

## 아크이미지, 아크전압과 유한요소해석을 통한 나선형 VI 전극 간의 비틀림 각도에 따른 아크거동분석

### Analysis of Arc Behavior as a Function of Twisting Angle Between Contacts in Spiral Type VI by Means of Arc Image, Arc Voltage and FEM

김병철<sup>1</sup>, 박홍태<sup>2</sup>, 손진우<sup>2</sup>, 임기조<sup>1,a</sup>

(Byoung-Chul Kim<sup>1</sup>, Hong-Tae Park<sup>2</sup>, Jin-Woo Son<sup>2</sup>, and Kee-Joe Lim<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

In this paper arc behavior in spiral type vacuum interrupter(VI) was analyzed by means of arc images, arc voltages and finite element method(FEM). As a result of experiment, the difference of arc voltage was observed under different twisting angles. It was found that the reason of the difference was the difference of arc resistance from simultaneous analysis of arc images and arc voltages, and the difference of arc resistance was explained by Lorentz force calculation with FEM. And the results of calculation were sufficient to explain the experimental results.

**Key Words** : Vacuum interrupter(VI), Radial magnetic field(RMF), Spiral type, Finite element method(FEM), Arc voltage, Arc behavior

#### 1. 서론

현재 국내외적으로 지구온난화와 관련하여 ‘친환경’이라는 산업트렌드가 강조되고 있다. 이 트렌드는 아크소호특성은 탁월하지만 온실가스 중의 하나인  $SF_6$  가스를 사용해 온 차단기분야에도 영향을 미쳤다. 따라서 친환경적인 진공차단기(VCB: vacuum circuit breaker)가  $SF_6$  가스를 사용해 온 가스차단기(GCB: gas circuit breaker)를 점차 대체해가고 있음도 널리 알려진 사실이다.

차단기의 주 임무는 고장전류를 차단하는 것이다. 진공인터럽터(VI: vacuum interrupter)는 고장전류의 차단과 관련된 진공차단기의 핵심부이다. 고장전류가 발생하면 전극이 분리되면서 아크가 발생한다. 대전류 진공아크를 소호하기 위해서는

아크가 소호되는 시점인 전류영점보다 충분한 시간 이전에 확산아크(DA: diffuse arc)로 전환시켜야 한다[1,2]. DA로의 전환은 아크소호를 위한 최적의 환경을 조성해주는 것이라고 생각하면 그 이해가 쉽다. 또한 이 과정을 아크제어라고 한다. 아크를 제어하는 방법에는 크게 횡자계(RMF: radial magnetic field) 방식과 축자계(AMF: Axial magnetic field) 방식이 있다. 아크제어의 궁극적인 목적은 고온의 아크로부터 전극이 받는 열적 스트레스를 완화시켜 이에 의한 전극의 용융 및 손상을 방지하는 것이다. 일반적으로 AMF 방식이 차단용량이 크다고 알려져 있다. 하지만 복잡한 전극 구조로 인해 생산단가가 높으며 전류가 흐를 때 열 발생량이 많다. 반면 RMF 방식의 나선형(spiral type) 전극은 구조가 단순하여 제조단가도 저렴할 뿐만 아니라 그 차단용량도 점진적으로 증가하고 있어 적용범위가 확장되고 있다. AMF 방식의 VI전극의 차단용량이 더 크지만 RMF 방식의 VI적용범위를 확장시켜 두 방식이 중첩되는 적용범위에서 RMF 방식의 우위를 점할 수 있다.

현재 국내 VI 관련 논문은 거의 AMF 방식의 VI 전극에 관한 논문들이며 그 내용 또한 실험을

1. 충북대학교 전기공학과 전기재료연구소  
(충북 청주시 흥덕구 개신동 12)

2. LS산전(주) 전력연구소

a. Corresponding Author : kjjim@chungbuk.ac.kr

접수일자 : 2009. 1. 8

1차 심사 : 2009. 1. 23

심사완료 : 2009. 3. 23

통한 것이 아닌 유한요소해석을 다룬 논문들이 많다[3,4]. AMF 방식은 전극의 분리와 동시에 발생한 아크를 AMF의 크기에 비례[5]하여 핀치효과(pinch effect)에 의한 아크수축을 방해하여 DA로 바로 전환시켜 아크에너지를 전극표면상에 분산시켜 접점손상을 최소화시키는 방식이다. 단, 이 방식에서는 마주보는 전극간의 전체면적에 걸쳐 아크가 DA상태를 유지하고 있는 것이 아니라 유효면적(effective area: 아크를 DA상태로 유지하는데 필요한 최소한의 자속밀도 이상의 영역)이라는 범위안에서 아크가 DA상태를 유지한다(그림 4). AMF의 방향은 말 그대로 축방향이므로 그 크기만 고려하면 되므로 컴퓨터 시뮬레이션도 비교적 용이하다. 또한 아크의 상태천이과정이 복잡하지 않다. 따라서 해외에서 이루어진 실험논문 등을 인용하여 해석위주로 연구가 진행된 것으로 판단된다. 국내 학계에 실험을 통한 논문이 많지 않다는 것은 아크소호메카니즘에 대한 선행연구 분석 및 연구가 활발하지 않았음을 의미한다.

