

플러그 내부에서 발생한 소선 단선에 의한 발열특성

(The Thermal Characteristics of Partially Disconnected Wire Happened in Plug)

지승옥* · 김시국 · 이춘하**

(Seung-Wook Jee · Shi-Kuk Kim · Chun-Ha Lee)

Abstract

There are over 30[%] of electric fires in Korea happened at wire or wiring devices. For its prevention many safety devices are set up electric equipments. These safety devices are not working in a rated current's condition of electric equipment. But when wire is partially disconnected, electric fire is able to be happened even though current is smaller than a rated current value.

This paper studied thermal characteristics and fire ability when wire in plug is partially disconnected. The experiment is progressed a method that inner wire of plug is partially disconnected and after that current that is less than a rated current is flowed. As the result, heating occurred in near of partially disconnected wire makes that outer sheath is melted, plug cover is carbonized, and even sometimes wire is fused. And results of analysis of thermal image of partially disconnected wire happened in plug, it shows a difference to heating distribution and temperature appeared surface of plug depend on a progress of a partially disconnected wire.

Key Words : Partially Disconnected Wire, Electric Fire, A Rated Current, Plug

1. 서 론

우리나라에서 발생하는 전기화재 중 전기배선 및 배선기구에서 발화하는 화재가 매년 30[%]를 넘고 있다. 이를 다시 세부적으로 분석하면 옥내배선, 전기기기용 코드, 콘센트 등의 순서로 많이 발생하는 것으로 알려져 있다[1].

반단선은 전선의 도체 중 일부가 잘려 통전로의 단면적이 감소된 상태를 말하며, 접촉불량이나 전선의 압착 손상 때문에 발생되어 국부적으로 발열을 일으킨다. 옥내배선이나 전기기기용 코드 같은 전기배선에서 주로 발생되며, 플러그와 같은 전기기구의 접속부에서도 많이 발생하는 것으로 알려져 있다[2-4]. 반단선은 그 자체로도 전기화재의 발화원이 되기도 하지만, 전선피복 등을 녹임으로써 합선을 일으키는 원인이 되기도 한다[1,4]. 이에 국내에서도 합선이나 반단선에 대하여 배선용 절연전선을 대상으로 하는 실험적인 연구들은 이루어져 있다[4-8]. 하지만 정작 도선 접속부에서 발

* 주저자 : 호서대학교 소방방재학과
** 교신저자 : 호서대학교 소방방재학과 교수
Tel : 041-540-5732, Fax : 041-540-5728
E-mail : leecha@hoseo.edu
접수일자 : 2010년 12월 13일
1차심사 : 2010년 12월 17일
심사완료 : 2011년 1월 24일

생되는 소선 일부의 단선이 화재에 미치는 영향이나 도선접속부 외부에서 이들을 찾기위한 연구는 미흡하다.

이에 본 논문에서는 대표적인 전기기구 접속기구인 플러그의 내부 연선접속부에서 소선의 일부가 단선 되었을 때의 온도특성 및 발화가능성을 구하였고, 이로부터 열화상을 이용하여 플러그 내부에서 발생한 소선의 단선 정도를 검출하고자 하였다. 전류는 차단 기나 퓨즈 등 전기적인 안전장치가 동작하지 않는 정격 이하의 값으로 제한하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 연선에서 선심수와 열량의 관계

저항률 $\rho[\Omega \cdot m]$, 단면적 $A[m^2]$, 길이 $l[m]$ 인 도체의 저항 $R[\Omega]$ 은 식 (1)과 같고, 이 도체에 전류 $I[A]$ 가 흐를 때 발생하는 줄열 $H[J]$ 은 식 (2)와 같다[9].

$$R = \rho \frac{l}{A} [\Omega] \tag{1}$$

$$H = I^2 R t [J] \tag{2}$$

도체가 단면적 $a[m^2]$ 인 선심 N [개]로 구성된 연선일 경우 연선의 단면적 A 는 식 (3)과 같다[10].

