

## 전동기 소손에 대한 화재 원인 분석에 관한 연구 A Study on the Fire Cause Analysis of Motor Damage

이춘하<sup>†</sup> · 옥경재 · 권병덕

Chun-Ha Lee<sup>†</sup> · Kyung-Jae Ok · Byung-Duck Kwon

호서대학교 소방방재학과  
(2007. 6. 26. 접수/2007. 12. 14. 채택)

### 요 약

본 논문은 전동기에 발생하는 화재에 대한 연구로서, 일반가전제품에 사용되고 있는 단상유도전동기에 과부하 및 외부화염을 가하여 그 변형 및 파손상태를 비교·분석하였다. 실험은 전동기의 구속을 통한 과부하 시험과 외부에서 화염을 가하는 실험으로 진행하였으며, 외부화염 시험의 경우 전압을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우로 구분하였다. 실험결과 구속을 통한 과부하 시험의 경우 권선부분에서 층간 단락 현을 관찰할 수 있었고, 권선부분의 조직에서는 과부하에 의해 변형된 전선의 특징인 나무줄기 형상의 수지상 조직이 나타났다. 전압을 인가한 상태에서 외부화염을 가한 경우 고정자 권선부분의 코일이 원형을 유지하고 있는 것을 확인할 수 있었고, 권선주변의 색이 붉게 변색된 것을 볼 수 있었다. 전압을 인가하지 않고 외부화염을 가한 경우 고정자 권선부분의 코일이 원형에서 많이 변형된 것을 관찰할 수 있었고, 권선 주변의 색은 전압을 인가한 경우와 마찬가지로 붉게 변색된 것을 확인할 수 있었다.

### ABSTRACT

We studied on the fires about the electrical motors in this paper. We compared and analyzed about the transformation and damage state of single-phase induction motors used in the home appliances when we applied electrical overload and exterior flame. This experiment was progressed by the electrical overload application test and the exterior flame application test through the locked rotor of motor. In case of the exterior flame application test, it is divided into the apply voltage case and not apply voltage case. The result of an experiment through the locked rotor of motor, it was able to observe the short-circuit marks between layers at the winding coil parts, and it was appeared a transformed dendritic tissue structure of winding coil by the electrical overload test. The application voltage and the application exterior flame, it was confirmed that the stator winding coil parts were remain original shapes and observed that the color of the winding coil's circumference was changed to red. The non-application voltage and the application exterior flame, it was observed that the stator winding coil parts were transformed quite from original shapes. It was observed that the color of the winding coil and circumference parts was changed to red at the same case of non-application voltage.

**Keywords :** Electrical motors, Overload, Exterior flame, Winding coil

### 1. 서 론

인간의 편리성을 추구하기 위해 전기설비는 사회가 발전함에 따라 점점 더 다양화 및 대용량화가 되고 있다. 이와 함께 전기로 인한 재해 역시 함께 증가하고 있는 실정이다. 전기사고는 장시간에 걸친 피로누적에 의해서 발생하는 사고로서, 일단 발생되면 적지 않은

인적·물적 피해를 초래하고 있다. 특히, 전기화재는 정확한 원인 규명이 어려운 부분이 많이 있으나 전기로 인한 화재의 원인을 정확히 규명할 수 있는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있겠다.<sup>1)</sup>

유도전동기는 가정용 전원에 사용되는 가장 일반적인 전동기중 한 가지로서, 기동방식에 따라 그 종류가 구분된다. 우리가 사용하는 냉방기 및 세탁기와 같이 외기에 노출하여 직접 물을 사용하게 되면 습도 및 물의 침입에 의해 권선의 절연피복에 핀홀(pin-hole) 및

<sup>†</sup>E-mail: leecha@office.hoseo.ac.kr

리크(leak)가 발생하고 절연불량으로 이어져 전기화재가 많이 발생하고 있다.<sup>2)</sup>

본 연구에서는 가장 많이 사용되고 있는 전기기기의 한가지인 단상 유도전동기의 구속운전에 의한 과부하와 외부화염에 의한 전동기의 손상에 의해 발생하는 화재 진행과정을 재현하고 그 결과를 분석하여 전기화재의 원인규명을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

## 2. 이 론

### 2.1 단상 유도전동기의 원리<sup>3,5)</sup>

단상 유도전동기의 고정자 권선에는 단상 교류가 흐르므로 교번 자계가 생긴다. 교번 자계는 크기가 같고 서로 반대 방향으로 같은 속도로 회전하는 두 개의 회전자계로 분해한다.

