

[Research Paper]

전극 재료에 따른 AC 직렬 아크방전의 리스트라이크 패턴 및 방사 스펙트럼 분석에 관한 연구

임종민 · 최충석^{*†}

전주대학교 일반대학원 박사과정, *전주대학교 소방안전공학과 교수

Study on the Analysis of Restrike Pattern and Radial Spectrum of AC Arc Discharge based on the Electrode Material

Jong-Min Lim · Chung-Seog Choi^{**†}

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

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

(Received April 20, 2021; Revised June 18, 2021; Accepted June 25, 2021)

요 약

본 논문은 안정적인 아크방전이 재현될 수 있도록 IEC-62606 및 UL-1699를 기초하여 시스템을 설계 및 제작하였다. 전극 재료에 따른 AC 직렬 아크방전을 실시하여 리스트라이크 패턴 및 방사 스펙트럼을 해석하는 데 있다. 구리 평면 전극의 전압 파형 분석에서 ‘+’ 파형의 반주기보다 ‘-’ 파형의 반주기가 더 불안정한 특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 구리 전극의 방사 스펙트럼은 자외선 및 가시광선 영역에서 발생하는 것으로 분석되었다. 탄소 평면 전극의 전압 파형은 구리 전극의 패턴과 유사한 것으로 확인되었으나 ‘-’ 파형의 반주기 때 발생하는 리스트라이크가 상대적으로 더 빠르게 생성되는 것을 알 수 있었다. 방사 스펙트럼은 589 nm, 671 nm, 766 nm 근처에서 가장 강한 것으로 분석되었다. 구리 평면 전극과 탄소 평면 전극을 이용한 AC 직렬 아크방전은 구리 평면 전극의 아크방전 패턴과 탄소 평면 전극의 아크방전 패턴 사이인 것을 알 수 있었다. 전극의 재질에 따라 전압 리스트라이크, 전류 패턴 및 방사 스펙트럼 대역 등의 차이가 있다는 것이 입증되었다.

ABSTRACT

In this study, we designed and fabricated a system based on IEC-62606 and UL-1699 such that stable arc discharge could be produced. AC arc discharge was performed to interpret the restrike pattern and radiation spectrum according to the electrode material. In the voltage waveform analysis of flat copper electrodes, it was analyzed that the accompaniment cycle of the negative waveform was more unstable than the half cycle of the positive waveform. We observed that the radiation spectrum of copper electrodes occurred in the ultraviolet and visible light regions. Moreover, the voltage waveform of the carbon electrode was found to be similar to the pattern produced by the copper electrode. However, we observed that the restrike generated at the half cycle of the negative waveform was produced relatively faster. The radio spectra were strongest near 589 nm, 671 nm, and 766 nm. AC arc discharges using copper electrodes and carbon electrodes were found to be between the arc-discharge patterns of copper electrodes and carbon electrodes. It has been proven that depending on the material of the electrode, there are differences in voltage list like, current patterns, and radiated spectra bands.

Keywords : Restrike pattern, Radiation spectrum, Serial arc discharge, Electrode material

1. 서 론

2019년 소방청 화재통계연감에 의하면 전체 화재는 40,102건이 발생하였고, 사상자는 2,515명, 재산피해는 8,572

억 원으로 조사되었다⁽¹⁾. 그리고 2019년 한국전기안전공사 (KESCO) 전기재해의 발생 분석에 의하면 전기화재는 8,155건이다. 미확인 화재는 2,153건, 절연 열화에 의한 화재는 1,903건, 트래킹에 의한 단락 화재는 992건, 접촉(속)