반면 RMF 방식은 핀치효과에 의해 수축된 아크를 로렌츠력에 의해 전극표면 위를 움직여 전극과 아크가 맞는 부분인 아크 근(arc root)(그림 3)을 통하여 전극으로 유입되는 에너지를 전극표면에 분산시켜 전극의 용융에 의한 전극손상을 최소화시키는 방식이다. 따라서 아크가 동적이며 메카니즘이 복잡하여 컴퓨터를 이용한 해석도 쉽지 않을 뿐더러 아크천이과정 각 단계별 아크상태에 대한 이해도 선행되어야 한다. 또한 차단시험은 그 실험장비자체도 고가이고 국내시설도 많지 않아 일부 기업을 제외한 국내학계에서는 실험을 통한 연구가 미미했으리라 판단된다. 하지만 전 세계적으로 대두되고 있는 친환경 트렌드에 맞춰 세계 VCB시장이 커짐에 따라 좀 더 고성능의 VCB개발을 위한 VI연구가 활발히 진행되어야 한다고 판단된다. VI 내부의 아크거동에 미치는 인자에는 접점재료와 VI 용기내부의 진공도 이외에도 전극의 직경[5], 실드[6,7], 전극의 분리속도[8], 최종 극간거리[8] 등이 있다. 본 연구에서는 RMF 방식의 나선형 VI 전극을 대상으로 아크전압, 아크이미지, 유한요소해석 등의 방법을 사용하여 두 전극간의 비틀림 각도에 따른 아크거동을 비교분석하였다.

## 2. 이론

### 2.1 횡자계 방식과 축자계 방식의 차이

양극점(AS: anode spot)의 형성유무는 AMF 방

식과 RMF 방식을 구분한다. 그림 1은 RMF 방식에서의 아크상태천이과정을 나타낸 그림이다. 양극점은 아크천이과정상 원통형 아크(CA: columnar arc)의 바로 전 단계이다. 이 상태에서 CA로의 발전과정에서 전극손상이 가장 심하다. AMF 방식에서는 이를 사전에 형성하지 못하게 하여 아크를 DA로 바로 전환시킨다. 일반적으로 DA에서 아크 전압은 평탄하다(그림 2). 반면 RMF 방식은 양극점의 형성에 의한 CA의 형성(그림 1)을 허용하되 그것을 극간에 존재하는 아크와 전극 고유의 구조를 따라 전류가 흐를 때 발생하는 로렌츠력에 의해 신속하게 움직여 양극점이 받는 평균 열적 스트레스를 제한한다. 이로써 전류가 전류영점에 도달할 때까지 아크 근(arc root)(그림 3)을 통하여 전극으로 유입되는 단위 시간당 에너지를 효과적으로 제한하여 CA를 유지시키기 위한 금속증기의 확보를 방해하여 DA로의 전환을 유도한다. 그림 4는 두 아크제어방식에서의 아크근을 보여주고 있다.

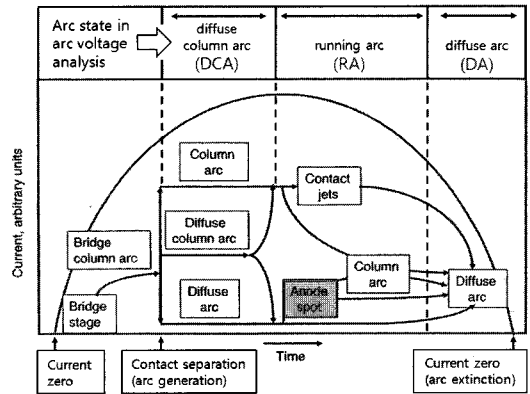


그림 1. 아크지속시간동안의 아크전압 및 아크 상태천이과정 설명을 위한 다이어그램.

Fig. 1. Diagram for explaining the state transition process of columnar vacuum arc.

AMF 방식은 매우 큰 전류에서도 CA를 DA로 전환시킨다. 일단 DA로 전환하면 전류영점까지 그 상태가 지속된다. 일반적으로 AMF 방식이 RMF 방식보다 차단용량이 큰 것은 양극점 형성을 허용하지 않고 바로 DA로 전환시켜 비교적 접점손상에 의한 금속증기 발생량이 적고 이로 인해 전류영점부근에서 아크소호를 위한 최적의 환경을 조성하기 때문이다. 아크와 접점과의 접촉면인 아크

근의 면적이 넓을수록 아크에너지에 의한 접점손상이 크다는 점을 고려하면 왜 RMF 방식이 아크를 움직여서 아크에너지를 분산시키는지 이해하기가 쉽다. 이는 마치 부탄가스 토치(torch)불로 고기(접점에 비유)를 구울 때 고기가 타지 않도록 불(아크)을 돌려 고기를 익히는 것과 마찬가지로, 불(아크)을 한 곳에 고정시켜서 고기(접점)를 굽게 되면 고기(접점)가 타버리기(손상) 때문이다.

