

[Research Paper]

반단선과 트래킹에 의한 복합적 전기화재의 위험성분석 연구

박상민 · 김시국[†]

호서대학교 소방방재학과

Study on the Risk Analysis of Complex Electrical Fire by the Partial Disconnection and Tracking

Sang-Min Park · Si-Kuk Kim[†]

Department of Fire and Disaster Protection Engineering, Hoseo University

(Received August 7, 2017; Revised August 18, 2017; Accepted August 19, 2017)

요 약

본 논문은 반단선과 트래킹에 의한 복합적 전기화재의 위험성분석에 관한 연구이다. 먼저, 단일원인인 반단선에 의한 전기화재 위험성을 분석하기 위해 전선의 소선 수 및 정격전류의 변화에 따른 열적특성을 측정하였다. 또한, 그 후 복합적 원인에 의한 전기화재 위험성을 분석하기 위해 반단선 상태에서 추가적으로 가속트래킹 실험을 실시하여 반단선과 트래킹의 화재연관성을 확인하였다. 실험결과 반단선이 단일원인으로 작용할 때의 전류에 의해 발생된 기존 열적특성과 트래킹이 복합적으로 작용함으로써 전류가 크게 증가되어 열적특성이 더욱 뚜렷이 나타나 단일원인에서 발생되지 않았던 급격한 온도상승으로 인한 소선의 단선이 복합적 원인에서 나타났다. 즉, 기존의 반단선에 의한 전기화재 위험성보다 반단선과 트래킹이 복합적으로 작용될 경우 상대적으로 그 위험성이 크게 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The present paper is a study on the risk analysis of complex electrical fire by the partial disconnection and tracking. First, in order to analysis the single cause of electrical fire risk by the partial disconnection, the thermal characteristic has been measured by the change in the number of strands and the rated current of a wire. And then, in order to analysis the electrical fire risk by complex cause, an experiment on the accelerated tracking has been carried out in a condition of partial disconnection and confirmed the fire relation between partial disconnection and tracking. From the experiment, if the partial wire disconnection acts as a single cause, the existing thermal characteristics generated by the flowing current has appeared more clearly by the increase in the flowing current due to the complex action of tracking. Accordingly, the disconnection of strands has appeared by the complex cause due to the drastic temperature increase which was not generated in the single cause. Namely, it has been confirmed that if the partial disconnection and tracking act complexly rather than the risk of electrical fire by the existing partial disconnection, relatively its risk has been increased in large.

Keywords : Partial Disconnection, Tracking, Complex Electrical Fire, Thermal Characteristics, Fire Risk

1. 서 론

현대사회에 급속성장의 원동력으로 사용되는 에너지원 중 전기는 일상생활에서 가장 많이 사용되고 있으며, 실용성 및 편리성 등이 고려된 다양한 전기기기들이 개발되면서 그 수요가 더욱 커지고 있다. 하지만 전기기기의 사용량 증가는 상대적으로 전기적 위험성 증가를 내포하기 때문에 전기설비의 사용에 있어 각별한 주의와 함께 지속적인 점검을 통한 안전성 확보가 중요하지만, 전기로 인한 화재위

험성에 대한 인식이 아직 부족한 실정이다. 최근 5년(2012~2016)간 발생한 전체화재 건수는 214,164건으로 이중 전기화재는 22.4%(47,977건)로 부주의에 의한 화재 다음으로 가장 높은 비중을 나타내고 있다. 전기화재를 원인별로 살펴보면, 절연열화에 의한 단락 25.3%(12,133건), 미확인단락 24.8%(11,919건), 과부하 및 과전류 10.5%(5,016건), 접촉불량에 의한 단락 9.9%(4,757건), 트래킹에 의한 단락 8.2%(3,913건), 기타 전기적 요인 8.0%(3,862건), 압착손상에 의한 단락 6.5%(3,132건), 누전 및 지락 4.0%(1,942건), 반단선

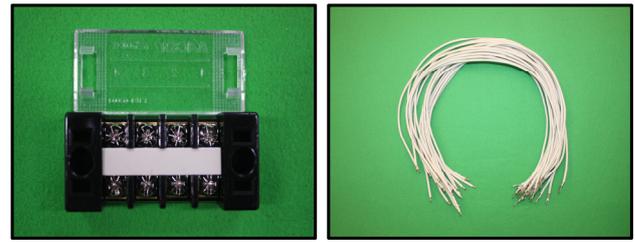
[†] Corresponding Author, E-Mail: kimsikuk@hoseo.edu, TEL: +82-41-540-5736, FAX: +82-41-540-5738

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

1.6%(791건), 층간단락 1.1%(512건) 순으로 나타났다.⁽¹⁾ 이러한 전기화재의 위험성을 저감하기 위해서 전기화재와 관련된 지속적인 연구가 선행되고 있지만, 기존 전기화재에 대한 연구들은 대부분은 단일원인을 대상으로 진행되었다.^(2,3) 하지만 통계자료를 바탕으로 전기화재의 원인을 분석해보면 단일원인이 아닌 다양한 원인에 기인되어 발생하고 있으며, 이로 인해 현재까지 화재원인이 명확히 규명되지 않은 미확인단락 및 기타 전기적 요인이 전기화재 중 33.3%로 많은 범주를 차지하고 있다. 이에 따라 전기화재 원인 규명에 있어 단일원인에 대한 세부적인 연구도 중요하지만, 다양한 원인에서 기인되는 복합적 원인에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 이로 인해 금동신⁽⁴⁾에 의해 단자대 접촉불량 및 트래킹에 의한 복합적인 전기화재위험성에 관한 연구가 선행연구로 진행되었다.

