

# 유도 전동기의 열해석에 관한 연구

°천장성 김형섭 이철균 원종수  
서울 대학교 공과대학 전기공학과

## A Study on the Thermal Analysis of Induction Motors

°Chun Jang-Sung Kim Hyung-Sup Lee Cheol-Gyun and Won Jong-Soo  
Dept. of Elec. Eng., Seoul Nat'l Univ

### ABSTRACT

The evaluation of the temperature of the motor in operation is necessary for smaller and lighter design of motors and for the determination of insulation class. The exact loss distribution modelling is absolutely necessary for the exact evaluation of the temperature .

We calculated the temperature exactly by considering the loss distribution dependent on temperature. The comparison between the calculated results and the experiments is performed to verify the validity of the analysis.

### 1. 서론

운전중인 전동기 각부의 온도포화치 추정은 절연계급의 결정이나 전동기의 소경량화요구에 절대적으로 필요하다. 이를 위해 전동기에서의 복잡한 열흐름상태를 간단한 열저항과 손실원의 모델로 등가화하여 열적 정상상태에서의 온도포화치를 추정하는 방법이 이용되어왔다. 그리고 정확한 열해석을 위해서는 전동기의 열원인 각 손실의 분포를 정확히 모델링하여야한다. 그러나 기존의 방법들은 손실분포를 계산하는데 있어서 미흡한 점이 있었다.

본 논문에서는 유도전동기 각 부에서의 열저항을 먼저 계산한다. 그리고 특정 운전조건과 온도상태에서 손실 분포를 설계식으로부터 계산한다. 위 계산치들로부터 열등가회로망을 꾸며 전기적인 해석을 함으로써 전동기 각 부의 온도포화치를 추정하고 이 추정치로 손실계산에서 온도를 보정하는 반복법을 사용한다. 이것으로 정확한 손실분포와 온도포화를 계산한다.

그리고 위 해석결과와 측정결과를 비교하여 그 타당성을 입증한다.

### 2. 열등가회로망의 구성과 열저항계산

#### 2.1 밀폐외선형 유도전동기의 열등가회로망 구성

해석에 사용된 전동기는 11kW, 4극, 3상의 밀폐외선형 유도전동기이고 측면도와 열등가회로망을 그림 1에 나타내었다. 또한 그림 2는 전동기의 정면도이다. 전동기에서의 온도상승은 전동기 내부손실에 의한 발열량과 전동기 내부에서부터 외기까지의 열저항으로부터 결정되어진다.

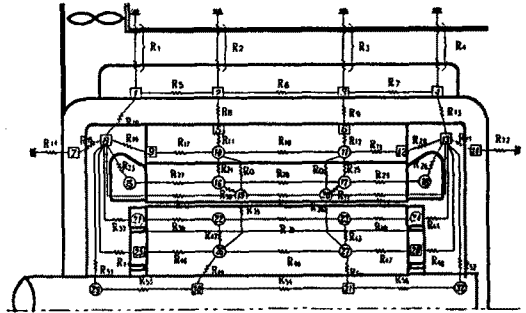


그림 1. 밀폐외선형 유도전동기의 측면도와 열등가회로망

본 해석에 사용된 전동기는 일반적인 밀폐외선형 유도전동기의 통풍방식과는 다르게 따로 독립된 전원에 의해 팬(fan)을 구동시켜 강제로 냉각공기를 불어넣는 밀폐 타력 통풍방식을 사용한다. 그림 1에 열 적 정상상태에서의 열등가회로망을 열발생원 및 열저항을 집중정수로 나타내었다. 좀더 정확한 열해석을 위해서는 집중정수를 분포정수로 나타내는 것이 좋겠으나 해석상의 복잡함과 해석 정도(精度)의 측면에서 볼 때 집중정수에 의한 평균적 열해석으로 해석한다.

