

옥내 배선계통에서 직렬 아크의 검출과 판별

김우현¹, 왕국명¹, 길경석^{1,a}, 지홍근²

¹ 한국해양대학교 전기전자공학과

² 국립과학수사연구원 이공학과

Detection and Identification of the Series Arc in an Indoor Wiring System

Woo-Hyun Kim¹, Guoming Wang¹, Gyung-Suk Kil^{1,a}, and Hong-Keun Ji²

¹ Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

² Physical Engineering Division, National Forensic Service Institute, Daegu 39872, Korea

(Received March 27, 2018; Revised May 1, 2018; Accepted May 19, 2018)

Abstract: Most series arcs lead to electrical fires that cannot be interrupted by circuit breakers, because the arc's current is outside the breaker's operating range. In this paper, experiments were conducted on the detection and identification of series arcs to prevent electrical fires. Plugs and outlets specified in KS C 8305 were deteriorated to replicate arc faults commonly found in fields. The characteristics of series arcs resulting from various types of loose connections were determined by analyzing the frequency spectra and phase distributions of detected arc pulses. The results showed that the simulated arc defects used in this study were more similar to actual arc phenomena than the existing arc generator specified in UL 1699. In addition, loose connections, such as wire-wire, terminal-wire, and outlet-plug, can be identified by phases of 0°, 180° and 360°, respectively. These phases can be detected by a band pass filter with a frequency range of 5~10 MHz, which can be used as the trip signal for circuit breakers.

Keywords: Electrical fire, Series arc, Artificial defects, Identification, Phase distribution analysis

1. 서론

전기화재로 인한 인명 및 재산 피해는 정부의 노력과 나날이 발전하는 차단기 및 자동화재 탐지설비에도 일정 수준을 유지하고 있다. 국가화재정보센터에 따르면, 2017년 국내에서 발생한 총 화재 44,178건 중 전기로 인한 화재는 9,256건으로 전체의 21%를 차지한다 [1]. 영국, 일본 등 국외 통계는 10% 정도로, 해외 사례와 비교해 보면 국내 전기화재의 비율이 높은데, 그 이유 중 하나는 아크차단기(arc fault circuit interrupter, AFCI)

의 부재이다. 2015년 한국전기안전공사 전기화재 통계에서 아크에 의한 발화가 전기화재 중 78%를 차지하지만 이를 해결하려는 공사의 근본적인 대책은 미비하다. 현재까지 국내에는 고성능의 아크차단기가 개발 및 상용화된 것이 없고 제한적인 기능을 가진 콘센트만이 출시되고 있다. 또한 화재가 발생하고 원인 규명이 힘들 경우, 원인 미상으로 분류하지 않고 조사관의 개인적인 추론으로 전기화재로 분류하는 경우가 많기 때문이다 [2].

최근 준공되는 최신식 건물에는 홈네트워킹이나 IoT 기술이 많이 적용되어 있다. 이를 이용해 화재 원인 분석이 실시간으로 가능하고 제반 정보를 관제실에 손실 없이 전송이 가능하기 때문에, 직렬 아크 분석의 신뢰성을 더욱 높인다면 미래의 화재예방과 설비 진단 기술을 하나의 시스템으로 통합하여 활용할 수 있을 것이다 [3,4].

따라서 본 논문에서는 전기화재의 원인이 되는 직렬

a. Corresponding author; kilgs@kmou.ac.kr

아크를 모의하고, 결합별 위상 분포로 특징을 추출하였으며, 이들 결과는 전기화재 검출과 예방을 위한 연구 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 실험 방법

2.1 옥내 배선에서 직렬 아크와 모의

전기배선에서 불안정한 접속부가 생길 경우, 접속부 양단의 저항이 증가하게 된다. 이러한 접촉 저항 때문에 전류가 흐를 때, 도전체의 온도상승과 아산화동 증식이 진행되며 절연체의 탄화가 발생한다. 지속적으로 발열로 주변 절연물의 탄화와 열분해가 진행되고, 이 과정에서 직렬 아크가 발생하고 절연 파괴로 인한 화재가 발생하게 된다 [5].

