

열적 스트레스 변화에 따른 600V 비닐절연전선의 특성 분석 The Properties Analysis of 600V Grade Polyvinyl Chloride Insulated Wire with Variation of Thermal Stress

최 충 석[†]

Chung-Seog Choi[†]

한국전기안전공사부설 전기안전시험연구원
(2001. 02. 08 접수/2001. 02. 24 채택)

요 약

본 연구에서는 600V 비닐절연전선에 열적 스트레스를 인가하였을 때 전선의 특성 변화를 분석하였다. 전선의 구조 분석에서 정상 전선은 표면에 방향성을 갖고 있으나, 400°C 이상에서 열화된 전선의 경우 탄화물, 크랙, 결정 등이 형성되었다. 정상 전선의 표면 조성은 Cu ; 100%였으나, 800°C에서 열화된 전선의 단면 조성은 Cu ; 78.89%, O ; 21.11%를 나타냈다. 연동선의 시차주사열량 분석 결과 700°C 이상에서 열화된 전선에서 새로운 반응 피크가 관측되었다. 절연물의 시차열 분석에서 150°C로 열화된 전선의 경우 정상 전선의 반응점보다 낮은 264°C에서 흡열 반응이 나타났다. 동선의 열화에 따른 산소 점유율은 500°C에서 약 20%이다.

ABSTRACT

In this paper, we analyzed the properties change of electric wire when the thermal stress was applied to 600V grade polyvinyl chloride insulated wire (IV). In the structure analysis, normal wire has the properties of direction on the surface, but in case of deteriorated wire at above 400°C, it formed the carbide, the crack and the crystal. The surface composition rate of normal wire was Cu ; 100%, but the section composition of the deteriorated wire at 800°C showed Cu ; 78.89%, O ; 21.11%. In result of analyzing the differential scanning calory of copper wire, the new reaction peak was observed on the deteriorated wire at above 700°C. In case of the deteriorated wire as 150°C at the differential thermal analysis, an endothermic reaction appeared at 264°C lower than the reactive point of normal wire. The occupation rate of oxygen according to the deterioration of copper wire is about 20% at 500°C.

Keywords : 600V grade polyvinyl chloride insulated wire, Deteriorated wire, Differential scanning calory, Differential thermal analysis, Endothermic reaction

1. 서 론

옥내용 전선의 도전재료는 연동선이 주로 사용되고 있으며, 절연재료는 클로로 에틸렌을 주성분으로 한 컴파운드(compound)가 사용되고 있다. 전선을 장시간 사용하게 되면 전기적, 열적, 기계적, 화학적, 환경적 요인 등에 의해 열화가 진행되며, 도체 및 절연물의 열분해, 산화, 뒤틀림 등에 의한 특성 저하로 전기설비 및 전기기기에 재해가 유발하게 된다.¹⁾

2000년도 행정자치부의 화재 발생 현황을 살펴보면, 1999년도 총 화재건수가 33,856건으로 이 중 전기화재가 차지하는 비율은 1998년 10,897건에서 11,204건으로 300여건이 증가하고 전체화재의 33.1%를 차지하고 있다. 해마다 전기화재의 점유율은 점차 감소하고는 있지만, 선진 외국과 비교하면 월등히 높은 수치이다.²⁾

1999년 전기화재를 원인별로 살펴보면 단락(합선)에 의한 화재가 76.5%로 가장 높은 점유율을 보이며, 전년도와 비교하여 9.0%가 증가한 11,204건 중 8,572건을 차지하고 있다. 과부하와 누전이 각각 6.9%와 7.1%씩 차지하고 있다. 화재는 한번 발생하면 수많은 인명

[†]E-mail: ccseog@netian.com

피해와 재산피해를 가져오게 되는데, 최근 들어 대형 화재의 발생빈도가 높아지고 있는 실정이다. 이에 전기화재를 미연에 방지하고 예방대책의 수립이 절실히 요구되고 있으나, 선진국과 비교할 때 아주 미미한 실정이며 전기화재를 전문으로 연구하는 기관은 손으로 꼽을 만큼 적다. 또한, 전기화재의 정확한 원인을 분석하는 감지기법도 기초단계에 머무르고 있는 실정이다.^{3,6)}

따라서, 본 연구에서는 600V 비닐절연전선(IV; 600V Grade Polyvinyl Chloride Insulated Wire)을 비통전 상태에서 전기로를 이용하여 열 열화(熱劣化)시켰을 때 특성변화를 실체 현미경, 금속 현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 전선의 외형, 절단면의 조직, 표면구조 등을 분석하고, 에너지분산X선분석기(EDX) 및 시차주사열량계(DSC)에 의한 조성과 열량 변화 분석을 통하여 전선의 열 의존도를 해석하고자 한다. 또한, 본 실험 결과는 화재현장에서 수거된 전선의 화재 원인 감정 및 전기설비의 안전한 운용에 적용하고자 한다.