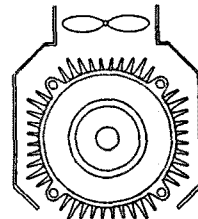


그림 2. 전폐외선형 유도전동기의 정면도

#### 2.2 열저항 계산

##### (1) 전도(Conduction) 열저항

주로 1차 권선이나 회전자 봉에서의 열전달이나 고정자 철심에서의 열전달, 프레임(frame)이나 브라켓(braket)에서의 열전달에 이용되는 방식으로 다음 식(1)과 같이 나타낸다.

$$Q = \frac{k_m A}{X} \Delta\theta \quad (1)$$

여기서 Q : 발열량 [W]

$k_m$  : 평균 열 전도도 [ $W/m \cdot ^\circ C$ ]

$A$  : 전도체체의 단면적 [ $m^2$ ]

$X$  : 전도체체의 길이 [ $m$ ]

$\Delta\theta$  : 두 점사이의 온도차분 [ $^\circ C$ ]

여기에서  $k_m/X$  을 '열전도턴스(thermal conductance)' 라

하며, 식(1)에서  $\frac{X}{k_m A} = R$  로 두면  $\Delta\theta = R \cdot Q$  가 되어 전

기회로에서의  $\Delta E = R \cdot Q$  와 같은 형식이 된다. 이때  $R$  을 열 저항(thermal resistance) 이라 한다.

### (2) 대류(Convection)

여기서도 열의 전도에서의 마찬가지로  $1/Ah = R$  (열저항) 으로 하여 전기회로적 해석을 할 수 있게 된다. 이러한 열의 대류는 고정자권선의 단부나 회전자 엔드링(end ring)부도 전도된 열과 내기(전동기내의 공기), 프레임으로 전도된 열과 외기(프레임위의 냉각 공기)와의 사이에서 일어난다. 통풍공기와외의 직접적인 냉각이므로 아주 중요한 부분을 차지한다.

$$Q = A \cdot h \cdot \Delta\theta \quad (2)$$

여기서  $Q$  : 발열량 [ $W$ ]

$h$  : 열 전달율 [ $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ]

$A$  : 냉각 단면적 [ $m^2$ ]

$\Delta\theta$  : 두 점사이의 온도차분 [ $^\circ C$ ]

### (3) 복사(Radiation)

전자기파의 형태로 열이 전달되는 것으로 전동기에서의 주된 열흐름방식이 아니므로 실제 전동기의 열해석에서는 중요하지 않다. 실제 해석에서는 대류열전도계수값을 약간 크게 함으로써 복사를 고려할 수 있다.

## 3. 손실값의 계산과 해석방법

### 3.1 손실값의 계산

#### (1) 1차 동손( $W_{e1}$ )

$$W_{e1} = W_{e1}' + W_{e1}'' \quad (3)$$

여기서  $W_{e1}'$  : 슬롯 부분의 코일에서 발생하는 동손 [ $W$ ]

$W_{e1}''$  : 코일단에서 발생하는 동손 [ $W$ ]

$$W_{e1}' = I_1^2 R_1 \times \frac{L_{e1}}{L_{r1} + L_e} \quad (4)$$

$$W_{e1}'' = I_1^2 R_1 \times \frac{L_e}{L_{r1} + L_e} \quad (5)$$

$L_{r1}$  : 철심의 축방향 길이 [ $m$ ]

$L_e$  : 코일단의 평균 길이 [ $m$ ]

#### (2) 2차 동손( $W_{e2}$ )

$$W_{e2} = W_{e2}' + W_{e2}'' \quad (6)$$

$$W_{e2}' = \left( \frac{I_2}{\sqrt{2}} \right)^2 \times \frac{N_2 L_2 \rho_2}{A_b} \quad (7)$$

$$W_{e2}'' = I_2^2 \times \frac{N_2^2 D_r \rho_r}{\kappa P^2 A_r} \quad (8)$$

여기서  $W_{e2}'$  : 회전자봉에서 발생하는 동손 [ $W$ ]

$W_{e2}''$  : 엔드링에서 발생하는 동손 [ $W$ ]

$A_b$  : 봉의 단면적  $I_2$  : 봉 전류  $L_2$  : 봉의 길이  
 $N_2$  : 2차 슬롯수  $D_r$  : 엔드링의 평균길이  
 $\rho_r$  : 링의 저항율  $P$  : 극수  $A_r$  : 엔드링의 단면적

