

열 스트레스에 의한 비닐절연전선의 탄화 패턴 및 결정 구조의 변화

論 文
57P-3-22

Variation of Carbonization Pattern and Crystal Structure of Polyvinyl Chloride Wire Under the Thermal Stresses

崔忠錫[†] · 金珣坤^{*}
(Chung-Seog Choi · Hyang-Kon Kim)

Abstract - We analyzed carbonization pattern and crystal structure of polyvinyl chloride wire by thermal stress. Copper that is oxidized at normal temperature is a reddish brown. If under the thermal stress range of 500 to 700 [°C], carbonization and exfoliation occurrence. Section structure of electric wire is same as arrangement of particle in metallograph analysis. But, as thermal stress increases, size of particle is enlarged. Electric wire displays elongation structure in SEM image analysis and elongation structure collapses when receive thermal stress at 300 [°C]. In EDX analysis, we get the spectra of CuL, CuK, OK, and ClK. FT-IR analysis was shown new spectra with in range of 1,440~1,430 [cm⁻¹], 1,340 [cm⁻¹], 1,240 [cm⁻¹].

Key Words : Carbonization Pattern, Crystal Structure, Polyvinyl Chloride Wire, Section Structure, SEM, EDX, FT-IR

1. 서 론

도전 재료 중에서 Cu, Al은 가장 널리 사용되는 금속으로 전기와 열에 대해 양도체이고 연성이 좋으므로 가공이 용이하다. 또한, 화학적 저항력이 커서 부식되기 어려우며 아름다운 빛깔과 귀금속적 성질을 가지고 있으며, Zn, Sn, Ni, Au, Ag 등과 용이하게 합금을 만들 수 있다는 성질 때문에 전기 공업에 많이 이용된다. 그리고 전선의 절연물로 가장 많이 사용되는 폴리염화비닐수지(PVC; polyvinyl chloride resin)는 아세틸렌(acetylene)과 염화수소를 염화제2수은 촉매로 반응시키는 방법과 에틸렌클로라이드를 열분해하는 방법 등으로 제조된다. 염화비닐수지는 클로로에틸렌(chloroethylene)계의 단량체(monomer)로 CH₂와 CH의 2중 결합의 형태와 CH와 Cl의 단일 결합의 형태로 구성되어 있다. 흡습성, 내유성 및 내화학성 등이 양호하며, 산이나 알칼리 등에 안정하다는 장점을 갖고 있다. 또한, 연화점은 80°C 정도이며, 원하는 색으로 착색하기가 쉽다[1-2].

이러한 절연 물질이 열화(劣化)되면 본래의 절연 성능이 저하되어 전기 화재를 일으키는 대표적인 원인이 된다. 전선에 전기가 흐르면 필연적으로 전류에 의한 발열이 생긴다. 그러므로 절연물은 열화(劣化)되고 절연물이 견딜 수 있는 한계를 벗어나는 경우 손상 용해되어 단락, 과부하,

누전, 정전기 불꽃 등에 의해 전기화재로 이어질 수 있다. 2005년도 국민 일인당 전기사용량(consumption per capita)은 6,883 [kWh/man]으로 급속한 증가 추세를 보이며 그에 따른 재해의 발생으로 인명과 재산피해가 증가하고 있다. 2006년 국내 화재 통계 조사에 의하면 발생건수 31,778건에 사망 446명, 부상 1,734명으로 나타났다. 전체 화재 중에서 전기 화재는 9,392건으로 약 29.6 [%]를 점유하며, 사망 43명, 부상 299명으로 나타났다. 일반적으로 화재 현장의 원인 조사는 처음에 출화 개소를 한정하고 그 출화 개소에 존재하는 출화의 가능성이 있는 화원에 대해서 검증한다. 전기화재를 출화 형태로 분류하면 전기배선 및 전기기기에 의한 출화, 누전경로로부터 출화, 정전기 불꽃에 의한 출화 등으로 나누어진다. 줄의 법칙(Joule's law)에서도 알 수 있듯이 전선에 전류가 흐르면 필연적으로 발생한 열이 발산되지 못하고 축열되어 주위에 있는 가연성 물질의 착화 온도에 도달하면 화재가 발생한다. 즉 전기화재의 발생 원인을 정확히 입증하기 위해서는 금속 조직 분석, 사진 판독, 에너지 변화, 화염의 패턴 해석 등이 합해진 융합 기술이 필요하다[3-5].

