

A-06

## 접촉재료에 따른 산화물의 전기적 특성 비교

김향곤, 김영석, 이기연, 최충석  
전기안전연구원(한국전기안전공사 부설)

### The Electrical Characteristics Comparison of Copper Oxide due to Contact Materials

Hyang-Kon Kim, Young-Seog Kim, Ki-Yeon Lee, Chung-Seog Choi  
Electrical Safety Research Institute(attached to KESCO)

#### 1. 서론

산업기술이 발달함에 따라 전기설비는 대용량화되고 있으며 생활을 편리하게 해주는 전기제품들은 소형화, 집적화, 경량화, 지능화되어 가고 있는 추세이다. 인터넷을 기반으로 한 정보화가 급속하게 확산됨에 따라 다양한 정보를 사이버 공간을 통하여 공유하고 있으며 시민단체와 같은 비정부기구(NGO)뿐만 아니라 제품을 직접 사용하는 소비자의 관심이 제품의 안전과 신뢰성 문제에 모아지고 있다. 2002년 7월 제조물책임법(PL법)이 시행됨에 따라 기업에서는 자사 제품의 안전 확보와 자사 제품과 관련된 사고원인 규명에 많은 관심과 투자를 늘리고 있는 실정이다. 그러나 사고는 복합적인 원인에 의해 발생하기 때문에 정확한 사고원인을 규명하는 것은 매우 어려운 일이다. 정확한 원인 규명을 위해서는 해당분야에 대한 전문지식과 다양한 실험·분석데이터, 현장 조사경험을 가진 전문가의 확보와 분석기술의 개발이 선행되어야 할 것이다. 통계상 국내 화재의 약 1/3은 전기에 의해 발생하는 것으로 집계되고 있다. 전기로 인한 재해를 줄이기 위하여 각계각층에서 다각적인 노력을 기울이고 있으며<sup>1-3)</sup> 향후에도 정부 주도의 정책적인 지원과 관심이 요구된다.

전기의 전달에는 다양한 도전재료가 사용되고 있으며 그중 대표적인 것은 동과 동합금, 알루미늄, 철 등을 들 수 있으며 이밖에도 다양한 접합재료와 접점재료가 사용되고 있다. 이들 도전재료는 동종 또는 이종금속이 서로 접촉하여 연장거나 분기된다. 이러한 도체의 전기적 접속부에서 접촉/접속불량이 발생하였을 때의 물리·화학적 특성과 재해 위험성을 밝혀내는 것은 전기 사용 중에 발생할 수 있는 사고 예방과 관련 기술의 개발에 중요한 자료가 될 것으로 생각된다<sup>4-5)</sup>.

본 논문에서는 전기화재의 원인 중 하나인 도체 접속/접촉부에서 접촉불량에 의한 접촉재료의 산화물 성장 특성과 이때의 전기적 특성을 실험과 분석을 통하여 규명하고자 하며, 향후, 전기재해 예방 및 원인규명을 위한 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

IEC 60943에 전기를 전달하는 도체의 접속/접촉에 대하여 규정하고 있으며 주요 내용을 살펴보면 접촉저항에 대한 이론적 설명, 접속/접촉 터미널에서의 열화 메커니즘, 도체의 온도상승 계산, 최대허용온도 등에 대해 서술하고 있다<sup>6)</sup>. 도체의 접속부에는 접촉저항( $R_c$ ; contact resistance)이 존재하고 이는 집중저항( $R_e$ ; constriction resistance)과 경계저항( $R_i$ ; film resistance)로 구성된다. 집중저항( $R_e$ )란 전류의 통로가 좁아짐으로 해서 생기는 저항을 말하며 접촉력이 클수록, 도체의 저항율이 작을수록, 금속의 경도가 낮을수록 작아지며, 경계저항( $R_i$ )은 도체가 외부 공기에 노출됨으로 해서 생기는 산화막 형성 등에 의한 저항을 나타낸다. 집중저항( $R_e$ )과 경계저항( $R_i$ )의 계산식 (1), (2)로부터 접촉저항( $R_c$ )의 계산식은 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$R_{(e)} = \frac{\rho}{2na} \dots\dots\dots (1)$$

$$R_{(i)} = \frac{\sigma_0}{\pi a^2} \dots\dots\dots (2)$$

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

여기서  $\rho$ 는 금속의 저항,  $n$ 은 접촉점의 수,  $a$ 는 도체의 지름,  $\sigma_0$ 는 터널저항(표면저항)을 나타낸다.