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

© 2021 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

불량에 의한 화재는 856건이고, 과부하에 의한 화재는 688 건 등이다. 전기재해의 발생 추이는 매년 유사한 것으로 해석되었으며, 주목할 내용은 전기화재가 발생하면 주변의 가연물에 의해 2차 확산 피해가 증가하는 경향을 보인다⁽²⁾. 전기화재를 발생시키는 요인 중에 직렬 아크방전은 재현이 어렵고, 사고 예방을 위한 적절한 보호장치가 없는 것이 현실이다. 현재 건축물에 설치된 배선차단기(MCCB)는 전선로의 단락 및 지락이 발생했을 때 전기설비를 보호하기 위해 설치하는 것이고, 누전차단기(ELB or RCD)는 생명체의 감전사고 예방을 위해 설치되는 것으로 전기화재 예방에 큰 도움이 되지 못하고 있다. 그동안 이와 같은 문제점을 인식하고 관련 전문가들은 저압용 전선로의 불완전한 접속(축)을 설정하고^(3,4), 방전 전압의 크기 및 패턴 연구가 진행되었다⁽⁵⁻⁷⁾. 또한, 직렬 아크방전이 완료된 후의 전극의 표면 및 단면의 패턴 해석⁽⁸⁻¹¹⁾, 아크방전이 진행될 때의 전압 파형, 전류 파형 및 재기전압의 특성 등을 해석하였다^(12,13). 따라서 본 연구에서는 안정적인 아크방전이 재현될 수 있도록 IEC-62606⁽¹⁴⁾ 및 UL-1699⁽¹⁵⁾를 기초하여 시스템의 설계 및 제작하였고, 전극 재료에 따른 AC 직렬 아크방전의 리스트라이크 패턴 및 방사 스펙트럼을 분석하여 AI 및 IoT 기반의 전기화재 예방용 디바이스 개발을 위한 객관적인 지식기반을 구축하는 데 있다.

2. 실험 방법 및 조건

Figure 1은 구리 평면 전극의 직렬 아크방전을 안정적으로 재현하기 위해 구성된 실험장치의 개략도이다. AC 직렬 아크방전을 위한 전원공급은 UPS (S500SL, Sunchang Ele. Co., AC 220 V, 60 Hz, 5 kVA, Korea)를 이용했으며, 시스템의 부하전류는 Dynamic Braking Resistor (HRA 2000, RARA Electronics, Korea)을 이용하였다. 저항부하는 110 Ω이다. 직렬 아크방전의 발생 과정은 Oscilloscope (1 GHz, ReCroy, 610Zi, USA)를 사용하여 실시간 기록하였고, 전압 및 전류는 Voltage Probe (ReCroy, ADP305, USA) 및 Current Probe (ReCroy, CP150, USA)로 측정하였다. 자외선 및 가시광선의 파형 측정은 Mini Spectrometer (AVATES, AvaSpec-Mini4096 CL-U10, DCL200, 10 μm slit, USB2, grating-MN1800-0.25/MN600-0.50, Netherlands)을 이용했다. 자외선 파장의 영역 분석은 200~365 nm이고, 가시광선 파장의 영역 분석은 350~885 nm이다. 데이터는 Bifurcated fiber cable (FCB-UVIR600-1, 600 μm, broadband 1m, 3×SMA, Netherlands)인 UV/VIS/NIR 200~2,500 nm를 적용하였다. UVV/VIS/NIR (COL-UV/VIS, including SMA adapter, Netherlands)을 사용하여 렌즈를 통과한 광선은 평행하게 유지할 수 있었다. Digital Camcorder (Sony Nxcam, Avchd Mpe2 SD, Japan) 및 Digital Camera (Nikon, HB-40, Japan)로 아크방전 패턴을 실시간 촬영하였다.

Figure 2는 AC 직렬 아크방전 실험을 재현하고, 방전이 진행될 때의 데이터 취득 및 해석과정을 나타낸 순서도이

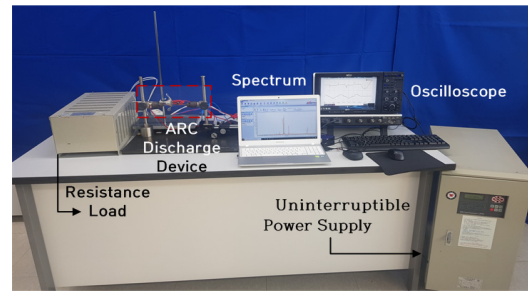


Figure 1. Schematic diagram of the experimental device configured to reliably reproduce the series arc discharge.