화재가 발생하면 연소 물질에 따라 최고 온도의 차이는 다양하지만 일반적으로 최성기의 온도가 1,200~1,300 [°C]까지 상승하므로 목재, 플라스틱은 물론 도체인 구리도 용융시키게 된다. 구리는 1,083 [°C]에서 용융이 발생하며 공기 중의 산소와 반응하여 재결합하는 과정에서 산소의 함유율에 따라 생성되는 금속 조직의 조성 변화가 있다. 즉 화재 시 잔존물로 남은 전선의 탄화 패턴, 용융 흔적(molten mark), 금속 조직, 보이드(void) 및 조성 변화 등의 차이에서 출화의 원인을 알 수 있으며, 발화(출화) 원인을 밝히는 중요한 근거가 된다[6-9].

[†] 교신저자, 正會員 : 全州大學校 消防安全工學科 教授 · 工博
E-mail: enetek@naver.com/choi365@jj.ac.kr

^{*} 正會員 : 電氣安全研究院 災害豫防研究그룹 責任研究員
接受日字 : 2008年 5月 26日
最終完了 : 2008年 6月 20日

따라서 본 연구에서는 열 스트레스에 의한 비닐절연전선의 탄화 패턴 및 결정 구조 변화를 해석하기 위해 실체 현미경, 금속 현미경, 주사전자현미경(SEM), 에너지분산분석기(EDX), 적외선분광분석기(FT-IR) 등으로 분석하여 전기 화재 원인 판정을 위한 기법 정립의 자료로 활용하고자 한다.

2. 이 론

순동의 전기적 성질은 도전율, 고유저항, 온도계수 등에 의해서 좌우되고, 도전율에 영향을 미치는 불순물은 Ti, P, Fe, Si, As 등이며 Al, Sn, Mn, Ni 등의 함유량이 수 %에 이르면 도전율은 격감한다. Cu의 자기적 성질은 반자성이므로 자력선이 통과하기 어려우나 Fe를 0.04 [%] 함유하면 상자성으로 된다. 어느 온도 t [°C]에서 금속의 비저항은 일반적으로 다음 식으로 주어진다.

$$\rho_{\theta} = \rho_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$$

여기서, ρ_0 : 0 [°C]에서 Cu의 비저항

ρ_{θ} : t [°C]에서 비저항

$\alpha, \beta, \gamma, \dots$: 정수

따라서 전도도는 온도 상승에 따라 저하한다. 금속 도체에 쓰이는 비저항의 온도 계수(20 [°C])는 일반적으로 100 [%] 전도율을 곱하여 구한다. 따라서 순동에서는 $\alpha_{20} = N \times 0.00393$ 으로 주어지며, 전기동의 물리적 성질은 표 1과 같으며, 기계적 성질은 불순물의 함유량, 열처리 및 가공처리 등에 따라 다르다.

$$\text{단, } 0.00393 = \frac{R_t - R_{20}}{R_0(t - 20)}$$

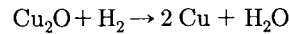
(100 [%] IACS에 대한 α_{20}) 여기서, N 은 IACS의 %이다.

표 1 구리의 물리적 특성

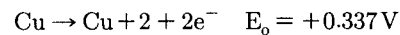
Table 1 Physical properties of Copper at 99.95 [%]

성 질	수 치
원 자 량	63.57
결정구조	면심입방격자, $a=3.6075$ [Å] at 20 [°C], 활면(111), 쌍정면(111)
밀 도	8.89 [g/cm ³] at 20 [°C]
액상선온도	1083 [°C]
고상선온도	1065 [°C]
비 점	2595 [°C]
열팽창율	16.8×10^{-6} at 20~100 [°C]
	17.7×10^{-6} at 20~300 [°C]
비 열	0.092 [cal/g/°C] at 20 [°C]
용해잠열	48.9 [cal/g]
증발잠열	1150 [cal/g]
열전도도	0.931 [cal/cm/cm/sec/°C] at 20 [°C]
탄성계수	12,000 [kg/mm ²]
용해 시 용적 변화	4.05 [%]

