

스트레스 종류에 따른 구리 전선의 특성 변화



최 충 석
전주대학교 소방안전공학과 교수

1. 서론

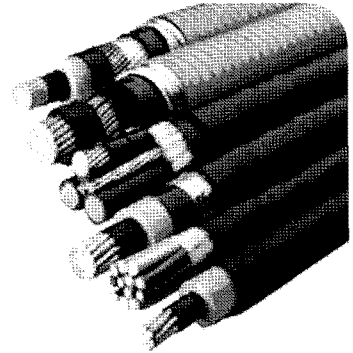
전기는 흐르기만 하면 때와 장소를 가리지 않고 열이 발생한다는 현상을 발견하여 제시한 사람이 제임스 줄(Joule, James Prescott; 1818~1889)이다. 즉 전기가 흐를 때 발생하는 열량은 전류의 2승과 저항의 곱에 비례하여 발생한다. 또한, 전기는 통전 중 주위에 전자계를 형성하는 성질이 있어서 다양한 에너지로 변환이 수월하며, 액체와 같은 전해질에서도 통전이 원활하고 반응을 자유롭게 할 수 있어서 전기도금, 전기분해 등이 가능하다. 그런데 이런 반응 과정 중에서 발생한 열을 적절하게 방사시키지 못하면 열균형이 무너지고 절연성능이 파괴된다. 전기에너지에 의해서 발생하는 사고의 형태는 전기화재(electric fire), 감전사고(electric shock), 전기설비 사고(electric installation) 등이다.



우리나라의 전기 생산 및 관리, 제품의 사용 전 검사, 주기적인 안전 점검 등을 실시하고 있다. 그런데 매일 발생하는 전체 화재의 약 25%가 전기화재로 판정되고 있다. 이 수치는 OECD 국가 중에서 가장 높은 점유율을 나타내고 있다. 지난 수년간 발생한 사고 유형을 분석한 결과 전기화재의 발생은 월별, 시간대별, 지역별 등의 요소에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 반면 빈번하게 사용되는 전압, 사용자의 관리 소홀, 전기에너지를

전달하는 매개체인 전기배선, 전기가 활용되는 주택, 전기를 관리 및 검사하는 기술자 집단 등이 상대적으로 높은 사고 발생률을 나타낸다.

따라서 본 논고에서는 도체(conductor)로 가장 많이 사용되고 있는 구리전선(copper wire)의 특성을 설명하고 스트레스 종류에 따른 구리전선의 특성 변화를 제시하여 사고원인 해석의 자료를 제공하는데 있다.



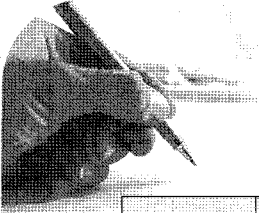
2. 구리의 특성

동의 성질은 순도에 따라 달라지는데 도전율에 영향을 주는 불순물은 Ti, P, Fe, Si, As 등이다. 또한, Al, Sn, Mn, Ni 등도 함유량이 수 퍼센트에 이르면 도전율이 격감하게 된다. 미량의 원소를 고용한도(固溶限度) 이하로 함유하면 농도에 대하여 직선적 관계가 있다. 두 가지 이상의 원소가 존재할 때도 고용한도 이하이면 서로 간섭하지 않으나 그 이상이 되면 간섭하는 경우가 있으며, <표 1>은 동의 물리적 성질을 나타낸다.

