

전동기 소손에 의한 화재 원인 분석에 관한 연구

옥경재, 권병덕, 육현대, 백원돈, 이춘하, 지승욱*
 호서대학교 소방방재학과, *영남대학교 전기공학과

A study on the Fire Cause Analysis of Motor Damage

Kyung-Jae Ok, Byung-Duck Kwon, Hyun-Dai Yuk, Won-Don Baek, Sung-Wook Jee*
 Department of Fire and Disaster Protection Eng.,
 Hoseo University, Department of Electrical eng., *Yeungnam University

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 많다. 따라서 전기로 인한 화재의 원인을 정확히 규명할 수 있는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있겠다.¹⁾

유도전동기는 가정용 전원에 사용되는 가장 일반적인 전동기중 한 가지로서, 기동방식에 따라 그 종류가 구분된다. 우리가 사용하는 냉방기 및 세탁기와 같이 외기에 노출하여 직접 물을 사용하는 습도 및 물의 침입에 의해 권선의 절연피복에 핀홀(pin-hole) 및 리크(leak)가 발생하여 절연불량으로 이어져 전기화재가 많이 발생하고 있다.²⁾

본 연구에서는 전기기기의 주요 부품 중 한가지인 단상 유도전동기의 구속운전에 의한 과부하와 외부화염에 의한 전동기의 소손에 의해 발생하는 화재 진행과정을 재현하고 그 결과를 분석하여 전기화재의 원인규명을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 이 론

2.1 단상 유도전동기에서의 발화³⁾

여러 가지 부품으로 이루어진 전동기는 그 종류가 수백 가지가 된다. 공통된 특징은 코일을 이용하여 전기에너지를 운동에너지로 바꾸는 장치로 되어 있으며, 자체저항 또는 유도리액턴스에 의해 발열하게 되어 있어 화재와 관련지어 볼 때 냉각시키지 않으면 안 된다는 것이다.

최근의 전동기는 대부분 권선 내부에 온도퓨즈를 내장시켜 과열로 발화되는 위험이 현저히 줄어들었는데 온도퓨즈가 내장된 전동기의 경우에도 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.

가. 과전압 인가

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

간혹 110[V]용 전동기에 220[V]를 연결시키는 경우 전동기보다 전원코드가 먼저 열 손상을 입어 단락이 일어나며 발화하기도 한다. 단상 교류전동기에서는 과전압이 인가되는 경우 권선 연소형태가 균등한 형태를 보이나 3상과 같은 경우 정상전압을 인가하였어도 3상 중 한 선이 단선되면 남은 권선에 과전압이 걸려 줄열이 발생하여 화재로 진행되기도 한다. 과전압이 인가되는 경우는 급격히 과열되므로 발화화재로 발전되는 예는 드물다.

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.

나. 과부하 인가

과부하란 전동기의 출력보다 큰 작업기계가 연결되는 것을 말하는 것으로 급격한 발열로 내부 권선이 먼저 열 손상되어 단락이 일어나 정지되고 만다. 그러나 주변에 인화성 물질이 있는 경우 착화되어 화재로 발전될 수 있다. 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 있는 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. 작업기계에 이물질이 감기거나 임펠러(날개)가 파손되는 경우 회전 중 파손된 형태가 남게 될 것이다.

2.2 절연 계급에 따른 허용 최고 온도

전동기 내부의 코일부분을 감싸고 있는 절연재료는 열에 의해 성질이 크게 변하기 때문에 온도 상승에 의해서 단기 또는 장기간에 걸쳐서 재료의 성질변화를 고려하고, 절연재료의 내열구분을 통하여 허용 최고온도가 정해져 있다. Table 1.은 이것을 고려하여 내열 구분의 종류별과 그 허용 최고온도 및 종류별로 중요한 절연재료의 종류를 표시하였다.

Table 1. Classification of the insulation material due to a permission maximum temperature.

Insulation class	Permission maximum temperature [°C]	Type of insulation	Use
Y class	90	The cotton thread and the silk, being composed of the material of the paper, wax type it did not have to include. It did not have to soak in the oil.	Low-end voltage and insulation of small-sized organization.
A class	105	The litter it had to put in the wax, or the litter it had to put in the oil.	A rotary machine of usual, insulation of transformer.
E class	120	Enamel wire use pulley urethan resin, epoxy resin or melamine resin, phenolic resin, PET film, etc.	The machinery and tools where the capacity is big comparison, insulation of magnet generator.
B class	130	Use adhesives of the mica, the asbestos and the glass-fibre back with the inorganic material.(There is also a case where the organic material is mixed)	High voltage generator, insulation of electric motor coil.
F class	155	With above it had to use the same material re-with adhesion of the silicon alkylid resin.	Same as above.(Case of minute description compared to the form of the machinery and tools is small-sized)
H class	180	It had to use with the silicone resin or the binding material above equality together.	Same as above. It had to be used in the high voltage transformer which does not use the oil.
C class	180 Exceed	It had to use the mica, the asbestos, ceramics and the separation back with independence.	Insulation of special thermostable and the climatic in necessity.

