

## 환풍기용 전동기 권선의 층간단락에 의한 화재위험성 분석

김혁수\*, 김형래\*, 최충석\*, 정재희\*\*  
 전기안전시험연구원\*, 서울산업대학교 안전공학과\*\*

### The Analysis of the Fire Hazard According to Layer Short-Circuit of Motor Winding for the Fan

Hyeog-Soo Kim\*, Hyung-Rea Kim\*, Chung-Seog Choi\*, and Jee-Hee Chung\*\*  
 Electrical Safety Laboratory Research Institute(KESCO ESLRI)\*  
 Seoul National Polytechnic University, Dept. of Safety Engineering\*\*

#### 1. 서론

대형건물을 비롯하여 상가 및 음식점 등 어느 곳에서나 쉽게 볼 수 있는 환풍기는 맑고 쾌적한 생활을 영위하게 해주는 유용한 전기기기이나 화재 위험이 항상 내재하고 있음을 잊어서는 안된다.

전체화재 중 전기화재가 매년 1위('97년 34.2%)를 점유하고 있으며, 이 중 단락에 의한 화재가 1위로 나타나고 있다.[1] 단락에 의한 화재는 전기화재의 대표적인 유형으로 전선의 도체에 용융흔이 발생한다.[2] 전기기기에 의한 화재원인을 구체적으로 구분하지 않아서 환풍기에 의한 화재는 1건도 통계상 수치로 나타나지 않지만 전기안전시험연구원에서 실시한 전기화재 감정에서 환풍기전동기 과열에 의한 화재가 확인되고 있다.

발생 건수는 몇 건 되지 않지만 화재가 발생하면 막대한 재산피해는 물론 인명피해까지 발생할 수 있어 이에 대한 철저한 원인분석 및 예방대책을 강구하지 않으면 안된다. 국내에서 환풍기 전동기에 의한 화재사례는 발표된 경우가 있으나 환풍기 전동기 과열에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 전압변동, 통풍유무, 회전날개를 강제로 구속시 나타나는 온도 및 전류를 측정하여 특성을 분석하고, 열화에 의해 환풍기 내부 전동기코일에 층간단락이 발생하였을 때 금속현미경, 주사전자현미경(SEM), 에너지 분산분석기(EDX)를 이용하여 조직의 표면구조, 배열상태 및 조성상태를 분석하여 전기화재 원인을 밝히고자 한다.

#### 2. 실험방법

환풍기에 의한 화재는 전동기 내부 코일의 층간 절연파괴에 의한 화재발생이 가장 높는데 이 절연파괴는 제품의 절연불량에 의해서도 발생할 수 있지만 장시간 사용으로 열적, 전기적, 환경적, 기계적 요인 등에 의하여 절연물이 열분해, 산화, 뒤뜰립 등의 물리화학적 반응을 일으켜 특성이 저하되어 전동기 내부코일의 절연이 서서히 파괴되어 층간단락이 진행되면서 화재로 진행되어 진다. 이러한 장시간 사용의외도 이상전압, 회전날개 고장에 의한 전동기회전 정지 등 비정상적인 상태에서 사용하면 대단히 위험한 상태까지 이르게 된다.

그림 1과 같이 환풍기 전동기 과열 실험시 온도 측정은 열전대(Cromel- Alumel,

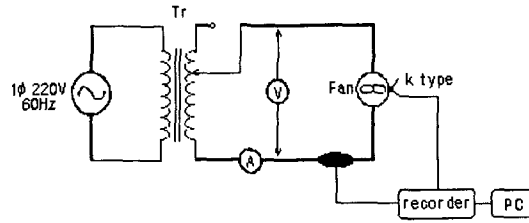


그림 1. 환풍기 실험을 위한 회로도

K-type)를 환풍기 전동기 표면과 내부에 고정시킨 후 기록계(Analyzing recorder, Yokogawa, Japan)를 사용하여 측정하였으며, 전류는 누설전류계(Clamp on leak hi tester, Hioki, Japan)를 연결하여 측정하였다.