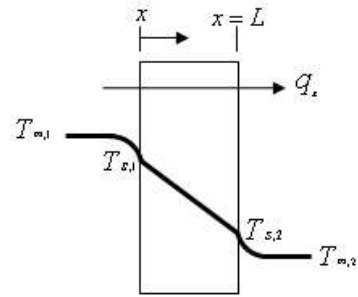
$$A = Na [m^2] \tag{3}$$

식 (1), (2) 및 (3)으로부터 식 (4)가 성립한다.

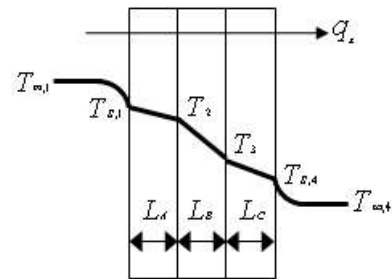
$$H = I^2 \rho \frac{l}{Na} t [J] \tag{4}$$

2.2 열전도율과 전도열 전달률

그림 1 (a)와 같이 열 발생이 없고, 일정한 열전도율을 가지는 두께 $L[m]$ 의 평면벽에서 1차원 정상상태 전도에 대하여 온도는 식 (5)와 같이 선형적으로 변한다[11-12].



(a) A plane wall



(b) A three-layer system in series

그림 1. 정상상태 전도에 대한 온도 분포
Fig. 1. Temperature distribution for steady-state conduction

$$T(x) = (T_{s2} - T_{s1}) \frac{x}{L} + T_{s1} \tag{5}$$

식 (5)에 푸리에 법칙을 사용하면 전도열 전달률은 식 (6)과 같다.

$$q_x = \frac{kS}{L} (T_{s1} - T_{s2}) \tag{6}$$

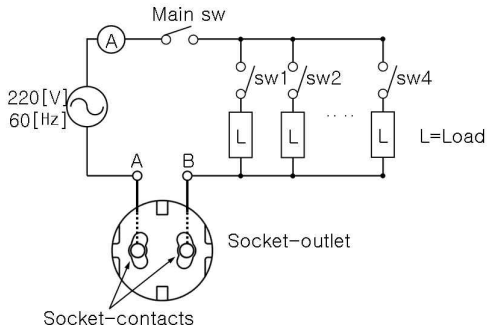
여기서 $S[m^2]$ 는 열전달 방향에 수직인 벽의 면적, $k[W/m \cdot K]$ 는 열전도율이다.

한편, 그림 1 (b)는 다층에서의 온도분포를 보여준다[11-12].

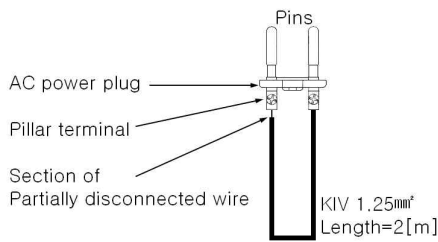
3. 실험 장치 및 방법

플러그와 연선의 접속부에서 발생한 일부 소선의 단선 때문에 발생하는 도선의 온도변화를 측정하기 위한 실험의 결선은 그림 2 (a)와 같다.

플러그 내부에서 발생된 소선 단선에 의한 발열특성



(a) Experimental circuit



(b) Test sample

그림 2. 실험장치 배치도
Fig. 2. Experimental setup diagram

전원은 220[V], 60[Hz] 상용교류전원이며, 스위치 (sw1, sw2, sw3, sw4)로 부하 L의 수를 조절함으로써 회로 전체의 전류를 결정하였다. 하나의 부하에 흐르는 전류는 4[A]이며, 4개의 부하를 모두 사용할 때 회로 전체에 흐르는 전류는 16[A]이다. 단자 A와 B는 각각 콘센트(Socket-outlet, 250[V], 16[A])의 양 칼반이(Socket-contacts)에 연결하였다.

