

직렬 아크에 따른 도체의 산화물 증식 및 전압 파형 분석

論 文

55P-3-6

The Analysis of Voltage Waveform and Oxidation Growth of Conductor with Series Arc

崔忠錫[†] · 金珣坤* · 金棟郁** · 金東佑***

(Chung-Seog Choi · Hyang-Kon Kim · Dong-Ook Kim · Dong-Woo Kim)

Abstract - In order to analyze the characteristics of series arcs that could happen in poor connections of electrical facilities, we made an apparatus which is similar to actual situation. series arcs are generated between copper and copper, copper and bronze, copper and brass, bronze and bronze, and then oxidation growth and voltage waveform were measured. A very small vibration with constant movement is needed to grow oxidation initially, whereas oxidation growth proceeded without a vibration after a certain amount of time. At first, blue white flame was generated initially between copper and copper, and then yellow flame was generated. In case of contact between copper and copper, the length of oxidation growth was about 7.1[mm] in 90[min]. In case of contact between copper and brass, the length of oxidation growth was about 4.3[mm] in 90[min], When bronze is contacted with copper, the lengths of oxidation growth were about 1.4[mm] in 20[min] and 2.7[mm] in 40[min] respectively, and no more oxidation growth was shown after that. In case of contact between brass and brass, the length of oxidation growth was about 1.2[mm] in 90[min], so it was the smallest compared to other cases. When copper is contacted with copper, the current through the load was about 1.6[A] and the power dissipation increased from 19[W] to 31[W]. In case of oxidation growth between copper and brass, the voltage changed from 8.4[V] to 11[V]. However, the voltage drop and the power dissipation between copper and brass were small compared to oxidation growth between copper and copper. When series arcs were generated between bronze and copper, a peak was shown at the beginning of voltage increase, and 40[min] later, oxidation material was not grown any longer. When oxidation growth occurred, voltage waveform showed irregular waveforms with tiny ripples.

Key Words : Poor connection, Series arc, Oxidation growth, Voltage form, Flame

1. 서 론

접촉 불량에 의한 전기 화재는 개폐기, 소켓, 콘센트, 전열 기구 등 전선과의 접촉 개소가 느슨해져 그 부분에서 접촉 저항의 증가로 줄열(Joule heat)이 발생하여 출화하는 것으로 특히 10[A] 이상의 부하 전류가 흐르고 있는 경우는 위험하다. 그러나 1[A] 정도의 작은 부하 전류에서 접촉 저항 증가에 따른 줄열에 의한 발화는 쉽게 일어나지 않지만, 실제로 산업 현장에서는 1[A] 이하의 미소 전류에서도 전기화재가 발생한다[1]. 저전류에서의 접촉 불량에 의한 발화 기구는 산화물 증식 발화 현상에 의한 것으로 접촉 저항 증가에 의한 줄열의 발화 형식과는 차이가 있다[2]. 같

크)가 발생하여 동은 산화되어 아산화동이 증식되고 1,300 [°C] 이상의 고온 상태가 지속적으로 유지된다. 이와 같은 산화물의 증식 현상은 접촉 불량이 발생했다고 해서 언제나 일어나는 것이 아니지만, 일단 발생하면 미소 전류에서도 전선의 용융이 발생하기 때문에 쉽게 화재로 진행될 위험성이 있다[3-6]. 즉 이와 같은 접촉 불량에 의한 발화는 전선이 단선된 곳, 콘센트와 플러그의 불완전한 접속(촉) 부위, 분전함(반) 단자대와 전선의 불완전한 연결, 기기 내부의 접속기구류의 불완전한 접속 등이 있다. 일반적으로 배선 재료는 대부분이 구리(copper)이지만 콘센트의 칼받이, 플러그의 칼, 단자대 등은 기계적 특성의 강화를 위해 구리 합금이 사용된다[7-8]. 도체의 접촉부 또는 단선 부분에 직렬 아크가 발생하면 접촉 저항이 증가하여 접촉부가 과열하게 된다. 접(속)촉부에서 발생하는 산화물의 생성은 표면에서 반응이 활성화되므로 피막의 내부로 진행은 거의 없다. 도체가 동의 합금인 경우 표면에는 일반적으로 산화동(CuO)이 생기지만, 때로는 아산화동(Cu₂O)을 발생시키는 경우가 있다. 즉 어떤 특수한 조건이 되면 지속적으로 산화동을 발생시키면서 발열하는 현상을 아산화동 증식 발열 현상이라고 부른다[9-14].