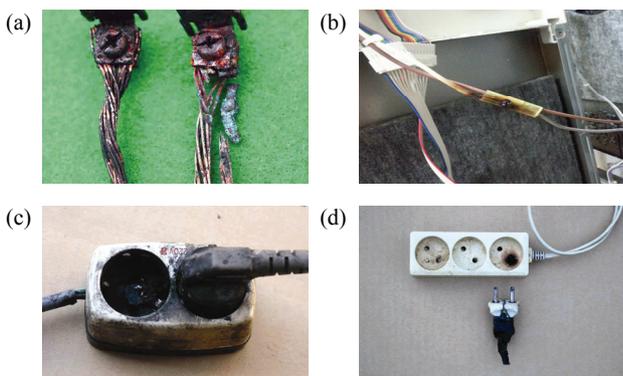


Fig. 1. Electrical fire caused by series arc. (a) Terminal, (b) connector, and (c) & (d) outlet.



Fig. 2. Artificial defects (left-normal, right-abnormal). (a) Wire-wire (partial disconnection), (b) terminal-wire (loose contact), and (c) outlet-plug (bad connection).

그림 1은 옥내 배선에서 직렬 아크로 인해 화재가 발생한 증거물 사진이다. (a)는 터미널 측에서 꺾임으로 인한 부분 단선에 의해 직렬 아크가 발생했다. 이 경우 배선의 놀림이나 반복 꺾임, 장력에 의해 배선이 부분적으로 절단되어 전선의 표면적이 감소하여, 같은 전류량에도 더 많은 발열이 나타난다. (b)는 커넥터 상호간 접촉 불량으로 발화가 일어난 경우이며, (c)와 (d)는 전기화재의 가장 빈번한 원인인 접속기에서의 접촉 불량이다 [6].

직렬 아크의 문제점은 화재 발생 직전까지 발견이 어렵고, 아크 전류의 실효값이 매우 작아 배선용 차단기(MCCB)나 누전 차단기(ELCB)가 동작되지 않기 때문이다 [7,8]. 또한 절연물이 탄화(carbonization)되어도 사용하는 데 문제로 나타나지 않기 때문에 예방할 수 있는 화재조차 쉽게 간과해 버린다. 국외에서는 각종의 아크차단기를 적용하고 있으나, 국내에는 아크차단기의 적용이 미미한 실정으로 이에 대한 연구가 절실하다 [9].

그림 2는 직렬 아크 결합을 제작한 것으로, UL 1699에 규정된 탄소-구리봉보다 실제 현상과 동일한 모의가 가능하다. UL 1699의 직렬 아크 발생기에서 만들어지는 전류 파형의 영점 지연(shoulder)은 접속부가 잠시 동안 완전 개방이 되었다가 다시 접촉하는 순간으로, 실제 아크보다 수~수십 배 길게 나타난다.

(a)는 전선-전선에서의 부분 단선을 모의하였으며, 이는 전선이 무거운 물체에 짓눌렸거나 비틀림 등으로 인한 손상을 의미한다. (b)는 터미널-전선의 접속 불량으로, 부실시공이나 경년 풀림 등의 경우이다. (c)는 사용자가 간과하기 쉬운 접속기-플러그의 접속불량으로, 접속기에 잦은 끼임과 분리의 반복으로 접속 도체부가 마모되거나 이완되어 헐거워지면 접촉저항의 증가로 발열된다.

