

과전류에 의해 스트레스 받은 전선의 특성 해석기법

최 충 석

한국전기안전공사부설 전기안전시험연구원 화재연구팀장 / 공학박사

1. 머리말

인간의 활동범위가 다양해지고 생산성 향상을 위한 복합기기의 사용빈도가 많아짐에 따라 일반 가정에서도 설비 용량이 증가하고 있는 것이 현실이다. 전압은 일정한데 소용량 기기를 하나의 콘센트에 여러 대 연결하여 사용하는 경우 설계용량 초과, 접촉불량, 사용빈도 증가에 따른 국부적인 소손 등이 발생할 가능성은 상대적으로 높아진다. 이런 원인을 조기에 차단하지 못하여 발생한 대표적인 사고가 화재이며 이것을 전기화재(Electric Fire)라 부른다. 전기설비의 결함에 의해 발생한 전기화재는 일반화재에 비해 화염의 확산 속도가 빠르고 경제적 손실도 크다.

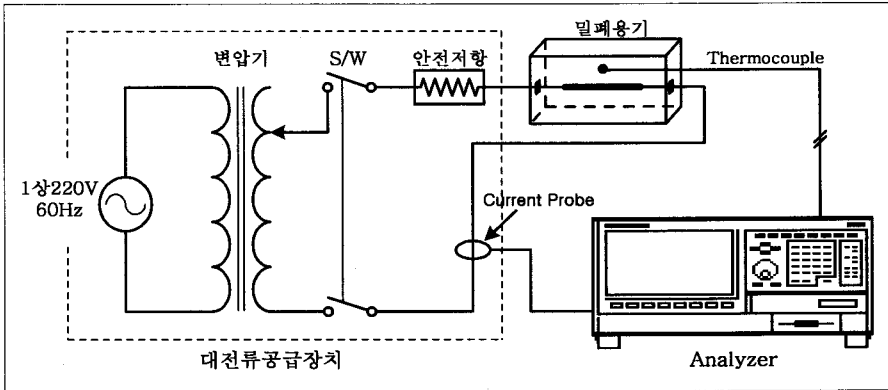
화재통계에 의하면 2000년 화재건수는 3만 4844건이며 이중 전기화재가 차지하는 비중은 33.9%로 1만 1203건을 나타냈다. 전기화재의 발화 원인을 살펴보면 합선, 과부하, 누전, 접촉부 과열, 스파크, 절연 열화 및 정전기 등에 의한 것을 들 수 있다. 과부하에 의해 전선에 허용전류 이상으로 전류가 흐르게 되면 전선 도체의 발열 작용(Joule's heat)에 의해 피복이 열화(劣化 : deterioration)되어 선간 단락, 지락에 의한 사고, 감전사고 등의 전기재

해를 유발하게 된다. 특히, 전기로 인한 과열현상은 사용조건에 따라 소손형태도 경우의 수로 나타난다. 즉 전기기기는 사용 목적에 따라 다양한 방법으로 열을 발생시키므로 사고가 발생한 기기의 조사 역시 열을 발생시킨 과정을 역으로 추적하여 분석하는 것이 중요한 조사의 요점(check point)이다.

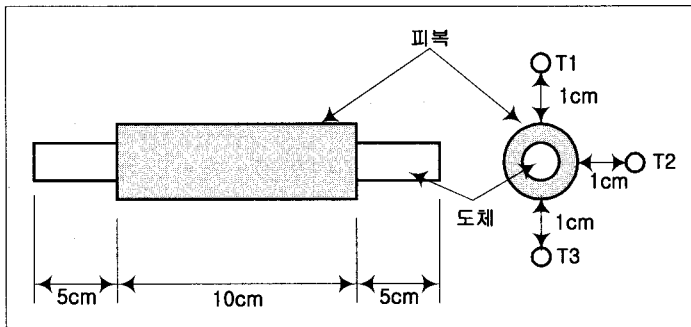
따라서 본 연구에서는 옥내 배선으로 주로 사용되는 옥내용 비닐절연전선(600V IV, 1.6mm)이 과전류(over current)에 의해 스트레스를 받으면 어떤 변화를 보이며 어떻게 원인을 분석하여 재해를 예방할 수 있는지에 대해서 논하고자 한다.