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

표 1. 대표적인 도전재료의 터널저항

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	-	$4.6 \times 10^{-13} \sim 4 \times 10^{-12}$ exceptionally up to $2.5 \times 10^{-11}$
Aluminium	-	$7 \times 10^{-11} \sim 10^{-9}$

동과 동합금의 접속부분에 접촉불량이 발생할 때 접촉되고 있는 부분의 동이 산화 및 발열하여 주위의 동을 산화시켜 가는 현상을 아산화동증식 발열현상이라 한다. 아산화동의 온도-저항특성을 살펴보면 상온에서는 수십 k $\Omega$ 의 전기저항을 갖고 있으나 온도가 상승함에 따라 저항이 낮아지는 부온도특성(NTC)을 가지고 있으며 동의 용융온도 부근인

1,050℃에서 약 3Ω 정도로 가장 낮은 저항을 갖으며 더욱 온도가 상승하게 되면 저항이 약간 증가하는 특성을 보인다. 아산화동은 전기적으로 P형 반도체의 특성을 갖고 있으며 육안상으로 유리질의 적색 결정을 보인다. 아산화동증식현상은 직류와 교류 모두에서 나타나며 접촉도체의 재질과 두께, 통전 전류의 크기에 따라 성장 특성이 달라진다. 또한, 산화물 증식시 등의 용융온도 이상으로 발열하기 때문에 주위 가연물에 착화하여 전기장애를 일으킬 수 있으며 산화물의 성장 조건이 유지되는 한 계속하여 증식하기 때문에 전기적인 접촉품질의 저하는 물론 접촉도체와 절연재료의 특성을 떨어뜨리는 결과를 가져온다.

### 3. 실험방법

전기의 전송에는 동과 동합금, 알루미늄, 철 등 다양한 재질의 도체가 사용되고 있다. 본 실험에 사용된 도전재료는 지름 2.0mm의 동선, 2.0mm의 황동선, 4.0mm의 청동선으로 표 2와 같은 순서와 접속방식으로 실험을 진행하였다.

표 2. 접촉불량 실험을 위한 도체의 접속 방식

순번	결합방식(성분)	순번	결합방식(성분)
1	동선(Cu) : 동선(Cu)	2	황동선(CuZn) : 동선(Cu)
3	황동선(CuZn) : 황동선(CuZn)	4	청동선(CuSn) : 동선(Cu)

그림 1은 접촉불량에 따른 산화물의 성장 특성과 전기적 특성을 측정하기 위한 실험장치 개략도이다. 60mm 길이로 절단한 각각의 실험용 전선을 실험장치의 좌우 고정대(chuck)에 고정하였으며 고정된 두 도체의 끝부분을 서로 접촉하여 전류의 통로를 만들었다. 실험 전원으로 교류 단상 220V 60Hz를 사용하였고 부하로는 100W의 백열전구 4개를 사용하였으며 이때 회로 전류는 1.6A였다. 두 도체의 접촉부에서의 접촉불량을 발생시키기 위하여 실험장치의 1축에 위치한 진동기(Vibrator)를 이용하여 미소 진동을 발생시켰으며 전용의 Controller를 이용하여 진동기의 크기(RPM)를 조절하였다. 진동은 2,000~3,000rpm으로 하였으며 10분간 진동을 인가한 후 멈추었다. 각각의 접속방식에서 미소 진동에 의하여 접촉면에서 아크와 산화가 진행되는 동안의 전압, 전류 등 전기적 특성을 오실로스코프(TDS-32, Tektronics, USA)를 이용하여 측정하였으며 진동을 정지한 후의 산화물 성장특성과 시간 경과에 따른 전기적 특성을 비교 분석하였다. 산화물의 시간에 따른 성장 길이는 마이크로미터(Miyutoyo, Japan)를 이용하여 측정하였다.