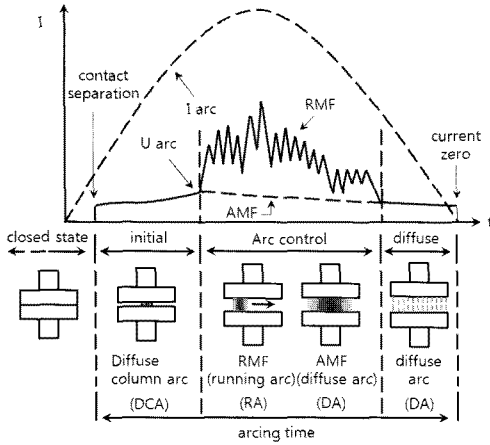


그림 2. 아크지속시간동안의 아크전압 및 아크 상태천이과정.

Fig. 2. Arc voltage and the transition of arc during arcing time.

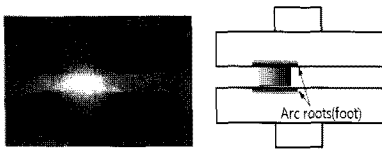
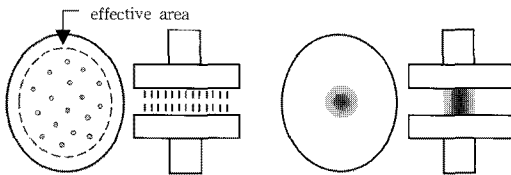


그림 3. 원통형 아크와 아크근.

Fig. 3. CA and its arc roots.



(a) AMF(diffuse arc) (b) RMF(columnar arc)

그림 4. AMF와 RMF 방식의 아크근.

Fig. 4. Arc roots of two arc control methods.

## 2.2 자기유체역학에 대한 기본방정식

전도성을 가지는 유체와 관련시키는 물리학 분야를 자기유체역학이라고 한다(MHD: magneto hydro dynamics)[9]. 플라즈마는 유체역학적인 성질과 함께 전자기학적인 성질도 중요하게 취급된다. 이는 기초방정식을 살펴봄으로써 알 수 있다. 따라서 제한된 조건하에서 플라즈마는 무한한 도전성을 가진 유체로 볼 수 있다. 실제 유체는 연속방정식으로 나타낼 수 있는데 그 방정식은

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}v) = 0 \quad (1)$$

이고, 운동방정식은 다음과 같다.

$$\nu \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p + \vec{f} \quad (2)$$

여기에서  $\frac{d}{dt} = \left(\frac{\partial}{\partial t}\right) + (\vec{v} \cdot \nabla)$ 이고,  $\vec{f}$ 는 유체의 단위체적당 작용되는 힘 밀도(force density)이며, 압력  $p$ 는 스칼라 양이다. 또 전자기장은 맥스웰방정식에 의하여 표현한다. 지금 우리는 높은 전도율의 유체를 생각하고 있으므로, 유체 내에서 변위전류는 전도전류에 비하여 무시하여도 된다. 이와 같은 성질 때문에 도체 속에서 공간전하의 축적도 무시할 수 있다. 이상과 같은 조건에 따른 맥스웰방정식을 다시 나타내면 다음 식과 같다

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}, \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \nabla \cdot \vec{D} = 0, \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

가 된다. 유체방정식과 전자기장을 나타내는 방정식은 다음과 같이 유체에 작용하는 전자기력으로 서로 결합시킬 수 있다.

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (4)$$

이 때 전류밀도는 옴의 법칙에 의해 다음과 같이

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \sigma \vec{E}' \quad (5)$$

나타낼 수 있다. 따라서 유한요소해석 프로그램과 식 (4)를 이용하여 전극간 비틀림 각도에 따라 아크에 작용하는 로렌츠력을 계산하여 비교하였다.

## 2.3 유한요소 해석

로렌츠력 계산은 3차원 유한요소해석 프로그램인 Maxwell 3D를 이용하여 이루어졌다. 아크에

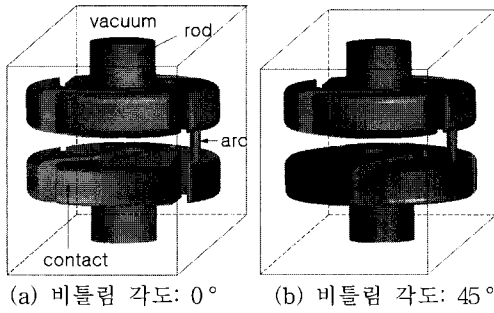


그림 5. 유한요소 해석모델.  
Fig. 5. FEM simulation models.

작용하는 전체 로렌츠력은 아크체적을 구성하는 한 점에 작용하는 로렌츠력을 구하여 그 값을 아크체적에 대하여 체적적분을 통하여 계산된다.

$$F_{\text{로렌츠}} = \int_{\text{vol}} j \times B dVol \quad (6)$$

$j$ 는 전류밀도이며  $B$ 는 자속밀도이다.

