

Copper Oxide Growing Characteristics of PVC Insulated Wire and Application to the Fire Investigation

金 珣 坤* · 崔 忠 錫** · 金 桐 郁*** · 崔 孝 祥†
 (Hyang-Kon Kim · Chung-Seog Choi · Dong-Ook Kim · Hyo-Sang Choi)

Abstract - This paper describes characteristics for copper oxide growth of polyvinyl chloride(PVC) insulated wires by series arc. In this experiment, 600 V IV wires were used, and characteristics of oxide growth and ignition process were analyzed in case load was 300 W, 460 W and 600 W, respectively. In the result of experiment, covering materials were molten, carbonized and ignited, whereas, oxidized materials were grown in conducting material. During copper oxide was growing, contact voltages and power dissipations increased. When there is copper oxide growth, the waveform of current showed sinusoidal waveform, and the waveform of voltage showed modified waveform. Oxidized materials were heated at about 905 ℃, surface structure showed irregular shapes, and cross-section showed multiple cracks. And, the results of this experiment were applied to the fire cause analysis of fire evidence collected at the fire scene.

Key Words : PVC Insulated Wire, Copper Oxide, Glowing, Fire Investigation, Contact Voltage

1. 서 론

전기는 우리의 일상생활에 있어 없어서는 안 될 중요한 에너지원인 동시에 국가 산업발전의 원동력이다. 국가 경제의 성장과 더불어 우리의 일상생활을 편리하게 해주는 다양한 전기제품 및 설비가 보급되고 있으며 해마다 전력사용량이 급증하고 있다. 이렇게 우리에게 유익한 전기는 사용자의 과실, 설비 불량, 노후, 제품 결함 등 다양한 원인에 의해 감전사고, 화재사고, 설비사고 등 전기재해가 발생하고 있다. 화재 통계에서도 알 수 있듯이 우리나라의 화재 발생원인 중 전기에 의한 화재가 매년 30 % 이상을 점유하고 있어 이에 대한 국가의 정책적인 지원과 국민적 관심이 필요하다 하겠다. 전기화재는 화재분류상 C급화재로 분류되며 전류가 흐르는 동안에는 항상 열이 발생하며 발열과 방열의 균형이 무너지거나 아크나 스파크 등 전기적 현상에 의해 주위의 가연성 물질이나 가스에 착화하여 화재를 일으키게 된다. 전기화재의 발생경과를 살펴보면 설계 및 구조 불량, 취급 불량, 공사 불량, 경년 열화 등을 들 수 있으며 출화 형태를 살펴보면 전기배선 또는 전기기기로부터의 출화, 누전에 의한 출화, 정전기 불꽃에 의한 출화 등을 들 수 있다. 전기화

재의 발생원인을 살펴보면 단락(합선)에 의한 화재, 과부하(과전류)에 의한 화재, 누전에 의한 화재, 반단선에 의한 화재, 절연열화에 의한 화재, 접촉불량에 의한 아산화동증식발열 및 이상발열에 의한 화재, 방전에 의한 화재, 정전기 불꽃에 의한 화재, 은 이동에 의한 화재 등으로 분류할 수 있다[1]. 특히, 전선 도체가 피복 내에서 단선된 경우 도체의 접촉에 의한 발열로 전선 피복이 탄화하거나 발생한 아크에 의해 절연물이 착화하여 화재가 발생하게 된다. 또한, 도체 접촉부에서 진동에 의한 아크로 도체는 산화하여 산화물을 증식시키고 이상발열 현상을 일으키게 된다. 이러한 동전선의 접촉부에서의 이상발열과 산화물의 성장은 전기설비 및 전기제품, 장치 등에서 전압강하나 불필요한 전력소비 등 전 원품질에 좋지 않은 영향을 준다. 또한, 이상발열에 의해 주위의 피복이나 가연물을 용융, 착화시켜 화재를 일으키기도 한다. 미국, 일본 등 외국에서는 도체 접촉부에서 접촉(접속) 불량에 의한 발열로 설비사고나 화재를 일으키는 메커니즘을 해석하고 이를 예방하기 위한 다양한 연구[2]~[4]가 이루어지고 있다. 국내에서도 동도체에서의 접촉불량에 대한 화재발생 메커니즘과 발열특성에 대한 연구를 진행 중에 있으며 다양한 실험과 분석결과를 바탕으로 전기재해 예방을 위한 대책을 수립하고자 노력하고 있다[5]~[6].

2. 본 론

2.1 접촉불량

전기를 전달하는 도체의 접속(접촉)에서의 접촉저항에 대한 이론적 설명, 접속(접촉) 터미널에서의 열화 메커니즘, 도체의 온도상승 계산, 최대허용온도 등에 대하여 IEC 60943(Guidance concerning the permissible temperature

† 교신저자, 終身會員 : 朝鮮大學校 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

* 正 會 員 : 電氣安全研究院 災害豫防研究그룹 責任研究員

** 正 會 員 : 電氣安全研究院 災害豫防研究그룹 首席研究員

*** 正 會 員 : 電氣安全研究院 災害豫防研究그룹 研究員

接受日字 : 2006年 11月 14日

最終完了 : 2006年 12月 12日

rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals)에서 설명하고 있다. 도체의 접속부에는 접촉저항(R_c ; contact resistance)이 존재하고 이는 집중저항(R_e ; constriction resistance)과 경계저항(R_i ; film resistance)로 구성된다. 집중저항(R_e)이란 전류의 통로가 좁아짐으로 해서 생기는 저항을 말하며 접촉력이 클수록, 도체의 저항률이 작을수록, 금속의 경도가 낮을수록 작아진다. 경계저항(R_i)은 도체가 외부 공기에 노출됨으로 해서 생기는 산화막 형성 등에 의한 저항을 말한다. 집중저항(R_e)과 경계저항(R_i)의 계산식 (1)과 (2)로부터 접촉저항(R_c)의 계산식은 (3)으로 나타낼 수 있으며, 여기서 ρ 는 금속의 저항, n 은 접촉점의 수, a 는 도체의 지름, σ_0 는 터널저항(표면저항)을 나타낸다[7,8,9].

$$R_e = \frac{\rho}{2na} \quad (1)$$

$$R_i = \frac{\sigma_0}{\pi a^2} \quad (2)$$

$$R_c = R_e + R_i = \frac{\rho}{2na} + \frac{\sigma_0}{\pi a^2} \quad (3)$$

터널저항(σ_0 ; tunnel resistivity, surface resistivity)은 산화물의 성질과 산화물의 두께에 좌우된다. 산화물의 두께는 일반적으로 10 nm를 넘지 않는다. 표 1에 대표적인 도전재료인 동(copper), 은(silver), 알루미늄(aluminium)의 터널저항을 나타냈다. 접촉저항은 일반적으로 접속(접촉)부를 통해 흐르는 전류와 접속(접촉)부 사이의 전압강하를 측정하여 계산한다.

