

논문 22-2-16

## 아크지속시간 측정을 통한 나선형 VI 전극의 전극배치에 따른 아크제어 성능비교

### Comparison of Arc Control Ability as a Function of Configuration of Spiral Type VI Contacts by Measuring Arcing Time

김병철<sup>1</sup>, 박홍태<sup>2</sup>, 오일성<sup>2</sup>, 임기조<sup>1,a</sup>  
(Byoung-Chul Kim<sup>1</sup>, Hong-Tae Park<sup>2</sup>, and Ill-Sung Oh<sup>2</sup>, and Kee-Joe Lim<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

One of the purposes of arc control is to change its state to the diffuse state before current zero as soon as possible. This can provide optimal conditions for full extinction of arc by minimizing the quantity of residual plasma between contacts near current zero. TRV(transient recovery voltage) occurs at current zero at the same time with current interruption. If there is substantial residual plasma near current zero it can cause 'post arc current' by the interaction of its conductance with TRV. In this paper, arc control ability as a function of configuration of spiral type VI contacts was compared on the criteria of the time taken for arc to reach to the diffuse state.

**Key Words** : Vacuum interrupter(VI), Arc control, Spiral type, Arcing time

#### 1. 서론

차단기의 주 임무는 고장전류를 차단하는 것이다. 진공인터럽터(VI)는 차단기의 차단용량을 결정짓는 진공차단기의 핵심부이다. 고장전류 발생시 전극이 분리되면서 아크가 발생한다. VI의 아크소호 방식에는 크게 축자계(AMF: Axial magnetic field) 방식과 횡자계 방식(RMF: Radial magnetic field)이 있다. 축자계 방식은 횡자계 방식에 비해 차단용량은 크지만 그 구조가 복잡하여 전류가 흐를 때 열 발생량이 많고 복잡한 구조로 인해 생산 단가가 높다. 횡자계 방식에는 크게 컵형(cup type)과 나선형(spiral type) 전극이 있는데 컵형 또한 구조가 복잡하다(그림 1). 이에 비해 나선형 전극은 그 구조가 단순하여 열 발생도 적고 제조

단가도 저렴하여 차단용량의 향상이 필요하다. 현재 국내 VI 관련 논문은 거의 축자계 방식의 VI 전극에 관한 논문들이며 그 내용 또한 실험을 통한 것이 아닌 유한요소해석을 다룬 논문들이 많다 [1,2]. 축자계 방식은 전극의 분리와 동시에 발생하는 아크를 축자계에 의해 핀치효과(pinch effect)에 의한 아크수축을 방해하여 확산아크로 바로 전환시켜 아크에너지를 전극표면상에 분산시켜 접점손상을 최소화시키는 방식이다. 축자계 방식에서는 아크가 움직임상으로 정적이며 이 수축을 방해하는 힘은 축자계의 크기와 비례한다[3]. 축자계의 방향은 축방향으로 정해져 있으므로 그 크기만 보면 되므로 컴퓨터 시뮬레이션으로도 충분히 가능하다. 반면 횡자계 방식은 핀치효과에 의해 수축된 아크를 로렌즈력에 의해 전극표면상을 움직이게 하여 전극과 아크가 맞닿는 부분인 아크 근(arc root)을 통하여 전극으로 유입되는 에너지를 전극표면에 분산시켜 전극의 용융에 의한 전극손상을 최소화시키는 방식이다. 따라서 아크가 동적이며 메카니즘이 복잡하고 변수도 많아 컴퓨터를 이용한 해석도 쉽지가 않다. 또한 차단시험은 그 실험

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

2. LS산전(주) 전력연구소

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

접수일자 : 2008. 12. 29

1차 심사 : 2009. 1. 14

심사완료 : 2009. 1. 22

장비자체도 고가이고 국내시설도 많지 않기 때문에 실험을 통한 연구가 미미했으리라 판단된다.