그림 2 (b)는 실험에 사용된 시료의 모습을 보여준다. 시료는 표 1의 KIV 연선을 2[m]로 잘라 만들었다. 연선 양끝의 피복을 벗겨내고 각각 플러그 칼(Pin)과 연결된 필러단자(Pillar terminal)에 연결한 후, 한 쪽은 정상상태로 두고(정상상태부), 다른 한 쪽만 그림 3과 같이 소선의 일부를 잘라 내었다(소선단선부). 이때 단선시키고 남은 소선의 수(소선수, Number of cores)는 각각 1, 2, 4, 8, 16, 32, 50으로 하였다. 또한 각 소선 마다 단선시킨 길이(단선길이, Length of partially disconnected wire)는 5, 9, 15[mm]의 세 종류로 하였다.

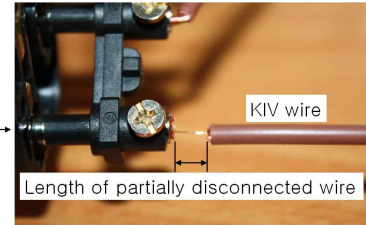


그림 3. 소선 단선 시료
Fig. 3. Test sample of disconnected wire.

표 1. 실험에 사용된 KIV의 전기적 특성(제조사 사양)
Table 1. Electric characteristic of KIV used in experiment(Manufacturing specification)

도체	공칭단면적	1.25[mm ²]
	소선수/지름	50No./0.18[mm]
	바깥지름	1.47[mm]
절연체 두께		0.8[mm]
완성품 표준 바깥지름		3.1[mm]
최대 도체 저항		14.7[Ω/km]
최고 허용 온도		75[°C]
절연 저항		50[MΩ · km]

그림 2에서 플러그(AC power plug, 250[V], 16[A])를 콘센트에 삽입하고, 스위치(sw1, sw2, sw3, sw4)로 전류값을 결정한 후 메인 스위치(Main sw)를 조작하여 전류를 흘렸다. 온도는 전류를 흘린 후, 5[min]이 경과했을 때 열화상 카메라(Fluke사, Ti25 Thermal imager)를 이용하여 측정하였다.

4. 실험 결과

그림 4는 단선길이 5[mm], 소선수 1인 시료에 대하여 그림 2의 실험에서 12[A]의 전류를 흘리고 5[min]이 지났을 때의 결과를 보여준다.

소선단선부의 경우 150[°C]를 초과하는 것을 볼 수 있다. 이 온도는 KIV 연선의 정격온도 75[°C]를 훨씬 상회하는 값이다. 그림 4는 이때 도선 피복의 모습을 보여준다.

그림 5는 소선단선부에서 발생된 열에 의해 도선의 피복이 변형됨으로써 연선의 일부가 피복 바깥으로 돌출된 것을 보여준다. 즉 단선으로 인해 발생된 열이

도선피복을 변형시킴으로써 단락을 유발하여 전기화재를 일으킬 수 있을 것으로 판단된다.

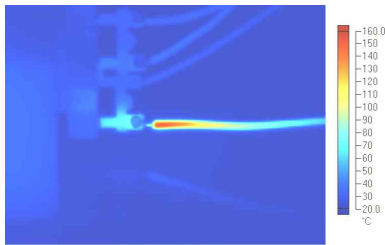


그림 4. 소선단선부의 열화상
(12[A], 단선길이=5[mm], 소선수=1)
Fig. 4. Thermal image of partially disconnected wire(12[A], Length of partially disconnected wire=5[mm], Number of cores=1)

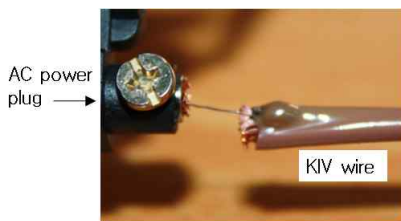


그림 5. 소선단선부에서 발생된 열에 의해 용융된 피복(12[A], 단선길이=5[mm], 소선수=1)
Fig. 5. Melted outer sheath cause of heating from partially disconnected wire(12[A], Length of partially disconnected wire=5[mm], Number of cores=1)

그림 6은 단선길이가 5[mm]이고, 소심수가 각기 다른 7종류(소선수=1, 2, 4, 6, 16, 32, 50)의 시료에 대하여 회로 전류를 각각 4, 8, 12, 16[A]로 하고 그림 2의 실험을 수행한 결과를 보여준다. 시료의 온도는 실험을 5회 반복한 후 그 평균값으로 하였다.