표 1 대표적인 금속의 터널저항 값

Table 1 Tunnel resistivity of typical metal

metal	state	tunnel resistivity($\sigma_0, \Omega m^2$)
copper	new	$2 \times 10^{-12} \sim 3 \times 10^{-11}$
	oxidised	10^{-10}
	tinned	$10^{-12} \sim 4 \times 10^{-11}$
silver	-	$4.6 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-12}$ 2.5×10^{-11}
aluminium	-	$7 \times 10^{-11} \sim 10^{-9}$

2.2 화재현장조사 및 화재원인 분석 체계

2004년 총화재 32,737건 중에서 전기화재는 10,450건으로 31.9%를 나타냈다. 여기에는 차량, 항공기, 선박 등에서 발생한 전기화재를 모두 포함한 수치이다. 전기화재의 발생 원인으로 합선(단락)에 의한 전기화재가 전체의 67.4%인 7,048건이었으며, 과부하에 의한 전기화재가 924건으로 8.8%, 누전에 의한 전기화재가 455건(4.4%), 접촉부 과열에 의한 전기화재가 432건(4.1%), 취급부주의 204건(2.0%), 제품결함이 92건(0.9%), 정전기가 54건(0.5%), 기타가 1,241건(11.9%)으로 나타났다. 사고설비별로 분석한 결과, 전기배선에서 3,096건(36.2%), 가전기기에서 1,950건(22.8%), 조명기구에서 1,181건(13.8%), 전기장치에서 1,019건(11.9%), 배선기구에서 706건(8.2%), 수전설비에서 431건(5.0%) 순으로 나타났다. 전기화재 발생원인 및 사고설비에

서 알 수 있듯이 대부분이 단락에 의해 발생하고 있으며 전기배선에서의 화재가 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 2005년도에 우리나라에서 발생한 총 화재 32,340건 중에서 전기화재는 9,991건(30.9%)으로 2004년도의 총 화재 32,727건 중 10,450건(31.9%)보다 다수 줄어들었으며 인명 및 재산피해 역시 점차 감소하고 있는 추세이다[10]. 그러나 다른 화재원인에 비해 전기에 의한 화재가 가장 많은 것으로 집계되고 있어 이에 대한 철저한 예방대책의 수립이 요구되며, 관련전문가의 양성과 교육, 연구지원 등 전반적인 시스템의 구축도 절실히 요구된다.

최근, 화재의 발생 경향을 살펴보면, 복합적인 원인에 의해 다양한 패턴으로 발생하고 있어 정확한 화재원인을 밝히는 데 많은 어려움이 있다. 또한, 화재현장의 조사기법과 화재 감정물에 대한 과학적이고 체계적인 분석, 재현실험을 통한 분석결과 검증 등 전문적인 지식과 경험이 요구된다. 그림 1은 화재현장 조사 및 감정 절차의 일례를 나타낸 것이다. 우선, 화재사고에 대한 조사가 관계기관으로부터 접수 되면 화재조사전문가로 구성된 화재조사자를 구성하여 현장 조사를 하게 된다. 화재현장에서는 거시적인 관점과 미시적인 관점에서 화재현장의 탄화패턴과 연소의 확산 패턴 등을 통하여 점차 최초 화재발생 지점으로 좁혀가며 발굴에 들어간다. 또한, 목격자의 진술과 탐문 등 관련 자료의 수집도 병행한다. 화재현장에서의 원인판정이 어렵고 정밀 분석이 요구되는 증거물은 별도의 정밀분석 과정을 거치게 된다. 또한, 필요한 경우에는 재현실험을 통하여 분석결과를 재검증하며 최종적으로 결과를 도출함으로써 일련의 화재조사가 종료하게 된다.

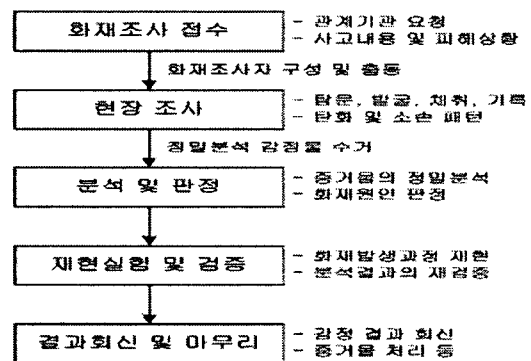


그림 1 화재조사 및 원인분석 과정(예)

Fig. 1 Fire investigation and process of cause analysis (example)

3. 실험방법

실험에는 지름 1.6mm의 600 V 비닐절연전선(IV)을 사용하였으며 전압조정기(Daelim Electric, Korea)를 이용하여 단상 220 V 60 Hz의 실험전압을 인가하였다. 그림 2는 실험에 사용된 실험시료를 나타낸 것으로 지름 1.6 mm의 전선 도체를 7.5 cm의 길이로 절단하고 절단면을 연마지(#2400)로 전선과 수직방향으로 연마하였다. 준비된 2개의 도체를 5 cm 길이의 절연 피복의 중간을 중심으로 서로 맞대어 위치시켰다. 그림 3은 직렬 아크에 의한 절연전선의 산화물 성장 특성을 실험하기 위한 장치를 나타낸 것으로

