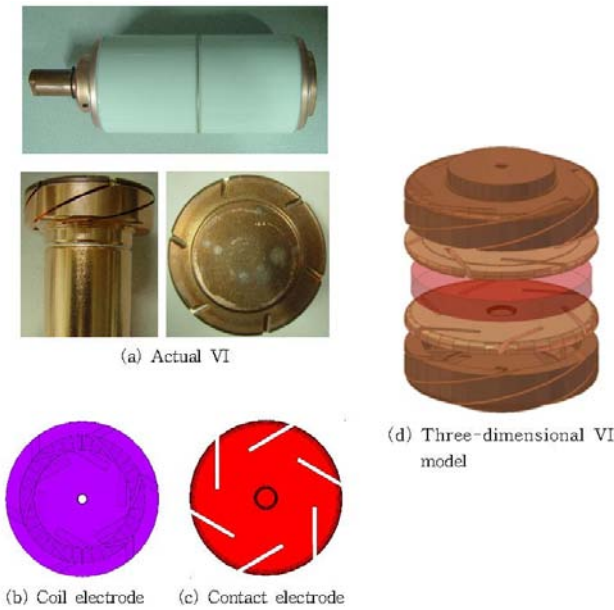


Fig. 1 Configuration of the Cup-type AMF

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

여기서 H 는 자계세기 (magnetic field intensity) [A/m], J 는 전류밀도 (current density) [A/m²], D 는 전속밀도 (electric flux density) [C/m²], E 는 전기세기 (electric field intensity) [V/m], B 는 자속밀도 (magnetic flux density) [T]이다.

열유동 해석을 위한 Navier-Stokes 방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\mathbf{u}\phi - \Gamma_\phi \nabla \phi) = S_\phi \quad (4)$$

위 식의 종속변수를 ϕ 라 할 때, Γ_ϕ , S_ϕ 는 각각 ϕ 에 의해 정해지는 대류 계수 (diffusion coefficient)와 생성항 (source term)을 의미한다 [5].

2.2 모델 및 격자계

해석 대상은 Fig. 1에 도시한 한 쌍의 컵형 (cup-type) AMF 전극 사이에서 발생하는 확산형 (diffused-mode) 진공 아크 부분이다. 전극의 직경 (D)은 84mm이며 접점 간극 갭 (lac)을 10mm로 고정시킨 후, 전류 크기를 변화시켜 해석을 수행하였다. 양극 (anode) 및 음극 (cathode)의 직경은 D=84mm로 동일하며, 아크와 외부 진공과는 FB (Free Boundary)를 경계로 구분된다. 아크 전류가 충분히 크지 않고, 양극점이 형성되기 전까지 접점 간 플라즈마 (inter-electrode plasma)는 주로 음극점에 의해 공급되며 플라즈마 유동 방향은 음극에서 양극 방향이다. 이전 연구 결과

에 따르면 진공 아크 모델은 준정상상태(quasi-steady) 모델로 간주할 수 있다 [3]. 따라서 본 연구에서는 일정한 접점 간극 및 전류를 갖는 아크 모델을 선정하여 계산하였다. 유한요소해석을 위한 해석 대상인 AMF형 진공차단부 내 진공 아크의 격자계는 원통형 체적으로 이루어져 있다. 전류의 흐름에 따라 접점 간극

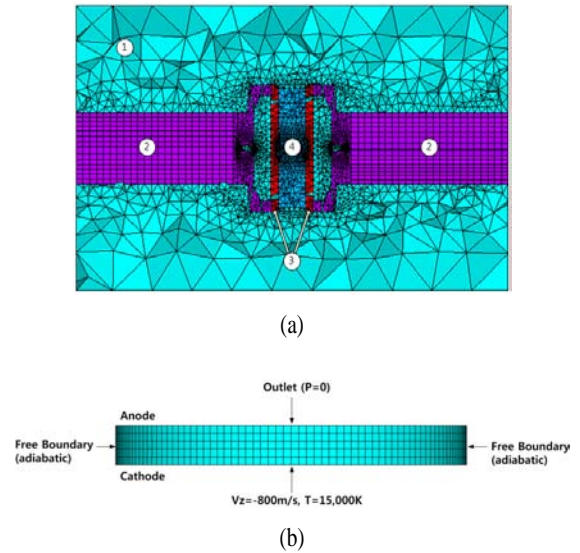


Fig. 2 (a) Finite element systems of the modelled vacuum interrupter

(b) Finite element systems for the flow analysis

에서 발생하는 초기 진공 아크는 확산 아크로 간주하여 전극 직경과 동일한 원통 형상의 격자계를 구성하였다. 격자계는 전체적으로 약 21,000개의 요소로 구성된 비정렬 격자계이다. 열유동 해석을 위해 ANSYS의 열유동 해석 모듈인 FLOTTRAN의 3차원 CFD 요소인 FLUID142를 사용하였다 (Fig. 2 참고).

