

우리나라에서 발생한 화재 중 전기재해는 균일한 사고분포를 나타내고 있다. 따라서 도체로 가장 많이 사용되고 있는 동전선에 열적 스트레스를 인가했을 때 특성변화를 이용하여 그 변화를 분석하고, 사고현장에서의 나전선의 특성을 알아보고 사고원인을 알아봄으로써 전기재해 예방에 보다 주의를 기울이는데 도움이 되고자 한다.

# 열적 스트레스를 받은 나전선(Cu)의 특성변화 해석

## 1. 머리말

우리들이 일상생활에서 사용하고 있는 전기는 빛처럼 빠르고 공기처럼 자유롭게 에너지를 전달시키는 특징을 가지고 있어 통신, 교통, 난방, 조명 등 응용의 폭이 무한하다. 전기의 기본 성질은 발열작용, 자기작용, 화학작용 등이 있으며 정도의 차이가 있지만 동시에 일으킨다. 전기는 흐르기만 하면 때와 장소를 가리지 않고 열이 발생한다. 발생한 열과 방사되는 열의 균형이 무너져 인접한 가연성 물질에 착화되는 것이 전기화재이다. 또한 전기가 사람이나 가축과 같은 생명체에 통전되어 사고로 나타나는 것이 감전이며, 전기에너지를 사용하는 전기설비 기계기구에서 발생하는 사고가 전기설비 사고이다.

우리나라는 전국적으로 매일 100건 이상의 화재가 발생하고 있고 그 중에 20~30% 정도가 전기화재로 판정되고 있다. 지난 수년간 발생한 사고 유형을 과학적으로 분석한 결과 전기재해의 발생은 월별, 시간대별, 지역별 등의 요소에 균일한 사고 분포를 나타냈다. 반면 빈번하게 사용되는 전압, 사람의 관리 소홀, 전기에너지를 전달하는 매개체인 전기배선, 전기가 활용되는 주택, 전기를 관리 및 검사하는 기술자 집단에서 상대적으로 높은 사고가 발생한 것으로 나타났다.

따라서 본 논문에서는 도체(導體)로 가장 많이 사용되고 있는 동전선(copper wire)에 열적 스트레스를 인가했을 때의 특성변화를 실체현미경, 금속현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 전선의 외형적 변화, 절단면의 조직변화, 표면구조를 분석하고, 에너지분산분석기(EDX)를 이

용하여 온도에 따른 정성분석과 시차주사열량계(DSC)에 의한 열량변화를 제시하고 사고 현장에서 발굴한 나전선의 특성을 과학적으로 제시하여 사고원인 판정에 기여하고자 한다.

## 2. 동의 특성

동(copper; Cu)은 알루미늄과 더불어 비철금속재료 중 가장 중요한 재료 중 하나로 전기·열의 양도체로 유연하며 전연성이 우수하여 가공이 용이하다. 또한 화학적 저항력이 커서 부식에 강하며, 아름다운 장미색 등을 가지고 있어서 다른 금속재료와 비교하여 우수한 점을 가지고 있다.

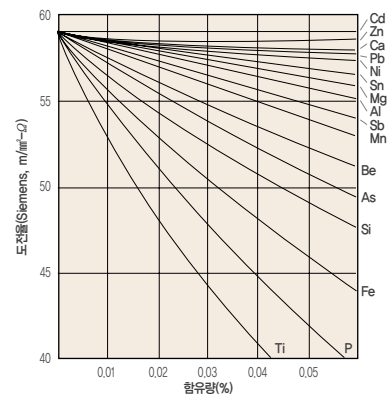
### 가. 물리적 성질

동의 성질은 순도에 따라 달라지는데 동의 도전율에 미치는 불순물 함량의 영향은 [그림 1]과 같으며, 동의 물리적 성질(99.95% Cu)은 <표 1>과 같다.