2. 실험 방법

실험에 사용한 전선은 IV(600V Grade polyvinyl chloride insulated wire) 1.6 mm로, 절단기를 이용하여 50 mm의 길이로 절단하고 피복을 제거하였다. 절단 중의 열에 의한 영향을 최소화하기 위하여 냉각수를 순환시켰으며, 절단한 시료는 증류수로 세척하여 오염을 제거하였다.

실험에 적용한 IV를 동일한 조건에서 열적 스트레스를 인가하기 위해 전기로(Electric Muffle Furnace, Model SSH-1500, Shinsung Co.)를 이용했다. 이때 온도는 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C, 1,000°C, 1,100°C 등에서 이루어 졌으며 과정은 그림 1과 같다.⁷⁾

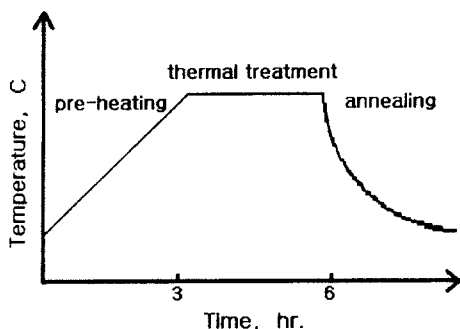


Fig. 1. 전선의 열적 스트레스 인가 조건

열화된 IV의 표면 변화 해석은 실체 현미경(Stereo microscope, Model SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용했으며, 단면구조 분석은 금속 현미경(Metallurgical microscope, Model Epipoht, Nikon, Japan) 및 주사전자현미경(SEM; Scanning electron microscope, JSM-6400, JEOL, Japan)을 이용했다. 조성의 변화는 에너지분산X선분석기(EDX; Energy dispersive X-ray spectrometer, Ultracool, Oxford, England)를 이용하여 해석하였다. 또한, 열화된 전선의 열량 변화 분석은 열분석기(DSC/DTA; TA Instrument, Model SDT-2960, USA)를 이용하였다.

금속 현미경을 이용한 전선의 단면 구조 분석을 위해 다이아몬드 절단기(Cutting machine, Model Minitom, Struers, Denmark)를 이용하여 절단하였으며, 절단된 전선은 성형기(Mounting press, Model Predopress, Struers, Denmark)로 고정시킨 후 연마기(Polisher machine, Rotopol-2, Struers, Denmark)를 이용하여 연마하였다. 연마가 끝난 시료는 크로머지로 에칭(etching)하였으며 과정은 그림 2와 같다.⁸⁾

3. 실험결과 및 고찰

그림 3은 과열된 전선을 실체 현미경을 이용하여 10 배 확대 관찰한 것으로 열적 스트레스의 상승에 따라 전선의 산화가 왕성했음을 보이고 있다. 그림 (a)는 정상 전선을 나타내 것이며, 그림 (b)는 300°C에서 열화된 전선이다. 그림 (c), (d) 및 (e)는 400°C, 600°C 및 800°C로 열화된 전선으로 산화에 의해 도체표면의 크랙 현상이 나타났으며 쉽게 도체로부터 이탈하였다. 즉

