

열처리 조건에 따른 비닐절연전선의 특성 변화

최충석*, 박창수*, 송길목*, 이경섭**, 이덕출***
 전기안전시험연구원*, 동신대학교**, 인하대학교***

Characteristics of Vinyl Insulated Wire with Thermal Treatment Conditions

C. S. Choi*, C. S. Park*, K. M. Shong*, K. S. Lee** and D. C. Lee***
 KESCO ESLRI*, Dongshin Univ.** and Inha Univ.***

Abstract - The composition, weight decrease, DTA, and surface structure of vinyl insulated wire with thermal treatment conditions have been investigated. The composition of Cu by EDX analysis indicates Cu, Cl, and O lines, and oxidation reaction results from thermal treatment. Thermal treated IV and HIV appeared chemical reaction at 269 °C and 265 °C, respectively. SEM of thermal treated Cu at 250°C disappears an elongation structure, and appears an original structure.

여기서, ρ_T 는 온도 T[K]에서 불순물을 함유한 Cu의 비저항, ρ_{Cu} 및 ρ_i 는 각각 Cu 및 불순물원소의 비저항, P는 용적분율(원자분율)로 나타낸 불순물의 함유량이다.

표 1 Cu의 전기적 성질(99.95%)
 Table 1 Electric properties of Copper(99.95%)

성 질	수 치
도 전 율	약 101% (IACS 기준)
고유저항	1.71 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ (20°C)
온도계수	0.00397/°C (20°C)
대 자 율	-0.080 $\times 10^{-6}$ cgs단위/g (20°C)

1. 서 론

전기제품은 사용의 편리성과 간편성으로 다양한 제품이 보급되면서 전기재해도 매년 증가함에 따라 안전하게 전기제품을 사용하기 위해서는 보다 신뢰성이 요구된다. 전체화재 중 전기로 인한 화재가 '96년에는 34.9[%]의 높은 점유율을 보였으며 피해 또한 점점 대형화되어 가고 있는 추세이다.[1]

전선 재료 중 Cu는 Al과 더불어 비철금속재료 가운데 가장 널리 사용되는 금속 중의 하나이다. 이 도체에 에너지를 인가하면 전류에 의한 발열과 전극간의 방전이 수반되어 재해로 이어지는 경우가 있다.

전기화재는 제품자체가 소실되기 때문에 정확한 화재 원인을 밝히는 것은 대단히 어려운 일이다. 즉, 화재 잔존물로 남은 전선의 전기적 용융흔의 형상, 금속조직, 보이드(Void) 등의 차이에서 직접출화의 원인이 되는 용융 흔인가 아닌가를 판별하는 방법이 발화(출화) 원인을 해명하는데 중요한 방법중의 하나이다. 일반적으로 동은 산소와 화합하는 경우 산소의 함유율에 따라 생성하는 금속조직의 차이가 발생한다.

따라서 본 연구에서는 EDX, DTA 및 SEM 등을 이용하여 옥내용 비닐절연전선의 온도 의존성을 분석함으로써 인가 에너지의 차에 따른 영향을 밝혀 전기재해의 원인을 규명하고자 한다.

2. 이 론

2.1 동 의 전기적 특성

순동의 전기적 특성은 표 1과 같고 도전율에 영향을 미치는 불순물은 Ti, P, Fe, Si, As 등이며 Al, Sn, Mn, Ni 등도 함유량이 수 %에 이르면 도전율은 격감한다. 고용체를 이루는 불순물이 비저항에 미치는 영향은 근사적으로는 다음과 같은 $\rho_T = (1 - P)\rho_{Cu} + P \cdot \rho_i$ 법칙에 따라서 변화한다.

Cu의 자기적 성질은 반자성이므로 자력선이 통과하기 어려우나 Fe를 0.04[%] 함유하면 상자성으로 된다. 어느 온도 t°C에서 금속의 비저항은 일반적으로 다음 식으로 주어진다.

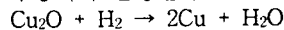
$$\rho_\theta = \rho_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$$

여기서, ρ_0 는 0°C에서 Cu의 비저항, ρ_θ 는 t°C에서 비저항이고 $\alpha, \beta, \gamma \dots$ 는 정수이다. 따라서 전도도는 온도 상승에 따라 저하한다.

