

# 전기 도금용 히터의 구성 및 화재 원인 해석

글 | 최충석

한국전기안전공사 전기안전연구원 재해예방연구그룹장,  
공학박사



## 1. 머리말

전기 에너지는 에너지 전달 속도가 빛의 속도와 매우 비슷하여 일반 가정에서는 물론 산업 현장에서의 활용이 매년 증가하고 있다. 국내 총 발전량(Gross Generation)은 1996년 약 226MWh에서 2005년에 약 392MWh로 증가하였고, 2005년도 국민 1인당 전기 사용량은 6,883kWh/man으로 급속한 증가 추세를 보이고 있으며 그에 따른 재해 발생으로 사람과 재산의 손실이 증가하고 있다. 2005년 국내 화재 통계 조사에 의하면 발생건수 32,340건에 사망 505명, 부상 1,837명으로 나타났다. 그리고 전체 화재 중에서 전기 화재는 9,991건으로 약 30%를 점유하며, 사망 44명, 부상 324명으로 나타났다.

일반적으로 화재 현장의 원인 조사는 처음에 출화 개소를 한정하고 그 출화 개소에 존재하는 출화의 가능성이 있는 화원에 대해서 검증한다. 전기 화재를 출화 형태로 분류하면 첫째, 전기 배선 및 전기 기기에 의한 출화, 둘째, 누전 경로로부터의 출화, 셋째, 정전기 불꽃에 의한 출화 등으로 나뉘어진다.

전기의 성질 중에 발열 작용을 응용한 옥내용 전기기기는 난로, 온풍기 등이 있으며, 산업 현장에서는 도금, 가열 등에 응용되고 있다. 줄의 법칙(Joule's law)에서도 알 수 있듯이 전선에 전류가 흐르면 필연적으로 흘러준 전기의 제곱에 비례하는 열이 발생한다는 사실은 보편화된 지식이다. 즉 전기 에너지를 열 에너지로 변환하는 것은 간단한 장치만 있으면 쉽게 바꿀 수도 있고 적절하게 제어가 가능하다.

전기 에너지는 생산성이 매우 우수한 에너지로 선진국일수록 사용량이 많은 것으로 보고되고 있다. 그런데 전기는 여러 가지 장점의 이면에 사용자의 부주의, 장치의 결함, 시공의 잘못 등에 의해 발생하는 감전사고, 전기

화재, 전기 설비 사고 등이 있다. 전기에 의한 감전 사고는 생명체를 대상으로 발생하며 화상, 사망 등이 있을 수 있다. 전기 화재는 발생 매커니즘이 일반 화재와 확연히 달라 원인에 따라 단락, 과부하, 누전, 접촉 불량 및 아산 화동, 증식발열 현상, 트래킹 및 흑연화 현상, 반단선, 방전, 정전기, 은 이동 등으로 구분되어 있다. 전기 설비 사고는 전기 에너지를 이용하여 다른 형태의 에너지로 활용하고자 고안된 기계 기구에 의해 발생하는 사고로, 경제적 손실을 수반하고 다른 인접 설비 또는 기기에 재해를 파생시키게 된다.

전기 히터에 대한 국내 규정은 한국산업규격(KS)에 가정용 전기 직접 가열식 실내용 난방기-성능 측정 방법: KS C IEC 60675, 가정용 및 이와 유사한 전기 기기의 안전성-제2-74부 : 휴대용 투입식 전열기의 개별 요구 사항; KS C IEC 60335-2-74, 전열 기기용 히터 및 석영관; KS C 2830, 환경시험 방법-전기·전자-히터에 의한 불완전 접속 내화성 시험 방법; KS C 0230 등에 적용 범위, 인용 규격, 정의, 측정 항목, 일반 조건, 크기, 무게 및 전원 공급 접속 방법 등을 규정하여 운용되고 있다.

따라서 본 논고에서는 산업용으로 사용되는 전기 도금용 발열 히터의 제원 및 구성에 대해 알아보고, 사고 현장에서 소손된 물품의 과학적 해석을 통해서 향후 유사 사고 예방을 위한 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 도금용 전기히터의 제원 및 구성

### 가. 제품의 제원

- (1) 품명 : 전기 도금용 전기히터
- (2) 전원 : 3상 3선식, 220V, 60Hz
- (3) 소비전력 : 3kW

- (4) 전원선 : 600V 비닐 캡타이어 케이블(VCTF, 3.5mm<sup>2</sup>×3C)
- (5) 외피 : 스테인레스(SUS)
- (6) 직경 : 25mm
- (7) 예열온도 : 40℃
- (8) 사용온도 : 50~65℃
- (9) 용도 : 물, 용제 등의 가열