AC 전류에서는 전류가 일시적으로 공급되지 않는 전류영점에서 아크소호가 가능하다. 전류영점에서 아크가 소호된 직후 극간저항은 거의 0에서부터 무한대까지 급격하게 변화하는데 이때 이 저항의 증가에 비례하여 과도회복전압(TRV: transient recovery voltage)이 발생한다(그림 2)[4]. 하지만 잔류플라즈마의 소멸에는 일정시간이 소요되며 아크가 소호된 이후에도 종종 극간에 급속증가가 존재하게 된다. 잔류플라즈마는 전기전도도를 가지므로 극간에 과도회복전압이 걸리면 전류영점 직후에 아크를 통해 흘러 결국 아크의 재점호를 야기시키는 '아크-후 전류(post arc current)'를 발생시킬 수 있다(그림 2)[5]. 따라서 전류영점의 충분한 시간 이전에 아크를 확산아크로 전환시켜 극간에 존재하는 잔류 플라즈마 양을 최소화시켜야 한다 [6]. VI 내부의 아크거동에 미치는 인자에는 접점 재료와 VI 용기내부의 진공도 이외에도 전극의 직경[7], 실드[8,9], 전극의 분리속도[10], 최종 극간거리[10] 등이 있다. 본 연구에서는 나선형 VI 전극을 대상으로 두 전극 사이의 비틀림 각도에 따른 아크제어성능을 비교분석하였다.

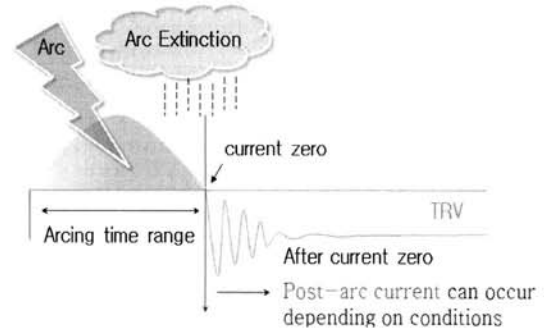


그림 2. 전류영점 부근에서의 아크소호 및 아크재발호 관련 메커니즘.

Fig. 2. The mechanism related with arc extinction and arc re-ignition near current zero.

## 2. 횡자계를 이용한 아크제어

축자계를 이용하여 아크를 제어하지 않으면 다중 음극점을 가지는 확산 진공아크가 수축한다. 이 수축력을 "핀치효과(pinch effect)" 라고 한다[7].

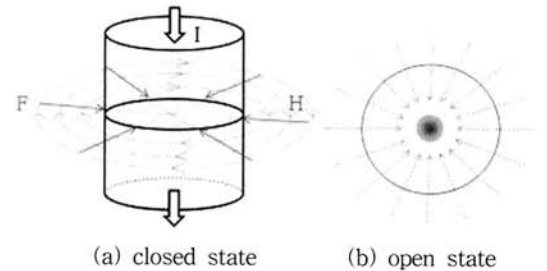


그림 3. 핀치효과에 의한 아크수축.

Fig. 3. Contraction of arc by pinch effect.

두 전극사이를 축방향으로 흐르는 전류는 자계에 의해 둘러싸이며 이 자계의 자속밀도는 움직이는 캐리어(charge carrier)에 작용하여 중심부에서 바깥으로 향하는 내부 압력의 반대 방향으로 전자기력을 발생시킨다.

$$\vec{j} \times \vec{B} = \nabla P \tag{1}$$

$j$ 는 아크를 통해 흐르는 전류의 전류밀도이고,  $B$ 는 아크에 작용하는 자계의 자속밀도를 나타낸다. 이 결과 형성된 아크의 직경은 유체에 작용하는 전자