2.2 동 의 물리화학적 특성

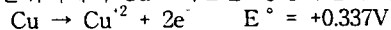
전기동의 물리적 성질은 표 2와 같으며, 기계적 성질은 불순물의 함유량, 열처리 및 가공처리 등에 따라 다르다. Cu는 상온의 건조한 공기 중에서는 그 표면이 변화하지 않으나, 대기 중에 방치하면 CO₂, SO₂ 및 수분 등의 작용에 의하여 표면에 녹색의 염기성탄성동[CuCo₃·Cu(OH)₂], 염기성황산동[CuSO₄·Cu(OH)₂] 등을 발생하며, 이것은 보통의 물에 불용성의 보호피막 역할을 한다.

정련동(Electrolytic tough pitch copper)에는 산소함량이 0.02~0.04[%] 정도이며, 약 3.4[%] Cu₂O의 공유결합 결정이 되어 동철피층에 공유결합 결정조직이 망상으로 존재한다. 주피를 가공하면 Cu₂O 상은 미립이 되어 분산하나 Cu₂O 상이 많을수록 가공성은 나빠지고 표면의 광택도 저하된다. Cu₂O상을 가진 Cu를 환원성의 수소가스 중에서 가열하면 Cu중에 확산 침입한 H가 Cu₂O를 환원시켜 수증기가 발생된다.



발생한 수증기는 고압이 되어 미소기포를 형성하거나 때로는 대단히 작은 hair crack을 많이 일으키기도 한다.

Cu중에 O는 다소 있는 편이 좋으며, 만일 정제시에 polishing을 과도하게 하여 O를 완전히 제거하면 용융중의 H와 N이 증가되므로 유해하다. Cu는 대부분의 수용성 분위기에서 Cu²⁺ 이온을 생성하면서 부식된다.



그리고 염화물용액에서 Cu⁺와 Cl⁻ 사이에 CuCl₂가 생성되는 경우처럼 Cu⁺가 부식생성이 되는 경우도 있으며 고온의 대기부식에서도 Cu₂O는 CuO 보다 더 안정하다.[2-4]

표 2 Cu의 물리적 성질(99.95%)
Table 2 Physical properties of Copper(99.95%)

성질	수치
원자량	63.57
결정구조	면심입방격자, a=3.6075Å (20°C), 활면(111), 쌍정면(111)
밀도	8.89 g/cm ³ (20°C)
액상선온도	1083°C
고상선온도	1065°C
비점	2595°C
열팽창율	16.8×10 ⁻⁶ (20 ~ 100°C) 17.7×10 ⁻⁶ (20 ~ 300°C)
비열	0.092cal/g/°C (20°C)
용해잠열	48.9cal/g
증발잠열	1150cal/g
열전도도	0.931cal/cm ² /cm/sec/°C (20°C)
탄성계수	12,000kg/mm ²
용해시용적변화	4.05%

3. 실험방법

전선 피복재료로 쓰이는 비닐을 장시간 사용하거나 고온에 노출된 경우 열열화로 인해 열분해, 산화, 뒤틀림 등의 화학반응을 일으켜 전기적, 기계적 특성이 저하되어 전기설비 및 전기기기의 재해를 유발하게 된다.

육내배선에 쓰이는 저압용 비닐절연전선을 40[mm]로 절단하여 세라믹 도가니에 넣어 전기로(Shinsung, R-type)를 이용하여 48 시간 열처리하였다.[5] 처리된 전선의 중량감소를 측정하였으며, 성분변화는 에너지분산형분광분석기(Energy Dispersive X-ray Spectrometer; EDX)로 분석하였다. 또한, 절연물의 열적 특성변화는 열시차분석기(Differential Thermal Analysis; DTA)를 이용하여 분석하였다. 그리고 전선의 표면구조는 SEM(JSM-6400)을 이용하여 관측하였다.

4. 결과 및 고찰

도전을 표시는 국제연동표준(IACS)을 이용하며 이것은 1913년 당시 양질시판동의 평균치를 100[%]로 정하고 도전율을 이것과 비교해 백분율로 나타낸 것이다.

1.6[mm] 연동선을 상온~1.100[°C]까지 열처리하여 중량감소를 측정된 결과를 그림 1에 나타냈다. 이 그림에서 알 수 있듯이 온도의 증가에 따라 중량감소가 이루어지고 있으며 900[°C] 이상에서는 중량이 급격한 감소되고 1000[°C] 이상에서는 용해되었다. 비교적 일정한 열처리온도 변화에 따른 Cu의 조성변화를 EDX를 이용하여 분석하였다. Cu의 특성을 좌우하는 주된 인자는 K line과 L line이다. 따라서 열처리에 따른 Cu의 에너지분산파장은 그림 2에 나타냈다. 그림 (a)는 normal 전선 Cu의 L line과 K line이 고르게 보이고 있다. 그림 (b)와 (c)는 250[°C]에서 열처리한 IV와 HIV를 각각 나타내고 있다. 그림 (b), (c)