### 나. 제품의 구성

- (1) 전원 공급 : 꽃음식 전기 플러그
- (2) 절연 재료 : 무기물 충전제
- (3) 구성 : 전원부, 비가열부, 가열부 등
- (4) 형태 : 원통의 관에 히터를 내장하고 충전제로 고정 후 밀봉
- (5) 온도 제어 : 별도의 제어시스템을 이용하여 조절

## 3. 사고 원인 분석

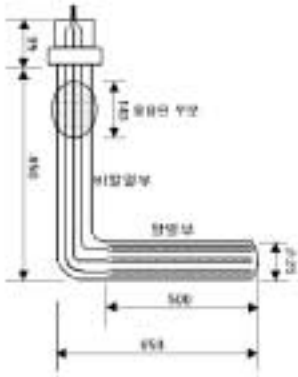
2000년 ○○사업장의 구리(Cu) 도금 공정의 용액 탱크 내에 설치되어 있던 전기히터에서 발생한 화재이다. 전기도금의 준비 상태(Standby Mode)에서 이유를 알 수 없는 화재가 발생하여 도금 용액 탱크 덮개가 소실되었고, 화재를 진압하던 소방관 1명이 유독가스에 질식되어 사망하였으며, 재산 피해는 미상인 사고의 원인을 융합기술을 적용하여 규명하고자 한다.

### 가. 도금용 히터의 외형 분석

도금용 히터는 3상 전원을 이용하는 것으로 전원선부, 발열부, 비발열부로 구성되어 있다. 발열부의 길이는 500mm이며, 비발열부는 450mm이다. 소손된 부분

의 위치는 비발열부의 상부 쪽 약 143mm로 심하게 용융된 흔적을 나타내고 있으며, [그림 1]은 제품의 제원 및 형태에 대해 개략적인 특징을 나타낸 것이다.

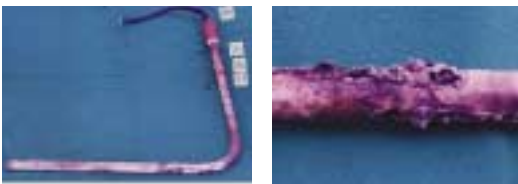
■ 그림 1. 전기 도금용 히터의 구성도



**나. 도금용 히터 및 연결케이블 외형 분석**

[사진 1]은 사고 현장에서 수거한 도금용 전기히터의 실제 사진으로 외형을 분석한 결과 비발열부의 [A]~[C]부분(143mm)에서 심하게 소손이 발생한 것을 알 수 있으나, 발열부는 소손된 흔적이 없는 것으로 나타났다. [사진 2]는 사진 1의 [A]부분을 확대 촬영한 실제 사진으로 심하게 소손된 것을 알 수 있고, 열화의 방향은 내부에서 외부로 진행된 것으로 판단된다.

■ 사진 1. 사고현장에서 수거한 전기히터    ■ 사진 2. 사진 1의 [A]부분의 확대 사진



[사진 3]은 사진 1의 [B]부분을 확대한 사진으로 심

하게 변색되었으며 내부에서 외부로 부식이 발생하여 구멍이 생긴 것을 알 수 있고, 표면에 이물질의 흔적도 관찰된다. [사진 4]는 [C]부분의 확대 사진으로 소손된 형태가 전원선의 한 선을 따라 진행하여 히터 외부(SUS 304)가 용융된 것을 알 수 있다. 즉 어떤 이유인지는 분석을 통해서 알 수 있지만 전원선 3가닥 중 한 가닥이 사고의 주된 원인으로 추정된다.

■ 사진 3. 사진 1의 [B]부분의 확대 사진    ■ 사진 4. 사진 1의 [C]부분의 확대 사진



[사진 5]는 사진 1의 [D]부분의 확대 사진으로 히터 전원선(케이블)의 절연 피복(PVC)이 탄화되었음을 알 수 있다. 그리고 연결 상태는 비교적 양호한 것으로 판단되며 내부 절연물의 소손은 없는 것으로 보인다. [사진 6]은 [사진 5]의 외부 절연 피복을 제거한 실제 사진으로 내부 절연 피복은 매우 양호한 것을 알 수 있다. 접속 단자 부분이 녹슨 형태로 나타나며 정밀 분석한 결과 용융 및 발화된 흔적을 발견할 수 없었다. 따라서 과전류, 트래킹 등의 현상 유무를 확인하기 위해 심선의 금속조직 변화를 분석할 필요가 있다.

