

비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손패턴 및 화재위험성 분석

김향곤, 김동욱, 길형준, 김동우, 최효상\*  
한국전기안전공사 전기안전연구원, 조선대학교\*

Analysis of Damaged Patterns and Fire Hazards by Mechanical Stress of Polyvinyl Chloride Insulated Cords

Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Hyoung-Jun Gil, Dong-Woo Kim, Hyo-Sang Choi\*  
Electrical Safety Research Institute(subsidiary of KESCO), Chosun University\*

**Abstract** - 본 논문에서는 비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손패턴과 화재위험성에 대하여 실험, 분석하였다. 비닐절연코드는 2중의 절연피복으로 되어 있으며 도체는 여러 가닥의 소손들로 구성되어 있다. 비닐코드는 반복적인 구부림이나 인장등 기계적 피로에 의해 피복 내 도체가 손상을 입게 되며 전기가 흐르고 있는 상태에서 끊어진 소선들이 접촉과 끊어짐을 반복함으로써 아크와 열이 발생하며 이때 발생한 아크와 열에 의해 피복이 탄화되어 결국에는 착화됨을 볼 수 있었다. 이러한 기계적 피로에 의한 국부 발열과 화재 예방을 위한 기술개발이 필요한 것으로 사료된다.

1. 서 론

최근 세계 각국에서 지구 환경오염의 감소와 친환경에너지를 위한 다양한 노력을 이루어지고 있다. 우리나라에서도 정부기관에서는 저탄소 녹색성장이라는 기조아래 신재생에너지의 개발과 보급에 힘쓰고 있으며 국가 경쟁력 확보와 에너지의 효율적인 활용을 위한 미래성장동력 산업분야를 발굴하여 육성하고 있다. 이중 LED는 미래성장동력의 하나로 기술개발과 함께 지속적인 보급이 이루어지고 있다. LED 조명의 경우 기존의 백열전구, 형광등, 나트륨등, 할로겐등을 대용하는 조명기구로 각광을 받고 있다. 기존의 조명기구보다 낮은 소비전력을 사용할 수 있다는 장점과 장수명의 특징을 가지고 있지만 LED 조명등기구가 기존의 등기구가 가지고 있는 장점을 현재로서는 모두 만족할 수는 없을 것으로 생각된다. 그러나 관계기관과 기업체, 연구소, 학계 등에서 다양한 기술개발과 실용화를 위한 연구를 수행하고 있어 머지않아 현재 안고 있는 기술적인 문제들은 해결될 것으로 생각된다.

전기기계기구, 전기제품 등의 전원선으로 많이 사용되는 비닐코드에서의 기계적 피로에 의한 화재 위험성[1-3]에 대한 연구와 화재 조사기법[4-6]에 대한 연구가 국내의 관계기관 및 대학 등을 통하여 진행 중에 있다. 본 논문에서는 이러한 조명기구나 전기제품의 전원선으로 사용되는 비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손 패턴, 탄화에 의한 피복 착화 과정, 열 분포 패턴, 탄화된 피복의 적외선 분광분석 등을 통하여 비닐절연코드의 소손 패턴과 화재위험성에 대하여 연구하였다. 이러한 실험과 분석을 통하여 비닐절연코드에서의 전기화재 발생 메커니즘의 규명과 화재원인의 규명, 유사사고의 발생을 억제하는 기술을 개발하는데 활용이 가능할 것으로 사료된다.

2. 실험 방법

그림 1은 비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손 패턴과 화재위험성을 실험하기 위한 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 실험장치는 전원공급장치, 차단장치, 실험부하와 실험용 비닐코드 등으로 구성되어 있다. 실험

에 사용된 전선은 VCTFK 1.25mm<sup>2</sup>×2C(0.18mm×50)를 사용하였으며 실험전원은 전원공급장치(Daelim electric, 10kVA)을 이용하여 단상 220V 60Hz를 인가하였으며 부하로는 100W의 백열전구 6개를 사용하였다. 이때의 통전전류는 누설전류계(3263, Hioki, Japan)로 측정하였으며 부하전류는 2.7A를 나타냈다. 실험 전에 내부 소선에 반복적인 구부림 피로를 주어 손상시킨 후에 실시하였으며 끊어진 소선의 접촉과 단선의 반복에 따라 발생한 아크와 열에 의해 피복이 열화되고 착화되는 과정을 디지털캠코더(Handycam, Sony, Japan)와 적외선진단장비(TVS-8500, AVIO, Japan)로 촬영, 분석하였으며, 소손된 코드의 외형과 탄화된 피복의 화학적 구조 변화를 실험현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 적외선 분광분석기(Spectrum-GX, Perkin-Elmer, England)를 이용하여 분석하였다.

