

## 진공차단부 아크 모델링 및 자계해석

최명준<sup>U</sup>, 김진수, 송태현, 석복렬, 박일한\*  
 현대중공업(주) 기전연구소, 성균관대학교\*

## Arc Modeling and Magnetic Field Analysis of Vacuum Interrupter

M. J. Choi<sup>U</sup>, J. S. Kim, T. H. Song, B. Y. Seok, I. H. Park  
 Hyundai Electro-Mechanical Research Institute, Sungkyunkwan Univ.

**Abstract** - 중저압 분야에서 가장 많이 사용되는 차단기는 진공차단기이다. 진공차단기는 SF<sub>6</sub>에 비하여 간단하며, 아크소호 능력 또한 뛰어나다. 이런 진공차단기에서 차단성능에 가장 중요한 부분이 진공차단부이다. 본 논문에서는 constricted arc와 diffuse arc에 관하여 서술하였으며, contrate type 진공차단부의 다양한 형상변경에 따른 직교자계와 축자계에 대한 3차원 전자계 해석을 수행하였다. 3차원 전자계해석으로 얻어진 결과는 새로운 진공차단부 개발에 커다란 도움이 될 것으로 사료된다.

를 이용하는 구조라고 생각하는데 전극의 slot방향에 따라 직교자계와 축자계가 발생한다는 것을 해석하였으며, 전극이 분리됨에 따라 전극사이에 constricted arc가 발생할 경우 전극, contact과 아크사이에 전류가 어떻게 흐르는가를 해석하였다. 또한 진공차단부 base의 slot개수 변화에 따른 자계해석을 하였다.

본 논문에서 수행한 진공차단부의 아크 모델링 및 전자계해석은 신모델 개발에 중요한 자료로 사용될 것으로 생각된다.

## 1. 서 론

약 35년 전, 1960년대에 두 가지 새로운 차단기 기술이 시장에 소개되었는데, 하나는 SF<sub>6</sub>를 소호매질로 사용하는 것이고, 다른 하나는 진공을 사용하는 것이다. 그 이후로 두 가지 기술에 대한 연구개발이 줄기차게 계속되어지고 있으며, 오늘날은 두 가지 모두 구형 타입의 개폐기를 거의 대체 했다고 말할 수 있다. SF<sub>6</sub> 및 진공 개폐기는 각기 다른 지역에서 다양한 시장 성공양상을 보였다. 유럽과 대부분의 중동지역에서는 SF<sub>6</sub>를 선호하는 반면, 중국, 일본, 미국에서는 진공을 절대적으로 선호한다. 진공차단기는 소형화, 경량화와 유지보수 없이 긴 전기적인 수명 때문에 중저압 배전시스템에 널리 사용되어진다. 진공차단기에서 가장 중요한 부분이 진공차단부이다. 진공챔버의 제한된 공간에서 높은 차단전류를 얻기 위해서는 대전류 진공아크가 contact위에 형성되지 않도록 해야 한다. 이와 같은 이유로, 진공차단부의 형상에는 직교자계의 원리를 이용하는 나선형 전극타입과 왕관형 전극타입이 있고, 축방향 자계를 이용하는 전극타입이 있다. 직교자계 타입의 전극은 자체가 전극주위로 빠르게 움직이도록 원주방향 아크에 수직적으로 작용하는 원리를 이용하는 것이고, 축방향 타입의 전극은 자체가 높은 차단전류에 도달할 때까지 발산된 아크를 유지할 수 있도록 아크에 평행으로 작용하는 원리를 이용하는 것이다[4][5].

또한 진공차단부에서 중요한 부분이 contact이다. contact는 개폐동작시에 아크 침식에 대한 높은 저항을 가져야 하며, 어떤 침식이 있다 하더라도 contact표면에 확산되어져야만 한다. contact 재질은 closing과 closed 되어있는 경우 모두 부식에 대해 낮은 성향을 가져야 하며, 소전류 차단시 소전류 재단특성 또한 중요하다. 이런 적절한 재질을 찾는 결과 크롬이 대부분의 요구되는 특성을 지니고 있다는 것이 밝혀져 크롬이 20~60%함유된 구리/크롬이 현재 contact의 표준재질로 사용되어진다. 본 논문에서는 진공아크의 주요한 형태인 diffuse arc와 constricted arc에 관하여 서술하였으며, constricted arc가 발생할 경우 전자계해석에 적합한 아크모델링을 조사하였다. 또한 contrate 타입의 전극구조에 대한 3차원 전자계해석을 시행하였다. 전자계해석은 유한요소법을 기반으로 하는 상용프로그램(Flux)를 이용하였다. 보통 contrate 타입은 직교자계

## 2. 진공아크 모델링

진공아크는 일반적으로 가스방전과 그 특성이 매우 다르다. 가스방전은 전달매질이 있는 반면 진공아크는 전달매질이 없는 경우이다. 단지 아크 현상 그 자체에 의해 전극으로부터 발생된 금속증기에 의해 양이온이 생성되고 이로 인해 아크가 발생한다. 진공아크는 확산아크(diffuse arc)와 응축아크(constricted arc)의 두 가지 형태로 존재한다[5].