전극의 직경은 45 mm, 극간거리는 4 mm, 아크 직경은 1.2 mm로 하여 25 kA의 전류를 인가했으며 모델 각 부분의 물성치는 표 1에 나타내었다. 물론 아크가 유체이므로 형상이 일정하지 않지만 본 해석에서는 아크가 완전한 원통형이라 가정하였다(그림 5). 모델의 단순화와 실제 시료와 모델 간의 물성치의 차이, 그리고 아크구동과 관련된 다른 파라미터들을 고려하지 않은 점 등으로 실제 실험값과는 차이는 있겠지만 비틀림 각도를 제외한 다른 조건들은 모두 일치시켰기 때문에 순수 비틀림 각도가 로렌츠력에 미치는 영향을 유한요소해석을 통한 계산결과와의 차이를 통하여 그 영향의 확인이 가능하다고 판단된다.

표 1. 모델 각 부분에 적용한 물성치[10,11,12].

Table 1. Material properties.

구성요소	재료명	$\sigma$ [S/m]	$\mu_r$ [H/m]
Arc	arc	2000	1
Contact	CuCr(Cr 50 %)	$1.8 \times 10^7$	1
Rod	copper	$5.8 \times 10^7$	1
Background	vacuum	0	1

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

본 연구를 위한 실험은 모두 LS산전 전력연구

소의 합성차단 시험설비에서 이루어졌으며 실험장비들은 그림 6과 같이 나타내었다. 입력전류는 커패시터  $C_g$ (generating capacitor)에 충전된 전류를 메이킹 스위치  $M_s$ 의 on과 동시에 인가된다. 또한 입력전류는 식 (7)의 공진조건에 따라 30000 [ $\mu F$ ]의 커패시터와 0.273 mH의 공진리액터 구성에 의하여 60 Hz의 공진주파수를 가지게 된다.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

또한 실험회로가 LC직렬공진회로로서 입력전류가 커패시터 충전전류이기 때문에 그림 7과 같이 전류와 전압은 90°의 위상차를 가지며 동시에 이상적인 공진을 하지 않기 때문에 감쇄진동을 한다. 전압/전류는 각각 분압비가 1000:1인 분압기와 변류비가 5000:1인 변류기에 의해 변환되어 오실로스코프로 표시된다. 그림 7과 같이 전류는 인가 후 두 번째 주기에서 측정되도록 미리 조정되었다. 전극의 분리는 전류영점 예측기를 사용하여 이루어지며 전극의 분리시점에서 아크이미지 촬영이 개시되도록 카메라가 설정되었다. 또한 VI에 의해 고장전류가 차단되지 않을 경우에 대비하여 보조차단기가 설치되었다. 측정된 아크전압은 PC에 저장되어 오실로스코프 연동프로그램인 X-viewer에 의해 취득하였으며 아크이미지 또한 PC에 저장되어 카메라 연동프로그램인 Motion pro X studio에 의해 아크이미지를 취득하였다.

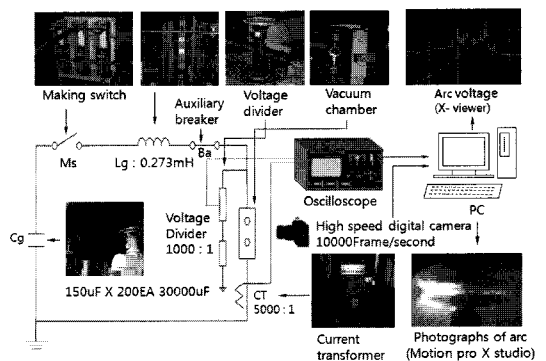


그림 6. 실험장비의 등가회로.  
Fig. 6. Equivalent circuit of experimental setup.

#### 3.2 실험방법

전극 간의 최종 개극거리는 45 mm, 전류는 31.5

kA를 인가하였다. 전극의 개극속도(3 m/s)는 일정하다. 시료는 4개의 petal을 가지며 직경 85 mm인 나선형 전극이 사용되었다. 진공도는 진공 펌프를 이용하여  $2 \sim 3 \times 10^{-6}$  mbar로 유지되었다. 실제 VI 내부에는 실드가 전극을 둘러싸고 있어 아크의 관찰이 불가능하다. 따라서 아크의 관찰이 용이하도록 진공 챔버 내부 실드는 고려하지 않았다. 다만 진공챔버의 내벽으로의 아크증착을 염두해 철 그물망(mesh)으로 내벽을 보호하였다.

