

[Research Paper]

평면형 구리 - 탄소 전극의 형태별 재기전압 특성 및 파형 패턴에 관한 연구

임종민 · 최충석^{*†}

전주대학교 일반대학원 대학원생, *전주대학교 소방안전공학과 교수

Study on Restriking Transient Voltage Characteristics and Waveform Patterns of Planar Copper-Carbon Electrodes using Forms

Jong-Min Lim · Chung-Seog Choi^{*†}

Graduate Student, Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University,

^{*}Professor, Dept. of Fire Safety Engineering, Jeonju University

(Received December 26, 2019; Revised July 6, 2020; Accepted July 20, 2020)

요 약

본 논문은 직렬 아크 방전이 진행될 때의 전압 및 전류 파형을 실시간 측정하였다. 아크 방전의 방사 패턴을 분석한 결과 간헐적인 방전, 아크의 성장, 발열부의 생성, 플룸의 발생, 적열부 형성 순서로 진행되는 것을 알 수 있었다. 직렬 아크 방전이 진행될 때 전류 및 전압 파형은 정현파와 같은 주기성을 나타냈다. 그리고 + 파형에서 - 파형으로 바뀔 때와 - 파형에서 + 파형으로 바뀔 때 파형의 재기전압이 발생하는 것이 확인되었다. 방전이 진행될 때 1s 동안에 발생하는 열량은 약 0.317 mJ이고, 600 s 동안에 약 190 mJ의 열이 발생하는 것으로 해석되었다. 그리고 단락 지속 시간은 약 1.66 ms인 것으로 해석되었으며, 동일한 주기에서 전압 파형은 49.9 V까지 전위가 상승하는 것을 알 수 있었다. 또한, 방전이 진행될 때 전류의 실효치는 약 1.72 A이고, 최대치는 약 2.53 A로 분석되었다. 그리고 전압의 실효치는 약 42.8 V로 계산되었고, 최대치는 약 208 V로 측정되었다.

ABSTRACT

In this study, the authors measured voltage and current waveforms in real time during a serial arc discharge. The analysis results of the arc discharge radiation patterns exhibited intermittent discharge, arc growth, creation of a heat generating area, occurrence of plume, and formation of a red heat area, which proceeded in that order. When the serial arc discharge was introduced, the current and voltage waveforms exhibited periodicity as sine waves. It was also observed that a restriking transient voltage occurred when the waveform changed from positive (+) to negative (-) and vice versa. When the discharge proceeded, the amount of heat generated for 1 s and 600 s was approximately 0.317 mJ, and 190 mJ, respectively. The duration of the short circuit was approximately 1.66 ms, and in the case of the voltage waveform, it was evident that the electric potential increased to 49.9 V in the same cycle. Furthermore, when the discharge proceeded, the effective value (RMS value) of the current was approximately 1.72 A with a maximum current of approximately 2.53 A, whereas the effective value of the voltage was approximately 42.8 V with a maximum of approximately 208 V.

Keywords : Restrike voltage, Waveform patterns, Serial arc discharge, Short circuit, Effective value

1. 서 론

2008년부터 2017년까지 발생한 전체 화재 441,030건 중 발화 요인은 부주의가 215,249건(49%)으로 가장 높으며, 전기적 요인 100,831건(23%), 기계적 요인 41,909건(10%), 방화 의심 15,052건(3%), 방화 5,321건(1%) 순이다⁽¹⁾.

2018년도 한국전기안전공사 전기재해 통계분석에 의하면 전기화재는 9,240건으로 전체 발생 화재의 21.8%를 점유하였다. 전기화재로 인하여 사망 85명과 부상 440명 등 총 525명의 사상자가 발생했으며, 재산피해는 약 1,130억원이 발생한 것으로 분석되었다. 전기화재를 전년도와 비교하면 건수는 1,229건, 인명피해는 308명, 재해피해는 약

[†] Corresponding Author, TEL: +82-63-220-3119, FAX: +82-63-220-2056, E-Mail: enetek@naver.com

