

A-16

## 기계적 피로에 의한 연선의 열화패턴 분석

송길목, 김동우, 김영석, 최충석  
전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

### The Pattern Analysis of Deterioration of Stranded Wire by Mechanical Stress

**Kil-Mok Shong, Dong-Woo Kim, Young-Seok Kim, Chung-Seog Choi**  
*Electrical Safety Research Institute(Attached to KESCO)*

#### 1. 서론

다양한 운동에너지로 변환이 가능하고 저장이 용이한 전기에너지는 산업이 발달하면서 더욱 대형화 및 고급화되어 가는 추세이다. 산업현장, 공장, 조명, 주택내 가전제품 등 편리한 인간생활을 영위할 수 있도록 하는 전기는 현대 문명에 있어서 사용빈도가 가장 많은 부분을 차지하는 것과 비례하여 사고발생빈도 역시 높은 비율을 차지하고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 전기의 사용에 있어서 열 발생에 의해 화재로 진전되는 경우 상당한 인적 물적 피해를 주게 되는 요인이 되기도 한다. 한국전기안전공사의 전기재해 통계자료에 의하면, 2001년도를 기준으로 전기화재는 1일 평균 30.8건이 발생하고 있는 것으로 조사되었다. 이는 2001년 동안 11,205건의 전기화재가 집계된 것으로 전체 화재의 30[%]를 상회하는 높은 재해율을 보이고 있다.<sup>1)</sup> 국내의 경우 전기화재에 대한 인식이 확산되어 연구가 진행 중에 있으며 재해를 줄이기 위한 노력이 활성화되고 있다. 하지만, 생산성에 치중되고 있는 현대의 산업기반 풍토가 바뀌지 않는 한 재해를 줄이기 위한 투자에 어려움이 많다. 따라서, 국가 정책적인 차원에서의 지원이 요구되고 있는 실정이다. 전기화재 연구는 다양한 패턴에서의 원인을 규명하고 예방대책을 제시하는 것이 매우 중요하다.<sup>1,2)</sup>

본 연구는 전기화재의 원인 중 기계적 피로에 의해 절연이 약화되어 화재가 발생하는 메커니즘을 모델링한 것으로 저압용 전기기기의 전원선으로 많이 이용되는 비닐캡타이어 타원형코드(VCTFK 2C×0.75[mm<sup>2</sup>], 1.25[mm<sup>2</sup>], 2.0[mm<sup>2</sup>])를 이용하여 반복 피로장치에 의해 구부림 열화시킨 후 단선경향을 분석하고 그 특성을 해석하였다.

#### 2. 실험방법

본 실험에서는 저압기기 이동기기용 절연코드로 많이 이용되는 비닐캡타이어 타원형

코드(VCTFK)의 0.75[mm<sup>2</sup>](0.18[mm]/30), 1.25[mm<sup>2</sup>](0.18[mm]/50), 2.0[mm<sup>2</sup>](0.26[mm]/37) 등 3종류를 선택하였다. 그림 1(a)는 기계적 피로를 일정부분 규칙적으로 가하여 단선될 때까지를 실험하기 위한 장치 구성과 분석방법을 서술한 것이다. 전원의 공급은 220[V] 상용전압을 인가하였고 부하로는 200[W]의 전등부하를 연결하여 실험하였다. 일정부분 반복적인 피로에 의해 단선되는 구부림(bending)회수를 근접센서를 이용하여 기록하고 구부림각은 좌우 각각 60[°]로 하였다. 좌우 왕복하는 데 걸리는 시간은 1.85[sec]로 하였다. 한국산업규격(KS)에서는 30[°]의 각으로 하고 하중은 600[g]을 매달아 실험하도록 되어 있으나 본 실험에서는 피로를 받는 부분에서 500[mm] 떨어진 위치에 하중이 1,000[g]이 되는 추를 달아 가속열화 시켰다. 그림 1(b)는 구부림 열화에 이용된 저압기기용 일체형 코드로 비닐 캡타이어 타원형 코드의 외형이다.

구부림 피로에 의해 단선된 절연코드의 특성은 실체현미경을 이용한 외형분석을 실시하였고, 단선시 아크 열에 의해 탄화된 절연피복은 적외선 분광기를 이용하여 분석하였다. 또한, 엑스선 분광기를 이용하여 연선의 단선 형태를 분석하였다.

