

이종 금속간의 산화물 증식에 따른 전압 파형분석 및 열화 패턴

김영석, 김동욱, 이기연, 최충석
한국전기안전공사 전기안전연구원

The Deterioration Patterns and Voltage Waveform between Different Kind of Metals According to Oxide Growth

Young-Seok Kim, Dong-Ook Kim, Ki-Yeon Lee, Chung-Seog Choi
Electrical Safety Research Institute, Korea Electrical Safety Corporation

1. 서론

전기 설비는 전기적으로 어떤 이상 현상에 대하여 자기 보호기능을 가지도록 설계되어 있지만, 열화가 진행하거나 전혀 생각지도 못한 곳에서의 화재가 발생하는 경우가 다수 있으므로 전기 설비의 안전 상태를 상시 감시하거나 화재의 징후를 사전에 감지하는 것이 필요하다. 또한 전기 설비나, 가전제품 등에서는 접촉 불량 시, 과열로 생각되는 전기사고 사례가 많으며, 금속의 산화에 기인하는 산화물 증식의 원인으로 화재사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이런 전기 접속부는 이종 금속간의 접속이 다수를 차지하고 있으며, 산화물 증식 등에 의한 화재의 위험성이 매우 높다[1-5].

일반적으로 접촉 불량에 의한 화재는 전기기기 내부, 배선기구, 배·분전반, 전기설비 등의 전선과의 접촉개소가 느슨해져 그 부분의 접촉저항이 증가하고 줄열이 발생하여 출화하는 것으로 큰 부하전류는 물론 작은 부하전류에서도 화재의 가능성이 매우 높다. 또한 구리 이외의 이종 금속 접속부에 대해서도 유사한 현상이 일어나는 것을 알 수 있지만, 전기적 특성 등에 대한 연구는 미미한 실정이다[6-8].

따라서 본 연구에서는 전기설비의 접속부에서 이종 금속간의 접촉 불량에 의한 산화물 증식, 전압 파형 분석, 시간경과에 따른 산화물 증식에 따른 열화 현상을 조사하였으며, 이들 열화 된 시료를 주사전자현미경 등을 이용하여 정밀하게 분석하였다.

2. 실험방법

전선 접속부의 접촉 불량에 의한 산화물 증식실험은 접촉상태의 설정 및 발열현상을 관측하기 어렵기 때문에 그림 1에 나타낸 것과 같이 접촉면의 진동을 유발하여 접촉 불량을 실험하였다. 그림 1은 실험장치의 개략도를 나타낸다. 본 실험에 사용한 재료는 구리, 청동, 황동으로 길이 60[mm], 직경 2.0[mm ϕ]로 하였으며, 황동의 도전율은 구리의 약 30[%] 정도이고 인장강도는 35~56[kg/mm 2]이다. 청동은 직경이 4.0[mm ϕ], 도전율 45~50[%], 인장강도는 45~70[kg/mm 2]인 것을 사용하였다. 이종금속의 접촉은 구리-청동, 구리-황동, 황동-황동 등의 조건에 대해 산화물 증식 실험을 수행하였다. 절단한 2분의

전선을 진동 가진부와 고정부에 설치하고 접촉 불량에 일어나기 쉽도록 하였으며, 전선과 전선을 접촉시킨 후, 단상 220[V], 60[Hz]의 상용전원으로 하였다. 진동기(vibrator)로 전선 접촉면에 미소진동을 주어 접촉 불량을 일으켰으며, 불꽃이 반복적으로 발생하도록 하였다. 이때 부하는 전등부하(240[W])를 사용하였으며, 전류값과 전압파형은 후크온메타와 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 그리고 산화물의 증식과정은 컴퓨터에 연결된 카메라를 이용하여 촬영하였다.