2. 실험 방법

과전류에 의한 전선 피복의 열화 특성을 해석하기 위해 그림 1의 실험회로와 같이 대전류공급장치(ODEN 1X, Programma, Sweden)를 이용하여 전선에 과전류를 인가하였다. 과전류에 따른 전선 주위의 온도변화 측정은 실시간(Real Time) 기록계(AR 1100A, Yokogawa, Japan)를 이용하였으며, 그림 2와 같이 3곳에 열전대를 설치하였다. 또한, 과전류에 의한 전선 피복의 열화과정



〈그림 1〉 전선의 과전류 인가 실험 회로



〈그림 2〉 온도 측정을 위한 열전대의 위치

을 4단계로 구분하여 실제 현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 주사전자현미경(SEM, JSM-6400, Jeol,

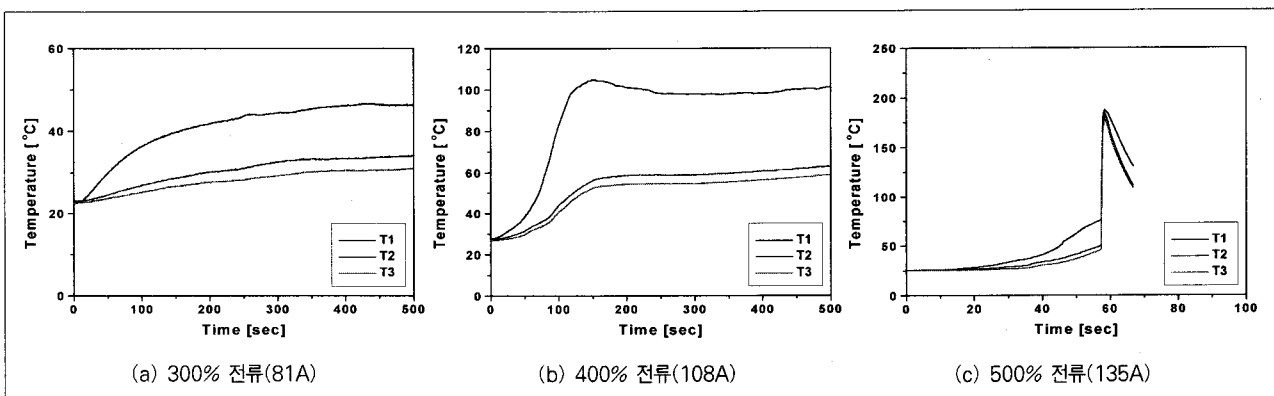
Japan)을 이용하여 표면상태와 구조를 분석하였다.

3. 결과 및 분석

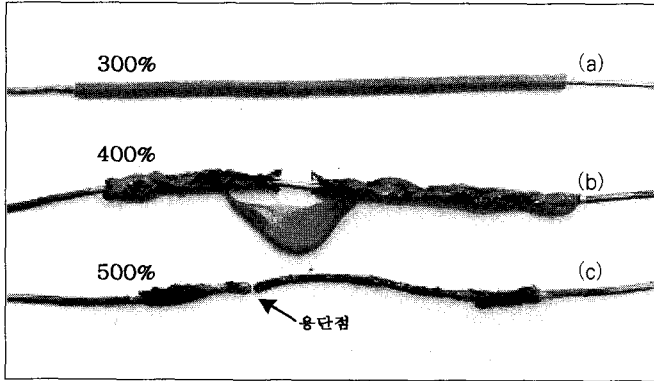
그림 3은 옥내용 비닐절연전선(600V IV, 1.6mm)에 전선 허용전류의 300%, 400%, 500%에 해당하는 각각의 전류를 500sec 동안 인가하여 전선 주위의 온도변화를 분석

한 것이다. (a)는 300% 전류(81A)를 흘렸을 때 전선 주위의 온도변화를 나타낸 것으로 T₁은 최고 46.7°C, T₂는 34.1°C, T₃은 30.9°C까지 상승했으며, 3점간의 최고 온도차는 15.8°C를 보였다. (b)는 400% 전류(108A)가 흘렸을 때 전선 주위의 온도변화로 T₁은 최고 105.4°C, T₂는 62.9°C, T₃은 59.1°C까지 상승했다. 3점간의 최고 온도차는 46.3°C를 보였다. (c)는 500%의 전류가 공급되었을 때의 온도변화를 나타낸 것

