

반복 피로에 의한 전원 코드의 화재위험성

김동욱, 길형준, 김향곤, 최충석
한국전기안전공사 전기안전연구원

The Fire hazard of the wire due to repetition stress

Dong-Ook Kim, Hyoung-Jun Gil, Hyang-Kon Kim, Chung-Seog Choi
Electrical Safety Research Institute

Abstract - 전원 코드에서의 전기재해는 외부의 기계적 피로에 의해 피복이나 피복 내부의 도체가 손상되어 이루어지는 경우가 많다. 특히, 전기청소기, 모발건조기 등 이동용 전기제품에서 잦은 반복 스트레스로 인해 전원 코드에서 단선선에 의한 전기화재가 발생한다. 본 연구에서는 전원 코드에 반복 스트레스를 받았을 때 전선의 소선이 손상되는 과정을 X-ray를 이용하여 소손 패턴을 분석하였으며, 단선선에 의한 불꽃 발생과정을 초고속 카메라로 촬영하였다. 또한 소손된 전원 코드를 실제 현미경 및 금속현미경을 이용하여 전선피복과 도체에 나타나는 특징을 분석하였다. 이러한 연구를 통하여 전원코드의 반복 피로에 의한 화재발생 메커니즘과 화재원인 분석에 유용한 자료가 될 것으로 기대된다.

축에 의해 아크를 발생하고 그 아크열에 의해 소선의 끝 부분에 용융망울이 형성된다. 이와 같은 지속적인 반복 스트레스는 결국 심선 전체가 단선되며 큰 아크 불꽃을 발생시킨다. (b)는 전기발송의 전원 코드에 나타난 단선선으로 고정하여 사용한다는 제품 특성 때문에 일부에서 이러한 현상을 발견할 수 있다. 이러한 단선선의 특징은 피복 내부의 소선이 단선된 부분에서 접촉저항이 다른 부분에 비하여 크기 때문에 높은 열을 발생시켜 전기화재를 일으킬 수 있다.

1. 서 론

산업의 발달과 신기술의 개발로 우리의 일상생활을 보다 편리하고 안락하게 해주는 다양한 전기제품이 보급되고 있다. 이들 저압용 전기제품의 전원선으로 일체형 비닐코드가 주로 사용되고 있으며 전원선의 특성상 사용상의 부주의 등 외부적 요인에 의한 전기재해 위험성이 있다[1].

전원 코드에서의 전기재해 발생원인으로 접촉불량, 과부하, 기계적 피로에 의한 소선의 단선, 방열불량 등을 들 수 있다[2-3]. 이중 기계적 피로에 의한 소선의 단선은 제품 불량보다는 사용자의 잘못된 사용과 계속되는 피로 축적에 의해 주로 발생하며 특히, 전기청소기, 헤어드라이어, 선풍기 등 잦은 구부림과 반복적인 인장과 압축을 받는 제품에서 볼 수 있으며, 문틈사이의 배선, 무거운 물건 아래에 놓여 소선이 끊어져 선간단락이나 아크, 누전 등으로 전기재해가 일어나게 된다[4-6].

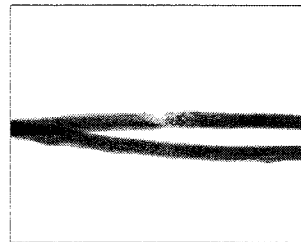
본 논문에서는 반복 피로에 의한 전선의 화재위험성을 실험하였으며, 지속적 피로에 의한 열화진행과정, 각 부위의 소손패턴, 소손된 부분의 외형과 전선도체의 금속조직 등을 분석하였다. 또한, 전원코드의 화재 진전과정 등을 분석하여 일체형 코드의 화재위험성을 규명하였다.

본 연구를 통하여 전원코드의 반복 피로에 의한 화재발생 메커니즘과 화재원인 분석에 유용한 자료가 될 것으로 기대된다.

