

일체형 비닐코드의 과전류 열화에 의한 열적 특성 해석

김향곤, 김동욱, 최충석
전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

Thermal characteristics analysis of PVC insulated flexible cords
deteriorated according to over current

Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Chung-Seog Choi
Electrical Safety Research Institute(attached to KESCO)

1. 서론

경제성장과 더불어 산업기술이 발달함에 따라 우리생활을 편리하게 해주는 다양한 편의시설들이 구축되고 있으며, 초기의 생산성 위주에서 점차 환경과 안전에 대한 일반인의 관심이 높아지고 있다. 최근 들어 대형화재가 자주 발생하고 있으며 이로 인해 귀중한 생명과 막대한 재산피해를 입고 있다. 이들 대부분은 안전불감증에 기인한 인재에 의한 사고라고 할 수 있으며 2002년도 화재통계를 살펴보면, 총화재는 32,966건으로 사망 491명, 부상 1,744명으로 총 2,235명의 인명피해가 발생하였으며, 143,447백만원의 재산피해가 발생하였다. 이는 2001년도에 비해 다소 감소한 것이기는 하나 최근의 화재발생 경향을 살펴볼 때, 화재건수 및 피해상황은 증가추세에 있다. 전체화재 중 전기화재가 차지하는 비율은 33.9%로 11,202건의 화재사고가 발생하였으며, 주원인은 단락(합선)에 의한 화재, 과부하(과전류)에 의한 화재, 누전에 의한 화재, 접촉부 과열, 스파크 등에 의한 화재 등을 꼽을 수 있으며, 가장 큰 비중을 차지하는 합선에 의한 화재는 주로 전기배선에서 발생하는 것으로 나타났다^{1,2)}.

전기배선에 쓰이는 전선은 도체의 굵기와 형태, 피복의 종류 등에 따라 허용전류가 정해져 있다. 그러나 전선의 허용전류 이상으로 부하를 사용하게 되면 전선도체에서 발생한 줄열에 의해 열이 발생하고 발열이 불량할 때에는 피복이 용융하여 선간단락 또는 지락 등으로 전기화재가 발생하게 된다. 전기제품의 전원선으로 사용되는 일체형 비닐코드의 허용전류는 3A, 7A, 12A, 15A, 20A 등으로 굵기가 작은 전선에 2~3배 또는 그 이상의 과전류가 흐르더라도 일반적으로 메인차단기의 보호범위 안에 있기 때문에 전기재해를 예방하지 못하게 된다. 현재, 국내·외에서 과전류에 의한 전기재해 원인 분석 및 예방에 대한 연구가 활발하게 진행 중에 있으며 향후 좋은 결과가 나올 것으로 기대한다³⁻⁸⁾.

본 연구에서는 전기제품의 전원선으로 사용되는 일체형 비닐코드의 과전류 열화에 의

한 열적특성을 밝히고자 하며, 과전류에 의한 전선의 열화과정, 열화단계별 특징 및 통전 전류와 전선의 배치형태에 따른 전선 각 부위의 온도변화를 비교, 분석하였으며, 과전류에 의해 용단된 전선도체의 외형, 단면조직, 표면구조와 조성분포 등을 분석하였다.

2. 실험방법

그림 1은 과전류에 의한 비닐코드의 열화 실험회로이다. 실험에는 일체형 비닐코드(VCTFK, $0.75\text{mm}^2 \times 2\text{C}$)를 사용하였으며, 대전류공급장치(ODEN 1X, Programa, Sweden)를 이용하여 5A, 10A, 15A, 20A의 전류를 각각 30분(1800sec)동안 인가하였다. 각각의 전류와 배치상태에 따른 비닐코드 각 부위의 온도변화를 K-type의 열전대와 기록계(AR1100A, Yokogawa, Japan)를 이용하여 측정, 기록하였으며 온도측정은 플러그 몸체부분에 T1~T3 등 3개소, 연장코드부분에 T4, T5 등 2개소 등 총 5개소의 온도변화를 측정하였다.

열화진행 과정은 디지털카메라를 이용하여 실시간 촬영하였으며, 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용하여 용융된 전선피복과 용단된 전선도체의 외형을 분석하였으며, 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)를 이용하여 용단된 전선의 단면조직을 분석하였다. 또한, SEM(JSM-6400, JEOL, Japan)과 EDX(ISIS, Oxford, England)를 이용하여 표면구조와 조성분포를 분석하였다.