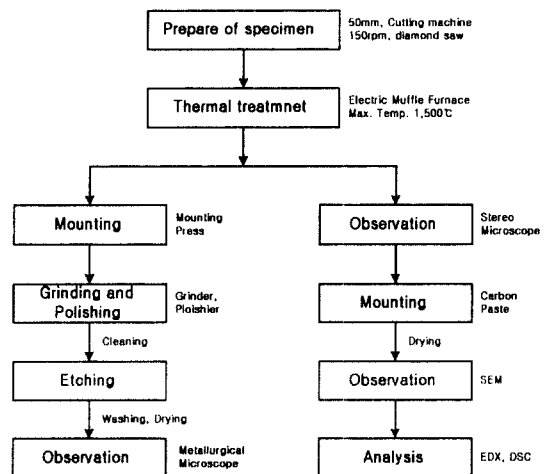


Fig. 2. 전선의 열화 및 분석 과정

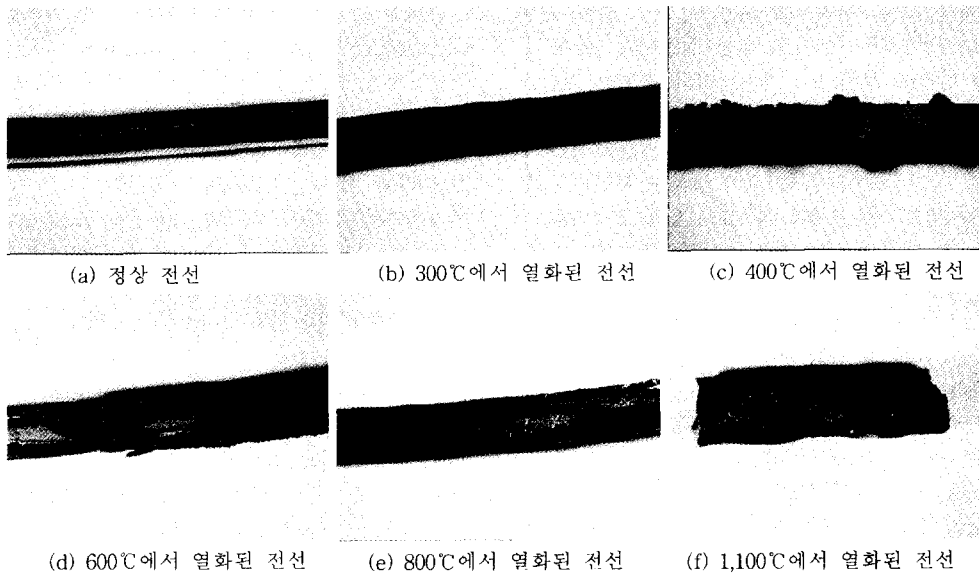


Fig. 3. 열적 스트레스를 받은 전선의 실제 현미경 사진(mag.×10)

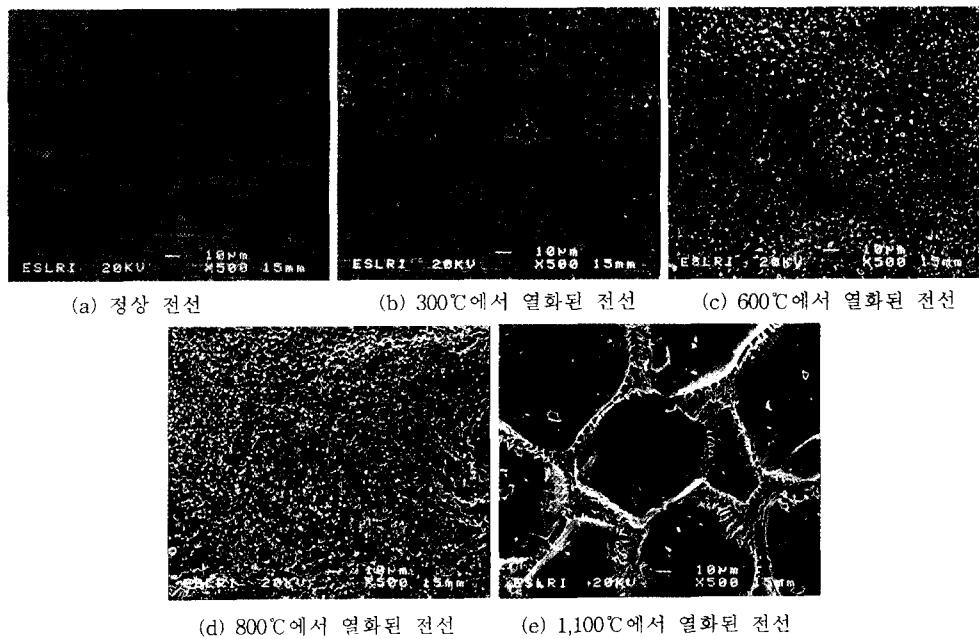


Fig. 4. 열화된 전선의 SEM 사진

전선표면의 산화에 의한 탄화물이 생성되고 점차 탄화물의 생성이 내부로 확산되고 있음을 알 수 있다. 그림 (f)는 1,100°C에서 열적 스트레스를 받은 것으로 형태가 심하게 변형되었고 전체적으로 탄화물로 바뀌었음을 알 수 있다.