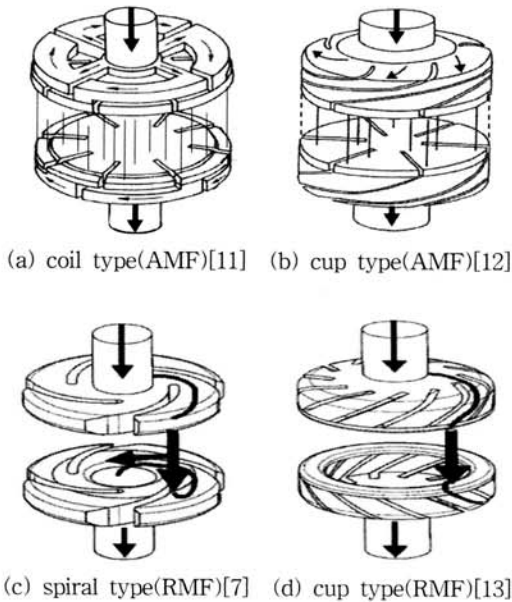


그림 1. 타입별 VI 전극.

Fig. 1. VI contacts by type.

기력( $\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B}$ [14])과 내부압력의 변화도(아크 팽창에 의한 내부압력)를 나타내는 내부압력경도  $\nabla P$ 값과의 평형에 의해 결정[7]되며 이는 국부적인 이온과 전자의 밀도, 그리고 온도에 의해 영향을 받는다. 아크직경이 결정되면 그 아크를 통해 흐르는 전류의 밀도는 대략  $10^8 \text{ A/m}^2$ 이다. 확산아크가 수축하기 시작하는 전류( $I_s$ )는 전극의 직경  $D$ 와 최종 극간거리  $d$ 에 의해 결정된다[7].

$$I_s \propto \frac{D}{d} \quad (2)$$

전극분리 후 용융 금속 브리지가 끊어지면 금속 증기가 이온화된다. 플라즈마가 확산상태로의 전환될 때까지 아크는 구속되어 있는데 이를 '원통형 아크'라고 한다. 횡자계 방식에서는 원통형 아크의 발생(양극점 형성)을 허용한다. 이 방식은 전극과 아크를 통해 흐르는 전류가 자속밀도가  $B_T$ 인 횡자계를 발생시키며 이는 전류와 함께 로렌츠력  $F_L$ 을 발생시켜 아크를 움직인다. 그림 4가 그 동작원리를 보여준다. 아크가 운동 중 페달 끝에 도달하면, 슬롯을 건너게 된다. 이때 아크에 작용하는 힘은 다음과 같다[15].

$$F_L = \lambda \times i \times L_0 \times B_T^n \quad (3)$$

$i$ 는 아크를 통해 흐르는 전류,  $\lambda$ 는 상수( $\approx 0.5$ ),  $B_T^n$ 은 횡자계의 자속밀도,  $L_0$ 는 아크의 길이를 나타낸다. 아크의 속도는 로렌츠력과 아크의 운동방향의 반대방향으로 작용하는 힘에 의해 결정된다. 또한 아크근에서 아크로부터의 에너지가 전극을 끊는점까지 가열시키는데 걸리는 시간이라는 추측도 있다[16].

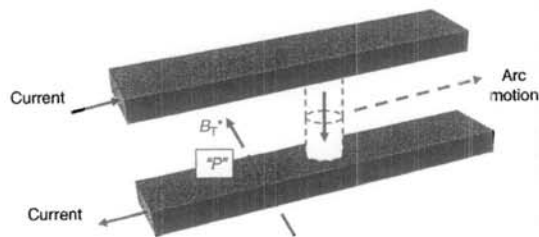


그림 4. 평행한 도체사이의 원통형 진공아크.  
Fig. 4. A columnar vacuum arc between conducting rails[15].

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

본 연구를 위한 실험은 모두 LS산전 전력연구소의 합성차단 시험설비에서 이루어졌으며 실험장비들은 그림 5와 같이 나타내었다. 입력전류는 커패시터  $C_g$ (generating capacitor)에 충전된 전류를 메이킹 스위치  $M_s$ 의 on과 동시에 인가된다. 또한 입력전류는 식 (4)의 공진조건에 따라 30000  $\mu F$ 의 커패시터와 0.273 mH의 공진리액터 구성에 의하여 60 Hz의 공진주파수를 가지게 된다.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

또한 실험회로가 LC직렬공진회로로서 입력전류가 커패시터 충전전류이기 때문에 그림 6과 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 6과 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.