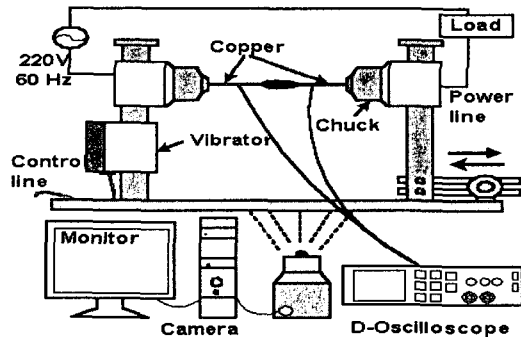


그림 1. 실험장치 개략도

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 접촉재료에 따른 산화물 증식 특성 분석

그림 2는 동선과 동선의 접촉에서 산화물의 증식과정을 나타낸 것이다. 접촉면에서 진동이 발생하면 백색을 불꽃이 발생한다. 진동이 계속됨에 따라 청백의 불꽃 중에 노란색의 불꽃이 나타난다. 이때 황색 불꽃이 계속 발생하면 진동기의 진동을 멈추었으며, 이때부터 산화물의 성장 길이를 측정하였다. (b)~(d)와 같이 성장하는 산화물은 산화제일구리인 아산화동( $Cu_2O$ )으로 적색으로 적열하는 적열부(hot zone)를 형성하며 적열부 내에는 노란색의 적열로(glowing path)가 꿈틀거리며 좌우의 도체를 산화시키며 성장해갔다.

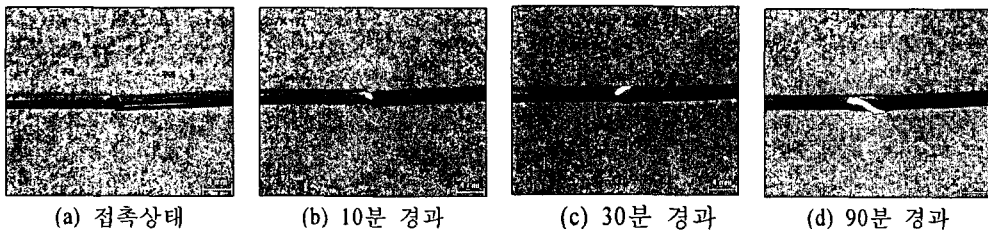


그림 2. 동선과 동선접촉에서의 아산화동증식 과정

그림 3의 (a)와 (b)는 황동선과 동선이 접촉했을 때 접촉부에서의 산화물 증식과정을 나타낸 것이다. (a)는 10분 경과후로 접촉면 부근의 동선은 용융되어 약간 검게 변색되고 산화물이 증식되지만 황동선은 열도전율이 동선보다 낮아 용융은 더디게 진행되었다. (b)는 90분 경과후로 동선과 황동선이 열전도에 의해 표면이 검게 변색되었다. 접촉부에는 적열부가 형성되고 산화물이 성장하였지만 동선과 동선의 접촉에 비해 성장 속도가 느린 것을 알 수 있었다.

그림 3의 (c)와 (d)는 황동선과 황동선이 접촉했을 때 접촉부에서의 산화물 증식과정을 나타낸 것이다. (c)는 10분 경과후로 접촉면 부근의 황동선은 다른 접촉 방식에서와 달리 증식이 늦게 진행되었으며 적열부의 형성 면적도 작게 나타났다. (d)는 90분 경과후로 아

산화동의 증식 길이는 다른 접촉방식에 비해 작음을 알 수 있다.