환풍기 전동기 내부의 층간단락에 의해 형성된 용융흔의 표면상태는 실체현미경(Stereomicroscope, SV-11, Carlzeiss, Germany)을 이용하였으며, 절단면의 조직변화를 분석하기 위해서 금속현미경(Metallurgical microscope, Nikon, Japan)을 사용하였다. 또한, 단면구조 및 조성변화는 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope, JEOL JSM-6400, Japan)과 에너지분산분석기(EDX: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, Oxford, England)를 이용하여 해석하였다.

금속현미경을 이용한 단면 구조분석은 절단기(Cutting machine, Struers, Denmark)를 이용하여 절단하였으며, 절단된 전선은 성형기(Mounting press, Struers, Denmark)로 성형시킨 후 연마기(Polisher machine, Struers, Denmark)를 이용하여 연마하였다.

연마가 끝난 시료는 크로머지로 에칭(Etching:  $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4 + H_2O + HCl$ )한 후 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전압상승에 따른 특성실험

정격전압 220V, 40W 환풍기에 과전압(242~308V)을 인가시켜 환풍기에 어떠한 변화가 일어나는지 실험하였다. 과전압 인가시 정격보다 회전수가 빨라지고 전류와 온도가 상승하였으나 환풍기 전동기 절연등급인 E종(120℃, KSC 4002) 온도 이상으로 상승하지 않았으며 전압상승 변화에 따른 전류 및 온도 수치는 아래 그림과 같다.[3]

그림 2에서 보는바와 같이 전류값은 변화가 없이 일정하며 온도는 220V일 때 인가전압의 상승에 따라 점진적인 전류증가를 보이고 있다. 그러나 이때 측정된 온도는 급격한 상승을 보이고 있다. 즉 주울의 법칙에서도 알 수 있듯이 전류의 제곱에 비례하는 열량이 측정되는 것이다. 또한, 환풍기 회전시 통풍유무에 따라 내부권선 및 표면의 온도에 어떠한 변화가 있는지 실험하였다. 통풍유무에 따라 많은 차이는 나타나지 않지만 셔터(셔터가 없는 제품도 있다)가 닫혀 통풍이 안될 때 온도상승이 높게 나타나는 것으로 나타났다. 정상적인 상태에서의 온도는 70℃(40W)로 측정되었는데, 셔터가 닫혀 통풍이 안될 때는 83℃로 약 13℃차이가 났다.

그림 3은 환풍기 전동기의 극한 상황을 실험하기 위하여 전압(220V)을 일정하게 유지하고 환풍기 회전날개를 강제로 정지시킨 상태에서 전류 및 온도상승을 측정하였다. 권선의 온도가 상승함에 따라 전류는 감소하나 시간이 경과하면 전류의 변화가 없어지고 일정하게 유지되었다. 전류는 정상 회전시에 비해 약간 상승하나 온도는 140℃로 E종 절연온도 이상으로 상승하여 내부에서 에나멜이 타는 냄새가 났다. 모든 전기기기와 마찬가지로 제품에서 이상한 냄새의 징후가 나타나면 제품에 이상

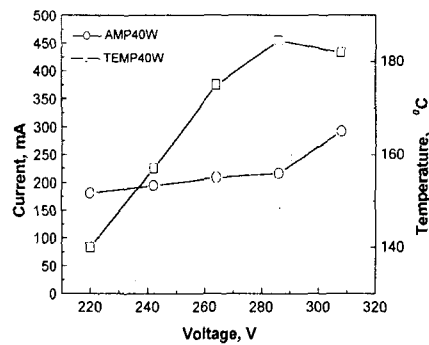
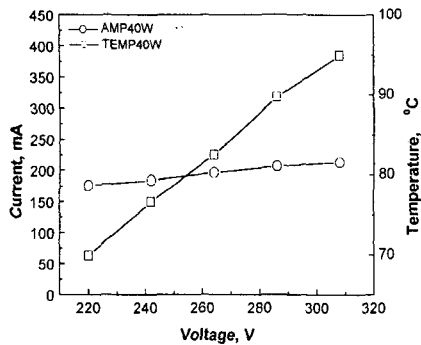