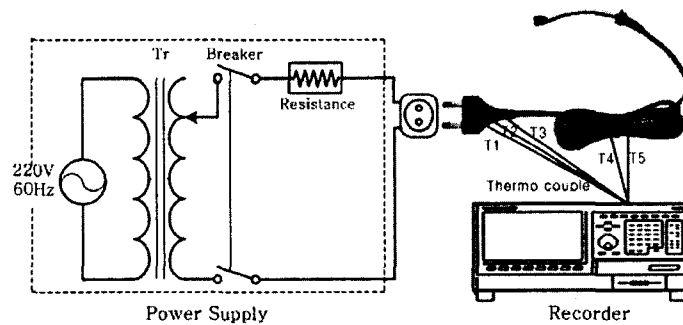


그림 1. 전선의 과전류 실험회로

3. 결과 및 고찰

3.1 과전류에 의한 전선피복의 열화과정

그림 2는 과전류에 의한 열화 진행과정을 실체현미경을 이용하여 외형과 단면구조를 확대, 분석한 것이다.

(a)와 (b)는 열화 1단계로 외부적인 변형은 보이지 않지만, 전선 내부에서 발생한 열에 의해 피복이 용융되면서 연기가 발생하였으며 전선피복이 부풀어 올랐다. 피복단면을 분석한 결과 전선도체의 줄열에 의해 전선도체와 닿는 부분에 작은 홀(구멍)이 형성되었다.

(c)와 (d)는 열화 2단계로 전선내부에서 발생한 열에 의해 전선의 형태가 찌그러지고 유

연성이 떨어졌으며 전선도체와 접촉한 피복은 용융되었다. 시간이 경과함에 따라 피복의 용융, 탄화가 촉진되었다.

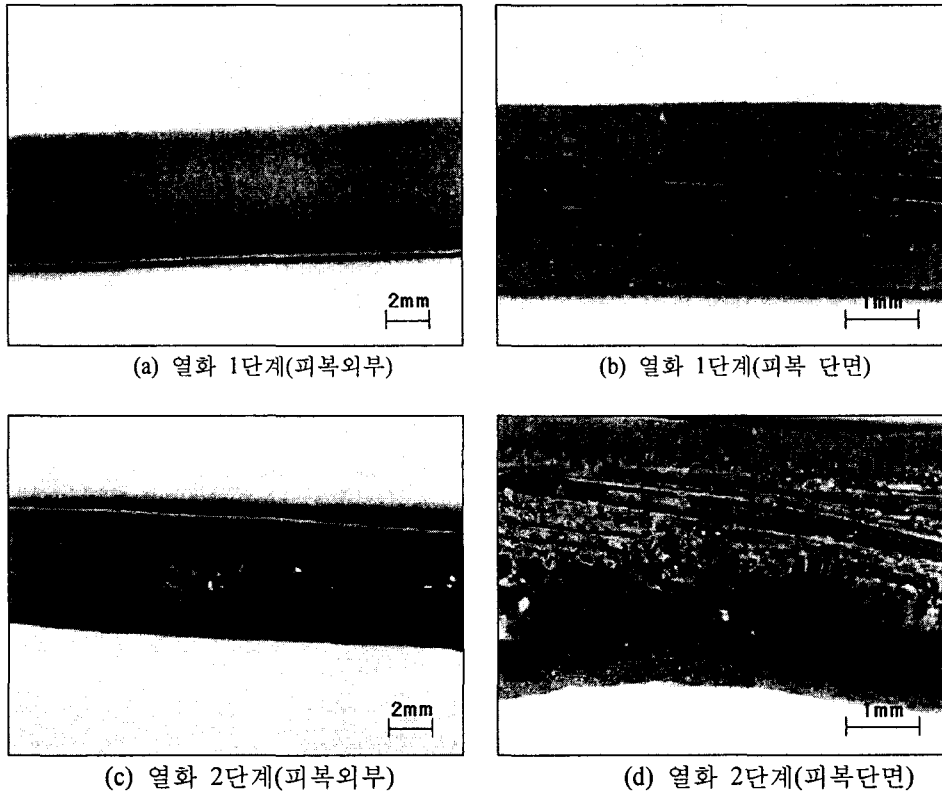


그림 2. 과전류에 의한 전선피복의 열화진행과정

3.2 과전류에 의한 각 부위의 온도변화 분석

그림 3은 대전류공급장치를 이용하여 10A와 20A의 전류를 30분 동안 흘렸을 때 각 부위의 온도변화를 나타낸 것이다. 전선의 배치는 늘어뜨린 상태와 연장코드 중간을 묶은 상태 등 2가지로 구분하였다. 전선을 묶지 않고 늘어뜨린 상태에서의 T1~T3은 플러그 부분이며, T4는 플러그 몸체에서 15cm 위치, T5는 플러그 몸체에서 30cm 위치에서의 온도를 측정하였으며, 전선 중간을 묶은 상태는 그림 1에서와 같은 방법으로 온도를 측정하였다.