■ 표 1. 동의 물리적 성질

항목	내용
원자량	63.57
결정구조	면심입방격자(FCC), $a=3.6075\text{Å}$ , 골면(111), 쌍정면(111)(at 20°C)
밀도	8.89g/cm <sup>3</sup> (at 20°C)
용융온도	1,083°C(액상선온도), 1,065°C(고상선온도)
비등점	2,562°C(at 1 atm)
열팽창률	12,000μ/m <sup>3</sup>
열전도도	0.934w/cm/cm/sec/°C(at 20°C)
도전율	101~104% IACS
고유저항	1.71Ω·cm(at 20°C)
온도계수	0.00397/°C(at 20°C)
탄성계수	16.8×10 <sup>6</sup> (20~100°C), 17.7×10 <sup>6</sup> (20~300°C)
용적변화	4.05%
비열	0.092w/g/°C(at 20°C)

■ 그림 1. Cu의 도전율에 미치는 불순물의 영향



### 나. 기계적 성질

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 500°C까지는 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>에 나타냈다.

[그림 2]는 62.5% 가공한 동선을 각 온도에서 1시간 어닐링했을 때 기계적 성질의 변화를 나

■ 표 2. Cu의 기계적 성질

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

타낸 것이다. Cu와 동합금의 결정입도에 대해 한국산 업계규격(KS D 0202)에 비교법, 절단법 및 구적법의 3가지 방법이 규정되어 있는데 일반적으로 비교법이 많이 사용되고 있다.

**다. 화학적 성질**

동은 상온의 건조한 공기 중에서는 그 표면이 변화하지 않으나 대기 중에 방치하면 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, 수분 등의 작용에 의하여 표면에 녹색의 염기성탄산동(CuCO<sub>3</sub>·Cu(OH)<sub>2</sub>), 염기성황산동(CuSO<sub>4</sub>·Cu(OH)<sub>2</sub>) 등이 발생하며, 이것은 보통의 물에 불용성의 보호피막 역할을 한다. 동은 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.

**라. 시판동**

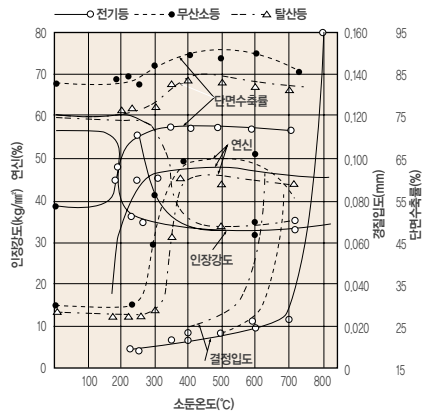
**(1) 전기동**

전해정련에 의해서 제조한 순구리로, 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.

**(2) 정련동**

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(furnace)의 분위기를 산화성으로 해서 용동(熔銅) 중의 산소농도를 증가하여 수소함량을 저하시킨 후에, 폴링(polishing)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

■ 그림 2. Cu의 어닐링 온도와 기계적 성질(Prait)



(tapping)한다. 산화용해하고 Cu 중에 산소를 다소 남기는 이유는 수소함량을 저하시키고 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 20℃에서 전기비저항은  $1.71\mu\Omega \cdot \text{cm}$ (annealed, 101%에 해당), 열전도도는  $0.934\text{cal}/\text{cm}^2/\text{cm}/\text{C}/\text{sec}$ 이다. 내식성, 전연성도 좋으며 상당한 강도를 가지고 있다. 이와 같은 특성 때문에 판, 선, 봉의 형태로 가공되어 전기공업용으로 널리 사용되고 있다.

### (3) 탈산동

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

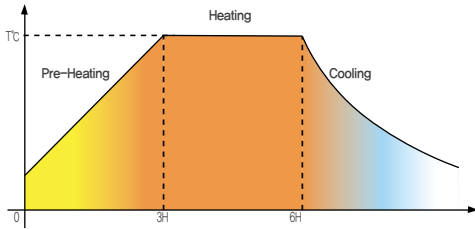
### (4) 무산소동

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 커넥터 등에 주로 이용된다.