## 2.1 확산아크(diffuse arc)

확산아크는 보통 수천암페어 이하의 저전류에서 발생한다. 일반적으로 두 개의 디스크형 전극에서 발생하는 수백에서 수천암페어정도의 전류가 흐르는 진공아크는 서로 평행하며, 매우 많은 수의 완전히 분리되어 있는 아크의 형태로 존재한다. 이 각각의 아크는 음극에 형성된 음극점(cathode spot)과 이 음극점으로부터 발생하여 양극을 향하는 아크플라즈마주의 형태를 나타낸다. 음극점은 서로 반발하여 음극표면에 퍼지게 된다. 아크 전류가 증가할 때, 음극점의 수는 아크 전류에 따라 대략 선형적으로 증가하며, 반면에 전극간 갭에서 diffuse glow는 밝게 되고, 양극은 빛이 없는 상태를 유지한다. 확산아크 모드에서의 아크 전압은 상대적으로 낮고 조용하다. 그러나 아크 전류가 증가할 때, 커다란 노이즈 요소를 일으키면서 아크 전압도 증가한다. 그래서 높은 증기압력을 가진 전극물질은 아크노이즈를 금지시키는 경향이 있다. 확산아크의 전류를 계속해서 증가시키면 응축아크로 변이하게 된다[3].

## 2.2 응축아크(constricted arc)

응축아크는 대전류에서 발생하는 아크이다. 응축아크가 전극사이에 발생하면 차단성능이 상당히 저하된다. 일단 아크가 응축상태가 되면 앞으로 아크가 어떻게 발전될지는 전극의 열적조건에 달려있다. 예를 들어 자계에 의해 아크를 전극의 표면에서 빠르게 이동시킴으로써 아크가 항상 냉전극상에서 움직이도록 하여 전극에서의 강력한 냉각이 일어나도록 한다면 높고 불규칙한 아크전압이 지속된다. 그러나 아크가 한곳에 머물러서 비교적 넓은 영역의 전극온도가 상승한다면 국부적인 증기밀도가 매우 높게 되어 응축상태인 아크가 아크주에서 열적 전리가 일어나므로 고압아크로 되어 아크전압은 다시 떨어

여지게된다. 그리고 확산아크에서의 용축아크로의 변이는 전극의 크기, 형태, 재질과 전류의 변화율( $di/dt$ )에 따라 변화한다.

### 2.3 아크 모델링

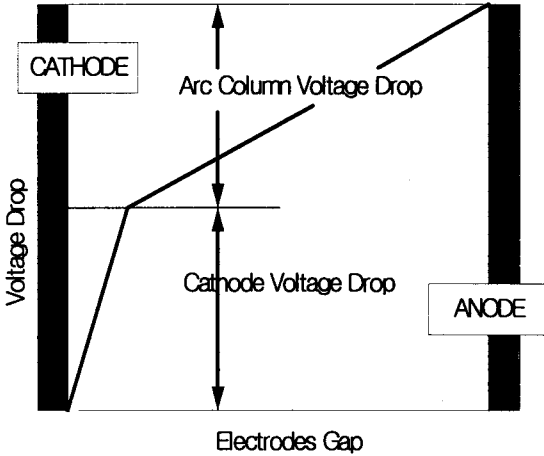


그림 1. 두 전극간의 전압분포

양전극간의 전압분포는 그림 1과 같다. Cathode 부분에서의 전압강하가 급격하지만 전극간 대부분에서의 전압강하는 평평하다고 말할 수 있다. 그러므로 진공차단부의 전자계해석시 양극간에 발생하는 아크를 도체로 간주하여 해석을 하여도 해석결과값에 커다란 영향을 미치지 않을 것이다[1]. 그러나 아크의 도전율은 전극의 base를 만드는 구리와 contact의 재질로 사용되는 크롬/구리의 도전율보다는 작다.

### 3. 유한요소 해석

진공차단부의 3차원 자체해석을 하기 위해서는 도체 부분에서의 전류밀도분포를 알아야 하므로, 두 가지 해석방법을 사용해야 한다. 우선 도체부분에서의 전류밀도분포를 알기 위해 다음과 같은 맥스웰 방정식을 쓴다.

$$\text{curl } \vec{E} = 0 \text{ and } \text{div } \vec{D} = q \quad (1)$$

여기에서,  $E$ 는 전계이고,  $D$ 는 전속밀도이다.