### 3.3 아크전압 결과파형의 한 예

전극분리 직후 아크발생에 의한 아크전압은 입력전압에 더해져서 중첩된다. 따라서 순수 아크전압을 고려하기 위해서는 측정된 전압으로부터 입력전압을 배제시켜야 한다. 따라서 측정된 전압으로부터 입력전압과 아크전압의 구분을 위해 그림 7과 같이 파선을 이용하여 별도로 구분하였다. 아크가 발생하는 전극의 분리시점에서 아크가 소호되는 전류영점까지의 시간을 아크지속시간(arcing time)이라고 한다. 본 연구에서는 고장전류의 완전한 차단을 전제로 하고 있다. 따라서 아크가 전류영점에서 완전히 소호되어 재점화가 일어나지 않는다면 아크지속시간은 전류의 반주기이내의 범위를 가진다. 60 Hz 기준으로 전류의 반주기는 8.3 ms이다. 고장전류는 임의의 시점에서 발생한다. 전극의 분리는 전류영점 예측기를 사용하여 원하는

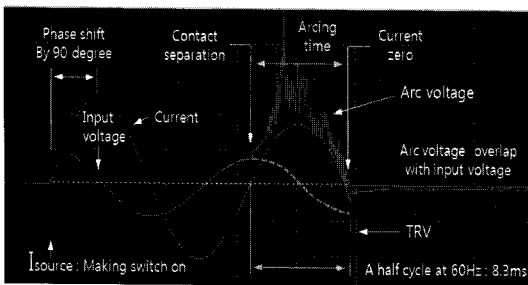


그림 7. 결과파형 예(아크지속시간: 약 8.2 ms).  
 Fig. 7. An example of the resulting arc voltage (arcing time: about 8.2 ms).

시점에서 전극을 분리시켜 아크지속시간을 의도적으로 설정하였다. 그림 6은 아크지속시간이 약 8.2 ms인 경우로 비교적 긴 경우에 해당한다.

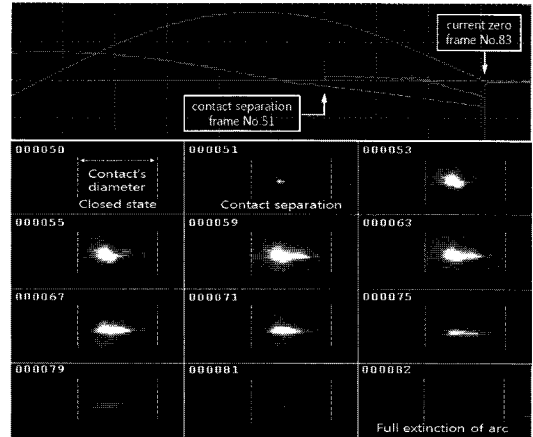


그림 8. 아크지속시간이 짧은 경우의 아크전압과 아크이미지.  
 Fig. 8. An example of arc voltage and consecutive arc image during short arcing time.

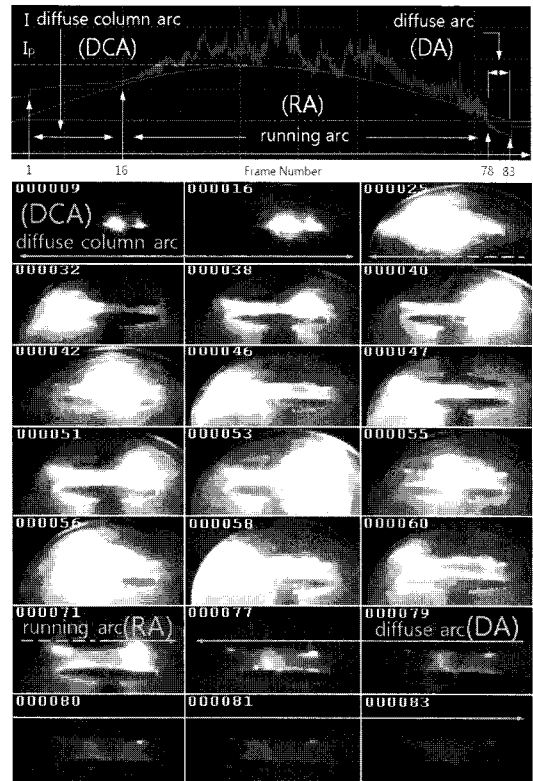


그림 9. 아크지속시간이 긴 경우의 아크전압과 아크이미지.  
 Fig. 9. An example of Arc voltage and consecutive arc image during long arcing time.

#### 4. 결과 및 분석

##### 4.1 실험결과

그림 8부터는 아크지속시간동안만의 아크전압관찰을 위해 그림 7에서 다소 밝게 음영을 준 영역을 확대하여 나타내었다.

그림 8과 그림 9는 각각 아크지속시간이 비교적 짧은 경우와 긴 경우의 예이다. 일반적으로 아크상태가 DCA일 때와 DA일 때는 아크가 확산상태로 운동을 하지 않기 때문에 아크전압이 평탄하다.

그림 8에서 아크지속시간이 전류주기의 1/4이내로 비교적 짧은 경우 아크가 DCA에서 바로 DA로 전환됨을 확인할 수 있다. 이 경우 전체 아크지속시간에 걸쳐 아크전압이 평탄하여 DCA와 DA간의 경계가 모호하다. 이는 전류가 전류영점에 가까워 아크를 움직이기에 충분한 로렌츠력을 발생시키지 못하므로 로렌츠력에 의해 운동하는 RA구간이 존재하지 않는다.