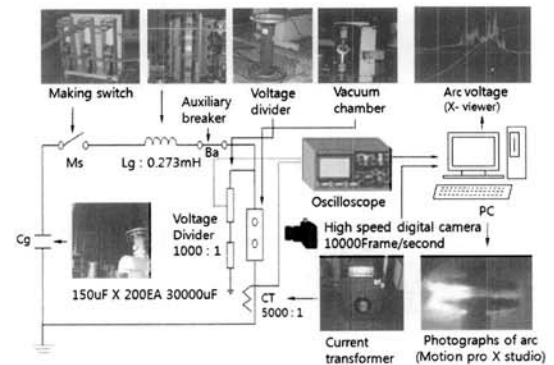


그림 5. 실험장비의 등가회로.  
Fig. 5. Equivalent circuit of experimental setup.

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

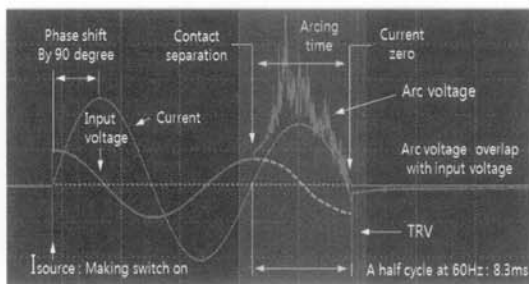


그림 6. 결과파형의 예(아크지속시간: 약 8.2 ms).  
Fig. 6. An example of the resulting arc voltage (arcing time: about 8.2 ms).

## 4. 결과 및 고찰

그림 7부터는 아크지속시간동안만의 아크전압관찰을 위해 그림 6에서 다소 밝게 음영을 준 영역을 확대하여 나타내었다. 그림 7과 그림 8은 각각 아크지속시간이 비교적 짧은 경우와 긴 경우의 아크전압의 예이다. 일반적으로 아크가 확산 원통형 아크(DCA: diffuse column arc)일 때와 확산아크(DA: diffuse arc)일 때는 운동을 하지 않기 때문에 아크전압이 평탄하다.

아크지속시간이 전류주기의 1/4이내로 비교적 짧은 경우 그림 7과 같이 아크가 확산 원통형 아크에서 바로 확산아크로 전환되었다. 이 경우 전체 아크지속시간에 걸쳐 아크전압이 평탄하여 가교 원통형 아크와 확산아크간의 경계가 모호하다. 또한 이때의 전류는 전류영점에 가까워 그 크기가 작아 아크를 움직이기에 충분한 로렌츠력을 발생시키지 못한다. 또한 이 경우 전극배치에 상관없이 아크가 바로 확산아크로 전환되므로 아크제어성능의 비교가 의미가 없다고 판단된다.

반면 아크지속시간이 전류주기의 1/4이상으로 비교적 긴 경우 그림 8과 같이 아크의 상태가 확산 원통형 아크, 운동아크(RA: running arc), 확산아크로 크게 세 개의 아크상태 구간으로 나뉘며 각 구간 사이의 경계가 분명하다. 따라서 이 경우 아크가 발생한 이후 운동구간을 거쳐 확산아크로 전환될 때까지 걸리는 시간을 측정하여 전극배치에 따른 아크제어성능을 비교하였다.

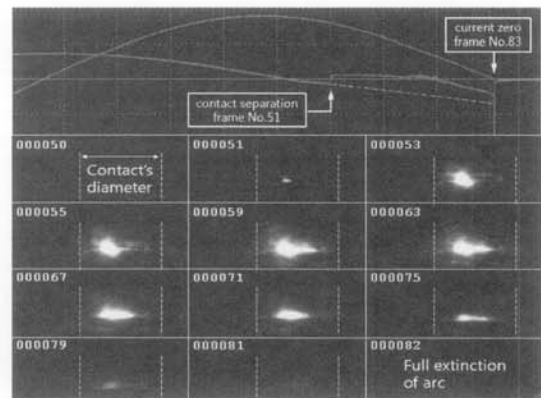


그림 7. 아크지속시간이 짧은 경우의 아크전압과 아크이미지.  
Fig. 7. An example of arc voltage and consecutive arc image during short arcing time.