<표 1> 동의 물리적 성질

항목	내용	항목	내용
원자량	63.57	열전도도	0.934cal/cm ² /cm/sec/°C (at 20°C)
결정구조	면심입방격자(FCC), a=3.6075Å 滑面(111), 晶面(111)(at 20°C)	도전율	101 ~ 104% IACS
		고유저항	1.71 μΩ · cm(at 20°C)
밀도	8.89g/cm ³ (at 20°C)	온도계수	0.00397/°C (at 20°C)
용융온도	1,083°C(액상선온도), 1,065°C(고상선온도),	탄성계수	16.8 × 10 ⁶ (20 ~ 100°C)
			17.7 × 10 ⁶ (20 ~ 300°C)
비등점	2,562°C (at 1 atm)	용적변화	4.05%
열팽창률	12,000kg/mm ²	비열	0.092cal/g/°C (at 20°C)

동의 기계적 성질은 불순물의 함유량, 열처리 및 가공처리 등에 의해 현저하게 변화하게 된다. Cu도 다른 금속과 같이 가공의 정도에 따라 연질, 1/4경질, 1/2경질, 경질 등의 종류가 있으며, 고온에서의 Cu 강도는 고온이 될수록 감소하나, 점성은 약 500까지는 저감하고 그 이상이 되면 다시 증대한다. 따라서 고온가공은 750-850°C에서 하는 것이 좋으며, Cu 중의 불순물은 냉간가공보다는 열간가공할 때 큰 영향을 주며, 압연한 후 어닐링(annealing)한 시편에 대한 결과를 <표 2>와 같다.



〈표 2〉 Cu의 기계적 성질

항목	수치	항목	수치
인장강도	22 ~ 25kg/mm ²	피로한계	~ 8.5kg/mm ²
연신률	49 ~ 60%	타성계수	12,200kg/mm ²
단면수축률	93 ~ 70%	Brinell 경도	35 ~ 40
lzod 충격치	5.8kg · m	Poisson 비	0.33 ± 0.01

동은 상온의 건조한 공기 중에서는 그표면이 변화하지 않으나 대기 중에 방치하면 CO₂, SO₂, 수분 등의 작용에 의하여 표면에 녹색의 염기성탄산동(CuCO₃ · Cu(OH)₂), 염기성황산동(CuSO₄ · Cu(OH)₂) 등을 발생하며 이것은 보통의 물에 불용성의 보호피막 역할을 한다. Cu는 자연수에서도 보호피막이 형성되기 쉽고 부식률이 대단히 낮으므로 수관, 탱크, 열교환기 등에 널리 사용된다. 그러나 연수(軟水)에서는 탄산이 생겨서 보호피막의 생성을 저지하기 때문에 산소의 용해량이 많아지면 부식률도 상당히 높아진다. 해수에서는 유속이 적을 때는 내식성이 좋으며 부식률은 0.05mm/year 정도이다.

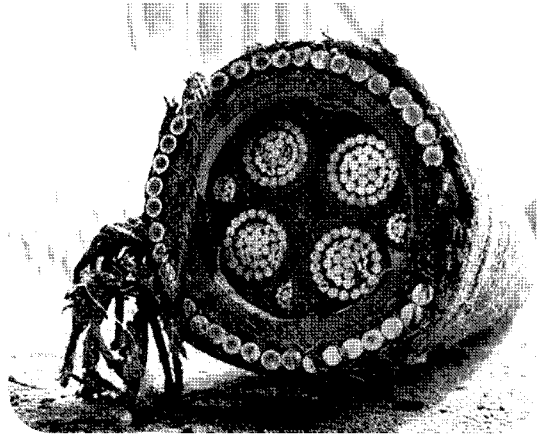
전해정련에 의해서 제조한 순구리를 전기동(electrolytic copper)이라고 부르며 동지금으로 판매되는 것이 보통이다. 이것의 순도는 높으나 취약해서 가공하기가 곤란하고 이것을 다시 산화환원에 의한 용융정련을 하여 형동(型銅)을 만들어 판매하는 경우가 많다. 표 3에 전기동지금에 대한 한국산업규격(KSD 2341)을 표시한다.

