

## 종자계형 진공 인터럽터에서 접점전극 슬릿의 영향에 관한 연구

### A Study on the Effect of the Contact Electrode Slits in the Vacuum Interrupter with Axial Magnetic Field Type

하덕용\*, 강형부\*\*, 최승길\*\*\*, 최경호\*\*\*\*

(Duk-Yong Ha\*, Hyung-Boo Kang\*\*, Seung-Kil Choi\*\*\*, and Kyung-Ho Choi\*\*\*\*)

#### Abstract

This paper deals with the distribution characteristics of the current density and axial magnetic flux density for each slits made on the contact electrode in the vacuum interrupter with axial magnetic field type using 3-dimension finite element analysis. It has been known that the presence of an axial magnetic field parallel to the current flow in the arc plasma can increase the high current breaking capacity of vacuum interrupter by carrying out the arc plasma from constricted mode to diffusion mode. The axial magnetic field is created of itself by current flow in the segments of coil electrode behind the contact electrode. The analyzed results show that if the slits are made in the contact electrode, they can increase the current density and axial magnetic flux density in the contact electrode surface and at the gap distance, which is due to decrease the effect of eddy currents flowing in the contact electrode. The phase shift due to eddy currents, defined as time difference between the maximum value of current and axial magnetic field, is decreased still more by increasing the number of slits made in the contact electrode at the center point of gap distance. These results demonstrate that 3-dimension finite element analysis has a great deal of merits in the development and evaluation of new electrode at the design of vacuum interrupter.

**Key Words** : Vacuum Interrupter, Axial Magnetic Field, Phase Shift, Gap Distance, Slit, Eddy Current

#### 1. 서론

진공 차단기(vacuum circuit breaker : VCB)는 진공을 절연매질로 사용하여 고장전류를 신속하게 자동으로 차단시켜 전력계통 및 계통내의 주요 기기들을 보호할 책무를 가진다. 진공 차단기내의 전류차단부인 진공 인터럽터(vacuum interrupter :

VI)는 접점전극의 간극(gap distance)에서 발생하는 아크 플라즈마(arc plasma)를 진공 중으로 급속하게 확산시키므로 접점전극 표면에 주입되는 아크 에너지를 최소화시켜 신속하게 아크를 소호하는 전극 구조체로서 진공차단기의 핵심 부품이다. 그리고 진공 차단기는 다른 종류의 차단기에 비해 차단성능, 안전성 및 신뢰성이 우수하고 소형, 경량의 장점을 가지고 있기 때문에 현재 배전 전압급의 개폐장치에 널리 보급되어 사용되고 있다[1].

최근 산업의 급격한 발전과 더불어 전력수요의 증대 및 계통부하의 급증으로 인하여 전력설비가 대용량화되고 있는 추세이다. 따라서 차단기의 전류 차단용량 증대 및 여러 가지 성능개선을 위한 연구개발의 필요성이 절실히 요구되어지고 있다.

\* : 한양대학교 전기공학과  
(서울시 성동구 행당동 17)  
Fax: 02-2281-9912  
E-mail : dyha63@hanmir.com

\*\* : 한양대학교 전기전자공학부

\*\*\* : 안산공업대학 전기과

\*\*\*\* : 동아대학교 기계공학과, (주)디엔디이

2002년 6월 24일 접수, 2002년 7월 6일 1차 심사완료

2002년 8월 16 최종 심사완료

진공차단기의 성능을 향상시키기 위해서는 진공 인터럽터에서 아크를 효과적으로 제어하는 기술을 이용하여 전류차단 용량을 증대시키거나, 새로운 접점전극 재료 개발에 의한 저서지(low surge)화를 실현하거나, 진공절연 기술의 개발에 의한 소형화, 고전압화를 이룩하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

진공 차단기는 사고전류를 차단하는 목적을 가지고 있기 때문에 대전류 차단성능은 진공 인터럽터 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 대전류 차단용량을 증대시키기 위해서는 접점전극 간극에서 발생하는 아크 플라즈마를 자계(magnetic field)를 이용하여 제어하는 방법이 매우 효과적이다. 여러 가지 방법이 개발되어 사용되고 있으나, 진공 인터럽터의 접점전극 간극에 형성되는 아크와 평행하게 종자계(axial magnetic field : AMF)를 발생시켜 아크에너지가 접점전극 표면에 균일하게 분포할 수 있도록 설계된 종자계형 진공 인터럽터가 대전류 차단용량 증대 및 소형화에 매우 유리하다 [2]. 그러므로 종자계형 진공 인터럽터에서 전극의 형상에 의해 결정되는 전류밀도와 종자계 자속밀도의 특성은 대전류 차단성능 향상에 있어 가장 큰 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다. 과거에는 진공 인터럽터의 접점전극 간극에서 발생하는 아크 플라즈마의 종자계 자속밀도 특성 해석이 실험적 방법에 의해 이루어짐으로써 정량적인 해석이 어려웠으나[3-5], 현재에는 컴퓨터 기술의 발달로 수치 해석 방법을 이용하여 이의 특성에 대한 정량적 해석이 가능해 졌다[6-9].