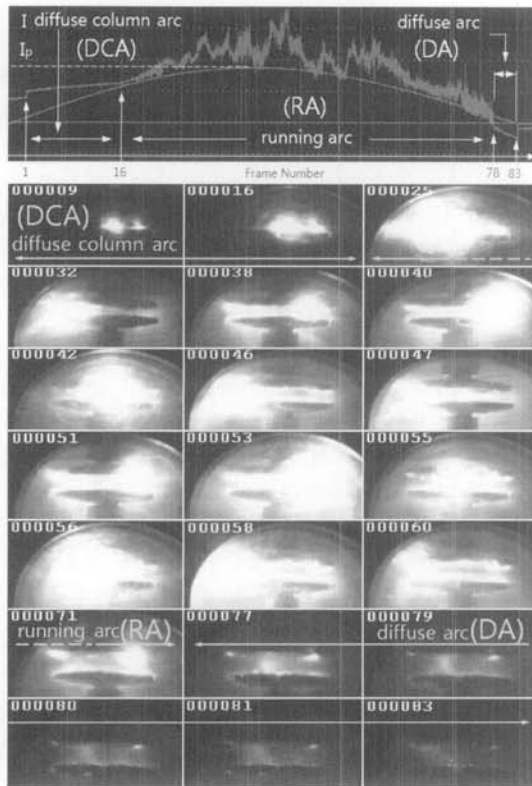
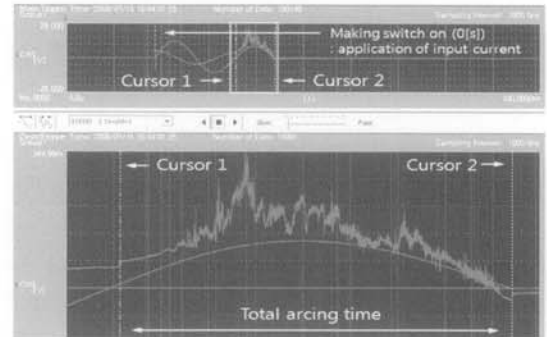


그림 8. 아크지속시간이 긴 경우의 아크전압과 아크이미지.

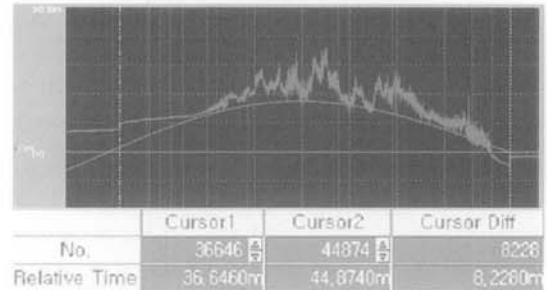
Fig. 8. An example of Arc voltage and consecutive arc image during long arcing time.

그림 9에서 아크의 발생시점(전극분리 시점)과 아크의 소호시점(전류영점)을 측정하여 전체 아크지속시간을 측정하였고 그림 11에서 아크가 확산아크로 전환되는 시점의 시간을 측정하였으며 또한 그 시점이 전류영점보다 얼마의 시간 이전인지를 확인하였다. 그 결과 비틀림 각도가 0°와 45°인 경우 그림 9에서 전극분리가 각각 35.886 ms와 36.646 ms에서 이루어졌으며 전체 아크지속시간은 각각 8.238 ms와 8.228 ms임을 확인하였으며 그림 11로부터 각각 43.892 ms와 44.472 ms에서 확산아크로 전환됨을 확인하였다. 결과적으로 아크가 확산아크로 전환되는 시점의 시간에서 전극이 분리되는 시점의 시간을 빼면 아크가 전극의 분리와 동시에 발생하여 확산아크로 전환되는데 소요된 시간을 확인할 수가 있다. 그 결과 각 경우 아크가 확산아크로 전환되는데 소요된 시간을 구하면 전극 간의 비틀림 각도가 0°일 때는 8.006 ms(전류