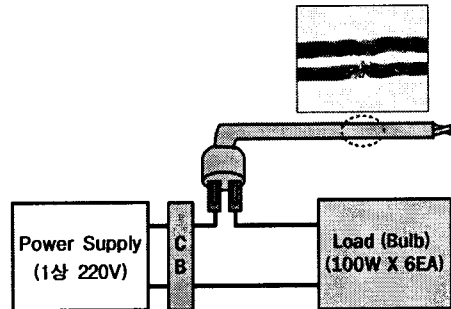
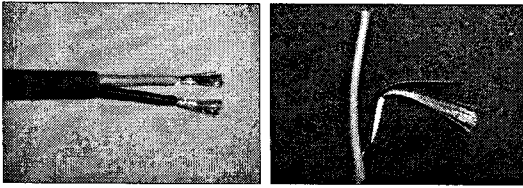


그림 1. 비닐절연코드의 기계적 피로 실험장치 구성

3. 결과 및 고찰

그림 2는 비닐절연코드의 구조를 나타낸 것이다. 시스, 절연체 도체로 구성되어 있다. 시스와 절연체는 주로 PVC를 주체로한 콤파운드로 되어 있으며 도체는 가느다란 수십 가닥의 소선으로 구성되어 있다. KS 규격의 IEC 부합화에 따라 VCTFK 전선의 경우 KS C IEC 60227-5에 적용받으며 범용비닐시스코드의 경우 0.75mm<sup>2</sup>, 1.0mm<sup>2</sup>, 1.5mm<sup>2</sup>, 2.5mm<sup>2</sup> 등이 있다[7]. 그림 2.(b)는 비닐코드를 구성하는 각각의 재료에 대하여 수직인 상태에서 우측으로 90°로 구부렸을 때 정상상태로의 복원 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 심선(도체)의 경우 구부러진 상태이며 시스나 절연체는 유연성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 절연물과 도체와의 기계적 피로(구부림 등)에 따른 물리적 특성 차이로 상대적으로 구부림이나 인장 등 기계적 피로에 대한 원상 복원 특성이 낮은 도체의 피로가 가중되며 이로 인하여 절연체 내 소선이 단선되게 된다.



(a) 비닐코드의 외형 (b) 구부림 특성  
그림 2. 비닐코드의 외형 및 구부림 특성

그림 2는 비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손 메커니즘을 나타낸 것이다. 반복적인 구부림과 인장, 압축 등 기계적 피로에 의해 절연체 내의 소선 일부가 단선되고 단선된 소선이 서로 접촉함에 따라 아크와 열이 발생하게 된다. 이에 의해 소선들 전체가 단선되고 피복이 탄화되어 피복 착화화 및 선간단락 등이 발생하게 된다. 또한 주위에 가연성 물질이 가연성, 폭발성 가스 등이 존재할 경우에는 화재로 확대될 수도 있다.

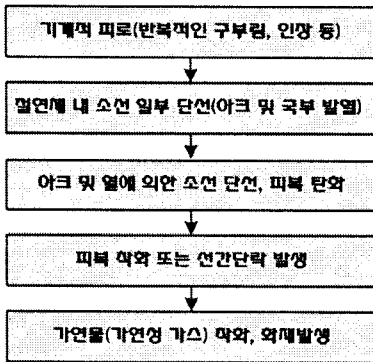


그림 3. 연선의 기계적 피로에 의한 소손 메커니즘

그림 4는 기계적 피로에 의해 손상된 비닐절연코드의 착화 과정을 디지털 캠코더를 이용하여 촬영 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 단선된 소선들이 서로 접촉하면서 발생한 아크에 의해 절연체(내부 피복)가 탄화되고 연기가 발생함을 볼 수 있다. 전기에너지가 공급되고 있는 동안에는 지속적으로 국부발열과 아크가 발생하며 이러한 과정이 반복됨에 따라 시스(외부 피복) 밖으로 불꽃이 분출하며 이로 인하여 화재가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