본 논문에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 6.0 을 이용하여 복잡한 전극 형상을 가진 종자계형 진공 인터럽터에 사인 반파의 고장전류를 인가시켜 접점전극 내에서 슬릿별 전류밀도 및 종자계 자속밀도의 크기와 분포, 접점전극 간극에서 전극 반경에 대한 슬릿별 종자계 자속밀도의 크기와 분포 그리고 간극의 중심에서 슬릿별로 인가 전류와 종자계 자속밀도 사이의 위상차동의 특성을 3 차원 유한 요소 법으로 시뮬레이션 하여 해석하였다.

## 2. 종자계형 진공인터럽터의 차단원리 및 해석이론

### 2.1 차단원리

그림 1은 접점전극(contact electrode)에 4개의 슬릿(slot)을 만든 3차원 종자계형 진공 인터럽터의

구조와 차단전류의 흐름을 나타내고 있다. 차단전류가 전류 전도부(rod)로부터 접점전극으로 흐르면, 접점전극 뒤에 위치하고 있는 코일전극(coil electrode)에서 전류는 4개의 원호(segment)로 균일하게 분배되어지고, 이 원주방향의 전류로 인해 종자계(AMF)가 발생된다. 또한, 진공 인터럽터에 차단전류가 흐르게 되면 접점전극과 전극의 구성 요소들에 와전류(eddy current)가 유도되기 때문에, 코일 전극에 의해 생성된 종자계는 와전류의 자계 영향으로 인해 감소하게된다. 그래서 접점전극에 슬릿을 만들면 이러한 와전류에 의한 영향을 최소화시켜 종자계의 세기를 증가시킬 뿐 아니라 균일한 분포를 얻는 것이 가능해진다. 그렇게 함으로써 진공 차단기는 대전류 차단용량 증가와 함께 전류 차단에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 그리고 접점전극사이의 진공 중에서는 전극재료의 용융으로 인하여 생성되는 금속증기(metal vapor) 들에 의해 아크 플라즈마가 발생하게 된다. 따라서 진공 차단기에서는 위의 종자계를 이용하여 이 아크 플라즈마를 얼마나 효과적으로 제어하는가에 따라 대전류 차단에 대한 진공 인터럽터의 성능개선이 이루어지게 된다.

그림 2는 진공 인터럽터의 접점전극 간극에서 발생한 아크를 소호 하여 전류를 차단하는 원리를 설명하고 있다. 고장전류가 발생하여 접점전극을 분리시키면, 접점전극 간극에서는 전극물질(CuCr)의 용융에 의해 생성되어진 용융금속브릿지가 파

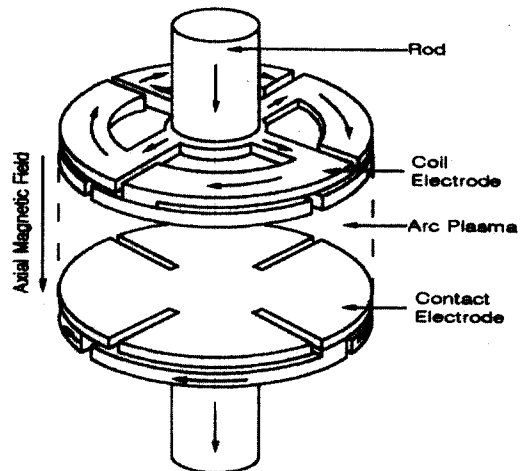


그림 1. 종자계형 진공 인터럽터 구조.

Fig. 1. Axial magnetic field type vacuum interrupter construction.

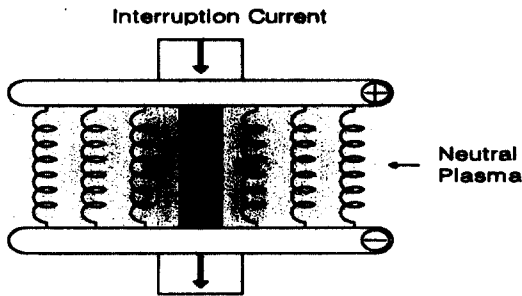


그림 2. 점접전극 간극에서 전류 차단 현상  
 Fig. 2. The phenomenon of current interruption at the gap distance