본 연구에서는 우리가 흔히 사용하는 전기기기에서 발생할 수 있는 복합적인 원인에 의한 전기화재 발생 위험성을 확인하기 위하여 반단선이 발생하는 플러그 부분과 트래킹이 발생하는 접속부에서 복합적인 원인으로 인해 발생할 수 있는 전기화재 위험성을 연구하고자 한다. 반단선은 물리적인 원인 및 외부의 충격에 의하여 전선 피복 안에 소선이 끊어지며 소선들이 이어짐과 떨어짐을 반복하거나, 전체 소선 중 일부(10% 이상)가 끊어진 상태로 유지되는 것을 말하며, 반단선이 발생하게 되면 정상적인 상태의 정격전류 내에서도 저항이 급격히 증가하게 되면 줄열($H=0.24I^2RT[\text{cal}]$)에 의한 국부적인 온도상승으로 화재발생 가능성이 나타난다. 트래킹은 전압이 인가된 단자대 사이의 절연재료 표면에 습기를 함유한 먼지나 염분 등의 오손액이 부착되면 절연재료 표면을 따라 누설전류가 흐르게 되고, 그 과정에서 건초대(Dry band) 형성과 함께 미소방전(Scintillation)이 일어나고, 이때 발생하는 불꽃방전에 의한 도전성 카본(Carbon)이 증식되고 최종적으로 표면 트래킹 화재가 발생하게 된다.⁽⁵⁾ 기존 반단선 연구는 지승욱,⁽²⁾ 김두현,⁽⁶⁾ 이우성,⁽⁷⁾ 김성철⁽⁸⁾ 등이 진행하여 대부분 인위적으로 반단선을 만든 상태에서 정격전류 및 과전류를 흐르게 하여 반단선 상태의 열적특성을 연구하였고, 트래킹 연구는 이춘하,⁽³⁾ 최기옥,⁽⁹⁾ 박남규⁽¹⁰⁾ 등이 진행하여 차단기 등에 사용되는 절연재료의 트래킹 특성에 대한 연구가 이루어졌지만, 대부분 단일원인에 의한 연구로 반단선과 트래킹이 복합적으로 나타나는 전기화재의 위험성에 관한 연구는 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는 반단선과 트래킹에 의한 복합적 전기화재의 위험성을 분석하기 위해 다음과 같이 연구를 진행하였다. 우선적으로 단일원인인 반단선에 의한 전기화재 위험성을 분석하기 위해 전선의 소선 수 및 정격전류의 변화에 따른 열적특성을 측정하였고, 그 후 복합적 원인에 의한 전기화재 위험성을 분석하기 위해 반단선 상태에서 추가적으로 트래킹을 인가하여 반단선과 트래킹의 화재원인 관성을 확인하였다.



(a) Terminal block

(b) Wire

Figure 1. Experiment samples.

Table 1. Specifications of Electric Wire

Features	Standards
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 °C	13.3 Ω/km
Temperature (Max.)	70 °C

2. 실험

2.1 실험 시료

Figure 1은 실험시료인 단자대(Terminal Block; TB) 및 전선을 나타낸 것이다. 실험시료로 사용된 단자대는 부하전류를 고려하여 나사, 와셔, 부스바, 절연물로 구성된 20 A, 4 P 단자대를 사용하였다. 또한, 반단선을 인가하기 위해 실험시료로 사용된 전선은 일반 공작물이나 전기기기의 옥내 배선용으로 많이 사용되고 있는 450/750 V 비닐절연전선(KSC IEC 60227-3)을 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 전선의 사양을 나타낸 것이다. 전선의 두께는 1.5 SQ, 소선 수는 23가닥(23 C)으로 구성되어 있으며, 평상시 온도인 20 °C에서의 최대 저항값은 13.3 Ω/km, 최대 허용온도는 70 °C의 물성을 가지고 있다.

2.2 실험방법

실험은 주위온도 20±3 °C, 상대습도 50±5%의 환경조건에서 실시하였다. 먼저, 반단선 및 트래킹에 의한 복합적 전기화재의 위험성을 분석하기에 앞서 단일원인인 반단선만 인가되었을 때의 위험성을 측정하였다. Figure 2는 실험의 구성도를 나타낸 것으로 트래킹이 반단선의 열적특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 다음과 같이 구성하였다. 단일원인인 반단선의 열적특성을 관찰하기 위해 플러그의 A 지점은 반단선이 발생되지 않은 정상상태 소선 수(23가닥)의 전선을 접속하였고, B지점에는 반단선을 인가하기 위해 기존 반단선 연구⁽²⁾에서 위험성이 높게 나타났던, 반단선 길이를 10 mm로 설정하고, 소선 수에 따른 위험성을 관찰