영점으로부터 약 250  $\mu$ s 이전 시점), 45°일 때는 7.826 ms(전류영점으로부터 약 400  $\mu$ s 이전 시점)가 소요되어 45°일 때가 더 빨리 확산아크로 전환되었다. 그림 12를 통하여 전체 아크지속시간이 약 6.2 ms인 경우에서도 마찬가지로 전극 간의 비틀림 각도가 45°일 때가 더 빨리 확산아크로 전환됨을 확인하였다.



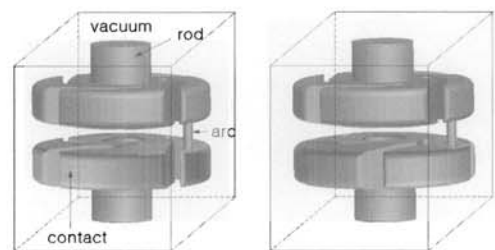
(a) twisting angle of 0°



(b) twisting angle of 45°

그림 9. 아크전압(아크지속시간: 약 8.2 ms).

Fig. 9. Arc voltage(arcing time: about 8.2 ms).



(a) 비틀림 각도: 0° (b) 비틀림 각도: 45°

그림 10. 전극 간 비틀림 각도에 따른 전극배치도.

Fig. 10. Figures of contact configuration.

### 5. 결론

본 연구에서는 나선형의 VI 전극을 대상으로 전극 사이의 비틀림 각도를 다르게 하여 전극배치에 따른 아크제어성능을 비교분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 아크지속시간이 비교적 짧은 경우 아크발생 후 초기 가교 원통형 아크에서 바로 확산아크로 전환되었다. 이때의 전류는 전류영점에 가까운 시점으로 그 크기가 매우 작아 아크를 운동시키기에 충분한 로렌츠 력을 발생시키지 못할 뿐 아니라 두 전극을 전기적으로 연결시켜주는 아크의 발생량도 적기 때문에 아크가 운동을 하지 못하고 바로 확산아크로 전환된 것이다. 또한 이처럼 아크지속시간이 짧은 경우는 전극배치와 상관없이 아크가 바로 확산아크로 전환되어 아크지속시간이 짧은 경우는 아크제어성능을 비교판단하기에는 적절하지 않다고 판단된다.

둘째, 아크지속시간이 비교적 긴 경우 아크는 초기 가교 원통형 아크에서 확산아크로 전환되기 이전에 로렌츠 력에 의해 운동을 하는 운동아크를 거점을 확인하였다. 실험결과 이 구간에서 전극배치에 따라 전극간의 비틀림 각도가 45°인 경우가 0°인 경우보다 더 빨리 확산아크로 전환됨을 확인하였다. 이로써 아크지속시간이 비교적 긴 경우에는 전극배치에 따라 확산아크로 전환되는 시간의 차이가 있음을 확인하였고 이는 아크제어성능을 간접적으로 비교판단하기에 충분하다고 판단되지만 좀 더 여러 측면에서 접근해 볼 필요가 있다고 판단된다.

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

- [1] 하덕용, 강형부, 최승길, 최경호, “종자계형 진공 인터럽터에서 점접전극 슬릿의 영향에 관한 연구”, 전기전자재료학회논문지, 15권, 9호, p. 822, 2002.
- [2] 하성철, 서상현, “축자계형 진공인터럽터의 전자계 현상 해석”, 전기전자재료학회논문지, 16권, 10호, p. 952, 2003.