피복 내 2개의 전선도체 사이에서 직렬 아크가 발생할 수 있도록 Arc Generator(AG-10, KESCO, Korea)를 이용하여 2,400 rpm으로 일정한 크기의 진동을 인가하였다. 실험부하로는 220 V용 60 W와 100 W의 백열전구를 사용하였으며 300 W, 460 W, 660 W 등 3가지 부하를 모델로 실험하였다. 회로에 흐르는 전류는 누설전류계(3263, Hioki, Japan)를 이용하여 측정하였고 전선 접속부에서의 전선 피복의 열화 진행과정은 디지털 캠코더(DCR-DVD803, SONY, Japan)를 이용하여 실시간으로 촬영하였으며 산화물이 성장하는 동안의 접속부 사이의 접촉전압, 전류, 소비 전력 등 전기적 특성은 정밀전력분석계(3030A, BMI, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한, 산화물이 성장하는 동안의 열 분포는 적외선 열화상 장비(TVS-8500, AVIO, Japan)를 이용하여 측정하였으며 시간에 따른 산화물의 성장 길이는 버니어캘리퍼스(Absolute, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 측정하였다. 성장된 동산화물(copper oxide)의 외형과 단면구조, 금속조직 등은 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)과 금속현미경(Epiphot-200, Nikon, Japan)을 이용하여 분석하였다.

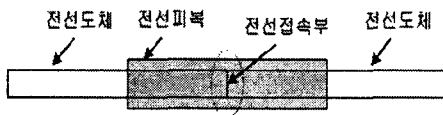


그림 2 실험시료의 준비
Fig. 2 Specimen preparation

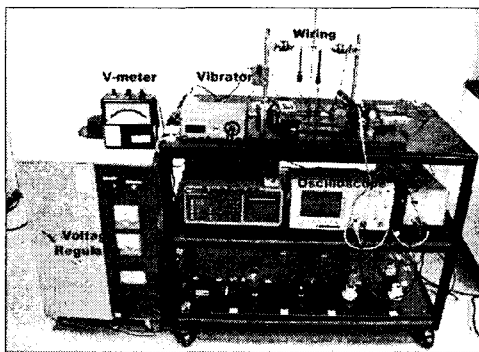


그림 3 실험장치 구성도
Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

4. 실험결과 및 고찰

4.1 직렬 아크에 의한 절연전선의 열화 과정

그림 4는 전선의 직렬 아크에 의한 열화 진행 메커니즘을 나타낸 것이다. 전선 접속부에서 접촉 불량시 발생한 상태에서 외부의 기계적 진동이 인가되면 전선 도체는 아크(스파크)에 의해 산화되고 아크에 의해 발생한 열에 의해 피복은 용융, 탄화하게 된다. 축적된 열에 의해 피복은 착화하게 되며, 주위에 가연물이 있게 되면 화재를 확대시킬 수도 있다. 시간이 경과한 후에는 아크에 의한 전선 도체의 산화가 지속되어 접속면에서는 산화동이 생성되고 점차 성장하게 된다. 또한 수백도 이상의 고온으로 적열하여 화재의 위험성이 있다.

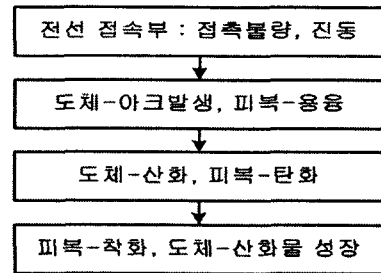


그림 4 전선의 직렬 아크에 의한 열화 메커니즘
Fig. 4 Deterioration mechanism of wires by series arcs

그림 5는 460 W의 부하에서 직렬 아크에 의한 전선의 변화과정을 나타낸 절단면 사진이다. (a)의 step 1은 정상상태로 두 가닥의 도체가 서로 맞닿아 있으며 피복 내·외부가 매끄러움을 알 수 있다. (b)의 step 2는 피복 내부에서 아크가 발생한 때로 피복 내부가 검게 탄화되었으며 도체 표면이 약간 검게 그을림을 알 수 있다. (c)의 step 3은 직렬 아크시 발생한 아크와 열에 의해 피복이 부풀어 오르고 피복이 탄화된 때로 피복에서는 연기가 발생하였고 피복 내부는 검게 탄화되었으며 두 도체의 접속면에서는 아크에 의한 산화가 가속되었다. (d)의 step 4는 피복 착화한 후 접속면에서 동산화물이 성장하고 있을 때를 나타낸 것으로 나전선에서의 접촉 불량시 생성되는 동산화물의 성장과 유사한 특징을 볼 수 있었으며 적열부와 적열로를 형성하면서 지속적으로 동산화물이 성장하였다.

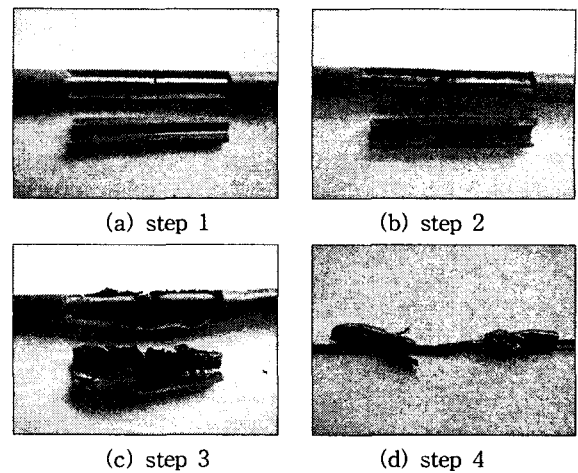


그림 5 전선 피복의 열화 과정
Fig. 5 Deterioration process of PVC insulating covers

4.2 직렬 아크에 의한 동산화물의 전기적 특성 분석

그림 6은 300 W의 부하에서 전선 접속부에서 직렬 아크가 발생하고 있을 때의 전압, 전류, 전력 파형을 나타낸 것이다. 회로에 흐르는 전류는 약 1.12 A였다. 산화물이 성장하기 시작하여 30분이 경과한 때 전선 접속부 사이의 접촉전압(전압 강하)은 9.0 V이었으며 소비전력은 9.81 W였다. 60분이 경과한 때에는 접촉전압은 11.2 V이었으며 소비전력은 12.48 W였다. 또한, 90분이 경과한 때에는 접촉전압은 11.0 V이었으며 소비전력은 12.27 W였으며 시간이 경과할수록 계