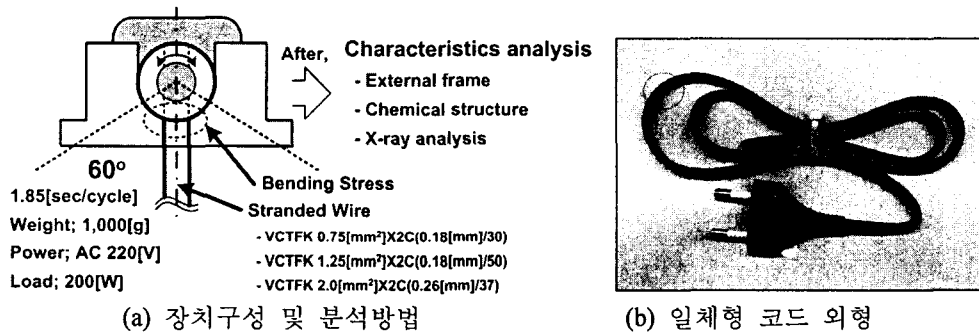


그림 1. 구부림 열화 장치와 일체형 코드

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 단면적 크기에 따른 단선경향

반복피로에 의해 단선 되기까지 실험한 결과 소선의 수와 허용전류 사이의 상관관계를 분석할 수 있었다. 그림 2는 연선이 단락 될 때까지의 왕복회수를 기록한 것으로 0.75 [mm<sup>2</sup>]의 경우 486.3±54회의 범위에서 단선되는 것을 확인하였다. 1.25[mm<sup>2</sup>]의 경우에는 826.3±7회에서 단선되는 것으로 보아 연선 가닥수가 많을수록 기계적 피로에 강한 것을 알 수 있었다.

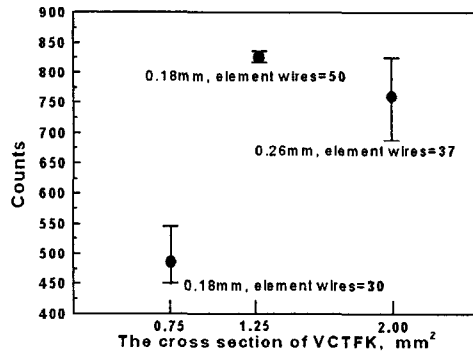
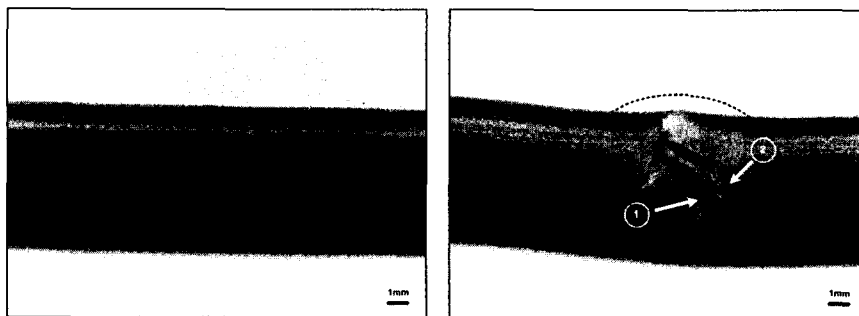


그림 2. 일체형 코드의 기계적 피로에 의한 단선경향

그러나, 2.0[mm<sup>2</sup>]의 경우에는 그 단면적이 크지만 상대적으로 기계적 강도가 약간 저하되어 있는 것을 확인할 수 있다. 0.75[mm<sup>2</sup>]보다 1.25[mm<sup>2</sup>]가 약 1.7배의 기계적 강도가 큰 것을 알 수 있고 2.0[mm<sup>2</sup>]의 경우에는 1.25[mm<sup>2</sup>]보다 약 0.9배 정도로 기계적 강도가 낮은 것으로 실험을 통해 알 수 있었다. 따라서, 기계적 강도만을 실험상으로 확인하였을 때에는 1.25[mm<sup>2</sup>]가 가장 안정된 형태임을 확인하였다. 따라서, 기계적 피로의 강도가 상대적으로 강한 1.25[mm<sup>2</sup>]의 사용이 권장된다.

