

과전류에 의한 TFR-8 케이블의 과도상태 특성에 관한 연구

(A Study on the Transient State Characteristics of TFR-8 Cable caused by Over Current)

김병조* · 김재호**

(Byeong-Jo Kim · Jae-Ho Kim)

Abstract

The incidence of fires caused by electrical factors has increased with the growth in domestic electrical consumption. According to the national fire data system of national emergency management agency, electrical fires accounted for 20% of all domestic fires in the last 10 years. Electrical fires are mainly caused by short circuit, leakage current, defect in an electrical equipment, over load, utility fault, etc. The fault current can be several times larger than the nominal current, thereby exceeding the rated current of cable. Consequently, the cable conductor, typically copper wire, heats up to a temperature that ignites surrounding combustibles. This paper describes the transient characteristics of the 0.6/1kV, TFR-8 cable have been investigated, and analyzed under the over current conditions for reduce the risk of electrical fire by experimental and FEM analysis. The experimental and FEM(Finite Element Method) analysis results of temperature and resistance variation according to the over current in copper wires were analyzed. The experimental results coincide well with the FEM analysis.

Key Words : Electrical Fire, Over Current, Fault Current, Cable

1. 서 론

국내 전기에너지 사용량이 증가함에 따라 전기적인 요인에 의한 화재도 증가하고 있으며, 소방방재청 국가화재정보시스템에 의하면 최근 10년간 전체 화재 발생비율중 전기적인 요인에 의한 화재발생은 20%

이상으로 부주의에 의한 화재 다음으로 가장 높은 비율을 차지하고 있다[1].

최근 주요 대형 전기 화재사고는 전기에너지의 전송에 사용되고 있는 케이블과 관련이 있다[2-3]. PVC 외피 등 석유계의 유기물로 구성된 절연재 또는 피복재가 연소될 때 유독가스와 연소생성물인 연기 등이 발생하므로 인체에 유해하며, 가시범위가 매우 좁아진다. 도심지역의 경우 지중화에 따라 건설된 지하구의 밀폐된 공간 특성상 열과 유독가스, 연소생성물인 연기 등의 배출이 어렵기 때문에 화재진압을 위한 소방대원의 진입과 소화활동에 지장을 초래한다. 또한 가용 케이블 혹은 불용 케이블들에 의해 화재가 확대될

* Main author : Fire and Disaster Prevention of Daejeon university

** Corresponding author : Professor, Fire and Disaster Prevention of Daejeon university

Tel : 042-280-2593, Fax : 042-280-2596

E-mail : jkim@dju.ac.kr

Received : September 23, 2014

Accepted : November 28, 2014

가능성이 상존할 뿐만 아니라, 이와 같은 케이블 화재 사고로 인하여 금융, 교통, 통신, 전력 등 국가기반시설의 마비로 인하여 2차 피해가 발생할 우려가 있다 [4-6].

전력전송을 위한 설비 중 케이블은 한 지점과 지점을 연결하는데 필수적인 요소로[7-9] 사용된다. 단락 및 지락과 같은 고장이 빈번히 발생할 경우 고장전류에 의해 케이블이 열화되어 초기의 특성을 유지하지 못하고 성능이 저하되며, 케이블 화재 사고의 원인으로 작용된다. 이와 같은 이유로 과도상태에서 전기적 특성변화의 분석 필요성과 안정적인 전력 공급을 위한 케이블의 신뢰성을 확보할 필요성이 증가하고 있다. 하지만 기존의 연구결과는 연소 측면에서 외부화염에 의한 케이블의 소손과 고전압 측면에서의 절연 파괴에 초점을 두고 연구가 수행되어 왔으며, 일부 논문은 경우 실험적 방법을 이용한 과도상태에서 케이블의 거동에 관한 연구를 수행하였으나, 수치해석을 통한 정량적인 결과 도출이 미비하였다.