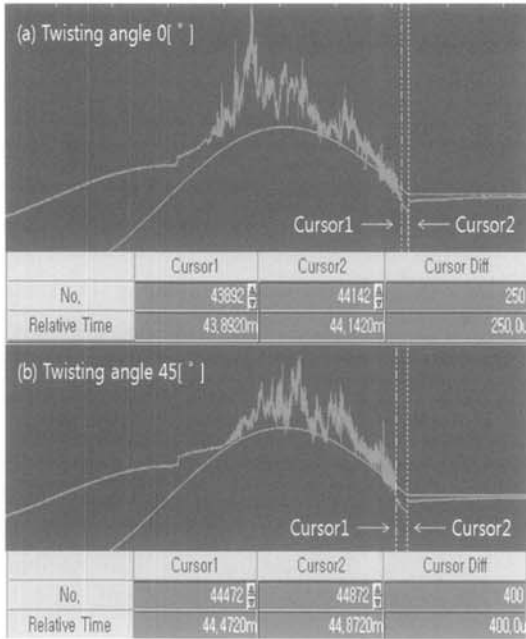


그림 11. 아크전압(아크지속시간: 약 8.2 ms).  
Fig. 11. Arc voltage(arcing time: about 8.2 ms).

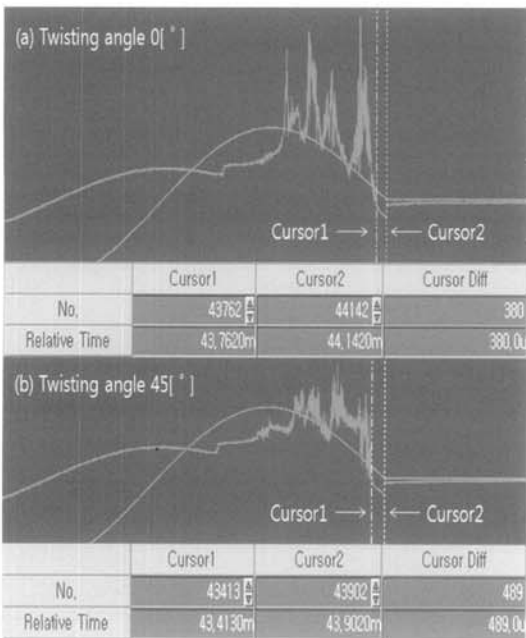


그림 12. 아크전압(아크지속시간: 약 6.2 ms).  
Fig. 12. Arc voltage(arcing time: about 6.2 ms).

- [3] P. G. Slade, "The vacuum interrupter: theory", Design and Application, Chapter 2, p. 163, 2007.
- [4] V. Lanen, "The current interruption process in vacuum: analysis of the current and voltages of current-zero measurements", Doctoral thesis of Delft university of technology, Chapter 2, p. 7, 2008.
- [5] V. Lanen, "The current interruption process in vacuum: analysis of the currents and voltage of current-zero measurements", The post arc current and the recovery voltage, p. 14, 2008.
- [6] P. G. Slade, "The vacuum interrupter: Theory", Design, and Application, Chapter 4, p. 282, 2007.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] S. Yanabu and E Kaneko, "Research and development of axial magnetic field electrode and its application", IEEE, 18th ISDEIV, p. 1, 1998.
- [12] L. Zhiyuan, W. Jimei, W. Zheng, H. Yong, X. Jun, and G. Hang, "Vacuum interrupter with cup-type electrode simulations of 3D axial magnetic field and eddy current in the contact", IEEE 19th ISDEIV, p. 459, 2000.
- [13] Y. Niwa, K. Sasage, K. Yokokura, and E. kaneko, "The arc behavior and the interruption ability of the transversal magnetic field electrode in the vacuum interrupter", XXIIInd ISDEIV, p. 161, 2006.
- [14] 박덕규, "플라즈마 및 핵융합물리학", 형설출판사, p. 197, 1985.
- [15] P. G. Slade, "The vacuum interrupter: Theory", Design, and Application, Chapter 2, p. 158, 2007.
- [16] E. Dullni, "Motion of high-current vacuum arcs on spiral type contacts", IEEE, Trans on plasma science, Vol. 17, No. 6, p. 875, 1989.