전선 접촉부에 생성된 산화물의 증식길이는 마이크로미터(Miyutoyo, Japan)를 이용하여 측정하였으며, 산화물의 표면 및 성분분석은 주사전자현미경(JSM 6400, Jeol, Japan)과 에너지 분산형 X선분석기(EDX, ISIS, Oxford, England)을 이용하였다. 실험은 온도 13.4[°C], 습도 28[%]의 분위기에서 실시하였다.

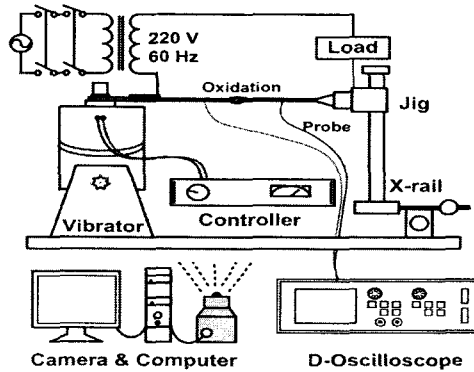
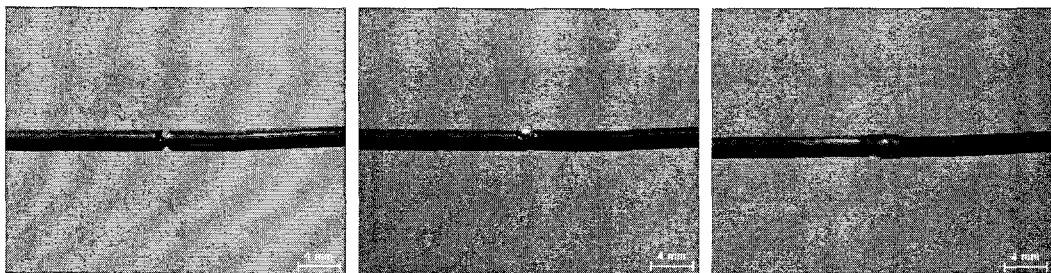


Fig. 1. 산화물 증식 발열 실험 개략도.

3. 실험결과 및 고찰

상용전원 220[V], 전류 1.6[A]의 조건에서 이중 금속 접촉에 따른 산화물의 성장, 전압파형 등을 실험 분석하였다. 이때, 접촉 불량에 유도된 진동기를 이용하였으며, 각 시료마다 10분 정도 진동을 주었으며, 그 이후 진동을 멈추었다.

그림 2에 황동과 구리를 접촉했을 때의 산화물 증식과정을 나타낸다. 그림 2(a)와 같이 10분 정도 경과되면, 불규칙적인 아크가 관측되고, 접촉면 근처의 구리는 용융되어 검게 변하고 증식이 시작되지만, 황동은 용융이 쉽게 일어나지 않았고 표면도 구리에 비해 검게 변하지 않았다. 그림 2(c)와 같이 90분 정도 경과되면 구리는 대부분 과열에 의해 표면은 검은색으로 변형되고 황동도 검게 용융되고 적열로가 확실하게 형성되었



(a) 10분 경과 후

(b) 30분 경과 후

(c) 90분 경과 후

Fig. 2. 황동과 구리 접촉에서의 산화물 증식

다. 또한 산화물의 증식길이는 점점 증가하여 90분 후에는 4.3[mm]로 증식되었으며, 대부분 구리방향으로 산화물이 성장하였다. 이는 황동이 도전율이 낮고 인장강도가 크기 때문에 구리방향으로 산화물이 성장하는 것으로 판단된다.

그림 3은 황동-구리접촉에서 산화물 증식에 따른 전압파형을 나타낸다. 그림 3(a)와 같이 10분이 경과한 후에는 도체 접촉면에서 불규칙적인 아크에 의한 파형의 찌그러짐이 관측되어 도체가 산화되고, 산화물 증식이 시작되는 단계인 것을 알 수 있다. 그림 3 (b)와 (c)에서는 산화물 증식에 의한 정류 특성이 관측되고, 정(+), 부(-)에서 전압 상승 시에 피크(peak)값이 나타났으며, 황동과 구리의 접촉에 따른 정(+), 부(-)의 피크값이 약간 차이가 나타난 것을 알 수 있다. 전압값은 산화물 증식에 따른 시간 변화에 의해 8.6[V], 9.6[V], 12.6[V]로 증가하여 그에 따른 소비전력도 증가하는 것으로 판단된다.

