

축방향으로의 열원분포 불균일을 고려한 3상 농형유도전동기의 온도상승 해석

전 치승^a, 김 병택^a, 권 병일^a, 박 승찬^b

^a한양대학교 대학원 전기공학과, ^b한양대 공학기술연구소

Analysis of temperature rises of three phase squirrel cage induction motor considering the nonuniform distribution of thermal sources

C. S. Jun^a, B. K. Kim^a, B. I. Kwon^a and S. C. Park^b

Dept. of Elec. Engr., Graduate School of Hanyang University, RIET^b

Abstract - The nonuniform thermal sources of a squirrel cage induction motor are obtained from the losses calculated by the nonlinear complex finite element analysis considering skew effects. Then, temperature rises of the motor are calculated using thermal equivalent network analysis and compared with some experimental values.

1. 서 론

전동기의 설계시 내부의 온도상승 예측은 절연계급, 냉각방법의 결정과 전동기의 수명보장 및 안정된 동작범위 등을 결정하기 위하여 중요한 역할을 한다. 전동기 온도상승계산은 전동기의 각 부분에서 발생하는 손실분포, 즉 열원분포를 정확히 산정하는 것이 중요하며, 보통 전기적 등가회로를 이용한 손실계산을 통하여 설계시에 자료로 이용한다[1,2,3]. 또한, 문헌[4]에서는 유한요소법을 이용하여 회전자에 사구슬롯이 없는 경우에 대하여 열원을 해석하였다. 그러나, 회전자에 사구슬롯이 있는 경우 축방향으로의 불균일한 자속분포로 인하여, 손실이 불균일하게 발생하고, 온도상승 역시 다르게 발생하므로, 이에 대한 고려가 필요하다.

본 논문에서는 사구슬롯으로 인한 영향을 고려하기 위하여 전동기를 축방향으로 세조각으로 분할한 후, 2차원 유한요소해석으로부터 각 부분의 손실을 계산하고, 이를 열원으로 하여 열등가회로를 이용한 3상 농형유도전동기의 온도상승을 해석하였다. 또한, 계산된 열원과 온도 상승을 실험치와 비교하므로써 해석방법의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 온도상승 해석

2.1 열등가회로의 구성

전기회로의 오음의 법칙과 유사하게 열등가회로에 있어서 식(1)에 의하여 온도상승을 계산할 수 있다.

$$\Delta T = R_{th} Q \quad (1)$$

여기서, ΔT 는 두 절점간의 온도차[°C], R_{th} 는 열저항[°C/W], Q 는 열원[W]을 나타낸다.

그림 1은 축을 기준으로 전동기의 상하대칭을 고려하여, 본 연구에서 해석하고자하는 유도전동기의 상반부에 대한 열해석 모델을 나타내고 있다. 그림 1의 (a)는 해석전동기의 측면도를 나타내고, 그림 1의 (b)는 열등가회로도와 해석위치를 표시하고 있다.

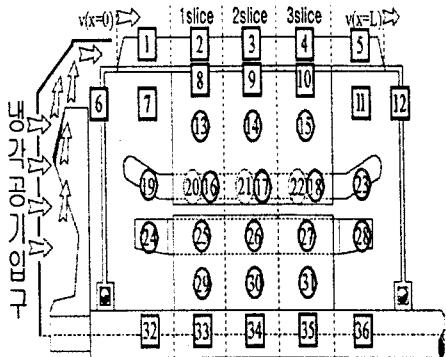
2.2 유한요소해석에 의한 열원 계산

해석하고자하는 모델의 사양은 6극20마력으로써 표 1과 같다.

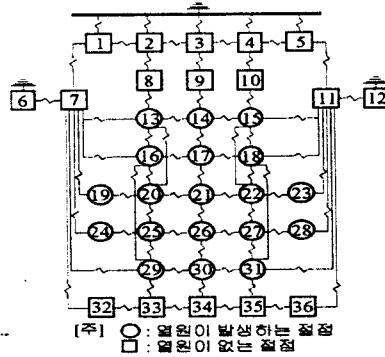
표 1 해석모델의 사양

Table 1 Specifications of analysis model

출력	20[HP]	상수	3상
극수	6극	고정자 내경	212[mm]
입력	220[V]	고정자 외경	300[mm]
전압		회전자 내경	72[mm]
전원	60[Hz]		
주파수		회전자 외경	
고정자	54	공극길 이	0.6[mm]
슬롯수			
회전자	48	철심 종류	S-23
슬롯수			
적층폭	130[mm]	사구각	1슬롯피치



(a) 해석 전동기의 측면도



(b) 열등가회로와 각 절점에 대한 해석 위치

그림 1 유도전동기의 열해석 모델

Fig. 1 Analysed thermal model of induction motor

그림 2는 유한요소해석을 위한 1극모델을 나타낸다.

