

**4 segment 코일타입 전극구조의 진공 인터럽터에서
접점전극의 슬롯의 길이와 폭이 전극사이의 축자계에 미치는 영향**

김병철, 윤재훈, 박성희, 강성화*, 임기조.
충북대학교, 충청대학*

**Influence of the length and width of the slots of contact electrode
on axial magnetic field at the mid-gap in 4 segment coil type vacuum interrupter**

Byong-Chul KIM, Jae-Hun-YOON, Seong-Hee PARK, Seong-Hwa KANG* and Kee-Jo LIM.
Chungbuk University, Chugcheong College*.

Abstract - Once high current flows through the vacuum interrupter, eddy current occurs due to the time-varying axial magnetic field caused by the current(AC) and it causes a decrease in axial magnetic field generated by current flowing through coil electrode. but if there are slots on contact electrode it is possible to increase the amplitude of axial magnetic field by reducing the influence of eddy current. there has been many studies about the number of slot of the contact electrode[1][2][3]. In this paper, in addition to these previous results we deal with the influence of the length and width of the slots on axial magnetic field at the mid-gap plane in 4 segment coil type vacuum interrupter by using 3D finite element method software.

1. 서 론

전 세계적 전력수요의 급증으로 전력설비가 대용량화되고 있는 가운데 최근에 들어 지구온난화의 주원인인 온실가스에 대한 관심이 커지면서 기존의 SF6가스를 이용한 가스차단기의 대안으로서 진공차단기에 대한 관심도 커지게 되었다. 이 진공차단기의 핵심부품이 바로 진공 인터럽터(vacuum interrupter)인데 이것은 아크를 소호하는 방식에 따라 횡자계(RMF)방식과 축자계(AMF)방식으로 분류할 수 있다. 축자계방식은 전류와 평행한 축자계를 이용하여 아크를 소호하는 방식인데 횡자계방식에 비해 차단능이 우수하여 대전류 차단용으로 사용되고 있다. 아크는 전류영점에서 소호되지만 사고전류와 이로 인해 발생하는 축자계 사이에는 위상차가 반드시 존재한다. 따라서 전류영점에서 간극에 남아있는 자계, 즉 잔류자계가 존재하게 되는데 이것은 전류영점에서 접점전극에 존재하는 와전류에 의해 발생하여 축자계를 감소시키게 된다[4][5]. 그리고 전류가 최대일 때 발생하는 축자계는 아크를 확산시키는데 사용된다. 따라서 본 논문에서는 3차원 상용 유한요소 해석 프로그램을 사용하여 4 segment 코일타입 전극구조의 진공 인터럽터에서 슬롯의 길이와 폭을 변화시켜가며 전류영점일 때와 전류최대일 때 전극사이에서의 자속밀도의 크기와 분포를 비교분석하여 축자계에 대한 슬롯의 길이와 폭의 영향을 파악하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 유한요소법 관련이론

1. 자기 벡터 포텐셜

$$\begin{aligned} \nabla \times H &= J_0 & (1) \\ \nabla \cdot B &= 0 \text{ or } B = \nabla \times A & (2) \\ H &= \nabla B & (3) \\ \nabla \times (\nabla \times A) &= J_0 & (4) \end{aligned}$$

도체에 외부입력전류밀도 J_0 가 주어지면 이 전류의 시간적 변화에 의해 시변자계가 형성되고 이로 인해 도체에 와전류가 발생하고 다시 이 와전류에 의한 자계는 입력전류에 의한 자계에 대해 반대방향으로 작용하여 합성자계를 형성한다. 이때 합성자계를 H 라고 하면 식(4)은 식(5)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \nabla \times (\nabla \times A) &= J_0 + J_e & (5) \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \text{ or } J_e = \sigma E_e & (6) \end{aligned}$$

$$\nabla \times E_e = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times A) \quad (7)$$

$$\nabla \times (E_e + \frac{\partial A}{\partial t}) = 0 \quad (8)$$

식(8)은 보전장인 경우이므로 그 해는 식(9)와 같이 전기스칼라 포텐셜 Φ 의 함수로 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_e &= -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \Phi & (9) \\ J_e &= -\sigma (\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \Phi) & (10) \end{aligned}$$