속 값이 증가함을 알 수 있었다. 전압파형과 전류파형을 분석한 결과, 산화물이 성장하고 있을 때 전류파형은 정현파형을 나타내고 있으나 전압파형은 (+)에서 (-)로, (-)에서 (+)로 바뀌는 시점에서 나타났다. 460 W의 부하시 전선 접속부에서 직렬 아크가 발생하고 있을 때의 전기적 특성을 분석한 결과, 회로에 흐르는 전류는 약 1.95 A였으며 산화물이 성장하기 시작하여 30분이 경과한 때 접촉전압(전압 강하)은 8.4 V이었으며 소비전력은 16.05 W였다. 60분이 경과한 때에는 접촉전압은 10.0 V였으며 소비전력은 18.91 W였다. 또한, 90분이 경과한 때에는 접촉전압은 10.9 V였으며 소비전력은 20.73 W였다. 이와 같이 시간이 경과할수록 접촉불량 부위의 접촉전압과 소비전력이 지속적으로 증가함을 확인할 수 있었다. 또한, 660 W의 부하에서 전선 접속부에서 직렬 아크가 발생하고 있을 때의 전기적 특성을 분석한 결과, 회로에 흐르는 전류는 약 2.88 A였으며 산화물이 성장하기 시작하여 30분이 경과한 때에 전선 접속부 사이의 접촉전압(전압 강하)은 6.9 V이었으며 소비전력은 18.99 W였다. 60분이 경과한 때에는 접촉전압은 8.2 V였으며 소비전력은 22.87 W였다. 또한, 80분이 경과한 때에는 접촉전압은 8.4 V였으며 소비전력은 23.27 W였다.

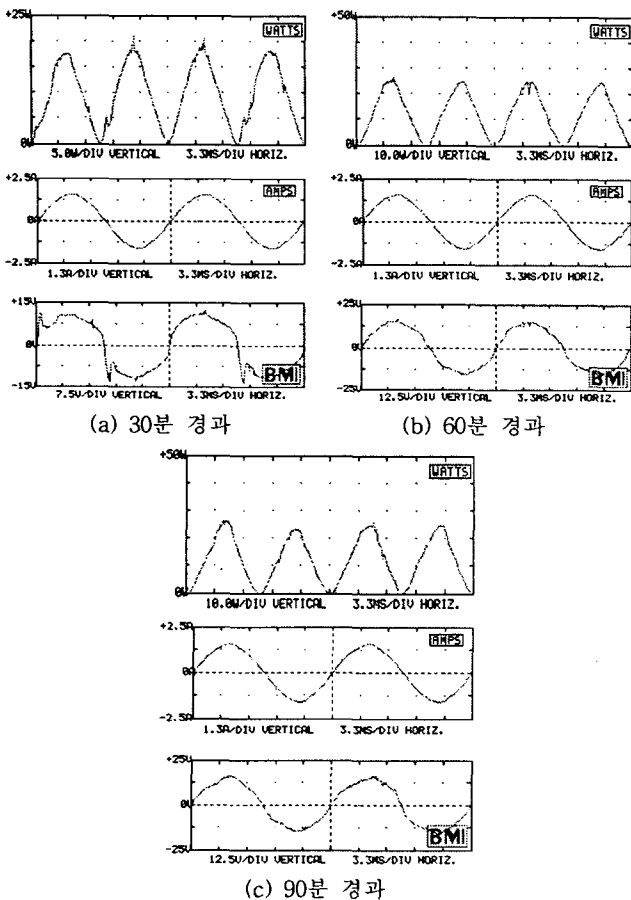


그림 6 시간 경과에 따른 전기적 특성 분석(300 W)
Fig. 6 Electrical characteristics analysis as the time goes (at 300 W)

그림 7은 300 W의 부하에서 직렬 아크에 의해 동산화물이 성장할 때 산화물 성장부위의 시간경과에 따른 소비전력

과 접촉전압의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 산화물이 성장하는 부분의 접촉전압(전압강하)과 소비전력은 점차 증가하는 경향을 보였으며 접촉전압과 소비전력의 변화를 살펴보면 20분이 경과한 때에는 8.2 V와 8.95 W를 나타냈으며 40분이 경과했을 때에는 9.7 V, 10.51 W를 나타냈다. 또한, 80분이 경과한 때에는 12.5 V와 13.90 W를 나타냈다. 공급전압이 일정한 상태에서 접촉 불량부에서의 전압 강하 및 전력소비는 실제의 부하설비에 있어 상대적인 입력 전압의 감소를 의미하며 이로 인하여 부하설비의 효율저하와 수명 감소를 초래하며 불필요한 전력 소모를 가져오게 된다.

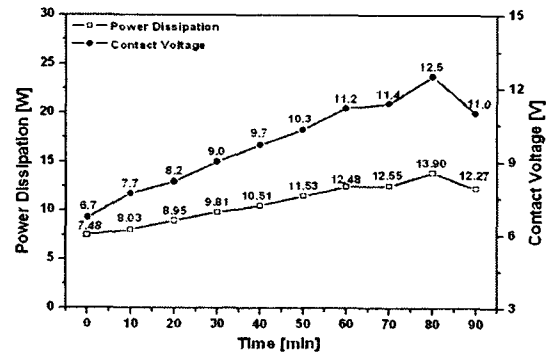


그림 7 시간경과에 따른 소비전력과 접촉전압의 변화(300 W)
Fig. 7 Variations of power dissipations and contact voltages as the time goes(at 300 W)

그림 8은 460 W의 부하에서 직렬 아크에 의해 동산화물이 성장할 때 산화물 성장부위의 시간경과에 따른 소비전력과 접촉전압의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 전반적으로 증가하는 경향을 보였으며 10분과 40분에서는 접촉전압과 소비전력이 감소함을 볼 수 있다. 이는 산화물 성장부위의 저항변화에 따른 것으로 생각되며 실험이 진행되는 동안 지속적으로 전압, 전류, 전력 등 전기적 특성이 변화함을 확인할 수 있었다. 접촉전압과 소비전력의 변화를 살펴보면 20분이 경과한 때에는 7.7 V와 14.12 W를 나타냈으며 40분이 경과했을 때에는 8.0 V, 15.49 W를 나타냈다. 또한, 80분이 경과한 때에는 10.4 V와 19.87 W를 나타냈다. 회로에 입력되는 전압이 일정한 상태에서 접촉불량부에서의 전압 강하 및 전력 소비는 실제의 부하에 있어 상대적인 입력전압의 감소를 의미하며 300 W의 부하에서보다 산화물 성장부분의 전압강하와 전력 소비가 큼을 알 수 있다.