Figure 1과 같이 회전각도  $\phi$ [rad]에 대하여 자극이 일정한 각속도  $\omega$ [rad/sec]로서 회전하는 것으로 하여  $\omega t$ 의 위치까지 회전한 임의의 시간  $t$ [sec] 후에 있어서  $\phi = \phi_m \cos \omega t$ 를 Y축 방향으로 교번하는 한 개의 교번자계로 하고  $\phi_a, \phi_b$ 를 크기가  $\phi_m/2$ 이고 같은 각속도  $\omega$ 로 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 회전자계로 한다.

그러면  $\phi_a$ 와  $\phi_b$ 의 X축 상의 성분의 합을  $\Phi_x$ 라고 하고 Y축 상의 성분의 합을  $\Phi_y$ 라 하면

$$\begin{aligned} \Phi_x &= \Phi_a \sin(-\omega t) + \Phi_b \sin \omega t \\ &= -\phi_m/2 \sin \omega t + \phi_m/2 \sin \omega t = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi_y &= \Phi_a \cos(-\omega t) + \Phi_b \cos \omega t \\ &= \phi_m/2 \cos \omega t + \phi_m/2 \cos \omega t = \phi_m \cos \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{합성자계} = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2} = \phi_y = \phi_m \cos \omega t \quad (3)$$

즉, 두 개의 회전자계의 합성은 한 개의 교번자계와 같다. 다시 말하면, 한 개의 교번 자계는 그 자계의 최대치의 1/2의 크기를 가지고  $\omega$ 의 각속도로 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 회전자계로 분해하여 생각할 수 있다. 따라서 단상 유도전동기는 서로 반대 방

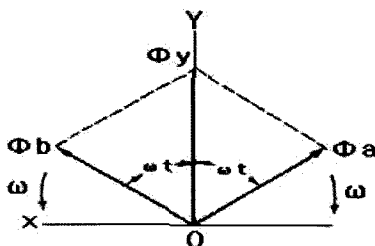


Figure 1. The decomposition of alternating magnetic field.

향으로 회전하는 두 개의 회전자계로 생기는 토크는 서로 반대로 되기 때문에 회전자가 정지된 상태에서 기동 토크는 영이 되어 회전하지 않는다. 그러나 일단 어떤 방법으로 한 방향으로 기동시켜 주면 그 방향으로 가속되어 회전하게 된다.

한 예로, 3상 유도전동기는 3선 중 한 선이 단선되면 기동력이 없어서 기동하지 않는다. 이것은 단상 유도전동기로 되어 기동 토크가 없기 때문이다. 그러나 이 전동기의 회전자를 손으로 일단 한쪽방향으로 회전시키면 그 방향으로 회전하게 된다. 이번에는 반대로 회전자가 정지된 상태에서 반대방향으로 일단 회전시키면 그 방향으로 회전하게 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 단상 유도전동기는 기동력을 주기 위하여 보조수단을 사용하는 기동 방법에 따라 분류된다.

### 2.2 단상 유도전동기에서의 발화<sup>6)</sup>

여러 가지 부품으로 이루어진 전동기는 그 종류가 수백 가지가 된다. 공통된 특징은 코일을 이용하여 전기에너지를 운동에너지로 변환시키는 장치이나, 자체 저항 또는 유도리액턴스에 의해 발열하게 되어 있어 화재와 관련지어 볼 때 생각시키지 않으면 안 된다는 것이다.