반면 아크지속시간이 전류주기의 1/4이상으로 비교적 긴 경우 아크상태가 전극분리 후 아크의 초기상태인 DCA구간, 실제 아크가 로렌츠력에 의해 운동하는 RA구간, 아크가 확산상태로 전환된 이후 전류영점까지의 DA구간으로 나뉘며 각 구간사이의 경계가 분명하다(그림 9)[13].

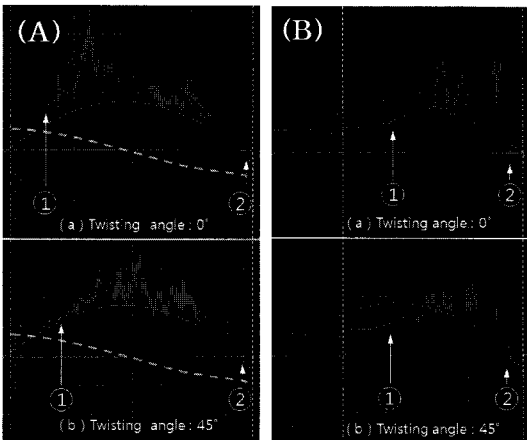


그림 10. 동일한 아크지속시간동안 비틀림 각도가 0°일 때와 45°일 때의 아크전압파형  
 Fig. 10. Arc voltage during arcing time of about (A) 8.2 ms and (B) 6.2 ms

그림 10에서 ①은 DCA가 RA로 전환되는 시점이며 ②는 RA가 DA로 전환되는 시점이다. 입력전

압이 동일하므로 아크전압의 단순비교가 가능하다. 아크지속시간이 약 8.2 ms와 6.2 ms인 두 경우 모두 RA구간에서 전극 간 비틀림 각도가 0°일 때가 45°일 때보다 측정전압의 최대치가 컸다.

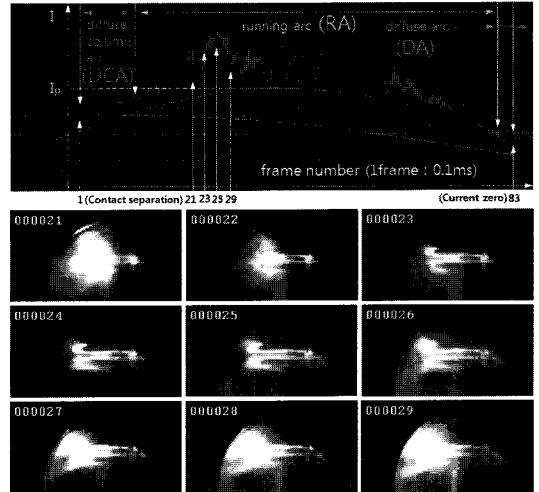


그림 11. 비틀림 각도가 0°, 아크지속시간이 8.2 ms일 때의 아크전압과 아크이미지.

Fig. 11. Analysis of arc images and arc voltage during arcing time of about 8.2 ms under twisting angle of 0°.

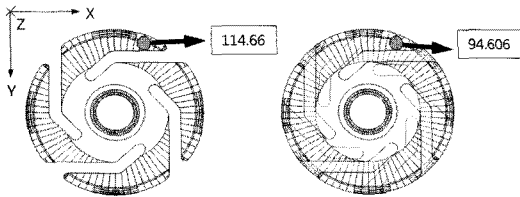
입력전류가 동일하므로 아크전압의 차는 아크저항의 차이이다. RA구간에서 아크는 형태상 두 전극을 전기적으로 연결하여 '원통형 아크(CA: columnar arc)'라고도 한다. 그림 8은 전극 간 비틀림 각도가 0° 경우의 아크전압과 아크이미지다. 아크전압의 최대시점(frame No.26)에서 아크의 연결상태가 좋지 않다(그림 11). 이 시점은 RA구간의 초기로서 이때에도 전류가 여전히 흘러 로렌츠력에 의해 아크가 운동을 할 수 있다. 또한 26번 프레임보다 측정전압이 낮은 21,29번 프레임의 아크는 26번 프레임보다 상하 두 전극을 잘 연결하고 있어 저항이 상대적으로 작음을 알 수 있다. 이로써 아크전압 차는 아크의 연결상태와 관련된 아크저항의 차임을 알았다. 이는 비록 전극 간의 비틀림 각도가 0°인 단일경우의 아크전압과 아크이미지의 상관성 분석이지만 전극간의 비틀림 각도에 따른 아크전압의 차도 같은 맥락에서 설명이 가능하다고 판단된다.

Objects	Value (newtons)	Objects	Value (newtons)
arc		arc	
fix		fix	
move		move	
	Force on object		Force on object
	F(x): 16.047		F(x): -9.9549
	F(y): 113.53		F(y): 94.079
	F(z): 0.044257		F(z): -0.48341
	Mag(F): 114.66		Mag(F): 94.606

(a) 비틀림 각도 : 0° (b) 비틀림 각도 : 45°

그림 12. 로렌츠력 계산 결과.

Fig. 12. The results of Lorentz force calculation.