본 연구에서는 소방용 비상 전원장치나 스프링클러·옥내 소화전설비·배전설비의 배선 등 소방설비의 전원 공급에 사용되는 0.6/1kV TFR-8(Tray Flame Retardant wire for fire service) 케이블의 전기적 특성변화를 분석하기 위한 기초 연구로서 케이블에 사용되고 있는 구리심선의 통전전류에 따른 온도 및 저항변화에 대한 실험을 실시하였으며, 실험결과와 신뢰성 확보를 위해 FEM 수치해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 실험구성 및 방법

실험은 IEC 60332-3 VTFT(Vertical Tray Flame Test) 난연불꽃시험을 만족한 저독성(케이블 연소 시 유독가스 및 부식성가스 발생 극소화), 저연성(케이블 연소 시 연기 발생 극소화)인 0.6/1kV TFR-8 트레이용 난연 내화케이블의 구리심선 1개에 대해 절연 및 비 절연 상태에서 수행하였다. 실험에 사용된 TFR-8 케이블의 사양은 표 1에 나타내었다.

그림 1은 실험에 사용되어진 Sample holder이며, 구

리심선의 총 길이는 240mm이다. 구리심선 및 주변의 온도변화를 측정하기 위해 K-type 열전대를 부착하였으며, 통전전류에 따른 저항변화를 측정하기 위해 구리심선의 양 끝단에 전압 탭을 부착하였다.

표 1. TFR-8 트레이용 난연 내화케이블의 사양
Table 1. Specifications of the TFR-8 cable

TFR-8 cable	Parameters
심선	3ea
공칭단면적(심1개에 대한)	2.5sq
소선수	7ea
소선의 지름	0.67mm
도체저항	7.41ohm/km
정격전류	32A(Air)
운용온도 범위	-15~60℃

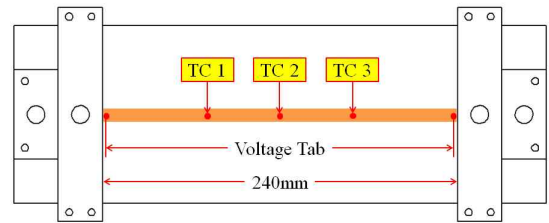
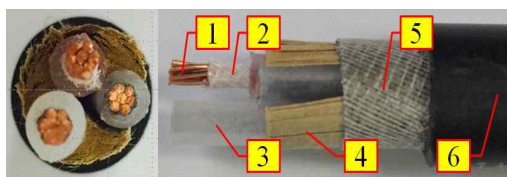


그림 1. 샘플홀더
Fig. 1. Sample holder

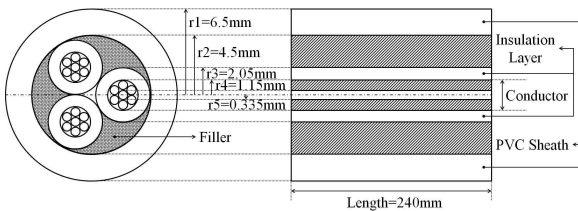
그림 2는 실험에 사용된 소방전원공급을 위한 TFR-8 트레이용 난연 내화케이블의 구조이다. 그림 2 (a)에서 1은 전류가 흐르는 구리도체, 2는 화재로부터 도체층을 보호하기 위해 mica tape로 구성된 내화층, 3은 가교 폴리에틸렌 절연층(XLPE; cross-linked polyethylene), 4는 케이블의 형태를 일정하게 유지하기 위한 충진제(filler), 5는 mica tape로 구성된 내열층(heat retardant layer), 6은 난연성(flame-retardance) PVC(polyvinyl chloride) 시스로 구성되어 있다. 그림 2 (b)는 케이블의 구체적인 치수를 나타내고 있다.