그림 4는 주사전자현미경에 의해 나타난 단면 구조로 분석 조건은 $V_{acc}=20kV$, $W_d=15mm$, $Mag.\times 500$ 이다. 그림 (a) 정상 전선의 SEM 사진이며 전선 제조시 생성된 길이 방향의 구조(연선 구조)가 존재하고 있다. 그림 (b)는 300°C에서 열화된 전선의 표면 구조를 나

타낸 것으로 정상 전선과 특이한 차이는 없고, 길이 방향의 결정성이 잘 나타나 있다. 그림 (c)와 (d)는 600°C 및 800°C에서 각각 열화된 전선으로 원형의 결정이 형성되었다. 특히, 그림 (d)의 경우 결정이 더욱 커진 것으로 보아 열적 스트레스의 강도가 증가하면 입자가 성장한다는 것을 알 수 있다. 그림 (e)는 1,100°C에서 열화된 전선을 나타낸 것이다. 전선의 용융 온도 1,083°C 이상의 에너지에 의해 새로운 결합의 형태를 보이고 있다. 즉 입자도 규칙성을 가지고 성장했으며 경계면을 따라 미세한 구조가 형성되었다.

그림 5는 금속 현미경을 이용하여 전선의 단면 결정 구조를 100배로 확대하여 분석한 것이다. 그림 (a)는 정상 전선으로 배열의 규칙성을 나타내고 있으며, 그림 (b)는 500°C에서 열화된 전선으로 열적 스트레스에 의해 연신 구조가 풀리면서 결정 입계 사이로 쌍정 조직이 커지며, 전선 외부의 입자 조직이 내부 입자 조직에 비해 크게 성장하여 외부 과열 전선임을 입증하는 판정의 기준이 된다. 그림 (c)는 800°C에서 열화된 전선으로 탄화물의 내부 증식이 증가하였으며, 입자의 수가 현저하게 감소하고 커졌으며 쌍정 입자가 관측된

다. 이는 상당히 높은 온도로 과열되었을 때만 나타나는 면심입방격자(FCC; face-centered cubic lattice) 금속의 특징으로 화재현장 전선의 열적 스트레스 영향 여부를 결정하는 단서가 될 수 있다. 그림 (d)는 1,100°C에서 열화된 전선으로 크래킹 현상이 내부까지 진전되었으며, 입자도 불규칙한 모양으로 성장하였고 경계면을 따라 탄화물이 형성되었다. 이러한 크래킹 현상은 과전류를 통전시켰을 때는 나타나지 않은 것으로 보아 열에 의해 열화되었을 때 일어나는 현상이라 판단된다.

그림 6은 그림 4의 해석 조건에서 에너지분산X선 분석기(EDX)를 이용하여 전선 단면의 조성 변화를 분석한 것이며, 분석 조건은 $V_{acc}=20\text{ kV}$, $W_d=15\text{ mm}$, $Mag.\times 500$ 이다. 그림 (a)는 정상 전선의 표면 조성을 분석한 것이며 Cu ; 100%이다. 그림 (b)는 200°C에서 열화된 전선의 표면 조성을 분석한 것으로 Cu ; 89.34%, O ; 4.84%, C ; 5.83%를 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 도체 표면의 산화 및 탄화가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 그림 (c)와 (d)는 600°C 및 800°C에서 각각 열화된 전선의 단면 조성으로 Cu