열됨과 동시에 큰 압력의 수축(constricted) 아크인 음극점(cathode spot)이 형성된다. 이 아크 플라즈마 영역에 코일 전극에 의해 생성된 종자계가 평행하게 인가되면, 음극에서 방사되는 전자는 종자계에 의해 포획(trap)되어 라무어(Larmor)반경을 가지고 나선형궤도(spiral orbit) 운동을 하면서 양극으로 이동하여 제한되어진다. 전자는 종자계에 의해 포획되어 제한되어지므로 이로 인해 아크영역에 전자가 풍부한 영역이 형성되어진다. 아크 영역내의 이온은 전자에 의해 끌어당겨지면서 방사상의 전기(radial electric field)를 발생시켜 점접전극의 간극 바깥쪽으로 향하는 이온흐름을 저지시켜 마침내 수많은 원통형(cylinder type)의 아크기둥(column)들을 형성한다. 이 아크기둥들은 기둥내에 존재하는 이온의 척력(repulsion force) 때문에 서로 분리되어져서 점접전극의 표면에 균일하게 분포함으로써 전극의 국소적 용융을 방지한다. 아크기둥들은 점접전극 간극 내에서 전류전도 경로인 플라즈마를 통해 확장을 시작함에 따라, 아크기둥의 부피 증가와 아크로부터 주변의 진공 중으로 금속증기가 계속적으로 손실됨으로 인하여 아크기둥의 압력은 영(zero)으로 접근하고, 음극에 단위 면적당 주입되는 에너지는 급격히 감소하게 된다. 그렇게 됨으로써 금속증기의 발생도 또한 급격히 감소하게 되어 아크는 수축 아크 모드에서 확산(diffusion) 아크 모드로 이행하게 된다. 이때 교류의 고장전류는 반주기(half cycle)마다 전류 영점이 나타나는데, 이 전류 영점 순간에 더 이상의 금속증기 발생이 없는 확산 아크가 되면 아크 플라즈마는 소멸되고 고장전류를 차단하게 된다[10].

2.2 해석이론

종자계형 진공 인터럽터에서 외부로부터 입력되

는 전류밀도  $J_o$ 와 자속밀도  $B$ 의 분포를 얻기 위해서는 전류 벡터 포텐셜법과 자기 벡터 포텐셜법을 이용하며, 자속밀도  $B$ 의 분포 해석 시에는 반드시 와전류를 포함하는 식이 고려되어야 한다. 도체와 아크를 포함하는 전류전도 영역에서 전류밀도 분포  $J_o$ 는 다음 식 (1)을 풀어 얻을 수 있다.

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\sigma} \text{rot } T\right) = 0 \quad J_o = \text{rot } T \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 전류 벡터 포텐셜이고  $\sigma$ 는 전기전도도이다. 전류 분포의 연속성은 식 (2)를 만족시켜야 한다.

$$\text{div } J_o = \text{div}(\text{rot } T) = 0 \quad (2)$$

전류 벡터 포텐셜  $T$ 의 경계 조건은 식 (3)을 만족시켜야 한다.

$$\oint T ds = I \quad (3)$$

여기서  $I$ 는 도체를 통해 인가되는 전류(total current)이다. 자속밀도  $B$ 의 분포는 와전류를 고려하여 다음 식들로부터 구하여진다[11].

$$\text{rot}(\nu \text{rot } A) = J_o + J_e \quad (4)$$

$$B = \text{rot } A \quad (5)$$

$$J_e = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (6)$$

여기서  $\nu$ 는 자기저항률 ( $= \frac{1}{\mu}$ ),  $A$ 는 자기벡터 포텐셜,  $J_o$ 는 외부입력 전류밀도이고,  $J_e$ 는 와전류 밀도이다.

3. 해석 및 결과고찰

3.1 3차원 유한요소 해석 모델

본 해석에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 Ansys 6.0 을 이용하여 종자계형 진공 인터럽터를 3 차원으로 모델링 하였으며, 점접전극의 직경은 70 mm, 점접전극의 간극은 10 mm 로 일정하게 고정시켰다. 그리고 전류 전도부에 30 KA RMS 50 Hz의 사인 반파 전류를 인가하여 전류밀도와 자속밀도에 대한 과도해석을 실시하였다. 해석에

사용된 종자계형 진공 인터럽터를 구성하는 전극 모델의 각 부분별 물질 특성을 표 1에 나타내었다. 외부전류 인가시 접점전극의 간극에서 발생하는 아크 플라즈마의 직경은 접점전극의 직경과 동일하고, 일정한 도전을 값을 가진 동질의 실린더 도체로 가정하여 각 부분별 전류밀도 및 자속밀도 크기와 분포를 해석하였다. 그림 3은 접점전극에 4개의 슬릿을 만든 3차원 종자계형 진공 인터럽터의 유한요소 해석 모델을 나타낸 것이며 아크 플라즈마 영역과 진공에 대한 요소분할은 나타내지 않았다.

표 1. 물질특성.

Table 1. Material properties.

