

반단선에 의한 누설전류 발생과 온도의 상관성 분석에 관한 연구

Study on the Correlation Analysis between Leakage-Current Generation and Temperature using Half Circuit

박은석* · 민세홍**

Park, Eunseok*, and Min, Sehong**

Abstract

This presents a study on developing an electric-fire early-detection system by detecting the leakage current before it becomes a major cause of electrical fires. According to the analysis of statistical data on fires from the last five years, the percentage of electrical fire among the total fires is 21.8% - a considerable portion of fire occurrences. According to the analysis of the fire-occurrence mechanism based on the cause of electrical fires, leakage current originates from complex factors related to the conductor resistance, and Joule heating is the representative cause of electrical fires. In our leakage-current analysis, the thermal change and amount of leakage current were measured according to the changing number of disconnected electrical wires. The risk of leakage current could be analyzed using the measured thermal change. An electrical-fire early-detection system must be installed at the site using a leakage-current measuring instrument, which must be verified through practical applications.

Key words : Early Detection System, Leakage Current, Electrical Fire, Leakage Current Measuring Instrument

요 지

본 논문은 전기화재의 주된 발생 원인이 되는 누설전류 감지를 통한 전기화재 조기감지시스템 구축에 관한 연구이다. 최근 5년간 화재 통계 데이터를 분석한 결과, 전체 화재 중 전기화재가 차지하는 비율이 21.8%로 전기화재는 화재발생원인 중 상당한 부분을 차지하고 있다. 이 중에서 전기화재 원인에 따른 화재발생 매커니즘을 분석한 결과, 도체의 저항과 줄열의 복합적인 이유로 발생한 누설전류가 전기화재의 대표적 원인이 된다는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라, 누설전류의 위험성을 분석하기 위해 전선 단선 수의 변화에 따라 전선의 열적 변화 및 누설전류량을 측정하였다. 측정된 열적 변화를 통해서 누설전류의 위험성을 분석할 수 있었고 실질적 적용 사례를 통해 검증된 현장 적용 누설전류 계측기를 이용하여 전기화재 조기감지시스템을 구축할 필요가 있다.

핵심용어 : 조기감지시스템, 누설전류, 전기화재, 누설전류 계측기

1. 서 론

현대사회에서 가장 간편하게 사용되는 에너지원으로 전기는 일상생활 및 산업시설(공업, 상업, 어업, 농업, 업무시설 등) 등 여러 분야에서 사용되고 있다. 또한, 한국전력공사 KEPCO (2018) 자료에 의하면, 폭염과 같은 계절적인 요인

때문에 Table 1과 같이 전력소비량은 매년 평균적으로 2.08% 증가하고 있다. 또한 2018년에는 사용량이 526,419 Wh, 상승률이 3.6%로 최대 수치를 기록하였으며, 이러한 증가 추세는 지속될 것이라고 예상된다. 이에 따라 전기기기의 사용이 증가하고 상대적으로 전기화재발생의 위험성이 증가하게 되었다.

*정희원, 가천대학교 일반대학원 소방방재공학과 석사과정(E-mail: piskpask@naver.com)

Member, MS Candidate, Department Fire Protection Engineering, Graduate School, Gachon University

**교신저자, 정희원, 가천대학교 공과대학 설비·소방공학과 교수(Tel: +82-31-750-5714, Fax: +82-31-750-8746, E-mail: shmin@gachon.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire & Disaster Protection Engineering, Gachon University

Table 1. Annual Electricity Consumption

Year	2014	2015	2016	2017	2018
Usage	477,413	483,464	497,018	507,746	526,149
Change rate	0.6%	1.3%	2.7%	2.2%	3.6%