〈표 3〉 전기동지금 규격(KSD 2341)

종류	Cu(%)	불순물(ppm 이하)							
		As	Sb	Bi	Pb	S	Fe	Ag	계
1종	99.99 이상	5.0	4.0	2.0	5.0	15.0	10.0	25.0	65.0
2종	90.90 이상	30.0	30.0	10.0	50.0	50.0	50.0	-	-

정련동(electrolytic tough pitch copper)은 전기동을 용융 정제하여 Cu 중의 산소를 0.02~0.04% 남긴 정제동(精製銅)으로, 표준조성은 Cu; 99.92%, O; 0.03%이다. 용해할 때에 로(fumace)의 분위기를 산화성으로 해

서 용동(熔銅) 중의 산소농도를 증가하여 수소함량을 저하시킨 후에 폴링(poling)이라 하여 용동 중에 생목(生木)을 투입하여 산소함량을 0.02~0.04% 정도까지 탈산해서 금형에 주입한다. 산소량을 조절하려면 시험용 금형에 용동을 주입하여 표면을 검사한다. 탈산이 지나치면 수축하고, 산소가 많으면 팽창하므로 평면(level set)이 될 때 출탕(tapping)한다. 산화용해하고 Cu 중에 산소를 다소 남기는 이유는 수소함량을 저하시키고 또, As, Sb, Bi 등의 불순물을 산화하여 입계에 석출시켜서 전도도를 향상하고 전연성을 증가시키기 위함이나 요즘과 같이 고순도의 지금을 쓰면 불순물의 산화제거 의미는 별로 없다. 정련동은 전기 및 열의 전도성이 대단히 좋으며 20에서 전기비저항은 $1.71 \mu\Omega \text{ cm}$ (annealed, 101%에 해당), 열전도도는 $0.934 \text{ cal/cm}^2/\text{cm}^2/\text{C}/\text{sec}$ 이다. 내식성, 전연성도 좋으며 상당한 강도를 가지고 있다. 이와 같은 특성 때문에 판, 선, 봉의 형태로 가공되어 전기공업용으로 널리 사용되고 있다.



탈산동(deoxidized copper)은 용해시에 흡수한 산소를 P(인)로 탈산하여 산소는 0.01% 이하가 되고 잔류P량이 0.02% 정도인 동이다. 따라서 탈산동은 고온의 환원성기 중에서도 수소취성이 없고 고온에서 산소를 흡수하지 않으며, 연화온도도 약간 높아 용접용으로 적합하다. 그러나 P 때문에 전도도가 저하하여 전기비저항은 약 $2 \mu\Omega \text{ cm}$ 이다. 용도는 판으로도 사용되나 대부분은 관으로 제조되어 가스관, 열교환관, 증유버너용관, 증기계관 등으로 사용된다.

무산소동(oxygen free high conductivity copper)은 산소나 탈산제를 품지 않은 Cu를 말하며 이것을 만들려면 진공 중에서 용해주조하거나 목탄 탈산장치로 목탄 및 CO가스에 의한 탈산처리를 하여 목탄발생로 가스분위기 중에서 주조한다. 진공용해동의 산소함량은 0.002~0.001% 정도이고, 성질은 정련동과 탈산동의 장점을 합한 것으로 전도성이 좋고 수소취성도 없으며 가공성도 우수하여 주로 전자기기 등에 사용된다. 또한, 우리의 봉착성이 좋으므로 진공관용 재료로서 유리에 봉입하는 동선, 접속기구류 인 압착단자 및 컨넥터 등에 주로 이용된다.

3. 스트레스 종류에 따른 구리 전선의 특성

(1) 열적 스트레스를 받은 구리 전선

전선은 도전재료와 절연재료로 구성되며 도전재료는 동과 알루미늄 등이 대표적으로 사용되고 있으며, 절연재료는 염소(Cl)를 주성분으로 한 플라스틱이 사용된다. 전선은 전기적, 열적, 기계적, 화학적, 환경적



온도에 의해서 열화하게 되며 전기기계기구의 소손 및 전기재해의 원인이 된다. 실험에 적용된 전선은 600V 비닐절연전선이다. 옥내용 전기설비의 배선으로 가장 많이 사용되는 것으로 지름은 1.6mm이다. 열적 스트레스 인가에 따른 특성 변화를 정성정량 해석하기 위해 동일한 조건에서 열적 스트레스를 인가시켰다. 실험이 진행될 때의 주위온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 습도는 $50 \pm 2\%$ 를 유지시켰다.

