기계적 피로에 의한 전원 코드의 화재위험성

최충석 · 김향곤 · 송길목 · 김동욱 · 김동우
전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

1. 개 요

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.

일체형 비닐코드에서의 전기재해 발생원인으로 접촉불량, 과부하, 기계적 피로에 의한 소선의 단선, 방열불량 등을 들 수 있다[1]. 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[2)~5)].

본 논문에서는 기계적 피로에 의한 일체형 전원코드의 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 기계적 피로에 의한 화재발생 메커니즘과 화재원인 분석에 유용한 자료가 될 것으로 기대된다.

2. 실험방법

본 실험에는 220V 비접지형 비닐코드(VCTFK, 0.75mm^2×2C)를 사용하였다. 통전 중 기계적 피로에 의한 화재 위험성을 실험하기 위해 그림 1과 같은 실험회로를 구성하고 전압조정기(10KVA, Daelim Ele., Korea)를 이용하여 1ϕ 220V 60Hz의 전압을 전원선에 인가하였으며 안전저항으로 200W(220V용)의 백열전구를 사용하였다. 그림과 같이 A지점을 θ°씩 상하로 반복해서 구부려 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, 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)을 이용하여 전원선이

외형과 아크에 의해 생성된 용융흔의 금속조직 등을 분석하였다.

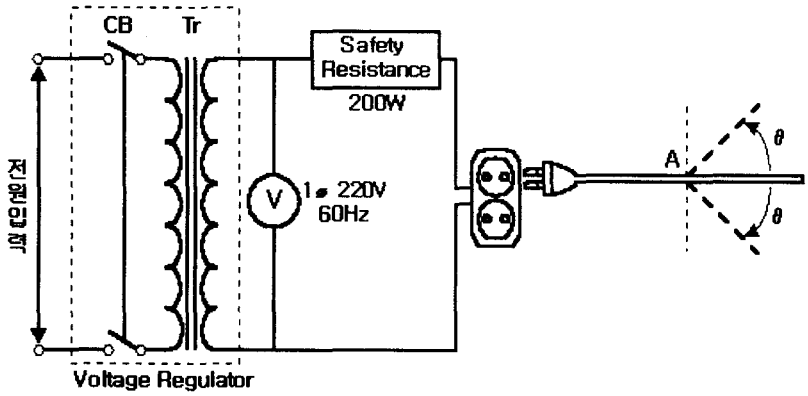


그림 1. 기계적 피로에 의한 전원코드 열화 실험회로

3. 실험결과 및 고찰

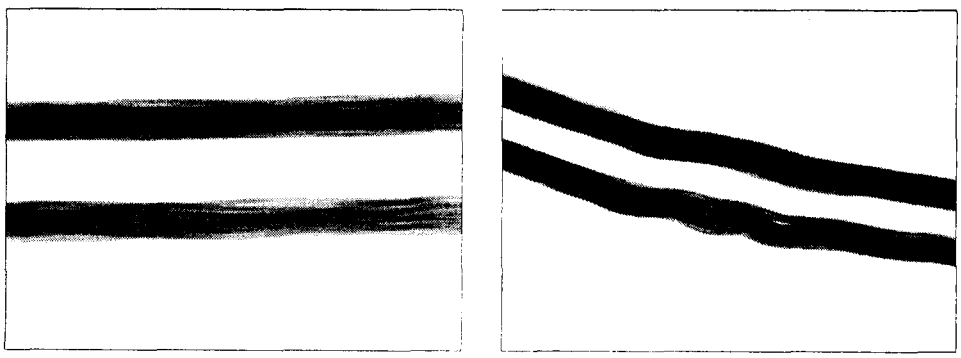
그림 2는 일체형 비닐코드 전원선(0.75mm^2×2C)의 구부림 횟수에 따른 전선내부의 심선 상태를 X선 투과 분석장치를 이용하여 분석한 것이다.