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

823억 원 증가한 것으로 조사되었다. 전기화재의 발화 형태별 분석에서 절연열화에 의한 단락화재가 2,268건(24.5%), 미확인 단락은 2,204건(23.9%), 과부하는 970건(10.5%), 트래킹에 의한 단락은 1,109건(12.0%), 접촉(속) 불량은 956건(10.3%) 등이다. 전기설비에서 접촉(속) 불량이 발생하면 줄열에 의한 축열로 열중이 더욱 커지고, 주변에 가연물이 있을 때 2차 화재로 확산될 수 있다. 또한, 접촉부가 열에 의해 변형이 되거나 접촉(속) 불량으로 전선이 이탈되어 건축 구조물의 철 또는 금속체에 닿아 2차 지락 사고 등의 복합적인 화재로 나타나기 때문에 전기화재의 원인을 정확하게 판정하는 것은 더욱 어려운 것이 현실이다⁽²⁾.

병렬 아크는 전선로와 전선로 사이에 발생하는 아크이며, 부하와 병렬로 발생하는 아크로 선간 단락 또는 지락이 여기에 속한다. 전선로에 병렬 아크가 발생되면 기존의 배선차단기(MCCB) 및 누전차단기(RCD) 등으로 비교적 효과적으로 회로를 차단할 수 있다. 그러나 직렬 아크는 회로 전류가 부하의 크기에 의해 결정되고, 보호 장치로 설치된 배선차단기 또는 누전차단기 등의 정격전류를 초과하지 않을 때가 많기 때문에 기존의 보호 장치는 효과적으로 반응하지 못하는 것이 현실이다. 전선의 불안정한 접속을 가정하여 구리-구리의 직렬 아크 시험은 일부 연구자들에 의해 지속적인 연구가 진행되었으나 구리와 탄소 전극에서 발생하는 직렬 아크 방사 패턴, 재기전압, 방전 지속 시간 및 패턴 등에 대한 연구는 부족하다⁽³⁻¹⁵⁾.

따라서 본 연구에서는 전극의 형태별 직렬 아크 방전시 발생하는 전압 및 전류 파형을 실시간 측정하는데 있다. 또한, 방전이 진행될 때의 재기전압의 크기 및 지속 시간 등을 해석하여 전기화재의 발화 메커니즘 규명 및 예방 장치의 개발을 위한 자료를 확보하는데 있다.

2. 관련 이론

전기설비에 사용되는 차단기는 정상시 부하전류의 개폐 및 이상시 회로를 신속히 차단하고, 사고점으로부터 계통을 분리시켜 선로 및 기기를 보호하는 장치이다. 차단기의 개방은 기계적인 개방과 전기적인 개방 등이 있다. 전기적 개방은 아크의 발생, 도통, 소호, 차단 완료 순으로 이루어진다. 전력계통에서 차단기를 개폐하는 경우 과도현상으로 이상 전압이 발생하며, 유도성 또는 용량성 전류의 경우는 메커니즘이 복잡하다. 보통 개폐 서지라는 것은 무부하 가공 송전선, 무부하 케이블, 전력용 콘덴서, 용량성 소전류의 개폐와 무부하 변압기, 리액터 등 유도성 소전류의 개폐에 의한 중간 주파수의 이상 전압을 말한다. 차단기에서 발생하는 개폐 서지의 종류는 무부하 충전 전류 차단, 유도성 소전류 차단, 고속도 재폐로시 차단, 단락 전류의 차단, 직류 차단, 3상 동시 투입 실패시 등이 있다. Figure 1은 차단될 때 발생하는 아크의 발생 메커니즘 및 차단 파형을 나타낸 것이다.