(a)와 (b)는 10A의 전류에서 늘어뜨린 상태와 묶은 상태에서의 각 부위별 온도변화를 나타낸 것이다. (a)는 늘어뜨린 상태로 T1은 최고 29.45°C, T2는 31.33°C, T3은 31.96°C, T4는 35.84°C, T5는 32.87°C까지 온도가 상승하였다. 각 부위별 온도 차이가 크게 나지 않음을 알 수 있으며, 전선선의 외형적 변화는 발견되지 않았다. (b)는 묶은 상태로 T1은 최고 26.59°C, T2는 31.56°C, T3은 32.64°C, T4는 43.60°C, T5는 58.84°C까지 온도가 상승하였다. 각 부위별로 약간의 온도차를 나타냈으나 모두 전선의 허용온도 범위에 있었다.

(c)와 (d)는 20A의 전류에서 늘어뜨린 상태와 묶은 상태에서의 각 부위별 온도변화를

나타낸 것이다. (c)는 늘어뜨린 상태로 T1은 최고 46.34°C, T2는 57.87°C, T3은 63.63°C, T4는 82.86°C, T5는 81.95°C까지 온도가 상승하였다. 이때는 비닐전선의 허용온도인 60°C를 초과하여 열이 발생하였으며, 장시간 지속되면 열화가 촉진되어 전기재해가 발생하게 된다. (d)는 묶은 상태에서 10분 동안 전류를 흘렸을 때, T1은 최고 40.86°C, T2는 50.73°C, T3은 58.89°C, T4는 202.1°C, T5는 127.4°C까지 온도가 상승하였다. 과전류에 의해 발생한 열로 묶여진 부분의 전선피복이 심하게 녹아 서로 달라 붙었으며 전선피복에서 다량의 연기가 발생하였다. 이 상태로 지속되면 피복 용융으로 전선도체가 서로 접촉하여 단락에 의한 전기재해가 발생할 수 있다.

