

## 과전류에 의해 탄화된 KIV의 소손패턴 해석에 관한 연구

최충석, 김향곤, 길형준, 김동욱, 문현욱  
한국전기안전공사 전기안전연구원

### A Study on the Analysis of Damaged Pattern of KIV Carbonized by Overcurrent

Chung-Seog Choi, Hyang-Kon Kim, Hyoung-Jun Gil,  
Dong-Ook Kim, Hyun-Wook Moon  
Electrical Safety Research Institute, a subsidiary of KESCO

#### 1. 서론

화재 현장의 원인 조사는 처음에 출화 개소를 한정하고 그 출화 개소에 존재하는 출화의 가능성이 있는 화원에 대해서 검증한다. 전기 화재를 출화 형태로 분류하면 전기 배선 및 전기기기에 의한 출화, 누전 경로로부터 출화, 정전기 불꽃에 의한 출화 등으로 나누어진다. 줄의 법칙에서도 알 수 있듯이 전선에 전류가 흐르면 필연적으로 열이 발생하며 그 열이 발산되지 못하고 축열되면 주위에 있는 가연성 물질의 착화 온도에 도달하여 화재가 발생한다. 전기 화재의 종류는 단락(electric short), 과부하(overload), 누전(leakage current), 접촉 불량(poor contact), 트래킹(tracking), 흑연화 현상(graphite phenomenon) 등으로 구분되고 있으나 재현 실험을 통한 과학적 방법으로 해석기법을 정량화하여 제시한 사례는 많지 않다. 전기기기에 쓰이는 전선은 도체의 굵기와 형태, 절연물의 종류 등에 따라 허용 전류가 규정되어 있다. 전기기기 또는 전선에 허용 용량 이상으로 전류가 공급되면 도체에서 발생한 줄열에 의해 절연물이 용융되어 도체의 단락, 과부하 등의 발생으로 전기 화재가 발생하게 된다.

일반적으로 전기기기에 사용되는 전선은 한국산업규격(KS C 3325)에 엄격히 규정되어 있고, 명칭은 전기기기용 600V 비닐절연전선(KIV; 600V Grade Polyvinyl Chloride Insulated Wires for Electrical Apparatus)으로 표기하고 있다. KIV는 전기기기의 배선에 사용되는 도체로 가요연(可撓燃)의 절연 전선으로 염화 비닐 수지를 주체로 한 혼합물(compound)로 절연된 전선이다. 도체는 주석 도금 연동선이나 전기용 연동선을 사용하고 도체의 최고 허용 온도는 60℃ 이하이다. 색상은 흑색, 백색, 적색, 녹색, 황색, 청색 등의 6색을 원칙으로 사용한다. 전선의 굵기는 0.75~14mm<sup>2</sup>까지 7 종류가 있다. 제품의 호칭 방법은 명칭 및 도체의 공칭 단면적 또는 기호 및 도체의 공칭 단면적으로 나타내며, 예를 들면 전기기기용 비닐 절연 전선 1.25mm<sup>2</sup> 또는 KIV 1.25mm<sup>2</sup>로 표시한다[1-7].

본 논문에서는 KIV 1.25mm<sup>2</sup>에 외부 화염과 과전류를 인가하여 탄화되었을 때 나타나는 특성을 실체 현미경(SM), 주사전자현미경(SEM), 온도 기록계 등을 이용하여 제시하고 그 결과는 사고원인 분석 및 향후 연구를 위한 지식 기반으로 활용하고자 한다.