### 3.2 광학현미경에 의한 외형분석

연선의 외형변화를 보면 1.25[mm<sup>2</sup>]의 연선인 경우 그림 3에서와 같이 정상 연선과는 다른 형태를 하고 있다. 그림 3(a)는 정상일 때의 외형을 촬영한 것이고 (b)는 구부림 피로에 의해 열화된 연선의 외형을 촬영한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 구부림 피로가 지속될수록 연선 내부의 소선들이 각각 단선되면서 접촉불량에 따른 아크(arc)와 출열을 발생한다. 절연피복의 내부를 탄화시키고 외부로 열이 방출된 형태를 보여준다. 열패턴은 연선이 들어 있는 내부에서 외부로 발산된 형태를 확인할 수 있었다.



(a) 정상 연선 (b) 기계적 피로에 의한 아크 흔적

그림 3. 반복피로에 의한 연선의 외형 비교

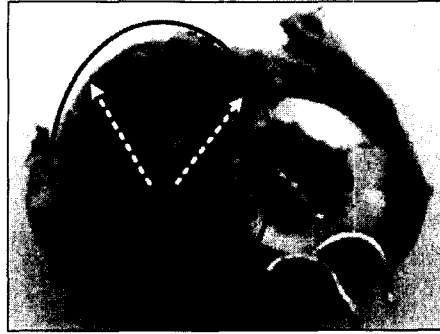


그림 4. 구부림 피로에 의한 열 패턴

그림 4는 그림 3(b)에서 탄화된 부분의 단면을 촬영한 것으로 절연피복의 탄화된 형태를 보면 화살표 방향으로 아크 열이 진행된 것을 확인할 수 있으며 이는 비산된 연선의 용융망울이 간헐적인 전원의 공급과 차단을 반복하면서 축열되다 절연피복의 가장 약한 부분에서 외부로 비산되는 것을 알 수 있다.

### 3.3 화학적 표면구조

그림 5는 적외선 분광기(FT-IR spectrometer)를 이용하여 그림 3(b)에서 ①은 절연피복의 정상부분(normal)을 분석한 것이고 ②은 탄화된 부분(carbonized part)을 분석하였다. ①에서 정상일 때  $2900.0[\text{cm}^{-1}]$  부근에서 탄소와 수소의 단일결합형태인 알킬기가 확인되었고  $1720.1[\text{cm}^{-1}]$ 의 파수에서 탄소와 산소의 이중결합형태인 카아보닐기가 확인되었다. 또한,  $1579.4[\text{cm}^{-1}]$ 에서 작은 흡광피크가 확인되었다. 탄화된 부분인 ②에서는  $3365.7[\text{cm}^{-1}]$ 에서 산소와 수소의 단일결합을 가진 흡광피크가 확인되었다. 이 흡광피크는 정상부분과 달리 열에 의해 탄화된 절연재료가 공기중의 산소나 수분과 결합한 것으로 판단된다. 또한,  $1716.9[\text{cm}^{-1}]$ 에서 흡광피크가 줄어들고  $1636.1[\text{cm}^{-1}]$ 의 흡광피크가 성장하는 것을 확인할 수 있는데 이는 산소와 탄소의 이중결합고리가 열에 의해 분해되었다가 다시 공기 중의 산소와 재결합하는 것으로 판단된다.

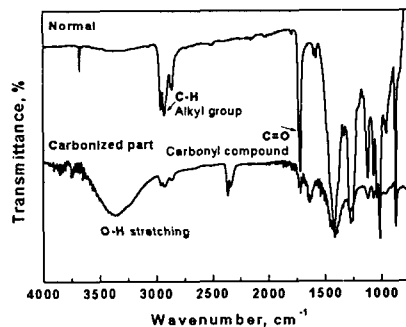
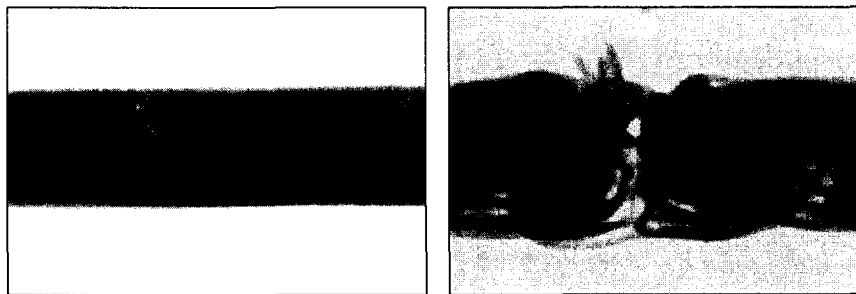