소선수가 줄어들면서 소선단선부의 온도 증가가 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 특히 회로의 전류가 4, 8, 12[A]일 때는 소선수가 8가닥, 16[A]일 때는 소선수가 16가닥 이하가 되면서부터 소선단선부의 온도 증가가 커지기 시작하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 줄열이 소선수와 서로 반비례 관계인 식 (4)와 일치한다. 16[A]의 경우 소선수가 1이 되면 줄열로 인해 소선이 단선되었다.

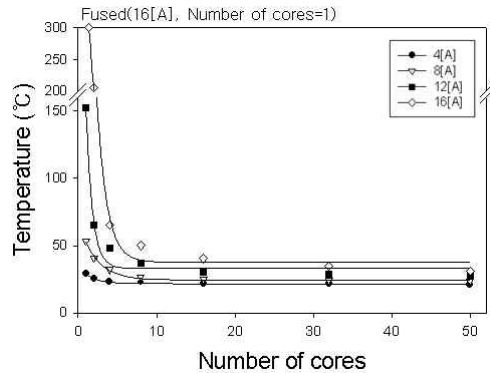


그림 6. 소선단선부의 온도(단선길이=5[mm])
Fig. 6. Measured temperature of partially disconnected wire(Length of partially disconnected wire=5[mm])

한편 소선의 일부가 단선된 연선에 대하여 플러그를 뽑을 때 사용자가 도선을 잡아당기면 소선단선부의 길이를 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 그림 7과 8은 이때를 모의하여 실험한 것으로 그림 6에서 단선 길이를 각각 9, 15[mm]로 증가시키고 실험한 결과를 보여준다.

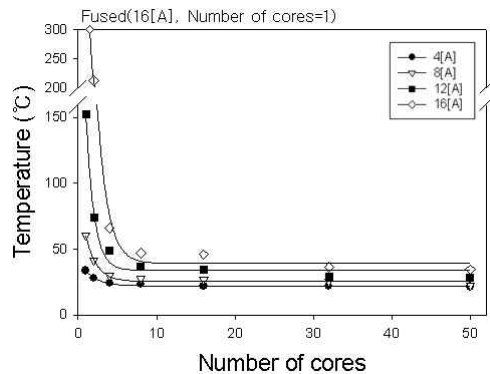


그림 7. 소선단선부의 온도(단선길이=9[mm])
Fig. 7. Measured temperature of partially disconnected wire(Length of partially disconnected wire=9[mm])

그림 7도 그림 6과 같이 소선수와 소선단선부의 온도는 서로 반비례 관계를 보인다. 또한, 그림 6보다 소선수 32까지는 평균 1.0[°C], 소선수 16 이하에서는 평균 4.6[°C] 높게 나타났다.

플러그 내부에서 발생된 소선 단선에 의한 발열특성

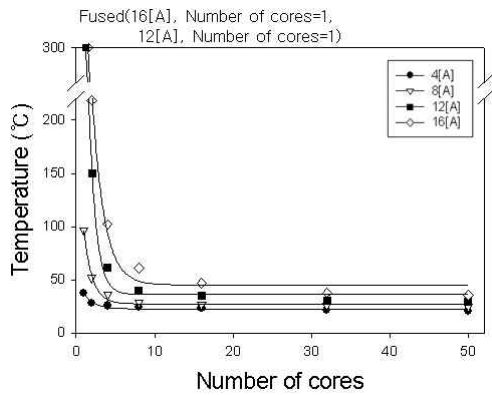


그림 8. 소선단선부의 온도(단선길이=15[mm])
 Fig. 8. Measured temperature of partially disconnected wire (Length of partially disconnected wire=15[mm])

그림 8도 그림 6이나 7과 같이 소선수와 소선단선부의 온도가 서로 반비례 관계를 보인다. 12[A]에서도 소선수가 1인 경우 단선이 발생하였다. 그림 8은 그림 5보다 온도가 평균 10.3[°C] 정도 높게 나타났다. 소선수가 4인 경우는 평균 14.3[°C] 이상 증가하였고, 소선수가 2 이하인 경우에는 평균 27.2[°C] 이상 증가하였다.