그림 3은 실험을 위한 하드웨어 구성도이다. 과전류 통전을 위해 Agilent 6681A 대용량 직류전원 공급장치 2개를 병렬로 연결하여 1.2kA/8V까지 통전할 수 있도록 구성하였다. 데이터의 측정 및 직류전

원 공급장치의 제어는 National Instruments의 LabVIEW 프로그램과 SCXI 시스템을 사용하였으며, 전류 측정은 shunt resistor (1000A/50mV)를 회로에 직렬로 연결하여 측정하였다. 실험은 상온 18~20℃에서 수행하였으며, 통전전류는 20A부터 최대 160A까지 10A씩 단계적으로 전류를 증가시켜 온도 및 저항변화를 측정하였다. 구리심선에 통전되는 전류의 증가는 온도가 증가하지 않는 포화상태에서 실시하였다.



(a)



(b)

그림 2. TFR-8 트레이용 난연 내화케이블의 구조
Fig. 2. Construction of the TFR-8 cable

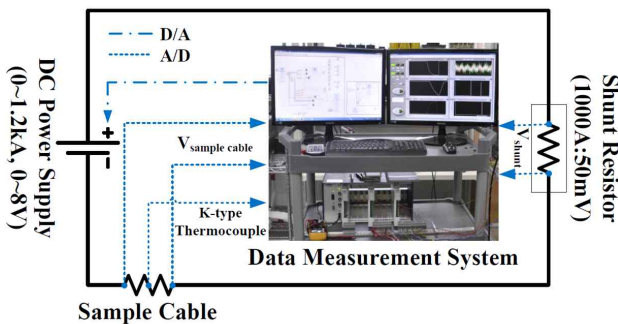


그림 3. 하드웨어 구성도
Fig. 3. Hardware setup

2.2 시뮬레이션 방법

실험결과의 타당성을 확보하기 위해 FEM(Finite

Elements Method) 유한요소 수치해석 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 열전달 지배방정식은 수식 (1)과 같다.

$$-n \cdot (-k \nabla T) = h(T_1 - T_2) \quad (1)$$

수식 (1)에서 k [$W/m \cdot K$]는 물질의 열전도계수, h [$W/m^2 \cdot K$]는 대류 열전달계수, n 은 경계의 방향벡터, T_1 은 외부온도, T_2 는 구리심선의 온도를 의미한다. 실험에 사용된 구리심선의 형상과 도체의 열전도계수, 저항, 실온 값을 수치해석 파라미터로 고려하였다. 실험실 내부의 대류 열전달계수 값을 측정할 수 없으므로 일반적으로 열역학에서 사용하고 있는 실내의 대류 열전달계수 값을 기준으로 10~50 사이의 값을 사용하여 해석을 수행하였다. 표 2는 기체의 대류 열전달계수 값을 나타내고 있으며, 그림 4는 FEM 수치해석 모델이다.