## 2. 실험 방법

전기기기용 600V 비닐절연전선(KIV)의 난연성 실험은 경사법에 따르며 외부에서 화염을 일정 시간 동안 가한 후 제거하였을 때 15초 이내에 자기 소화되어야 한다. 일반 화염에 의한 탄화 패턴 해석을 위한 실험용 전선은 KIV 1.25mm<sup>2</sup>를 사용하였고, 과전류는 대전류 공급 장치(ODEN 1X, Programma, Sweden)를 이용하여 전선에 허용 전류 이상으로 인가하였으며, 과전류에 따른 실험 전선 주위의 온도 변화는 온도 기록계(AR1100A, Yokagawa, Japan)로 측정하였다. 실험에 사용된 KIV 1.25mm<sup>2</sup> 전선을 26cm 길이로 절단하고 양끝의 절연물을 약 3cm 제거한 후 외부의 공기 유동을 차단하여 실험의 신뢰성을 안정적으로 확보하기 위해 밀폐 용기 내의 단자에 고정하였다. 탄화된 절연물의 구조 변화 해석은 주사전자현미경(SEM; JSM-6400, Jeol, Japan)을 이용하였으며, 그림 1은 실험 과정을 나타낸 실체 사진이다.

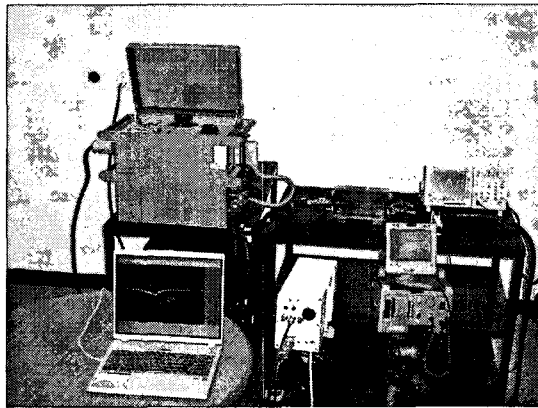
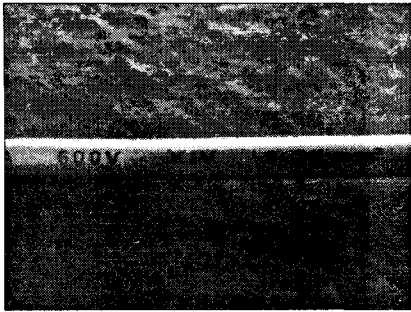


그림 1. KIV 1.25mm<sup>2</sup>에 과전류를 인가하는 실험 장치

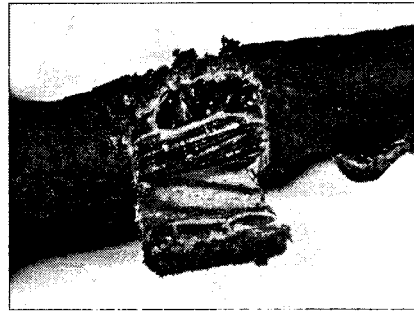
## 3. 결과 및 고찰

KIV 1.25mm<sup>2</sup> 전선의 난연 특성을 실험한 결과 규정된 시간 내에 자연 소화되었으며, 전선 절연물은 열에 의해 심하게 탄화되었고 열이 외부에서 내부로 진행됨을 알 수 있었다. 그림 2(a)는 실체 사진을 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 탄화된 절연물의 실체 사진으로 외부와 내부를 나타낸 것이다. 사진에서도 알 수 있듯이 내부에 작은 구멍이 다수 생성되었음을 보이고 있다. 그림 2(c)는 탄화된 절연물의 단면을 주사전자현미경(SEM) 사진으로 나타낸 것으로 전반적으로 다공질의 망상 구조를 나타내며, 그림 2(d)는 불꽃을 절연물의 표면 SEM 사진으로 불꽃에 의해 다공질의 입자 형태를 나타냈다.