#### (3) 철손 ( $W_f$ )

단위중량당 철손은 계절부( $W_{yoke}$ )와 치부( $W_{teeth}$ )에서 발생하는 각 철손의 합으로 철손식은 다음식으로 나타내어진다.

$$W_f = \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \left[ \sigma_H \frac{f}{100} + \sigma_E d^2 \left( \frac{f}{100} \right)^2 \right] [W/kg] \quad (9)$$

여기서  $B$  : 평균 자속 밀도 [ $Wb/m^2$ ]

$f$  : 교번 주파수 [ $Hz$ ]

$\sigma_H, \sigma_E$  : 철관 재질에 따른 상수

$d$  : 극소 강판의 두께 [ $m$ ]

#### (4) 베어링 마찰손

$$W_b = 0.015 \frac{P_b}{D_b} v_r \quad [W] \quad (10)$$

여기서  $P_b$  : 베어링이 받는 하중

$D_b$  : 구의 중심을 통하는 원의 지름 [ $cm$ ]

$v_r$  : 축의 주변속도 [ $m/sec$ ]

(5) 그 외에 풍손 ( $W_f$ ), 표류 부하손 ( $W_s$ ) 등이 있으나 전동기 전체 손실에서 차지하는 비중이 그다지 크지 않으므로 여기서는 일단 고려하지 않는다.

## 3.2 해석 방법

위에서 제시된 동손의 계산식에서 고정자 전류나 회전자 전류는 온도의 변화에 영향을 받게 되고 철손계산식에서도 자속밀도는 전류의 함수이므로 손실분포값의 계산과 전동기 내부의 온도는 같이 고려되어야한다.

즉, 입력전압과 입력주파수를 파라미터로 하여 설계식으로부터 고정자 계절부와 고정자 치부에서의 자속밀도를 계산한다. 이것을 위 식에 대입하여 분포된 철손을 계산한다. 동손의 계산에서는 온도변화를 고려하여 고정자 저항과 회전자 저항을 계산한다. 그리고 이 값으로 만들어진 유도기의 전기적 등가모델로부터 고정자 전류와 회전자 전류를 계산한다. 이렇게 계산된 저항과 전류로부터 동손이 계산되어진다.

따라서 온도변화와 손실분포를 반복적인 계산에 의해 좀더 정확한 열해석을 할 수 있다.

표 2. 각 운전조건에서의 손실 분포

종류 \ 부하	100% 부하 팬 구동	50% 부하 팬 정지	20% 부하 팬 정지
전압 [V]	159.4	160	160.6
슬립 [%]	1.778	0.9167	0.333
$W_{yoke}$ [W]	153.25	154.46	155.67
$W_{teeth}$ [w]	252.33	252.27	254.22
$W_{er}$ [W]	265.4	111.2	58.4
$W_{e2}$ [W]	173.5	47.7	6.4

\* 위 표에서 손실은 60 [Hz]상용전원으로 구동될 때의 손실이다. %부하는 정격 부하로 59 [N-m]를 100으로 한 것이다.

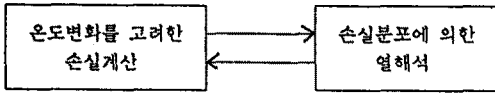


그림 3. 해석방법 (손실계산과 열해석의 반복방법)

위의 반복법으로부터 각 운전조건에서의 손실분포를 계산한 결과는 표 2와 같다.

2.2 절에서의 각 열저항들을 실제 주어진 유도전동기의 치수와 재질에 따른 여러 물질상수들을 대입하여 열등가회로망을 구성하고 위에서 구해진 손실분포들로부터 전기회로적인 해석을 가하면 식 (4)와 같은 행렬식을 구할 수 있다.

$$[G] [\theta] = [W] \quad (11)$$

여기서  $[G]$  : 열전도턴스 행렬 (Thermal conductance matrix)

$[\theta]$  : 열 행렬 (Thermal matrix)

$[W]$  : 손실분포 행렬 (Loss distribution matrix)

위에서 만들어진 행렬 계산에 의해  $\theta_i$  들을 계산하면 이 값들이 외기에 대한 전동기 각 부의 상대적인 온도포화치이다.