국가화재정보시스템 NFDS (2019)를 통해 5년(2014~2018) 간 화재 통계 데이터를 분석한 결과, Park and Min (2019)에서 언급한 바와 같이 전체 화재 216,499건 중 전기화재는 47,121건으로 전기화재가 차지하는 비율은 21.8%이며, 부주의 화재 건수 다음으로 두 번째로 높은 화재발생 비율을 차지하고 있다. 또한, 전체 화재피해액 232,582만원 기준으로 전기 화재 피해액은 45,465만원으로 19.5%를 차지하고 있다. 전체 화재 발생 비율은 Fig. 1과 같이 2017년 44,178건에서 2018년 42,338건으로 약 0.5% 줄어든 반면, 전기화재 발생 건수는 2017년 9,264건에 비해 약 1.8배 증가한 수치인 10,471건으로 급속도로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 전기 화재 중 세부 요인별 발생 건수를 분석한 결과, 접촉불량에 의한 단락, 반단선, 기타, 충전단락, 누전, 절연열화에 의한 단락, 과부하/과전류, 미확인 단락, 압착손상에 의한 단락, 트래킹에 의한 단락 순으로 나타났다.

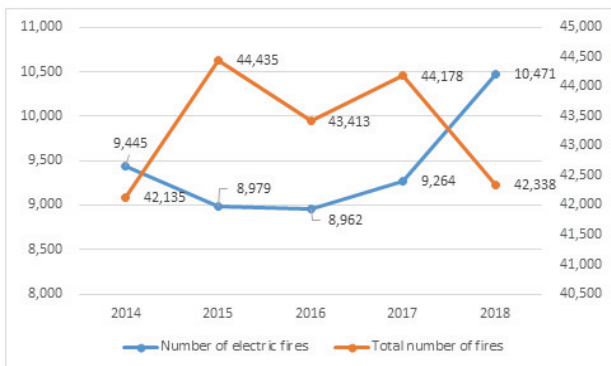


Fig. 1. Analysis of the Number of Electric Fires Compared to the Total Number of Fires

2. 전기 화재 발화 매커니즘 분석

대표적인 전기 화재요인들의 화재 매커니즘 분석 결과는 아래와 같다.

- (1) 단락: 전선 및 전기기기의 절연체가 전기적, 열적, 화학적, 기계적 원인으로 열화 또는 파괴되어 합선이 일어나 단락전류(누설전류)로 화재가 발생한다.
- (2) 과부하/과전류: 과부하/과전류에 의한 발열로 절연피복이 탄화되어 누전으로 화재가 발생한다.
- (3) 누전: 전류가 통로 이외의 곳으로 흐르는 현상으로

누설전류가 부대설비 및 건물로 흐르게 되면 탄화축진으로 화재가 발생된다.

- (4) 절연열화: 유기질의 절연재료가 오랜 시간이 경과되어 절연성이 떨어지거나 접촉부분이 탄화되어 트래킹 현상 또는 발열에 의해 화재가 발생된다.
- (5) 반단선: 소선을 꼬아 만든 연선에서 외부의 영향에 의해 소선의 일부가 끊어져 누설전류로 화재가 발생된다.
- (6) 트래킹: 전기적인 스트레스와 절연재료 표면의 오염에 의해 도전로가 형성되는 현상으로 단자대와 절연재료를 통해 누설전류가 흐르게 되어 화재가 발생된다.

위와 같은 전기화재 매커니즘 분석을 통하여 대부분의 전기화재에서 누설전류가 화재와 연관성이 높다는 것을 확인할 수 있었다. 누설전류는 용량성 누설전류와 저항성 누설전류로 구성되어 있고 이 중 저항성 누설전류가 흐르면 줄열($H=0.24I^2RT[cal]$)에 의하여 주위 온도가 높아져 화재가 발생된다. 하지만 기존에 설치되어있는 대부분의 누전 차단기의 정격감도 전류는 30 mA로 미세한 누설전류를 감지하지 못한다.