순동의 Cu는 상온의 건조한 공기 중에서는 그 표면이 변화하지 않으나, 대기 중에 방치하면 CO₂, SO₂ 및 수분 등의 작용에 의하여 표면에 녹색의 염기성탄산동 [CuCO₃ · Cu(OH)₂], 염기성황산동 [CuSO₄ · Cu(OH)₂] 등을 발생하며, 이것은 보통의 물에 불용성의 보호 피막 역할을 한다. Cu는 자연수 중에서도 보호 피막이 형성되기 쉽고 부식율이 대단히 적으므로 수관, 탱크, 열교환기 등에 널리 사용된다. 정련동(electrolytic tough pitch copper)에는 산소함량이 0.02~0.04 [%] 정도이며, 약 3.4 [%]의 Cu₂O가 공유 결합 결정이 되어 동철피 중에 공유 결합 결정 조직이 망상으로 존재한다. 주피를 가공하면 Cu₂O 상은 미립이 되어 분산하나 Cu₂O 상이 많을수록 가공성은 나빠지고 표면의 광택도 저하된다. Cu₂O상을 가진 Cu를 환원성의 수소가스 중에서 가열하면 Cu 중에 확산 침입한 H가 Cu₂O를 환원시켜 수증기가 발생된다.



발생한 수증기는 고압이 되어 미소 기포를 형성하거나 때로는 대단히 작은 헤어 크랙(hair crack)을 많이 일으키기도 한다. Cu 중의 O는 다소 있는 편이 좋으며, 만일 정제 시에 연마(polishing)를 과도하게 하여 O를 완전히 제거하면 용융 중의 H와 N이 증가되므로 유해하다. Cu는 대부분의 수용성 분위기에서 Cu + 2 이온을 생성하면서 부식된다.



그리고 염화물 용액에서 Cu⁺ 와 Cl⁻ 사이에 CuCl₂가 생성되는 경우처럼 Cu⁺가 부식 생성이 되는 경우도 있으며 고온의 대기 부식에서도 Cu₂O는 CuO보다 더 안정하다 [1-2].

3. 실험 방법

전선을 장시간 사용하면 여러 가지 요인에 의해 열화(劣化)가 지속되어 절연물의 열분해, 산화, 뒤틀림 등의 화학 반응을 일으켜 특성이 저하되어 전기설비 및 전기기기에 사고가 발생된다. 연구에 적용한 전선은 600V 비닐절연전선(600V Grade Polyvinyl Chloride Insulated Wire)을 사용하였으며, 실험 연구 대상 전선에 열 스트레스를 가했을 때 탄화 패턴 및 결정 구조 변화를 분석하기 위해서 그림 1과 같은 방법으로 시료를 준비하였다[10-11].

동일한 조건의 전선에 온도 변화를 주어 중량 감소를 측정하였으며, 도체 표면의 탄화 패턴은 실체 현미경(Steromicroscope, SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용했고, 단면의 구조 및 조성 변화를 분석하기 위해 금속 현미경(Metallurgical microscope, Nikon, Epiphot-200, Japan), 주사전자현미경(SEM; JEOL JSM-6400, Japan) 및 에너지분산분석기(EDX; Energy dispersive x-ray spectroscopy, Oxford, England) 등을 사용하여 해석하였다. 금속 현미경을 이용한 표면 구조 분석은 다이아몬드 절단기(Cutting machine, Struers, Denmark)를 이용하여 전선을 절단하고, 절단된 전선은 성형기(Mounting press, Struers, Prontopress-10, Denmark)로 고정시킨 후 연마기(Polisher machine, Struers, Rotopol-2

Pedemat, Denmark)를 이용하여 연마하였다. 연마가 끝난 시료는 크로머지를 사용하여 화학 부식(etching)하였으며, 과정은 그림 2와 같다. 또한, 염화비닐수지 절연물의 정성적인 분자량 분포 해석에는 적외선분광분석기(FT-IR, Perkin-Elmer, Spectrum-GX, England)를 사용하였다.

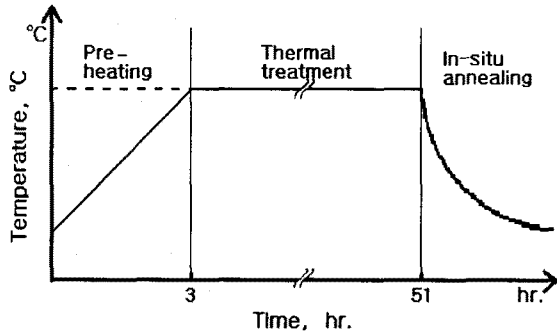


그림 1 비닐절연전선에 대한 열 스트레스 인가 과정
Fig. 1 Thermal stress supply process for polyvinyl chloride wire