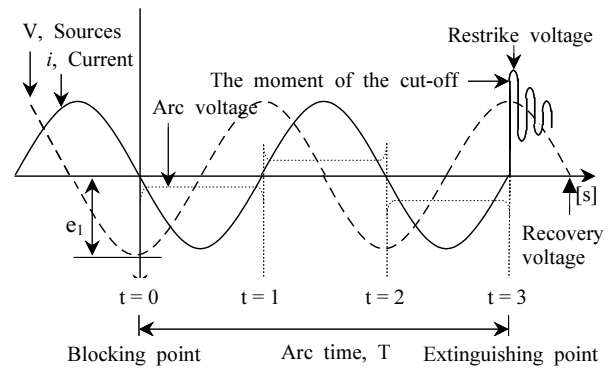
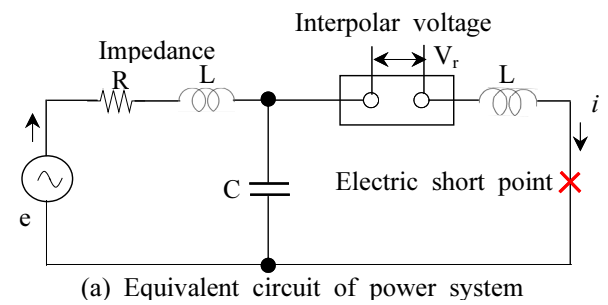
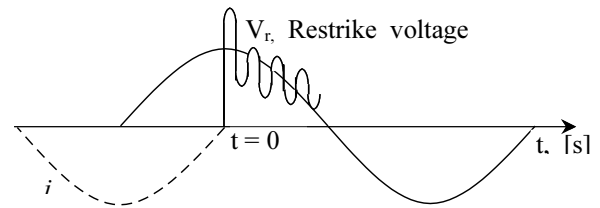


Figure 1. The blocking mechanism and the blocking process of the breakers.



(a) Equivalent circuit of power system



(b) Voltage wave type when circuit is cut off

Figure 2. Equivalent circuit of power system and voltage wave type when circuit is cut off.

Figure 2는 직렬 아크 방전이 발생할 때 유발되는 재기전압(Restrike voltage)의 유발 회로 및 차단 파형의 특징을 나타낸 것이다. 일반적인 전력계통에 필연적으로 존재하는 저항, 인덕턴스, 커패시턴스 성분을 나타낸 회로가 Figure 2(a)이다. 즉, 전력선의 일부 또는 접속기구류의 ON/OFF 등이 발생할 때 순간 돌발 전류가 흘러 아크를 유발시키는데 이것을 재기전압 또는 재발호라고 한다. Figure 2(b)는 회로가 ON/OFF 될 때의 파형을 나타낸 것이다. 차단 전류는 전원 전압에 비해 90° 늦은 지상인 전류가 흐르므로 t=0에서 전류가 영점 소호되었을 때 Vr은 전원측의 R-L-C 회로에서의 과도 진동에 의해 재기 전압이 발생하게 된다. 재기 전압은 차단기의 차단 능력을 저하시키지만 이상 전압은 상대적으로 적으며, 중성점 저항 접지 방식에서 차단 능력을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

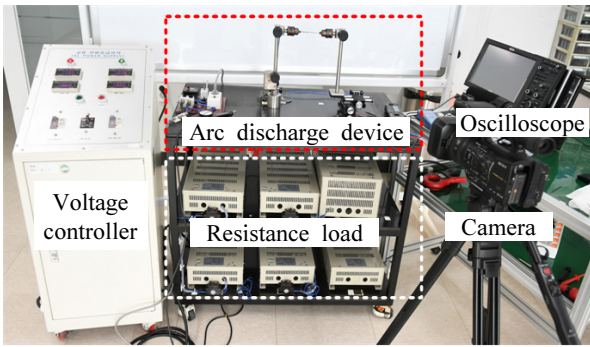


Figure 3. Photo of the series arc discharge device.

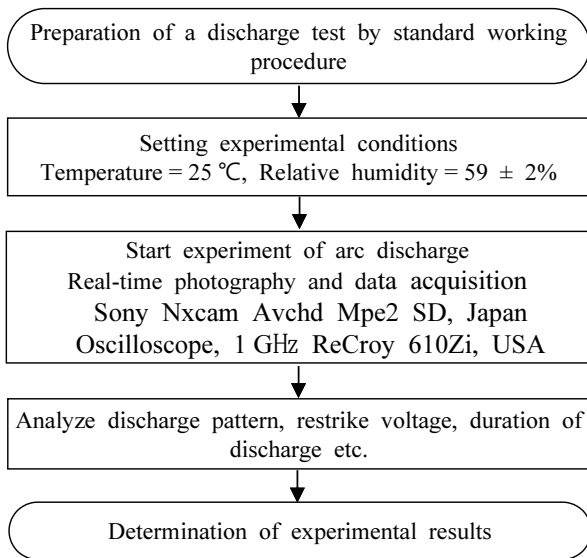


Figure 4. Flow chart for series arc discharge test.