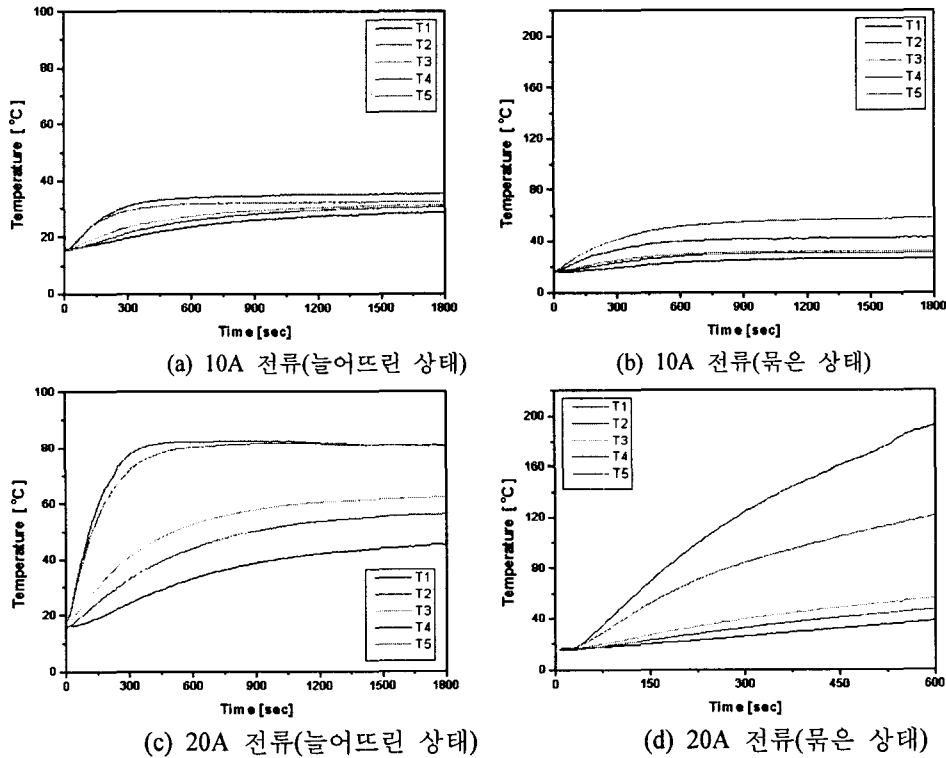


그림 3. 전선의 배치와 전류 크기에 따른 각 부위별 온도변화

3.3 과전류에 의해 용단된 전선도체의 외형 및 단면조직 분석

그림 4는 실체현미경과 금속현미경을 이용하여 과전류에 의해 용단된 전선도체의 외형 및 단면조직을 분석한 것이다.

(a)는 용단된 전선의 외형으로 소선들이 산화되었으며, 끝부분에는 용융흔이 형성되었다. (b)는 용융흔의 단면조직으로 과전류에 의해 용단될 때 생성된 수지상(dendrite) 조직을 확인할 수 있었다.

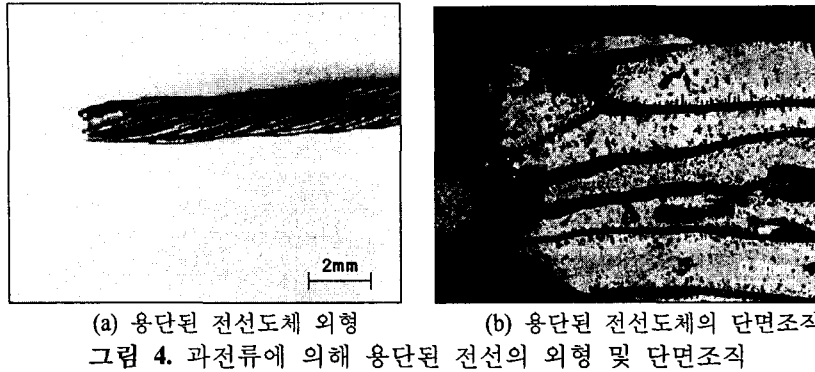


그림 4. 과전류에 의해 용단된 전선의 외형 및 단면조직

그림 5는 용단된 전선도체의 표면구조와 조성분포를 SEM과 EDX를 이용하여 분석한 것이다.

(a)는 용융된 도체 단면에 성장한 조직을 확대한 것으로 수지상의 조직들이 성장함을 볼 수 있다

(b)는 성장한 수지상 조직의 표면구조를 Cameo를 이용하여 분석한 것으로 녹색 부분은 구리(Cu)가 분포하는 곳을 나타내며, 적색으로 표시된 부분은 산소(O)가 존재하는 위치를 나타낸다.

(c)는 Linescan으로 성장한 조직의 조성분포를 분석한 것으로 분석결과는 (d)와 같다.

(d)는 (c)의 산소가 존재하는 부분을 경계로 구리와 산소의 조성분포를 나타낸 것으로 조직이 성장한 부분에 산소가 존재함을 알 수 있다.