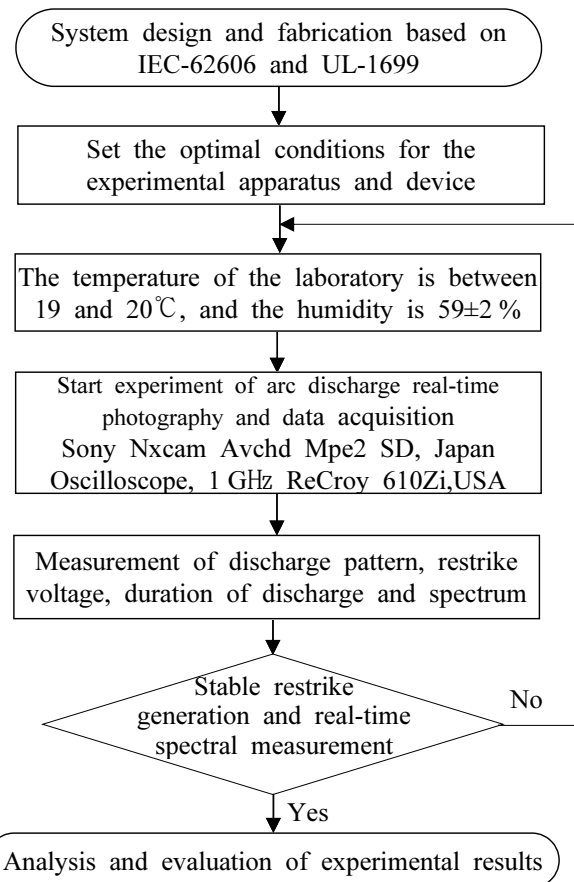


Figure 2. Flowchart reproducing the series arc discharge experiment and showing the acquisition and analysis of data.

다. AC 직렬 아크방전이 진행될 때 실험실의 온도는 19~20 °C, 상대 습도는 59~61%, 풍속은 0.1~0.2 m/s이다. 구리 전극의 도전율은 97% 이상이며, 탄소 전극의 함유율은 97% 이상이다. 전극의 단면은 평판구조이며, 직경은 2.0 mm이다. 실험은 일정한 환경에서 전극 재료에 따라 각각 10회 반복 실시하였다. 직렬 아크방전이 진행될 때 저항부하는 110 Ω를 연결하여 인덕턴스와 커패시턴스에 의해 발생할 수 있는 오동작 요소를 차단하였다. 실험의 과정은 동시에 촬영되었고, 전류 및 전압 파형의 데이터 취득 역시 동시에 진행함에 따라 실험 오차를 줄였다^(14,15).

3. 결과 및 고찰

Figure 3은 IEC-62606 및 UL-1699를 근거하여 안정적인 데이터 픽업을 위해 설계 및 제작된 실험장치의 개략도이다. 구리 평면 전극과 구리 평면 전극, 탄소 평면 전극과 탄소 평면 전극 그리고 구리 평면 전극과 탄소 평면 전극의 3가지 실험 방법으로 전원에 AC 220 V를 인가하였다. 저압용 전기설비와 유사한 조건의 부하전류 2 A가 흐를 때 직렬 아크 방전된 전압 및 전류 파형의 패턴을 실시간 측정하였다. IEC-62606 및 UL-1699 기준을 융합한 시스템을 독창적으로 개발함에 따라 안정적으로 재현된 리스트라이크의 실시간 발생이 가능하였다. 또한, 고감도 광학 센서를 적용하여 자외선 및 가시광선 대역의 스펙트라를 실시간 측정 및 저장이 가능하여 AI 및 IoT 기반의 전기재해예방 시스템의 개발을 위한 데이터를 구축할 수 있다.

Figure 4는 구리 평면 전극을 서로 맞대고, AC 220 V를 인가하고, 부하전류 2 A가 흐를 때 직렬 아크 방전된 전압 및 전류 파형의 패턴을 실시간 측정하여 나타낸 것이다. 전극과 전극이 직렬 접촉되는 순간에는 미세한 변동이 있는 전압 파형을 보이다가 초기 방전이 시작되는 순간에 과도 아크파형이 발생하였고, 그 이후에 삼각파가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 전압 파형의 분석에서 ‘+’ 파형의 반

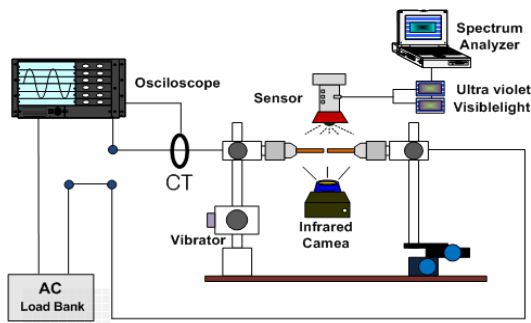


Figure 3. Schematic diagram of the experimental apparatus for the analysis of the characteristics of the series arc discharge according to the shape of electrodes and the change of load current.