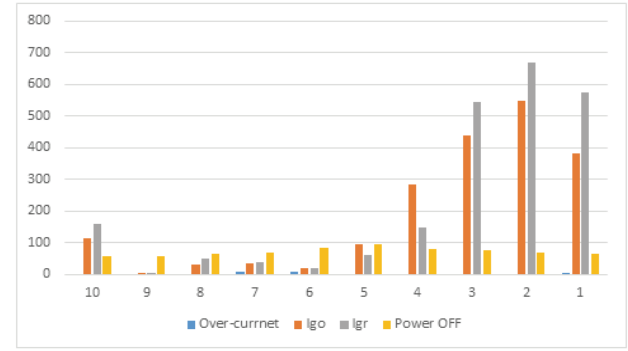
사용된 누설전류 계측기는 ㈜에프에스에서 개발한 I-FireSense를 사용하였으며, 무선통신망을 기반으로 실시간으로 누설전류를 계측할 수 있고 계측한 내용을 통해 누설전류량을 분석하여 사전에 화재예방이 가능하다. 이 계측기는 현재 대전 시장 등 여러 전통시장에 Fig. 2와 같이 실질적으로 적용되어 있다. 화재 전조증상을 검출하여 실시간 알림을 통해 화재발생 전 조기 대응이 가능하며, 기존 설치된 계측 모듈에 수집한 데이터베이스를 통해 화재 조기 성상 분석이 가능하다. 추가적으로 전기화재, 전기안전사고 사전예방, 전기에너지 절약 유도 등이 가능하다. 해당 제품을 개발한 ㈜에프에스에서는 전통시장에 설치하여 실질적 검증을 진행하였다. 2018년 5월 18일 대전 중앙시장에 A점포에서 냉장고 콤프레셔에 비닐 봉지가 감겨 저항성 누설전류 3.66 mA 경보가 발생하여 즉각적으로 조치한 사례가 있다. 또한, Table 2에서 나온바와 같이 대전 중앙시장(11개소)에 2018년 1월 1일에서 2018년 10월 19일까지 적용한 결과, 최대 1,282건의 이벤트 검출 후 조치를 통해 최소 62건으로 감소한 것을 확인할 수 있었다. 10월 달에 이벤트 건수가 소량 증가하는 것은 온도가 내려감에 따라 외부에서 전열기를 상점에서 사용하기 때문이다.



Fig. 2. Instrument Applied to the Market Distribution Board

Table 2. Specifications of Electric Wire

Event Type	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Sum
Over-current	1	0	0	0	0	8	9	0	0	0	18
Igo	380	546	437	282	96	21	36	31	1	114	1,863
Igr	574	667	543	147	59	21	38	48	5	160	2,262
Power OFF	64	69	74	81	96	83	67	63	56	56	709
Sum	1,019	1,282	1,054	510	251	133	150	142	62	339	4,942



3. 실험

3.1 실험 개요

누설전류를 발생시키기 위해 반단선 상황을 조성하였고 사용되는 전선의 소선들을 Table 3의 시나리오에 맞추어 소선들을 끊어 실험을 진행하였다. 실험 시나리오의 경우, 23개의 소선으로 이루어진 전선 총 5개를 순차적으로 끊어가며 실험을 진행하며, 시나리오 6에서부터는 한 개의 전선을 1/2, 1/4로 나누어 실험을 진행하였다. 감지대상은 계측기를 통한 누설전류 발생량 및 누설전류에 따른 전선의 온도 변화로 하였으며, 충분한 온도 변화를 측정하기 위해 20분간 실험을 진행하였으며 5분 간격으로 온도를 측정하였다.