2. 전류벡터 포텐셜

외부입력전류는 해석 영역 내에서 연속되어야 하므로

$$\nabla \cdot J_0 = 0 \text{ or } J_0 = \nabla \times T \quad (11)$$

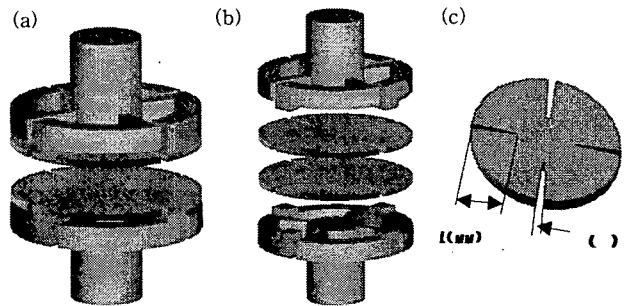
정전계의 경우 $\nabla \times E = 0$ 이고, $J_0 = \sigma E$ 이므로

$$\nabla \times E = \nabla \times (\frac{J_0}{\sigma}) = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \times (\frac{1}{\sigma} \nabla \times T) = 0 \quad (13)$$

v : 자기저항률, σ : 전기전도도, Φ : 전기 스칼라 포텐셜,
 J_0 : 외부입력전류밀도, J_e : 와전류밀도, T : 전류 벡터 포텐셜,
 A : 자기 벡터 포텐셜.

2.2. 3차원 유한요소 해석 모델



<그림 1> 전극구조 (a)전체구조, (b) 분해도, (c)개념도

본 논문의 시뮬레이션은 상용 유한요소 해석프로그램인 Maxwell 3D를 이용하여 계산되었으며 시뮬레이션 모델은 그림1과 같이 슬롯의 개수를 4개일 경우를 선택하였으며, 접점전극의 직경은 80mm, 접점의 두께는 3mm, 전극 간 갭은 10mm인 형태이다. 외부전류(사고전류)인가시 접점전극 사이에서 발생하는 아크 플라즈마는 직경이 접점전극과 동일한 아크주(arc cylinder)의 형태로 가정하여 모델링되었다. 입력전류는 60Hz, 50kA인 사인파형의 교류전류를 사용하였으며 전류가 흐르는 모든 도체에서 와전류(eddy current)의 영향 또한 고려하였다. 그리고 접점전극의 재료로는 현재 진공차단기의 진공 인터럽터의 접점전극재료로 가장 많이 사용되는 CuCr를 사용하였고 Cr의 함유율은 50%인 경우를 선택하였다.

그림1에 나와 있는 전극구조를 사용한 시뮬레이션에 사용된 진공 인터럽터의 전극구성부품 각각의 재료 속성은 <표 1>에 정리를 하였다.

<표 1> 재료속성(material property)

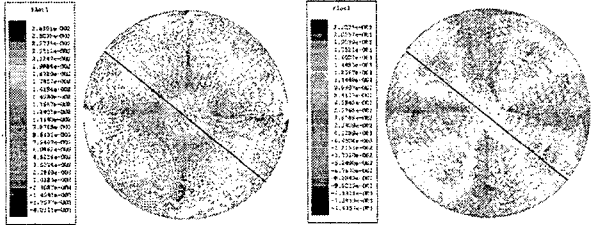
	재료명	도전율[S/m]	비투자율
코일전극	copper	5.8×10^7	1
전도부	copper	5.8×10^7	1
아크주	arc	2800	1
접점전극	CuCr50	5.8×10^6	1
진공	vacuum	0	1

본 논문에서는 4 segment 코일타입인 전극과 연결되어 있는 접점전극 상에 있는 슬롯의 개수가 4개인 경우에서 그림1(c)와 같이 슬롯의 길이와 폭을 변화시켜가며 슬롯의 길이와 폭의 변화에 따른 축자계의 자속밀도의 크기변화를 관찰하여 아래에 있는 그래프와 같은 결과를 얻었다. 단, 슬롯의 폭은 4개의 코일(coil segment)간의 간격과 일치시켜 동시에 변화를 주었으며 슬롯의 길이의 변화시 폭은 5도로 고정시켜 결과를 도출하였다.

2.3 해석 방법

$$B_{critical} = 3.2(I-9)[mT] \quad (14)$$

전류가 최대점일 때의 축자계는 아크를 확산시키는데 사용된다. 위 식은 아크를 확산시킬 수 있는 최소크기의 축자계의 임계치(critical value)를 구하는 식으로서 술만(shulman)이 실험을 통하여 만든 실험식이며 그는 이 임계치 이상의 축자계값을 가지는 영역을 유효영역[effective area]이라고 정의하였다.[6][7]. 전류 최대점에서의 축자계의 크기는 술만의 실험식에 의해 구해진 임계치로서 비교를 하고자 하였으며 전류영점(at current zero)에서의 축자계의 크기는 와전류와 연관시켜 설명하고자 하였다. 본 논문에서는 사고전류를 50kA를 인가하였으므로 식(14)을 통해 축자계의 임계치가 0.131[mT]임을 알았다.