그림 6으로부터 12, 16[A]의 경우 소선수가 각각 1, 2 이하가 되면 단시간에 도선 피복을 변형시킬 정도의 높은 열이 발생되는 것으로 나타났다. 하지만, 그림 7 및 8과 같이 단선길이가 늘어나면, 16[A]의 경우 소선수 4, 12[A]의 경우 소선수 2 이하에서도 단시간에 도선 피복을 변형시킬 정도의 고열이 발생되었다.

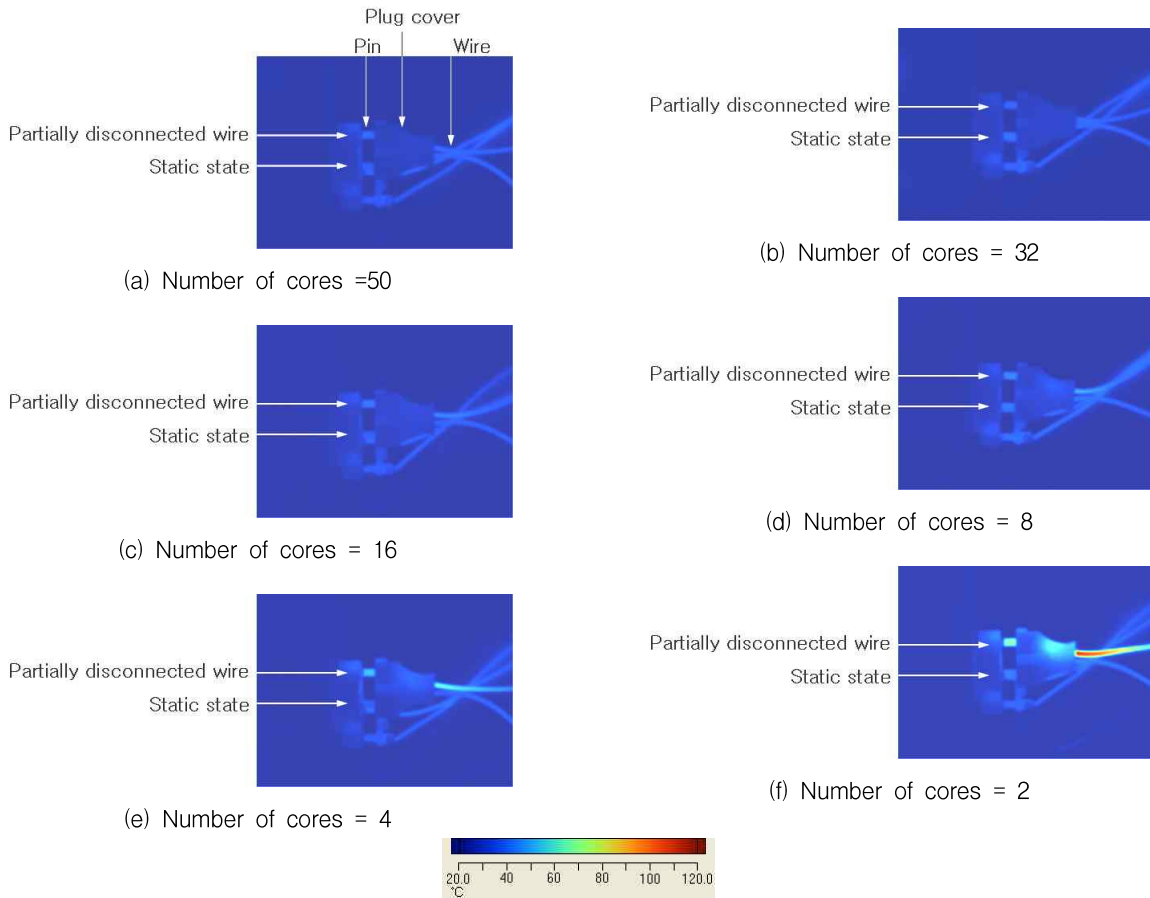


그림 9. 내부에서 소선단선이 발생한 플러그의 열화상(16[A], 단선길이=5[mm])
 Fig. 9. Thermal image of plug that wire in plug is partially disconnected (16[A], Length of partially disconnected wire=5[mm])