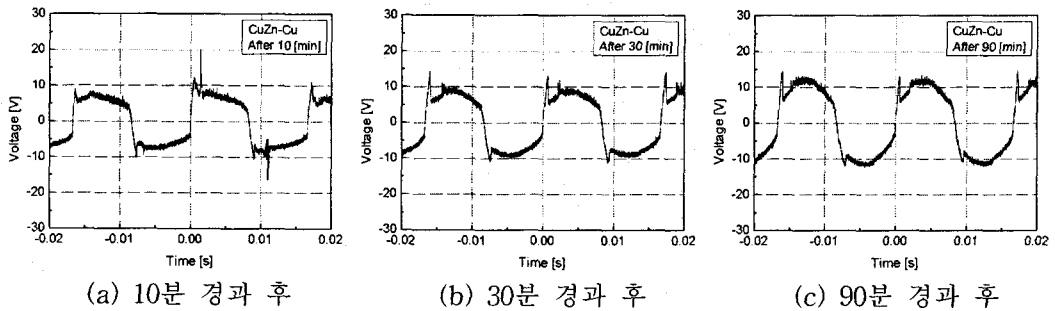


Fig. 3. 황동-구리 양단의 전압파형

그림 4는 청동과 구리를 접촉했을 때의 산화물 증식과정을 나타낸다. 그림 4(a)와 같이 10분 정도 경과되면, 불규칙적인 아크에 의해 산화되고 용융되어 황색의 불꽃이 발생하였으며, 증식이 시작되었다. 하지만, 청동과 구리의 접촉에 의한 산화물 증식은 그림 4(c)에 나타난 것과 같이 40분 정도 경과되면 산화물의 증식은 더 이상 일어나지 않았다. 이것은 청동의 직경이 상대적으로 구리 및 황동의 시료보다 굵고, 열도전율이 가장 낮기 때문에 쉽게 용융되지 않는 것으로 판단된다. 산화물의 증식 길이는 40분이 경과된 후, 2.7[mm] 정도 성장하였지만, 더 이상의 증식은 일어나지 않았다.

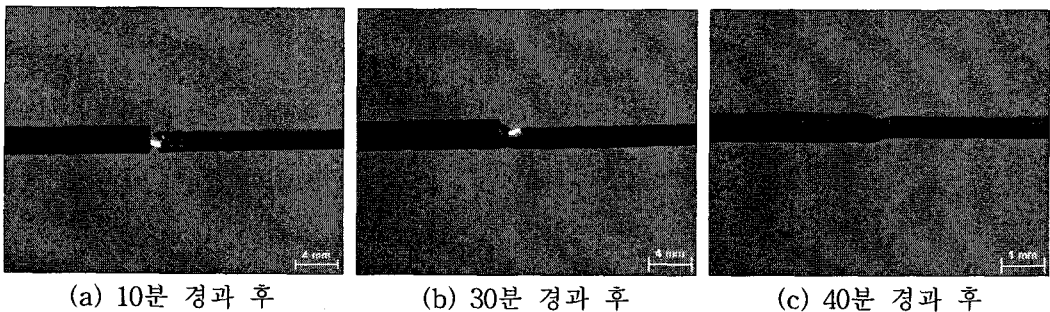


Fig. 4. 청동과 구리 접촉에서의 산화물 증식

그림 5는 청동-구리접촉에서 산화물 증식에 따른 전압파형을 나타낸다. 청동-구리 접촉에서는 그림 3과 약간 다른 경향을 나타냈으며, 정(+), 부(-)에서 전압 상승 시에 피크(peak)값만이 나타났으며, 산화물 증식에 따른 시간 변화에 따라 전압값은 9.2[V],