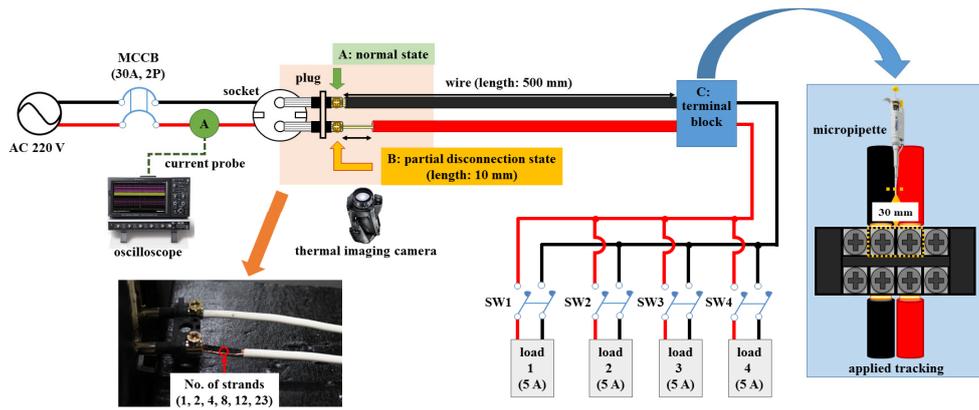


Figure 2. Schematic diagram of experiment.

Table 2. Maximum Temperature Change by Single Cause with Partial Disconnection (Initial Temperature 20 °C)

Items	ΔT (at 23 C)	ΔT (at 12 C)	ΔT (at 8 C)	ΔT (at 4 C)	ΔT (at 2 C)	ΔT (at 1 C)
5 A	6 °C	7 °C	8 °C	8 °C	10 °C	20 °C
10 A	11 °C	13 °C	16 °C	21 °C	31 °C	38 °C
15 A	17 °C	21 °C	23 °C	34 °C	36 °C	121 °C
20 A	17 °C	34 °C	36 °C	55 °C	93 °C	167 °C

하기 위해 반단선 전선의 소선 수를 각각 1 (4%), 2 (9%), 4 (17%), 8 (35%), 12 (52%), 23 (100%) 가닥으로 설정하여 실험을 실시하였다. 이때, 부하전류는 가정에서 일반적으로 사용되는 정상전류 범위인 5 A, 10 A, 15 A, 20 A로 설정하여 1800 s 동안 인가하였고, 열화상카메라(testo 890, Testo Co., Germany)를 이용하여 반단선을 인가한 B지점에서의 소선 수 및 전류 변화에 따른 초기온도대비 온도변화 (Temperature change; ΔT)를 측정하여, 반단선의 열적특성을 관찰하였다. 그 후 복합적 원인에 의한 전기화재 위험성을 규명하기 위해 단일원인인 반단선 상태의 실험조건과 동일하게 한 후 KS C IEC 60112⁽¹¹⁾ 기준을 응용하여 가속 트래킹 실험을 진행하였다. 가속트래킹 실험을 위한 오손액은 국내 바닷물의 평균 소금농도를 기준으로 3% 염화나트륨수용액을 사용하였고, 마이크로피펫(WitoPet, WITEG Co., Germany)을 이용하여 C지점인 단자대(Terminal block) 접속부에 오손액을 30 s 마다 0.1 cc 주입하여 트래킹인가에 따른 반단선 부위의 열적특성을 관찰하였다. 그리고 추가적으로 오실로스코프(Wave surfer 64Xs-A, Lecroy Co., USA)와 전류프로브(CP150, Lecroy Co., USA)를 이용하여 트래킹 진전과정에서의 전류파형을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 단일원인인 반단선에 의한 열적특성 측정실험결과

Table 2는 단일원인인 반단선에 의한 열적특성 측정실험 결과 최대온도변화를 나타낸 것으로 초기온도 20 °C 대비

온도상승을 관찰하였다. 부하전류에 따른 소선 수 가닥별 온도상승 측정결과 부하전류 5 A에서는 초기온도보다 최소 6 °C에서 최대 20 °C까지 상승하였고, 부하전류 10 A에서는 초기온도보다 최소 11 °C에서 최대 38 °C까지 상승하는 것으로 나타났다. 부하전류 5 A, 10 A의 경우 부하의 양이 크지 않아 소선 수에 따른 전선의 열적특성이 미비하게 관찰되었고 화재가 발생할 정도의 온도상승은 나타나지 않았다. 부하전류 15 A에서는 초기온도보다 최소 17 °C에서 최대 121 °C까지 상승하였고, 부하전류 20 A에서는 초기온도보다 최소 17 °C에서 최대 167 °C까지 상승하는 것으로 나타났다. 특히, 부하전류 15 A 1가닥 및 부하전류 20 A 4가닥, 2가닥, 1가닥에서는 초기온도대비 최소 55 °C에서 최대 167 °C까지 상승하여 전선의 허용온도인 70 °C를 넘어 화재위험성이 높은 것으로 나타났다. 단일원인인 반단선에 의한 최대온도변화를 확인해 본 결과 20 A 23가닥에서는 초기온도대비 37 °C 상승하였지만, 20 A 1가닥에서는 초기온도대비 167 °C 상승하여, 정상상태의 전선 소선 수를 기준으로 소선 수가 적어질수록 온도상승이 높게 나타났다. 또한, 5 A 1가닥에서는 초기온도 대비 20 °C 상승하였지만, 20 A 1가닥에서는 초기온도대비 167 °C 상승하여 부하전류가 높아질수록 온도가 상승하였고, 전선의 온도가 167 °C까지 상승하여 화재위험성이 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 3은 단일원인인 반단선에 의한 열적특성 측정실험결과 실험시간인 1800 s 동안의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 기존 반단선 연구⁽⁴⁾의 경우 지속적인 온도상