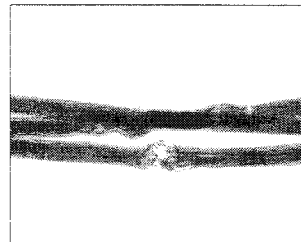
2. 본 론

2.1 사고사례

그림 1은 전기제품을 사용 중 단선선에 의해 화재가 발생한 전원코드로 X-ray를 이용하여 촬영한 사진이다. (a)는 전기청소기 전원선으로 청소기의 특성상 잦은 당김과 감기, 구부림 등에 반복적인 스트레스를 받는 특징이 있다. 청소기에서의 이러한 소선이 끊어지는 단선선 특징은 전원선 전체에서 볼 수 있다. 이러한 이동용 전기제품에서 단선선의 메커니즘은 먼저 끊어진 일부의 소선이 반복 접



(a) 전기청소기 전원선의 소손상태



(b) 전기발송 전원선의 소손상태

그림 1. 반복 피로에 의한 전원선의 사고사례

2.2 실험방법

본 실험에는 220V 비접지형 비닐코드(VCTFK, 0.75mm²×2C)를 사용하였다. 통전 중 반복 피로에 의한 화재 위험성을 실험하기 위해 그림 2와 같은 실험회로를 구성하고 전압조정기(10KVA, Daelim Ele., Korea)를 이용하여 1φ 220V 60Hz의 전압을 전원선에 인가하였으며 안전 저항으로 200W(220V용)의 백열전구를 사용하였다. 그림과 같이 A지점을 θ°씩 상하로 반복해서 구부러 전원선 내부의 소선이 열화 되도록 하였다. 구부림 횟수에 따른 전선내부 소선의 상태와 전원선 각 부위별 소손 상태를 X선 투과 분석장치(Pcba/Analyzer, Phoenix, Germany)를 이용하여 분석하였으며, 고속카메라(HG-100K, Redlake, USA)를 이용하여 소손부위에서의 발화 과정을 분석하였다. 또한, 실제현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)을 이용하여 전원선이 외형과 아크에 의해 생성된 용융흔의 금속조직 등을 분석하였다.

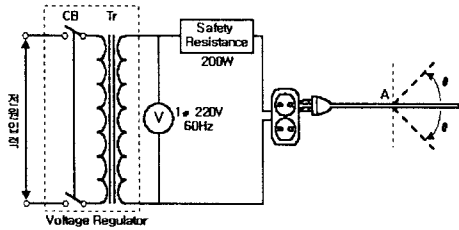


그림 2. 반복 피로에 의한 전원코드 열화 실험회로

2.3 실험결과 및 고찰

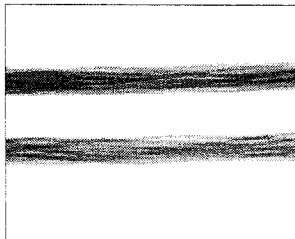
그림 3은 일체형 비닐코드 전원선(0.75mm²×2C)의 구부림 횟수에 따른 전선내부의 심선 상태를 X선 투과 분석장치를 이용하여 분석한 것이다.

(a)는 정상상태로 여러 가닥의 소선들이 나선형으로 감겨있음을 알 수 있다.

(b)는 10회 구부림 것으로 구부린 부분에 약간의 굴곡이 남아있음을 볼 수 있다.

(c)는 30회 구부린 것으로 구부러진 굴곡이 커졌음을 볼 수 있다.

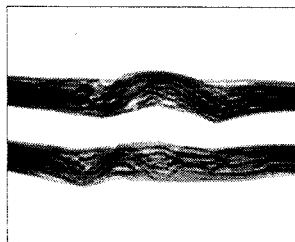
(d)는 50회 구부린 것으로 소선의 일부가 단선되기 시작함을 볼 수 있으며 소선이 한쪽으로 몰려 있음을 알 수 있다. 한번 소선이 단선되기 시작하면 소선의 단선율이 급속하게 커지게 된다. 이러한 상태에서 전류가 흐르게 되면 단선된 소선이 다른 소선과 접촉하여 아크가 발생하고 이 아크에 의해 피복이 탄화되고 주위의 가연물이 존재할 경우 화재로 이어진다.