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

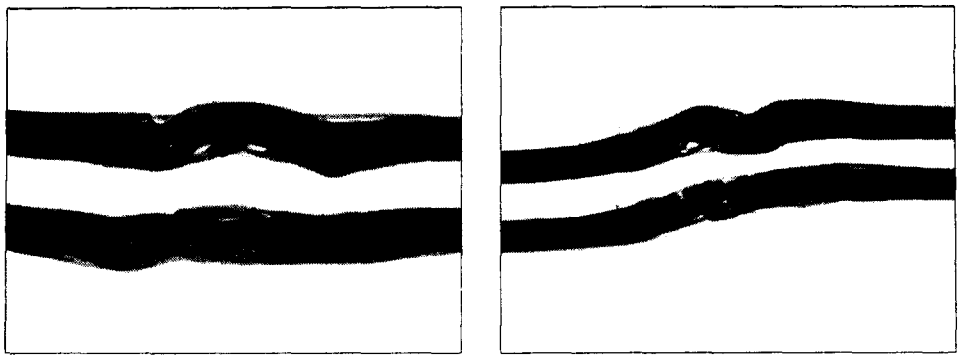
(b)는 10회 구부림 것으로 구부린 부분에 약간의 굴곡이 남아있음을 볼 수 있다.

(c)는 30회 구부린 것으로 구부려진 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



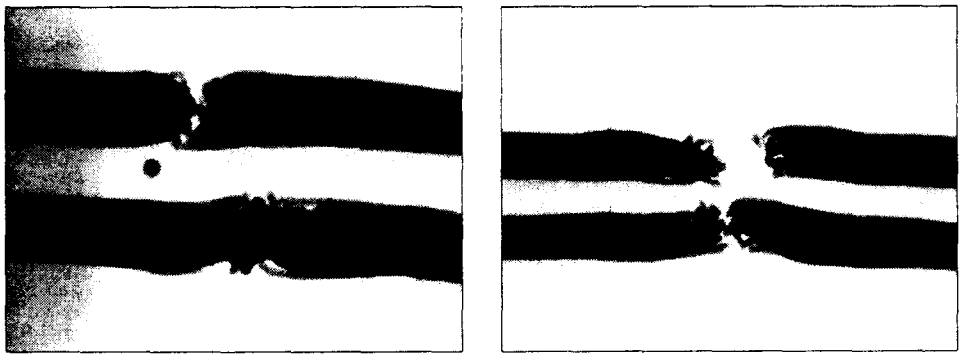
(c) 30회 구부림 (d) 50회 구부림

그림 2. 구부림 횟수에 따른 전원코드 내부 소선의 상태(VCTFK)

그림 3은 각 부위별 기계적 피로에 의한 소선의 소손 특성을 X선 투과 분석한 것이다

(a)는 플러그와 연장코드의 연결부분으로 반복적인 기계적 피로에 의해 소선 전체가 단선됨을 볼 수 있으며 잘려진 소선 조각이 두 가닥의 연선사이에서 발견할 수 있었다. 이 전원선을 전원이 인가된 상태에서 사용하게 되면 단선된 소선끼리 접촉함으로써 아크가 발생하며 이 아크에 의해 주위 소선을 용융시키고, 피복을 탄화시켜 화재로 이어지게 된다.

(b)는 연장코드 부분으로 반복적인 기계적 피로로 소선이 열화되어 단선되었으며 끊어진 부분에 공간(gap)이 있음을 알 수 있다. 이 상태로 전원을 투입하여 사용하게 되면 전원공급이 원활하지 못하게 되고, 일부의 소선만이 접촉한 경우에는 접촉부에서 발생한 열과 아크에 의해 피복이 탄화하여 전기재해가 일어나게 된다.