구분	물질명	도전율[S/m]	비투자율
접점전극	CuCr(75/25)	5.5 E6	1
코일전극	Cu	5.5 E7	1
아크	Arc	2.0 E3	1
진공	Vacuum	1.0 E-9	1

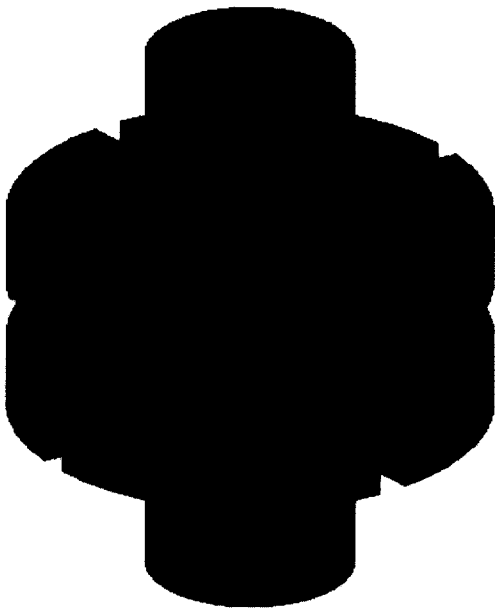


그림 3. 종자계형 진공 인터럽터의 3차원 유한요소 모델.

Fig. 3. 3-D FEM model of vacuum interrupter with axial magnetic field type.

### 3.2 접점전극 에서 전류밀도와 종자계 자속밀도 해석

그림 1에서 보듯이 전류 전도부를 거쳐 코일전극과 접점전극의 접촉면을 통해 접점전극 쪽으로 흘러 들어온 전류는 접점전극의 모든 방향으로 분할되어 흐르게 된다. 이때 교류의 사인 반과 고장 전류가 인가되는 위쪽의 접점전극(양극) 표면에서 전류치가 피크값( $t=5 \text{ ms}$ )일 때 접점전극에서 슬릿의 개수 변화에 따른 전류밀도와 종자계 자속밀도의 분포특성을 그림 4, 그림 5 및 그림 6에서 보여 주고 있다. 여기서 슬릿의 길이는 접점전극 반경(radius)의 66% 이고 슬릿의 폭은 최대 3 mm 이다. 그리고 3차원 유한요소해석에서 슬릿이 형성된 부분의 요소 성질은 진공으로 간주하여 해석을 실시하였다.

그림 4는 접점전극에 슬릿이 없을 때 전류밀도 벡터도와 종자계 자속밀도 분포도를 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 전류는 접점전극의 표면에서 모든 방향으로 분할되어 흐르게 되며, 이 전류 중에서 일부분은 원주방향의 코일전극에 흐르는 전류 방향과는 반대로 되어지는 경우 혹은 동일하게 되어지는 경우가 있게된다. 그러면 코일전극의 전류 흐름에 의해 생성된 종자계 자속밀도는 접점전극에서 전류의 와전류 현상 영향으로 인해 감소 또는 증가하게된다. 그림 4(b)에서 접점전극 4분면 중심에 위치한 A부분은 약 298 mT의 최대 자속밀도 값을 가지는데, 코일전극의 전류 흐름과 접점전극의 전류 흐름에 의해 발생된 자속이 서로 중첩되어 증가함으로써 나타난다. 즉 이 부분에서 코일전극에서의 전류 흐름방향과 접점전극에서의 전류 흐름방향이 서로 같아지므로 인해 나타난 현상이다. 이와 반대로 접점전극의 가장자리인 B부분은 이들의 전류 흐름방향이 반대로 되어져 자속이 서로 상쇄되어 감소함으로써 나타나게 되며, 이 부분은 코일전극과 접점전극이 서로 접촉하여 전류가 흐르는 면이었다[9].

그림 5는 접점전극에 슬릿이 4개 있을 때 전류밀도 벡터도와 종자계 자속밀도 분포도를 나타내고 있다. 접점전극에 흐르는 전류는 슬릿이 존재하므로 인해 전류의 흐름이 그림 4(a)의 슬릿이 없는 경우와는 전혀 다른 모습을 보이게 된다. 그림 5(a)에서 보듯이 전류는 슬릿을 기준으로 코일전극과 접점전극의 접촉면에서부터 접점전극의 한쪽방향으로만 흐르게 됨으로써 와전류 영향이 감소되어지고 전류밀도도 증가함을 알 수 있다. 그림 5(b)에서 종자계 자속밀도 분포는 그림 5(a)의 접

접점극에서 한쪽방향의 전류 흐름과 코일전극의 전류 흐름방향이 같아지므로 인해 코일전극과 접점전극의 전류흐름에 의해 발생하는 자속밀도가 증첩되어져서 증가하고 슬릿 끝 부분에 국부적으로 약 421 mT 정도의 최대값을 갖게 된다. 또한 전체적인 종자계 자속밀도는 접점전극에 슬릿이 없는 경우인 그림 4(b)에 비하여 자속밀도의 크기 면에서 훨씬 증가하였으며 균일한 분포를 얻을 수 있었다.