## 4. 해석치와 측정치의 비교 및 응용

### 4.1 해석치와 측정치의 비교

위 운전 조건하에서의 전동기 각 부의 온도해석치와 온도측정치는 표 3과 같다. 그림 4, 그림 6, 그림 8은 전동기의 축방향에 따른 온도분포인데 해석치와 측정치가 비교적 잘 맞는 것을 알 수 있다.

표 3. 각 운전조건에서의 온도 해석치와 온도측정치의 비교

Thermo Couple	100% 부하 팬 구동		50% 부하 팬 정지		20% 부하 팬 정지	
	해석치	측정치	해석치	측정치	해석치	측정치
㉔	18	18	18	18	18	18
㉑	43	49	69	68	65	65
㉒	55	59	79	78	74	75
㉓	30	28	63	63	60	60
㉕	49	43.5	80	79	75	73
㉖	31	39	67	73	64	69

\* 각 수치들의 단위는  $[^{\circ}\text{C}]$  이다.

각 서모커플(Thermo-couple) 이 나타내는 위치는 다음과 같다.

- ㉔ : 외기      ㉑ : 내기      ㉒ : 고정자 권선 단부
- ㉓ : 프레임 부하측      ㉕ : 프레임 중앙      ㉖ : 프레임 반부하측

100% 부하운전에서 약간의 오차가 발생한 것은 팬 구동에 따른 프레임의 대류열전도계수가 정확하지 못했기 때문이다. 위 각 운전조건에서의 열해석으로부터 얻어진 전동기 내부의 온도포화치를 그림 5, 그림 7, 그림 9에 각각 나타내었다. 50% 부하와 20% 부하 운전에서 회전자 철심의 양 끝부분의 온도가 중앙부분의 온도보다 높게 나타난 이유는 회전자 봉의 전류 밀도가 낮아서 2차 동손이 1차측 손실에 비해 매우 낮기 때문이다. 즉, 고정자의 철손과 동손에 의해 높아진 내기의 온도가 회전자 철

심중앙부의 온도보다 높게 되는데 회전자 철심의 축방향전도율이 낮기 때문에 그림과 같은 분포가 얻어진다. 또한 고정자 권선과 회전자 봉의 온도분포가 그다지 변화가 없는 것은 구리와 알루미늄의 열전도율이 매우 높기 때문이다.

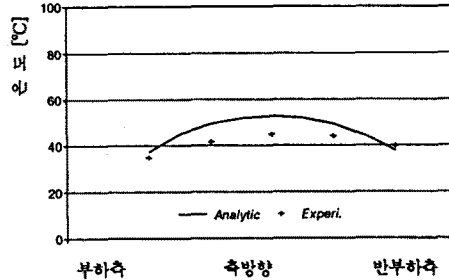


그림 4. 100%부하시 프레임부의 축방향 온도분포 (팬 구동)

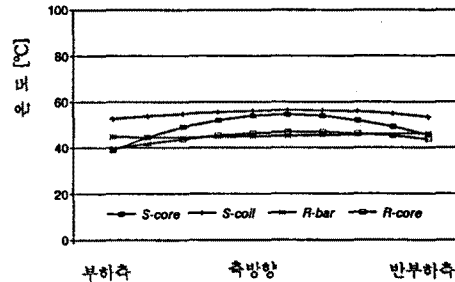


그림 5. 100%부하시 전동기 각부의 온도 (팬 구동, 계산치)

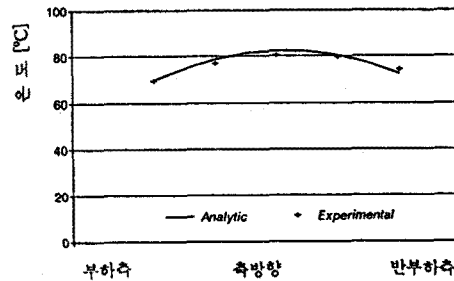


그림 6. 50%부하시 프레임부의 축방향 온도분포 (팬 정지)