경우그림 (a)에서 볼 수 없었던 O의 K line과 Cl의 K line이 보이고 있다. 이것은 250[°C]에서 48시간 동안 열적스트레스를 받음으로 인해 Cl이 녹아 Cu로 스며들어 갔음을 의미하고, 산화반응이 일어난 것을 알 수 있다. 그리고 Cu의 L line도 normal Cu에 비하여 많은 차이를 보이고 있다. 즉, 이와 같이 열에너지 따라 각각의 line 변화를 통해서 에너지원의 차에 따른 조성변화를 예측할 수 있을 것으로 생각된다.

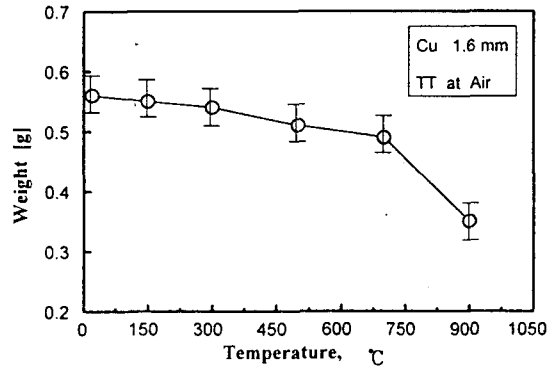


그림 1 열처리온도에 따른 구리의 중량감소
Fig. 1 Weight decrease of copper with thermal treatment temperature

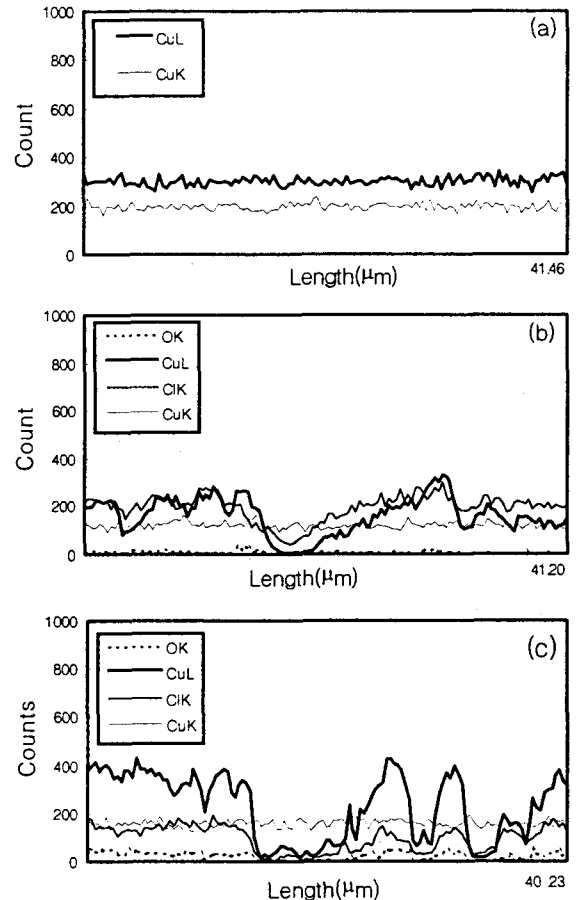


그림 2 에너지변화에 따른 조성분포 (a) normal, (b) IV, and (c) HIV
Fig. 2 Composite distribution with energy variation (a) normal, (b) IV, and (c) HIV

짧은 시간에 재료의 열특성을 추정하는 시험법으로 열시차분석이 이용되고 있다. 이 방법은 일정한 속도로 온도를 변화시키에 따라 시료의 물리적, 화학적 변화로 인한 열적 특성 변화를 알아낼 수 있다. 600[V] 비닐절연전선의 DTA 곡선을 그림 3에 나타냈다.

비닐절연전선의 열처리(Thermal Treatment : TT)는 100[°C]에서 48 시간 실시하였다. 600[V] IV의 경우 269[°C], 303[°C], 420[°C], 455[°C]에서 흡열반응이 일어나고, 저온 영역이 고온영역보다 반응이 급하게 일어남을 보이고 있다. 그리고 600[V] HIV의 흡열반응은 265[°C], 309[°C], 381[°C]에서 일어나며 471[°C] 이상에서 열분해가 일어남을 알 수 있다. IV와 HIV의 반응성을 비교해 보면 약 265[°C]부터 절연물의 화학적 변화가 시작됨을 알 수 있다.