Table 3. Scenario Details

Scenario	(+) Number of Non-broken Wire	Detection Target
1	23 * 5	Temperature Change of Wire according to Leakage Current, Whether to Detect Instrument Leakage Current
2	23 * 4	
3	23 * 3	
4	23 * 2	
5	23 * 1	
6	23 * 1/2	
7	23 * 1/4	

※ 20 Minutes Minimum to Measure Temperature

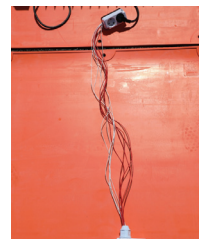
3.2 실험방법

Table 4는 실험 때 반단선 상황을 부여하기 위해 실험시료로 사용된 전선으로 Park and Kim (2017)에서 나온 바와

같이 보통 전기기기의 배선용으로 사용되고 있는 450/750 V 비닐절연전선(KSC IEC 60227-3)을 이용하였다. 또한, 전선의 사양으로 전선 두께는 1.5 SQ, 동선 수 및 지름은 23/0.26 mm이고 외경은 1.6 mm이며 평상시 온도인 20 °C에서의 최대 저항값은 13.3 Ω/km, 최대허용온도는 70 °C의 물성을 가지고 있다. 또한, 실험은 반단선을 통한 누설전류 발생으로 전선의 열적 변화를 확인하는 것을 목적으로 하기에 절연 매트리스(500 × 500, 1.6 mm, 중량 460 g)를 설치하여 안전을 확보하였다. 해당 전선에는 부하(전열기 3000 W)를 통해서 전류를 13.6 A로 유지하였다. 분전반의 경우, 1차 전원 보호를 위해 배선용 차단기 및 누전 차단기를 설치하였다. Fig. 3은 적용된 각 장비의 모습과 실험 모습을 나타내고 있다.

Table 4. Specifications of Electric Wire

Features	Standard
No. of Cores	1
Nominal Sectional Area	1.5 SQ
Number & Diameter of Wire	23/0.26 mm
Outer Diameter	1.6 mm
Insulation Thickness	0.7 mm
Max. Conductor Resistance at 20	13.3 Ω/km
Max. Temperature	70 °C



(a) Wire



(b) Distribution Board



(c) Thermal Camera



(d) Insulation Matrix



(e) Experiment progress scene

Fig. 3. Experiment Equipment and Experiment Progress

실험 진행시 주위 온도는 24 ± 5 °C, 상대습도 $45 \pm 5\%$ 에서 진행되었으며, 누설전류와 전선의 온도 측정을 위해 Fig. 4와 같이 실험의 구성도를 구축하였으며, 반단선의 열적 변화를 측정하기 위해 플러그의 접속 부분을 열화상 카메라 (FLIR E5)로 촬영하였다. 열화상 카메라의 성능은 주변온도 10 °C ~ 35 °C에서 사용 가능하고 대상 온도 범위가 -20 °C에서 250 °C까지 되며, 7.5 ~ 1.3 μm 의 스펙트럼 범위를 가지고 있다.

3.3 실험 결과 및 고찰

Table 5는 각 시나리오에 따른 평균 누설전류량의 변화량과 온도 변화를 보여주고 있다. 부하전류에 따른 소선 수가 탁별 온도상승 측정결과, 시나리오 1에서는 온도차가 12.2 °C로 나타났고, 시나리오 2에서는 17.46 °C, 시나리오 3은 18.8 °C로 누설전류 평균값이 0.165 mA 이하로 낮아 전선의 열적 변화가 20 °C 미만으로 관찰하게 되었다. 이와 달리,

시나리오 4, 시나리오 5, 시나리오 6은 온도차가 순차적으로 21.6 °C, 23.9 °C, 24.6 °C이며, 최고 온도는 57.3 °C로 점차적으로 누설전류 평균값이 0.180 mA 까지 증가함에 따라 온도 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 마지막으로 시나리오 7에서는 평균 누설전류값이 0.218 mA이 됨에 따라 온도차가 69.1 °C, 최고 온도가 103 °C로 전선의 허용온도인 70 °C를 넘어 화재위험성이 높은 것으로 나타났다. 반단선에 의한 최대온도변화를 확인해 본 결과, 시나리오 1에서는 온도 상승률 145%이고 시나리오 7에서는 온도 상승률이 303%인 것을 통해, 전선 소선 수를 기준으로 소선 수가 적어질수록 온도상승이 높게 나타났다. 또한, 시나리오 1에서의 누설전류 평균값이 0.149 mA로 측정되었고, 시나리오 7에서는 0.218 mA인 것을 통해, 전선 소선 수를 기준으로 소선 수가 적어질수록 누설전류 평균값이 높다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 전선 소선 수가 적어질수록 누설전류 평균값이 상승하고 줄열의 법칙에 따라 전선의 온도가 상승하게