그림 6은 접점전극에 슬릿이 8개일 경우에 대한 전류밀도 벡터도와 종자계 자속밀도 분포도를 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 보듯이 슬릿의 개수를 8개로 증가시켰을 때 그림 5(a)에서 얻은 결과와 비교하여 보면 접점전극에서 전류는 방사상(radial) 방향으로만 흐르므로 와전류 현상은 훨씬 감소되어지고 전류 밀도도 더욱 증가하는 모습을 보이고 있다. 그림 6(b)의 종자계 자속밀도 분포를 보면 4개의 슬릿 끝 부분에서 국부적으로 약 525 mT 정도의 최대 자속밀도값을 가지나, 또 다른 4개의 슬릿에서는 자속밀도가 급격하게 감소되어진다. 그래서 자속밀도 분포의 균일도(uniformity)는 그림 5(b)의 경우에 비해 매우 현저하게 저하되어지는 모습을 볼 수 있었다.

### 3.3 접점전극 간극에서 종자계 자속밀도 해석

그림 7은 인가되는 사인 반파 전류가 상승하는 과정인  $t=2$  ms 일 때, 접점전극 간극의 아크영역 중앙 면(삽입된 그림의 일점쇄선)에서 슬릿개수별로 전극 반경에 따른 종자계 자속밀도  $B_z$ 의 분포를 나타내었다. 접점전극 간극의 가장자리 부분에서는 접점전극에 만들어진 슬릿의 개수에 무관하게 자속밀도  $B_z$ 는 거의 영에 가까운 값을 가지나 간극의 축 중심으로 이동할수록 자속밀도는 증가하는 경향을 보인다. 그러나 축 중심 주위에서 자속밀도가 감소하는데 이는 접점전극과 전극의 구성 요소들에 의해 발생한 와전류의 영향으로 인하여 종자계(AMF) 자속이 상쇄되어 나타난 현상이다. 슬릿이 없는 경우 간극의 축 중심에서 자속밀도  $B_z$ 는 약 83 mT 정도의 값을 가지며, 슬릿이 4개인 경우에는 2배 증가한 약 160 mT 정도의 자속밀도 값을 가진다. 그러나 슬릿이 8개인 경우에는 접점전극에서 방사상 방향으로 흐르는 전류의 영향으로 인해 4개 슬릿에 비해 훨씬 감소한 116 mT 정도의 자속밀도 값을 가지게 된다. 자속밀도  $B_z$ 는 슬릿의 개수와는 무관하게 축 중심을 기준

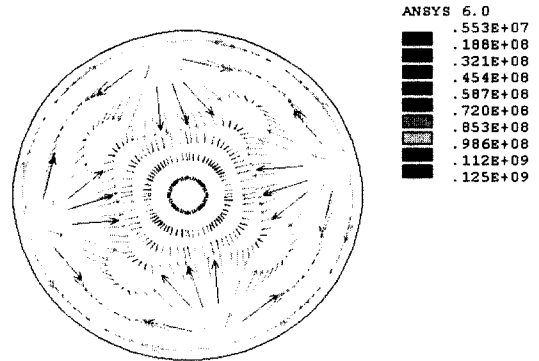


그림 4.(a) 접점전극 표면에서 전류밀도(슬릿=0 개).  
Fig. 4.(a) Current density on the contact electrode surface(slits=0 EA).

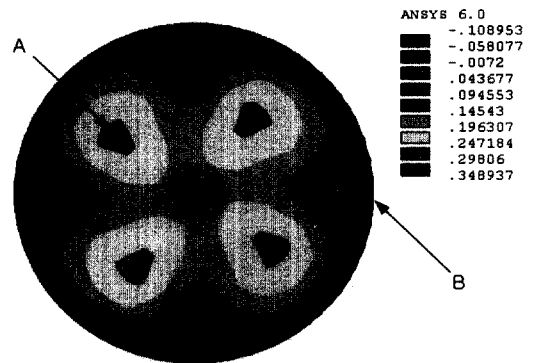


그림 4.(b) 접점전극 표면에서 종자계 자속밀도(슬릿=0 개).  
Fig. 4.(b) AMF flux density on the contact electrode surface(slits=0 EA).

으로 대칭성을 보이고 있는데, 이는 그림 1에서 보듯이 종자계형 진공 인터럽터 구조의 대칭성에 의해 기인된 것으로써 그 중에서도 특히 코일 전극의 대칭성에 크게 영향을 받았다.

그림 8은 인가되는 사인 반파 전류치가 피크값( $t=5$  ms)일 때, 접점전극 간극의 아크영역 중앙 면(삽입된 그림의 일점쇄선)에서 슬릿개수별로 전극 반경에 따른 종자계 자속밀도  $B_z$ 의 분포를 나타내고 있다. 그림 7과 같이 접점전극 간극의 가장자리 부분에서는 접점전극에 만들어진 슬릿의 개수에 무관하게 자속밀도  $B_z$ 는 거의 영에 가까운 값을 가지나 간극의 축 중심으로 이동할수록 자속밀도는 증가하는 경향을 보인다.