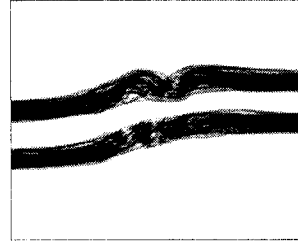
(a) 정상상태



(b) 10회 구부림



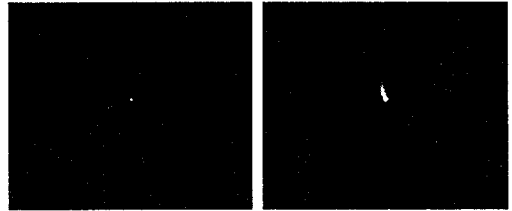
(c) 30회 구부림



(d) 50회 구부림

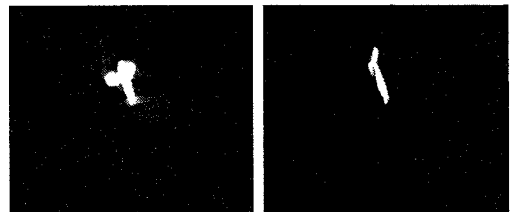
그림 2. 구부림 횟수에 따른 전원코드 내부 소선의 상태

그림 4는 일체형 비닐코드 전원선(VCTFK, 0.75mm²×2C)의 반복 피로에 의한 화재진행 과정을 고속 카메라를 이용하여 분석한 것이다. 진행 과정을 살펴보면, 기계적 피로에 의해 피복 내 소선의 일부가 단선되고 단선된 소선이 서로 접촉하여 아크가 발생한다. 이 아크에 의해 주위 소선이 용단되며 피복을 용융시킨다. 소선의 대부분이 단선되면 전기제품의 전원공급이 불안정해지며 단선된 부분은 개폐기의 역할을 하게 되어 접촉시 아크와 높은 열이 발생하여 피복을 탄화시키고 불꽃이 밖으로 분출하게 된다. 이때 발생한 불꽃은 주위의 가연물을 충분히 착화 가능하며, 또한 선간단락이 발생하면 순간적으로 큰 전류가 흘러 전기화재 등 전기화해를 일으킨다.



(a) step 1

(b) step 2



(c) step 3

(d) step 4

그림 4. 반복 피로에 의한 전원 코드의 화재 진행과정

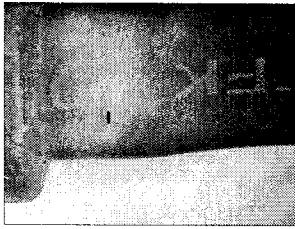
그림 5는 기계적 피로에 의해 전원 코드 내부의 소선이 단선된 것으로 실체현미경과 금속현미경을 이용하여 소선된 전원선의 내·외부와 소선의 외형 및 금속조직을 분석하였다.

(a)는 외부 피복으로 내부에서 발생한 열에 의해 피복에 작은 홀이 형성되었다.

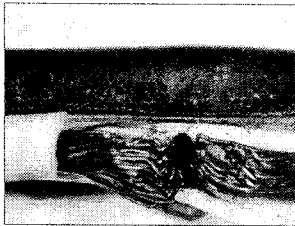
(b)는 전선도체의 상태로 주위의 피복이 검게 탄화되었으며 단선된 소선의 끝부분에 용융흔이 형성됨을 볼 수 있다.

(c)는 단선된 소선의 외형으로 접촉시 발생한 아크에 의해 소선의 끝부분에 용융흔이 형성됨을 볼 수 있으며 소선에는 피복 탄화물이 부착됨을 알 수 있다.