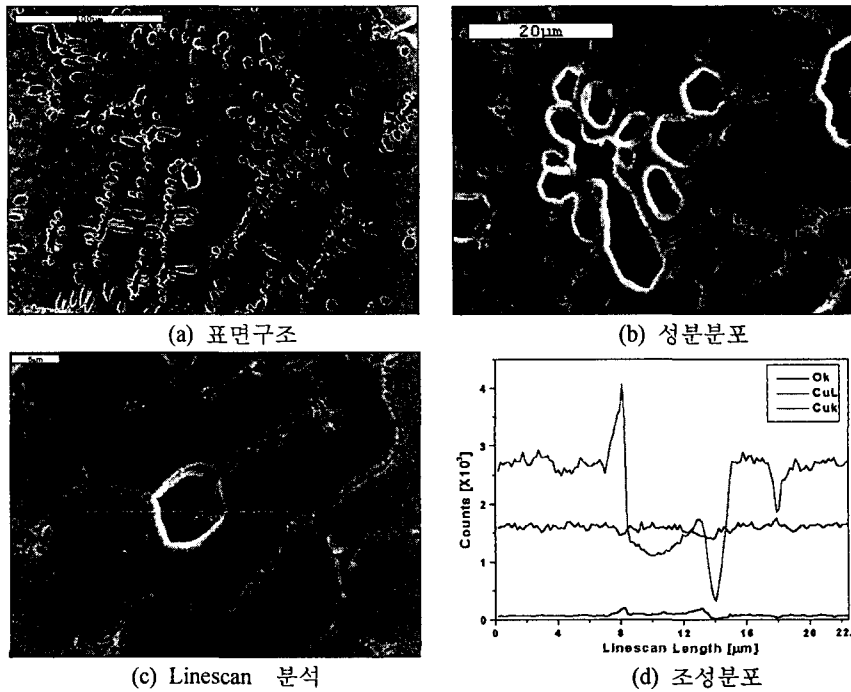


그림 5. 성장한 수지상 조직의 표면구조 및 조성분포 분석

4. 결론

일체형 비닐코드의 과전류 열화에 의한 열적 특성에 대하여 이상과 같은 실험과 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 과전류에 의한 전선피복의 열화과정을 분석한 결과, 전선도체에서 발생한 줄열에 의해 도체와 접촉한 전선피복 내부에서부터 점차 열화가 진행되어 피복이 뜨거워지고 연기가 발생하였으며 그 후 피복이 부풀어 올랐다. 시간이 경과함에 따라 강렬하게 유독성의 연기가 발생하였으며 피복은 외부까지 용융, 탄화되었으며, 전선도체는 적열한 후 용단하였다. 또한, 열화진행에 따른 피복의 단면구조를 분석한 결과, 전선도체와 접촉한 피복내부에 작은 구멍(홀)이 생성되었으며 점차 확대되어 피복 외부까지 진행되고, 도체와 접촉한 피복은 검게 탄화되고 전선도체서 탈락하였다.

2) 과전류에 의한 비닐코드 각 부위의 온도변화를 분석한 결과, 늘어뜨린 상태로 실험한 경우에는 플러그 몸체보다 연장코드의 온도가 가장 높게 나타났으며, 20A을 통전시켰을 때에는 전선피복의 허용온도를 초과하여 열이 발생하였다. 연장코드를 묶은 상태로 실험한 경우에도 플러그 몸체보다 연장코드의 온도가 훨씬 높게 나타났으며, 15A의 전류를 통전시켰을 때에는 연장코드 부분은 100°C이상으로 발열하여 늘어뜨린 경우보다 묶여있을 때가 화재 위험성이 높음을 알 수 있었다.

3) 용융된 전선도체의 외형과 단면조직을 분석한 결과, 과전류에 의해 전선도체가 용단되어 용융흔이 형성되었으며, 용단된 전선의 단면조직에서는 수지상조직이 성장함을 볼 수 있었다.

4) 성장한 수지상 조직의 표면구조 및 조성분포를 분석한 결과, 여러 형태의 수지상 조직을 볼 수 있었으며 수지상 조직은 구리(Cu)와 산소(O)가 결합한 산화동임을 확인할 수 있었다.

이상과 같은 실험과 분석결과는 일체형 비닐코드의 과전류 열화에 의한 전기재해 원인 분석 및 예방에 많은 도움을 줄 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. 행정자치부 소방국, "소방행정 자료 및 통계", 행정자치부, pp.167-168, 2003. 1.
2. 임의빈 외 5, "전기재해 통계분석", 한국전기안전공사, pp.7-23, 2002. 10.
3. 최충석 외 5, "과부하에 의해 변형된 비닐절연전선의 구조변화 분석", 한국전기전자

- 재료학회 하계학술대회, pp.398-401, 2002. 7.
4. 송길목 외 3, "Over-current에 의한 PVC insulated flexible cord의 전기화재 해석에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회, pp.131-133, 2003.
 5. 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.
 6. 製品評價技術センター北關東支所, "電線の熔融痕に関する一考察", 日本火災學會, Vol.48 No.1, pp34-37, 1998.
 7. Nasayoshi Nagata, "Firing Current and Energy Input of Polyvinyl Chloride Covered Cords Having Disconnected Element Wires", Bulletin of Japanese Association of Fire Science and Engineering, Vol.33, No.1, pp.1-2, 1983.
 8. Atila Mertol, "Estimation of Aluminum and Gold Bond Wire Fusing Current and Fusing Time", IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol.18 No.1, pp.210-214, 1995. 2.