3. 실험

실험에 사용된 전동기는 가정용 전기제품인 세탁기, 선풍기, 환풍기 등에 사용되는 단상 유도전동기를 사용하였으며 Table.2에 그 규격을 나타내었다.

Table 2. Standard of each motor

Type	Voltage	Frequency	Rated				Insulation class
			Consumption electric power	Revolution	Torque	Current	
			[W]	[RPM]	[Kg-cm]	[A]	
	[V]	[Hz]					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

3.1 과부하에 의한 소손실험

전동기에서는 회전자가 회전을 하지 못하도록 하는 경우에 과부하 운전이 되며, 전자 변이나 마그네트 스위치등에는 가동철편의 흡인을 방해하도록 한 경우에 과부하로 된다.⁴⁾ 전동기의 과부하 실험을 실시하기 위하여 전동기의 회전자가 회전을 하지 못하도록 구속 시험을 실시하였다. 실험은 구속운전을 시작하여 전동기에 발화가 될 때까지 혹은 차단기가 작동이 될 때까지 진행하였으며, 실험하기 전 실내의 온도와 습도를 측정하였고, 전동기 코일부분에 열전대를 부착하고 전동기의 몸체부분과 회전자를 Base로 고정시켰다. 통전 상태 후부터 발화에 이르기까지의 지속시간을 측정하였으며, 전동기가 운전 중에는 온도상승으로 온도가 높아지게 되나 허용최고온도 이상은 올라가지 않도록 설계되어 있기 때문에 안전장치(Bimetal)를 제거 하였다. 또한 전원측으로의 사고파급을 차단하기 위하여 차단기를 설치하였다.

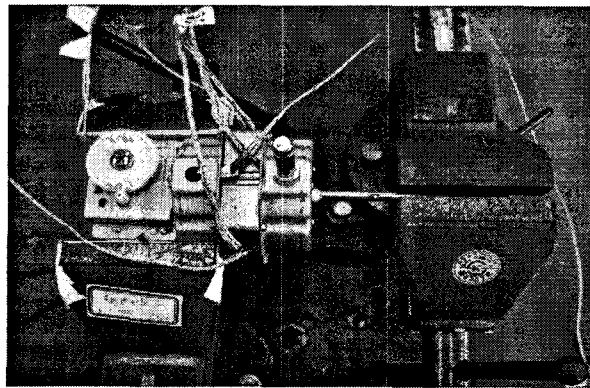


Fig. 1 The whole diagram of experiment apparatus.

3.2 외부화염에 의한 소손 실험

외부화염에 의한 소손실험은 전압을 인가한 경우와 인가하지 않은 경우로 구분하여 실시하였으며, 그 실험 방법은 전압 인가여부 외에는 모두 동일하게 진행하였다.

가연물로는 건조한 톨합판 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 차단기를 설치하였다. 또한 화염에 의해 전선이 먼저 소손되어 전동기의 회전자가 구동을 멈추는 것을 막기 위하여 쇠파이프 관을 이용하여 전선을 관속에 통과시켜 연결하였다.

실험은 가연물에 점화후 약 15분 동안 진행되었고 전동기에 잔염이 없어 질 때까지 진행하였다.

4. 결과 및 토론

4.1 전동기의 외형 분석

Fig. 2는 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 달라붙은 것을 볼 수 있었고, 권선부분에서 층간 단락흔이 발생된 것을 확인할 수 있었다. 그리고 권선의 변형 및 탈색이 부분적으로 나

타나는 것을 볼 수 있었다.

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

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

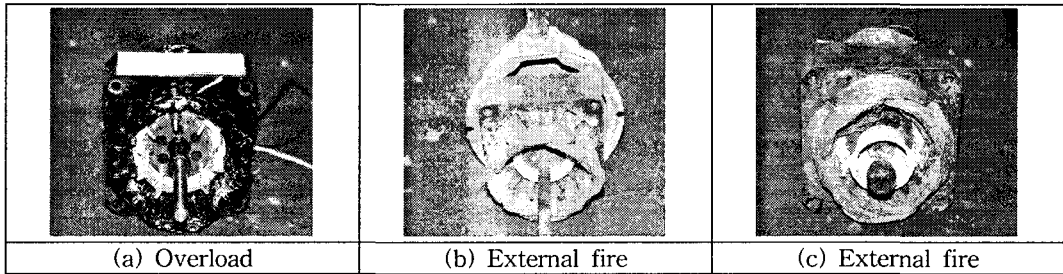


Fig. 2 External of motor.