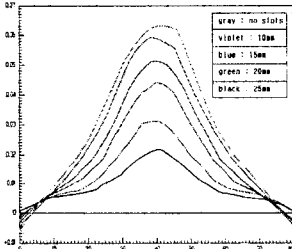


(b) 전류영점에서의 자속밀도분포 (a) 전류최대치에서의 자속밀도분포

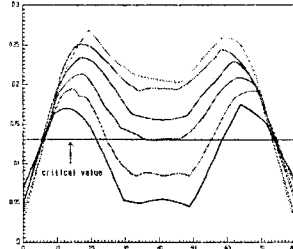
〈그림 2〉 간극에서의 자속밀도분포

전류최대점에서의 자속밀도분포 그래프는 축자계의 최대값을 보기위함이다. 그림2에서와 같이 전류최대점에서 최대자속밀도분포를 갖는 지점에서 2차원의 자속밀도분포를 취득하여 비교하였다. 그리고 전류영점에서의 자속밀도분포 그래프는 원의 중심부에서 최대값을 가지는 등고선 모양을 하고 있으므로 임의의 지점에서 선을 형성하여 그 영역에 한해서 자속밀도분포를 비교분석하였다.

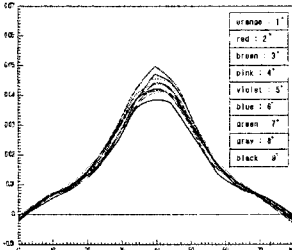
2.4 해석 결과



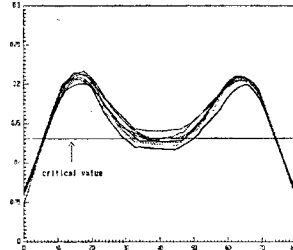
(a) 전류영점에서 슬롯길이 변화시



(b) 전류최대점에서 슬롯길이 변화시



(c) 전류영점에서 슬롯폭 변화시



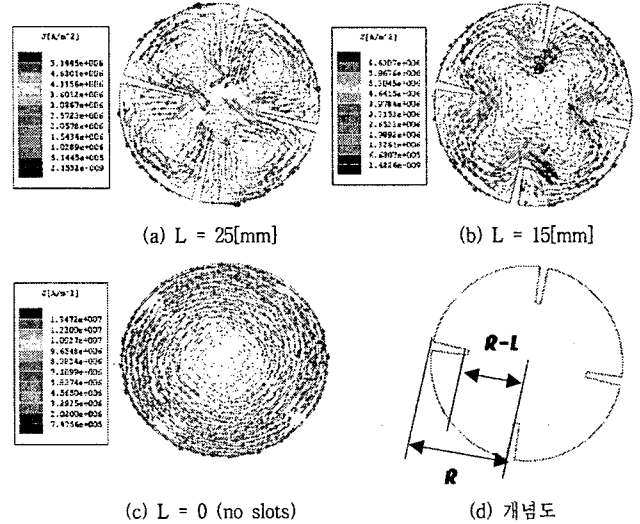
(d) 전류최대점에서 슬롯폭 변화시

〈그림 3〉 자속밀도 분포비교
(a),(b)에서 $\theta = 5^\circ$, (c),(d)에서 $L = 14[\text{mm}]$ 로 고정

시뮬레이션 해석 결과 그림3(a)에서와 같이 전류영점에서 슬롯길이 변화시 슬롯의 길이가 길어짐에 따라 잔류자계(밀도)값이 작아짐을 확인하였다. 그 원인은 그림4와 같이 접점전극의 반경(R)에서 슬롯의 길이(L)를 뺀 만큼의 길이(R-L)가 커짐에 따라 접점전극의 중심을 회전축으로 하여 원주방향(circular)으로 회전하는 전류경로가 증가하게 되고 따라서 그 경로를 따라 흐르는 전류의 밀도도 증가하기 때문이다. 따라서 전류영점에서 이 증가한 와전류에 의해 발생하는 축자계의 크기도 증가하게 되는 것이다. 하지만 전류영점에서 슬롯폭 변화시에 발생하는 잔류자계밀도는 큰 차이는 없지만 그림3(c)에서 보는 바와 같이 슬롯폭이 $1 > 3 > 2 > 4 = 5 > 6 = 7 = 8 > 9[\text{mm}]$ 와 같은 그룹을 형성하여 그 크기를 나타내었다.