본 논문에서는 전선의 직렬 아크가 안정적으로 발생할 수

[†] 교신저자, 正會員 : 電氣安全研究院 災害豫防研究그룹
首席研究員 E-mail : ccseog@kesco.or.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 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 2月 7日

最終完了 : 2006年 7月 29日

동선, 구리선-청동선, 황동선-황동선 등 사이에 직렬 아크를 발생시켜 산화물의 성장 속도를 밝히고, 증식이 진행될 때의 전압과 전력 파형의 특성을 제시함으로써 전기설비 사고 원인 분석 및 진단을 위한 자료를 확보하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

전기설비에 사용되는 전선 재료는 구리(copper)가 대부분이고, 스위치류와 같은 접속(접촉) 부분에는 황동(brass), 청동(bronze) 등이 주로 사용된다. 전기 에너지를 전달하는 전선이 물리적인 스트레스를 받게 되면 단선되어 '끊어짐'과 '이어짐'이 반복되면서 고열이 발생하여 화재 또는 설비 사고가 발생한다. 본 실험에서는 도전 재료로 가장 많이 사용되는 구리선, 청동선, 황동선을 구리선-구리선, 구리선-청동선, 구리선-황동선, 황동선-황동선 등의 4 가지 형태로 설정하여 상호 간의 직렬 아크 발생과 산화물 증식의 특성을 해석하고자 그림 1과 같이 실험 장치를 제작하였다. 표 1은 실험에 사용된 전선의 특성을 나타낸 것이다.

표 1 구리선과 구리 합금선의 특성 비교
Table 1 The properties of copper wire and copper alloys wire

spec. samples	length [mm]	thickness [mm]	conductivity [%]	resistivity [$\mu\Omega \cdot m$]	thermal conductivity [W/mK]
Copper(Cu)	60	2.0	100	1.71 at 25°C	390
Brass(CuZn)	60	2.0	30	6.13 at 25°C (70% Cu, 30% Zn)	about 120
Bronze(CuSn)	60	4.0	15	about 15.0 at 25°C	110 (68%Cu, 32%Sn)

실제 배선용 기구에서 전선 접속부의 직렬 아크에 의한 산화물 증식 실험은 접촉 상태의 설정 및 발열 현상을 관측하기 어렵기 때문에 접촉면에 진동을 유발시켜 접촉 불량을 실험하였다. 실험에 사용한 구리선, 황동선, 청동선은 각각 60[mm] 길이로 절단하여 사용하였다. 절단한 2개의 나전선을 좌우에 설치된 척(chuck)에 고정하였으며, 왼쪽은 고정하고 오른쪽은 상하, 좌우 그리고 전진과 후진을 할 수 있는 레일 위에 설치하여 직렬 아크가 일어나기 쉽도록 조절하였다. 절단된 전선과 전선은 접촉 불량 상태를 모의하기 위해 토크드라이버(FDS2-S, Tohnichi, Japan)를 이용하여 압력은 0 [N·m]로 설정하였다. 또한, 접촉면에서의 산화물 증식 현상을 재현하기 위하여 220[V], 60[Hz] 상용 전원을 인가하였다. 직렬 아크를 산업 현장과 유사하게 유도되도록 왼쪽에 설치된 진동기(vibrator)로 전선 접속면에 미소 진동을 주어 불꽃이 반복적으로 발생하도록 하였다. 이때 미소 진동의 인가는 제어부(control part)에서 조절하였으며, 2,000[rpm]으로 하였다. 이때 사용된 부하는 전동 부하로서 부하의 크기에 따라 전류의 크기를 조절 가능하도록 하였으며, 부하의 변동은 정밀전력분석계(3030A, BMI,

USA)를 사용하여 측정했으며, 접촉 불량에 따른 접촉면 양단의 전압은 전압 리드선을 통해 오실로스코프(TDS-3052, Tektronics, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한, 산화물의 증식 과정은 디지털 카메라를 이용하여 실시간 촬영하였으며, 시간에 따른 산화물의 증식 길이는 마이크로미터(Miyutoyo, Japan)를 이용하여 측정하였다. 이상과 같은 실험이 진행될 때 실험실의 조건은 온도 15[°C], 습도 30[%] 정도의 분위기에서 실시함으로써 오차율을 최소화하였다.