주기보다 ‘-’ 파형의 반주기가 더 불안정한 특성을 나타내는 것으로 분석되었다. 전류 파형은 기본파형이 일그러지고, 불규칙한 과도파형이 형성되는 것으로 확인되었다. 전극과 전극이 떨어져 전류의 흐름이 어려운 약 0.2 s 동안의 파형은 미세한 진동이 포함된 파형을 나타내며, 양 전극이 접촉되어 전류가 흐를 때의 전류 파형은 미세한 진동이 포함된 정현파 패턴을 나타낸다.

Table 1은 Figure 4와 같은 AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 주요 특성을 제시한 것으로 주기는 0.02 s이다. AC 직렬 아크방전이 1 주기 진행될 때를 10회 반복 측정한 것으로 평균 실효 전압은 58.37 V, 실효 전류는 1.82 A, 저항은 32.15 Ω, 열용량은 105.98 J, 평균 발열량은 0.43 cal 등으로 해석되었다. 그러므로 전선로에 이와 같은 현상이 반복되면 설비 및 기기 등은 점점 열화(劣化)되어 절연성능이 저

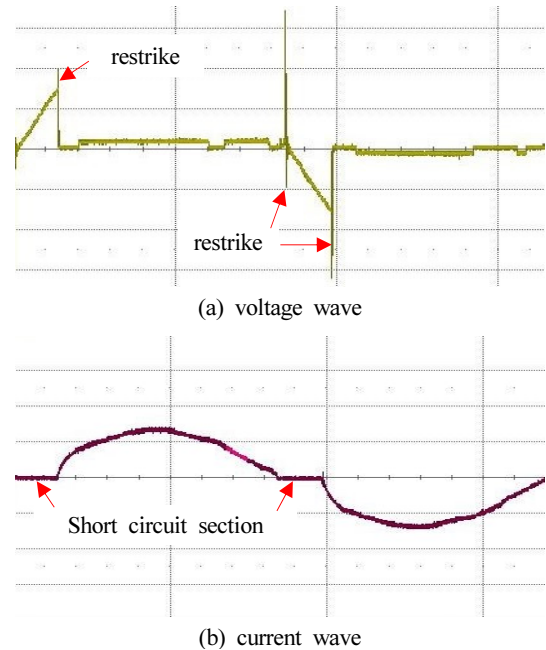


Figure 4. Waveform pattern when load current flows 2 A and AC series arc discharge between Cu - Cu flat electrodes.

Table 1. Data when the Load Current Flows 2A and the AC Series arc Discharge between the Cu - Cu Flat Electrodes Occurs

No.	Voltage [V]	Current [A]	Resistance [Ω]	Energy [J]	Constant	Period [T]	Caloric value [cal]
1	51.60	1.79	28.76	92.57	0.24	0.02	0.38
2	52.00	1.66	31.36	86.22	0.24	0.02	0.35
3	60.20	1.66	36.22	100.05	0.24	0.02	0.41
4	57.70	1.87	30.89	107.78	0.24	0.02	0.44
5	63.60	1.85	34.38	117.66	0.24	0.02	0.48
6	69.30	1.88	36.88	130.21	0.24	0.02	0.53
7	62.40	1.82	34.36	113.32	0.24	0.02	0.46
8	55.70	1.86	30.01	103.38	0.24	0.02	0.42
9	60.70	1.86	32.63	112.90	0.24	0.02	0.46
10	50.50	1.91	26.40	96.61	0.24	0.02	0.39
Average	58.37	1.82	32.15	105.98	0.24	0.02	0.43

하될 것이고, Table 2에 제시된 가연성 분진에 착화되어 화재가 발생할 것으로 판단된다⁽¹³⁾.