그림 9는 660 W의 부하에서 직렬 아크에 의해 동산화물이 성장할 때 산화물 성장부위의 시간경과에 따른 소비전력과 접촉전압의 변화를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 산화물이 성장하는 부분에서의 접촉전압(전압강하)과 전력 소비는 점차 증가하는 경향을 보였으며, 접촉전압과 소비전력의 변화를 살펴보면 20분이 경과한 때에는 6.2 V와 17.24 W를 나타냈으며 40분이 경과했을 때에는 7.3 V, 20.25 W를 나타냈다. 또한, 80분이 경과한 때에는 8.4 V와 23.27 W를 나타냈다. 80분이 경과했을 때 산화물 성장부분에서의 산화물의 다량 비산으로 회로가 단선되어 전원공급이 차단되었다.

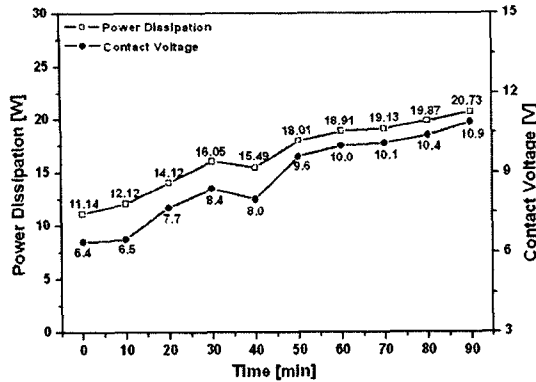


그림 8 시간경과에 따른 소비전력과 접촉전압의 변화(460 W)
 Fig. 8 Variations of power dissipations and contact voltages as the time goes(at 460 W)

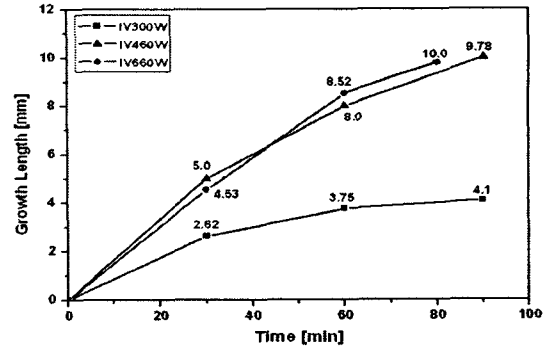


그림 10 시간 경과에 따른 산화물의 성장길이 비교
 Fig. 10 Comparison of growing length of copper oxide as the time goes

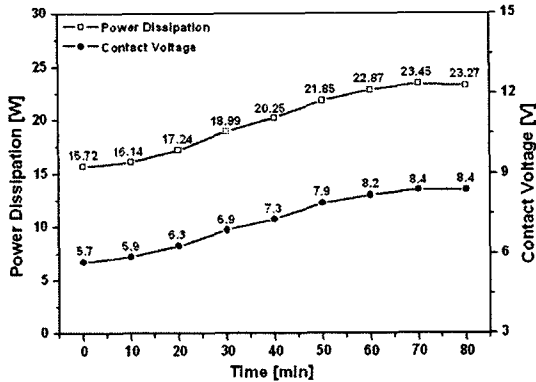


그림 9 시간경과에 따른 소비전력과 접촉전압의 변화 (660 W)
 Fig. 9 Variations of power dissipations and contact voltages as the time goes(at 660 W)

4.3 동 산화물의 열 특성 및 구조 분석

그림 11은 도체 접속부에서 동산화물이 성장하고 있을 때의 온도 분포를 적외선 열화상 장비를 이용하여 측정된 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 동산화물이 성장하는 부분에서 국부적인 발열이 일어남을 알 수 있으며, 온도를 실측한 결과, 905 °C($\epsilon=1.0$)를 나타냈다. 기존의 나전선에서의 직렬 아크에 의한 동산화물의 성장특성을 분석한 결과, 산화물의 성장은 도체의 지름과 통전 전류의 크기에 따라 좌우되는 것으로 실험결과 밝혀졌으며(5,6,7) 이러한 동산화물의 성장 특성에 대한 연구가 진행 중에 있다.

그림 10은 시간 경과와 부하 크기에 따른 산화물의 성장 특성을 버니어캘리퍼스(Absolute, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 실시간으로 측정된 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 300 W(약 1.12 A)의 경우 460 W(약 1.95 A)나 660 W(약 2.88 A)에 비해 상당히 늦은 성장 특성을 나타냈으며 30분이 경과한 때에는 2.62 mm가 성장하였으며 60분 경과시에는 3.75 mm, 90분 경과시에는 4.1 mm가 성장하였다. 산화물의 성장은 외부에서 약간의 충격을 가할 때에만 산화물 성장부위가 끊어졌다 이어지면서 성장하는 특성을 반복하였으며 산화물이 성장하지 않더라도 실험회로에는 정상적인 전원이 계속 공급되었다. 460 W의 경우에는 도체 접속부에서 산화물이 성장하기 시작하여 지속적으로 가장 안정하게 성장함을 알 수 있었으며 성장 길이는 30분 경과시 4.53 mm, 60분 경과시 8.52 mm, 90분 경과시 9.78 mm가 성장하였다. 660 W의 경우 산화물의 성장 속도는 460 W와 비슷하였으나 실험을 시작한 후 80분이 경과했을 때 산화물 성장 부분에서의 용융 망을 비산으로 성장이 멈추었으며 그 부분이 단선되어 실험회로의 전원 공급이 차단되었다. 660 W에서의 산화물의 성장 길이는 30분 경과시 5.0 mm, 60분 경과시 8.0 mm, 90분 경과시 10.0 mm가 성장하였다. 이상의 실험결과, 1.6 mm 동전선은 220 V(60 Hz)의 전압에서 약 2 A의 전류가 흐를 때 가장 안정적으로 산화물이 성장함을 확인할 수 있었다.