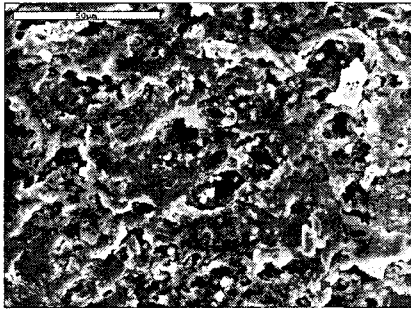
그림 3은 KIV 1.25mm<sup>2</sup>에 전선 허용 전류의 100%, 300%, 400%, 500%를 각각 500sec 동안 인가하여 전선 주위의 온도 변화를 분석한 것이다. 그림 3(a)는 100% 전류(13A)를 흘렸을 때의 전선 주위 온도 변화로 T<sub>1</sub>은 최고 22.31℃, T<sub>2</sub>는 21.69℃, T<sub>3</sub>은 21.40℃를 나타냈다. 그림 3(b)는 300% 전류(39A)를 흘렸을 때의 전선 주위 온도 변화로 T<sub>1</sub>은 최고 29.33℃, T<sub>2</sub>는 25.40℃, T<sub>3</sub>은 23.80℃까지 상승했으며, 3점간의 최고온도차는 5.53℃를 보였다. 그림 3(c)는 400% 전류(52A)를 흘렸을 때의 전선 주위 온도 변화로 T<sub>1</sub>은 최고 39.78℃, T<sub>2</sub>는 29.96℃, T<sub>3</sub>은 26.65℃를 나타냈다. 3점간의 최고온도차는 13.13℃를 나타내 상당한 차이를 보였다.



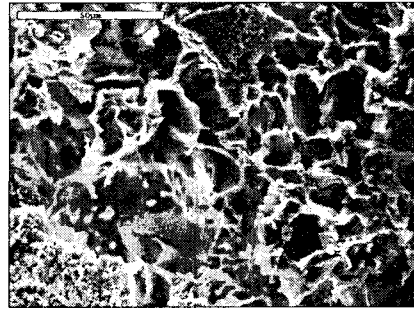
(a) 실제 사진



(b) 탄화된 절연물

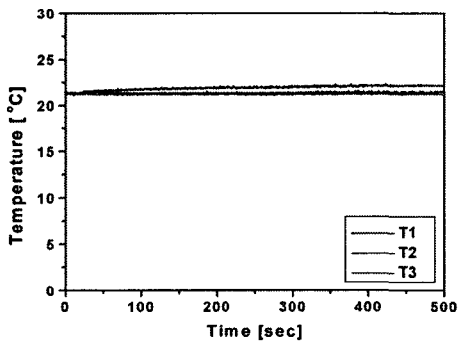


(c) 절연물 단면

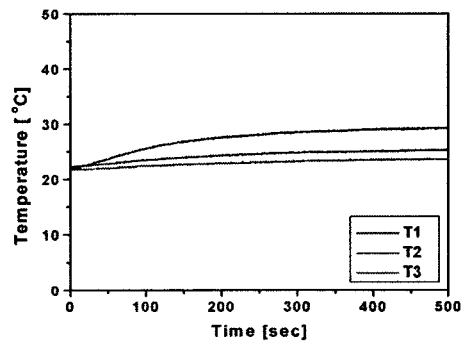


(d) 절연물 표면

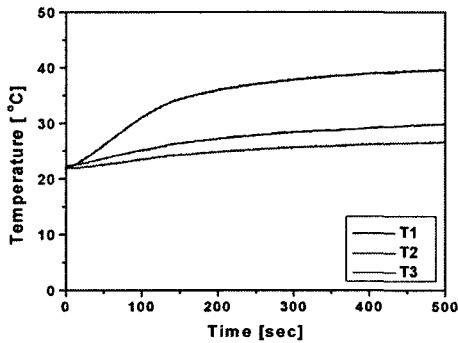
그림 2. KIV 1.25mm<sup>2</sup>의 외형 변화 및 단면 구조



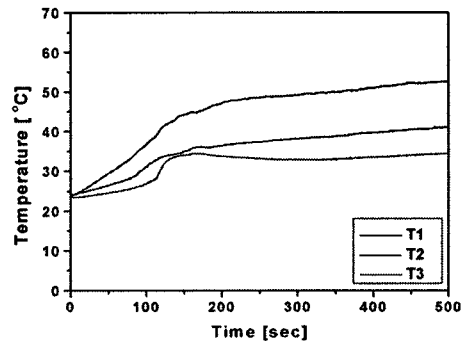
(a) 100% 전류(13A)



(b) 300% 전류(39A)



(c) 300% 전류(39A)



(d) 500% 전류(65A)