Figure 5는 탄소 평면 전극을 서로 맞대고, AC 220 V, 부하전류 2 A를 인가하여 직렬 아크방전이 진행될 때의 전압 및 전류 파형의 패턴을 실시간 측정하여 나타낸 것이다. AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 전압 파형의 분석에서 구리 전극의 패턴과 유사한 리스트라이크 현상이 확인되었다. 그러나 ‘-’ 파형의 리스트라이크가 구리 전극보다 더 빠르게 생성되는 것을 알 수 있었다. 그리고 동일한 조건에서 획득한 전류 파형 역시 유사한 패턴을 나타냈다. 즉, 탄소 전극의 방전 메커니즘이 구리 전극의 방전 메커니즘과 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 3은 Figure 5와 같은 AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 주요 특성을 제시한 것이다. AC 직렬 아크방전이 1 주기 진행될 때를 10회 반복 측정한 것으로 평균 실효 전압은 28.50 V, 실효 전류는 1.78 A, 저항은 16.06 Ω, 열용량은 50.59 J, 평균 발열량은 0.21 cal 등으로 분석되었다. 그러므로 전선로에 이와 같은 현상이 반복되면 설비 및 기기 등은 점점 열화(劣化)되어 절연능력이 저하될 것이고, 발생된 발열량이 방사되는 발열량보다 많아져 축열량이 증가되면 주변의 Table 2와 같은 가연성 물질에 착화되어 전기화재를 유발시킬 것으로 판단된다.

Figure 6은 구리 평면 전극과 탄소 평면 전극을 서로 맞

대고, AC 220 V을 인가하고, 부하전류가 2 A 흐를 때 AC 직렬 아크방전의 전압 및 전류 파형의 패턴을 실시간 측정하여 나타낸 것이다. 직렬 아크방전이 진행될 때의 전압 파형은 기본파형이 대부분 없어지고, 주기적인 과도파형 및 약간의 삼각파가 형성되는 것을 알 수 있다. 그리고 전류 파형 분석에서 전극과 전극이 떨어져 전류의 흐름이 어려운 약 0.2 s의 파형은 미세한 진동이 포함된 파형을 나타내며, 양 전극이 접촉되어 전류가 흐를 때의 전류 파형은 미세한 진동이 포함된 정현파 패턴을 나타내는 것으로 분석되었다. 즉, 동일한 전원 및 부하저항이라면 전극의 재질에 따라 전압 및 전류 패턴이 다르게 생성되는 것이 입증된바 전극의 재질에 따른 아크방전을 재현하고, 각각의 패턴 및

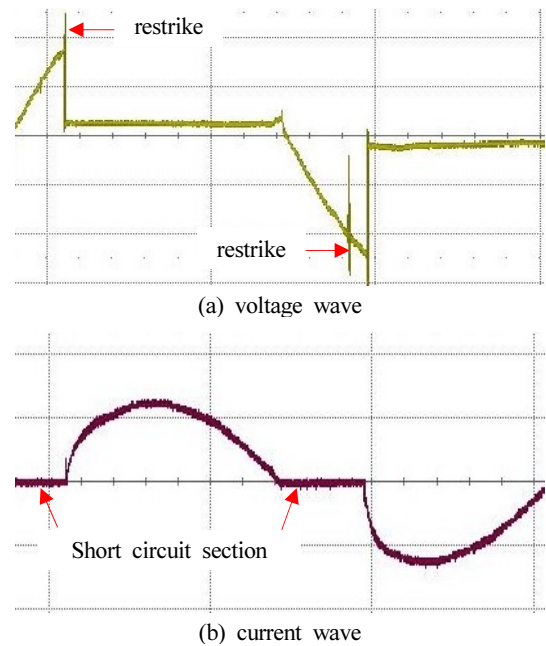


Figure 5. Waveform pattern when load current flows 2 A and AC series arc discharge between C - C flat electrodes.

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
Polyethylene	20	10
Wooden flour	40	30
Wheat flour	60	160

Table 3. Data when the Load Current Flows 2 A and the AC Series Arc Discharge between the C - C Flat Electrodes Occurs

No.	Voltage [V]	Current [A]	Resistance [Ω]	Energy [J]	Constant	Period [T]	Caloric value [cal]
1	30.40	1.82	16.71	55.30	0.24	0.02	0.23
2	34.00	1.72	19.77	58.48	0.24	0.02	0.24
3	30.50	1.76	17.38	53.53	0.24	0.02	0.22
4	24.90	1.81	13.76	45.04	0.24	0.02	0.18
5	26.70	1.82	14.67	48.59	0.24	0.02	0.20
6	25.40	1.82	13.94	46.28	0.24	0.02	0.19
7	32.00	1.79	17.86	57.34	0.24	0.02	0.23
8	24.20	1.80	13.41	43.66	0.24	0.02	0.18
9	27.30	1.82	15.00	49.69	0.24	0.02	0.20
10	34.90	2.59	13.50	90.22	0.24	0.02	0.37
Average	28.50	1.78	16.06	50.59	0.24	0.02	0.21

데이터를 빅데이터 처리하면 직렬 아크방전에 의한 사고를 예방할 수 있는 차단기 개발이 가능할 것으로 판단된다.