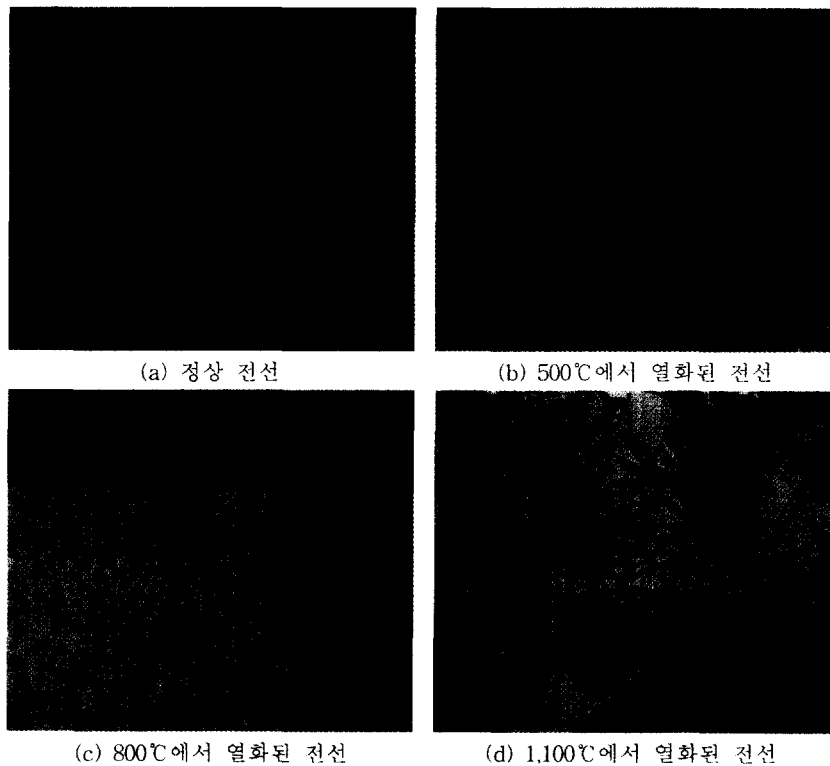


Fig. 5. 열화된 전선의 금속 현미경 사진(mag.×100)

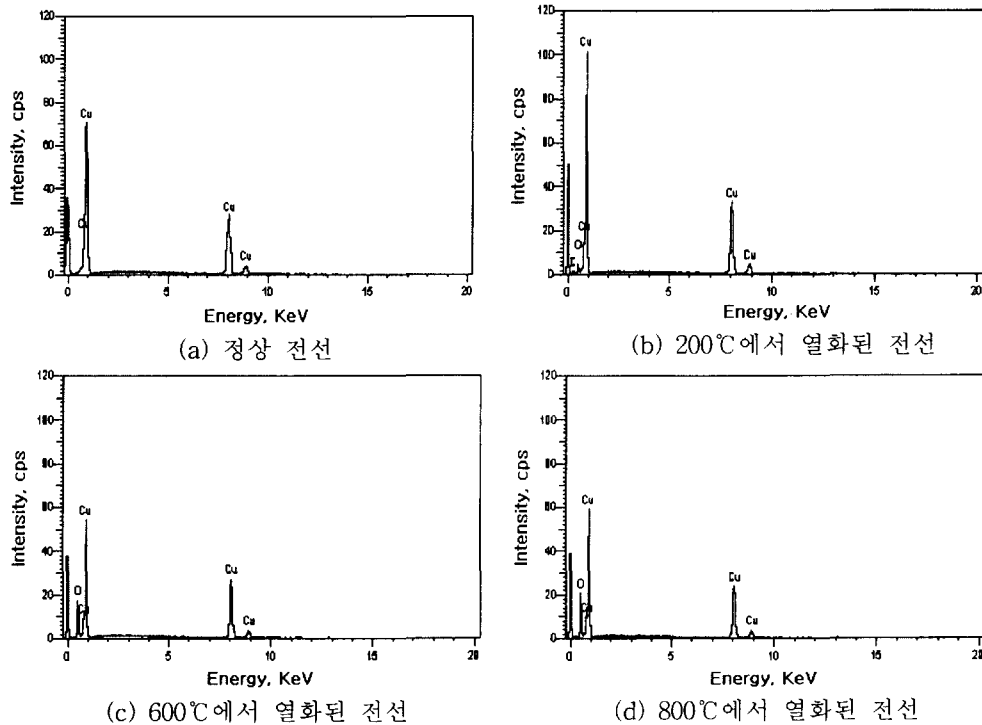


Fig. 6. EDX에 의한 전선의 성분 분석

; 82.47%, O ; 17.53% 및 Cu ; 78.89%, O ; 21.11%를 나타냈다. 즉 열적 스트레스의 증가에 따라 산화가 왕성히 일어나고 있음을 보이고 있다. 또한, 사고 현장에서 전선이 어느 정도 열적 스트레스를 받았는가를 판정하기 위해서는 표면 및 단면의 조성 분석이 병행되어야 한다는 것을 말해주고 있다.