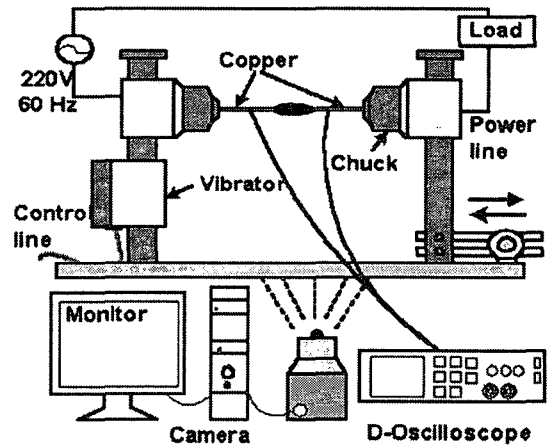


그림 1 산화물 증식을 위한 실험 개략도
Fig. 1 The experimental schematic of oxidation growth

3. 결과 및 고찰

저압 옥내용 전기 설비와 동일한 220[V], 60[Hz] 상용 전원이 공급되는 전선이 단선되어 직렬 아크가 발생할 때의 산화물 성장 길이 및 산화물이 증식될 때 양단의 전압을 측정하였다. 부하는 100[W]의 전동 부하 4개를 사용하였으며 그때 통전 전류는 1.6[A]로 일정하게 유지하였다. 직렬 아크를 유도하기 위해 사용한 진동기는 각 조건마다 10분 정도 진동을 인가한 후 제어부의 전원을 제거하였다.

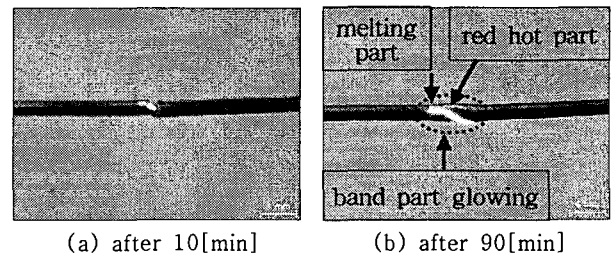


그림 2 구리선-구리선 접촉할 때의 산화물 성장
Fig. 2 The oxidation growth of copper-copper contacts type

그림 3은 황동선과 구리선 사이에 직렬 아크가 발생할 때의 산화물 증식을 나타낸 것이다. 그림 3(a)과 같이 10분 정도 경과되면 접촉면 근처의 구리선은 용융되어 검게 변하고 증식이 시작되지만, 황동선은 도전율이 구리선보다 낮기 때문에 용융은 더디게 진행된 것으로 판단된다. 그림 3(b)과 같이 90분 정도 경과되면 구리선 표면은 대부분 과열에

의해 검은색으로 산화 변형되고 황동선도 검게 용융되어 적열로가 확실하게 형성되지만, 산화물의 증식 길이는 구리선-구리선 접촉 보다 짧은 것을 알 수 있다. 구리(390[W/mK])와 황동(120[W/mK])의 열전도율이 다르고 저항률의 차이 등이 있기 때문으로 판단된다[15-16].

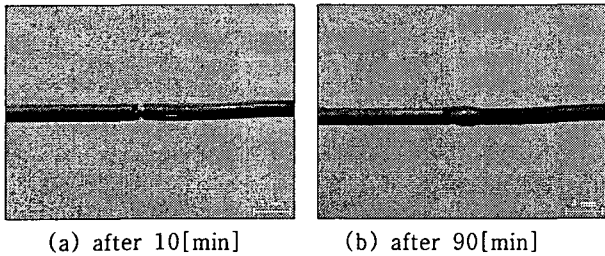


그림 3 황동선-구리선 접촉할 때의 산화물 성장

Fig. 3 The oxidation growth of brass-copper contacts type

그림 4는 청동선과 구리선을 접촉했을 때 발생하는 직렬 아크에서 생성되는 산화물 증식을 나타낸 것이다.

그림 4(a)와 같이 10분 정도 경과되면 접촉면 근처의 청동선과 구리선은 검게 변하고 용융되어 증식이 시작되었다. 그러나 청동선과 구리선의 접촉에 의한 산화물 증식은 그림 4(b)에 나타낸 것과 같이 40분 정도 경과되면 산화물 증식은 더 이상 일어나지 않고 멈추었으며, 청동선과 구리선은 검게 변색되었다. 이것은 청동선의 직경(4.0[mm])이 상대적으로 구리선(2.0[mm]) 및 황동선(2.0[mm])의 시료보다 굵고, 구리(100[%])와 청동(15[%])의 도전률 차이 등에 따른 단위 면적당의 전류량이 적기 때문인 것으로 판단된다[15-16].