으로 급격한 열로 주위 온도가 순간적으로 상승하며, T₁은 최고 187.4°C, T₂는 184.8°C, T₃은 180.0°C까지 상승



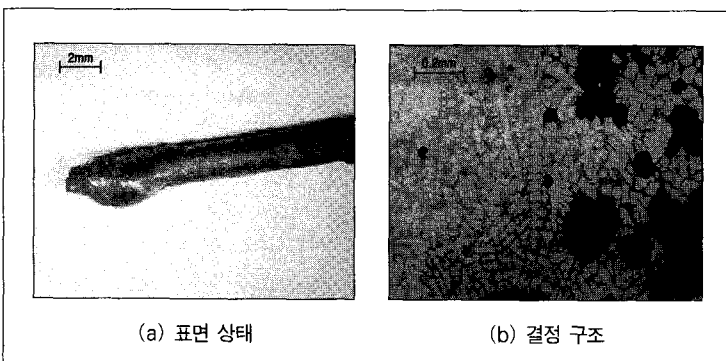
〈그림 3〉 과전류에 따른 전선의 주위 온도 변화



〈그림 4〉 과전류에 따른 전선 피복의 열화

했다. 3점간의 최고 온도차는 7.4°C로 전체가 균일하게 축열되었다는 것을 알 수 있다.

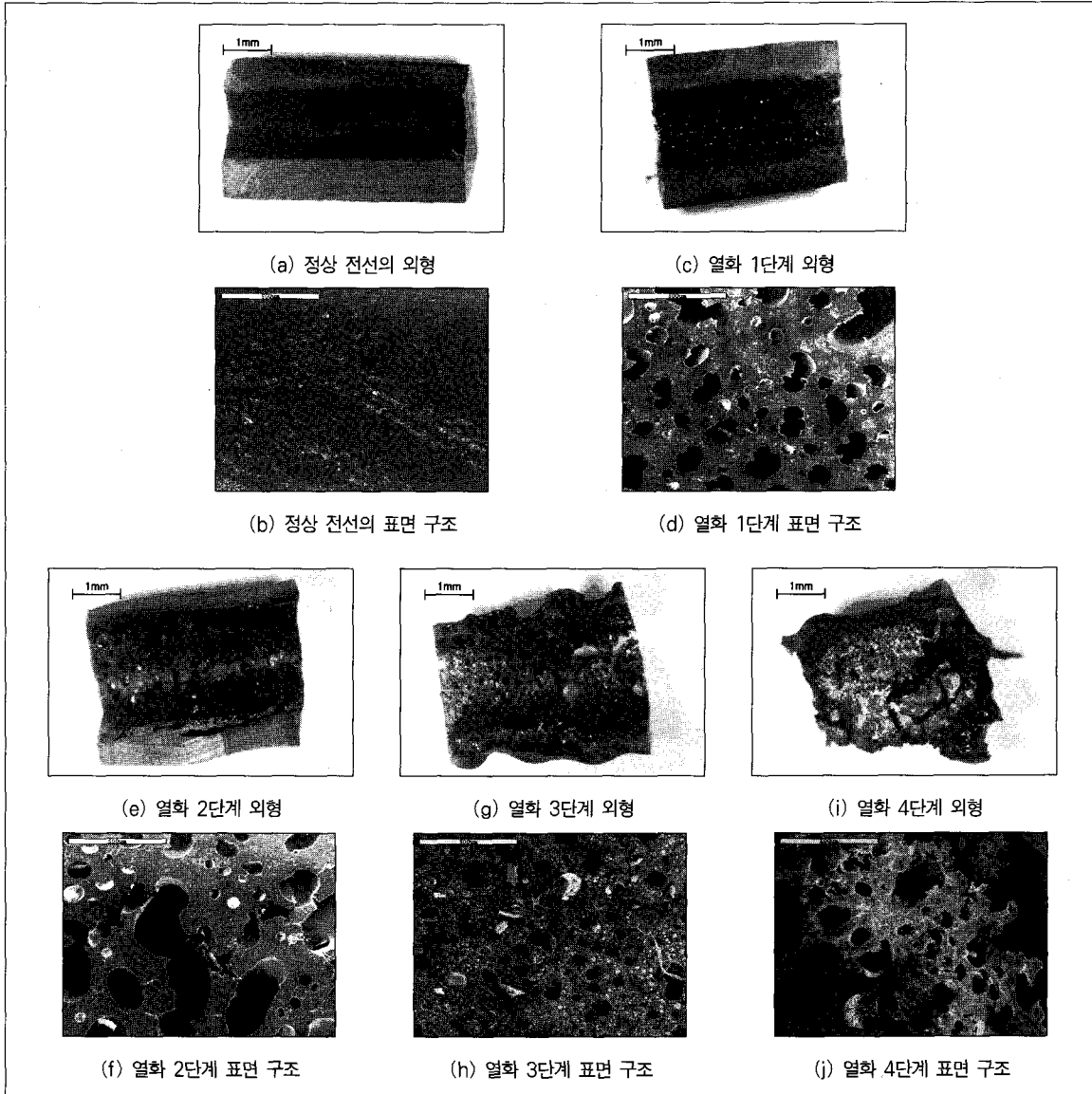
그림 4는 전선의 열화 상태를 나타낸 실체 사진이다. (a)는 300%의 과전류가 흘렀을 때의 사진으로 전선 피복에서는 흰 연기가 발생하였으며, 양 끝단이 약간 변형되기 시작하였다. (b)는 400%의 과전류가 흘렀을 때의 현상으로 전선 피복이 심하게 용융 및 탄화되고 많은 연기가 발생하였으며, 전선의 도체가 붉게 발열하였다. (c)는 500% 전류(135A)가 흘렀을 때 전선 주위의 온도 변화로 전선 도체가 붉게 발열하였으며 전류인가 후 54초 정도 경과하였을 때 도체가 용단되었다.