## 3. 실험

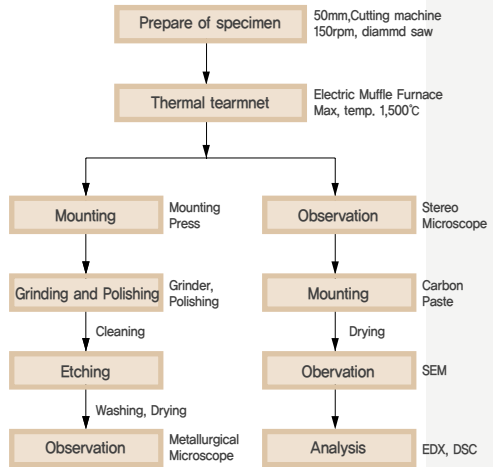
전선은 도전재료와 절연재료로 구성되며 도전재료는 동과 알루미늄 등이 대표적으로 사용되고 있으며, 절연재료는 염소(Cl)를 주성분으로 한 플라스틱이 사용된다. 전선은 전기적, 열적, 기계적, 화학적, 환경적 요인 등에 의해서 열화하게 되며 전기기계기구의 소손 및 전기재해의 원인이 된다. 실험에 사용된 600V 비닐절연전선은 옥내용 전기설비의 배선으로 가장 많이 사용되는 것으로 지름은 1.6mm이다. 열적 스트레스 인가에 따른 특성 변화를 정성정량 해석하기 위해 길이는 50mm로 절단하고, 시료는 세척 후 전기로(SSH-1500, Shinsung Heating. Co., Korea)를 이용하여 100~1,100℃까지 100℃의 간격으로 각각의 온도에서 [그림 3]과 같이 열적 스트레

■ 그림 3. 나전선의 열적 스트레스 인가 과정



스를 인가시켰고, [그림 4]는 나전선의 전처리 및 분석 과정을 나타낸 것이다.

■ 그림 4. 나전선의 전처리 및 분석 과정



## 4. 결과 및 고찰

### 가. 실체현미경 분석

[그림 5]는 각각의 온도에서 열적 스트레스를 받은 전선을 실체현미경을 이용하여 관찰한 것이다. (a)는 정상전선으로 전선 제조시 생성되는 가로방향의 연신구조가 확인되었다. (b)의 400°C 및 (c)의 900°C에서 열적 스트레스를 받은 전선으로 산화에 의해 도체표면에 박리현상이 나타났으며 쉽게 도체로부터 이탈하였다. 400°C 이상에서 열적 스트레스를 받으면 도체 표면에 탄화물이 생성되고 있음을 제시하였고 점차 내부로 확산되고 있음을 알 수 있었다. (d)와 같은 용융온도에서 열적 스트레스를 받으면 도체 내부까지 탄화물로 바뀌었다.

■ 그림 5. 열적 스트레스를 받은 전선의 실제 사진(Mag.×10)

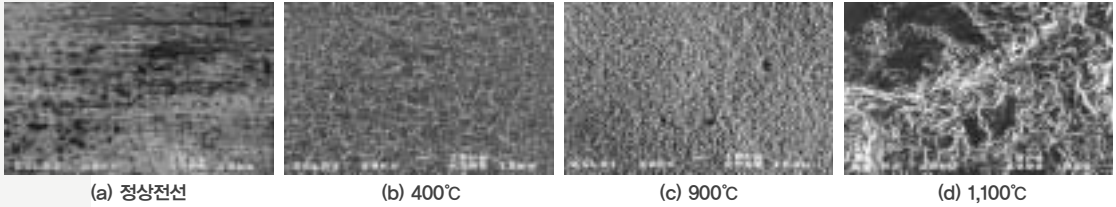


### 나. 표면의 미세구조 및 조성 분석

[그림 6]는 주사전자현미경을 이용하여 열적 스트레스를 받은 전선의 표면 미세구조를 분석한 것이며, 에너지분산분석기를 이용하여 온도에 따른 조성변화를 분석하였다. (a)는 정상전선의 표면구조를 나타낸 것으로 전선 제조시 생성된 연신구조의 존재가 확인되었다. (b)의 400°C 및

(c)의 900℃에서 열적 스트레스를 받은 경우 CuL, CuK, CuKb, OK 스펙트라가 주사길이에 관계없이 균일한 분포를 보이고 있다. 또한, 표면은 박리현상이 일어나며 내부와 외부도체의 표면 구조에 차이가 있음을 알 수 있었다. (d)와 같이 용융온도 부근에서 열적 스트레스를 받으면 박리 현상이 없어지고 탄화물로 변화되었다.