〈그림 1〉은 열적 스트레스를 받은 구리전선을 실체현미경(SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용하여 관찰한 것이다. 〈그림 1〉(a)는 정상전선으로 전선 제조시 생성되는 가로방향의 연신구조가 확인되었다. 〈그림 1〉(b)의 400°C , 〈그림 1〉(c)의 900°C 에서 열적 스트레스를 받은 전선으로 산화에 의해 도체표면에 박리현상이 나타났으며 쉽게 도체로부터 이탈된다. 400°C 이상에서 열적 스트레스를 받으면 도체 표면에 탄화물이 생성되고 있음을 제시하였고 점차 내부로 확산되고 있음을 알 수 있다. 〈그림 1〉(d)와 같은 용융온도에서 열적 스트레스를 받으면 도체 내부까지 탄화물로 바뀐다.



(a) 정상전선



(b) 400°C



(c) 900°C

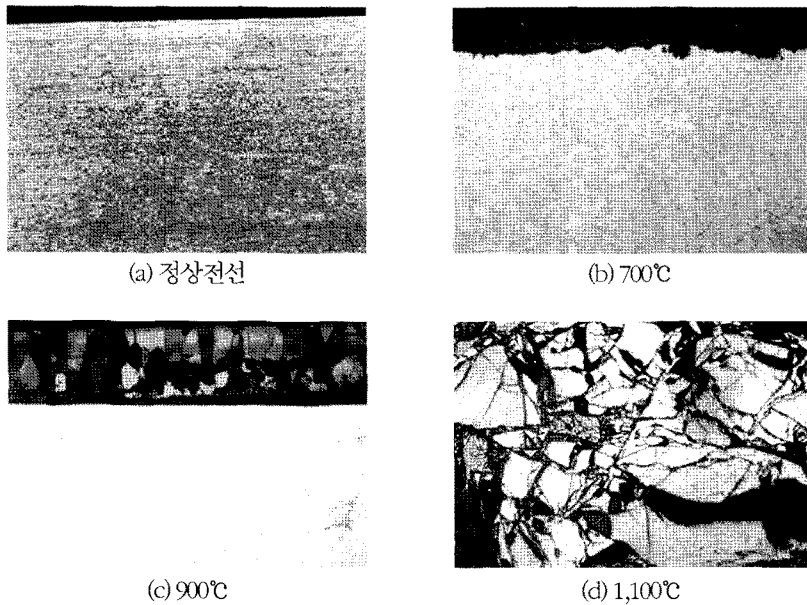


(d) $1,100^\circ\text{C}$

〈그림 1〉 열적 스트레스를 받은 전선의 실체 사진(Mag. $\times 10$)

〈그림 2〉는 금속현미경(Epiphot, Nikon, Japan)을 이용하여 절단면의 단면조직을 분석한 것이다. 〈그림 2〉(a)는 정상전선으로 전선 제조시 생성되는 가공방향으로 신장된 연신구조가 나타났다. 〈그림 2〉(b)는 700°C 에서 열적 스트레스를 받은 전선으로 크래킹 현상이 일어나며 입자의 크기가 커졌다. 〈그림 2〉(c)는 900°C 에서 열적 스트레스를 받은 것으로 탄화물의 내부증식이 증가하였다. 또한, 입자의 수가 현저하게 줄어