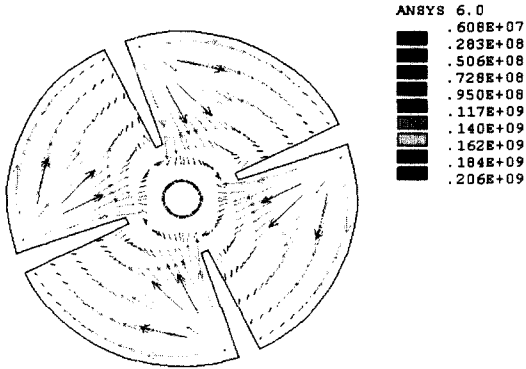


그림 5.(a) 접점전극 표면에서 전류밀도(슬릿=4개).  
Fig. 5.(a) Current density on the contact electrode surface(slits=4 EA).

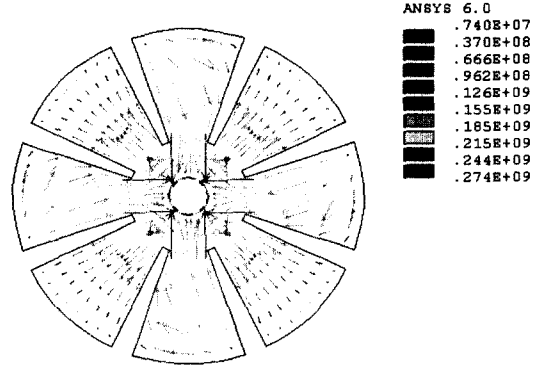


그림 6.(a) 접점전극 표면에서 전류밀도(슬릿=8개).  
Fig. 6.(a) Current density on the contact electrode surface(slits=8 EA).

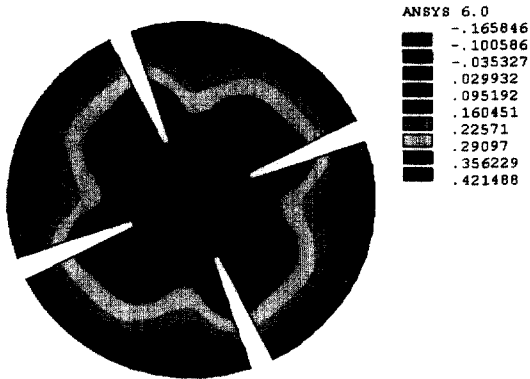


그림 5.(b) 접점전극 표면에서 종자계 자속밀도(슬릿=4 개).  
Fig. 5.(b) AMF flux density on the contact electrode surface(slits=4 EA).

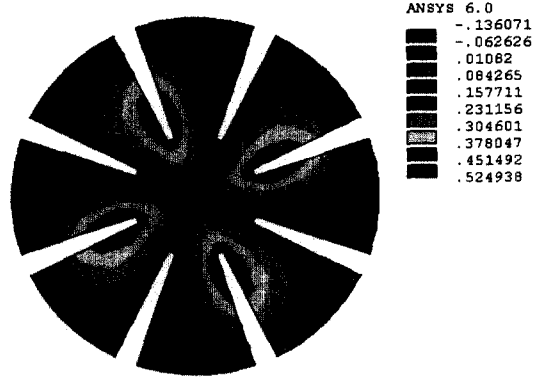


그림 6.(b) 접점전극 표면에서 종자계 자속밀도(슬릿=8 개).  
Fig. 6.(b) AMF flux density on the contact electrode surface(slits=8 EA).

그러나 축 중심 주위에서는 그림 7과는 달리 자속 밀도가 평탄하여지는데 이는 와전류의 영향이 감소되어지므로 인해 일어난 현상이다. 그리고 그림 7에 비하여 전류가 증가함으로써 전반적으로 자속 밀도도 증가하였다. 슬릿이 없을 때 간극의 축 중심에서 자속밀도  $B_z$ 는 약 198 mT 정도의 값을 가지며, 슬릿이 4개인 경우에는 1.7배 증가한 약 343 mT 정도의 자속밀도 값을 가진다. 그러나 슬릿이 8개인 경우에는 그림 6(a)에서 보여진 것과 같이 접점전극에서 방사상으로 흐르는 전류의 영향으로 인해 4개 슬릿에 비해 훨씬 감소한 약 251 mT 정도의 자속밀도 값을 가지게된다. 상기의 결과들에