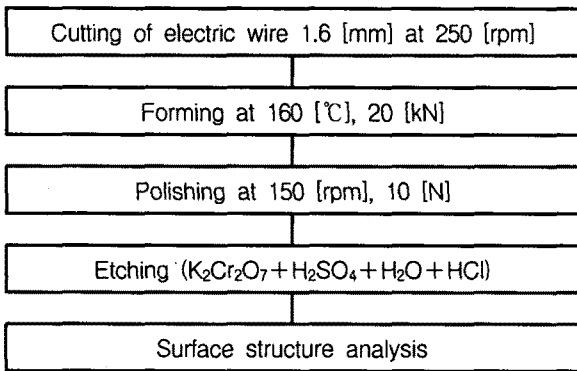


그림 2 구리 전선의 단면 구조 분석 과정
Fig. 2 Cross section structure analysis process of copper wire

4. 결과 및 고찰

도전 재료인 구리의 도전을 표시는 국제연동표준(IACS)을 이용하였으며 이것은 1913년 당시 양질인 시판동의 평균치를 100 [%]로 정하고 도전을 이것과 비교해 백분율로 나타낸 것이다. 실험에 사용된 1.6 [mm] 비닐절연전선을 그림 1과 같은 과정을 적용하여 48 [hr] 동안 열 스트레스를 인가하였을 때 탄화 패턴을 그림 3에 나타내었다. 구리 고유의 색은 그림 3(a)와 같이 밝은 적갈색을 나타내며 상온에서도 산화가 진행되었음을 알 수 있다. 그러나 150~300 [°C]에서 스트레스를 받은 전선은 더 어두운 적갈색 또는 갈색의 패턴을 보인다. 그러나 500~700 [°C]에서 스트레스를 받으면 탄화 및 박리가 발생하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 900~1,050 [°C]까지 온도가 증가함에 따라 박리가 더욱 심해지고 탄화물의 입자가 작아지는 것을 알 수 있다. 즉 외부 화염에 의해 스트레스를 받은 전선은 고유의 색 → 적갈색 → 탄화 및 박리 → 용융 및 단선의 과정을 거쳐 전선으로서의 기능이 소실됨을 알 수 있다.

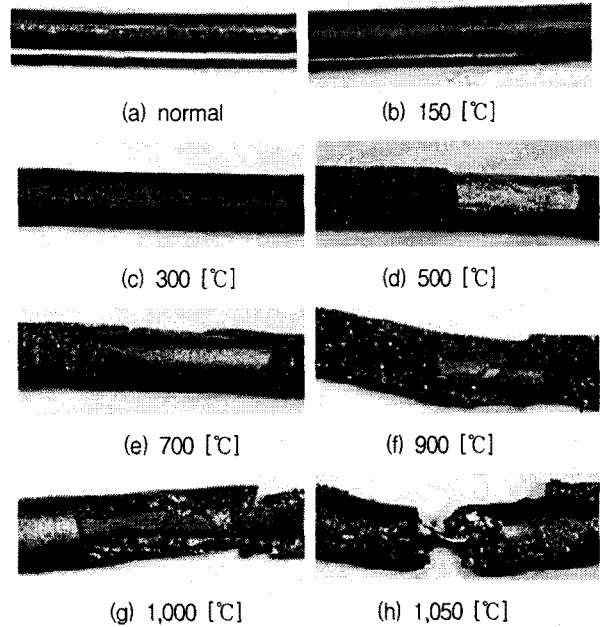


그림 3 탄화된 구리 전선의 실제 현미경 사진
Fig. 3 Stereoscopic microscope picture of charred copper wire

그림 4는 옥내용으로 사용되는 1.6 [mm] 비닐절연전선에 상온~1,050 [°C]까지 열 스트레스를 인가했을 때의 중량 감소를 측정하여 나타낸 것이다. 전선의 중량 변화는 700 [°C]까지 비교적 완만한 감소폭을 보이다가 그 이후부터는 급격히 중량 감소가 발생하여 1,050 [°C] 근처에서 용융과 더불어 완전히 소실되는 것으로 나타났다. 즉 화재 현장에 도달하는 최성기의 온도에 전선이 노출되는 경우 다양한 형태의 용융 전선이 발생할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 전선의 용융 패턴만을 보고 화재의 에너지원을 예측, 판단하는 것은 과학적인 입증이 수반되어야 한다.