그림 3. 과전류가 인가된 KIV 1.25mm<sup>2</sup>의 주위 온도 변화 특성

전선 절연물에서 연기가 발생하였고 열화 1단계의 특징을 나타냈으며, 전선 절연물의 외형적 변화는 관찰되지 않았다. 그림 3(d)는 500% 전류(65A)를 흘렸을 때의 전선 주위 온도 변화로  $T_1$ 은 최고 52.84℃,  $T_2$ 는 41.32℃,  $T_3$ 은 34.53℃까지 상승했다. 3점간의 최고온도차는 18.31℃로 큰 차이를 보였고, 전선 절연물에서는 다량의 연기가 발생하여 밀폐 용기 안을 가득 채웠다. 또한, 전선 절연물이 도체로부터 이탈하였으나 도체의 용단까지는 이르지 않았다. 이상의 결과로 볼 때 300% 전류까지는 주위 온도 변화가 시간이 경과함에 따라 점차 완만해지는 경향을 나타낸 반면에 400% 전류에서는 온도차가 커졌으며 절연물에서는 연기가 발생하여 전선 절연물이 열화됨을 알 수 있다.

그림 4는 KIV 1.25mm<sup>2</sup>에 500%(65A)의 과전류를 대전류공급장치를 이용하여 인가하였을 때 전선 절연물의 열화 진행 과정을 실체 현미경(SM)과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 분석한 것이다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 정상 상태의 전선 절연물로 제조시 생성되는 구멍이 나 있으며 표면이 균일하고 매끄럽다. 그림 4(c)와 그림 4(d)는 열화 1단계로 전선 절연물에서 소량의 연기가 발생하였으며, 전선 도체와 접촉한 전선 절연물에 작은 구멍(hole)들이 형성됨을 볼 수 있었다. 이는 전선 도체에서 발생한 열에 의해 절연물 재료 중의 염소가 빠져나가는 탈염화 수소 반응에 의한 것으로 판단된다. 그림 4(e)와 그림 4(f)는 열화 2단계로 전선 절연물이 부풀어 오르고 연기가 활발하게 발생하였으며 전선 도체와 접촉한 절연물은 열에 의해 탄화된 흔적을 볼 수 있었다. 도체와 접촉한 부분의 전선 절연물에 열화 1단계에서보다 더 큰 구멍(hole)들이 형성됨을 볼 수 있었다. 그림 4(g)와 그림 4(h)는 열화 3단계로 전선 절연물이 검게 탄화되었으며, 도체와 접촉한 절연물에는 커다란 구멍들이 형성되었다. 그림 4(i)와 그림 4(j)는 열화 4단계로 전선 절연물이 열에 의해 심하게 용융, 탄화되었다. 전선에 과전류가 흐르게 되면 전선 도체와 접촉한 내부 절연물이 먼저 열을 받게 되어 작은 구멍들이 생기면서 연기가 발생한다. 시간이 경과하면 점차 열이 절연물 외부로 전달되며 내부에서는 탄화가 진행된다.