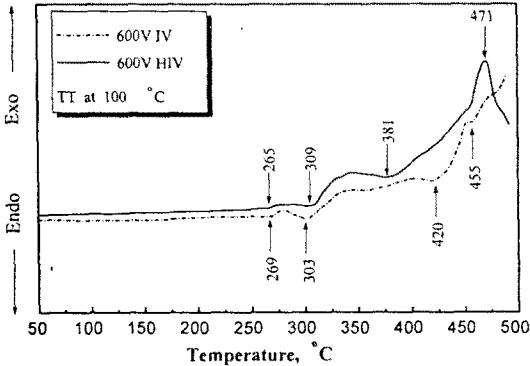


그림 3 비닐절연전선의 DTA 곡선
Fig. 3 DTA curves of vinyl insulated wire

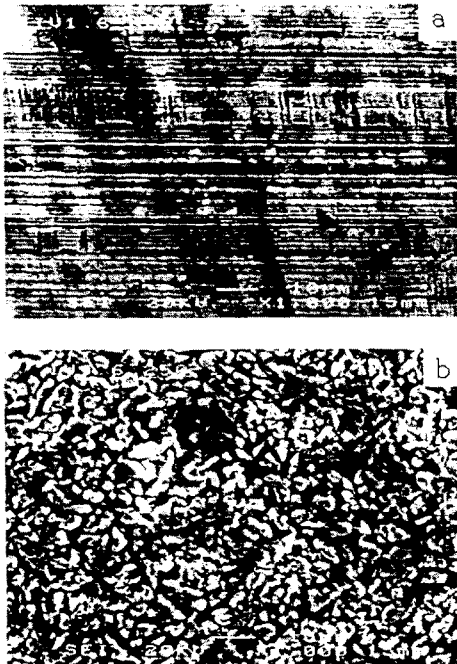


그림 4 Cu의 SEM 사진 (a) normal, (b) IV, (c) HIV
Fig. 4 Scanning electron micrographs of (a) normal, (b) IV, and (c) HIV coppers

그림 4는 열처리한 IV와 HIV의 Cu SEM 사진이다. 사진 (a)는 1.6(mm) 연동선의 사진으로 전선본래의 연신된 구조가 보이고 있다. 그림 (b)와 (c)는 IV와 HIV를 250[°C]에서 열처리한 Cu의 표면구조이다. 이 사진에서 보는 바와 같이 연신된 구조가 많이 변형되었으며 Cu 고유의 결정이 주류를 이루고 있고 비교적 규칙성을 갖고 있음을 알 수 있다. 특히, 그림 (c)는 결정의 모양이 클러스터(Cluster)와 같은 구조를 하고 있음을 보이고 있다. 이런 특징은 Cu의 조성변화가 있었음을 의미한다.

5. 결 론

일반 설비에 가장 많이 사용되는 옥내용 비닐절연전선의 온도 의존성을 EDX, DTA 및 SEM을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전선의 중량은 900[°C] 이상에서 급격히 감소되고 1000[°C] 이상에서는 용해되기 시작했다.
2. 열처리한 IV와 HIV의 EDX 조성분석은 Cu의 L, K line 뿐만 아니라 O의 K line과 Cl의 K line이 나타난 것으로 보아 Cl이 Cu로 스며들어갔고, 산화반응이 일어난 것을 알 수 있다.
3. 600[V] 비닐절연전선의 절연물을 DTA 분석한 결과 IV는 269[°C], HIV는 265[°C]에서 화학적 변화가 시작됨을 알 수 있었고, HIV는 471[°C]에서 열분해가 시작되었다.
4. 600[V] IV와 HIV를 250[°C]에서 열처리한 Cu의 표면구조를 분석한 결과 연신된 본래의 구조가 없어지고 Cu 고유의 결정이 주류를 이루고 있고 비교적 규칙성을 갖고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결과로 보아 금속의 표면구조 및 조성변화, 절연물의 화학적 특성을 분석함으로써 전기화재의 원인을 과학적으로 규명할 수 있는 가능성이 입증되었으며, 향후 지속적인 연구를 통해서 전기화재 발생원인 및 예방에 기여를 할 것으로 생각된다.

(참 고 문 헌)

- [1] 한국전기안전공사, "전기화재통계분석", 1997
- [2] 양훈영, "금속재료학", 문운당, 1996
- [3] 성영권, "전기·전자재료", 동명사, 1986
- [4] 홍중휘, "금속재료", 보성문화사, 1997
- [5] KS C 3004, "한국산업규격", 1992