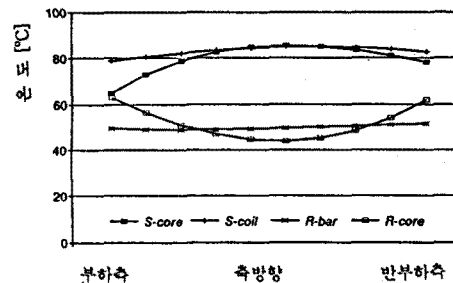


그림 7. 50%부하시 전동기 각부의 온도 (팬 정지, 계산치)

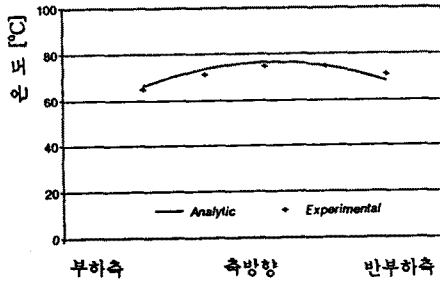


그림 8. 20%부하시 프레임부의 축방향 온도분포 (팬 정지)

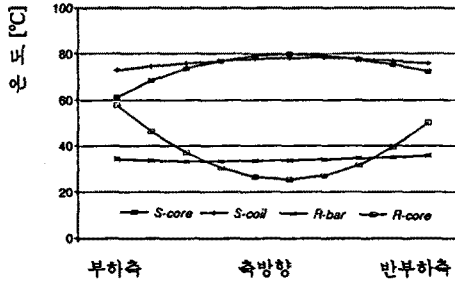


그림 9. 20%부하시 전동기 각부의 온도 (팬 정지, 계산치)

## 4.2 응용

위의 열해석방법을 유도전동기의 특성해석에 응용하였다. 종래에는 고정자 및 회전자 온도를 모든 부하에 대해서 절연 계급으로 정해진 일정한 온도값으로 가정하고 특성을 해석하였다. 그러나, 실제 전동기 운전에서는 부하 별로 열 적 평형상태의 온도값에 상당한 차이가 있다. 그러므로 본 논문의 방법으로 해석된 온도값을 적용시켰을 때 그림 10에 보인 것과 같이 온도를 일정하게 두는 기존의 특성해석법에 비해 특히 효율면에서 정확한 특성산정을 할 수 있었다.

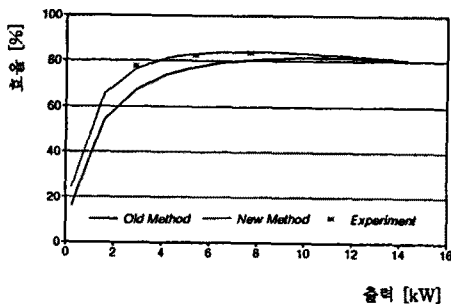


그림 10. 유도전동기 특성해석 방법의 비교 (효율)

## 5. 결론

유도전동기의 정확한 열해석을 위해서는 열원인 각 손실분포의 변화를 정확히 모델링하여야 한다. 본 논문에서는 특정 운전조건하에서의 손실 분포를 3.2 절에서 언급한 반복법에 의하여 정확히 모델링하여 계산된 온도포화치와 실측치가 비교적 잘 일치함을 확인하였다. 또한, 이 방법으로 구한 온도포화치를 특성해석에 적용하여 좀더 정확한 특성해석

을 할 수 있었다.

앞으로 열적 과도상태에서의 열해석이 이루어져야 하며 팬 구동시 난류의 영향을 좀더 정확히 고려해야 할 것으로 본다.

## 참고 문헌

- [1] 北森輝明, 片岡二郎, "全閉外扇形誘導電動機の 溫度上昇推定法", National Technical Report 17, 4, pp. 350-355 (1971-8)
- [2] 佐藤忠幸, "小中容量 全閉外扇形電動機の 溫度上昇計算", 東芝レビュー, 29, pp. 364-369 (1974-4)
- [3] 島原 外, "電動機絶緣體の 熱傳導性向上による 溫度低減效果", 東芝レビュー, 35, pp. 835-837, (1971-8)
- [4] S.Sonaka, "Analysis of Ventilation and Cooling System for Induction Motors," IEEE Trans. on PAS, PAS-100, 11, pp. 4636-4643, 1981
- [5] 김 형섭 외, "인버터로 구동되는 유도 전동기의 특성해석 방법" 전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 104-106, 1992