최근의 전동기는 대부분 권선 내부에 온도퓨즈를 내장시켜 과열로 발화되는 위험이 현저히 감소되었으나 온도퓨즈의 이상으로 인하여 발화하게 되는 경우가 있다. 전동기에서의 과열원인은 과전압 인가, 과부하 인가, 부하 증대, 콘덴서 열화이며, 이 경우 온도퓨즈 같은 안전장치가 없는 경우 발화하여 화재로 발전되며, 온도퓨즈와 관계없이 연결배선의 절연손상에 의한 단락이 원인이 되어 발화되는 예도 많다.

#### 2.2.1 과전압 인가

110 V용 전동기에 220 V를 인가하는 경우와 같이 과열 보호 장치가 없는 전동기나 정상적으로 작동하지 않는 전동기에 과전압이 인가되는 경우 단순 과전류에 의한 과열로 출화될 수도 있을 것이나, 대부분 외부가 연물에 착화되기 전에 내부 권선에서 먼저 절연체인 에나멜이 탄화되어 단락이 일어나거나 과전류로 용단되어 전원이 완전 차단 정지상태가 되기 때문에 쉽게 발화되지는 않는다.

간혹 110 V용 전동기에 220 V를 연결시키는 경우 전동기보다 전원코드가 먼저 열 손상을 입어 단락이 일어나며 발화하기도 한다. 단상 교류전동기에서는 과전압이 인가되는 경우 권선 연소형태가 균등한 형태를 보이거나 3상과 같은 경우 정상전압을 인가하였어도 3상

중 한 선이 단선되면 남은 권선에 과전압이 걸려 줄열이 발생하여 화재로 진행되기도 한다.

과전압인가로 발화 연소된 전동기 잔해의 형태는 외부의 수열형태보다 내부의 수열형태가 강하게 나타나며, 권선이 균일한 연소형태를 나타내고 극히 일부 권선에서 미세한 단락형태가 나타난다. 전원코드에서는 피복소실에 의한 단락흔이 남게 된다. 또한 축수 부분의 발열흔, 단락된 코드에서의 발화특징은 나타나지 않게 된다. 입력 측에서의 과전압 인가인 경우 전 회로에 과전류가 인가되므로 전원코드에서 과전류에 의한 열변형 특징이나 단락형태가 나타나게 된다.

2.2.2 과부하 인가

과부하란 전동기의 출력보다 큰 작업기계가 연결되는 것을 말하는 것으로 급격한 발열로 내부 권선이 먼저 열 손상되어 단락이 일어나 정지되고 만다. 처음부터 전동기출력보다 큰 작업기계가 연결되는 경우에는 전동기 구동 직후부터 과열되어 내부 가연물이 연소되는 현상이 나타나게 되며, 내부 권선의 단락으로 구동이 정지되고 조기 발견되어 화재로 발전되지는 않게 된다. 작업 중 갑자기 작업기계에 이물질이 걸려 회전이 중지되는 경우에는 전동기 외부에 착화되기 이전에 내부 권선에서의 단락으로 전원이 차단되어 발화되지 않지만 섬유먼지 등 주변에 착화되기 쉬운 물질이 있

는 경우 단락불꽃에 의해 착화되어 화재로 발전된다.

과부하에 의한 발화의 경우 대부분 전원선과 내부 권선에서 절연피복 소실에 의한 단락흔이 발견된다. 그러나 축수 부분에서의 마찰흔은 남지 않게 된다. 작업 기계에 이물질이 감기거나 임펠러(날개)가 파손되는 경우 회전 중 파손된 형태가 남게 될 것이다.

3. 실험

3.1 실험시료

실험에 사용된 전동기는 가정용 전기제품인 세탁기, 선풍기, 환풍기 등에 사용되는 단상 유도전동기를 각각 10개를 사용하였으며 Table 1에 그 규격을 나타내었다. 실험시 주변환경은 사고시와 비슷한 조건을 주기위해 상온(온도 24 °C, 습도 43%)의 실내에서 진행하였다.