2.2 실험계

그림 3은 직렬 아크 결합 3종에 대한 모의 실험계를 나타낸 것으로, 부하는 최대 3 kW까지 변환이 가능한 전열기(저항성)이다. 직렬 아크는 1 Hz ~ 20 MHz의 주파수 특성을 갖는 고주파변류기(HFCT)로 검출하였

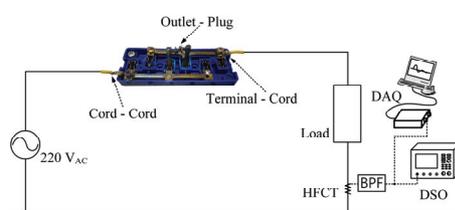


Fig. 3. Configuration of the experimental setup.

다. 단일 아크 신호의 검출을 위해 대역통과필터를 사용하였으며 차동프로브로 전원위상과 동기화하였다. 신호 수집 및 분석에는 12 bit, 100 MS/s의 데이터취득 장치(DAQ) 모듈과 오실로스코프를 사용하였다.

2.3 측정 및 분석 알고리즘

그림 4는 UL 1699에 규정된 아크 발생장치와 본 실험에서 제작한 접속기에서 발생한 아크를 비교한 것이다.

그림 5는 각각의 아크발생장치에서 검출된 전류 파형을 나타낸다. 영점지연 구간에서 아크 방전이 일어나며 아크 신호가 검출되는데, UL 1699의 탄소-구리봉의 경우 영점지연 현상이 2~8 ms이지만, 제작한 결함에서는 0.2~1 ms로, 실제 배선에서 초래하는 아크 현상과 유사함을 알 수 있다.

그림 6은 LabVIEW 기반으로 설계한 직렬 아크의 분석 알고리즘이다. 대역통과 필터를 거친 신호로부터 아크 펄스의 위상과 크기를 데이터베이스에 축적한다. 각각의

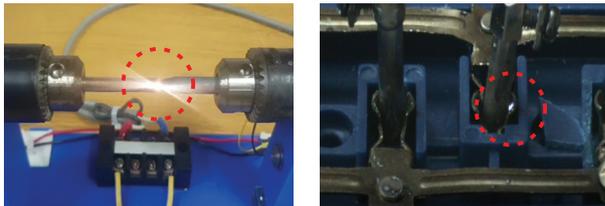


Fig. 4. UL 1699 electrode (left) and outlet defect (right).

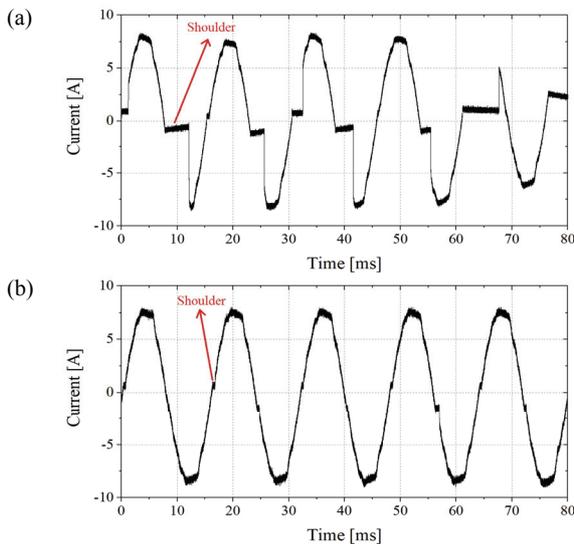


Fig. 5. Arc current waveforms. (a) UL 1699 simulator and (b) experimental setup.

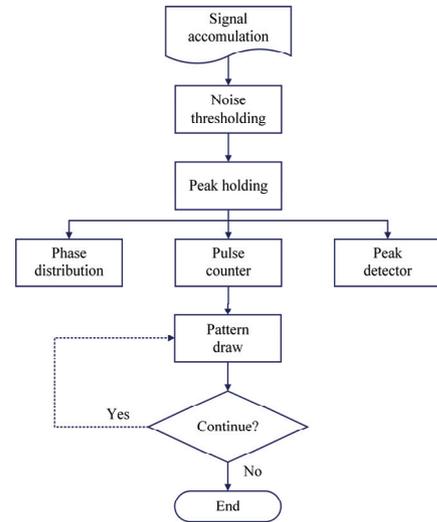


Fig. 6. Analysis algorithm. of series arc.