3. 실험 방법

Figure 3은 재기전압의 특성 및 방전 지속 시간을 해석하기 위해 제안된 직렬 아크 방전 장치와 데이터 취득 시스템을 나타낸 실제 사진이다. 직렬 아크 방전 장치의 좌측이 고정자 전극이다. 직렬 아크 방전 장치에 공급되는 전원은 정격출력 10 kVA 전압조정기로 AC 220 V, 60 Hz이다. 그리고 110 Ω 및 220 Ω 저항부하(HRA 2000, RARA Elect., Korea)을 연결하였으며, 직렬 아크 방전의 발생 과정은 오실로스코프(Oscilloscope, 1 GHz ReCroy 610Zi, USA)를 사용하여 실시간 기록하였다. 전압 측정은 직렬 아크 방전 전극의 양단에 전압 프로브(Voltage Probe, ReCroy ADP305, USA)을 연결하여 측정하였다. 전류 측정은 직렬 아크 방전 전극에 직렬로 전류 프로브(Current Probe, ReCroy CP150, USA)을 연결하여 측정하였다. 또한, 실험의 초기 방전부터 종료되는 과정을 디지털 캠코더(Sony Nxcam Avchd Mpe2 SD, Japan)와 디지털 카메라(Nikon HB-40, Japan)를 사용하여 실시간 촬영하였다⁽¹²⁻¹⁵⁾.

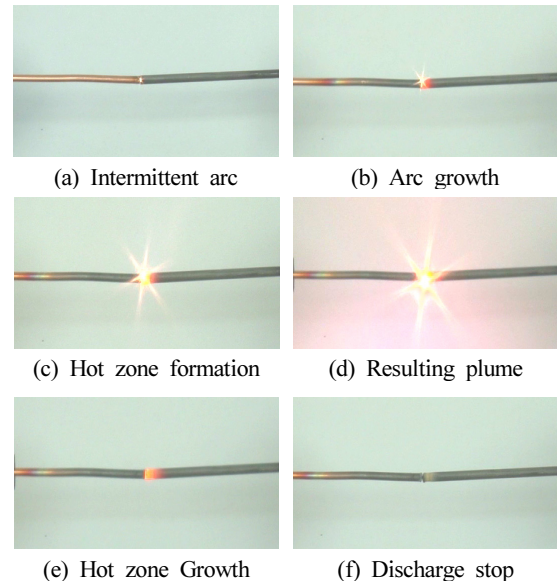


Figure 5. Radiation pattern of the plane-shaped copper electrode and plane-shaped carbon electrode.

Figure 4는 전극의 형태별 직렬 아크 방전시 발생하는 전압 및 전류 파형을 실시간 측정하기 위한 순서도이다. 구리 전극은 도전율 97% 이상, 단면적 2.5 mm² 표준 연동을 사용했다. 그리고 탄소 전극은 직경 2 mm, 탄소 함유율 99% 이상의 제품을 실험에 사용하였다. 실험의 신뢰성을 확보하기 위해 동일한 환경 및 제품을 실험에 적용하였으며, 전극의 형태별 각각의 조건에서 20회 실험을 반복 실시하였다. 직렬 아크 방전이 진행될 때 저항부하 110 Ω를 연결하여 일정한 조건에서 방전이 진행됨에 따라 외란에 의한 오동작을 최소로 하였다. 또한, 방전의 모든 과정은 동시에 촬영되었고, 전류 및 전압 파형의 데이터 취득 역시 동시에 진행함에 따라 실험의 신뢰성을 유지시켰다⁽¹²⁻¹⁵⁾.