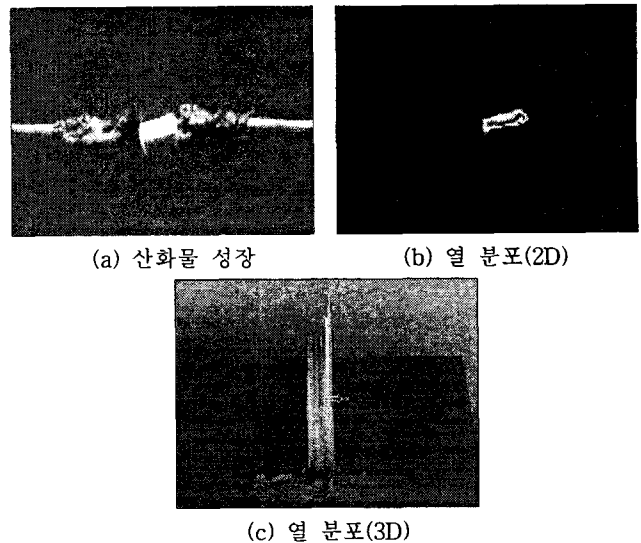


그림 11 동산화물 성장시의 온도 분포
 Fig. 11 Temperature distribution during copper oxide growing

그림 12는 각각의 부하에서 성장한 동산화물의 외형을 비교한 것이다. (a)는 300 W의 부하에서 성장한 동산화물로 총 길이는 4.1 mm이며 가운데로 갈수록 지름이 커지는 형태로 성장하였다. (b)는 460 W의 부하에서 성장한 산화물로 총 길이는 9.78 mm이며 전체적으로 불규칙하고 가느다란 형태로 성장하였다. 또한 (c)는 660 W의 부하에서 성장한 산화물로 성장길이는 10.0 mm이며, 산화물 성장시 발생한 비산의 영향으로 산화물의 표면에 비산된 망울이 타원형을

형성하며 부착된 것을 볼 수 있으며 성장한 산화물의 형태도 불규칙함을 알 수 있었다. 접촉불량에 의해 성장하는 산화물의 전형적인 특징으로 성장한 산화물의 표면은 흑색을 띄며 내부는 적색의 유리질 결정을 나타내는 것이 특징이다. 이러한 것이 전기를 전달하는 도체의 접속부 등에서 발견되면 접촉불량에 의해 화재가 발생하였음을 유추할 수 있다. 특히, 동산화물은 아산화동이라는 물질을 생성하며 동의 용융온도보다 높은 1,232 °C의 용융온도를 가진다. 일반적인 도체가 온도가 올라가면 저항이 증가하는 PTC(positive temperature coefficient)의 특성을 갖는데 반해 아산화동은 부온도특성(NTC:negative temperature coefficient)의 특성을 갖고 있어 화재현장에서 수거한 물질이 아산화동으로 의심된다면 외부에서 열을 가하여 저항의 변화를 확인하는 방법으로 알 수 있다.

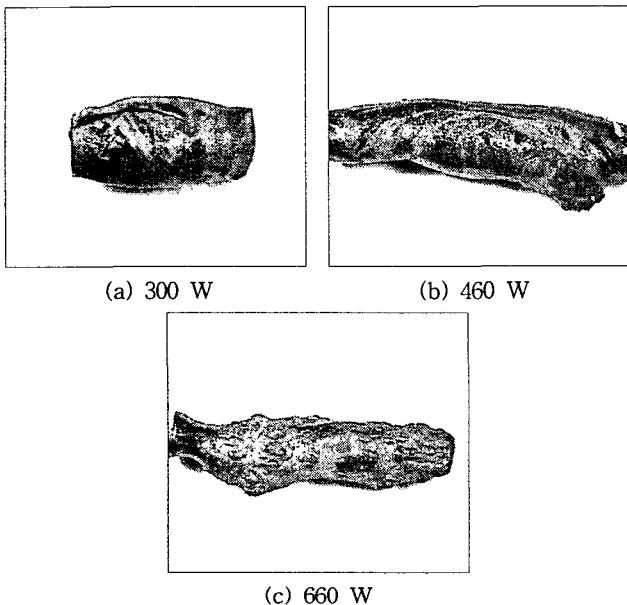
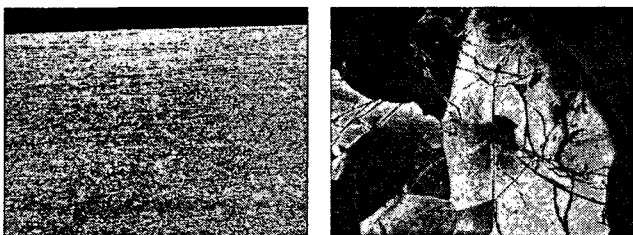


그림 12 실체현미경에 의한 외형 특성 비교(mag.×6)
 Fig. 12 Comparison of surface structures by stereomicroscope (mag. ×6)



(a) 정상도체의 단면구조 (b) 동산화물의 단면구조
 그림 13 정상도체와 동산화물의 단면구조 비교(mag.×100)
 Fig. 13 Comparison of cross section structures between normal and copper oxide(mag. ×100)

그림 13은 정상상태의 동 도체와 실험을 통해 성장한 동산화물의 단면구조를 금속현미경을 이용하여 100배 확대하여 비교한 것이다. (a)는 정상상태의 동전선으로 전선 제조시 생성된 가로 방향의 연신구조(elongation structure)를 볼

수 있으며 (b)의 실험에서 성장한 동산화물에서는 다수의 크랙(crack)이 있는 입자조직을 관찰할 수 있었으며 이러한 특성은 1,000 °C 이상의 고온에서 동도체가 산화동(copper oxide)으로 바뀔 때 나타나는 특징으로 이러한 단면구조 특성은 화재현장이나 설비사고의 원인을 규명하는데 있어 동도체의 산화물의 성장 유무와 산화물의 성장 방향을 확인함으로써 화재의 원인이 전기적인 원인에 의한 것인지 외부 열에 의한 것인지를 판별하는 중요한 인자로 사용될 수 있다.