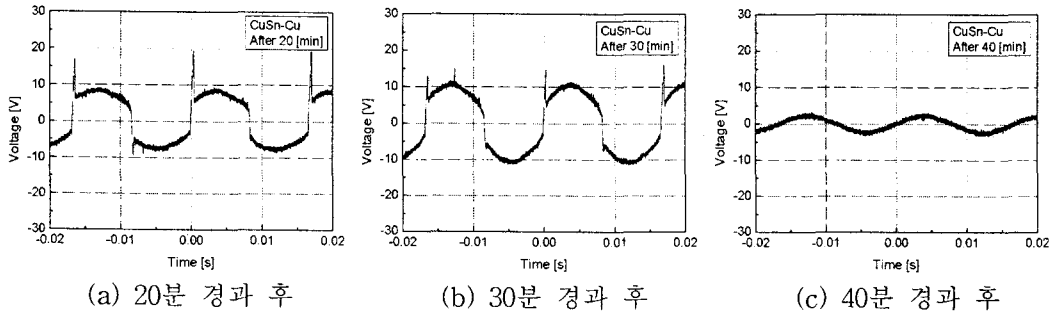


Fig. 5. 청동-구리 양단의 전압파형

11.2[V]로 증가하였다. 전압값이 상승함에 따라 산화물 증식이 황동-구리 접촉보다 쉽게 증식되는 것으로 판단되며, 그에 따른 소비전력도 증가한 것으로 판단된다. 하지만, 40분이 경과된 후에는 산화물 성장이 더 이상 일어나지 않는 파형이 관측되었다.

그림 6은 황동과 황동을 접촉했을 때의 산화물 증식을 나타낸다. 그림 6(a)와 같이 10분 정도 경과되면, 접촉면 근처의 황동은 다른 시료와는 다르게 용융되는 현상은 적게 이루어지고 적열로의 형성 면적도 작게 일어났다. 또한 그림 6(b)에 나타낸 것과 같이 90분 정도가 경과되어도 산화물의 증식길이는 1.2[mm] 정도 성장하여 다른 시료보다 작게 증식되었다.

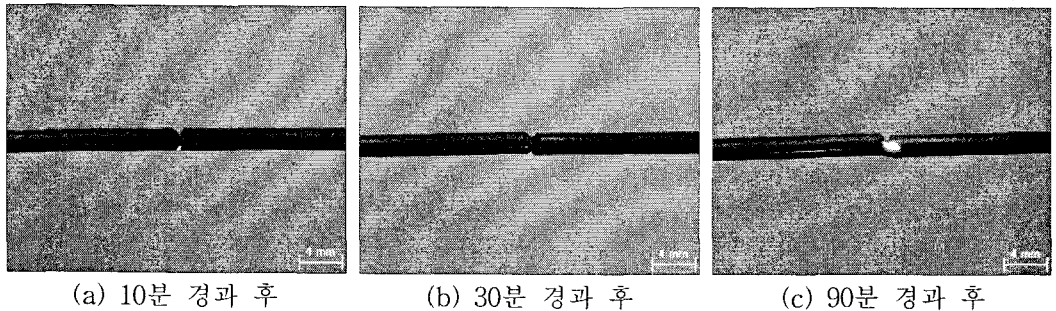


Fig. 6. 황동과 황동 접촉에서의 산화물 증식

그림 7은 황동-황동접촉에서 산화물 증식에 따른 전압파형을 나타낸다. 황동-황동 접촉에서는 정(+)과 부(-)의 피크값은 같았으며, 피크(peak)값의 크기는 크지 않았다. 또한 산화물 증식에 따른 전압값의 변화는 8.2[V]에서 10[V]로 증가하였지만, 다른 이