4. 결과 및 고찰

Figure 5는 평면형 구리 전극과 평면형 탄소 전극을 서로 맞대고, 직렬 아크 방전이 진행될 때의 방사 패턴을 나타낸 실제 사진이다. 평판형은 전극의 단면이 직각으로 제작된 것이며, 두 전극 사이의 방전이 진행될 때 방사 패턴을 디지털 카메라로 촬영하였다. Figure 5(a)는 직렬 아크 방전이 간헐적으로 발생하는 것을 알 수 있었고, Figure 5(b)는 아크의 성장 과정을 확인할 수 있었다. Figure 5(c)는 두 전극 사이에 발열부(hot part)가 생성된 것을 알 수 있으며, Figure 5(d)는 발열부가 점점 커지고 플룸(plume)이 발생한 것을 알 수 있었다. 그리고 Figure 5(e)는 적열부가 형성되어 있으며, 불꽃을 비산하는 방전은 정지된 것을 알 수 있다. Figure 5(f)는 아크 방전이 종료된 실제 사진으로 방전이 진행된 곳은 회백색과 검정색이 혼합된 특징을 나타내며, 주변은 검정색으로 변색된 것을 확인할 수 있다⁽¹²⁻¹⁶⁾.

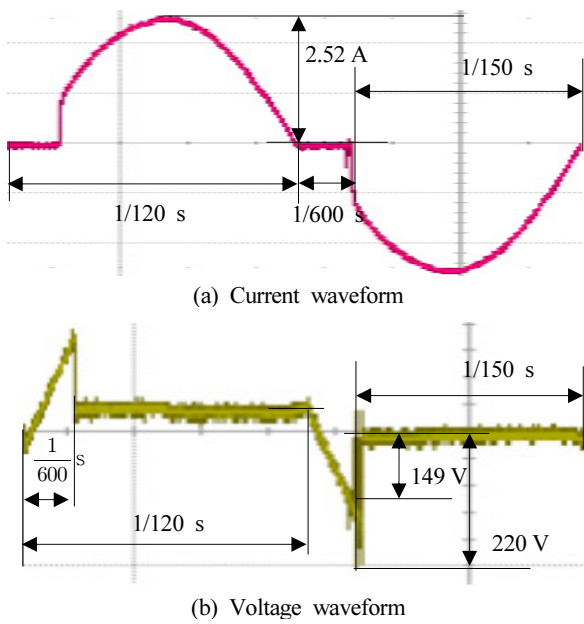


Figure 6. Voltage and current waveforms about the discharge of the plane-shaped copper and plane-shaped carbon electrodes.

Figure 6은 평면형 구리 전극과 평면형 탄소 전극을 서로 맞대고, 직렬 아크 방전이 진행될 때의 전압 및 전류 파형을 오실로스코프로 기록하여 나타낸 것이다. 직렬 아크 방전 장치를 이용하였으며, 가진기의 기계적 진동수는 2,000 rpm으로 설정하였다. 그리고 두 전극 사이에 AC 220 V, 60 Hz를 인가하였고, 부하는 저항 부하를 연결하여 2 A의 전류가 일정하게 흐르도록 조정하였다. 전류 및 전압 파형은 정현파와 같은 주기성을 나타냈으나 ‘+’ 파형에서 ‘-’ 파형으로 바뀔 때와 ‘-’ 파형에서 ‘+’ 파형으로 바뀔 때 파형의 일그러짐이 심하게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 전류 파형의 분석에서 단락은 약 1.667 ms가 발생하는 것으로 해석되었고, 동일한 주기에서 전압 파형은 33.8 V까지 전위가 상승하는 것을 알 수 있었다. 즉, 전류와 전압은 수하특성을 보이며, 직렬 아크 방전이 지속되는 것을 확인하였다⁽¹²⁻¹⁵⁾.