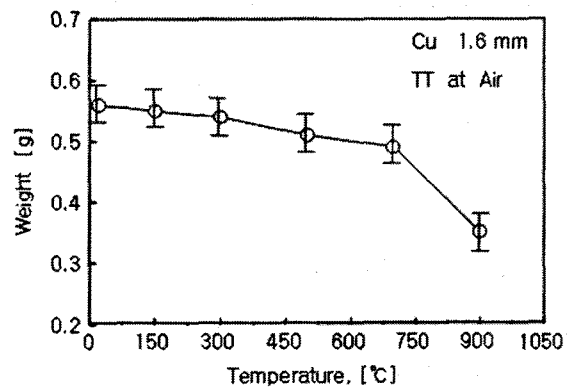


그림 4 열 스트레스에 의한 전선의 중량 변화
Fig. 4 Weight variation of electric wire on the thermal stress

그림 5는 열 스트레스를 받은 전선의 금속 단면 구조 해석을 위해 그림 2와 같은 과정을 거쳐 나타낸 금속 현미경 사진이다. 그림 5(a)는 전선 고유의 단면 구조로 입자의 배열이 비교적 균일한 형태를 보이고 있다. 그러나 열 스트레스가 증가함에 따라 입자의 크기가 확대되었음을 알 수 있

고, 900 [°C]에서 소손된 전선의 경우 그레인의 형태가 구리 단괴와 유사함을 알 수 있다. 또한, 1,000 [°C] 정도에 노출되면 그레인(grain)과 그레인의 경계가 매우 혼재된 형태로 비정질체의 특성을 보여 주고 있다.

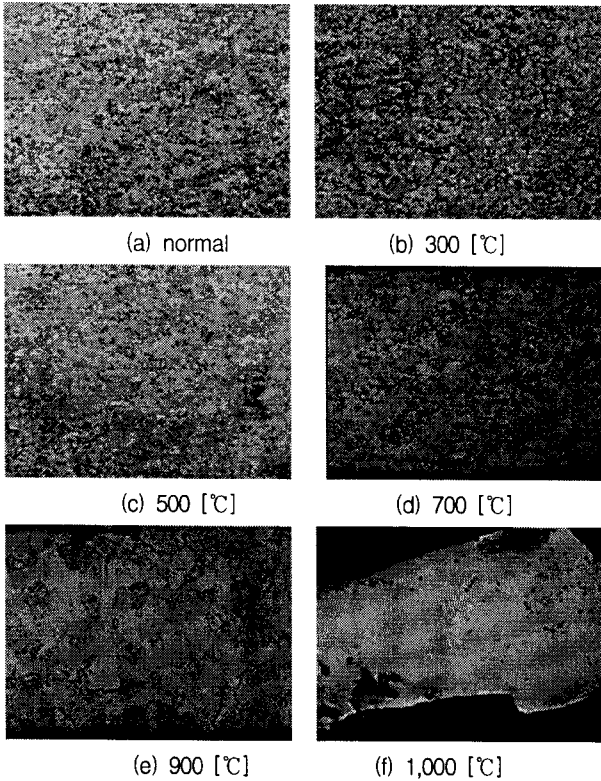
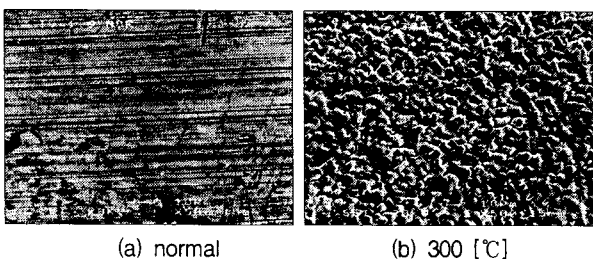


그림 5 구리 전선의 금속 현미경 단면 사진
Fig. 5 Metallograph section picture of copper wire

그림 6은 열 스트레스에 의해 소손된 구리 전선의 주사전자현미경(SEM) 사진이며, SEM의 이미지를 얻기 위한 작업거리 $W_d = 15[\text{mm}]$, 가속 전압 $V_{acc} = 20[\text{kV}]$ 의 상태에서 관측하였다. 그림 6(a)는 정상 전선의 단면 구조로 전선을 가공할 때 발생하는 연신 구조(elongation structure)가 잘 나타나 있고, 표면의 상태는 비교적 일정한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다. 300 [°C]에서 스트레스를 받은 경우 입자(grain)들의 연신 구조가 무너지고 구리 단괴 원래의 형태로 되돌아가려는 변화가 일어남을 알 수 있다. 500 [°C]에서 열 스트레스를 받으면 미소한 헤어 크랙(hair crack)이 형성되며, 700 [°C]에서는 헤어 크랙 사이에 새로운 탄화 입자가 균일하게 생성되는 것으로 판단된다. 온도가 더욱 높아져 900 [°C]에 이르면 입자(grain)는 급격히 커지며 직경은 15~20 [μm]로 성장함을 알 수 있다.