■ 사진 5. 사진 1의 [D]부분의 확대 사진    ■ 사진 6. 사진 5의 외피를 제거한 사진





[사진 7]은 [사진 6]에 나타난 [E]부분의 금속 조직 특성을 해석하기 위해 나타낸 금속현미경 사진이다. 사진에 나타난 바와 같이 구리 전선 조직의 일반적 특징과 매우 유사함을 알 수 있다. 즉 외부 화염(열)에 의해 구리 입자가 약간 커진 것 외에는 다른 특이 사항을 발견할 수가 없었다.

■ 사진 7. 사진 6의 금속 사진



**다. 도금용 히터 내부 분석**

[사진 8]은 소손된 전기 히터(144mm)를 4부분으로 절단하여 나타낸 실체 사진이다. 절단은 다이아몬드 커

터를 사용하였으며, 절단 작업시에 발생할 수 있는 열적 스트레스가 최소화되도록 방열 시간을 고려하여 작업하였다. [사진 9]는 [사진 8] [F]의 우측 단면 실체 사진이다. 전선은 3가닥이며 내부는 무기물 충전재로 채워져 있다. 사진에서 알 수 있듯이 내부 전원선 3선 중 1선과 외부 스테인리스(SUS 304) 사이에 절연이 파괴되어 소손된 패턴을 보이고 있다. 그리고 다른 2개의 전원선도 전기적으로 안정된 위치에 배치되지 못하고 한쪽으로 편중된 배선 형태를 나타내고 있다.

■ 사진 8. 단면 분석을 위해 절단한 실체 사진

■ 사진 9. 사진 8의 [F]부분 우측 단면 사진



[사진 10]은 [F]부분의 전원선, 보빈 및 산화마그네슘(MgO)을 제거한 스테인리스(SUS 304)로 안쪽 부분을 펼친 실체 사진이다. 열적 스트레스를 받은 흔적은 물론 일부가 균열이 발생한 것으로 판단된다.

[사진 11]은 [사진 10]을 16배 확대하여 나타낸 이미지이다. 균열은 가지(tree)모양으로 진행된 것을 알 수 있고, 다른 부분의 표면 패턴은 비교적 안정한 상태인 것으로 판단된다.

■ 사진 10. 스테인리스 외피의 내부

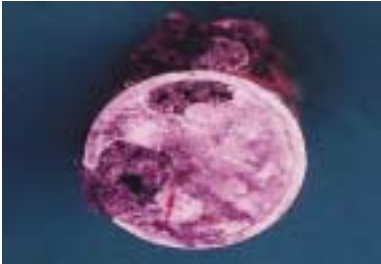


■ 사진 11. 사진 10의 확대된 실체 사진



[사진 12]는 [G]부분의 우측 단면 실체 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 내부 발열선 3선 중 좌측 1선이 심하게 용융되었으며 또 다른 상측 1선과 외부 스테인리스 사이에 심하게 용융이 진행된 형태를 나타내고 있다. 즉 진행 상황을 종합적으로 분석해 볼 때 발열선과 충전제 사이에서 어떤 이유인지는 정확하지 않지만 열화가 촉진되었음을 알 수 있다.

■ 사진 12. [G]부분의 우측 단면 실체 사진



#### 라. SEM 및 EDX 분석

소손된 부분에 대한 구조 및 특성을 과학적으로 분석하기 위해 주사전자현미경(SEM) 및 에너지 분산 X

선 분광분석기(EDX)를 사용하여 용융 부분의 내부 표면 구조 및 원소 조성을 비교·분석하였다. 이때 분석기의 가속 전압(Vacc)=20kV, 작업거리(Wd)=15mm, 배율=1500 등으로 유지하였고 동일한 조건에서 분석하였다.

[사진 13]은 히터 내부의 정상 발열선의 표면 구조를 나타낸 것으로 표면은 연신된 방향의 특성을 보이고 있다. 즉 최초에 제작할 때 발생하는 구리 전선의 성질을 잘 보여주고 있고, 일부 오염된 특성을 보이고 있다. [사진 14]는 히터 내부에 배선된 발열선의 용융 이미지를 나타낸 것이다.

정상 발열선에서 관측되는 연신 구조는 없어지고 새로운 결합 구조를 보이고 있다. 이와 같은 새로운 형태의 결합 구조가 생성되기 위해서는 반응 에너지가 높은 준위에서 지속적으로 공급될 때 발생된 것이 일반적인 학설이다.