그리고 Figure 6의 파형을 분석하여 직렬 아크 방전이 발생할 때의 열량(H)을 계산할 수 있다. 전기회로에서 실효값(Effective value)은 시간 가변 전류 및 전압의 크기를 정의하는 방법에 의해 산술적 평균값 외에 전력적인 측면에서 해석한 것이다. 정현파는 반파 대칭이므로 반파 또는 반주기에 대한 실효값은 한 주기에 대한 실효값과 같다. 그러므로 정현파의 반주기분에 대한 실효값은 식 (1)과 같이 표현되며, 파형의 주기를 각도 또는 위상으로 표현한 것은 식 (2)와 같이 반주기분에 대한 실효값을 구한다.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} i^2 dt} \quad [A] \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i^2 d\theta} \quad [A] \quad (2)$$

그리고 Figure 6(a)에서 반파 정류된 전류의 실효값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (3) \\ &= \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{0.2\pi}^{\pi} I_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{2.52^2}{\pi} \int_{0.2\pi}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d(\omega t)} \\ &= \sqrt{\frac{2.52^2}{\pi} \times 1.495} \\ &= 1.738 \quad [A] \end{aligned}$$

여기서, 최대전류(I_m)는 2.52 A이므로 이론적 정현파의 실효전류(I)는 $I_m/\sqrt{2}$ 이므로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\text{이론적 실효전류}(I) = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 1.782 \quad [A] \quad (4)$$

그러므로 직렬 아크 방전이 지속될 때 통전된 실효 전류는 이론값에서 측정값을 빼면 알 수 있으므로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$I = 1.782 - 1.738 = 0.044 \quad [A] \quad (5)$$

그리고 직렬 아크가 발생할 때 열량(H)은 줄의 법칙을 이용하여 구할 수 있으므로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} H &= I^2 \times R \times t \quad (6) \\ &= 0.044^2 \times 110 \times \frac{1}{600} \quad [J] \\ &= 0.317 \quad [mJ] \end{aligned}$$

따라서 평면형 구리 전극과 평면형 탄소 전극에서 전압 220 V, 저항성 부하전류 2 A를 인가하여 1 s 동안에 직렬 아크가 발생하는 열량은 약 0.317 mJ 이고, 600 s 동안에 발생하는 약 190 mJ의 열이 발생하는 것을 실험을 통해서 확인하였다.

Figure 7은 평면형 구리 전극과 송곳형 탄소 전극을 서로 맞대고 직렬 아크 방전이 진행될 때의 전압 및 전류 파형을 측정된 것으로 Figure 4의 조건과 동일한 실험이 진행된 것이다. 전파형의 분석에서 단락은 약 1.66 ms가 발생하는 것으로 해석되었고, 동일한 주기에서 전압 파형은 32.4 V까지 전위가 상승하는 것을 알 수 있었다. 즉, 전류와 전압은

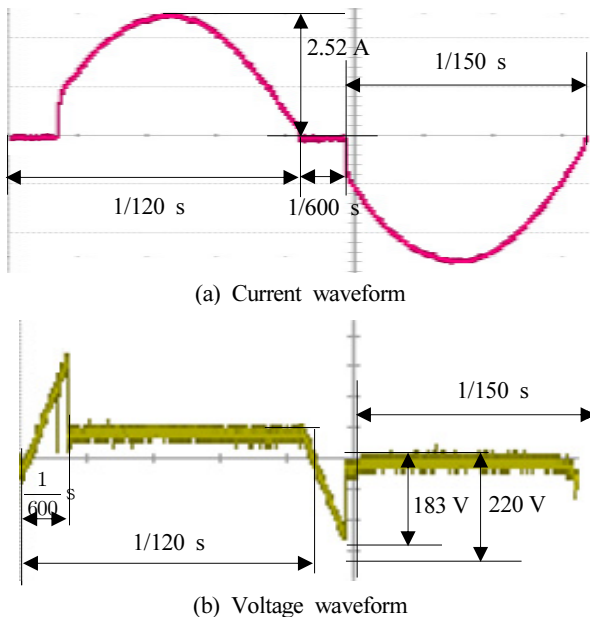


Figure 7. Voltage and current waveforms about the discharge of the plane-shaped copper and awl-shaped carbon electrodes.