데이터는 배열로 저장되며, 잡음 제거(noise threshold) 과정을 거쳐 위상별로 최댓값을 저장한다. 직렬 아크의 측정은 30초(1,800주기) 동안 진행된다.

3. 결과 및 고찰

3.1 단일펄스와 위상분포 패턴

그림 7(a)는 필터를 통해 검출된 아크 신호 파형이

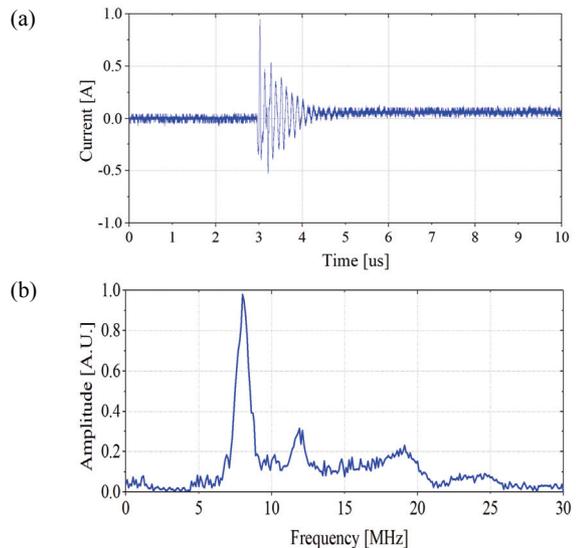


Fig. 7. Single pulse. (a) Time domain and (b) frequency spectrum.

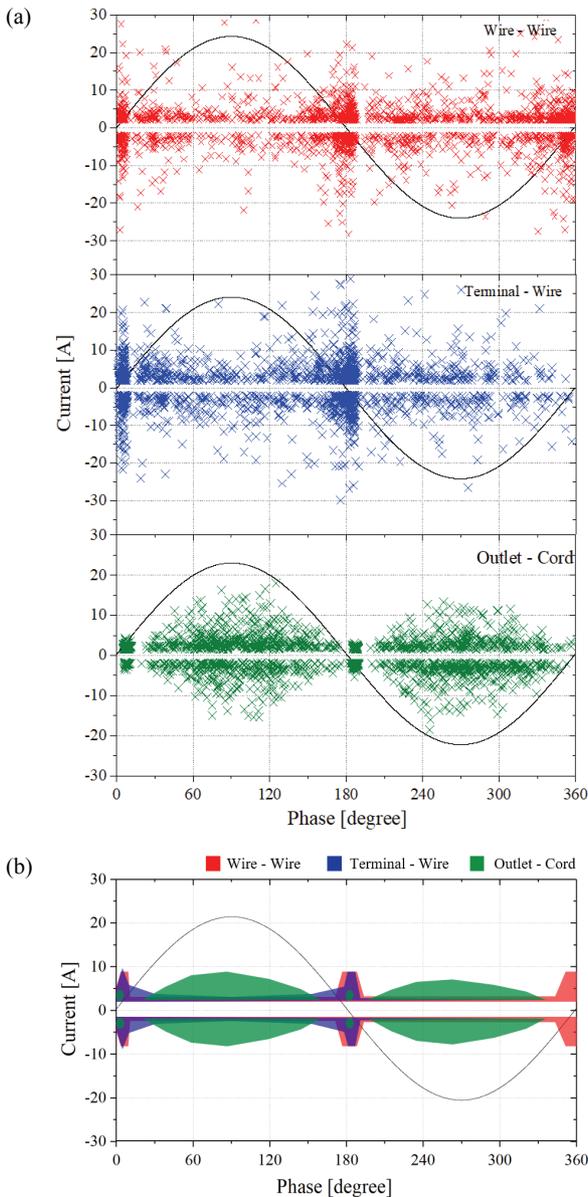


Fig. 8. A pattern depending on defects. (a) Phase distribution analysis pattern and (b) cluster.