Table 4는 Figure 6과 같은 동일한 조건에서 AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 주요 특성을 획득하여 제시한 것으로 주기는 약 0.02 s이다. AC 직렬 아크방전이 1 주기 진행될 때를 10회 반복 측정하여 평균 실효 전압은 32.80 V, 실효 전류는 1.72 A, 저항은 19.04 Ω , 열용량은 56.51 J, 평균 발열량은 0.23 cal 등으로 분석되었다. 즉, 전극의 종류, 부하의 크기, 전압 및 전류 파형의 패턴 등을 융합할 수 있는 기법을 적용한다면 새로운 차원의 AC 직렬 아크방전 검출 장치의 개발이 가능한 것이다.

Figure 7은 구리 평면 전극 간 AC 220 V를 인가하고, 부하전류가 2 A 흐를 때 AC 직렬 아크방전의 스펙트럼을 나타낸 것이다.

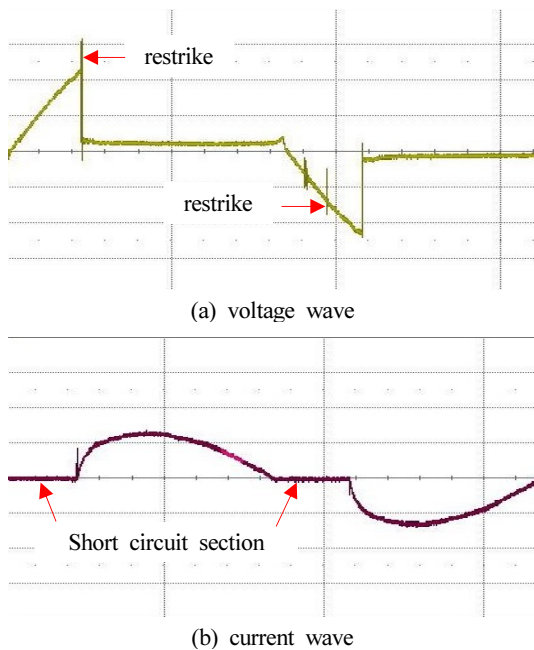


Figure 6. Waveform pattern when load current flows 2 A and AC series arc discharge between Cu - C flat electrodes.

타낸 것이다. AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 방사 스펙트럼은 219 nm, 325 nm, 510 nm, 511 nm, 522 nm, 578 nm, 793 nm, 809 nm 등에서 다수가 관측되었다. 즉, 구리 전극만을 사용한 AC 직렬 아크방전은 자외선 및 가시광선 영역에서 빈번하게 발생하는 것으로 분석되었다.

Figure 8은 탄소 평면 전극 간 AC 220 V를 인가하고, 부하전류가 2 A 흐를 때 AC 직렬 아크방전의 스펙트럼을 나타낸 것이다. AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 방사 스펙트럼은 221~288 nm, 295 nm, 308 nm, 323 nm, 335 nm, 338 nm, 365 nm, 589 nm, 671 nm, 766 nm 등에서 측정되었다. 그리고 589 nm, 671 nm, 766 nm 근처에서 방사 스펙트럼의 세기가 가장 강한 것으로 분석되었다.

Figure 9는 구리 평면 전극과 탄소 평면 전극 간 AC 220 V를 인가하고, 부하전류가 2 A 흐를 때 AC 직렬 아크방전의 스펙트럼을 나타낸 것이다. AC 직렬 아크방전이 진행될 때의 방사 스펙트럼은 222~252 nm, 288 nm, 309 nm, 325 nm, 327 nm, 358 nm, 515 nm, 522 nm, 587 nm, 793 nm 등에서 생성되었다. 그리고 522 nm 근처에서 방사 스펙트럼의 세기가 가장 강한 것으로 분석되었다. 구리 평면 고정 전극과 탄소 평면 가변 전극을 이용한 AC 직렬 아크방전의 방사 스펙트럼은 구리 평면 전극 및 탄소 평면 전극을 각각

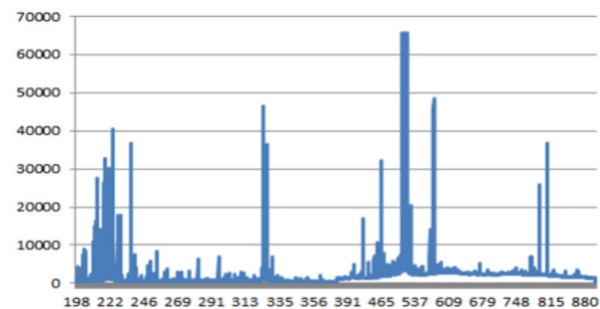


Figure 7. Spectrum pattern when load current flows 2 A and AC series arc discharge between Cu - Cu flat electrodes.