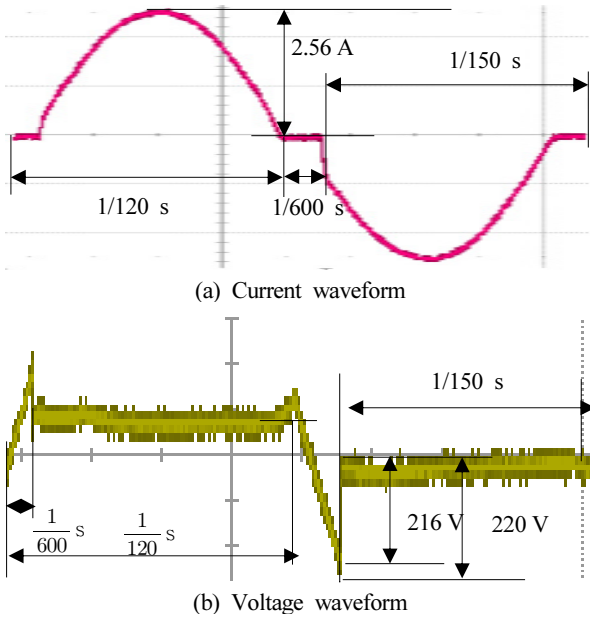


Figure 8. Voltage and current waveforms about the discharge of the plane-shaped copper and diagonal-shaped carbon electrodes.

수하특성을 보이며, 직렬 아크 방전이 지속되는 것을 확인하였다. 발생하는 열량은 0.317 mJ로 계산되었으며, 600 s 동안에 발생하는 열량은 약 190 mJ로 해석되어 전극의 형태는 열량 변화에 큰 영향이 없는 것으로 해석되었다.

Figure 8은 평면형 구리 전극과 대각형 탄소 전극을 서로 맞대고, 직렬 아크 방전이 진행될 때의 전압 및 전류 파형을 나타낸 것이다. 대각형은 전극의 단면이 45°로 제작된 것이며, 방전이 진행되는 동안 동일한 조건을 유지시켰다.

Table 1. Size of Current and Voltage According to the Type of Electrode

Classification		Current [A]		Voltage [V]	
Fixed Electrode	Variable electrode	rms	max	rms	max
Copper Plane	Carbon plane	1.73	2.52	33.8	149
	Carbon awl	1.74	2.52	32.4	183
	Carbon diagonal	1.72	2.56	49.9	216
Carbon Plane	Copper plane	1.71	2.52	49.7	242
	Copper awl	1.71	2.56	54.1	236
	Copper diagonal	1.73	2.52	36.6	222
Average		1.72	2.53	42.8	208

Table 2. Explosive Limits and Minimum Ignition Energy for Different Dust Types

Kind of dust	Explosion limit [g/m ³]	Minimum ignition energy [mJ]
Magnesium	20	80
Aluminum	35	80
Pulp	60	0
Wooden flour	40	30
Wheat flour	60	160

전류 파형의 분석에서 단락은 약 1.66 ms가 발생하는 것으로 해석되었고, 동일한 주기에서 전압 파형은 49.9 V까지 전위가 상승하는 것을 알 수 있었다. 즉, 전류와 전압은 수하특성을 보이며, 직렬 아크 방전이 지속되는 것을 확인하였다⁽¹²⁻¹⁵⁾.

UL-1699에서 제안한 방법에 근거한 직렬 아크 방전 장치를 개발하였고, 구리 전극과 탄소 전극의 형태별 직렬 아크 방전을 실시하여 Table 1과 같은 특성을 알 수 있었다. 전류의 실효치는 약 1.72 A로 계산되었고, 최대치는 약 2.53 A를 나타냈다. 그리고 전압의 실효치는 약 42.8 V로 계산되었고, 최대치는 약 208 V를 나타냈다. 직렬 아크 방전이 지속될 때 정격전압 220 V에 근사한 값을 나타내는 것으로 해석된다. 그러나 전류는 비교적 많이 흘러 Table 2와 같은 물질이 있을 때 착화되어 전기화재를 유발시킬 것으로 판단된다.

5. 결론

전극의 형태별 직렬 아크 방전시 발생하는 전압 및 전류 파형을 실시간 측정 및 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 직렬 아크 방전이 진행될 때의 방사 패턴 분석에서 간헐적인 방전, 아크의 성장, 발열부의 생성, 플룸의 발생, 적열부 형성 순서로 진행된다.
- 2) 직렬 아크 방전이 진행될 때 전류 및 전압 파형은 정

현파와 같은 주기성을 나타냈다. 그리고 + 파형에서 - 파형으로 바뀔 때와 - 파형에서 + 파형으로 바뀔 때 파형의 재기전압이 발생하였다.