4.2 권선의 내부조직 분석

Fig. 3은 권선의 조직을 금속 현미경(GX-52)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 확인 할 수 있었다. 또한 전체적으로 결정의 경계가 명확하며 조직의 형태가 중앙부의 조직이 외부의 조직에 비해 크게 형성이 되는 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.

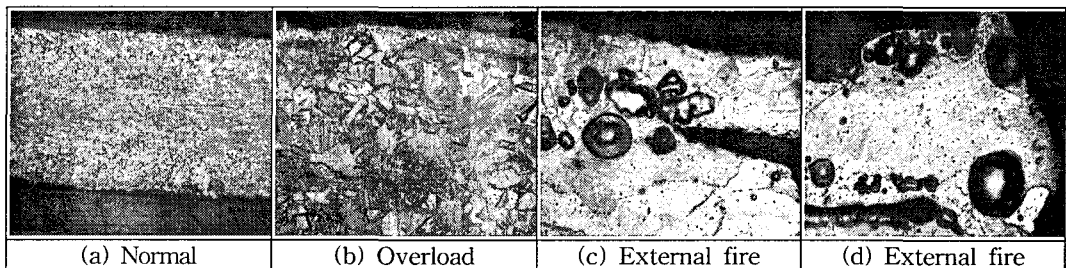


Fig. 3 Texture of coil.

4.3 권선의 표면분석

Fig. 4는 권선부분의 표면을 주사전자현미경(FE-SEM, S-4300)을 이용하여 1000배 배율로 촬영한 것이다. (a)는 정상적인 전동기의 권선표면을 나타낸 것으로 표면에 일정한 방향으로 줄무늬 형태가 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 이는 전선의 제조과정

에서 생성되는 연신구조임을 알 수 있었다. (b)는 과부하에 의해 권선이 소손된 상태에서 권선의 형태가 갈라지고 표면부분이 산화로 인해 불규칙한 적층이 형성되는 것을 확인 할 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.

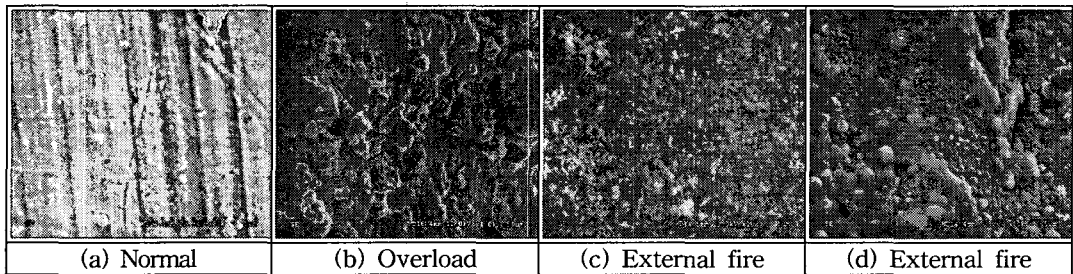


Fig. 4 surface of coil.

5. 결론

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

- 1) 전동기의 외형분석 결과 권선부의 형태 및 색상이 과부하 인가한 경우와 외부화염을 인가한 경우가 서로 상이하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.
- 2) 권선부분의 조직분석 결과 과부하를 인가한 경우 정상적인 전동기의 권선에 비해 결정이 많이 성장하고 결정의 경계가 뚜렷하게 형성되는 것을 확인 할 수 있었다. 외부화염을 인가한 경우 결정의 경계가 불분명하고 조직 내에 불규칙적인 기공이 형성되는 것을 확인 할 수 있었다.
- 3) 권선부분의 표면은 정상적인 전동기의 권선은 전선의 제조과정에서 생성되는 일정한 방향의 연신구조가 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 과부하와 외부화염을 인가한 권선은 공통적으로 표면부분의 산화로 인해 불규칙적인 적층이 발생하는 것을 알 수 있었다. 단 과부하에 의한 경우 권선표면이 갈라지는 현상을 볼 수 있었다.

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", (2003).
- 3) 방재와 보험 학회지 96호 2003, 신년호.
- 4) KS C 4202 : "General low voltage three-phase induction motors", 2000.
- 5) 윤현국. "단상 유도전동기의 기동특성개선에 관한 연구", 조선대학교 산업대학원, (1997).