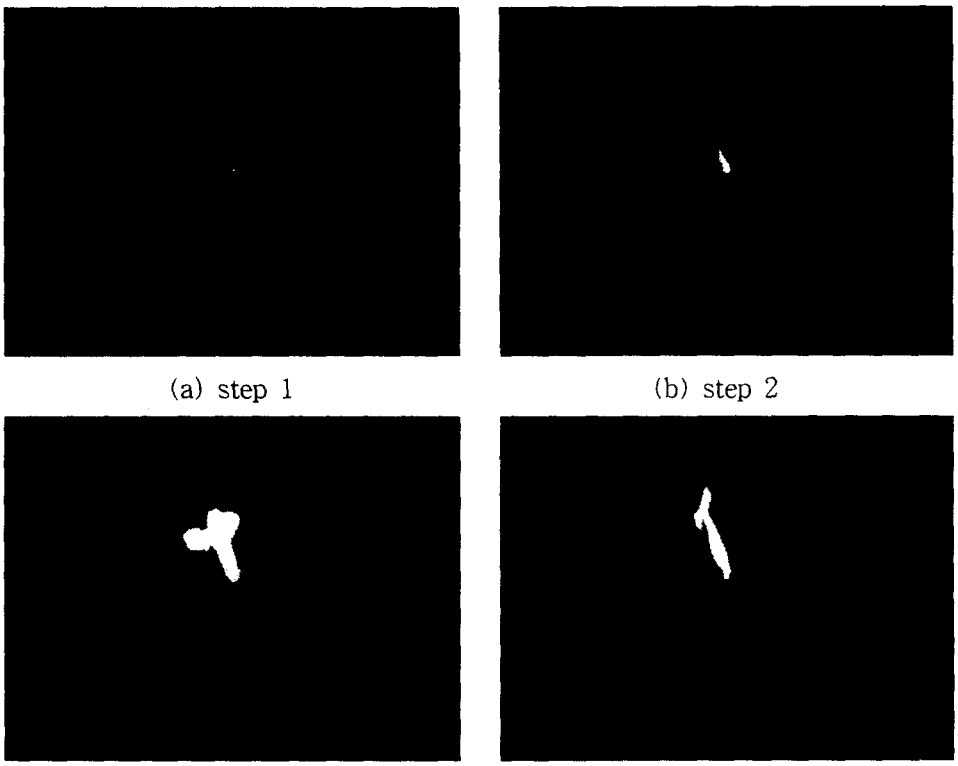


(a) 플러그와 연장코드 연결부위 (b) 연장코드 부위

그림 3. 전원 코드의 부위별 소손 특성(VCTFK)

그림 4는 일체형 비닐코드 전원선(VCTFK, 0.75mm^2×2C)의 기계적 피로에 의한 화재 진행 과정을 고속카메라를 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 전

기제품의 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 전기재해를 일으킨다.



(a) step 1 (b) step 2

(c) step 3 (d) step 4

그림 4. 기계적 피로에 의한 전원 코드의 화재 진행과정(VCTFK)

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

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

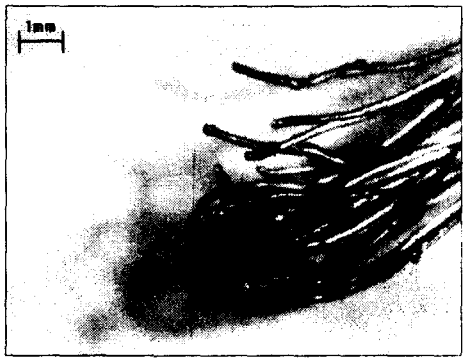
(b)는 전선도체의 상태로 주위의 피복이 검게 탄화되었으며 단선된 소선의 끝부분에 용융흔이 형성됨을 볼 수 있다.

(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



(c) 소선의 외형(12배)

(d) 용융혼의 금속조직

그림 5. 소손된 전원 코드의 외형 및 조직 분석(VCTFK)

4. 결 언

이상과 같이 기계적 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 전원선은 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) 각 부위별 기계적 피로에 의한 소선의 소손특성을 X선 투과 분석한 결과, 플러그와 연장코드의 연결부분에서의 반복적인 기계적 피로에 의해 소선 전체가 단선됨을 볼 수 있으며 잘려진 소선 조각이 두 가닥의 연선사이에서 발견되었다. 또한, 연장코드 부분에서의 반복적인 기계적 피로로 소선이 열화되어 단선되었으며 끊어진 부분에 공간(gap)이

있음을 알 수 있다. 소선이 끊어진 전원선에 전원이 투입되면 전원공급이 원활하지 못하게 되고, 일부의 소선만이 접촉한 경우에는 접촉부에서 발생한 열과 아크에 의해 피복이 탄화하여 전기재해가 일어나게 된다.

3) 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 탄화하였으며 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.

4) 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 용융흔이 형성되었으며, 소선에는 피복 탄화물이 부착되어 있었다. 소선의 끝부분에 형성된 용융흔의 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.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, pp.169~211, 2001
2) 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
3) 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
4) 金原壽郎, "加熱におるコード被覆の絶緣劣化", 日本火災學會, Vol.28, No.6, pp.10~13, 1978
5) 長田正義 외 1, "ビニルコードの高溫劣化と發火特性", 日本火災學會, Vol.33 No.2, pp.25~29, 1983