다. 각 결함별로 단일 펄스를 측정된 결과에서는 특이점을 발견하기 힘들었지만, 주파수 스펙트럼으로부터 직렬 아크의 검출을 위한 최적 주파수는 5~10 MHz임을 알 수 있다 [10].

그림 8(a)는 분석 알고리즘으로 획득한 결함별 패턴을 나타낸 것이다. 전선-전선에서는 0°, 180° 및 360°에서 아크 펄스가 대부분 분포해 있고 터미널-전선에서는 0° 및 180° 부근에 집중되어 있다. 접속기-플러

그는 터미널과 전선에서와 마찬가지로 0° 및 180°에 분포되어 있지만, 아크 전류 크기가 2~5 A의 크기를 갖는다. 0~2 A 크기의 신호의 경우 노이즈와 같은 기준 값(threshold level)에서 제거된다. (b)는 결함별 분포를 클러스터로 구분한 것으로 적색 영역은 전선과 전선에서 생기기 쉬운 부분 단선 결함을 의미한다. 청색 영역은 터미널에서의 접촉 불량이며 녹색영역은 접속기에서의 접속 불량을 의미한다.

3.2 비교 및 분석

표 1은 결함별 아크 펄스의 극성 의존성을 나타낸 것이다. 결함별로 아크 펄스를 30초(1,800주기) 동안 누적했을 때, 전압 위상을 기준으로 '+' 1/2주기($0^\circ \leq \phi < 180^\circ$)와 '-' 1/2주기($180^\circ \leq \phi < 360^\circ$)의 펄스 수를 비교하였다. 특징적으로 전선-전선에서는 '-' 주기에서 많이 발생하였으며, 터미널-전선 및 접속기-플러그에서는 '+' 주기에서 높게 나타났다.

표 2는 특정 위상에서의 아크 펄스 수를 나타낸 것으로, 특이점은 354~359°에서 전선-전선 결함만이 아크 펄스가 많이 나타났다. 이는 전선-전선은 부분 단선으로, 터미널-전선과 접속기-플러그의 경우보다 접촉저항이 낮기 때문에 적은 전류에서도 아크 발생이 원활하기 때문이다.

터미널-전선에서는 나사의 풀림으로 전선과의 접촉이 불량하며, 접속기-플러그에서도 도체 접촉이 헐거워 2가지 조건 모두 접촉저항이 매우 크기 때문에 인

Table 1. Pulse counts and distribution ratio.

Counts	Defect types		
	Wire-wire	Terminal-wire	Outlet-plug
Total counts [n]	2,112	2,047	2,052
0~180° [%]	41.4	57.4	51.9
180~360° [%]	58.6	42.6	48.1

Table 2. Pulse count at a specific phase.

Counts	Defect types		
	Wire-wire	Terminal-wire	Outlet-plug
0~4° [n]	139	196	100
175~185° [n]	319	497	149
354~359° [n]	117	1	3

가전압의 크기가 '+' 또는 '-'에서 '0'에 도달하기 직전 구간($\rightarrow\pi$ 및 $\rightarrow2\pi$)에서 아크가 소멸되기 때문이라고 판단된다.

3.3 아크 발생 시 주변 절연물의 온도

그림 9는 직렬 아크가 발생할 때, 열화상 카메라로 열적 분포를 측정된 것이다. 아크가 발생하고 수분 내에 점점 부근의 온도가 약 100°C까지 증가했으며, 플러그의 금속 부분에서는 360°C로 측정되었다. 탄화가 진행되는 주변부에서는 전선피복의 용융이 발생하였다. KS C 8305에 규정된 콘센트 및 플러그의 재질은 PS (polystyrene), PE (polyethylene) 또는 PP (polypropylene)로 내열성이 70~90°C인 것을 고려하면 미소한 직렬 아크도 발화원이 될 수 있음을 보여준다.