식(1)에서 상태변수는 전기스칼라 포텐셜이고, source는 경계부분에 부여되는 포텐셜이다.

식(1)을 해석함에 따라 해석대상의 각 부분에서의 전계( $E$ )값을 알 수 있다. 이 전계값을 이용하여 각 부분에서의 전류분포는 다음과 같은 식을 이용하면 알 수 있다.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2)$$

여기에서,  $J$ 는 전류밀도이고,  $\sigma$ 는 도전율이다.

식(2)을 통해 각 부분에서의 전류밀도분포를 구한 후, 그 값을 source로 사용하여 자체해석을 시행한다. 자체해석은 다음과 같은 맥스웰 방정식을 쓴다.

$$\text{curl } \vec{H} = \vec{J} \text{ and } \text{div } \vec{B} = 0 \quad (3)$$

여기에서,  $H$ 는 자계이고,  $B$ 는 자속밀도이다.

식(3)을 해석함으로써 해석모델 각 부분에서의 자체해석을 할 수 있다. 위와 같이 두 가지 해석방법을 사용하는 이유는 3차원의 경우 전류방향은 2차원의 경우에서처럼 단지  $z$ 축 성분만이 존재하는 것이 아니라,  $x, y, z$ 축 성분이 존재하기 때문이다.

### 4. 수치해석 사례

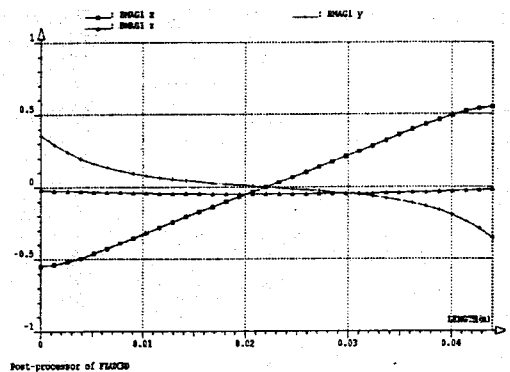
본 논문에서는 3차원 유한요소법에 근거한 상용프로그램인 Flux를 이용하여 전자계해석을 수행하였다. 각 모델에 대한 절점수는 17,000~18,000개 정도이며, 요소분할 수는 110,000~120,000개이다. 수치해석에 사용된 컴퓨터의 CPU는 733MHz이며, RAM은 512MB이다. 해석방법은 위에서 언급했던 것처럼 일단 각 모델의 경계조건으로 고정부에는 1V, 가동부는 0V를 주었다[1]. 위와 같은 경계조건을 주고 풀면 모델 각 부분에서의 전류밀도 분포를 알 수 있다. 다음으로 전류밀도 분포를 source로 하여 자체해석을 하였다. 자체해석을 할 경우 해석모델의 외부면에는  $B$ 와  $H$ 가 접선방향으로 대칭이라는 경계조건을 부여하였다. 전자계해석의 경우에는 미지수는 스칼라 포텐셜이고, 자체해석의 경우에는 자기벡터 포텐셜이다. 전자계해석의 경우는 해석시간이 짧았지만 자체해석의 경우는 상당한 시간이 소비되었다.

일단 base부분의 slot모양에 따라 축자계와 직교자계의 변화를 알아보기 위해 다음과 같은 해석을 하였다.

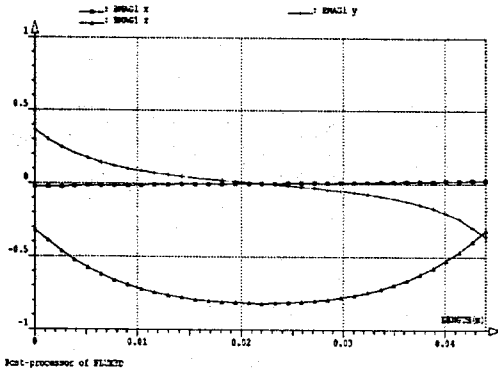


a) 직교자계 해석모델      b) 축자계 해석모델

그림 2. 자체해석 모델 ( 2 Types)



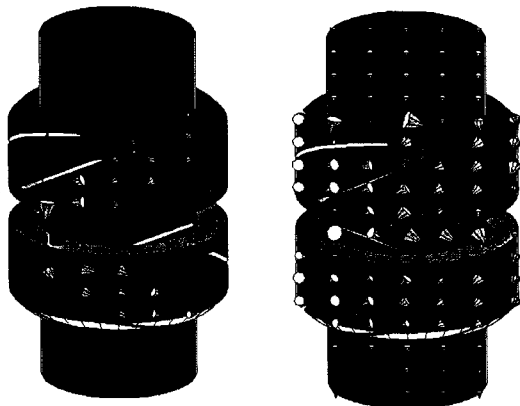
a) 직교자계 성분별 자속밀도값



b) 축자계 성분별 자속밀도값

그림 3. 성분별 자속밀도값

위의 해석에서 알 수 있듯이, base의 slot 방향에 따라 성분별 자속밀도값이 바뀌는 것을 알 수 있다. 다음으로는 아크 모델링을 고려한 전류밀도 분포를 해석한 예이다.