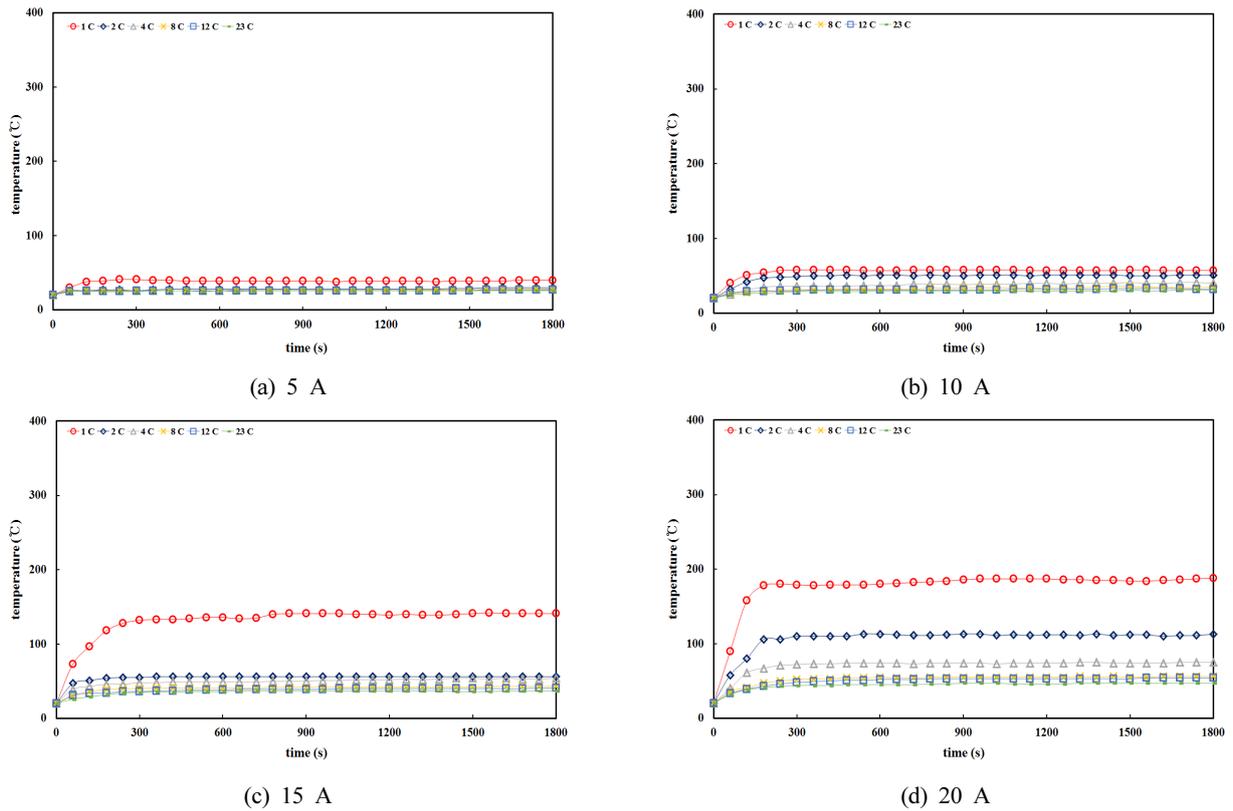


Figure 3. Temperature change graph by single cause (partial disconnection).

승이 관찰되는 구간까지만 측정하여 반단선에 의해 위험성이 크게 증가되는 것으로 나타났다. 하지만 본 연구에서는 1800 s 동안의 온도변화를 관찰한 결과 300 s 이전까지의 온도상승은 지속적으로 발생하여 위험성이 크게 증가되었으나, 300 s 이후의 온도상승은 크게 나타나지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 원인은 초기 반단선에 의한 온도상승으로 300 s 이전까지 뚜렷한 열적특성이 관찰되었지만, 300 s 이후 반단선으로 발생된 열에 의해 반단선 부근의 전선피복이 열화되어 녹으면서 전선피복에 의해 보호되어 있던 정상상태의 전선부위(도체)가 추가적으로 공기 중에 노출되면서 공기와의 접촉면이 증가하게 되고, 이로 인해 열의 방열과 축열이 평형을 이루며 일정하게 온도가 유지되는 것으로 생각된다.

이상의 실험결과를 바탕으로 추가적으로 반단선 길이(l) 10 mm에서 측정된 열적특성의 실험값과 줄열에 의한 이론값을 비교·분석하였다. 도체에서 발생하는 줄열 H [cal]는 식(1)과 같고, 식(1)에서 도체의 저항 R은 식(2)과 같다.

$$H = 0.24I^2Rt \text{ [cal]} \tag{1}$$

$$R = \rho \frac{l}{A} \text{ [\Omega]} \tag{2}$$

식(2)에서 전선의 도체 단면적 A는 식(3)으로 구할 수 있으며, a는 소선 한 가닥의 단면적을 N은 소선 수를 의미한다.

$$A = Na \text{ [m}^2\text{]} \tag{3}$$

식(1), 식(2) 및 식(3)으로부터 식(4)가 성립한다.

$$H = 0.24I^2\rho \frac{l}{Na}t \text{ [cal]} \tag{4}$$

실험에 사용된 전선의 도체 저항값 13.3 Ω/km을 이용하여 반단선 길이(l) 10 mm의 전선 저항 R을 구하면 0.000133 Ω (0.01 m : X Ω=1000 m : 13.3 Ω)이 된다. 여기에 도체의 단면적 식(3)과 도체의 저항 R 식(2)로부터 식(5)가 성립된다.