그림 2. 전압에 따른 전류 및 온도 변화      그림 3. 회전날개 고정에 따른 전류 및 온도 변화

이 발생한 것으로 보고 교체하는 것이 전기화재를 예방하는 지름길이란 것을 명심하여야 한다

환풍기 전동기에 회전날개를 강제로 정지시킨 후 정격전압에 1.1~1.4배 인가시 온도와 전류가 급격히 상승하여 40W용 환풍기는 1.3배인 284V인가시 온도가 약 185°C까지 상승하였으며 전류도 216mA까지 상승하였고, 1.4배인 308V인가시 284V인가보다 온도와 전류가 적게 상승하였으나 내부에서 층간단락이 발생하여 화재로 진행되었으나, 차단기(누전차단기 및 배선용차단기)는 동작하지 않았다.

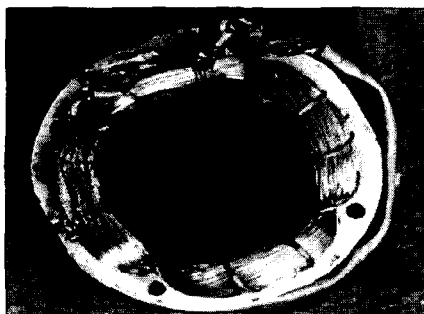
### 3.2 층간단락에 의해 생성되는 용융흔 고찰

환풍기 전동기의 층간단락은 코일의 절연열화가 주원인으로 전기적, 기계적, 환경적 원인 등이 복합적으로 작용하여 부분적인 단락현상이 나타나며, 이상발열이 계속 진행되면서 절연물의 열화가 촉진되어 단락이 확대되고 전류가 증대되어 절연물이 발화되어 화재로 진행된다.

사진 1은 자체 재현실험 및 화재현장에서 수거한 층간단락 환풍기 전동기를 비교한 사진으로 실험에 의해 생성된 환풍기 전동기의 층간단락 범위는 좁고 용융흔(화살표)이 적으나, 화재현장에서 수거한 환풍기 전동기의 범위는 넓고 용융흔이 많이 형성되었다.

사진 2는 실체현미경에 의해 8배로 확대된 사진으로 실험에 의해 형성된 용융흔은 몇 개되지 않아 눈으로 셀 수 있을 정도이지만, 화재현장에서 수거한 용융흔은 사진 전체가 용융흔으로 덮혀 있을 정도로 많이 형성되어 있었다.

재현실험 및 화재현장에서 수거한 용융된 코일을 하나씩 떼어내어 보면 구별할



(a) 재현실험



(b) 화재현장

사진 1. 층간단락에 의해 형성된 단락흔



(a) 재현실험



(b) 화재현장

사진 2. 실체현미경에 의한 외형확대



(a) 재현실험



(b) 화재현장

사진 3. 금속현미경에 의한 금속조직

수 없을 정도로 모양이 비슷하여 외부화염에 의한 용융인지, 단락에 의해 생성된 용융인지 외형으로 판단하기가 매우 어렵다.[4-6]

소손된 환풍기 전동기의 공통점은 N극과 S극이 만나는 부분에 집중적으로 용융 흔이 생성되었다는 점이다. 이것은 열이 발산이 되지 않고 축열되어 그 부분에서 층간단락이 발생되어 용융흔이 생성된 것으로 판단된다

사진 3은 실험 및 화재현장에서 수거한 환풍기 전동기의 금속조직에서 2개 모두 층간단락시 생성되는 주상조직이 나타났으며, 크기는 화재현장에서 수거한 코일이 더 크고 선명하게 나타났으나, 그 외 다른 특이한 조직이 나타나지 않아 실험한 조직과 구별이 되지 않을 정도로 매우 유사하나 외부화염에 의해 용융된 전선 조직과는 현저하게 달라 전기화재 유무를 구별할 수 있다.

### 3.3 SEM 및 EDX에 의한 분석

주사전자현미경에 의한 표면조직의 차이점은 실험에 의해 생성된 홀의 깊이가 깊지 않았으나 화재현장에서 수거한 환풍기 전동기코일 표면의 홀(hole)은 깊게 파여 홀의 깊이가 다르게 나타났다.