a) 유부하시

b) 무부하시

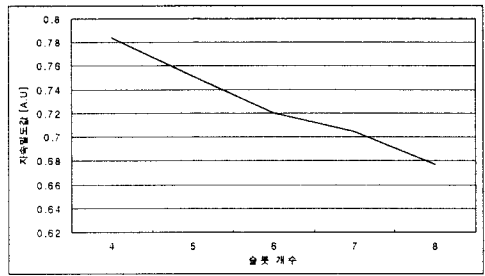
그림 4. 아크 유·무에 따른 전류밀도 분포

위 그림에서 알 수 있듯이, 양전극간에 아크가 존재할 경우에는 base의 전류들이 거의 아크를 따라 흐른다는 것을 알 수 있으며, 아크가 존재하지 않을 경우에는 슬롯의 각도에 따라 전류가 흐르지만 슬롯의 모든 부분에서 일정하다. 그리고 아크를 위 해석예와 같이 도전율을 가진 도체로 가정하고 해석을 해도 무방하다고 생각된다. 이때 아크의 도전율은 base와 contact 재질의 도전율보다는 낮다고 가정하였다 [2].

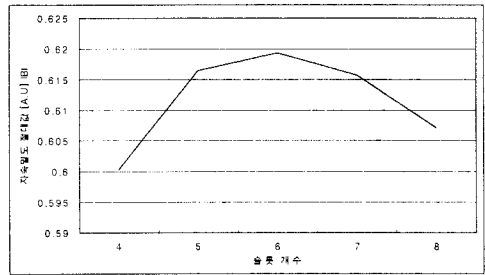
다음으로는 base의 슬롯 개수에 따른 자속밀도값을 해석하였다. 이 해석은 진공차단부 설계에 커다란 도움이 될 것으로 사료된다. 슬롯의 개수는 4개에서 8개까지 변화시켰다.

표 1. 슬롯 개수에 따른 자속밀도값

슬롯 개수	y축 최대자속밀도값	z축 최소자속밀도값
4	0.78367	-0.60035
5	0.7510	-0.61645
6	0.72012	-0.61938
7	0.70413	-0.61566
8	0.67683	-0.607127



a) y축성분 최대자속밀도값



b) z축성분 최대자속밀도 절대값

그림 5. 슬롯 개수에 따른 성분별 자속밀도값

## 5. 결 론

본 논문에서는 진공차단부의 아크 모델링 및 자계 해석을 하였다. base의 슬롯 방향에 따른 자계의 변화를 알아보았으며, 아크 모델링을 하여 진공차단부의 전류밀도 분포를 알아보았다. 그리고 진공차단부 설계에 적용될 수 있을 것으로 생각되는 슬롯 개수의 변화에 따른 자계 해석을 하였다. 위의 해석예에서 슬롯의 개수가 증가한다고 해서 z축성분의 자속밀도값이 비례적으로 증가하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 z축성분의 자속밀도값은 아크가 양전극사이에 집중하지 않도록 하는 주요한 성분임을 알 수 있었다. 향후 과제로는 슬롯 각도, contact 형상변경 및 아크가 받는 전자력밀도 분포에 대한 전반적인 해석이 필요하다고 사료된다.

## (참 고 문 헌)

- [1] K. Nitta, K. Watanabe, et al, "Three-Dimensional Magnetic Field Analysis of Electrodes for VCBs", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.4, pp1520-1525, 1997
- [2] Yoshihiro Kawase, Hiroyuki Mori and Hiroaki Inoue, "3-D Finite Element Analysis of Magnetic Blowout Forces Acting on the arc in Vacuum Circuit Breakers", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.32, No.3, pp1681-1684, 1996
- [3] Zdzislaw Zalucki and Jerzy Janiszewski, "Transition from Constricted to Diffuse Vacuum Arc Modes During High AC Current Interruption", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.27, No.4, pp991-1000, 1999
- [4] M. Bruce Schulman, "Separation of Spiral Contacts and the Motion of Vacuum Arcs at High AC Currents", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol.21, No.5, pp484-488, 1993
- [5] C.H. Flurscheim, et al, Power circuit breaker theory and design, IEE Power Engineering Series 1, 1982