표 2. 대류 열전달계수
Table 2. Convection heat transfer coefficient

Convection	$h(W/m^2 \cdot K)$
자유대류 : 기체	2~25
강제대류 : 기체	25~250

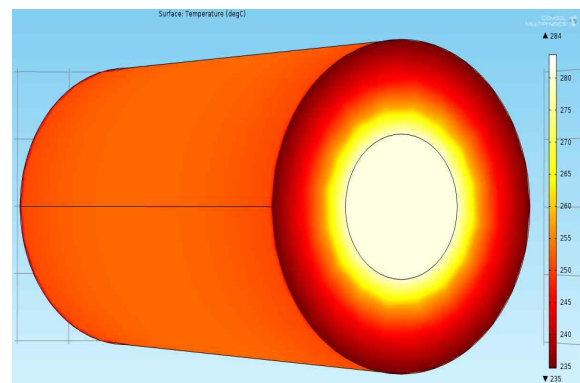


그림 4. 유한요소 수치해석 모델
Fig. 4. FEM analysis model

2.3 실험 및 수치해석 결과

그림 5와 그림 6은 구리심선의 통전전류 증가에 따

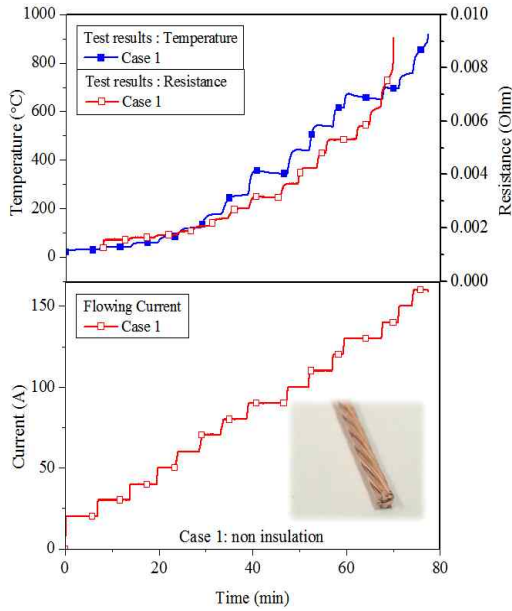


그림 5. 전류 증가에 따른 온도와 저항 변화 실험결과 (비절연)
 Fig. 5. Test results of temperature and resistance variation by increasing current (non-insulation wire)

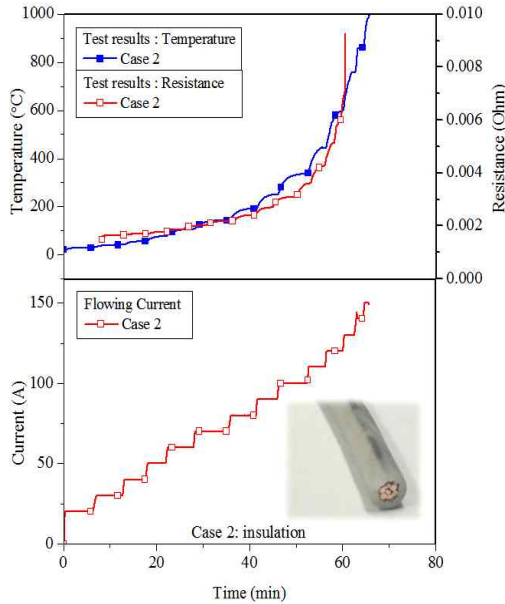
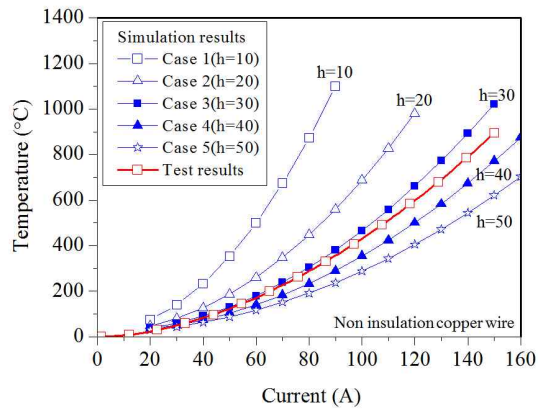
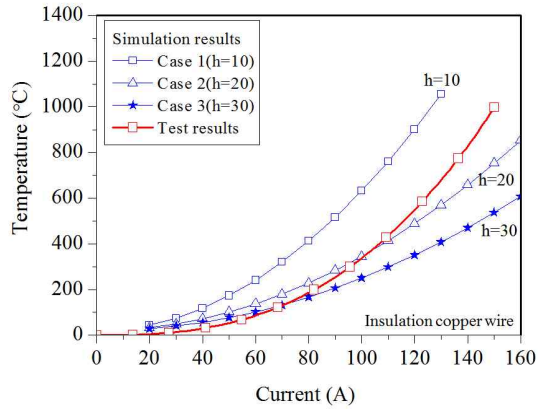


그림 6. 전류 증가에 따른 온도와 저항 변화 실험결과 (절연)
 Fig. 6. Test results of temperature and resistance variation by increasing current (insulation wire)

른 온도와 저항변화 특성을 나타내고 있다. 그림 5는 비 절연 상태, 그림 6은 절연 상태의 실험결과이다. 구리심선에 통전되는 전류가 증가함에 따라 온도와 저항 값은 증가하며, 온도와 저항변화의 기울기가 유사함을 확인할 수 있다. 그림 5의 온도와 저항변화의 기울기는 비교적 선형적이지만, 그림 6의 온도와 저항변화의 기울기는 약 100°C 이상에서 기울기가 급격히 변화하였으며, 이는 절연물의 연소가 시작되는 시점으로 온도가 급격히 증가함에 따라 저항도 증가하는 것을 확인하였다.