(a) 비틀림 각도 : 0° (b) 비틀림 각도 : 45°

그림 13. 그림 12의 시각화.

Fig. 13. Visualizaion of the Fig. 12.

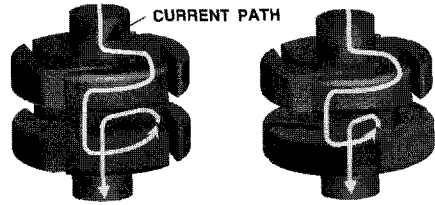
#### 4.2 로렌츠력 계산 결과

그림 12는 로렌츠력 계산결과이다. 로렌츠력은 3차원의 벡터량이기 때문에 두 계산결과와의 비교가 용이하도록 다시 그림 13과 같이 그림으로 표현하였다(Z방향 힘은 너무 작아서 무시).

그림 13에서 보는 바와 같이 전극 간의 비틀림 각도가 0°일 경우 45°일 때보다 힘이 전극의 중심으로부터 바깥으로 방사상으로 향하고 있을 뿐만 아니라 그 크기도 커서 아크가 회전할 때 아크의 중심부가 바깥으로 치우칠 가능성이 커진다. 아크가 회전할 때 전극의 중심부에서 바깥으로 치우치면 아크가 전극을 이어주는 전류통로라는 점에서 연결상태가 악화되어 저항이 커질 수밖에 없다. 이는 앞서 다룬 실험결과인 비틀림 각도에 따른 아크전압 차와 아크저항 차의 원인인 아크의 연결상태 차의 원인을 잘 설명해준다.

로렌츠력의 크기를 분석하면 다음과 같다. 그림 15로부터 전극간의 비틀림 각도가 0°일 때가 45°일 때보다 전극을 따라 흐르는 전류에 의한 자계의 중첩이 더 잘 되어 더 큰 자계가 발생함을 알 수 있다. 이는 다시 자속밀도에 영향을 끼쳐 결국 로렌츠력에 영향을 준 것으로 판단된다.

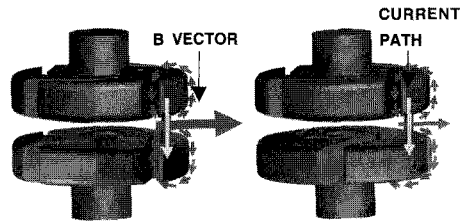
힘의 방향차이를 분석하면 다음과 같다. 아크 전체에 작용하는 로렌츠력은 아크를 구성하는 한 점에 작용하는 로렌츠력을 구하여 그 값을 아크



(a) 비틀림 각도 : 0° (b) 비틀림 각도 : 45°

그림 14. 전극 간 비틀림 각도에 따른 전류경로.

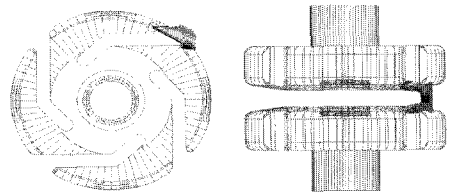
Fig. 14. Current path by twisting angle.



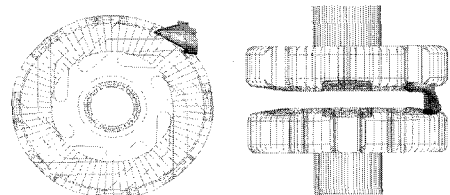
(a) 비틀림 각도 : 0° (b) 비틀림 각도 : 45°

그림 15. 비틀림 각도에 따른 자계의 중첩.

Fig. 15. Magnetic field by twisting angle.



(a) 비틀림 각도 : 0°



(b) 비틀림 각도 : 45°

그림 16. 아크의 각 부분에 작용하는 로렌츠력.

Fig. 16. Forces acting on each part of arc in length direction.

체에 대한 체적적분을 하여 얻어진다. 그림 13에서와 같이 아크에 작용하는 총 힘(Net force)의 방향은 곧 아크원통 길이 방향의 중심축이 받는 힘

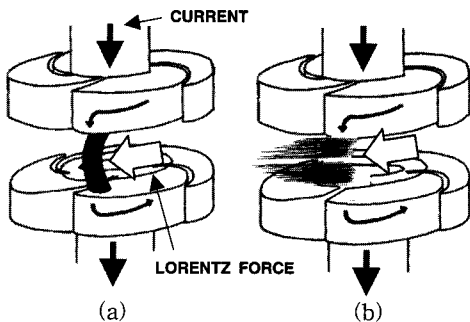
들만을 더한 힘의 방향과 일치하였다. 그림 16의 벡터들은 전체 아크가 받는 힘의 한 부분에 불과하므로 색깔에 따른 계산결과를 수치로 나타내는 color index는 삽입하지 않았다.