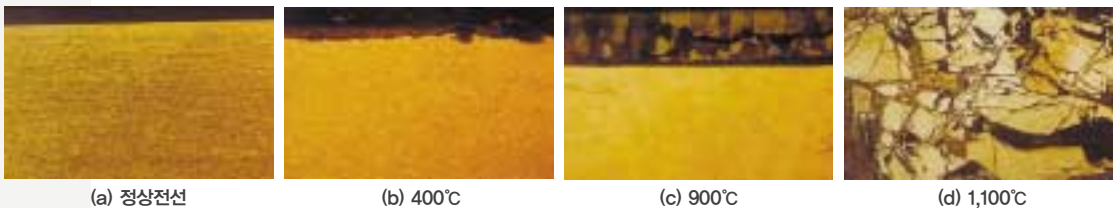
■ 그림 6. 전선 표면의 미세구조 분석(Mag.× 500)



#### 다. 단면조직 분석

[그림 7]은 금속현미경을 이용하여 절단면의 단면조직을 분석한 것이다. (a)는 정상전선으로 전선 제조시 생성되는 가공방향으로 신장된 연신구조가 나타났다. (b)는 700℃에서 열적 스트레스를 받은 전선으로 크래킹 현상이 일어나며 입자의 크기가 상당히 커졌다. (c)는 900℃에서 열적 스트레스를 받은 것으로 탄화물의 내부증식이 증가하였다. 또한 입자의 수가 현저하게 줄어든 반면, 형태가 평행선 방향으로 이루어진 쌍정입자가 나타나고 전형적으로 안정한 상태인 육각형 모양의 조직들이 치밀하게 결합하고 있었다. 이는 높은 온도에서 열적 스트레스를 받을 때 나타나는 면심입방격자(FCC) 금속의 특징으로 화재현장 전선의 열화온도 추정시 결정적인 단서가 될 수 있다. (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 7. 열적 스트레스를 받은 전선의 단면조직(Mag.× 100)



#### 라. 열량변화 분석

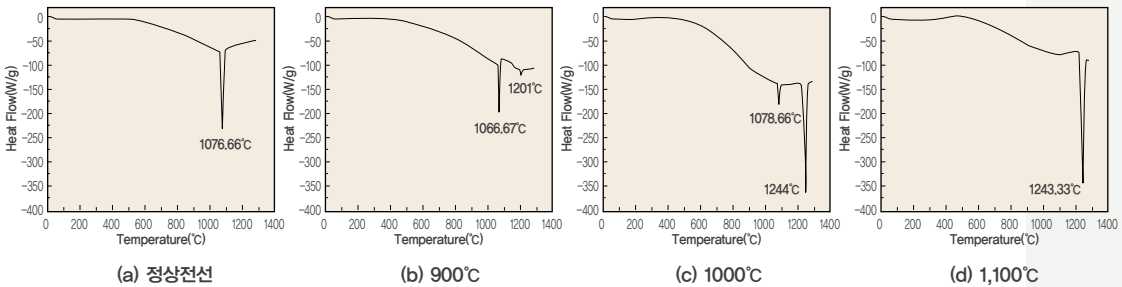
[그림 8]은 시차주사열량계를 이용하여 열적 스트레스를 받은 전선의 열량 변화를 분석한 것



으로 분석조건은 20°C/min으로 상온에서 1,300°C까지 승온하였다. 분위기 가스는 질소(N<sub>2</sub>)를 사용하였으며, 100ml/min으로 흘려주었다. (a)는 정상전선으로 동의 용융온도 부근인 1,076.66°C에서 열량 변화를 나타냈으며, (b)는 900°C로 열적 스트레스를 받은 전선으로 동의 용융온도 부근인 1,066.67°C에서 큰 열량 변화를 나타냈으며, 아산화동의 용융온도 부근인 1,201°C에서도 작은 열량 변화가 나타났다.