그림 7은 시차주사열량계(DSC)를 이용하여 과열된 전선의 열 특성을 분석한 것으로 분석 조건은 20°C/min으로 상온에서 1,300°C까지 승온하였으며, 분위기 가스는 N₂를 사용하였으며 100 ml/min으로 흘려주었다. 그림 (a)는 정상 전선으로 동의 용융 온도 부근인 1,076.66°C에서 열량 변화를 나타냈으며, 그림 (b)는 500°C에서 열화된 전선으로 동의 용융 온도 부근인 1,080.66°C에서 열량 변화를 나타냈고, 그림 (c)는 700°C에서 열화된 것으로 새로운 피크가 나타나기 시작했으며 1,068.0°C에서 열량 변화를 나타냈다. 그림 (d)는 900°C로 열화된 전선으로 동의 용융 온도 부근인 1,066.67°C에서 큰 열량변화를 나타냈으며, 아산화동의 용융 온도 부근인 1,201°C 부근에서도 작은 열량변화를 나타냈다. 정상 전선에서 900°C로 열화된 전선의 열량 변화를 살펴보면, 동의 용융 온도 부근에서 열량변화가

크게 나타났으나, 점차 아산화동의 용융 온도 부근에서의 열량변화가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로 볼 때, 점차 구리에서 아산화동으로 조성 변화가 진행되고 있음을 알 수 있으며, 그림 (e)는 1,000°C로 열화된 전선으로 1,078.66°C 부근에서는 약간의 열량 변화가 나타나며, 1,244°C에서 큰 열량 변화를 나타냈다. 그림 (f)는 1,100°C로 열화된 전선으로 1,232.85°C 부근에서 열량 변화를 나타냈다. 그림(e)와 (f)에서 알 수 있듯이 동의 용융 온도 부근에서 보다 아산화동의 용융 온도 부근에서의 열량 변화가 많음을 알 수 있으며, 전선의 열화 온도가 높아짐에 따라 점차 동이 아산화동으로 변함을 알 수 있다.⁹⁻¹¹⁾

그림 8은 IV 절연물의 반응성을 분석하기 위해 시차열 분석기를 이용하여 분석하였다. 일반적으로 유기질 절연재료(PVC)의 연화 온도는 약 150°C이고 염화비닐의 낮은 열분해 온도는 약 200°C이다. 용융점은 273°C이며 300°C에서 염화비닐의 높은 열분해가 일어난다. 인화 온도는 391°C에서 시작되며 유기질 절연재료가 발화되는 시점은 약 454°C에서 일어난다. 그림 (a)의 정상 전선의 경우 온도가 상승하면서 발생하는 304°C, 424°C 및 470°C에서 열을 흡수하는 반응이 나