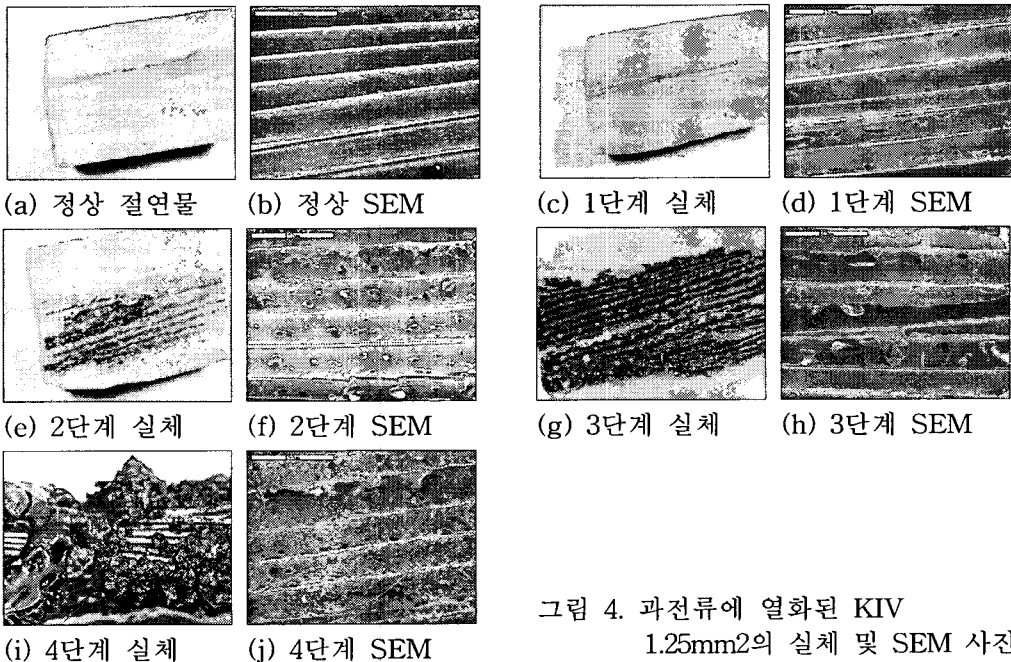


그림 4. 과전류에 열화된 KIV 1.25mm<sup>2</sup>의 실체 및 SEM 사진

#### 4. 결 론

전기기기용 600V 비닐절연전선(KIV)에 외부 화염과 과전류를 인가하여 탄화되었을 때 나타나는 특성을 분석한 결과 다음과 같은 특성을 알 수 있었다.

1) 전선의 난연 특성 실험 결과 외부 화염을 제거하고 15초 이내에 자연 소화되었으며, 전선 절연물은 열에 의해 심하게 탄화되었고 열이 외부에서 내부로 진행됨을 알 수 있었다. 또한, 탄화된 절연물을 주사전자현미경(SEM) 사진으로 분석한 결과 단면 및 표면은 다공질의 망상(구멍) 구조를 나타냈다.

2) 전선 허용 전류의 400% 전류(52A)를 흘렸을 때의 전선 주위 온도 변화는 최고 39.78℃를 보였으며, 절연물에서 연기가 발생하였고 열화 1단계의 특징을 나타냈다. 또한, 500% 전류(65A)를 흘렸을 때 최고 52.84℃이며, 절연물이 도체로부터 이탈하였으나 도체의 용단까지는 이르지 않았다.

3) 500%(65A)의 과전류를 인가하였을 때 전선 절연물은 열화 1단계에서 열화 4단계까지 형성하며 용융과 탄화가 진행되었다. 즉 전선에 과전류가 흐르게 되면 전선 도체와 접촉한 내부 절연물이 먼저 열을 받게 되어 작은 구멍들이 생기면서 연기가 발생하고 시간이 경과하면 점차 열이 절연물 외부로 전달되며 내부에서는 탄화가 진행된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

#### 6. 참고문헌

1. 최충석 외 5, "전기화재공학", 도서출판 동화기술, pp.189-265, 2004.
2. Chung-Seog Choi, et al, "A study on the characteristics of tracking deterioration between electrodes on phenolic resin used for low voltage", KIEE, The international Conference on Electrical Engineering Proceedings, pp.1135-1138, 2002.
3. 최충석, 김향곤, 김동욱, "과전류에 의해 용단된 소선의 특성 해석에 관한 연구", 한국산업안전학회 논문지, Vol.19, No.1, pp.60-65, 2004.
4. 최충석, 김향곤, 송길목, "외부화염에 의해 소손된 비닐코드의 단락 특성에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.18, No.4, pp.72-77, 2004.
5. 최충석, 송길목, 김동우, "VCTFK의 반복피로에 의한 소손 패턴의 특성 해석", 한국안전학회 논문지, Vol.19, No.4, pp.42-47, 2004.
6. 최충석, 김향곤, 김동욱, "일체형 비닐코드의 과전류 열화에 의한 열적 특성 분석", 한국화재소방학회추계학술대회, pp.105-111, 2003. 10.
7. 中野弘伸, "電氣配線からの發火原因に関する考察", 日本火災學會誌, Vol.46, No.2, pp.1-5, 1996.