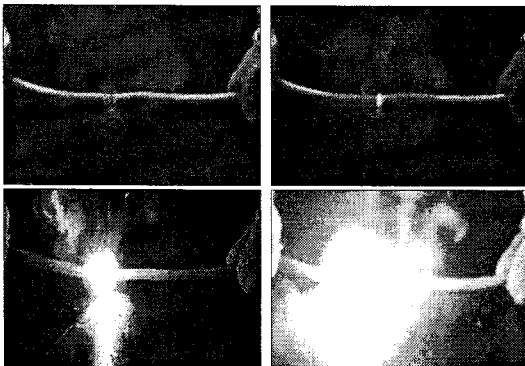


그림 4. 비닐코드의 기계적 피로에 의한 화재발생 과정

그림 5는 비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손 패턴과 화재 진행과정에서의 발열 특성을 적외선진단장비를 이용하여 측정, 분석한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 전선 피복 내 도체가 손상된 부분에서 국부적인 발

열이 발생함을 볼 수 있으며 기계적 피로의 반복에 따라 국부적 발열이 심해져서 피복(시스) 밖으로 불꽃과 더불어 용융 망울이 비산됨을 확인할 수 있다. 결국에는 전선 피복이 착화하여 불꽃이 발생함을 볼 수 있다.

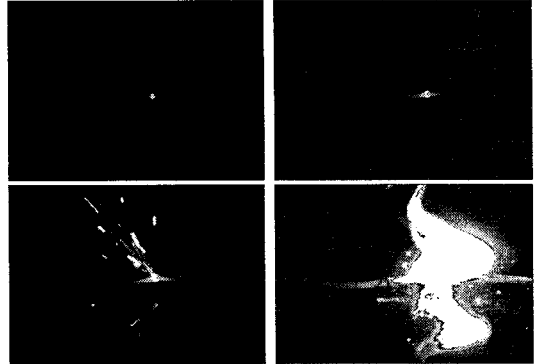


그림 5. 비닐절연코드의 기계적 피로시 발열 패턴

그림 5는 기계적 피로에 의해 손상된 절연코드의 외형과 손상된 부분을 확대한 것이다. 그림 5(a)는 손상된 비닐절연코드의 외형을 나타낸 것으로 손상된 부분의 피복이 검게 탄화됨을 볼 수 있으며 손상된 부분은 확대 관찰한 결과, 탄화된 피복 내에 용융된 망울과 소선에 용융흔이 관찰되었다.

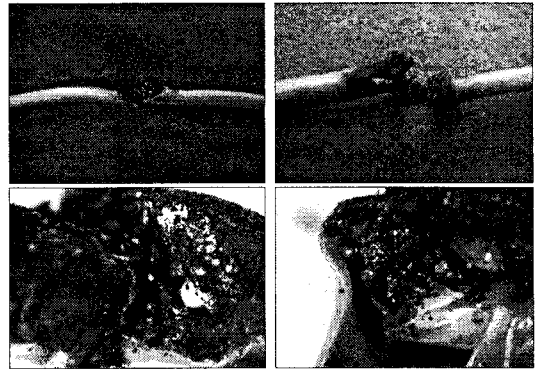
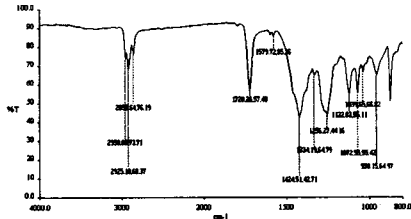