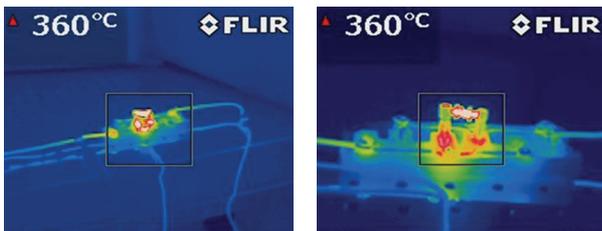


Fig. 9. Thermal distribution of an outlet with an incomplection connection.

4. 결론

본 논문에서는 저압의 옥내 배선계통에서 전기화재의 주요 요인인 배선 및 접속기 등에서 발생하는 직렬 아크의 특징을 도출하기 위해 3가지 결함을 제작하고, 아크 발생 시 전기적 및 열적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) UL 1699에 규정된 탄소-구리봉의 경우 영점지연이 5 ms 이상으로, 검출이 용이한 아크가 발생했다. 제작한 접속기의 경우, 실제 아크 현상과 유사한 1 ms 이하의 영점지연을 보였고 주변 가연물의 최소 착화 에너지를 가지는 미소한 아크를 지속적으로 발생했다.

- 2) 결함별 단일 아크 펄스의 주파수 분석을 통해, 직렬 아크 검출을 위한 최적의 주파수 대역을 도출하였다. 전원 주파수 성분의 차단을 위해 전원 전압을 100 dB 이상 감소시켰으며, 아크 펄스만 통과하도록 5~10 MHz의 대역통과 필터를 설계하여 적용하였다.
- 3) LabVIEW 기반의 분석 알고리즘으로 결함별 특징을 도출하였다. 결함에서 아크 펄스는 전원 전압의 위상을 기준으로 0°, 180° 및 360°에 분포로 구분이 가능하였으며, 360°에서의 아크 펄스 분포로 접속기와 배선에서의 결함을 판별할 수 있었다.
- 4) 미소한 직렬 아크에 의해 절연물의 온도가 연소점 이상에 도달함으로써 전기화재의 원인으로 작용함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] National Fire Data System, <http://www.nfds.go.kr/>
- [2] J. H. Lee, D. H. Kim, and S. J. Kim, *J. Korean Inst. Fire Sci. Eng.*, **23**, 36 (2009).
- [3] S. H. Park and J. C. Cho, *J. Korean Inst. Fire Sci. Eng.*, **24**, 46 (2010).
- [4] H. S. Yum, Ph. D. Thesis, *Research on Monitoring and Recording System of Electric Fire Signals in Building*, p. 2-34, Sungkyunkwan University, Seoul (2017).
- [5] G. S. Kil, H. K. Ji, D. W. Park, I. K. Kim, Y. I. Kim, and Y. J. Cho, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **22**, 95 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.5207/JIEIE.2008.22.12.095>]
- [6] Korea Industrial Standards, *KS C 8305 - Plugs and Socket-Outlets for Domestic and Similar Purposes* (Korea, 2011) p. 10.
- [7] H. K. Ji, Y. J. Cho, G. Wang, S. C. Hwang, and G. S. Kil, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **18**, 221 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.4313/TEEM.2017.18.4.221>]
- [8] M. G. Kim and J. P. Kim, *Electrical Fire Identification Engineering* (Seong An Dang, Korea, 2015) p. 4.
- [9] H. K. Lee, D. K. Kwak, K. Y. Park, and B. S. Lee, *Proc. The Korean Institution of Power Electronics Conference* (The Korean Institution of Power Electronics, Korea, 2017) p. 491.
- [10] K. Tan, C. Peng, P. Liu, X. Song, and A. Q. Huang, *Proc. 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)* (IEEE, Long Beach, USA, 2016) p. 132.