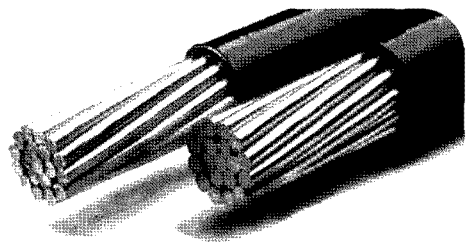
든 반면, 형태가 평행선 방향으로 이루어진 쌍정입자가 나타나고 전형적으로 안정한 상태인 육각형 모양의 조직들이 치밀하게 결합되어 있다. 이는 높은 온도에서 열적 스트레스를 받을 때 나타나는 면심입방격자 (FCC) 금속의 특징으로 화재현장 전선의 열화온도 추정시 결정적인 단서가 될 수 있다. <그림 2>(d)는 1,100℃에서 열적 스트레스를 받은 전선으로 도체 전체가 탄화물로 변형되었으며, 이러한 크래킹 현상은 과전류를 통전시켰을 때 나타나지 않는 것으로 보아 열에 의해서만 형성되는 현상으로 판단된다.



<그림 2> 열적 스트레스를 받은 전선의 단면조직(Mag. × 10)

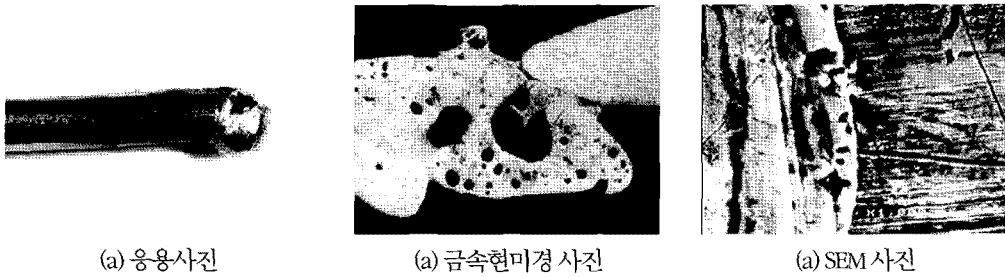
(2) 단락(합선)된 구리 전선

전선에 단락이 발생하더라도 무제한으로 큰 전류가 흐르는 것은 아니고 기본적으로는 옴의 법칙에 따라 전압과 저항의 상관관계에 의해서 결정된다. 이 경우 전압은 주상변압기 2차측의 전압이고 저항은 주상변압기로부터 단락개소에 도달하기까지의 회로임피던스로 전선의 굵기와 길이, 주상변압기의 용량 등에 의해서 결정되는 값이다. 따라서 간단히 단락전류를 산출하는 것은 할 수 없지만, 일반 수용가의 배선은 약 100[A]에서 1,000[A]의 범위가 된다고 말하고 있다. <그림 3>은 구리 전선에 단락(합선)이 발생했을 때 특성을 나타낸 것이다. <그림 3> 전선에 단락이 발생할 때 형성되는 여러가





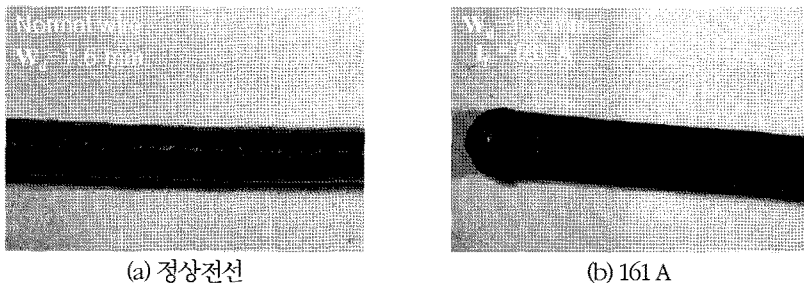
이 유형 중의 하나를 나타낸 것이다. 용융 흔적은 단락전류, 전선의 굵기, 접촉각도 및 압력 등에 따라 다르게 나타나는 것으로 보고되고 있다. <그림 3> (a)는 단락에 의해 생성된 용융 흔적을 나타낸 실체사진이다. 표면이 비교적 균일하며 윤기가 있는 것을 알 수 있다. <그림 3> (b)는 용융 망울의 단면 금속 사진을 나타낸 것이다. 구리의 고유한 조직이 없어지고 경계면, 주상조직 및 보이드(void)가 형성된 것을 알 수 있다. 그림 3(c)는 용융 단면의 SEM(주사전자현미경) 사진을 나타낸 것이다. 용융된 부분은 구리 조직의 형태가 없어졌으나, 정상 부분은 구리전선 고유의 연신 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다.