서 보면 본 논문의 유한 요소 해석에 사용된 진공 인터럽터는 그림 1에서 보듯이 코일전극의 원호가 4개이었다. 그리고 접점전극의 슬릿이 또한 4개일 때 종자계 자속밀도  $B_z$  크기가 최대로 됨을 알 수 있었다. 즉 슬릿이 존재하지 않을 때는 접점전극과 전극의 구성요소들에 의해서 발생하는 와전류의 영향으로 인해 종자계 자속밀도 크기가 감소된다. 슬릿이 8개인 경우에는 와전류에 의한 영향이 슬릿이 4개인 경우에 비해 훨씬 감소되어지므로 종자계 자속밀도  $B_z$ 의 크기가 다른 경우와 비교하여 최대가 되어야 하나 그렇지 못하다. 왜 이런 현상

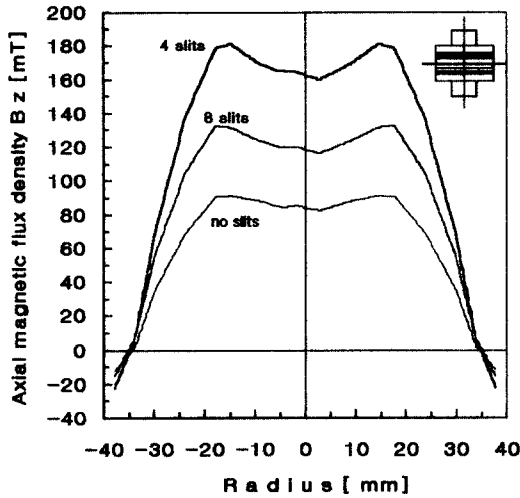


그림 7. 간극에서 접점전극 반경에 대한 슬릿별 종자계 자속밀도 분포( $t=2$  ms).

Fig. 7. Distribution of the AMF flux density vs. contact electrode radius for each slits at the gap distance( $t=2$  ms).

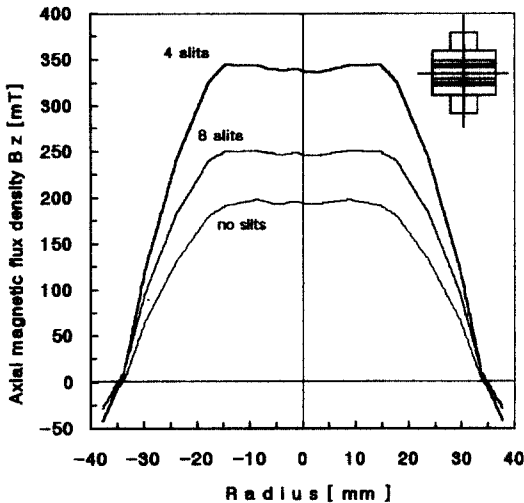


그림 8. 간극에서 접점전극 반경에 대한 슬릿별 종자계 자속밀도 분포( $t=5$  ms).

Fig. 8. Distribution of the AMF flux density vs. contact electrode radius for each slits at the gap distance( $t=5$  ms).

이 발생하는지에 대한 정확한 해석은 현재로서는 존재하지 않고 있으며 향후 이 현상의 원인을 규명할 필요가 있다.

그림 9는 접점전극 간극의 중심점(center point)에서 슬릿 개수별로 시간의 변화에 따른 종자계 자속밀도  $B_z$ 의 분포를 보여주고 있다. 50 Hz 주파수를 가진 사인 반파의 인가전류에서는 시간이 5 ms 가될 때 전류치가 최대값이 된다. 그러나 자속밀도  $B_z$ 는 이때 최대값을 가지지 않음으로써 인가 전류 최대값과 자속밀도 최대값 사이의 시간차로서 정의되어지는 위상차가 발생하게 된다. 그림 9에서 보듯이 본 해석에서는 슬릿이 없을 때에는 약 1 ms, 슬릿이 4개 일 경우에는 약 0.75 ms, 슬릿이 8개 일 경우에는 약 0.5 ms 정도의 위상차가 발생하였다. 그리고 인가 전류가 영이 되는 순간( $t=10$ ms)에 나타나는 잔류자계(residual magnetic field)는 49~51 mT 잔존하고 있으며 슬릿개수 변화에 따른 차이는 거의 없음을 알 수 있었다. 위상차가 발생하는 이유는 접점전극과 전극의 구성요소들에 흐르는 와전류의 영향으로 인해 기인된 것이며, 접점전극에 슬릿을 만들면 이 와전류에 의한 영향을 감소시킬 수 있다. 그리고 슬릿의 개수를 증가시키면 위상차가 더욱 더 감소되어지는 것을 알 수 있었다.