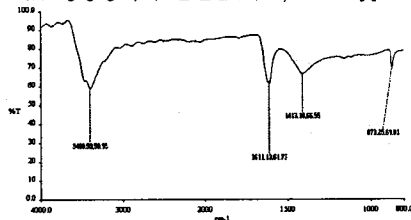
그림 5. 그림 4. 손상된 절연전선 외형 및 확대 분석

그림 6은 적외선분광분석기(FT-IR)를 이용하여 정상 상태의 시스와 탄화된 절연체의 화학적 구조변화를 비교 분석한 것이다. 그림 6(a)는 비닐절연코드 시스(Soild type)의 화학적 구조를 분석한 것으로 시스 및 절연체는 PVC를 주체로 한 킵파운드로 되어 있으며 분석결과에서 볼 수 있듯이 다양한 결합구조가 확인되었다.

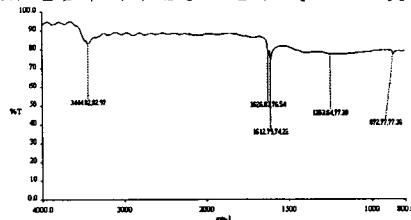
그림 6(b)는 전원이 인가된 상태에서 기계적 피로에 의해 아크와 함께 발생한 불꽃에 의해 탄화된 탄화물(power type)의 화학적 구조로  $3400.5\text{cm}^{-1}$ ,  $1611.13\text{cm}^{-1}$ ,  $1413.18\text{cm}^{-1}$ ,  $873.25\text{cm}^{-1}$ 에서 흡광피크가 나타났으며, 그림 6(c)의 전기에너지가 공급되지 않은 상태에서 외부 화원에 의해 탄화된 탄화물(power type)에서는  $3444.8\text{cm}^{-1}$ ,  $1626.8\text{cm}^{-1}$ ,  $1612.7\text{cm}^{-1}$ ,  $1253.6\text{cm}^{-1}$ ,  $872.7\text{cm}^{-1}$ 에서 흡광피크가 나타났다. 이는 전기에너지의 의해 탄화된 탄화물과는 차이가 있음을 알 수 있다.



(a) 정상상태의 절연물(시스, solid type)



(b) 실험에 의해 손상된 탄화물(powder type)



(c) 외부화염 탄화물(powder type)

그림 6. 비닐코드 절연물의 적외선 분광분석

#### 4. 결 론

이상과 같이 조명기구 및 전기제품의 전원선으로 주로 사용되고 있는 비닐절연코드의 기계적 피로에 의한 소손 패턴과 화재발생 메커니즘, 화재위험성, 손상된 코드의 외형, 실제 확대, 적외선 분광분석 등을 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다. 비닐절연코드는 반복적인 구부림, 인장, 압축 등 기계적 피로에 의해 피복(절연체) 내 소손이 단선되게 된다. 이는 절연물과 전선 도체의 기계적 피로에 대한 물리적 특성의 차이에 따른 것으로 반복적인 피로에 의해 소손이 단선되고 단선된 소선이 서로 접촉을 반복함에 따라 국부적인 발열이 발생함을 확인할 수 있었으며 전기에너지의 지속적인 공급에 의해 아크와 열의 발생은 반복되며 결국에는 피복(시스) 외부로 불꽃과 용융된 망울이 비산됨을 볼 수 있었다. 이러한 화재나 소손사고의 예방을 위해서는 기계적 피로에 충분한 물리적 특성을 갖는 전선의 개발이 필요할 것이며 전기기구나 전기제품의 사용시 비닐절연코드 전원선에 반복적인 기계적 피로가 가해지지 않도록 주의가 요구된다.

#### 감사의 글

본 논문은 지식경제부에서 시행하는 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 김향곤 외 4명, "기계적 피로에 의한 전원 코드의 화재위험성", 한국산업안전학회 춘계대회, pp.366-371, 2003.
- [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, p.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] 東京防災指導協會, "新火災調査教本 第3卷 電氣火災編", pp.10-19, 平成 19年.
- [5] 消防科學總合center, "火災原因調査要領(電氣火災編)", pp.17-18, 平成 8年.
- [6] 김만건, 김진표, "전기화재감식공학", 성안당, pp.79-81, 2006.
- [7] 지식경제부 기술표준원, "KS C IEC 60227-5". 2005.