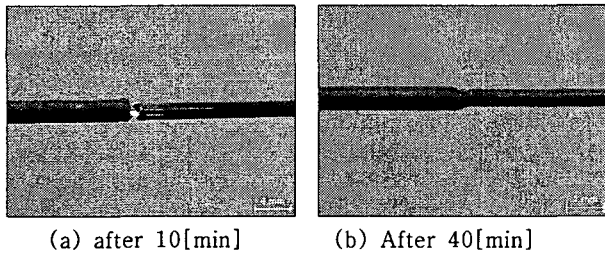


그림 4 청동선-구리선 접촉할 때의 산화물 성장

Fig. 4 The oxidation growth of bronze-copper contacts type

그림 5는 황동선과 황동선에 직렬 아크가 발생할 때의 산화물 증식을 나타낸 것이다. 그림 5(a)와 같이 10분 정도 경과되면 접촉면 근처의 황동선은 다른 시료와는 다르게 용융되는 현상은 적게 이루어지고 적열로의 형성 면적도 작게 일어났다. 그림 5(b)에 나타낸 것과 같이 90분 정도가 경과되어도 산화물의 증식 길이(1.2[mm])는 다른 시료보다 작게 증식되었다. 구리선과 구리선의 산화물 증식이 가장 활발하였으며, 황동선과 황동선의 산화물 증식이 가장 더디게 일어났다. 또한, 구리선과 접촉하는 청동선과 황동선은 구리의 영향에 의해 산화물의 증식 현상이 비교적 쉽게 일어났다.

그림 6은 직렬 아크가 발생했을 때 산화물의 생성 길이와 시간의 함수 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있

듯이 도전 재료의 종류에 따라 증식 길이의 차이가 큼을 알 수 있다. 구리선과 구리선에서 접촉 불량에 따른 산화물 증식이 가장 잘 일어났으며, 황동선과 황동선의 접촉 불량에 의한 산화물 증식이 가장 더디게 나타났다. 구리선-구리선에서는 약 20분이 지난 후 약 2[mm]가 성장하였으며, 90분이 경과한 후에는 약 7.1[mm] 정도가 성장하였다. 구리선-황동선에서는 약 20분이 지난 후 0.9[mm] 정도가 성장하였으며, 90분 후에는 4.3[mm]로 증식되었다. 청동선-구리선에서는 약 20분이 지난 후 약 1.4[mm]가 성장하였으며, 40분이 경과된 후에는 2.7[mm] 정도 성장하였지만 더 이상의 증식은 일어나지 않았다. 황동선-황동선에서는 20분 경과 후 0.8[mm]가 성장하였으며, 90분이 경과한 후에는 1.2[mm] 정도가 성장하여 다른 시료보다 작게 나타났다.

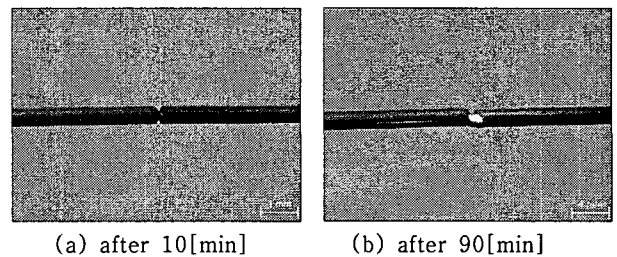


그림 5 황동선-황동선 접촉할 때의 산화물 성장

Fig. 5 The oxidation growth of brass-brass contacts type

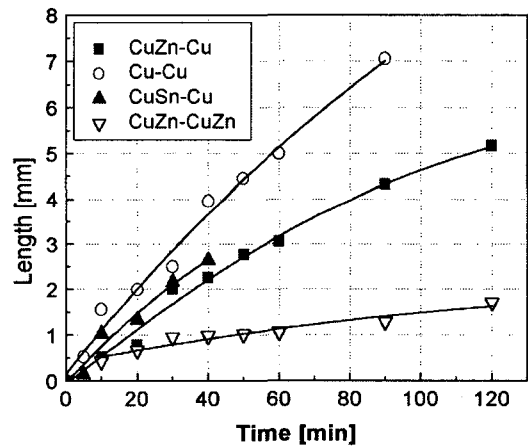
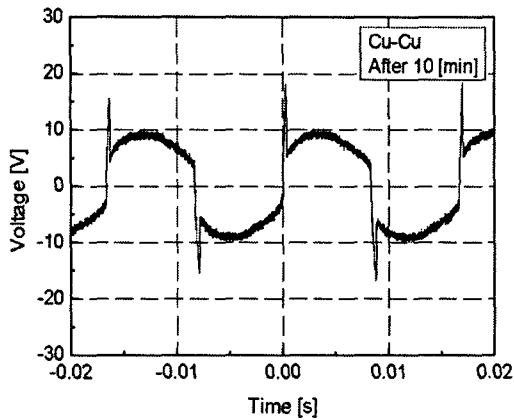