〈그림 5〉 과전류 용단 전선의 표면 상태와 결정 구조

그림 5는 정격전류의 5배가 흘렀을 때 용단된 전선의 표면상태와 단면의 결정구조를 분석한 것이다. (a)는 실체 현미경에 의한 외형 사진으로 전선 도체 끝 부분에 용융흔(molten mark)이 형성됨을 볼 수 있다. (b)는 금속 현미경을 이용하여 단면의 구조를 분석한 것으로 전선 본래의 연신 구조(elongation structure)가 없어지고 과전류에 의해서 용단된 전선에서 볼 수 있는 변형된 수지상 구조(樹枝狀構造; dendritic structure)를 볼 수 있다.

그림 6은 정상 전선의 피복과 과전류를 인가했을 때 전선 피복의 열화 진행과정을 실체 현미경과 SEM을 이용하여 분석하였다. (a)와 (b)는 정상상태의 전선 피복으로 표면이 고르고 매끈한 상태를 보인다. (c)와 (d)는 전선 피복에서 미세하게 연기가 발생하는 열화 1단계(약 110°C)로 피복 외부에는 변화가 없었으며, 전선 도체와 접촉하는 피복 내부에 작은 홀(hole)들이 형성됨을 볼 수 있었다. 이는 전선 피복의 주재료인 염소의 탈염화 작용에 의한 것으로 내부에서부터 열화가 진행됨을 알 수 있다. (e)와 (f)는 전선 피복이 부풀어오르고 연기가 발생하는 열화 2단계(약 165°C)로 전선 피복이 부풀어올랐으며, 피복이 2개의 층(double layer)으로 분리되었다. 전선 도체와 접촉하는 피복은 그물모양을 나타내며 이는 피복의 탈염화 작용과 탄화 현상이 동시에 이루어졌기 때문으로 판단된다. (g)와 (h)는 전선 피복이 심한 연기를 발생하면서 용융되는 열화 3단계(약 210°C)로 전선 피복이 급격하게 용융 및 탄화되었다. (i)와 (j)는 피복이 용융하여 이탈하는 열화 4단계(약 230°C)로 전선 피복이 전선 도체에서 이탈하기 시작했으며 전선 도체와 접촉한 피복은 심하게 변색되었다. 표 1은 옥외용 비닐절연전선(600V IV)의 과전류에 따른 전선 피복의 열화 상태를 단계별로 나타낸 것이다.