■ 사진 13. 외피의 표면 구조 이미지

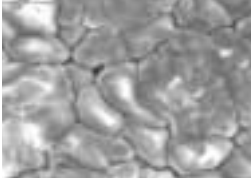


■ 사진 14. 히터 내부 발열선의 용융 이미지



[사진 15]는 히터 내부 발열선 주위 탄화물의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 열적 스트레스에 의해 입자의 크기가 커졌고 경계면 사이가 명확히 생긴 것으로 보아 격렬한 산화 반응이 발생했던 것으로 판단된다. [사진 16]은 용융된 스테인리스의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 스테인리스(SUS 304) 고유의 조직은 나타나지 않고 새로 형성된 구멍과 결정이 관측된다.

■ 사진 15. 발열선 주위 탄화 물의 SEM 이미지



■ 사진 16. 용융된 스테인리스의 SEM 이미지



〈표 1〉은 히터 내부 정상 발열선의 조성 변화를 알아보기 위해 에너지 분산 X선 분광분석기(EDX)로 분석하여 나타난 원소 성분 분포이다.

전기 도금용 발열 히터에 주로 사용되는 철(Fe), 크롬(Cr), 마그네슘(Mg) 등이 다수 측정되었다.

■ 〈표 1〉 히터 내부 정상 발열선의 조성 변화

Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
O K	ED	1.359	0.65	11.66	2.66	30.15
Mg K	ED	0.415	0.90	3.56	0.32	6.05
K K	ED	1.138	0.99	0.98	0.18	1.03
Cr K	ED	1.077	1.00	16.84	0.73	13.39
Mn K	ED	0.951	1.00	1.77	0.43	1.34
Fe K	ED	0.939	1.00	58.39	1.93	43.25
Ni K	ED	0.873	1.00	6.80	0.69	4.79
Total				100.00		100.00

〈표 2〉는 히터 내부의 용융된 발열선의 조성 변화를 알아보기 위해 분석한 EDX 성분 분포이다. 정상 발열선의 조성과의 많은 차이를 보이고 있는 것으로 보아 높은 에너지에서 변화가 발생했음을 유추할 수 있다.

특히 철(Fe)의 함량이 많이 줄어들고 산화반응과 밀접한 마그네슘(Mg)과 산소(O)가 다량 검출된 것으로 보아 격렬한 산화 반응이 발생했음을 예견할 수 있다.

■ 〈표 2〉 히터 내부의 용융된 발열선의 조성 변화

Elmt	Spect. Type	Inten. Corr.	Std Corr.	Element %	Sigma %	Atomic %
O K	ED	0.996	0.65	24.87	4.71	48.51
Mg K	ED	0.457	0.90	10.50	0.78	13.48
K K	ED	1.101	0.99	8.53	0.62	6.81
Cr K	ED	1.002	1.00	5.02	0.49	3.01
Mn K	ED	0.899	1.00	0.91	0.35	0.52
Fe K	ED	0.912	1.00	45.00	2.92	25.14
Cu K	ED	0.831	1.00	5.16	0.80	2.54
Total				100.00		100.00