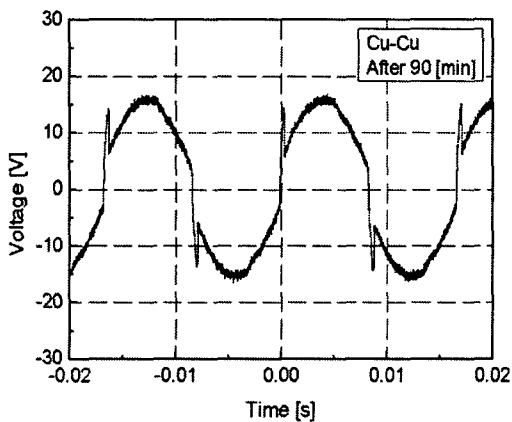
그림 6 접촉 형태에 따른 산화물의 성장 길이와 시간의 관계

Fig. 6 The oxidation growth length of contacting parts according to time

전선 접속부의 산화물 증식이 있을 때 인가된 전원에 대한 전압 파형은 어떤 특성을 보이는지 알아보기 위해 오실로스코프를 이용해 측정하였다. 그림 7은 구리선-구리선 접촉에서 시간에 따른 전압 파형을 나타낸 것이다. 직렬 아크는 전원 공급의 정(+), 부(-)에서 전압 상승 시에 피크가 관측되었으며, 산화물 증식의 경우에 발생하는 인가전압의 극성에 따라 불규칙적인 전압 파형이 발생하였다. 또한, 그림 7(b)와 같이 시간에 따른 산화물 성장시 접촉 불량부의 전압도 16.8[V]로 상승함을 알 수 있었다. 이는 산화물 증식에 따라 저항이 높아졌기 때문으로 판단된다.



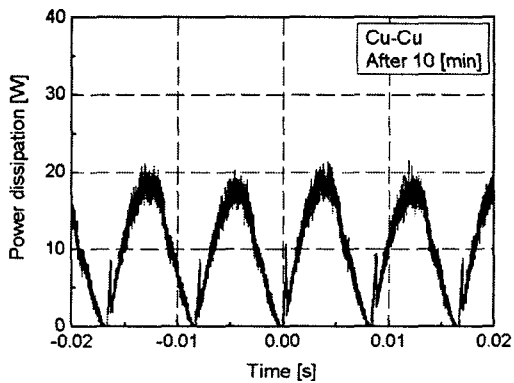
(a) after 10[min]



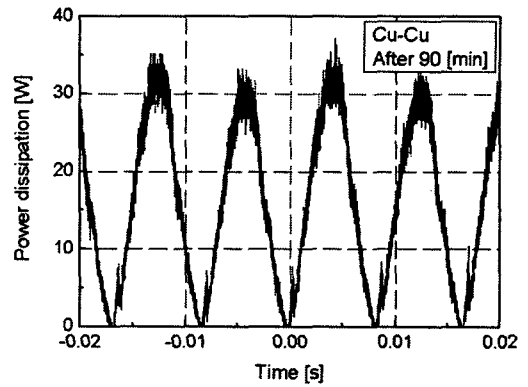
(b) after 90[min]

그림 7 구리선-구리선 접촉할 때의 시간과 전압 파형의 관계
Fig. 7 The voltage waveform of copper-copper contacts type according to time

그림 8은 구리선-구리선 직렬 아크가 발생할 때의 전력 소비 파형을 나타낸 것이다. 부하에 흐르는 전류는 1.6[A]이며 산화물 성장에 따른 접촉 저항의 상승으로 전력 소비도 약 19[W]에서 31[W]로 증가하는 것을 알 수 있다. 파형의 특성 곡선에 나타난 바와 같이 미세한 전력 변화가 있음을 알 수 있는데 이것은 산화물 증식에 필요한 에너지 변동 요소로 판단된다.



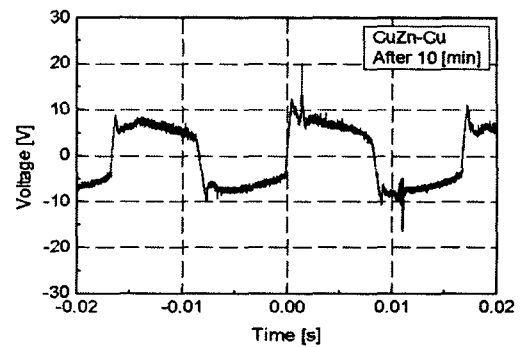
(a) after 10[min]



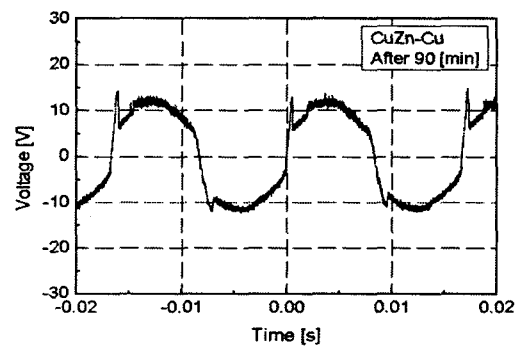
(b) after 90[min]