(a) Non insulation copper wire



(b) Insulation copper wire

그림 7. 실험 및 시뮬레이션 결과 비교
 Fig. 7. Comparison of simulation and experimental results

그림 7은 절연 및 비 절연 상태에서 대류 열전달계수에 따른 FEM 수치해석 및 실험결과의 비교 그래프

이다. 그림 7 (a)는 비 절연 상태의 구리심선, 그림 7 (b)는 절연 상태 구리심선의 실험 및 시뮬레이션 비교 결과이다. 실험 결과와 대류 열전달계수에 따른 시뮬레이션 결과를 비교하여 구리심선에 작용된 대류 열전달계수 값을 확인할 수 있었다. 대류 열전달계수 값이 커질수록 통전전류에 의한 온도상승 기울기가 완만해졌으며, 이는 대류 열전달계수 값이 커질수록 대류에 의한 냉각효과가 증가하는 것을 의미한다. 그림 7 (b)에서 절연된 구리심선의 시뮬레이션 온도변화 기울기가 비 절연된 구리심선의 시뮬레이션 온도변화 기울기보다 완만하다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 절연물의 유무에 따른 표면적 차이에서 발생하는 현상이다.

그림 8은 전류증가에 따른 절연 및 비 절연 구리심선의 실험결과 비교 그래프이다. 절연된 구리심선의 온도가 비 절연된 구리심선의 온도보다 동일 통전전류에서 낮게 측정되었다. 그 이유는 절연물에 의해 구리심선의 표면적이 넓어 열의 방출이 비교적 원활하며, 방출되어야 할 열 에너지가 절연물의 발화에너지로 사용되었기 때문이다. 하지만 절연물이 연소하여 약 700°C 이상 온도가 상승하게 되면 절연된 구리심선의 온도가 비 절연된 구리심선의 온도보다 높아진다. 절연된 구리심선의 온도가 약 100°C를 초과하면서부터 온도변화 기울기가 비선형적으로 증가하는 경향을 나타내며, 비 절연된 구리심선의 온도변화 기울기는 약 50°C 이후 비교적 일정한 기울기를 유지하고 있다. 통전 전류의 증가에 따른 저항변화 기울기도 온도변화 기울기와 유사한 형태를 나타내며, 절연 및 비 절연 상태의 구리심선은 도체의 재질과 공칭단면적이 동일하기 때문에 최종 저항 값에는 큰 차이가 발생하지 않았다.

그림 9의 (a), (b), (c)는 비 절연 상태의 구리심선, (d), (e), (f)는 절연 상태의 구리심선을 과전류에 의한 온도 및 상태변화를 나타낸 것이다. 그림 9 (b)는 통전 전류 100A를 비 절연된 구리심선에 인가했을 때의 모습이며, 탄화되어 검게 변한 수열 변색흔을 확인할 수 있다. 이때 구리심선의 온도는 478°C이다. 그림 9 (c)에서는 150A에서 160A로 통전전류 값을 증가시킨 후 수 초 이내에 적열현상과 함께 단선된 모습이며, 이때 구리심선의 온도는 910°C로 측정되었다. 그림 9 (e)는