(c)는 1,000°C로 열적 스트레스를 받은 전선으로 1,078.66°C부근에서는 약간의 열량 변화가 나타나며, 1,244°C에서 큰 열량 변화를 나타냈다. (d)는 1,100°C로 열적 스트레스를 받은 전선으로 1,232.85°C 부근에서만 열량 변화를 나타냈다. 즉, 열적 스트레스가 심한 전선일수록 도체 내의 산소 함량이 상대적으로 감소하여 도체 경도가 증가하고 2차 열적 반응에 따른 용융온도가 증가한 것으로 판단된다.

■ 그림 8. 열화 전선의 열량변화 분석



■ 그림 9. 외부화염에 의해 소손된 전선의 표면구조 변화



마. 현장 수거품의 특성

[그림 9]는 사고 현장에서 수거한 옥내용 비닐절연전선을 나타낸 것이다. 전선의 직경은 1.6mm이며 표면이 심하게 변형되었다. (a)는 단선(1가닥)을 나타낸 것으로 격렬

한 온도에 의해 용융되고 탄화된 전형적 패턴으로 박리현상과 거칠기가 심하게 나타난다. (b)는 인접한 전선(2가닥)이 서로 용융되어 재결합 과정에 달라붙은 것으로 표면이 비교적 매끄럽게 보이고 있다. 이와 같은 형상이 나타나기 위해서는 비교적 장시간 화염에 노출되어야 하며, 주위에 충분한 열원이 있는 화재에서 나타나는 소손 패턴이다. 또한, 각각의 전선에 대한 구조적 변화를 주사전자현미경(SEM) 및 금속현미경으로 분석한 결과 [그림 6] 및 [그림 7]의 (c)와 (d)의 특성과 같은 패턴을 보였다.

## 5. 맺음말

옥내용 전기설비의 전선으로 가장 많이 사용되는 600V 비닐절연전선의 열적 스트레스 인가에 따른 소손 패턴, 구조 및 조성, 열량변화 등을 분석하고 사고 현장에서 수거한 전선과 특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

### 가. 소손 패턴 및 표면구조

실체현미경을 이용한 분석에서 정상전선은 길이 방향의 연신구조가 확인되었으며, 400℃ 이상에서 열적 스트레스를 받으면 도체 표면에 탄화물이 생성되고 점차 내부로 확산되고 있음을 알 수 있었다.

### 나. 표면의 미세구조 및 조성

주사전자현미경(SEM) 및 에너지분산분석기(EDX)을 이용한 전선 표면의 미세구조 및 조성 분석에서 연신구조의 존재가 확인되었고, 400℃에서 열적 스트레스를 받은 경우 CuL, CuK, CuKb, OK 스펙트라가 주사길이에 관계없이 균일한 분포를 보이고 있다. 900℃ 이상의 온도에서는 박리현상이 없어지고 탄화물로 변화되었다.

### 다. 단면조직 변화

금속현미경을 이용한 절단면의 단면조직 분석에서 700℃ 이상에서 열적 스트레스를 받은 전선은 크래킹 현상이 일어남을 알 수 있으며, 900℃ 이상의 온도에서는 탄화물의 내부증식이 증가하였다. 또한 입자의 수가 현저하게 줄어든 반면 형태가 평행선 방향으로 이루어진 쌍정입자가 나타나고 육각형 모양의 조직들이 치밀하게 결합한 면심입방격자(FCC)를 확인했다. 즉 화재현장에서 발굴한 전선의 분석에서 이와 같은 패턴이 보인다면 전기적인 요인에 의한 사고가 아니고 방화 또는 실화에 의해 소손되었음을 추정하는 데 결정적 판단근거가 될 수 있다.

### 라. 시차 열량 변화

시차주사열량계(DSC)를 이용한 분석에서 열적 스트레스를 심하게 받은 전선일수록 도체 내의 산소 함량이 상대적으로 감소하여 도체 경도가 증가하고 2차 열적 반응에 따른 용융온도가 증가한 것으로 판단된다. 