즉 소선수의 감소뿐만 아니라 단선길이가 길어질수록 소선단선부의 온도도 더욱 증가하였다. 이는 식 (4)로부터 H가 1에 비례하는 것과 일치하는 결과이다.

그림 9는 그림 6에서 16[A] 실험에 대하여 플러그 커버를 썩은 상태에서 열화상카메라로 측정된 플러그 외부 표면의 온도분포를 보여준다.

그림 9를 보면, 소선수 32는 소선단선부를 감지하지 못하였다. 소선수가 16이 되면서 소선단선부(그림 9에서 Partially disconnected wire) 쪽의 도선(wire) 및 플러그 칼의 온도가 정상상태부(그림 9에서 Static state) 보다 3~4[°C] 정도 높게 나타나기 시작하였다. 소선수가 8 이하가 되면서 플러그 커버에도 온도의 변화가 감지되었다. 또한 소선단선부가 정상상태부에 비해 3[°C] 이상, 소선수 4에서는 5[°C] 이상, 소선수 2에서는 18[°C] 이상 높게 관측되었다.

전류값을 각각 4, 8, 12[A]로 변경하고 그림 8의 실험을 수행한 결과도 그림 9와 동일하게 나타났다. 소선수 32인 경우에는 국부적인 발열이 도선과 플러그 칼에서만 관측되었지만, 소선수 16부터 1까지는 도선과 플러그 칼뿐만 아니라 플러그 커버에서도 소선단선으로 인한 국부적인 발열이 관측되었다.

소선단선부로부터 발생한 열은 플러그 칼의 경우 열전도율이 높은 금속을 통해 전달되고, 도선의 경우 식 (5)와 비교할 때 두께가 얇은 도선 피복을 통해 전달되기 때문에 높지 않은 온도에서도 플러그 외부에서 관측되었다. 하지만 플러그 커버의 경우 그림 1 (b)와 같이 도선 피복, 공기층, 플러그 커버의 3개 층을 통과해야 되고, 특히 열전도율이 낮은 공기층을 통과해야 하므로 상대적으로 높은 열이 발생해야만 플러그 외부에서 관측할 수 있다고 사료된다.

그림 10은 그림 9 (f)의 실험 후 촬영한 플러그 내부의 모습을 보여준다. 탄화가 발견되었다. 12[A] 소선수 1에서도 탄화가 발견되었다. 즉 플러그 내부에서 발생하는 소선단선은 직접적인 전기화재의 발생원이 될 수 있으며, 절연열화를 통해 단락을 용이하게 함으로써 전기화재를 일으킬 수 있을 것으로 사료된다.



그림 10. 내부에서 탄화가 발생한 플러그 (16[A], 단선길이=5[mm], 소선수=2)

Fig. 10. The plug that is carbonized inner side(16[A], Length of partially disconnected wire=5[mm], Number of cores=2)

5. 결 론

본 논문은 16[A], 250[V] 플러그와 KIV 1.25[mm] 로 구성된 배선용 접속기구 사이에서 연선의 소선 일부에 단선이 발생할 경우 정격전류에 의한 화재 가능성 및 이를 사전에 검출하기 위한 내용을 다루고 있다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 소선수 N의 연선에 전류가 흐를 때 발생하는 열량 H와의 관계를 이론적으로 구하였다. 그 결과 소선수와 열량은 서로 반비례 관계에 있었다.