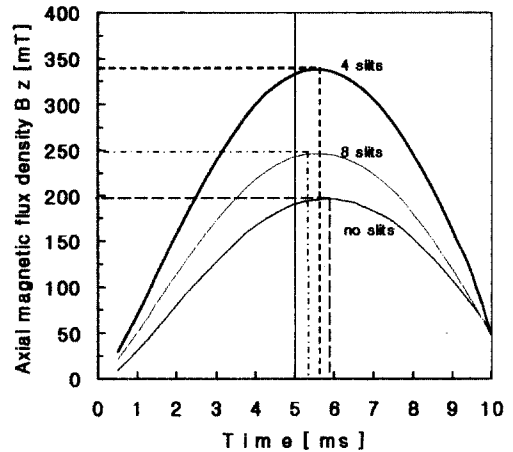


그림 9. 간극의 중심에서 시간에 대한 슬릿별 종자계 자속밀도 분포.

Fig. 9. Distribution of the AMF flux density vs. time for each slits at the center point of the gap distance.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 종자계형 진공 인터럽터를 상용 해석 프로그램인 Ansys 6.0 을 사용하여 3 차원으로 모델링하고 30 KA RMS 50 Hz의 사인 반파 전류를 인가시킨 후 3 차원 유한 요소 해석을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 접점전극에 슬릿을 만들면 접점전극 표면에서 전류밀도를 증가시킬 뿐 아니라 종자계 자속밀도  $B_z$ 를 증가시킬 수 있었으며, 슬릿이 4개인 경우가 슬릿이 없을 때와 슬릿이 8개인 경우에 비해 종자계 자속밀도  $B_z$ 가 최대로 됨을 알 수 있었다.
2. 접점전극 간극의 중앙 면에서 전극 반경에 따른 자속 분포를 보면 인가전류가 상승할 때 ( $t=2$  ms)나, 피크값 일 때( $t=5$  ms) 종자계 자속밀도  $B_z$ 의 크기는 4 slits > 8 slits > no slits 의 순서이었다.
3. 접점전극 간극의 중심점에서 인가전류와 종자계 자속밀도  $B_z$  사이의 위상차는 접점전극에 만드는 슬릿개수가 증가하면 더욱 더 감소하게 된다.
4. 인가 전류가 영(zero)이 되는 순간( $t=10$  ms)에 나타나는 잔류 자계는 슬릿개수 변화에 따른 차이는 거의 없음을 알 수 있었다.

종자계형 진공 인터럽터에 대전류 차단용량을 증대시키기 위하여 대전류 인가 실험을 실시하면, 엄청난 경비와 많은 시간이 소요된다. 그러나 본 논문과 같이 3 차원 유한요소 해석을 실시하여 얻은 결과를 종자계형 진공 인터럽터 설계에 적용시키면, 진공 차단기의 성능 개선을 위한 새로운 전극형상의 개발과 평가에 매우 큰 장점을 가질 수 있다고 사료된다.

#### 참고 문헌

- [1] Satoru Yanabu and Eiji Kaneko, "Research and development of axial magnetic field electrode and its application", ISDEIV, 18th, p. 1, 1998.
- [2] S. Yanabu, S. Souma, T. Tamagawa, S. Yamashita, and T. Tsutsumi, "Vacuum arc under an axial magnetic field and its interrupting ability", PROC. IEE, Vol. 126,

p. 313, 1979.

- [3] S. Yanabu, E. Kaneko, H. Okumura, and T. Aiyoshi, "Novel electrode structure of vacuum interrupter and its practical application", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No. 4, p. 1966, 1981.
- [4] S. Yanabu, E. Kaneko, H. Koike, T. Tsutsumi, and T. Tamagawa, "The application of axial magnetic field electrodes to vacuum circuit breakers", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-102, No. 5, p. 1395, 1983.
- [5] K. Watanabe, E. Kaneko, and S. Yanabu, "Technological progress of axial magnetic field vacuum interrupters", ISDEIV, 17th, p. 231, 1996.
- [6] B. Fenski and M. Lindmayer, "Vacuum interrupters with axial field contacts 3-d finite element simulation and switching experiments", ISDEIV, 17th, p. 337, 1996.
- [7] Paul N. Stoving and E. Fred Bestel, "Finite element analysis of AMF vacuum contacts", ISDEIV, 18th, p. 522, 1998.
- [8] K. Nitta, K. Watanabe, K. Kagenaga, T. Mori, E. Kaneko, H. Somei, and H. Takahashi, "Three-dimensional magnetic field analysis of electrodes for VCBs", IEEE trans. on PD, Vol. 12, p. 1520, 1997.
- [9] 하덕용, 강형부, "3차원 유한요소해석을 이용한 종자계형 진공 인터럽터의 특성고찰", 전기전자재료학회논문지, 15권, 5호, p. 460, 2002.
- [10] M. Bruce Schulman and John. A. Bindas, "Evaluation of AC axial magnetic fields needed to prevent anode spots in vacuum arcs between opening contacts", IEEE Transaction on Components, Packaging, and Manufacturing Technology - Part A, Vol. 17, No. 1, p. 53, 1994.
- [11] Yoshihiro Kawase, Hiroaki Inoue, and Tomohiro Ota, "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", IEEE trans. on Magnetics, Vol. 34, p. 2668, 1998.