Table 4. Data when the Load Current Flows 2 A and the AC Series Arc Discharge between the Cu - C Flat Electrodes Occurs

No.	Voltage [V]	Current [A]	Resistance [Ω]	Energy [J]	Constant	Period [T]	Caloric value [cal]
1	31.70	1.78	17.83	56.36	0.24	0.02	0.23
2	27.90	1.75	15.97	48.74	0.24	0.02	0.20
3	31.50	1.72	18.31	54.18	0.24	0.02	0.22
4	30.80	1.72	17.87	53.10	0.24	0.02	0.22
5	34.80	1.75	19.84	61.04	0.24	0.02	0.25
6	31.60	1.74	18.18	54.92	0.24	0.02	0.22
7	37.60	1.74	21.60	65.46	0.24	0.02	0.27
8	32.10	1.72	18.63	55.31	0.24	0.02	0.23
9	35.70	1.70	20.99	60.73	0.24	0.02	0.25
10	37.90	1.69	22.37	64.20	0.24	0.02	0.26
Average	32.80	1.72	19.04	56.51	0.24	0.02	0.23

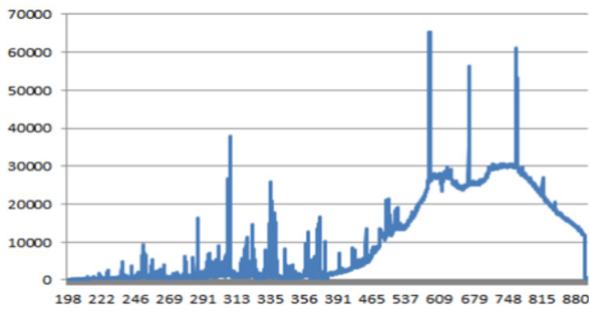


Figure 8. Spectrum pattern when load current flows 2 A and AC series arc discharge between C - C flat electrodes.

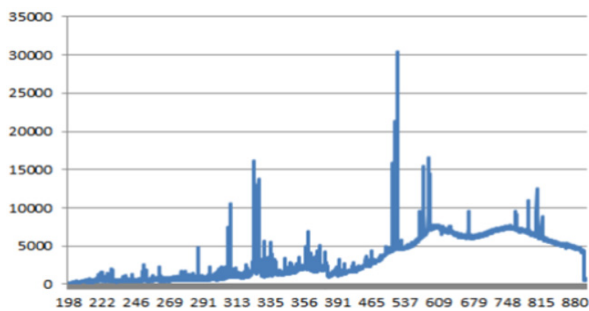


Figure 9. Spectrum pattern when load current flows 2 A and AC series arc discharge between Cu - C flat electrodes.

사용했을 때 발생한 패턴이 혼재된 것으로 해석되었다. 따라서 저압용 전기설비에 사용되는 스위치 기어류 및 도체 등을 이용하여 AC 직렬 아크방전을 재현하고, 각각에 대한 전압 및 전류 패턴, 방사 스펙트럼 등을 빅데이터 처리한다면 새로운 개념의 디바이스 개발이 가능할 것이다.

4. 결 론

안정적인 AC 직렬 아크방전을 재현하기 위해 IEC-62606, UL-1699를 근거하여 시스템을 설계 및 제작하였고, 방전이 진행될 때의 리스트라이크 패턴 및 방사 스펙트럼을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 구리 평면 전극을 이용한 AC 직렬 아크방전의 전압 파형 분석에서 ‘+’ 파형의 반주기보다 ‘-’ 파형의 반주기가 더 불안정한 특성을 나타낸다. 전류 파형은 인가된 기본파형이 일그러지고, 불규칙한 과도파형이 형성되는 것으로 확인되었다. 그리고 평균 실효 전압은 58.37 V, 실효 전류는 1.82 A, 저항은 32.15 Ω, 열용량은 105.98 J, 평균 발열량은 0.43 cal로 해석되었다. 방사 스펙트럼은 219 nm, 325 nm, 510 nm, 511 nm, 522 nm, 578 nm, 793 nm, 809 nm 등에서 다수가 관측되었다. 구리 평면 전극을 사용한 AC 직렬 아크방전은 비교적 넓은 영역에서 빈번하게 발생하는 것으로 분석되었다.