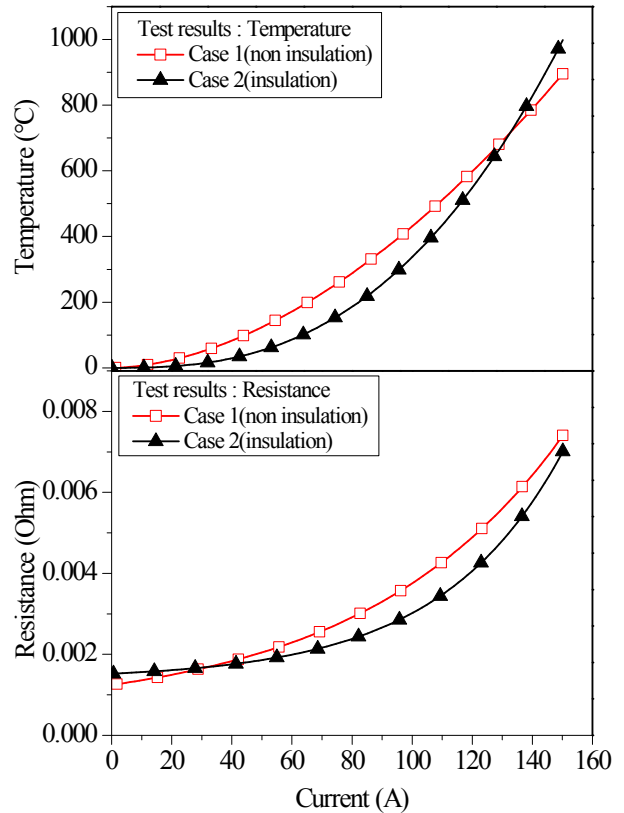


그림 8. 전류 증가에 따른 절연 및 비 절연 구리심선의 비교결과

Fig. 8. Comparison results of the insulation and non insulation copper wires by increasing current

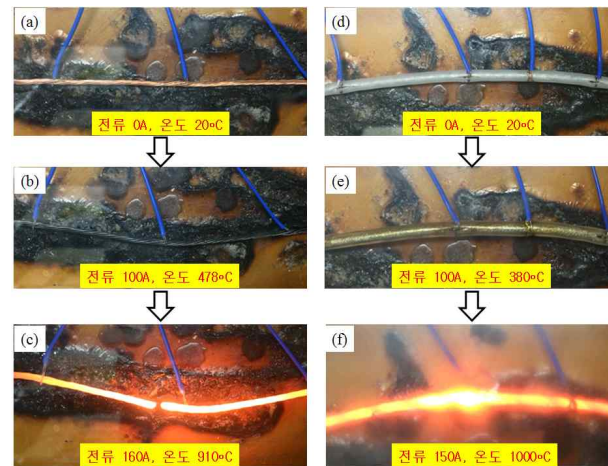


그림 9. 과전류에 따른 구리심선의 온도 및 상태변화
Fig. 9. Temperature and condition variation caused by over current

통전전류 100A를 절연된 구리심선에 인가했을 때의 모습이며, 누렇게 변색되는 피복의 탄화 진행과정을 확인할 수 있다. 이때 구리심선의 온도는 380°C로 측정되었다. 그림 9 (f)는 140A에서 150A로 통전전류 값을 증가 시킨 후 단선이 일어나기 직전의 모습이며, 구리심선의 온도는 1000°C로 측정되었다. 구리심선의 절연물은 탄화되었으며, 적열현상을 확인할 수 있었다. 그림 9 (b)와 (e)를 비교했을 때 절연되지 않은 구리심선과 절연된 구리심선에 동일한 100A의 전류 통전 시 절연된 구리심선의 온도가 절연되지 않은 구리심선에 비해 약 98°C 정도 낮은 것을 확인할 수 있으며, 이는 과전류에 의해 생성된 열에너지의 일부가 절연물의 발화에너지 축적에 사용되었기 때문이다.

그림 10 (a)는 절연물을 제거한 구리심선의 단선된 모습을 Dino-Lite의 디지털 현미경(AD 7013MZT)을 이용하여 50배율로 촬영한 것이며, 7개의 소선이 용융되어 하나로 뭉쳐진 모습을 확인할 수 있다. 그림 10 (b)는 구리심선의 절연물이 탄화되어 사라진 곳과 사라지지 않은 곳의 경계를 디지털 현미경을 이용하여 50배율로 촬영한 것이다. 이 부분은 7개의 소선이 용융되지 않아 하나로 합쳐지지 않았으나, 중앙의 단선이 발생한 부분에서는 용융되어 7개의 소선이 하나로 뭉쳐진 모습을 확인하였다.