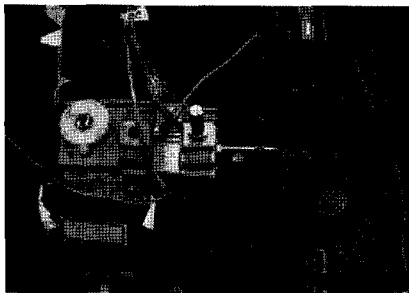
3.2 실험방법

3.2.1 과부하에 의한 소손실험

전동기는 회전자가 회전을 하지 못하도록 하는 경우 과부하 운전이 되며, 전자변이나 마그네트 스위치등은 가동철편의 흡인을 방해하도록 한 경우에 과부하로 된다.<sup>7)</sup> 전동기의 과부하 실험을 실시하기 위하여 첫 번째 경우인 전동기의 회전자가 회전을 하지 못하도록

Table 1. Standard of each motor

Type	Voltage	Frequency	Rated				Insulation class
			Consumption electric power	Revolution	Torque	Current	
	[V]	[Hz]	[W]	[RPM]	[Kg-cm]	[A]	Class
Washing machine motor	220	60	260	1600	6	1.0	B
Electric fan motor	220	60	85	1000	2.2	0.7	A
Ventilation fan motor	220	60	38	830	2.2	0.65	A



(a) Overload



(b) External fire

Figure 2. The whole diagram of experiment apparatus.

구속 시험을 진행하였다. 실험은 구속운전을 시작하여 전동기에 발화가 되거나 설치된 차단기(ELCB : leakage current circuit breaker)가 작동이 될 때까지 진행하였으며, 전동기의 구속은 전동기의 몸체와 회전자를 vise로 고정시킨 후 전동기를 동작하였다. 전원을 인가하고 전동기를 작동한 후부터 발화에 이르기까지의 시간을 측정하였으며, 전동기의 허용온도 이상으로의 온도상승을 방지하기 위한 안전장치(Bimetal)는 제거하여 실험을 진행하였다. 또한 전원측으로의 사고파급을 차단하기 위하여 차단기(AC 220V, 정격전류 30A)를 설치하였다.

### 3.2.2 외부화염에 의한 소손 실험

외부화염에 의한 소손실험은 전압을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우로 구분하여 실시하였으며, 전압 인가여부 외에는 모두 동일한 조건으로 실험을 진행하였다.

외부화염을 가하기 위한 가연물로는 건조한 틀합판 3.9 kg 3개, MDF 1.4 kg (600 mm×600 mm×3 mm)를 사용하였고, 전동기를 가연물 위쪽에 위치하도록 하였다. 연소 초기에 원활한 연소를 위하여 알코올 1리터를 바닥에 붓고 점화하였으며, 안전을 고려해 차단기(AC 220V, 정격전류 30A)를 설치하였다. 또한 화염에 의해 전선이 먼저 소손되어 전동기의 회전자가 구동을 멈추는 것을 막기 위하여 쇠파이프 관을 이용하여 전선을 관속에 통과시켜 연결하였다. 실험은 가연물에 점화후 15분 동안 화염을 가한 후 전동기에 잔염이 없어 질 때까지 진행하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 전동기의 외형 분석

Figure 3은 각 실험별로 전동기를 분해하여 그 외형을 관찰한 것이다. (a)는 과부하에 의해 소손된 전동기를 분해한 것으로서, 과부하에 의해 소손된 전동기의 권선 에나멜 피복이 열에 의해 녹아서 권선내부에 달

라붙은 것을 볼 수 있었고, 권선부분에서 층간 단락흔이 발생된 것을 확인할 수 있었다. 그리고 권선의 변형 및 탈색이 부분적으로 나타나는 것을 볼 수 있었다.