4.4 연구결과의 화재원인 분석 적용

그림 14는 화재현장에서 수거한 압착단자이다. (a)는 압착단자 내에 산화물이 형성됨을 볼 수 있다. (b)는 압착단자 내에 형성된 산화물을 실체현미경으로 6배 확대한 것으로 표면은 흑회색을 나타내며, 내부는 아산화동의 전형적인 특징인 적색의 유리질 결정구조를 나타냈다. (c)는 금속현미경으로 100배 확대한 결정조직으로 다수의 크랙이 형성된 조직을 나타냈다.

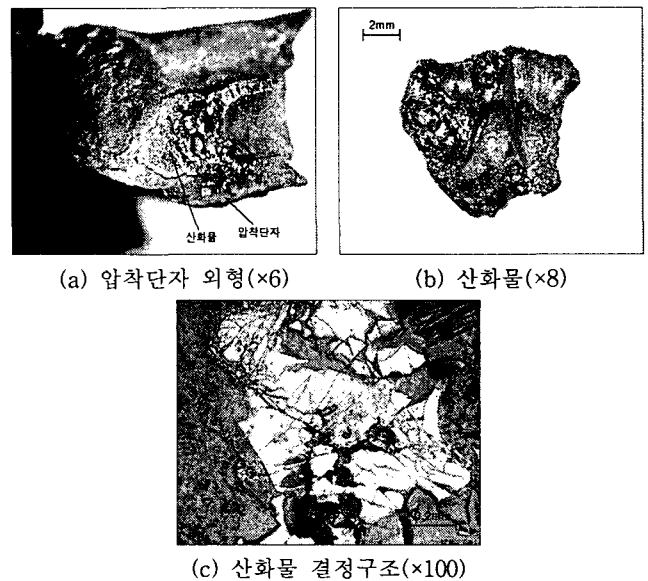


그림 14 화재현장에서 수거한 압착단자와 산화물
 Fig. 14 Terminal lug collected at the fire scene and its copper oxide

그림 15는 정상상태의 동전선과 실험을 통해 얻은 동산화물, 화재현장에서 수거한 압착단자 내에 생성된 산화물의 열적 특성을 비교하기 위하여 시차주사열량계(DSC, SDT-2960, TA.Ins., USA)를 이용하여 분석한 그래프이다. 열량 변화 분석은 상온에서 1,300 °C까지 20 °C/min으로 승온시키면서 열량변화를 측정하였으며 퍼지가스로 N₂가스를 100 ml/min으로 흘려주었다. (a)는 정상전선으로, 동의 용융온도 부근인 1,076.66 °C에서 열량변화를 나타냈으며, (b)는 실험에서 얻은 산화물로 아산화동의 용융온도인 1,231 °C에서 열량변화를 나타냈다. (c)는 화재 현장에서 수거한 산화물로 아산화동의 용융온도보다 약간 높은 1236.6 °C에서 열량 변화를 나타냈으며 이러한 열량 변화를 통해서도 수거한 물질이 동산화물임을 확인할 수 있었다.

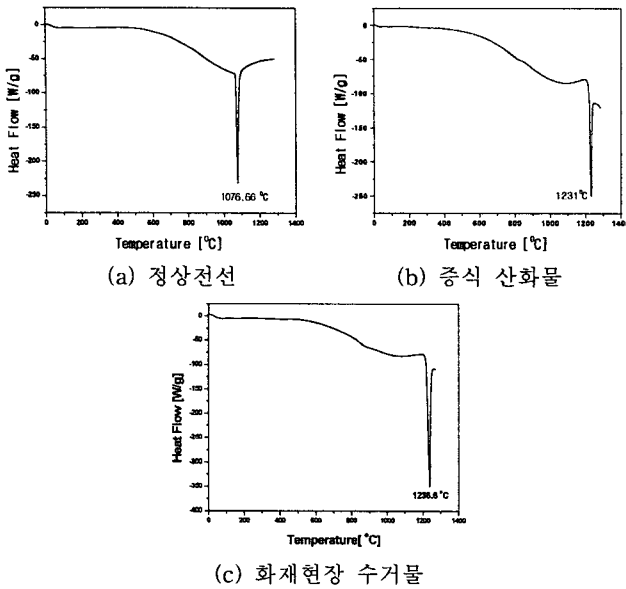


그림 15 DSC에 의한 열 특성 비교
 Fig. 15 Comparison of thermal characteristics using DSC

5. 결 론

이상과 같이 접촉불량에 의한 비닐절연전선에서의 동산화물의 성장 특성과 연구결과의 화재원인 분석 적용에 대하여 알아보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 직렬 아크에 의한 전선피복의 열화 과정을 분석한 결과, 전선접속부에서의 진동에 의해 발생한 스파크와 열에 의해 절연피복이 용융, 탄화되었으며 축적된 열에 의해 피복이 착화하였다. 전선 도체는 피복 착화 후 도체 접속부에서 접촉 불량으로 청백색의 불꽃이 발생하였으며 점차 황색 불꽃으로 바뀌었다. 황색 불꽃이 발생한 후에는 외부의 기계적 진동이 없어도 동 화물은 지속적으로 성장함을 확인할 수 있었다. 또한 전선 피복의 열화진행은 결합 요인이 전선피복 내부에 존재하는 관계로 피복 내부에서 외부로 진행됨을 확인할 수 있었다.