#### 4. 맺음말

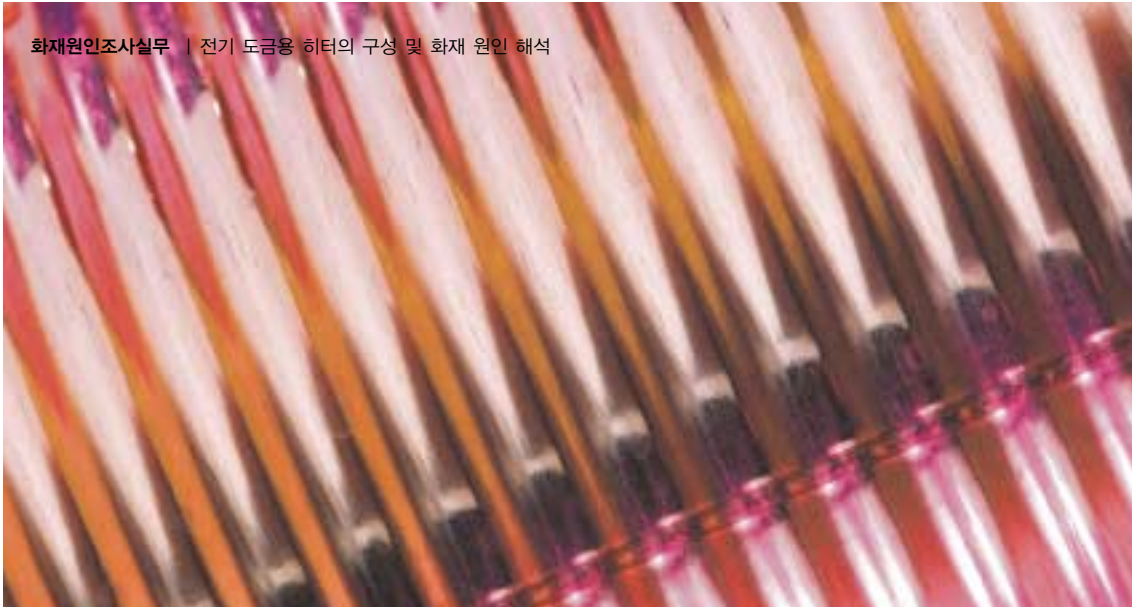
##### 가. 히터 외형 및 내부

도금용 히터는 3상 전원을 이용하는 것으로 전원선부, 발열부, 비발열부로 구성되어 있다. 발열부의 길이는 500mm이며, 비발열부는 450mm이다. 소손된 부분의 위치는 비발열부의 상부 쪽 약 143mm로 심하게 용융된 흔적을 나타내고 있다.

##### 나. 도금용 히터 및 연결케이블 외형 분석

사고 현장에서 수거한 도금용 전기히터의 외형을 분석한 결과 비발열부의 [A]~[C]부분(143mm)에서 심하게 소손이 발생한 것을 알 수 있으나, 발열부는 소손된 흔적이 없는 것으로 나타났다. 소손된 부분의 확대 사진 분석 결과 내부에서 외부로 부식이 발생하여 구멍이 생긴 것을 알 수 있고, 표면에 이물질의 흔적도 관찰된다. 또한 발열선의 한 선을 따라 일직선으로 히터 외부(SUS 304)가 용융된 것을 알 수 있다.

히터의 전원선(케이블)의 절연 피복(PVC)이 탄화되었음을 알 수 있다. 그리고 연결 상태는 비교적 양호한



것으로 판단되며 내부 절연물의 소손은 없는 것으로 보인다. 또한 외부 절연 피복을 제거한 실체 사진으로 내부 절연 피복은 양호한 것을 알 수 있다.

#### 다. 도금용 히터 내부 분석

히터 절단면의 분석에서 발열선은 3기닥이며 내부는 무기물 충전재로 채워져 있다. 내부 발열선 3선 중 1선과 외부 스테인리스(SUS) 사이에 절연이 파괴되어 소손된 패턴을 보이고 있다. 그리고 다른 2개의 발열선도 균형적 위치에 배치되지 못하고 한쪽으로 편중된 배선 형태를 나타내고 있다. 소손된 외피(SUS 304)의 확대 분석에서 균열은 가지(tree) 모양으로 진행된 것을 알 수 있고, 다른 부분의 표면 패턴은 비교적 안정한 상태인 것으로 판단된다.

#### 라. SEM 및 EDX 분석

정상 발열선의 표면 구조를 분석한 결과 연신된 특성을 보이고 있으나, 열적 스트레스를 받은 발열선은 연신 구조는 없어지고 새로운 결합 구조를 보이고 있

다. 정상 발열선의 조성 변화를 EDX로 분석한 결과 전기 도금용 발열선에 주로 사용되는 철(Fe), 크롬(Cr), 마그네슘(Mg) 등이 측정되었다. 그러나 소손된 발열선의 경우 철(Fe)의 함량이 많이 줄어들고 산화반응과 밀접한 마그네슘(Mg)과 산소(O)가 다량 검출된 것으로 보아 격렬한 산화 반응이 발생했음을 예견할 수 있다.

탱크 용액과 발열체 상부에서 온도차가 형성되어 경계면 부근에서 반복적인 열 열화가 빠르게 진전되었다. 이로 인해 외피(SUS) 내부에서 일부 균열이 발생하였고, 그에 따른 전계 불평형으로 절연은 더욱 악화되었다. 이런 과정의 반복으로 발열체와 외피(SUS) 사이에 단락(합선)이 발생하여 급격한 온도 상승과 동시에 사고가 이어진 것으로 판단된다. ⚡

#### [예방대책]

탱크 용액과 대기와의 경계면에 노출되어 있는 부분을 이중 절연 구조로 제작하여 사용하는 것이 열적 스트레스를 감소시킬 수 있다. 또한 발열체에 전원을 공급하는 전원선의 국부 과열이나 소손이 일어나지 않도록 하고, 전계 불평형이 되지 않고 균등한 배열이 되도록 설계 제작하여야 한다.