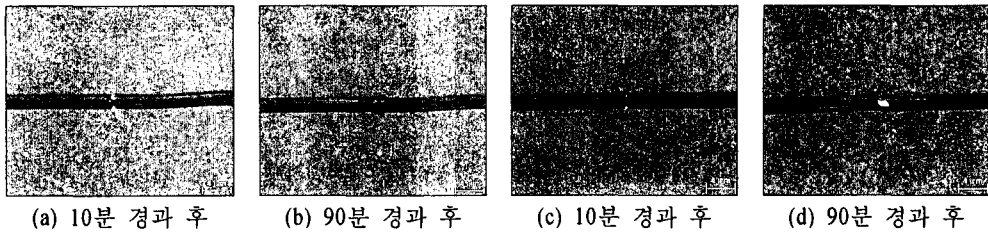


그림 3. 황동선(좌)과 동선(우) 및 황동선(좌)과 황동선(우) 접촉에서의 아산화동증식 과정

그림 4는 청동선과 동선을 접촉했을 때 아산화동의 증식 과정을 나타낸 것이다. (a)는 10분 경과후로 접촉면 부근의 청동선과 동선은 열전도에 의해 표면이 약간 검게 변색되고 접촉면에서는 산화물이 증식되었다. 그러나 청동선과 동선 접촉에서 아산화동의 증식은 (b)의 40분이 경과한 때에 산화물의 증식은 더 이상 이루어지지 않고 정지하였으며 청동선의 표면은 짙은 검정색으로 변색됨을 볼 수 있었다. 아산화동의 증식이 이루어지지 않은 이유는 동합금 중 청동의 열도전율과 전선의 두께, 통전전류의 영향인 것으로 판단된다.

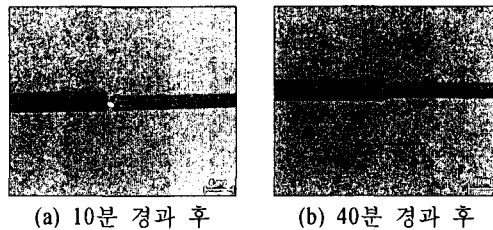


그림 4. 청동선(좌)과 동선(우) 접촉에서의 아산화동증식 과정

그림 5는 각각의 접촉방식에서 시간에 따른 산화물의 성장 길이를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시간이 경과함에 따라 증식 길이가 점차 증가함을 알 수 있었으며 동선과 동선의 접촉에서 약 20분 후에는 약 2mm가 성장하였으며, 90분 후에는 약 7.1mm 정도가 성장하였다. 황동선과 동선의 접촉에서는 약 20분후 0.9mm정도가 성장하였고 90분후에는 4.3mm로 증식되었다. 황동선과 황동선 접촉에서는 20분 후 약 0.8mm가 성장하였으며, 90분 후에는 1.2mm 정도가 성장하여 성장폭이 다른 접촉방식보다 가장 작게 나타났다. 청동선과 동선의 접촉에서는 약 20분 후 약 1.4mm가 성장하였으며, 40분 후에는 2.7mm 정도 성장하였지만, 더 이상의 아산화동 증식은 일어나지 않았다. 또한 황동선과 동선의 접촉에서와 거의 비슷한 성장 길이를 나타냈다.

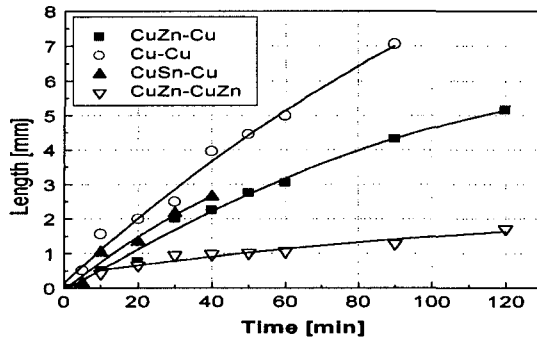


그림 5. 시간경과에 따른 아산화동의 성장 길이 비교

#### 4.2 접촉불량 진행시 전기적 특성 분석

그림 6은 접촉부에서 산화물이 성장하기 시작하여 30분이 경과한 때의 산화물 성장 부분의 전압파형을 측정된 것이다. 그림과 같이 정(+) 주기와 부(-) 주기로 바뀔 때 peak가 튀는 것을 볼 수 있으며 약간의 정류파형도 관측되었고 실험한 접촉방식 모두에서 유사한 파형 패턴을 보였다.