$$R = \rho \frac{l}{Na} = \frac{R'}{N} \text{ [\Omega]} \left(\because \text{여기서 } R' = \rho \frac{l}{a} \right) \tag{5}$$

식(5)로부터 전선의 총 소선 수인 23가닥의 저항 R'=NR=23×0.000133=0.003059 Ω이 된다. 식(1)과 식(5)를 통해 단위시간(t=1 s)당 전류가 흐르는 전선에서 발생하는 줄열은 식(6)과 같다.

$$H = 0.24I^2 \frac{0.003059}{N} \text{ [cal]} \tag{6}$$

식(6)을 통해 전선에 전류가 흐를 때 발생하는 줄열은 전

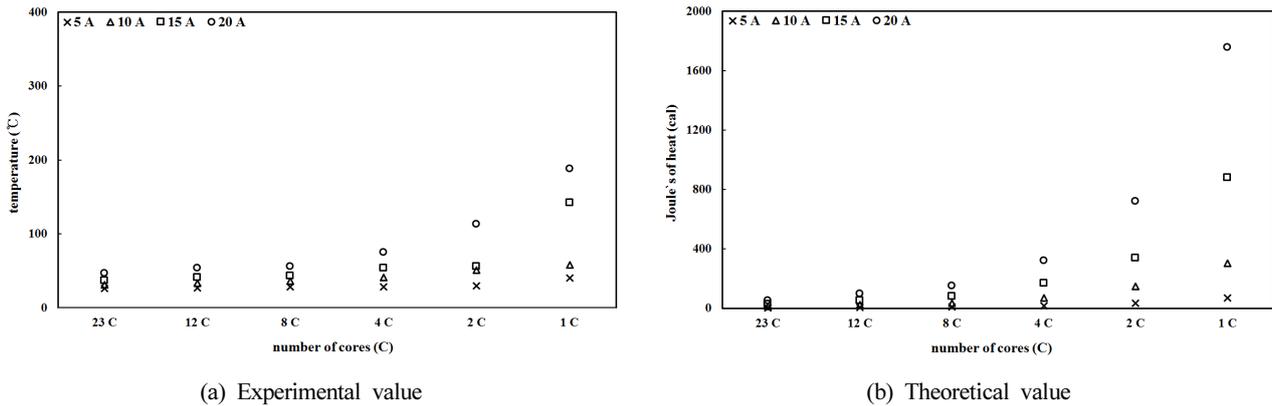


Figure 4. Graph of experimental value and theoretical value.

Table 3. Maximum Temperature Change by Composite Cause with Partial Disconnection and Tracking (Initial temperature 20 °C)

Items	ΔT (at 23 C)	ΔT (at 12 C)	ΔT (at 8 C)	ΔT (at 4 C)	ΔT (at 2 C)	ΔT (at 1 C)
5A	6 °C	8 °C	8 °C	11 °C	30 °C	330 °C
10A	13 °C	19 °C	26 °C	45 °C	330 °C	330 °C
15A	22 °C	34 °C	52 °C	55 °C	330 °C	330 °C
20A	28 °C	37 °C	59 °C	88 °C	330 °C	330 °C

선의 소선 수에 반비례하는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 도체의 경우 저항과 온도상승의 관계는 비례하기 때문에 온도가 상승함에 따라 저항이 변화하는 것을 고려한 줄열을 추가적으로 계산하는 것이 적합하다.⁽³⁾

온도가 t °C일 때 전선의 저항값을 R_t 라고 하면, 시간에 따라 상승하는 온도에 의해 변화하는 저항값 R_t 를 식(7)을 통해 구할 수 있다. R_{20} 은 시험 초기온도인 20 °C에서의 전선의 저항값을 나타낸 것이고, α_0 는 초기온도 20 °C에서 전선 구리의 온도계수, Δt 는 시간에 따라 상승한 온도와 초기온도 20 °C의 온도차를 의미한다.

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha_0 \Delta T) [\Omega] \quad (7)$$

식(7)에서 전선의 저항값 R_t 를 식(6)에 대입하면 시간별 온도상승에 의해 변화되는 줄열 식(8)을 도출 할 수 있다. 이를 통해 전선의 소선 수별 시간경과에 따라 저항변화에 의해 발생하는 열량 $H[\text{cal}]$ 을 산출할 수 있다.

$$H = 0.24 I^2 \frac{0.003059}{N} (1 + \alpha_0 \Delta T) t [\text{cal}] \quad (8)$$

Figure 4는 반단선 실험에 의해 측정된 부하별 전선의 소선 수에 따른 열적특성 그래프와 이론식을 대입하여 산출된 전선의 소선 수에 따른 줄열특성 그래프를 나타낸 것으로 실험값과 이론값의 열적특성이 유사한 패턴으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 복합적 원인인 반단선과 트래킹에 의한 열적특성 측정실험결과