2.3 경계조건 및 해석방법

진공차단부 내 진공 아크 플라즈마의 자기유체역학적 (MHD) 특성을 계산하기 위해 복합 물리계 (Multiphysics)에 대한 연성해석이 가능한 상용 FEM 소프트웨어 ANSYS 11.0의 열유동 해석 모듈인 Flotran을 사용하였다. 열유동 해석의 경계조건으로는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 음극에서 공급되는 플라즈마의 속도는 약 800m/s이며 온도는 15,000 K로 가정하였다. 양극은 완전한 수동적 싱크 (passive sink)로 가정하여 출구 조건 (outlet boundary condition, p=0)을 적용하였으며, FB (Free Boundary) 부분은 외부 진공과의 경계면으로 단열 조건을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 복합수치해석 기법을 바탕으로 코일형 및 컵형 코일 전극을 갖는 두 가지 다른 형상의 모델에 대하여 동일 조건 하에서 아크 전류 크기에 따른 접점 간 아크 플라즈마의 열유동 특성을 고찰하기 위하여 각각 7, 15, 30, 50kA_{rms}에 해당하는 교류 전류를 적용한 열유동 해석결과를 Figs. 3~4에 도시하였다. Fig 3은 전류크기에 따라 양극과 접촉하는 아크 표면에서의 온도 분포를 나타낸 것이다. 결과를 살펴보면 이전 연구 [3]에서 논해진 바와 같이 7kA에서는 두 가지 형상 모두 양극 표면에서 온도 집중 현상 없이 전체적으로 확산된 온도 분포를 나타낼 수 있다. 전류 크기 증가에 따라 아크 플라즈마의 천이와 함께 아크 수축에 의한 열유속 밀도가 증가에 의해 양극 표면의 온도 분포 특성이 변하게 된다. Figure 3에 도시한 온도 분포 결과를 살펴보면, 로렌츠 힘의 작용으로 코일형 AMF 전극

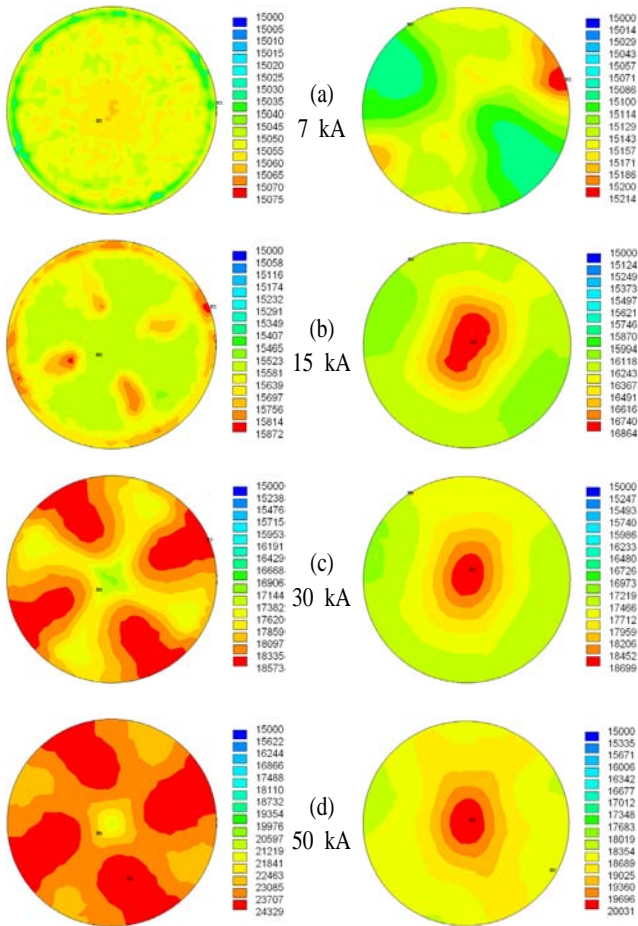


Fig. 3 Temperature distributions on the anode surface with various current ranges (left: Coil-type, right: Cup-type)

에서는 4개 슬릿을 기준으로 각각 네 방향으로 분리되어 온도가 집중되며, 컵형 AMF 전극에서는 양극 표면 중앙 영역에서 고온 영역이 집중되어 나타나는 것을 볼 수 있다. Figure 4는 전류 크기에 따라 점점 간 플라즈마 중앙 단면 온도 분포이다. 전체적으로 음극에서 양극으로 갈수록 온도가 상승하며, 전류 증가에 따라 코일형에서는 중앙을 기준으로 양쪽으로 분리되어 온도가 집중되며, 컵형에서는 양극 표면 중앙 영역에서 온도가 집중되는 것을 알 수 있다. 이로부터 전류 증가에 따른 아크 플라즈마의 수축 현상을 예측할 수 있다. 또한 중앙을 기준으로 온도 분포가 비대칭적인 것을 알 수 있는데, 이는 로렌츠 힘에 의한 아크 플라즈마 구동 메커니즘에서 예측한 바와 같이 3차원적인 회전에 의한 전류밀도 및 주울 열의 불균일한 분포에 의해 발생하는 비대칭성 때문인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 전자계 해석을 통해 얻은 주울 열과 로렌츠 힘을 열유동 해석시 생성항으로 적용하여 진공 아크 플라즈마의 열유동 특성을 계산할 수 있는 복합수치해석 기법을 이용하여 대전류 진공차단부 내 점점 간 아크 플라즈마에 대한 자기유체역학적 특성을 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