그림 5. 일체형 코드의 적외선 흡광 스펙트라

### 3.4 X-선 투과에 의한 분석

연선 1.25[mm<sup>2</sup>]의 구부림에 의해 단선된 형태를 분석하기 위해 X-선 투과기를 이용하여 분석하였다. 그림 6(b)에서 전원선 내부의 소선들이 말아져 있는 형태를 하고 있으며 선간 단락의 형태를 가지고 있지 않은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 구부림 피로에 의해 화재로 진전된 일반적인 형태는 단선된 소선의 접촉불량에 따른 발열에 의해 화재로 진전된 것을 알 수 있다. 접촉불량에 의한 경우 전기의 공급이 불규칙하게 이루어지지만 차단기가 동작하지 않아 실질적으로 화재가 발생하더라도 보호할 수 있는 설비가 없다.



(a) 정상연선 (b) 기계적 피로에 의한 연선  
그림 6. 구부림 피로에 의한 연선의 X-선 투과

## 4. 결론

(1) 0.75[mm<sup>2</sup>]의 비닐코드보다 1.25[mm<sup>2</sup>]가 약 1.7배의 기계적 강도가 큰 것을 알 수 있고 2.0[mm<sup>2</sup>]의 경우에는 1.25[mm<sup>2</sup>]보다 약 0.9배 정도로 기계적 강도가 낮아 1.25[mm<sup>2</sup>]가 가장 안정된 형태임을 확인하였다.

(2) 저압기기용 일체형 코드에 구부림 피로가 지속되면 연선 내부의 소선들이 각각 단선되면서 접촉불량에 따른 아크(arc)와 줄열이 발생하고 열패턴은 연선이 들어 있는 내부에서 외부로 발산된 형태를 확인하였다.

(3) 정상의 저압기기용 일체형 코드는 2900.0[cm<sup>-1</sup>] 부근에서 탄소와 수소의 단일결합형태인 알킬기가 확인되었고 1720.1[cm<sup>-1</sup>]의 파수에서 탄소와 산소의 이중결합형태인 카아보닐기가 확인되었다.

(4) 접촉불량에 의해 탄화된 저압기기용 일체형 코드의 절연피복은 3365.7[cm<sup>-1</sup>]에서 탄화되어 공기 중의 산소와 수소의 단일결합을 가진 흡광피크와 열분해되었다가 공기중의 산소와 재결합한 형태의 1716.9[cm<sup>-1</sup>]에서 흡광피크가 줄어들고 1636.1[cm<sup>-1</sup>]의 흡광피크가 성장하는 것을 확인하였다.

(5) 기계적 피로에 의해 연선 내부의 소선들이 말아져 있는 형태를 하고 있으며 선간 단락의 형태를 가지고 있지 않고 연선이 단선되어 접촉불량에 의한 아크 열에 의해 소손된 것으로 확인되었다.

기계적 피로에 의해 연선이 단선되는 경우 화재로 진전되는 과정과 외형변화를 분석하여 연선의 반단선 특성을 해석하였고, 연선의 종류에 따라 단선 특성을 비교 분석하여 향후 저압기기용 일체형 코드의 전기적 기계적 안정성 선정에 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, pp.185-211, 2000.
2. Chung-Seog Choi, "A Study on the Electrical Fire Analysis of Insulating Materials Due to the Tracking Deterioration", 2002 ACED & K-J Symposium, pp.606-609, 2002.
3. 최충석 외 4, "열적 피로에 의한 전원코드의 발화특성과 전기화재 분석에 관한 연구", KIFSE Conference, pp. 164-170, 2003.
4. 송길목, 최충석, 김동우, 박희로, "구부림 피로에 의한 연선의 반단선 특성 해석", KIEEME Annual Summer Conference 2003, pp. 464-467, 2003.
5. 송길목 외 3, "Over-Current에 의한 PVC Insulated Flexible Cord의 전기화재 해석에 관한 연구", KIEE Conference on HV&DAT, pp. 131-133, 2003.