Table 3은 복합적 원인인 반단선과 트래킹에 의한 열적특성 측정실험결과 최대온도변화를 나타낸 것으로 초기온도 20 °C 대비 온도상승을 관찰하였다. 부하전류에 따른 소선 수 가닥별 온도상승 측정결과 부하전류 5 A에서는 초기온도보다 최소 6 °C에서 최대 330 °C 이상 상승되어, 온도상승이 기존 단일원인인 반단선만을 인가했을 때보다 트래킹이 추가적으로 인가되면서 열적특성이 크게 증가되었고, 열화상카메라로 측정 가능한 최대온도인 350 °C를 초과하는 것으로 나타났다. 소선 수 8가닥까지는 반단선만 발생하였을 때와 열적특성이 비슷하였지만 4가닥부터는 열적특성이 뚜렷하게 나타났으며, 1가닥에서는 최대 330 °C 이상 상승하면서 선이 끊어지는 단선이 발생하였다. 부하전류 10 A에서는 초기온도보다 최소 13 °C에서 최대 330 °C 이상 상승하였으며, 전체적인 소선 수에서 반단선만 인가했을 때보다 온도상승이 크게 나타났고, 소선 수 2가닥 및 1가닥에서는 최대 330 °C 이상 상승하여 급격한 온도상승으로 인한 단선이 발생하였다. 부하전류 15 A에서는 초기온도보다 최소 22 °C에서 최대 330 °C까지 상승하였고, 반단선만 인가했을 때보다 전체적인 소선 수에서 온도상승이 크게 증가하여 8가닥부터 전선의 허용온도인 70 °C를 초과한 72 °C로 측정되었고, 2가닥, 1가닥에서는 최대 330 °C 이상 상승하여 급격한 온도상승으로 인한 단선이 발생하였다.

부하전류 20 A에서는 초기온도보다 최소 28 °C에서 최대 330 °C 이상 상승하였고, 모든 실험시료 중 온도상승이 가장

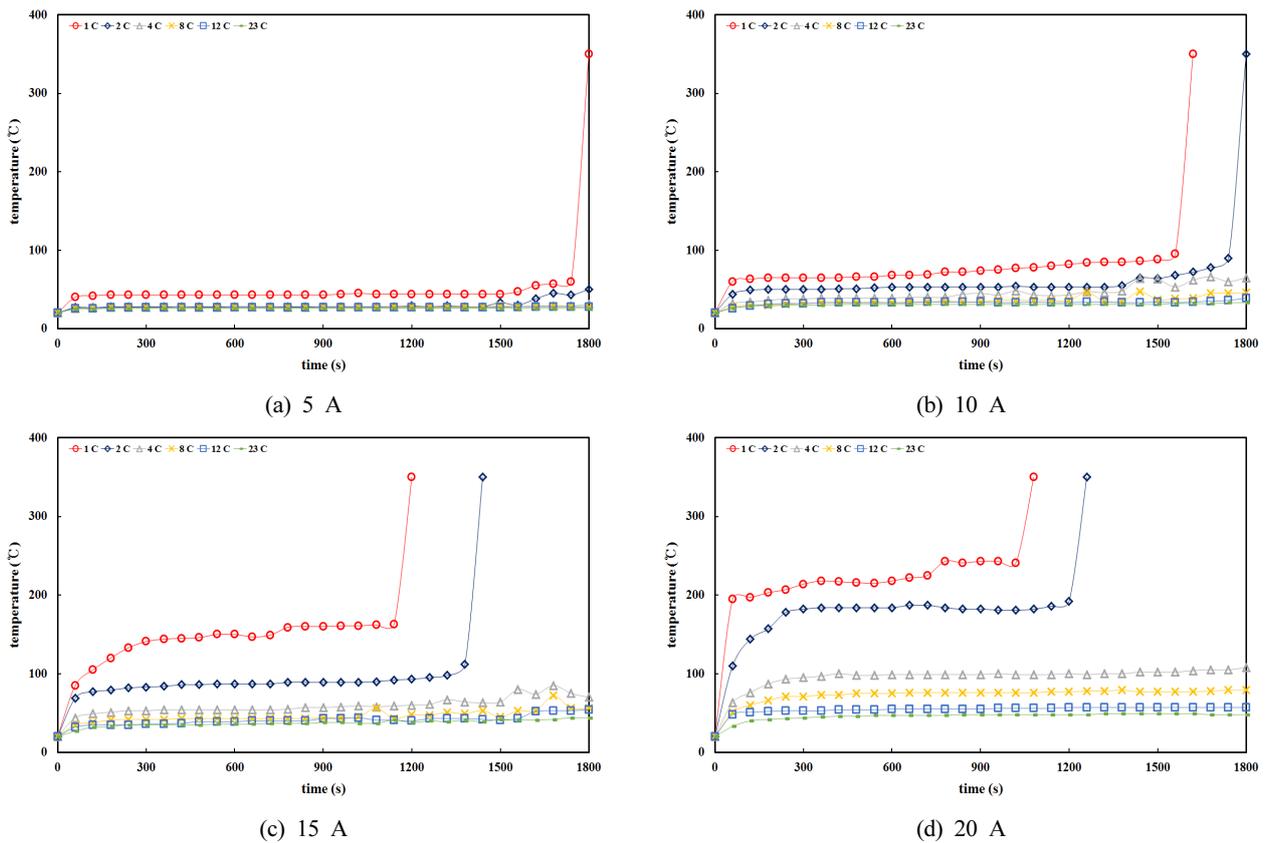
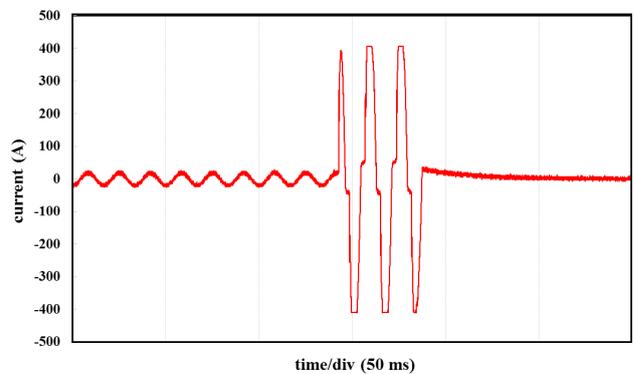


Figure 5. Temperature change graph by composite cause (partial disconnection and tracking).