2) 직렬 아크에 의한 산화물 성장시 부하의 크기에 따라 접촉불량 부위의 전기적 특성을 분석한 결과, 300 W의 부하에서는 30분 경과시 9.0 V의 접촉전압과 9.81 W의 전력이 소비되었으며 90분 경과시에는 11.0 V의 접촉전압과 12.27 W의 전력이 소비되었다. 460 W의 부하에서는 30분 경과시 8.4 V의 접촉전압과 16.05 W의 전력이 소비되었으며 90분이 경과한 때에는 10.9 V의 접촉전압과 20.73 W의 전력을 소비하였다. 660 W의 부하에서는 30분 경과시 6.9 V의 접촉전압과 18.99 W의 전력을 소비하였으며 80분 경과시에는 8.4 V의 접촉전압과 23.27 W의 전력을 소비함을 알 수 있었다. 위의 결과와 같이 시간이 경과함에 따라 접촉전압과 소비전력을 점차 증가함을 알 수 있었다. 또한, 전류 파형은 정현파형을 나타냈으나 접촉불량이 발생하고 있는 양단의 전압파형은 (+)에서 (-)로, (-)에서 (+)로 바뀔 때 파형이 변화하는 특징을 나타냈다. 이는 산화물의 성장과 깊은 관계가 있는 것으로 판단된다.

3) 부하의 크기에 따른 산화물의 성장특성을 분석한 결과, 300 W의 부하에서는 산화물의 성장이 느리게 진행되어

90분 경과시 약 4.1 mm가 성장하였으며 외부의 충격에 의해 접촉부가 끊겼다가 다시 붙을 때에 잠시 진행되다 성장이 정지하였다. 산화물이 성장하지 않는 동안에도 부하는 동작을 계속하였다. 460 W의 부하에서는 산화물의 성장이 활발하였으며, 90분 경과시 약 9.78 mm가 성장하였고 계속적으로 산화물 성장이 이루어졌으며 부하는 정상적으로 동작하였다. 660 W의 부하에서는 80분이 경과할 때까지 460 W의 부하와 유사한 성장 특성을 나타냈으나 80분이 지난 후에는 접촉불량 부위에서의 용융 산화물의 비산으로 접촉면이 침식되어 결국에는 단선되고 전원의 공급이 차단됨을 확인할 수 있었다. 80분 경과시 까지의 성장 길이는 약 10.0 mm였다. 이상의 성장특성에서 산화물은 전류의 크기에 영향을 받음을 알 수 있었다.

4) 산화물 성장시 동산화물의 열 분포 특성과 성장된 산화물의 표면 및 단면구조를 분석한 결과, 성장하고 있는 산화물의 온도는 약 905 °C를 나타냈으며 국부적으로 발열함을 확인할 수 있었다. 또한, 각각의 부하에서 성장한 동산화물의 표면을 비교한 결과, 300 W의 부하에서는 가운데로 갈수록 지름이 커졌으며 460 W와 660 W의 경우에는 전체적으로 가느다랗고 불규칙한 형태를 나타냈다. 660 W의 경우에는 표면에 비산된 망울이 부착된 흔적을 볼 수 있었다. 단면 조직을 분석한 결과, 정상 전선도체에서는 연신구조를 볼 수 있었으며 동산화물에서는 다수의 크랙이 생성된 것을 확인할 수 있었다.

5) 화재현장에서 수거한 압착단자 내에 생성된 산화물에 대하여 산화물의 외형, 표면구조, 결정구조, 열량 변화 등을 실험을 통해 얻은 산화물과 비교 분석한 접촉불량에 의해 생성된 것을 확인할 수 있었으며, 연구결과가 충분히 화재현장에서 화재원인을 규명하는데 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글
 본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 최충석 외 5, "전기화재공학", 동화기술, pp.255-263, 2004.
 [2] Jarle Sletbak, Roar Kristensen, Hakon Sundklakk, Gunnar Navik, Magne Runde, "Glowing contact areas in loose copper wire connections", IEEE Trans., on components, hybrids, and manufacturing technology, Vol.15 No.3, 1992.
 [3] John J.Shea, "Conditions for Series Arcing Phenomena in PVC Wiring", 51st IEEE Holm conference on Electrical Contacts 2005, pp.167-175. 2005.
 [4] 川瀬太郎, "電線接続部と電気火災", 日本火災學會誌, Vol. 32 No.6, pp.43-45, 1983.
 [5] 김향권 외 3, "저압용 전원선의 접촉불량에 따른 열적 특성에 관한 연구", 대한전기학회 하계대회, Vol. C, pp.1466-1468, 2003.

- [6] 최충석 외 3, "전원코드의 접촉불량에 의해 형성된 파형 및 플러그 특성", 한국안전학회 논문지, Vol.20 No.1, pp.87-93, 2005.
- [7] IEC 60943, "Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals", 1998.
- [8] Robert D. Malucci, "Dynamic Model of Stationary Contacts Based on Random Variations of Surface Features", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology Vol.15 No.3, pp.339-347, 1992
- [9] Lonel Boyer, "Contact Resistance Calculations : Generalizations of Greenwood's Formula Including Interface Films", IEEE Transactions on Components and Packing Technologies, Vol.24 No.1, pp.50-58, 2001.
- [10] 송인희, "전기재해 통계분석", 한국전기안전공사, pp.7-24, 2005.



김 동 욱 (金 桐 郁)

1971년 1월 6일생. 1998년 2월 인천대학교 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 전기안전연구원 재해예방연구그룹 연구원.

Tel : 031-580-3035

Fax : 031-580-3045

E-mail : dokim@kesco.or.kr



최 효 상 (崔 孝 祥)

1966년 2월 21일생. 1989년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년~한전전력연구원 선임연구원. 현재 조선대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-230-7025

Fax : 062-230-7020

E-mail : hyosang@chosun.ac.kr

저 자 소 개



김 향 곤 (金 珥 坤)

1970년 12월 14일생. 1996년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1996년~현재 전기안전연구원 재해예방연구그룹 책임연구원.

Tel : 031-580-3031

Fax : 031-580-3030

E-mail : kon0704@kesco.or.kr



최 충 석 (崔 忠 錫)

1961년 9월 19일생. 1991년 2월 인하대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년 나고야대학 초청연구원. 1994~95년 구마모토대학 객원연구원. 1997년~현재 전기안전연구원 재해예방연구그룹 그룹장/수석연구원.

Tel : 031-580-3030

Fax : 031-580-3045

E-mail : ccseog@kesco.or.kr