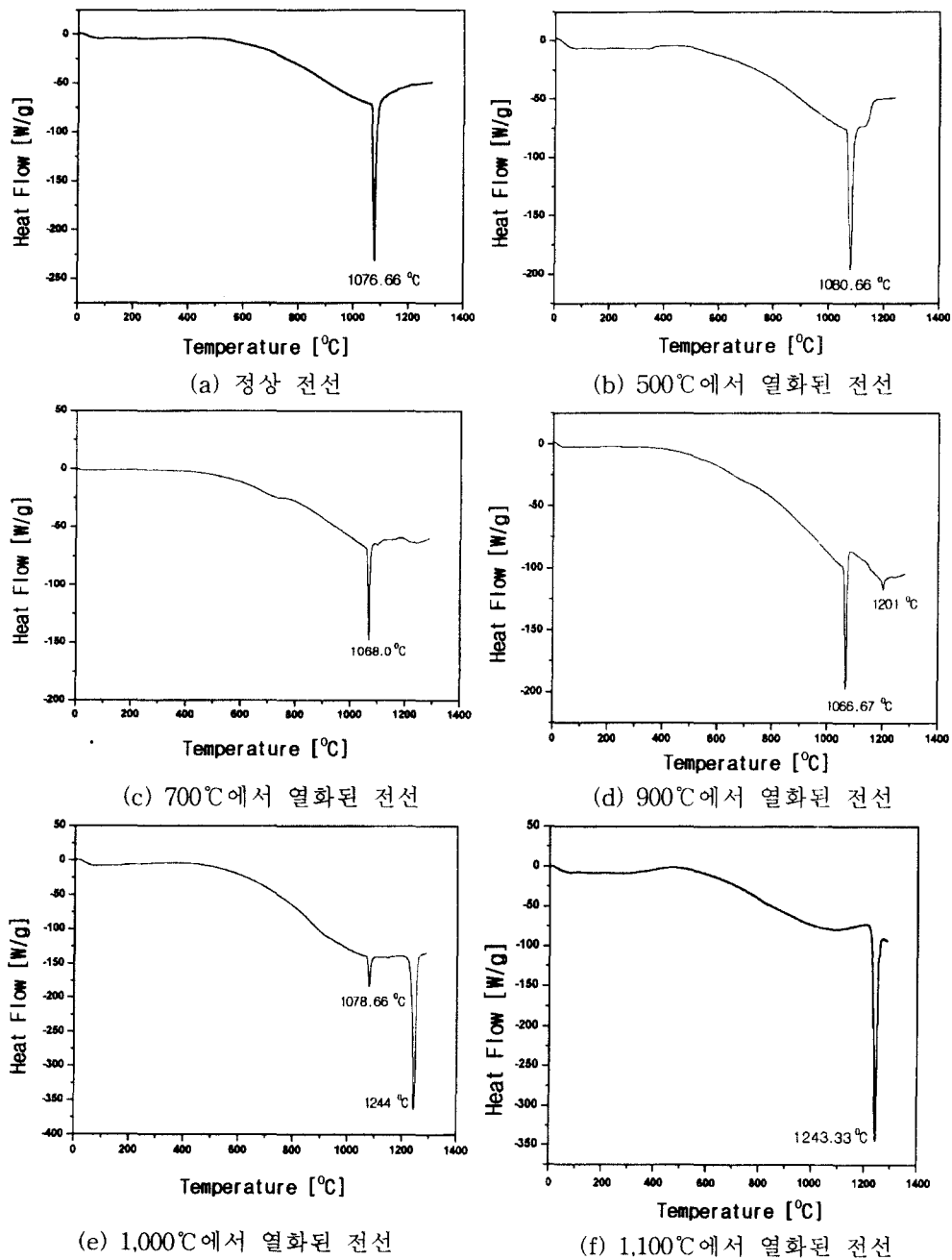


Fig. 7. 열화된 전선의 DSC 분석

타났다. 그림(b)의 곡선은 150°C에서 열화된 전선의 열 반응을 나타낸 것으로 정상 전선의 반응점보다 낮은 264°C에서 흡열 반응이 나타났고, 492°C에서 마지막 발열 반응을 나타냈다.^{13,14)}

그림 9는 전선이 열적 스트레스를 받았을 때 어떤 성분의 변화가 있는지 EDX에 의해 해석한 것이다. 연동선의 산화 반응에 대한 온도 의존성을 보면 열화 온도가 200°C 정도에서 반응이 활성화되어 500°C에서 산

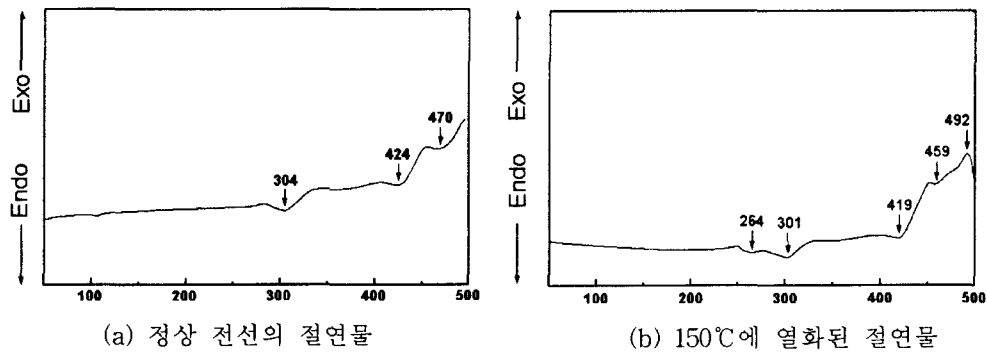


Fig. 8. IV 절연물의 DTA 곡선

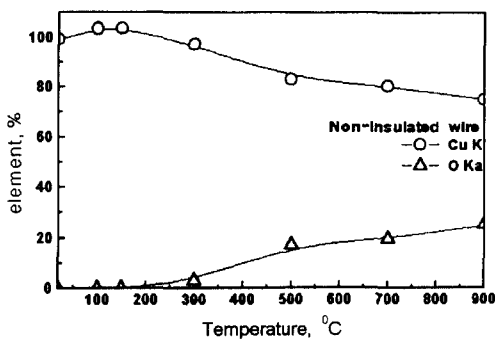


Fig. 9. 열화에 따른 전선의 조성 분석

소의 점유율이 약 20%이며, 그 이상의 온도에서는 비교적 완만한 증가율을 나타낸다. 이것은 연동선의 용융점이 1,083°C이므로 도체에는 큰 영향이 없을 것으로 판단되나, 절연물의 절연 성능에는 밀접한 관계가 있으므로 설비 운용에 주의가 요망된다.