(b)는 전압을 인가한 상태에서 외부화염을 가한 것으로서, 권선의 형태가 과부하에 의한 것에 비해 탄성이 떨어져 권선간 간격이 넓어졌으며 붉게 변색된 것을 확인할 수 있었다. 그리고 권선부위에 외부화염에 의한 단락흔 발생되었으며, 에나멜 피복이 모두 탄화되어 소실된 것을 확인할 수 있었다.

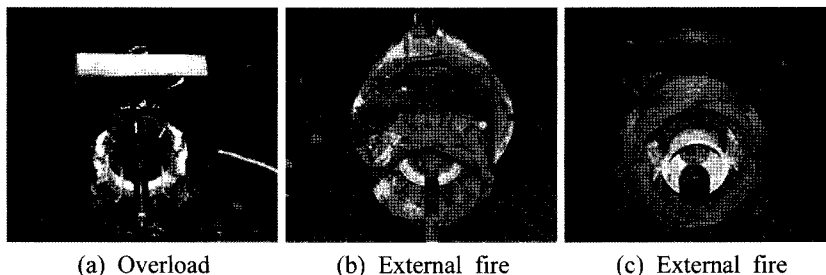
(c)는 전압을 인가하지 않고 외부화염을 가한 것으로서, 권선의 에나멜 피복이 완전히 탄화되었으며, 권선부가 전압을 인가한 경우보다 더욱 심하게 변형되었고, 붉은 색으로 변색된 것을 확인할 수 있었으며 권선부분에 층간단락 현상은 발생되지 않았다.

### 4.2 권선의 내부조직 분석

Figure 4는 권선의 조직을 금속 현미경(GX-52)이 이용하여 200배 배율로 촬영한 것이다. (a)는 정상적인 전동기의 권선을 나타낸 것으로 일정한 방향성이 없는 조직의 형태를 확인할 수 있었다. (b)는 과부하에 의해 소손된 권선부분을 나타낸 것으로 조직이 정상적인 것에 비해 상당히 크기가 증가한 것을 확인할 수 있었으며, 과부하에 의해 변형된 조직의 특징인 나무줄기 형상의 수지상 조직<sup>8)</sup>이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 전체적으로 결정의 경계가 명확하며 조직의 형태가 중앙부의 조직이 외부의 조직에 비해 크게 형성되는 것을 알 수 있었다. (c)는 전압을 인가한 상태에서 외부화염을 가한 것으로서 결정의 형상이 불분명하고 조직 내에 기공이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. (d)는 전압을 인가하지 않은 상태에서 외부화염만을 가한 것으로 전압인가시의 거의 비슷한 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

### 4.3 권선의 표면분석

Figure 5는 권선부분의 표면을 주사전자현미경(SE-



(a) Overload

(b) External fire

(c) External fire

Figure 3. External of motor.

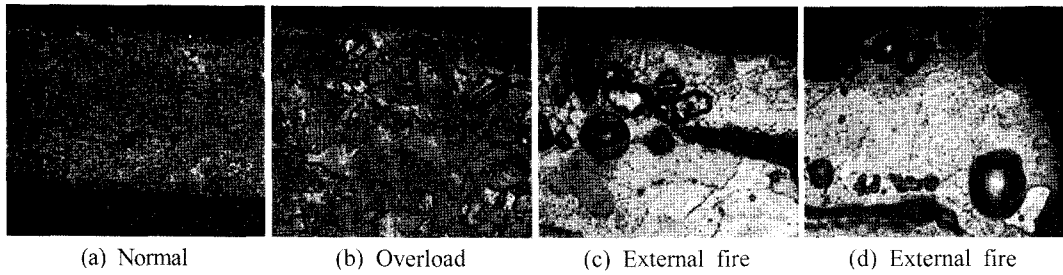


Figure 4. Texture of coil.