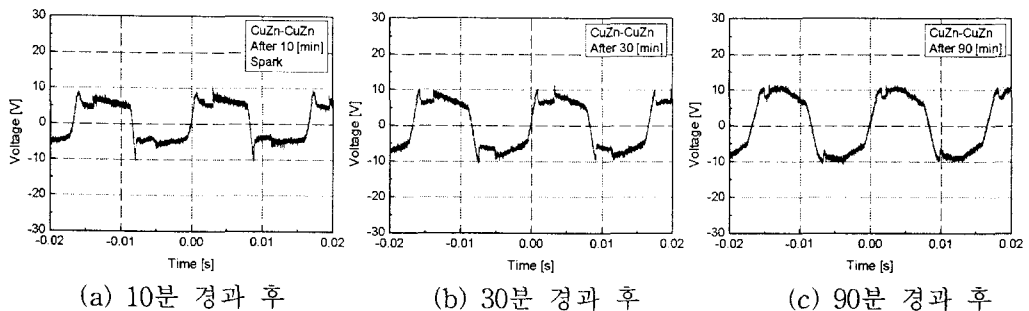


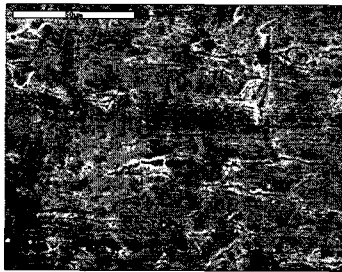
Fig. 7. 황동-황동 양단의 전압파형

중 금속 접촉시의 전압값보다 낮게 나타났다.

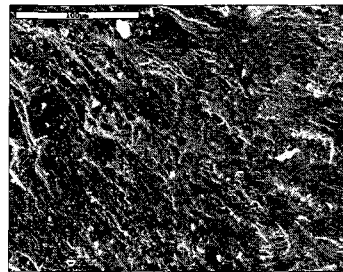
이중 금속간의 접촉에서는 산화물 증식에 따라 정류특성을 가지는 전압파형이 발생하였으며, 접촉하는 재질에 따라 전압파형도 각각 다르게 나타났다. 이는 이중 금속간의 독특한 현상은 산화물 증식이 반도체와 금속의 접촉 특성에서 인가전압의 극성에 의해 흐르는 전류값이 크게 달라지는 정류성 접촉의 원인에 의한 것으로 판단되지만, 여기에 대한 정확한 이유에 대해서는 지속적인 연구가 필요하다.

각 시료에서 접촉면의 산화물을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 표면 상태와 에너지 분산형 X선 분석기(EDX)를 이용하여 성분을 분석하였다. 분석조건은 가속전압(AccV) 20[kV], 작업거리(WD) 15[mm], 배율(Mag.)은 500배로 하였다.

그림 8은 황동과 구리의 주사전자이미지를 나타낸다. 그림 8(a)는 황동의 표면구조를 나타낸 것으로 전선 본래의 연신조직이 나타났으며, 여러 군데에서 크랙(crack)이 형성된 것을 볼 수 있었다. 또한 구리성분이 49.24[%], 아연성분이 39.03[%], 산소성분이 11.73[%] 검출되었다. 그림 8(b)는 황동과 구리사이에 증식된 산화물 내부의 이미지를 나타낸 것으로 산화물의 절단면은 매끄럽고 광택이 나타나며, 작은 홀들이 관측되었다. 산화물 내부의 성분은 구리성분이 33.59[%], 아연성분이 43.48[%], 산소성분이 22.94[%] 검출되었다. 그림 9(a)와 (b)에 나타난 청동-구리의 산화물 내부와 황동-황동의 산화물 내부에서도 그림 8(b)에 나타낸 조직 구조와 같은 이미지를 나타내었다.