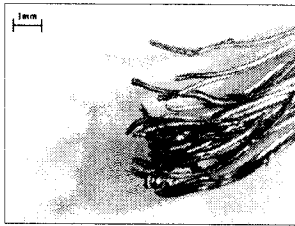
(d)는 (c)의 금속단면조직으로 높은 아크에 의해 형성되는 주상조직을 볼 수 있다.



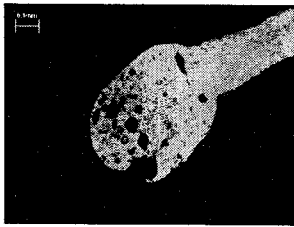
(a) 외부피복



(b) 내부 피복(10배)



(c) 소선의 외형(12배)



(d) 용융혼의 금속조직

그림 5. 소손된 전원 코드의 외형 및 조직 분석

3. 결 론

이상과 같이 반복 피로에 의한 전원 코드의 화재위험성을 실험, 분석하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 정상상태의 전원 코드와 구부림 횟수에 따른 전선 내부의 심선 상태를 X선 투과 분석한 결과, 정상상태의 전원 코드는 여러 가닥의 소선들이 나선형으로 감겨 있었으며, 구부림 횟수가 증가함에 따라 구부린 부분에 약간의 굴곡이 생기기 시작하여 점차 굴곡이 커졌으며, 일부 소선들이 단선되기 시작하였다. 또한, 소선의 단선이 시작되면 단선율이 급속하게 커지게 된다. 이러한 상태에서 전류가 흐르게 되면 단선된 소선과 다른 소선이 접촉하여 아크가 발생하고 피복을 탄화시키며 주위의 가연물이 존재할 경우 화재로 이어진다.

2) 고속카메라를 이용하여 전원이 인가된 상태에서 일체형 비닐코드의 기계적 피로에 의한 화재진행 과정을 분석한 결과, 기계적 피로에 의해 피복 내 소선이 단선되고 단선된 소선이 서로 접촉하여 아크가 발생하였다. 이 아크에 의해 피복이 탄화되었으며 단선된 소선은 개폐기 역할을 하게 되어 접촉시 아크와 높은 열을 발생하여 전선 피복의 탄화를 촉진시켰으며 불꽃이 피복 밖으로 분출하였다. 주위에 가연물이 존재할 경우에는 화재 발생 위험성이 매우 높다.

3) 전원이 공급된 상태에서 소손된 전원 코드의 외형과 소선의 단면조직을 분석한 결과, 외부 피복에는 내부에서 발생한 열에 의해 피복에 작은 홀이 형성되었으며 전선도체 주위의 피복이 검게 탄화되었으며 단선된 소선의 끝부분에 용융혼이 형성되었으며, 소선에는 피복 탄화물이 부착되어 있었다. 소선의 끝부분에 형성된 용융혼의 금속조직을 분석한 결과, 높은 아크에 의해 형성된 주상조직을 볼 수 있었다.

위와 같이 기계적 피로에 의한 전원코드의 화재 위험성을 규명하였으며, 반복적인 구부림이나 인장, 압축을 받는 곳에 사용하는 전원선은 전기화재 등 전기재해의 위험이 있으므로 주기적인 점검과 사용상 주의가 필요하다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, pp.169~211, 2001
- [2] Chung-Seog Choi, "The properties variation of PVC insulated plug damaged by poor contact, Vol. 1, ICPADM pp. 431-434, 2003
- [3] Norimich WATANABE 외 2, "電源コードの半斷線箇所における放電形態と發火危險性", 日本火災學會研究發表會, pp.202~203, 1994
- [4] 長田正義, "素線切れビニルコードの着火電流と流入エネルギー", 日本火災學會, Vol.33 No.1, pp.1~7, 1983
- [5] 金原壽郎, "加熱におけるコード被覆の絶縁劣化", 日本火災學會, Vol.28, No.6, pp.10~13, 1978
- [6] 長田正義 외 1, "ビニルコードの高温劣化と發火特性", 日本火災學會, Vol.33 No.2, pp.25~29, 1983