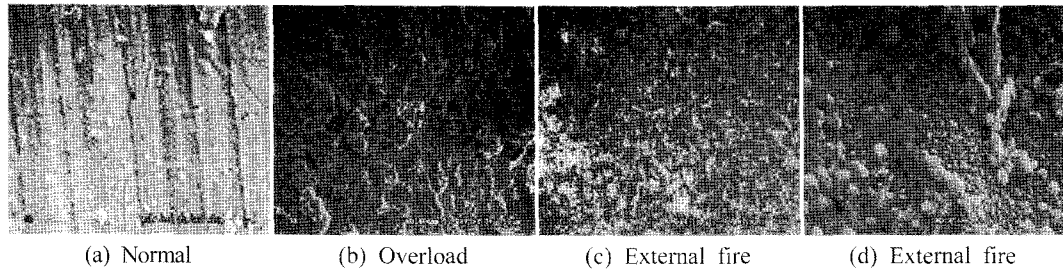


Figure 5. surface of coil.

SEM, S-4300)을 이용하여 1000배 비율로 촬영한 것이다. (a)는 정상적인 전동기의 권선표면을 나타낸 것으로 표면에 일정한 방향으로 줄무늬 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이는 전선의 제조과정에서 생성되는 연신구조임을 알 수 있었다. (b)는 과부하에 의해 권선이 소손된 상태로서 권선의 형태가 갈라지고 표면부분이 산화로 인해 불규칙한 적층이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. (c)는 전압을 인가한 상태에서 외부화염을 가한 것으로서 권선의 표면부분이 산화로 인해 불규칙적인 적층이 형성이 되고 과부하와 같이 갈라지는 부분은 보이지 않았다. (d)는 전압을 인가하지 않고 외부화염을 가한 것으로서 권선의 표면이 거칠게 산화된 것을 관찰할 수 있었고 산화로 인해 역시 불규칙적인 적층이 형성이 되는 것을 알 수 있었다.

인가한 경우 정상적인 전동기의 권선에 비해 권선의 조직 결정이 많이 성장하고, 과부하에 의해 변형된 전선의 특징인 나무줄기 형상의 수지상 조직이 형성되었으며, 또한 결정의 경계가 뚜렷하게 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 외부화염을 인가한 경우 결정의 경계가 불분명하고 조직 내에 불규칙적인 기공이 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

3) 권선부분의 표면분석 결과 정상적인 전동기의 권선은 전선의 제조과정에서 생성되는 일정한 방향의 연신구조가 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 과부하와 외부화염을 인한 권선은 공통적으로 표면부분의 산화로 인해 불규칙적인 적층이 발생하는 것을 알 수 있었다. 단 과부하에 의한 경우 권선표면이 갈라지는 현상을 볼 수 있었다.

## 5. 결 론

이상과 같은 실험을 통하여 전동기의 구속에 의한 과부하 및 외부화염에 의한 소손실험 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 전동기의 외형분석 결과 권선부의 형태 및 색상이 구속에 의한 과부하를 인가한 경우와 외부화염을 인가한 경우가 서로 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 권선부분의 조직분석 결과 구속에 의한 과부하를

## 참고문헌

1. 최충석, 송길목, 김형래, 김향곤, 김동욱, 김동우, "Standby Mode에서 출화된 콘센트의 화염 패턴 및 전기적 특성에 관한 연구", 한국화재소방학회지, Vol. 16, No.1, pp.39-44(2002).
2. 인천소방본부 화재조사팀, 현장실무자를 위한 화재원인 조사기법, pp.327-330(2003).
3. 안두수, 박용관 공역, 신편전기공학, 영설출판사, pp.185-187(1994).
4. 최동진 역, 전기공학, 학문사, pp.151-160(1993).

5. 윤현국, 단상 유도전동기의 기동특성개선에 관한 연구, 조선대학교 산업대학원(1997).
6. 김윤희, 발화원의 감정, 한국화재보험협회, 방재와 보험 96호, pp34-42(2003).
7. KS C 4202 : General Low Voltage Three-phase Induction Motors(2000).
8. 김만건, 김진표, 전기화재 감식공학, 성안당, pp.304-312(2006).