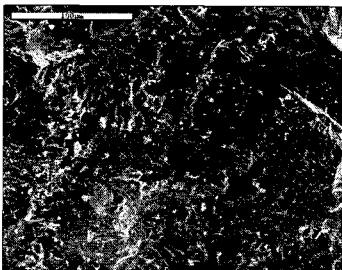


(a) 산화물 표면

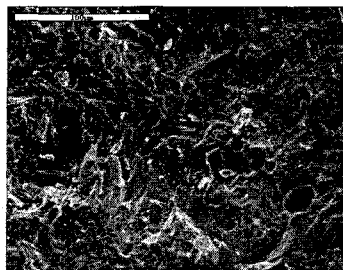


(b) 산화물 내부

Fig. 8. 황동과 구리 접촉에서의 산화물 주사전자이미지



(a) 청동-구리 내부



(b) 황동-황동 내부

Fig. 9. 주사전자이미지

4. 결론

본 연구에서는 전기설비 접속에 많이 이용되고 있는 구리 및 구리 합금에서 아크에 의한 산화물 증식에 따른 전압파형 및 열화패턴에 관하여 연구하였다.

- 1) 이종 금속 간에서 진동에 의한 접촉 불량에 발생하면, 불규칙적인 아크 발생에 의해 금속은 산화되고 황색불꽃이 발생하며 산화물이 증식되었다. 또한 시간이 경과 할수록 이종 금속간의 용융은 점점 심해지고 적열부가 확대되었다.
- 2) 일정 전류에서 이종 금속 간의 산화물 증식길이는 차이가 나타났으며, 황동-구리 접촉은 90분 후에 4.3[mm], 황동-황동접촉은 90분이 경과한 후에는 1.2[mm] 정도가 성장하여 산화물 증식이 잘 이루어지지 않았다. 산화물의 증식은 재료의 도전을 및 인장강도와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.
- 3) 이종 금속간에서 산화물 증식에 따른 전압은 독특한 형태의 파형이 관측되었으며, 산화물 증식 시 정류특성을 가지는 전압파형이 발생하였으며, 접촉하는 재질에 따라 전압파형도 각각 다르게 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 산화물 증식에 따라 소비되는 전력도 증가하는 것으로 판단된다.
- 4) 산화물의 주사전자이미지를 분석해 보면, 표면구조는 전선 본래의 연신조직 및 크랙(Crack)이 나타나는 것을 확인하였으며, 내부구조는 매끄럽고 광택이 나타나며, 작은 홀들이 관측되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 木下勝博 et al, “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 報告科學編, Vol. 49, No. 1, 1996.
2. Jarle Sletbak et al, “Glowing Contact Areas in Loose Copper Wire Connections”, IEEE Trans. on Component, Hybrid and Manufacture Technology, Vol. 15, No. 3, 1992.
3. 伊佐昭征, 亞酸化銅による發熱現象について, 火災學會紙, Vol 74, No. 24, p.237-242, 昭和49年.
4. 최충석, 송길목, 김향곤, 김동욱, 김동우, 김영석, “직렬아크에 따른 산화물 증식 및 전압파형 분석”, 대한전기학회 하계학술대회, pp.1832-1834, 2005.
5. 최충석, 김향곤, 김동욱, 김영석, “전원코드의 접촉 불량에 의해 형성된 파형 및 플러그의 특성”, 한국안전학회지, Vol. 20, No.1, pp.87-93, 2005.
6. H. Shingu, “Heat Generation on Screwed Electric Contacts (II)”, 愛知工業大學 研究報告, 20号 B, 昭和60年.
7. 과학경찰연구소, “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科學編, Vol. 41, No. 3, pp.30-37, 1988.
8. Chung-Seog Choi, Young-Seok Kim and Hyang-Kon Kim, “The Fire Hazard of Screwed Electric Contacts Due to Mechanical Vibration at Low Voltage Equipment”, International Journal of Safety, Vol. 4, No. 2. pp. 18-23, 2005.