(a) normal (b) 300 [°C]

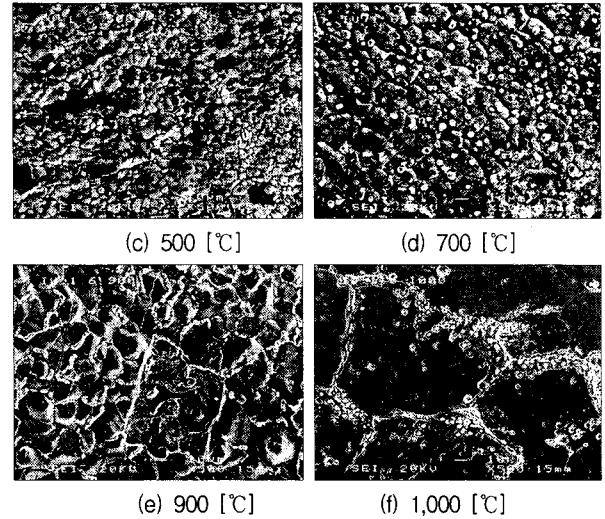
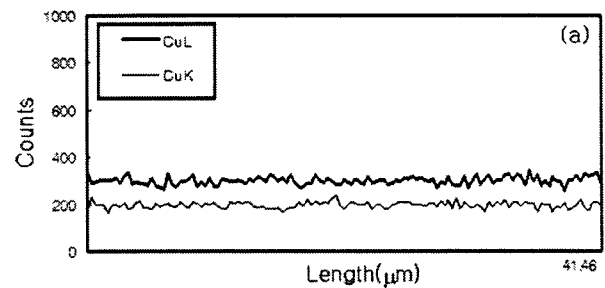
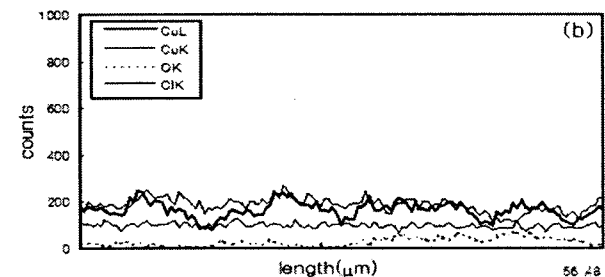


그림 6 구리 전선 단면의 SEM 이미지
Fig. 6 SEM image of copper wire section

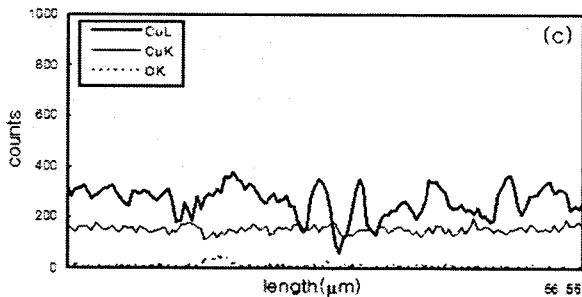
열 스트레스의 온도 변화에 따른 Cu의 조성 변화를 EDX를 이용하여 분석하였으며 이들을 그림 7에 나타냈다. EDX에 의해 분석된 라인 스펙트라에서 Cu의 특성을 좌우하는 주된 인자는 K와 L lines 이다. 그림 7(a)는 정상 전선의 EDX 스펙트라이다. 그림 7(b)는 300 [°C]에서 열 스트레스를 받은 전선의 CuL, CuK, OK, 및 ClK 스펙트라는 주사 길이에 관계없이 고르게 보이고 있다. 특히, Cl 스펙트라가 전체에 걸쳐 보이는 것으로 보아 절연물인 Cl이 금속 조직의 표면에 고르게 흡착하였음을 알 수 있다. 그림 7(c)와 (d)는 700 [°C] 및 900 [°C]에서 열 스트레스를 받은 IV의 Cu를 분석한 그림으로 CuL, CuK, OK 스펙트라가 보이고 있다. 그런데 CuL 스펙트라는 주사 길이의 변화에 따라 심하게 변화함을 알 수 있다. 또한, Cl 스펙트라는 발견되지 않았다. 각각의 스펙트라의 변화를 통해서 에너지의 차이를 알 수 있으며 이를 이용하여 전기 화재 해석이 가능한 것으로 나타났다.