### 5. 고찰

실험결과 관찰되었던 전극 간의 비틀림 각도에 따른 아크전압 차는 아크이미지와의 상관성 분석을 통해 아크의 연결상태와 관련된 매 순간의 아크저항 차에 의한 것임을 알았다. 또한 매 순간의 아크저항을 결정하는 아크의 연결상태의 변화원인은 로렌츠력임을 알았다. 따라서 유한요소해석에 의해 전극 간 비틀림 각도에 따른 로렌츠력 계산 및 비교를 통하여 운동구간에서의 아크전압 차의 원인인 아크의 연결상태를 설명하였다. 앞서도 언급했듯이 이 해석상의 조건과 실제 실험조건 간의 차이와 모델의 단순화로 정확하지는 않지만 실험결과들을 설명하기에는 충분하다고 판단된다. 이와 같이 아크전압과 아크이미지와의 상관성 분석과 유한요소해석을 통한 로렌츠력 계산을 통하여 나선형 전극의 전극 간 비틀림 각도에 따른 아크전압 차 및 아크거동을 설명할 수 있었다.

### 6. 결론

본 논문에서는 RMF 방식의 4페달 나선형 VI전극을 대상으로 두 전극사이의 비틀림 각도가 아크거동에 미치는 영향을 알아보았다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



(a) 아크가 힘을 받음을 보여주는 개념도[14]  
(b) 실제 힘을 받는 아크를 보여주는 그림

그림 17. 아크의 각 부분에 작용하는 로렌츠력.  
Fig. 17. Forces acting on each part of arc in length direction.

아크지속시간이 비교적 짧은 경우 아크가 발생하여 로렌츠력에 의해 운동을 하지 않고 바로 DA로 전환되는 반면 아크지속시간이 비교적 긴 경우에는 아크가 로렌츠력에 의해 운동하는 구간이 존재한다. 이 경우 아크의 상태별 구간은 아크의 발생부터 소호까지 DCA, RA구간, DA구간으로 크게 나뉜다. RA구간에서 아크의 운동으로 아크전압의 요동이 심한 것이 특징인데 전극 간 비틀림 각도가 0°일 때가 45°일 때보다 측정전압의 최대치가 컸다. 이 아크전압의 차는 아크전압과 아크이미지와의 상관성 분석으로부터 아크의 연결상태와 관련된 아크저항의 차에 의한 것임을 알았다. 또한 아크의 연결상태와 관련된 아크저항의 차는 유한요소해석을 통한 로렌츠력 계산을 통하여 실험결과와 결부시켜 설명할 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원의 대학전력연구센터 지원사업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 관계자분들께 감사드립니다.

### 참고 문헌

- [1] P. G. Slade, "The vacuum interrupter: theory", Design and Application, Chapter 2, p. 163, 2007.
- [2] 김병철, 박홍태, 오일성, 임기조, "아크지속시간 측정을 통한 나선형 VI 전극의 전극배치에 따른 아크제어 성능비교", 전기전자재료학회논문지, 22권, 2호, p. 184, 2009.
- [3] 하덕용, 강형부, 최승길, 최경호, "중자계형 진공 인터럽터에서 접점전극 슬릿의 영향에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 15권, 9호, p. 822, 2002.
- [4] 하성철, 서상현, "축자계형 진공인터럽터의 전자계 현상 해석", 전기전자재료학회논문지, 16권, 10호, p. 952, 2003.
- [5] E. Dullni, E. Schade, and W. Shang, "Vacuum arcs driven by cross-magnetic fields (RMF)", IEEE Trans, on Plasma Science, Vol. 31, No. 5, p. 902, 2003.
- [6] J. Li and W. Jimei, "Measurement and study of arc characteristics of vacuum interrupter with high voltage and high capacity", IEEE, XVIIth ISDEIV, p. 266, 1996.
- [7] M. B. Schulman, "The behavior of vacuum



- arcs between spiral contacts with a fixed-polarity arc shield", *IEEE Trans on Plasma Science*, Vol. 27, No. 4, p. 984, 1999.
- [8] M. B. Schulman, "Separation of spiral contacts and the motion of vacuum arcs at high AC currents", *IEEE Trans. on Plasma Science*, Vol. 21, No. 5, p. 484, 1993.
- [9] 박덕규, "플라즈마 및 핵융합물리학", 형설출판사, p. 197, 1985.
- [10] 하덕용, 강형부, "3차원 유한요소해석을 이용한 종자계형 진공 인터럽터의 특성고찰", *전기전자재료학회논문지*, 15권, 5호, p. 460, 2002.
- [11] X. Shixin, P. Lei, W. Jimei, L. Ianfei, and H. Guangli, "Analysis of axial magnetic field electrode applied to high voltage vacuum interrupters", *XXIInd ISDEIV matsue*, 2006.
- [12] Stoving P. N. and Bestel E. F., "Finite element analysis of AMF vacuum contacts", *IEEE 18th ISDEIV(Eindhoven, Holland)*, p. 407, 1997.
- [13] P. G. Slade, "The vacuum interrupter : theory, design, and application", 2.7 Vacuum arc and an axial magnetic field, 4.2.3 Interruption of high-current vacuum arcs, p. 282, 2007.
- [14] E. Dullni, "Motion of high-current vacuum arcs on spiral type contacts", *IEEE, Trans on Plasma Science*, Vol. 17, No. 6, p. 875, 1989.