그림 8 구리선-구리선 접촉할 때의 시간과 전력 파형의 관계
Fig. 8 The power dissipation of copper-copper contacts type according to time

그림 9는 황동선-구리선 산화물 증식이 있을 때 시간에 따른 전압 파형을 나타낸 것이다. 산화물 증식에 있어서 정(+), 부(-)에서 전압 상승시에 피크가 나타났으며, 황동선과 구리선의 접촉에 따른 정(+)의 피크와 부(-)의 피크 역시 약간 차이가 나타난 것을 알 수 있다. 산화물 증식에 따른 접촉 불량부의 전압 변화는 8.4[V]에서 11[V]로 증가하였지만, 구리선-구리선 접촉의 경우보다는 낮게 나타났으며 전력 소비도 낮게 나타났다. 구리의 저항률은 1.71[$\mu\Omega\text{m}$]이고, 황동의 저항률은 25[$^{\circ}\text{C}$]에서 6.13[$\mu\Omega\text{m}$]이므로 비슷한 경향을 보이는 것을 알 수 있다[15-16].



(a) after 10[min]

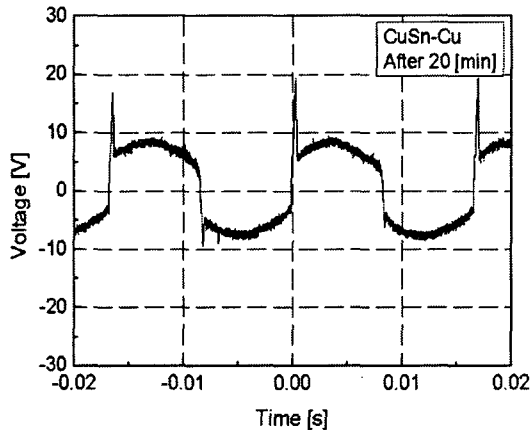


(b) after 90[min]

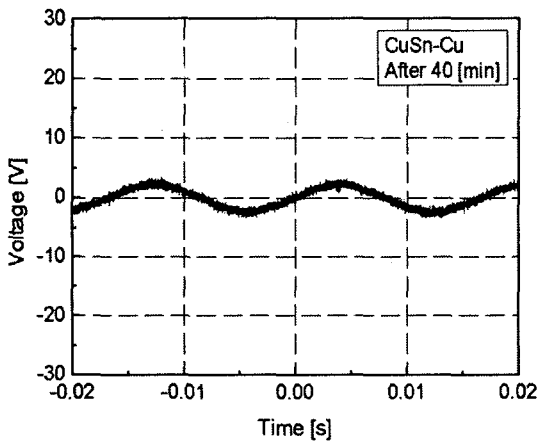
그림 9 황동선-구리선 접촉할 때의 시간과 전압 파형의 관계
Fig. 9 The voltage waveform of brass-copper contacts type according to time

according to time

그림 10은 청동선-구리선 직렬 아크가 발생했을 때 시간에 따른 전압 파형을 나타낸 것이다. 청동선-구리선 접촉에서는 앞의 두 경우와 다르게 정(+)에서 전압 상승시에 피크만이 나타났으며, 40분이 경과된 후에는 산화물 성장이 더 이상 일어나지 않았다. 열전도율[W/mK]은 구리 \approx 390, 황동 \approx 120, 청동 \approx 110 정도로 산화물 성장에 관계가 있는 것으로 여겨지며, 실험에 사용된 청동선의 직경이 상대적으로 구리선 및 황동선의 시료보다 굵기 때문에 단위 면적당의 전류량이 적기 때문인 것으로 판단된다.



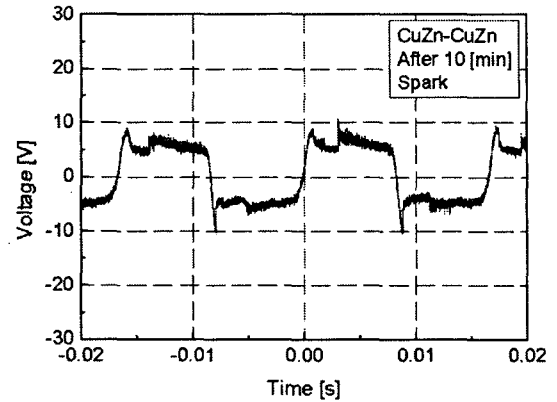
(a) after 10[min]