그러나, 그 외 조직상 특이한 차이점은 나타나지 않았으며, 조직 표면의 조성변화를 분석하기 위하여 여러 부분을 line scanning한 결과 CuL, CuK성분에너지원이 실험 및 화재현장에서 수거한 환풍기 전동기에서 같게 나타났다. 화재현장 및 실험에 의해 생성된 환풍기 전동기의 용융된 코일의 조직과 성분분석에서 특이한 차이점이 나타나지 않았다.

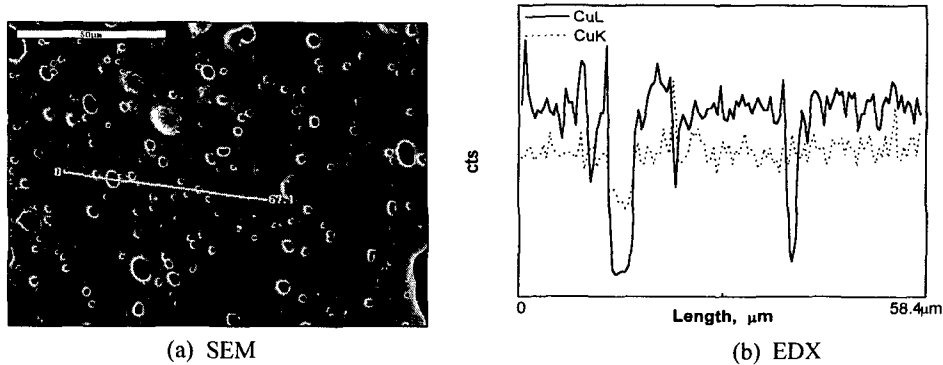


그림 4. 재현실험으로 형성된 용융흔 분석

#### 4. 결론

일반 가정 및 산업용으로 많이 사용되고 있는 환풍기의 화재위험성에 대하여 전압상승 및 환풍기 전동기 강제 정지시에 따른 영향을 알아보고, 환풍기 전동기의 층간단락에 의해 생성된 용융흔을 금속현미경, SEM과 EDX를 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻게 되었다.

- 1) 정속운전시 1.4(최대 308V)배의 과전압이 인가된 환풍기 전동기는 정격전압 인가시보다 회전수가 빨라지고 전류와 온도도 상승하였으나 E종 온도 상승치에는 이르지 않았다.
- 2) 환풍기 전동기 회전날개를 강제로 정지시킨 상태에서 정격전압(220V) 및 과전압을 인가하면 전동기 내부온도가 E종온도 이상으로 상승하여 층간단락과 화재가 발생하였으나, 누전차단기 및 배선용차단기는 동작하지 않았다.
- 3) 실험과 화재현장에서 수거한 환풍기 전동기 용융흔의 금속조직에서 여러 개의 작은 홀(void)과 주상조직이 나타나는 등 매우 유사한 조직이 나타나 구분할 수 없으나, 외부화염에 의해 용융된 금속조직과는 상이하여 전기화재 유무를 판별할 수 있다.
- 4) 전자현미경에 의한 단면 관찰에서 특이한 차이점이 나타나지 않아 실험 및 화재현장에서 수거한 환풍기 전동기가 같은 원인, 즉 내부 과열에 의해 층간단락이 발생하면서 환풍기 전동기에서 화재가 발생된 것임을 유추할 수 있다.

#### 참고문헌

1. 허만엽, 황병표, “전기재해통계분석”, 한국전기안전공사 전기안전시험연구원, pp. 7~16, 1997.
2. 최충석 외5, 전기화재공학, pp. 185~193, 329~334, 도서출판 동화기술, 2000.
3. 한국표준협회, 한국산업규격, KS C 4002, C 9304, 1990.
4. 三橋 信雄, 横井 良秀, 長田 正義, 伊坂 勝生, “絶縁被覆電線の劣化履歴と火災危険について”, 火災, vol. 31, no. 1, pp. 11~19, 1981.
5. 石橋 良男, 岸田 順次, “電線の一次, 二次熔融痕鑑定方法に関する研究(その1),(その2)”, 日本火災學會研究發表會概要集, pp. 83~90, 1990.
6. 최충석 외 3, “저압용 HIV의 열열화에 따른 조성변화”, 대한전기학회춘계학술대회논문집, pp. 8~11, 1999.