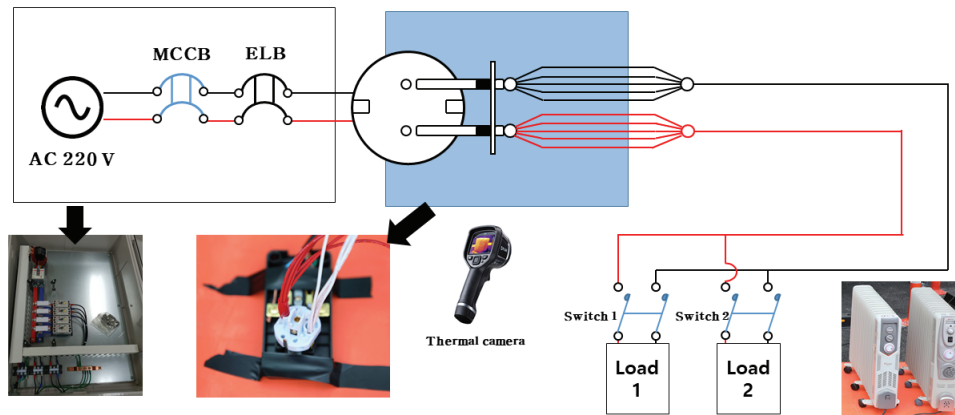
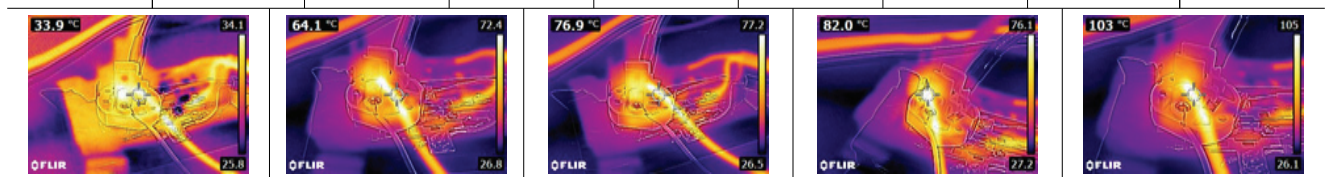


Fig. 4. Schematic Diagram of Experiment

Table 5. Leakage Current Average and Temperature According to Scenario

Scenario	Number of wires	0 Minute	5 Minute	10 Minute	15 Minute	20 Minute	Temperature difference	Average Igo
Scenario 1	115	26.6	33.5	36.4	38.4	38.8	12.2	0.149
Scenario 2	92	30.24	40.3	46.6	46.9	47.7	17.46	0.159
Scenario 3	69	30.7	46.5	49.0	49.1	49.5	18.8	0.165
Scenario 4	46	30.7	41.3	41.5	48.2	52.3	21.6	0.170
Scenario 5	23	30.7	50.4	52.0	52.6	54.6	23.9	0.175
Scenario 6	12	32.7	47.9	52.1	56.5	57.3	24.6	0.180
Scenario 7	6	33.9	64.1	76.9	82	103	57.3	0.218



Wire temperature changes in scenario 7

된다는 것을 확인할 수 있었다. 만약 이러한 상태가 일반 제품에서 지속되었다면 전선이 피복이 녹아 합선이 발생되어 화재가 발생할 수 있다.