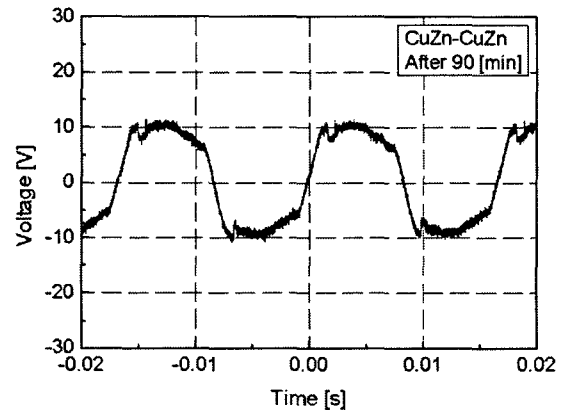
(b) after 90[min]

그림 10 청동선-구리선 접촉할 때의 시간과 전압 파형의 관계
Fig. 10 The voltage waveform of bronze-copper contacts type according to time

그림 11은 황동선-황동선 산화물 증식이 있을 때 시간에 따른 전압 파형을 나타낸 것이다. 황동선-황동선 사이의 접촉에서는 정(+)과 부(-)의 피크가 거의 같았으며, 피크의 크기는 비교적 완만한 형태를 보이는 것으로 관측되었다. 또한, 산화물 증식에 따른 접촉 불량부의 전압 변화는 8.2[V]에서 10[V]로 약 1.8[V] 증가하였으며, 파형의 저그러짐이 반복적인 주기성을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 기계적인 진동이 전원 주파수에 영향을 미친 것은 확실한 것으로 추측하고 있으나 구체적인 메커니즘인가에 대해서는 지속적인 분석이 요구된다.



(a) after 10[min]



(b) after 90[min]

그림 11 황동선-황동선 접촉할 때의 시간과 전압 파형의 관계
Fig. 11 The voltage waveform of brass-brass contacts type

4. 결 론

본 연구에서는 전기 설비의 접속부 또는 단선시에 발생될 수 있는 직렬 아크의 특성을 해석하기 위해 현장과 유사한 조건의 실험 장치를 제작하여 산화물이 증식된 실제 사진을 제시하였으며, 실시간으로 측정된 전압 및 전력 파형을 관측하고 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 구리선과 구리선을 접촉한 상태에서 진동에 의한 직렬 아크가 시작되면 접촉면에서는 청백색의 불꽃이 초기에 발생하고 일정 시간이 지나면 황색의 불꽃이 발생한다. 즉 적열로(hot zone)에서 증식이 확대되며 대부분 과열에 의해 표면은 검은 색으로 변형되는 것을 알 수 있으며, 초기의 직렬 아크가 생성되기 위해서는 미소 진동이 필연적이나 일정 시간이 경과하여 산화물 증식이 활성화되면 기계적인 진동이 없이도 성장되는 것을 알 수 있다.

(2) 황동선과 구리선 사이에 직렬 아크가 발생할 때의 산화물 증식은 10분 정도 경과되면 접촉면 근처의 구리선은 용융되어 검게 변하고 증식이 시작되지만, 약 90분 정도 경과되면 구리선은 대부분 과열에 의해 표면은 검은 색으로 변형되고 황동선도 검게 용융되고 적열로가 확실하게 형성되었다.

(3) 구리선과 구리선에서 접촉 불량에 따른 산화물 증식 길이는 약 20분이 지난 후 약 2[mm]가 성장하였으며, 90

분이 경과한 후에는 약 7.1[mm] 정도가 성장하였다. 구리선과 황동선에서는 약 20분이 지난 후 0.9[mm]정도가 성장하여 시간이 지날수록 증식 길이는 점점 증가하여 90분 후에는 4.3[mm]로 증식되었다. 청동선과 구리선에서는 약 20분이 지난 후 약 1.4[mm]가 성장하였으며, 40분이 경과된 후에는 2.7[mm] 정도 성장하였지만 더이상의 증식은 일어나지 않았다. 황동선-황동선에서는 20분 경과 후 0.8[mm]가 성장하였으며, 90분이 경과한 후에는 1.2[mm] 정도가 성장하여 성장 폭이 다른 시료보다 작게 나타났다.