5. 결 언

600V 비닐절연전선에 열적 스트레스를 인가하였을 때 전선의 특성 변화를 실체 현미경, 금속 현미경, SEM, EDX, DSC, TGA 등으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전선의 표면구조 분석에서 정상 전선은 표면에 연신 구조가 있으나, 400°C 및 600°C로 열화된 전선은 산화에 의해 도체 표면에 탄화물과 크랙 현상 등이 나타났으며 쉽게 도체로부터 이탈하였다.
2. SEM에 의한 단면 구조 분석에서 600°C 이상에서 열화된 전선은 원형의 결정이 형성되었으며, 1,100°C에서 열화된 전선은 육각형 또는 오각형의 새로운 결정의 성장과 더불어 경계면을 따라 미세한 결정이 성

장했다.

3. 금속 현미경 분석 결과 500°C에서 열화된 전선은 연신 구조가 풀리면서 결정 입체 사이로 쌍정 조직이 커지고 외부의 입자 조직이 내부 입자 조직에 비해 크게 성장된 것을 알 수 있었다.

4. 정상 전선의 표면 조성을 EDX로 분석한 결과 Cu ; 100%이며, 800°C에서 열화된 전선의 단면 조성은 Cu ; 78.89%, O ; 21.11%를 나타냈다. 즉 사고 현장에서 전선이 어느 정도 열적 스트레스를 받았나를 판정하기 위해서는 표면 및 단면의 조성 분석이 병행되어야 한다는 것을 말해주고 있다.

5. DSC 분석 결과 700°C 이상에서 열화된 전선에서 새로운 반응 피크가 관측되었고, 1,000°C에서 열화된 전선은 1,244°C에서 급격한 열량 변화를 나타냈다.

6. 절연물의 시차열 분석에서 150°C로 열화된 전선의 경우 정상 전선의 반응점보다 낮은 264°C에서 흡열 반응이 나타났고, 492°C에서 마지막 발열 반응을 나타냈다.

7. 연동선의 산화 반응에 대한 온도 의존성을 보면 열화 온도가 200°C 정도에서 반응이 활성화되어 500°C에서 산소의 점유율이 약 20%이며, 그 이상의 온도에서는 비교적 완만한 증가율을 나타낸다.

참고문헌

1. David R. Lide, "Handbook of Chemistry and Physics", CRC Press, pp.464-633(1997).
2. 이준, 황병표, "전기재해통계분석", pp.7-16, 한국전기안전공사 전기안전시험연구원(2000).
3. 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, pp11-19(1981).
4. 石橋 良男, 岸田 順次, "電線の一次, 二次熔融痕鑑定方

- 法に関する研究(その1), (その2)”, 日本火災學會研究發表會概要集, pp83-90(1990).
5. NITE, “An Examination about Molten Mark of Copper Electric Wire Fused by Over Current”, Jpn. Asso. for Fire Sci. and Eng., 232, Vol. 48, No.1, pp.34-37(1998).
 6. 岡本 勝弘, 渡邊 憲道, 萩本 安昭, “電源接續箇所の接觸抵抗の變化によるプラグ絶緣材料の熱劣化”, 日本火災學會研究發表會概要集, pp178-181(1998).
 7. KS C 3004, 3302, “한국산업규격”(1992).
 8. 최충석, 백동현, “형광등용 안정기의 화재원인 판정에 관한 연구”, 한국화재·소방학회논문지, Vol. 14, No. 3, pp1-5(2000).
 9. 川瀬太郎, “電線接續部と電氣火災”, 日本火災學會誌, Vol. 32, No. 6, pp43-45(1982).
 10. 科學警察研究所, “電氣的接續部における酸化物の生成と發光發熱現象”, 科學警察研究所報告法科學編, Vol. 49, No. 1,2, pp31-37(1996).
 11. 科學警察研究所, “銅線の接續部における電氣的赤熱現象”, 科學警察研究所報告法科學編, Vol. 41, No. 3, pp30-37(1988).
 12. P. J. Flory, “Statistical Thermodynamics of Rodlike Particles, 6. Rods Connected by Flexible Joints”, Macromolecules, Vol. 11, pp.1141-1144 (1978).
 13. W. Wrasidlo, “Transitions and Relaxations in Aromatic Polymers”, J. Polymer Sci., Vol. A-2, No. 9, pp.1603-1627(1971).