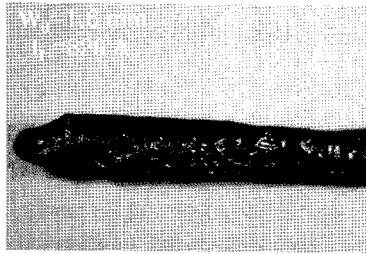
<그림 3> 단락(합선)된 구리전선의 특성

(3) 과전류에 의해 용단된 구리 전선

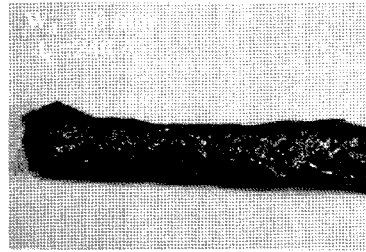
<그림 4>는 1.6mm 전선에 각각의 용단 전류를 공급했을 때 단선된 실체사진이다. 공급된 전류는 프리스의 식(W. H. Preece's equation)으로 결정하여 용단 전류의 1배(161A), 1.5배(240A), 2배(320A)를 공급하였다. 그림 4(a)는 1.6mm 구리전선의 실체 사진으로 표면이 산화되어 옅갈색을 나타낸다. <그림 4> (b)는 용단전류의 1배인 161A가 흘렀을 때의 실체 사진이다. 용단된 전선은 표면이 옅갈색으로 단면이 원형으로 나타났다. <그림 4> (c)는 용단전류의 1.6배인 240A가 흘렀을 때의 실체 사진이다. 전선의 표면이 불규칙하게 찌그러진 형태를 나타낸다. <그림 4> (d)는 용단전류의 2배인 320A가 흘렀을 때의 실체 사진이다. 용융된 단면이 더욱 심한 형태로 변형됨을 확인할 수 있다.



<그림 4> 과전류에 의해 용단된 구리전선의 실체 사진



(c) 240 A



(d) 320 A

〈그림 4〉 과전류에 의해 용단된 구리전선의 실제 사진(계속)

4. 결론

옥내용 전기설비의 전선으로 가장 많이 사용되는 구리 전선이 열, 단락(합선), 과전류 등의 스트레스를 받았을 때 나타나는 특성을 실제 사진, 금속 조직, SEM 사진 등으로 제시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 열적 스트레스를 받은 구리전선 도체표면에 박리현상이 나타났으며 쉽게 도체로부터 이탈된다. 온도가 높아짐에 따라 표면은 박리의 두께 및 크기가 커지는 것을 알 수 있다.
- (2) 금속현미경을 이용한 정상전선의 단면조직 분석에서 신장된 연신구조가 확인되었다. 반면 열적 스트레스를 전선은 입자의 수가 현저하게 줄어든 반면, 형태가 평행선 방향으로 이루어진 쌍정입자가 나타나고 전형적으로 안정한 상태인 육각형 모양의 조직들이 치밀하게 결합되어 있다.
- (3) 단락에 의해 생성된 용융 망울의 단면 금속 사진에서 구리의 고유한 조직이 없어지고 경계면, 주상 조직 및 보이드(void)가 형성된 것을 알 수 있다.
- (4) 프리스의 식으로 결정하여 용단 전류의 1배를 인가하였을 때 용단된 전선은 표면이 흑갈색으로 단면이 원형으로 나타났다. 용단전류의 1.6배가 인가될 때는 표면이 불규칙하게 찌그러진 형태를 나타냈으며, 2배의 용단 전류에서는 더욱 심하게 변형됨을 확인할 수 있다.