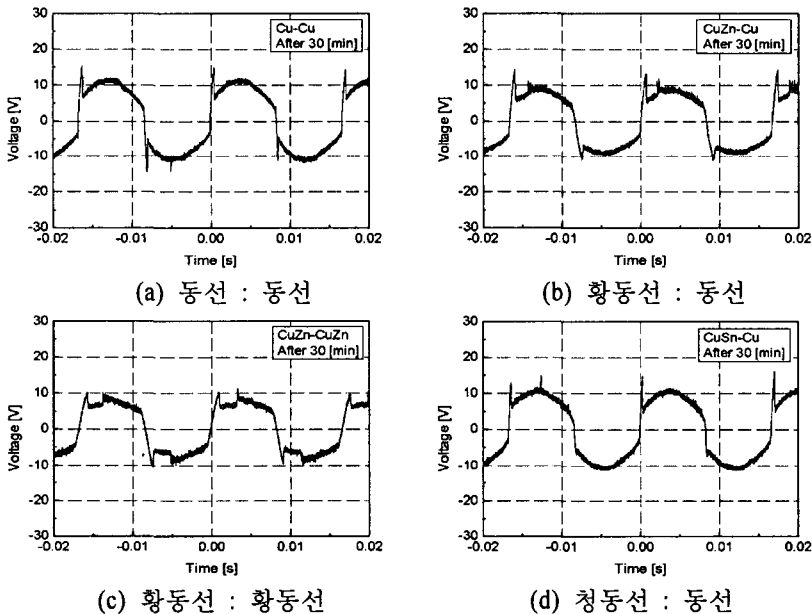


그림 6. 아산화동 성장시 전기적 파형 패턴 비교(30분 경과시)

### 5. 결론

이상과 같은 실험과 분석 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 접촉재료에 따른 산화물의 증식 특성을 분석한 결과, 동선과 동선의 접촉에서 가장 활발하게 진행되었으며 반면에 황동선과 황동선의 접촉에서 가장 더딘 진행을 보였다.

- 2) 산화물의 증식길이 측정결과, 동선과 동선의 결합에서 90분 경과시 약 7.1mm 성장으로 가장 빠르게 성장하였으며 황동선과 황동선의 접속에서는 40분 경과 후에 성장이 정지하였다. 이는 열전도도, 기계적 강도 등 도전 재료의 물리적 특성과 깊은 관계가 있는 것으로 판단된다.
- 3) 전압, 전류 등 전기적 특성을 분석한 결과, 정(+)주기와 부(-)주기로 바뀔 때 peak가 튀는 것을 볼 수 있었으며 약간의 정류파형도 관측되었다. 이는 동산화물(copper oxide)이 성장할 때 관측되는 특이 파형으로 전기재해 예방을 위한중요한 단서가 될 것으로 사료된다.

따라서, 전기화재, 감전사고 등 전기재해 예방을 위하여 동과 동, 동과 동합금의 접속부분에서의 접속 신뢰도 향상을 위한 접속/결합 방법의 개선 및 재료의 개발이 요구되며, 전기적 특성 해석 장치개발을 통한 사전예방 대책이 요구된다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. 최충석 외 4, “전기화재공학”, 동화기술, pp.189-265, 2004.
2. 김향곤 외 3, “저압용 전원선의 접촉불량에 따른 열적 특성에 관한 연구”, 대한전기학회 하계학술대회, Vol. C, pp.1466-1468, 2003.
3. 中野 弘伸, “電氣配線からの發火原因に関する考察”, 火災, Vol.46 No.2, pp.1-5. 1996.
4. Ming Sun et al, "Lifetime Resistance Model of Bare Metal Electrical Contacts", IEEE Trans. on Advanced Packaging, Vol.22 No.1, pp.60-67, 1999
5. Roland S. Timsit, "A Possible Degeneration Mechanism in Stationary Electrical Contacts", IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol.13 No.1, 1990.
6. IEC 60943(Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals), 1998