이를 통해서 노후화된 건축물 및 전통시장에서 설치되어 있는 전선의 상태 또한 노후화됨에 따라 단락, 과부하/과전류, 누전, 절연열화, 반단선, 트래킹 현상으로 인해 누설전류가 증가하게 되어 전기화재 발생 위험성이 증가할 것이다. 이를 방지하기 위해서는 Min and Lim (2018)에서 언급한 바와 같이 지속적으로 노후화 건축물에 설치되어 있는 전선 및 전기기기에 대한 관리가 필요하다. 하지만, Lim (2018)에서 나온 바와 같이 노후화 밀집지역은 도시기반시설(도로, 주차장 등)이 부족한 상태로 주택 규모, 밀도가 지속적으로 증가하고 있으며 열악한 도로, 대지 조건으로 주택 신축 한계로 전체적으로 과밀화, 노후화가 진행되고 있다. 또한, 전통시장은 Seo and Min (2017)에서 나온 바와 같이 현행법상 전통시장의 정의 및 범위에 관한 명확한 규정이 미비한 실정이며, 관리주체도 부재하며 대부분 1970년대 이전에 만들어졌다. 이와 같은 이유로 노후화된 전선이나 전기기기의 지속적인 관리가 어려움으로 전기화재가 많이 발생하고 있다. 대표적으로 2016년 11월 30일에 대구 서문시장에서 발생한 전기화재가 발생하여 약 1,000억 원의 재산피해를 발생시켰다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 누설전류 감지기 설치를 통해 화재 위험성을 감소시킬 수 있을 것이다.

4. 결론

소방청 5년간 화재통계 데이터 분석을 통하여 전국의 전기 화재를 분석한 결과, 부주의와 전기적 요인이 화재발생 건수 중 많은 부분을 차지하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 세부 전기화재요인을 분석한 결과, 누설전류가 전기화재의 대표적인 이유가 된다는 것을 확인할 수 있었다. 이후 실험을 통해서 누설전류와 전기화재의 관계를 확인하였다.

본 연구의 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 5년간 화재통계를 분석한 결과, 전기적 요인의 화재가 2번째로 높은 비중을 차지한다는 결과를 도출하였다. 세부 화재 요인별 발생 매커니즘을 분석한 결과, 누설전류가 전기화재의 근본적인 원인이 된다는 것을 확인하였다.
- (2) 누설전류와 전기화재의 관계를 분석하기 위하여 현재 전통시장에 적용 중에 있는 누설전류 계측기(I-FireSense)를 선정하였으며, 반단선을 통해 누설전류 및 온도를 측정하기 위한 실험을 계획하였다.
- (3) 실험 데이터를 분석한 결과, 소선 가닥 수가 줄어들어

따라 누설전류 평균값이 증가하고 전선의 온도가 100℃ 이상 증가하는 것을 확인하여, 이를 통해 누설전류가 전기화재와의 관계를 분석하였다.

- (4) 현재, 전통시장 및 밀집지역의 화재 사례를 분석하여 그 문제점을 분석하고 누설전류 감지를 통하여 이를 해결할 수 있다고 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-재난안전플랫폼기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. NRF-2017M3D7A1071832).

References

Korea Electric Power Corporation (KEPCO). (2018). *Annual electricity consumption*.

Lim, S.B. (2018). *A study on the developing the fire safety guidelines of the old congested area*. Master's thesis, Gachon University

Min, S.H., and Lim, S.B. (2018). A study on securing safety in concentrated areas by developing fire safety guidelines. *Proceedings of 2018 Annual Conference*, The Korean Society of Disaster Information, pp. 51-52.

National Fire Data System (NFDS). (2019). *Analysis of the number of electric fires compared to the total number of fires*.

Park, E.S., and Min, S.H. (2019). Standardization of fire factor for big data. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 4, pp. 143-149.

Park, S.M., and Kim, S.K. (2017). Study on the risk analysis of complex electrical fire by the partial disconnection and tracking. *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 111-118.

Seo, Y.G., and Min, S.H. (2017). A study on the cause analysis and countermeasures of the traditional market for fires in the TRIZ method. *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 4, pp. 95-102.

Received	October 4, 2019
Revised	October 7, 2019
Accepted	October 16, 2019