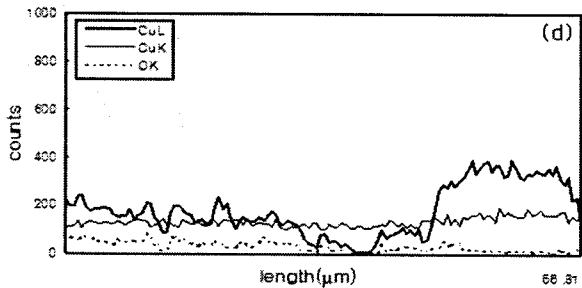
(a) normal wire



(b) 300 [°C]



(c) 700 [°C]



(d) 900 [°C]

그림 7 열 스트레스를 받은 전선의 EDX 스펙트라
Fig. 7 Energy dispersive x-ray spectra of electric wire on the thermal stress

표 2 클로로에틸렌 단량체의 FT-IR
Table 2 FT-IR band assignment of chloroethylene monomer

Material	Peak Position [cm ⁻¹]	Band Assignment
Chloroethylene	540~785 1,600~1,660 3,000	C-Cl stretching C=C stretching C-H stretching

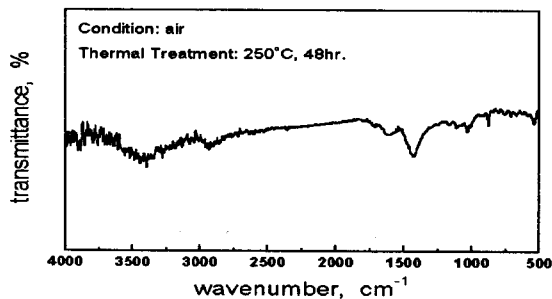


그림 8 열 스트레스 받은 전선의 FT-IR 스펙트럼
Fig. 8 FT-IR spectrum of electric wire on the thermal stress

폴리염화비닐수지는 클로로에틸렌(chloroethylene)계의 단량체(monomer)로 CH₂와 CH의 2중 결합의 형태와 CH와 Cl의 단일 결합의 형태로 구성되어 있으며 표 2와 같은 특성을 갖고 있다. 이런 폴리염화비닐의 적외선스펙트럼 분석은 필름법과 KBr법이 이용되고 있다. 연질인 비닐을 연화시켜 필름으로 만들어 분석하며, 열화(劣化)된 불포화염화비닐은 KBr 분말과 같이 가공하여 분석하게 된다. 그림 8은 KBr법에 의해 제작된 IV의 FT-IR 스펙트럼을 나타낸 것

이다. 이 그림에 나타난 바와 같이 클로로에틸렌 단량체의 기본 피크 외에도 1,440~1,430 [cm⁻¹] 부근의 -CH₂- 변각 진동, 1,340 [cm⁻¹] 및 1,240 [cm⁻¹] 부근의 -CH-Cl의 CH 변각 진동 등 스펙트럼이 관측되었다[12-15].

5. 결 론

육내용으로 가장 많이 사용되는 육내용 600V 비닐절연전선에 열 스트레스를 인가했을 때의 탄화 패턴 및 결정 구조 변화를 해석하기 위해 실체 현미경, 금속 현미경, 주사전자현미경(SEM), 에너지분산분석기(EDX), 적외선분광분석기(FT-IR) 등을 활용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 상온에서 산화된 구리는 적갈색을 나타내며, 500~700 [°C]에서 스트레스를 받으면 탄화 및 박리가 발생하고 있는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 900 [°C]를 넘으면 박리가 심해지고 탄화물의 입자가 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 열 스트레스를 받은 전선은 고유의 색 → 적갈색 → 탄화 및 박리 → 용융 및 단선의 과정을 거쳐 기능이 소실됨을 알 수 있었다.

(2) 열 스트레스를 인가했을 때의 중량 감소는 700 [°C]까지 비교적 완만한 감소폭을 보이다가 그 이후부터는 급격히 중량감소가 발생하여 1,050 [°C] 근처에서 용융과 더불어 완전히 소실되는 것을 알 수 있었다.

(3) 금속 현미경을 이용한 전선의 단면 구조 해석에서 정상 전선은 입자의 배열이 비교적 균일한 형태를 보이고 있으나 열 스트레스가 증가함에 따라 입자의 크기가 확대되었음을 알 수 있었다. 또한, 1,000 [°C] 정도에 노출되면 그레인(grain)과 그레인의 경계가 매우 혼재된 형태로 비정질체의 특성을 보여 주고 있다.