(a) Photograph of tracking spark discharge



(b) Tracking current waveform

Figure 6. Tracking spark discharge and current waveform (I=15 A, No. of cores=1 C).

높게 나타났다. 전체적인 소선 수에서 온도상승이 가장 크게 증가하여 8가닥부터 전선의 허용온도인 70 °C를 초과한 79 °C로 측정되었고, 2가닥, 1가닥에서는 최대 330 °C 이상 상승하여 급격한 온도상승으로 인한 단선이 발생하였다.

Figure 5는 복합적 원인인 반단선 및 트래킹에 의한 열적 특성 측정실험결과 실험시간인 1800 s 동안의 온도변화를 그래프로 나타낸 것이다. 단일원인인 반단선만 인가하였을 경우 300 s 이전까지 온도증가하고 그 후 일정온도를 유지

하였지만, 반단선과 트래킹이 동시에 인가될 경우 전체적인 온도가 실험시간 동안 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 실험결과 반단선과 트래킹은 상호 연관성을 가지고 있었으며, 단일원인이 아닌 복합적인 원인으로 상호작용이 일어날 경우 단일원인보다 전기화재 발생 위험성이 상대적으로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 6은 부하전류 15 A 인가 시 전선 소선 수 1가닥의 반단선 상태에서 트래킹이 진전되면서 나타나는 불꽃방전

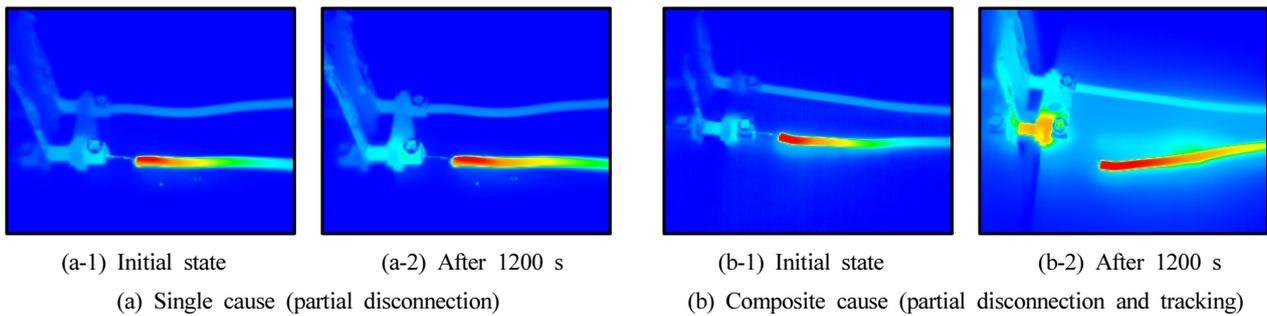


Figure 7. Thermal image of single cause and composite cause ($I=15$ A, No. of cores=1 C).

과 그 때의 전류파형을 나타낸 것이다. 기존 반단선만 인가한 경우 15 A의 전류가 반단선 부위에 흐르게 되었지만, 반단선 상태에서 트래킹을 인가한 복합적 전기화재의 경우 트래킹이 진전되면서 강한 불꽃방전과 함께 실효값 300 A (최대값 424 A 이상) 이상의 강한 대전류가 반단선 부위로 흐르게 되고, 전류의 급격한 증가에 따른 급격한 온도상승이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

이상과 같은 결과 반단선이 단일원인으로 작용할 때 흐르던 전류에 의해 발생된 기존 열적특성이 트래킹이 복합적으로 작용함에 따라 기존에 흐르던 전류의 크기가 트래킹이 진전됨으로써 단락전류형태의 대전류가 인가되어 줄열에 의한 온도상승을 더욱 가속시켜 열적특성이 더욱 뚜렷이 나타난 것으로 생각된다.⁽³⁾ 이로 인해 단일원인보다 복합적인 원인에 기인한 전기화재가 그 위험성이 더욱 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 7은 부하전류 15 A 인가 시 전선의 소선 수 1가닥에서의 단일원인인 반단선을 인가했을 때와 복합적 원인인 반단선과 트래킹을 인가하였을 때 열적특성의 차이를 열화상 카메라로 촬영한 이미지를 나타낸 것이다. 단일원인인 반단선 상태에서 부하전류 15 A를 인가하였을 때 반단선 인근의 피복에 의해 보호된 정상상태의 전선부위가 지속적인 열축적으로 온도 상승이 나타나지만, 공기 중에 노출된 반단선 전선의 경우 발열보다는 방열이 크게 나타나면서 온도상승이 미비하게 나타나 단선이 발생되지 않았다. 반면, 복합적 원인인 반단선과 트래킹을 동시에 인가하였을 경우 트래킹이 진전됨에 따라 단락전류 상태의 대전류가 반단선된 전선부위로 흐르게 되어 줄열에 의한 급격한 온도상승으로 방열이 크게 증가되어 소선 수 1가닥에서 단선이 발생되고, 콘센트와 접속되는 플러그 부분에서도 온도가 높게 증가하는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 반단선과 트래킹에 의한 복합적 전기화재 위험성분석에 관한 연구로서 반단선과 트래킹의 화재연관성을 분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 단일원인인 반단선에 의한 열적특성을 측정한 결과