3) 구리 전극과 탄소 전극에 전압 220 V, 저항성 부하전류 2 A를 연결되어 있을 때 1 s 동안에 발생하는 열량은 약 0.317 mJ이고, 600 s 동안에 발생하는 약 190 mJ의 열이 발생하였다.

4) 직렬 아크 방전이 진행될 때 단락 지속 시간은 약 1.66 ms인 것으로 해석되었고, 동일한 주기에서 전압 파형은 49.9 V까지 전위가 상승하는 것을 알 수 있었다. 그리고 전류와 전압은 수하특성을 보이며, 직렬 아크 방전이 지속된다.

5) 구리 전극과 탄소 전극의 직렬 아크 방전이 진행될 때 전류의 실효치는 약 1.72 A이고, 최대치는 약 2.53 A로 분석되었다. 그리고 전압의 실효치는 약 42.8 V로 계산되었고, 최대치는 약 208 V로 측정되었다.

후 기

본 논문의 일부는 제1저자의 전주대학교 일반대학원 공학석사 논문⁽¹⁶⁾ 및 (사)한국화재소방학회 학술발표대회 발표원고⁽¹²⁻¹⁵⁾를 기반으로 진보된 해석을 실시하여 집필되었음을 고지합니다.

References

1. Ministry of Public Safety and Security, "Fire Statistic Status", National Fire Date System (2017).
2. KESCO, "A Statistical Analysis on the Electrical Accident", Vol. 25, pp. 18-26 (2018).
3. Underwriters Laboratory, "UL 1699 Arc-Fault Circuit-Interrupters" (2008).
4. J. J. Shea, "Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring", Proceedings of the Fifty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 167-175 (2005).
5. J. J. Shea, "Comparing 240Vrms to 120Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire", Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 218-224 (2008).
6. J. J. Shea, Xin Zhou, "Material Effect on Glowing Contact Properties", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 32, No. 4, pp. 734-740 (2009).
7. X. Zhou and J. Shea, "Characterization of Glowing Contacts using Optical Emission Spectroscopy", Proceedings of the 53th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 98-104 (2007).
8. J. J. Shea, "Glowing Contact Physics", Proceedings of the Fifty-second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, pp. 48-57 (2006).
9. C. S. Choi, H. K. Kim and D. O. Kim, "A Study on the Growing Properties of the Cu₂O According to the Change of Load", Journal of the KIIS, Vol. 16, No. 5, pp. 46-49 (2001).
10. C. S. Choi, H. K. Kim, D. W. Kim and K. Y. Lee, "Temperature Diffusion Distribution of Electric Wire Deteriorated by Overcurrent", IEEJ Trans. PE, Vol. 128, No. 1, pp. 194-198 (2008).
11. W. S. Ko and C. S. Choi, "Properties Analysis of Cabinet Panel Body with Alarming Function of Leakage Current", Proceedings of 2016 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 71-72 (2016).
12. J. M. Lim and C. S. Choi, "Composition and Properties Analysis of Arc Discharge Device that use Copper-Carbon Electrode", Proceedings of 2016 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 77-78 (2016).
13. J. M. Lim and C. S. Choi, "A Study on the Radiation Pattern of a Series Arc Discharge by Using Plane-shaped Copper - Carbon Electrode", Proceedings of 2017 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 91-92 (2017).
14. J. M. Lim and C. S. Choi, "Restrike Voltage and Discharge Continuous Time when Series Arc is Generated", Proceedings of 2018 Fall Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 133-134 (2018).
15. J. M. Lim and C. S. Choi, "Analysis of Section Structure of Continuous Dischargeable Copper-Carbon Electrode", Proceedings of 2019 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 9-10 (2019).
16. J. M. Lim, "A Study on the Analysis of the Configuration and Characteristics of a Series Arc Discharge Device Using Copper - Carbon Electrodes", Master's Thesis, General Graduate School, Jeonju University (2017).