(4) 구리선과 구리선 사이에 직렬 아크가 발생할 때의 부하에 흐르는 전류는 1.6[A]이며 산화물 성장에 따른 접촉 저항의 상승으로 전력 소비도 약 19[W]에서 31[W]로 증가하는 것을 알 수 있다. 황동선-구리선의 경우 산화물 증식에 따른 전압의 변화는 8.4[V]에서 11[V]로 증가하였다. 청동선-구리선 접촉에서는 앞의 두 경우와 다르게 정(+)에서 전압 상승시에 피크만이 나타났으며, 40분이 경과된 후에는 산화물 성장이 더 이상 일어나지 않았다. 황동선과 황동선 사이의 접촉에서는 정(+)과 부(-)의 피크가 거의 같았으며, 피크의 크기는 비교적 완만한 형태를 보이는 것으로 관측되었다. 또한, 산화물 증식에 따른 전압 파형은 8.2[V]에서 10[V]로 약 1.8[V] 증가하였으며, 파형의 찌그러짐이 반복적인 주기성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 결과를 종합하면 전선과 전선 사이에 직렬 아크가 발생하여 산화물 증식이 발생하기 위해서는 초기에 일정한 진동이 필요하며 재질에 따른 일부 상이한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 산화 반응이 일어날 때 전압 파형은 미세한 리플이 수반되며 불규칙적인 파형이 관측됨을 밝혔다. 즉 이상의 특성을 동일한 시계열로 설정하고 각각의 특성에 대한 데이터를 분석하면 전기 설비의 직렬 아크 발생 여부를 판정할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 송인회, 電氣災害統計分析, 韓國電氣安全公社, pp.88-89, 2004.
- [2] 최충석 외 5, “전기화재공학”, 동화기술, pp.189 -270, 2004.
- [3] 최충석, 이경섭, 이덕출, “열열화된 600V 2중 비닐절연 전선의 특성변화 분석”, 대한전기학회논문지, Vol.49C, No.1, pp.8-12, 2000.
- [4] 김향근, 최충석, 정현상, “저압용 전원선의 접촉 불량에 따른 열적 특성에 관한 연구”, pp.1466-1468, 대한전기학회학술지C권, 2003.
- [5] C.S. Choi, K.M. Shong, D.O. Kim, D.W. Kim, Y.S. Kim, “The Electrical arc Direction PatternS by Short-circuit angle”, pp.218, Thirtieth Int. Symposium on Combustion, 2004.
- [6] 三木康生 外 2, “電氣接點の集中抵抗について”, 電氣學

會論文誌 A, Vol.89, No.1, pp.151, 1974.

- [7] Shigehito, Kensuke Akamatsu, Tetsuya Yano, Minoru Mizuhata and Akihiko Kajinami, “Preparation and characterization of copper(I) oxide nanoparticles dispersed in a polymer matrix”, J. Mater. Chem., 8(8), pp.1865-1868, 1998.
- [8] A.Jolk, M.Jorger, C.F.Klingshirn, M.Franco, B.Prade, A.Mysyrowicz, “Differential Transmission Spectroscopy(DTS) in Cu₂O in the Presence of Cold Excitons”, Physical status solidi(b), Vol.222, No.1, pp.295-299, 2000.
- [9] 堀田悦博, “亞酸化銅増殖發熱現象について”, 日本火災學會誌, Vol.24, No.1, pp.52-58, 1974.
- [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, pp.31-37, 1996.
- [11] V.musolino, A.Dal Corso, A.Selloni, “Initial stages of growth of copper on MgO(100) : A first Principles study”, The American Physical Society, Vol.83, No.14, pp.2761-2764, 1999.
- [12] Chang Q.Sun, “A model of bonding and banding-forming for oxides and nitrides”, American Institute of Physics, Vol.72, No.14, pp.1706-1708, 1998.
- [13] Macro T. Grassi, Bo Shi, Herbert E. Allen, “Partition of Copper Between Dissolved and Particulate Phases Using Aluminum Oxide as an Aquatic Model Phase : Effects of pH, Solids and Organic Matter”, J. Braz. Chem. Soc., Vol.11, No.5, pp.518-524, 2000.
- [14] V. Musolino, A.Selloni, R.Car, “Atomic and electronic structure of Cu clusters on MgO”, Surface Science 402-404, pp.413-417, 1998.
- [15] David R. Lide et al, Handbook of Chemistry and Physics 76th, CRC press, pp.12-172 to 175, 1995.
- [16] 김병희 외, 이화학사전, 성문각, pp.112-113, 198-199, 1203, 1996.

저 자 소 개



최 충 석 (崔 忠 錫)

1961년 9월 19일생. 1991년 2월 인하대 공대 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



김 향 곤 (金 珮 坤)

1970년 12월 14일생. 1996년 2월 조선대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년~현재 전기안전연구원 재해예방연구그룹 책임연구원.

Tel : 031-580-3031

Fax : 031-580-3045

E-mail : kon0704@kesco.or.kr



김 동 옥 (金 棟 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



김 동 우 (金 東 佑)

1972년 3월 20일생. 1996년 2월 인하대학교 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 전기안전연구원 재해예방연구그룹 연구원.

Tel : 031-580-3036

Fax : 031-580-3045

E-mail : klove@kesco.or.kr