그림 10. 현미경 사진 (50x)
Fig. 10. Microscope image (50x)

3. 결 론

소방설비의 전원공급용으로 사용되고 있는 0.6/1kV TFR-8 케이블(트레이용 난연 내화케이블)의 과전류에 의한 전기적 특성변화를 분석하였다. 케이블에 사용되고 있는 구리심선 1개에 대한 절연 및 비 절연 상태에서 통전전류 크기에 따른 온도 및 저항변화의 실험 및 수치해석을 수행하였다.

물리·화학적, 전기적 요인 등에 의해 케이블 열화가 발생하여 기존의 특성을 유지하지 못하고 절연능이 저하되거나 접촉 불량 및 소선의 단선 등으로 인해 케이블의 저항이 증가하게 되면, 케이블의 온도가 상승하여 케이블 트레이 등에서 열 축적이 발생, 발화점까지 온도가 상승하여 화재로 발전 될 가능성이 있을 것으로 사료된다.

향후 3심 TFR-8 케이블에 대하여 과전류 크기 및 통전시간, 통전상태에서 외부화염이 가해진 조건에서의 단선실험과 수치해석을 통해 보다 정량적으로 케이블 전기화재에 관한 연구를 수행할 예정이다. 본 연구를 통해 케이블 전기화재 사고 발생 위험 지역을 모니터링하여 화재 발생 전 이상 현상을 조기에 발견할 수 있는 시스템을 구축할 예정이다.

References

- [1] National Emergency Management Agency, "National Fire Data System," <http://www.nfds.go.kr>.
- [2] S. C. Kim, J. Y. Kim, and K. S. Bang, "Experimntal study of fire characteristics of a tray flame retardant cable," *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 28, no. 3, pp.39-43, 2013.
- [3] H. K. Kim, D. O. Kim, and C. S. Choi, "Thermal characteristics analysis of PVC insulated flexible cords deteriorated according to over current," *KIFSE Autumn Annual Conference*, vol.2003, no.10, pp.105-111, 2003.
- [4] S. H. Hong, and M. S. Choi, "A experimental study on the fire hazard analysis for communication cable in buildings", *Journal of the Korean Society of Safety*, vol. 26, no. 6, pp.20-25, 2011.
- [5] S. M. Park, W. H. Kim, and M. O. Yoon, "Experiments on the behavior of underground utility cable in fire", *Journal of Korean Institute of Fire Science Engineering*, vol. 16, no. 2, pp.75-80. 2002.
- [6] H. P. Kim, H. R. Kim, Y. J. Park, and S. S. Keum, "A study on the flame retardancy according to the aging of

power cables”, KIFSE Autumn Annual Conference,, vol. 2010, no. 10, pp.358-361, 2010.

- [7] S. H. Lee, J. S. Kim, and H. S. Oh, “A study on the identification of electrical fire focused on distance analysis of electrical wires by overcurrent”, Journal of Korean Institute of Fire Science Engineering, vol. 18, no. 2, pp.7-11, 2004.
- [8] C. J. Kim, Y. H. Rho, “Characterization of spark signal of electric fire”, KIEEE Autumn Annual Conference, vol. 1997, pp.55-59, 1997.
- [9] S. H. Lee, and H. S. Oh “A study on the electrical fire analysis in overcurrent of low voltage wiring”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 18, no. 3, pp.142-148, 2004.

◇ 저자소개 ◇



김병조 (金炳助)

1990년 6월 18일생. 2013년~현재 대전대학교 소방방재학과.

Tel : (042)280-2764

E-mail : vendescent@naver.com



김재호 (金載浩)

1976년 11월 17일생. 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업(박사). 2009~2012년 Center for Advanced Power Systems (CAPS) at Florida State Univ. 박사 후 연구원. 2012년~현재 대전대학교 소방방재학과 조교수.

Tel : (042)280-2593

E-mail : jkim@dju.ac.kr