〈그림 6〉 옥내용 비닐절연전선의 과전류에 의한 열화 과정

〈표 1〉 과전류에 의한 옥내용 비닐절연전선의 열화 단계 및 피복의 형태

구 분	전선 피복의 변화 형태
정상 전선	전선 피복의 내·외부 모두가 매끄러운 상태
열화 1단계	전선 피복의 내부에서 연기 발생 및 작은 구멍이 생성(탈염화 작용)
열화 2단계	전선 피복이 두 개의 층으로 분리되며 내부는 그물모양의 구조
열화 3단계	전선 피복이 융융되고 다량의 연기가 발생하며 탄화가 심하게 진행됨
열화 4단계	전선 피복이 도체로부터 이탈하며 내부 절연물이 완전히 탄화됨

4. 맺음말

옥내용 비닐절연전선(600V IV)에 과전류를 인가하여 전선의 열화 특성을 단계별로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 과전류에 따른 전선 주위의 온도 변화를 분석한 결과 300% 전류에서는 최고 46.7°C까지 상승하였고, 400% 전류에서는 최고 105.4°C까지 온도가 상승하였다. 또한, 500%의 전류가 공급되었을 때 180.0~187.4°C까지 상승했다. 즉 과전류의 증가에 따라 급격한 온도 상승을 알 수 있고 시간이 길어지고 축열이 잘릴 경우 사고의 발생 빈도는 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다.

(2) 과전류 인가에 따른 전선의 특성 변화를 분석한 결과 300%의 과전류가 흘렀을 때 흰 연기가 발생하고 양 끝단이 약간 변형되었다. 400%의 과전류가 흘렀을 때

전선 피복이 심하게 용융 및 탄화되고 많은 연기가 발생하였고, 전선의 도체가 붉게 발열하였다. 500%의 전류(135A)가 흘렀을 때 전선 도체가 붉게 발열하였으며 전류 인가 후 54초 정도 경과하였을 때 전선 도체가 용단되었다.

(3) 정격 전류의 5배가 흘렀을 때 용단된 전선의 단면을 금속 현미경으로 분석한 결과 전선 본래의 연신 구조가 없어지고 수지상 구조로 변형되었다.

(4) 전선이 과부하에 의해 스트레스를 받으면 4단계에 걸쳐 열화가 진행됨을 알 수 있다. 특히, 열화의 1단계(약 110°C)의 경우 전선의 표면은 아무런 변화가 없으나 전선 도체와 접촉하는 피복 내부에 작은 홀(hole)들이 형성됨을 알 수 있다. 따라서 전선이 열적 스트레스에 노출되었는지의 유무를 식별하기 위해서는 절연 피복의 안쪽을 분석함으로써 사고를 예방할 수 있다.

<참고 문헌>

- (1) 한국전기안전공사 'A Statistical Analysis on the Electrical Accident', 10th edition, pp. 8~55, 2001
- (2) 최충석 외 4, 전기화재공학, pp. 149~211, 동화기술, 2000
- (3) 三橋信雄, '絶縁破壊電線の劣化履歴と火災危険について', 日本火災學會誌, Vol. 31, No. 1, pp. 11~19, 1981
- (4) Liu Guicai et al, 'Electrical Failure and Aviation Safety', Proceedings of Asia Pacific Symposium on Safety, Vol. 1, pp. 279~282, 2001
- (5) C. S. Choi et al, 'A Study on the Growing Properties of the Cu₂O according to the Change of Load', Journal of the Korean Institute for Industrial Safety, pp. 47~50, Vol. 16, No. 5, 2001
- (6) 上山 勝, '有機絶縁物の絶縁破壊(トラッキング)による炭化生成物の結晶性について', 科學警察研究所報告, Vol. 28, No. 2, pp. 44~47, 1975
- (7) 최충석 외 2, '열 열화된 600V 2종 비닐절연전선의 특성변화 분석', 대한전기학회논문지, Vol. 49C, No. 1, pp. 8~12, 2001
- Vol. 16, No. 5, pp. 42~45, 2001
- (9) 김홍재 역, 염화비닐수지, 대광서림, pp. 1~2, 1995
- (10) Yosimura et al, 'Research in Japan on the Tracking Phenomenon of Electrical Insulating Materials', IEEE EIM feature article, pp. 8~19, 1997
- (11) C. S. Choi et al, 'Heating Characteristics according to the Mechanical Pressure at the Terminal of Circuit Breaker for Low Voltage', The 29th Int. symposium on Combustion, pp. 68, Japan, 2002