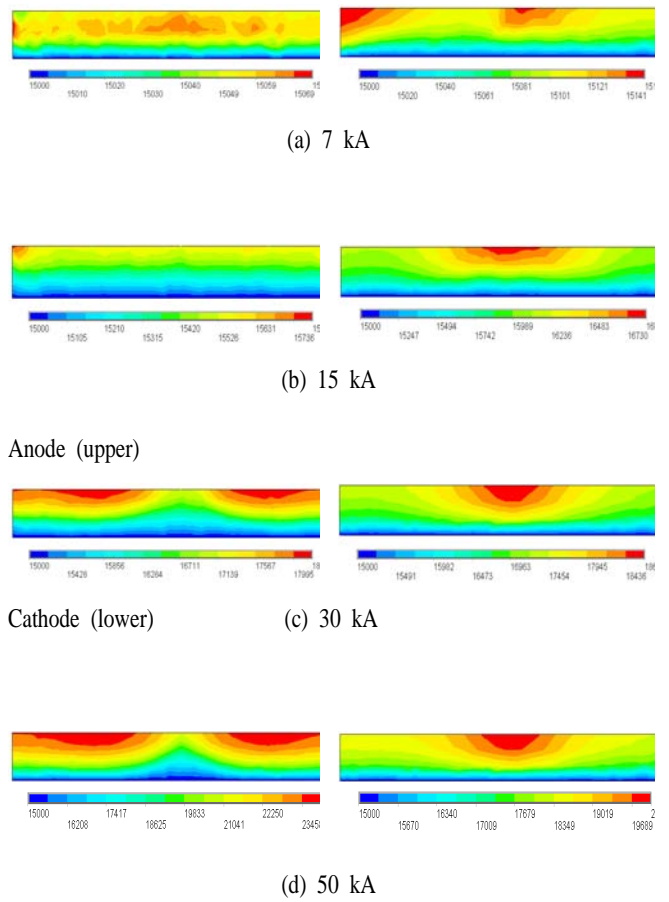


Fig.4 Temperature distributions on the cross sectional areas of the arc plasma with various current ranges (left: Coil-type, right: Cup-type)

- (1) 개발된 복합수치해석 기법을 이용하여 아크 전류 크기 변화에 따른 점점 간 아크 플라즈마 열유동 특성을 해석한 결과, 7kA에서는 확산 아크에 의해 양극 표면에서 균일한 온도 분포를 나타내었으며, 전류 증가에 따라 코일형 및 컵형 AMF 전극에서 서로 다른 형태의 집중된 고온 영역이 발생하고 축방향 온도 구배 차가 증가하는 것을 차단 시험 결과와 비교를 통해 확인하였다.
- (2) 본 연구의 복합수치해석 기법은 일방향 연성해석 기법 (sequential coupling method) 적용으로 인한 물리적 현상 예측에 한계점을 가질 것으로 보이며, 양방향 연성해석 기법 (two-way coupling method) 및 복사 모델 등을 추가한 향상된 해석 기법에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- (3) 진공차단부 대전류 차단 성능 향상을 위하여 대전류를 인가한 실험을 위해서는 엄청난 경비와 과도한 시간이 요구된다. 따라서 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션으로 계산된 정확한 예측 결과를 축차계형 진공차단부 설계에 적용시킴으로써, 진공차단기 성능 향상을 위한 새로운 전극 형상 개발 및 평가 등에 큰 장점을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2007년 청정생산기술개발보급사업의 지원을 받아 수행된 연구이며, 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- [1] 황정훈, “眞空 아크 플라즈마의 磁氣流體力學的 特性에 關한 研究“, 석사학위 논문, 성균관대학교, 2008.
- [2] 황정훈, “전극형상 변화가 진공차단기내 축방향 자기장 특성에 미치는 영향“, 대한기계학회 논문집 A권 제32권 제1호, 2008년 1월, pp. 7-12.
- [3] Schade, E. and Shmelev, D. L., "Numerical Simulation of High-Current Vacuum Arcs with an External Axial Magnetic Field," IEEE Trans. On Plasma Sci., 2003, Vol. 31, pp. 890-901.
- [4] Jin, J., "The Finite Element Method in Electromagnetics," John Wiley & Sons Inc, New york. 1993.
- [5] Patankar, S. V., "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," Hemisphere, Washington, D. C. 1980.