(4) SEM 이미지 분석에서 정상 전선은 연신 구조(elongation structure)가 잘 나타나 있고 일정한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다. 300 [°C]에서 열 스트레스를 받은 때 연신 구조가 무너지고, 500 [°C]에서는 적은 균열이 형성되며, 700 [°C]에서는 새로운 탄화 입자가 균일하게 생성되는 것으로 나타났다.

(5) EDX를 이용한 Cu의 조성 분석에서 300[°C]에서 열 스트레스 받은 전선은 CuL, CuK, OK, 및 ClK 스펙트라가 주사 길이에 관계없이 고르게 보이고 있고, Cl은 스펙트라 전체에 걸쳐 보이는 것으로 보아 절연물인 Cl이 금속 조직의 표면에 고르게 흡착하였음을 알 수 있다. 그리고 700[°C] 및 900[°C]에서 열 스트레스를 받은 전선은 CuL, CuK, OK 스펙트라가 보였으며, CuL 스펙트라는 주사 길이의 변화에 따라 심하게 변화함을 알 수 있었다.

(6) 폴리염화비닐의 FT-IR 분석에서 클로로에틸렌 단량체의 기본 피크 외에도 1,440~1,430 [cm⁻¹] 부근의 -CH₂- 변각 진동, 1,340 [cm⁻¹] 및 1,240 [cm⁻¹] 부근의 -CH-Cl의 CH 변각 진동 등 스펙트럼이 관측되었다.

참 고 문 헌

[1] David R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", CRC press, 76th Edition, pp.12-46~48, 1996.

[2] 한국사전연구사, “이화학사전”, pp.112-113, 1996.
 [3] 최충석 외 5, “전기화재공학”, 동서출판 동화기술, pp.193-216, 2004.
 [4] 최충석 외 5, “열 열화 온도에 따른 IV의 수축률 및 조직 분석”, 대한전기학회회계학술지, pp.1416-1418, 2003.
 [5] 한국전기안전공사, “전기재해통계분석”, pp.7-16, 2007.
 [6] 三橋 信雄, 横井 良秀, 長田 正義, 伊坂 勝生, “絶縁被覆電線の劣化履歴と火災危険について”, 火災, Vol.31, No.1, pp.11-19, 1981.
 [7] 石橋 良男, 岸田 順次, “電線の一次, 二次熔融痕 鑑定方法に關する研究(その1),(その2)”, 日本火災學會研究發表會概要集, pp.83-90, 1990.
 [8] Bruce V. Ettlting, “Electrical Wiring in Building Fires”, Fire Technology, Vol.14, No.4, pp.317-325, 1978.
 [9] D. W. Levinson, “Copper Metallurgy as a Diagnostic Tool for Analysis of the Origin of Building Fires”, Fire Technology, Vol.19, No.1, pp.211-222, 1983.
 [10] KS C 3302, 3325, “한국산업규격”, 1992.
 [11] KS C 3004, “한국산업규격”, 1992.
 [12] The Infrared Spectroscopy Committee, “An Infrared Spectroscopy Atlas for the Coatings Industry Federation of Societies for Coatings Technology”, Philadelphia, 1980.
 [13] 一般分析化學編, 高分子分析ハンドブック, 朝倉書店, 1985.
 [14] P. J. Flory, “Statistical Thermodynamics of Rodlike Particles, 6. Rods Connected by Flexible Joints”, Macromolecules, vol. 11, pp.1141-1144, 1978.
 [15] W. Wrasidlo, “Transitions and Relaxations in Aromatic Polymers”, J. Polymer Sci., Vol.A-2, No.9, pp.1603-1627, 1971.

저 자 소 개



최 충 석 (崔 忠 錫)

1991년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업.
 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원전기공학과 졸업(박사). 1993년 나고야대학 초청연구원. 1994~1995년 구마모토대학 객원연구원. 2006년 3월~2006년 12월 서울대학교 산업안전최고전략과정 수료. 1997년 3월~2008년 2월 전기안전연구원 과장/그룹장/수석연구원/부원장. 2008년 3월~현재 전주대학교 소방안전공학과 교수
 Tel : 063-220-3119
 Fax : 063-220-3119
 E-mail : enetek@naver.com/choi365@jj.ac.kr



김 향 곤 (金 珮 坤)

1970년 12월 14일생. 1996년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1996년~현재 전기안전연구원 재해예방연구그룹 책임연구원. 2006년 9월~현재 조선대학교 공과대학 전기공학과 박사과정
 Tel : 031-580-3031
 Fax : 031-580-3045
 E-mail : kon0704@kescor.or.kr