초기온도 20 °C를 기준으로 부하전류 5 A에서는 최소 6 °C에서 최대 20 °C까지, 부하전류 10 A에서는 최소 11 °C에서 최대 38 °C까지, 부하전류 15 A에서는 최소 17 °C에서 최대 121 °C까지, 부하전류 20 A에서는 최소 17 °C에서 최대 167 °C까지 온도상승이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 실험시간인 1800 s 동안 반단선에 의한 온도변화를 관찰한 결과 300 s 이전까지의 온도상승은 지속적으로 발생하여 위험성이 크게 증가되었으나, 300 s 이후의 온도상승은 크게 나타나지 않는 것으로 관찰되었다.

2) 복합적원인인 반단선과 트래킹에 의한 열적특성을 측정한 결과 초기온도 20 °C를 기준으로 부하전류 5 A에서는 최소 6 °C에서 최대 330 °C 이상 상승되면서, 열화상카메라의 최대온도 설정범위인 350 °C를 초과하는 것으로 나타났다. 부하전류 10 A에서는 최소 13 °C에서 최대 330 °C까지, 부하전류 15 A에서는 최소 22 °C에서 최대 330 °C까지, 부하전류 20 A에서는 최소 28 °C에서 최대 330 °C까지 온도상승이 발생하여 단일원인인 반단선만을 인가하였을 때보다 그 위험성이 크게 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 단일원인인 반단선만 인가하였을 경우 300 s 이전까지 온도증가하고 그 후 일정온도를 유지하였지만, 반단선과 트래킹이 동시에 인가될 경우 전체적인 온도상승이 실험시간 동안 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다.

이상과 같이 반단선이 단일원인으로 작용할 때 흐르던 전류가 트래킹이 복합적으로 작용함에 따라 강한 불꽃방전과 함께 단락전류 형태의 대전류가 반단선에 인가되어 줄열에 의한 온도상승을 더욱 가속시켜 열적특성이 더욱 뚜렷이 나타났다. 이로 인해 기존 단일원인보다는 복합적 원인에 의한 전기화재의 위험성이 더욱 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

따라서 전기화재의 경우 다양한 환경조건 및 원인에 의해 복합적으로 발생될 가능성이 나타날 수 있기 때문에 전선에서 발생하는 화재 위험성을 최소화하기 위해서는 평상시 접속부 및 전선의 관리를 통해 반단선 및 트래킹이 발생될 수 있는 있는 상황을 예방한다면, 화재 발생 위험성을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 단일 원인이 복합적 원인에 영향을 주는 전기화재의 발생 위험성을 최소화하기 위해서는 기존에 연구해 온 단일원인에 연구와

추가적으로 복합적 원인에 대한 다양한 연구가 진행되어 향후 화재원인조사 시 다각적인 분석을 통한 기초데이터 확보가 필요할 것으로 생각된다.

References

1. Ministry of Public Safety and Security, "National Fire Information Center E-Fire Statistics" (2012-2016).
2. S. W. Jee, S. K. Kim and C. H. Lee, "The Thermal Characteristics of Partially Disconnected Wire Happened in Plug", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 25, No. 4, pp. 104-110 (2011).
3. C. H. Lee, K. J. Ok, S. K. Kim and S. W. Jee, "A Study on the Tracking Characteristics of Contaminated Insulating Materials of RCD", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 67-71 (2008).
4. D. S. Gum, "A Study on the Electrical Fire Hazard by Poor Contact and Tracking of the Terminal Block", The Graduate School of Hoseo University, Academic Thesis, pp. 1-68 (2015).
5. S. K. Kim, D. S. Gum and C. H. Lee, "A Study on the Electrical Fire Risk of Terminal Block Due to Single and Composite Cause", Fire Science and Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 57-66 (2015).
6. D. H. Kim, S. C. Kim, J. H. Lee, J. Y. Park, Y. H. Park and H. J. Lee, "Analysis of Thermal Characteristics for the Fire Risk Assessment According to Partial Disconnection on the VCTF and IV Electric Wire", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 23, No. 4, pp. 47-52 (2008).
7. Y. S. Lee, "Temperature Characteristics Analysis of Heat-resistant PVC Insulated Wire According to the Breaking Degree" The Graduate School of Hanbat University, Academic Thesis, pp. 1-69 (2015).
8. S. C. Kim and D. H. Kim "Analysis for the Thermal Properties of the Electrical Wire According to Overload and Disconnection", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 4, pp. 26-31 (2007).
9. G. O. Choi, "A Study on the Tracking Characteristics and Prevention from Fire of Tracking for ELBs (Earth Leakage Breakers)", The Graduate School of Seoul National University of Science & Technology, Master's Degree Thesis, pp. 6-10 (2012).
10. N. K. Park, "The Electrical and Morphological Characteristics for an Organic Insulating Material Surface in the Tracking Process", The Graduate School of Sungkyunkwan University, Doctor's Degree Thesis, pp. 8-11 (2007).
11. KS C IEC 60112, "Methods for Determining the Comparative and the Proof Tracking Indices of Solid Insulating Materials Under Moist Conditions" (2010).