(2) 소선의 일부가 단선된 시료에서 발생하는 열은 단선된 소선이 많을수록, 흐르는 전류가 클수록 높게 나타났다. 특히 12, 16[A]의 경우 선심수가 각각 2, 4 이하가 되면 도선 피복에 변형을 가져올 정도의 높은 열을 발생하였다.

(3) 소선단선으로 발생하는 열은 단선길이가 증가할수록 높게 나타났다. 이는 소선단선이 발생한 플러그에 대하여 사용자의 잘못된 사용이 화재위험을 더욱 증가시킬 수 있음을 의미한다.

(4) 열화상 카메라를 이용하여 플러그에서 발생되고 있는 소선단선을 감지하기 위한 실험을 수행한 결과 소선수 16부터 도선이나 플러그 칼 부위를 통해 감지가 가능했다. 소선수가 8 이하가 되면서 도선과 플러그 칼뿐만 아니라 플러그 커버를 통해서도 감지할 수 있었다.

(5) 전기기구에서 발생한 초기의 소선단선은 기기 고유의 기능에 큰 변화를 주지 않기 때문에 전기기기

플러그 내부에서 발생된 소선 단선에 의한 발열특성

를 계속 사용하게 되고, 이로써 전기화재로 이어질 수 있다. 따라서 이상의 자료들은 배선기구에서 소선단선에 의해 발생하는 화재를 사전에 감지하고 이를 예방하기 위한 시스템 구축에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] 한국전기안전공사, “2007년도 전기화재통계보고서”, 전기화재통계정보시스템(<http://www.kesco.net>), pp.17~28, 2008.
- [2] 東京消防, “新火災調査教本(電氣火災編)”, pp.8, 2004.
- [3] 이춘하, 이광식, 심광열, 지승욱, “전기안전관리의 길잡이”, 태영문화사, pp.58~78, 2007.
- [4] 김두현, 김성철, 이종호, 박종영, 박영호, 이형준, “VCTF와 IV전선의 반단선에 의한 화재위험성 평가를 위한 열적특성 해석”, 한국안전학회지, Vol.23, No.4, pp.47~52, 2008.
- [5] 박용환, 양승용, “단면결함 전선에서의 화재발생 메커니즘 연구”, 한국화재·소방학회 추계학술대회 논문집, pp.61~67, 2001.
- [6] 송길목, 최종석, 김동우, 박희로, “구부림 피로에 의한 전선의 반단선 특성 해석”, 한국전기전자재료학회 2003년도 하계학술대회 논문집, pp. 464~467, 2003.
- [7] 김동욱, 김형준, 김향곤, 최종석, “반복 피로에 의한 전원 코드의 화재위험성”, 대한전기학회 2006년도 춘계학술대회 논문집, pp.60~62, 2006.
- [8] 지승욱, 김시국, 이춘하, 이광식, “통전중인 도선에서 화재 가능성에 관한 기초 연구”, 조명·전기설비학회논문지, Vol.23, No.6, pp.72~77, 2009.
- [9] 지승욱, 백동현, 옥경재, 이춘하, “소방전기공학”, 신광문화사, pp.13~42, 2009.
- [10] 이동인, 손현, 남상천, 이우양, “신평 전력공학(II) 송·배전편”, 동명사, pp.17~21, 1979.
- [11] 이택신, 이재현, 이준식, “열전달 제2판”, pp.1~146, 희중당, 1995.
- [12] Frank Kreith, Mark S. Bohn, “Principles of Heat Transfer, six edition”, pp.1~72, Brooks/Cole, 2001.

◇ 저자소개 ◇



지승욱(池昇勳)

1971년 12월 27일생. 1995년 영남대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 졸업(박사). 현재 호서대학교 소방방재학과 출강.



김시국(金時國)

1981년 3월 24일생. 2007년 호서대 소방학과 졸업. 2007년 동 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



이춘하(李春夏)

1953년 10월 20일생. 1979년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985~1994년 한국기계연구원 실장. 2005~2006년 미국 Worcester 공과대학 객원교수. 2006~2008년 전국대학 소방학과 교수협의회 회장. 현재 방폭기술연구회 회장. 호서대 소방방재학과 교수.