2) 탄소 평면 전극을 이용한 AC 직렬 아크방전의 전압 파형 분석에서 구리 평면 전극의 패턴과 유사한 현상이 확

인되었으나 ‘-’ 파형의 반주기 때 생성되는 리스트라이크가 구리 평면 전극보다 더 빠르게 생성되는 것을 알 수 있었다. 평균 실효 전압은 28.50 V, 실효 전류는 1.78 A, 저항은 16.06 Ω, 열용량은 50.59 J, 평균 발열량은 0.21 cal 등으로 분석되었다. 방사 스펙트럼은 589 nm, 671 nm, 766 nm에서 강한 것으로 분석되었다.

3) 구리 평면 전극과 탄소 평면 전극을 이용한 AC 직렬 아크방전은 구리 평면 전극의 아크방전 패턴과 탄소 평면 전극의 아크방전 패턴 사이인 것으로 분석되었다. 그리고 평균 실효 전압은 32.80 V, 실효 전류는 1.72 A, 저항은 19.04 Ω, 열용량은 56.51 J, 평균 발열량은 0.23 cal 등으로 분석되었다. 또한, 방사 스펙트럼은 522 nm 근처에서 가장 강한 것으로 분석되었으며, 전극의 재질에 따라 전압 리스트라이크, 전류 패턴 및 방사 스펙트럼이 차이가 있는 것이 입증되었다.

따라서 전극 재료에 따른 AC 직렬 아크방전을 재현하고, 각각에 대한 전압 리스트라이크, 전류 패턴 및 방사 스펙트럼 등을 빅데이터 처리를 통해서 AI 및 IoT 기반의 전기화재 예방을 위한 디바이스 개발에 활용되었다.

References

1. Ministry of Public Safety and Security, “Fire statistic Status”, National Fire Date System (2019).
2. S. W. Cho, “A Statistical Analysis on the Electrical Accident”, KESCO, Vol. 29, pp. 18-26 (2019).
3. 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).
4. 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).
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 and X. Zhou, “Material Effect on Glowing Contact Properties”, IEEE Transactions on components and packaging technologies, Vol. 32, No. 4, pp. 734-740 (2009). <https://doi.org/10.1109/TCAPT.2009.2034328>
7. X. Zhou and J. J. Shea, “Characterization of Glowing Contacts using Optical Emission Spectroscopy”, Proceedings of the 53th IEEE Holm Conference on electrical contacts, pp. 98-104 (2007). <https://doi.org/10.1109/HOLM.2007.4318201>
8. W. S. Ko and C. S. Choi, “Properties Analysis of Cabinet Panel Body with Alarming Function of Leakage Current”, Proceeding of 2016 KIFSE Annual Fall Conference, pp.

- 71-72 (2016).
9. J. M. Lim and C. S. Choi, "Composition and Properties Analysis of Arc Discharge Device that use Copper-Carbon Electrode", Proceeding of 2016 KIFSE Annual Fall Conference, pp. 77-78 (2016).
 10. 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", Proceeding of 2017 KIFSE Annual Spring Conference, EXCO, pp. 91-92 (2017).
 11. J. M. Lim and C. S. Choi, "Analysis of Section Structure of Continuous Dischargeable Copper-Carbon Electrode", Proceeding of 2019 KIFSE Annual Spring Conference, EXCO, pp. 9-10 (2019).
 12. J. M. Lim and C. S. Choi, "Restrike Voltage and Discharge Continuous Time when Series Arc is Generated", Proceeding of 2018 KIFSE Annual Fall Conference, pp. 133-134, (2018).
 13. J. M. Lim and C. S. Choi, "Study on Restriking Transient Voltage Characteristics and Waveform Patterns of Planar Copper-Carbon Electrodes using Forms", Fire Science and Engineering, Vol. 34, No. 4, pp. 1-6 (2020). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.a080ed32>
 14. International Electrotechnical Commission, "IEC-62606 Arc Fault Detection Device" (2019).
 15. Underwriters Laboratory, "UL 1699 Arc-Fault Circuit - Interrupters" (2008).