그리고 전류최대점에서 슬롯길이 변화시 그림3(b)에서 보는 바와 같이 슬롯의 길이가 거의 14mm이하일 때부터 유효영역(effective area)이 85%정도가 되었다. 따라서 슬롯의 길이가 20[mm], 25[mm]인 경우에는 아크를 확산시키기 위한 축자계의 유효영역이 부족하여 부적절하다는 결론을 내렸다. 이 결과로부터 본 논문에서 아크를 확산시키기 위한 축자계의 유효영역(effective area)이 85%정도가 되는 최소한의 슬롯의 길이를 임계슬롯길이

(critical length of slot)라고 명명하였다. 위 결과로부터 임계슬롯길이는 14[mm]라고 할 수 있으므로 슬롯의 길이가 14[mm]일 때 슬롯의 폭을 변화시켜 슬롯폭의 영향을 알아보았다. 결과는 그림3(d)와 같았으며 $1^\circ 5'$ 까지 임계치 이상을 유지하였으며 $6^\circ 9'$ 일 경우에는 유효영역이 충분하지 않음을 확인하였다.



(a) L = 25[mm]

(b) L = 15[mm]

(c) L = 0 (no slots)

(d) 개념도

〈그림 4〉 전류영점에서 접점전극에 흐르는 와전류

5. 결 론

본 논문에서는 4 segment 코일타입 진공인터럽터를 모델링하여 다른 모든 조건은 동일하게 두고 슬롯의 길이와 폭을 변화시켜가며 축자계에 대한 슬롯의 길이와 폭의 영향에 대해 알아보았다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 전류영점에서 슬롯의 길이가 길어짐에 따라 와전류는 감소하였다. 그 이유는 슬롯의 길이가 늘어남에 따라 접점전극의 중심을 축으로 하여 원주방향으로 회전하는 전류경로가 줄어들었기 때문이다.
2. 전류최대점에서 슬롯의 길이가 14[mm]이하에서 유효영역이 85%정도를 유지하였다. 따라서 본 논문에서 사용된 모델의 경우 슬롯의 길이가 14[mm]일 경우를 슬롯의 임계길이(critical length of slot)라고 명명하였다.
3. 결과2로 임계슬롯길이가 14[mm]임을 확인하여 슬롯의 길이를 14[mm]로 고정시켜 슬롯의 폭을 변화시켜 그 영향을 파악하였는데 그 결과 $1^\circ 5'$ 일 경우에 85%정도의 유효영역(effective area)을 유지하였다.
4. 결과2,3으로부터 만약 이 모델을 가지고 실제 진공 인터럽터를 제작한다면 슬롯의 길이는 14[mm]이하의 범위가 적당하겠으며 슬롯의 폭은 $1^\circ 5'$ 가 적당하다는 결론을 얻었다. 하지만 슬롯의 길이가 0에 가까워질수록 전류영점에서 접점전극 표면에 흐르는 와전류에 의한 잔류자계가 커지므로 이 점을 고려해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] Paul N. Stoving, E. Fred Bestel "finite element analysis of AMF vacuum contacts." IEEE, 1998.
- [2] Yoshihiro Kawase, "Numerical Analysis of Axial Magnetic Field Acting on the Arc in Vacuum Circuit Breakers by 3-D Finite Element Method Taking into Account Eddy Currents." Y. Kawase." IEEE, 1997.
- [3] 하덕용 "중자계형 진공 인터럽터에서 접점전극 슬롯의 영향에 관한 연구", 전기전자재료 2002년 9월호.. "3차원 유한요소해석을 이용한 중자계형 진공 인터럽터의 특성고찰"
- [4] Liu Zhiyuan et al. "Vacuum Interrupter with Cup-Type Electrode-Simulations of 3D Axial Magnetic Field and Eddy Current in the Contact."
- [5] Liu Zhiyuan et al, "Analysis of Axial Magnetic Field Characteristics of Coil Type Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters". IEEE, 2006.
- [6] Xiu Shixin et al, "Analysis of Axial Magnetic Field electrode applied to high voltage Vacuum Interrupters", IEEE, 2006.
- [7] M. B. schulman, "Effect of an Axial Magnetic Field upon the Development of the Vacuum arc between Opening Electric Contacts." IEEE, 1992.