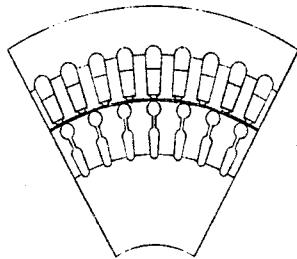


그림 2 유한요소해석 모델

Fig. 2 Analysis model in FEM

사구슬롯을 모델링하기 위하여 축방향으로 전동기를 세 등분하였으며, 세 단면에 대한 전류 연속조건을 주어서, 유한요소 정식화를 통해 최종적인 전체 계 matrix 방정식을 식(2)와 같이 구성하였다.

$$\begin{pmatrix} [S+j\omega L] & [Q] & [D] \\ j\omega[H] & [Y] & [0] \\ \vdots & [0] & [Z] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} [A] \\ [U_b] \\ [I_s] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} [0] \\ [0] \\ [V_s] \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, $[A]$, $[U_b]$ 는 각각 단면별 자기백터포텐셜과 회전자도체 양단간의 전위차를 나타내고, $[I_s]$, $[V_s]$ 는 각각 고정자의 상전류와 상전압벡터이다.

2.2.1 동손에 의한 열원계산

동손은 유한요소해석으로부터 고정자 전류, 회전자 바전류, 단락환전류를 구하여 식(3)의 동손식을 적용하여 계산하였다.

$$W_c = \sum_{j=1}^{NS} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} R^{(e)} (I_i^{(e)} \times I_i^{(e)*}) [W] \quad (3)$$

여기서, $I_i^{(e)}$ 는 한 요소에서의 최대치 전류이고, $I_i^{(e)*}$ 는 $I_i^{(e)}$ 의 공액복소분이며, $R^{(e)}$ 은 한 요소의 저항을 나타내고, NS 는 단면개수, N 은 한 단면에서 전류가 흐르는 부분의 요소 개수를 나타낸다.

또한, 고정자 동손은 코일변(coil side)과 코일단(coil end)으로 나누어 식(4)에 의해 계산하였다.

$$W_{cls} = \frac{L_{le}}{L_{le} + L_{ls}} W_c \quad (4.a)$$

$$W_{cls} = \frac{L_{ls}}{L_{le} + L_{ls}} W_c \quad (4.b)$$

여기서, W_{cls} , L_{ls} 는 각각 코일변의 손실과 등가길이를 나타내고, W_c , L_{le} 는 각각 코일단의 손실과 등가길이를 나타낸다.

식(3)과 식(4)에 의해 구해진 동손으로부터 그림 1에서 필요한 각 단면별 열원이 계산된다.

2.2.2 철손 계산

철손은 유한요소해석으로부터 얻은 자속밀도로부터 식(5)를 이용하여 구하였으며, 해석영역을 네부분(고정자 요오크, 고정자 치, 회전자 요오크, 회전자 치)으로 구분하여 각각에 대하여 계산하였다[5].

$$w_f = B^2 (\sigma_k \frac{f}{100} + \sigma_a \sigma^2 (\frac{f}{100})^2) [W/kg]$$

$$W_f = G_f \times w_f [W] \quad (5)$$

여기서, a 는 규소강판 두께, j 는 전원주파수, σ_h 는 히스테리시스 손실계수(S23의 경우 요크 : 4.5, 치 : 7.5), σ_e 는 와전류 손실계수(S23의 경우 요크 : 36.0, 치 : 63.0)이고, G_j 는 중량을 표시한다.

식(5)로부터 구한 철손을 이용하여 그림 1에서 필요한 각 단면별 열원을 계산한다.

2.3 열저항(thermal resistances) 계산

2.3.1 전도(conduction)에 대한 열저항

전도는 금속내 전자의 이동에 의해 일어나는데, 전동기의 철심내, 고정자 코일, 회전자바 등에서 발생하고, 식(6)으로 산정할 수 있다.

$$R_{cd} = \frac{l}{ks} [\text{°C/W}] \quad (6)$$

여기서, l 은 전열길이[m], k 는 열전도 계수[W/m°C], S 는 전열경로의 단면적[m²]이다.

2.3.2 대류(convective)에 대한 열저항

대류는 유체가 고체위나 유로내를 흐를 때 유체와 고체 표면의 온도차에 대한 유체의 상대운동의 결과로 이루어지는데, 식(7)로 나타낼 수 있다.

$$R_{cv} = \frac{1}{hA} [\text{°C/W}] \quad (7)$$

여기서, h 는 열전달 계수[W/m²°C], A 는 열전달 표면적[m²]을 나타낸다. 그리고, 전동기에서 발생하는 손실의 대부분이 프레임을 통하여 방출되므로, 프레임에서의 열전달계수값이 중요하며, 이 값은 식(8)을 용하여 구한다[3].

$$h = md^{-0.22} v(x)^{0.78} \quad (8)$$

여기서, m 은 2.9, a 는 유로의 등가 직경(hydraulic diameter), $v(x)$ 는 냉각공기속도[m/s]로써 다음식에 의해 표현된다.

$$v(x) = \gamma \cdot v(x=0) \quad (9)$$

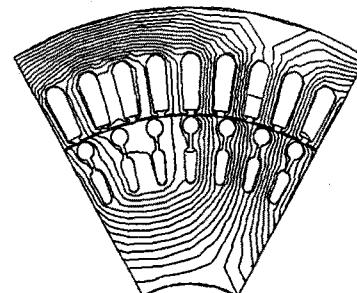
여기서, γ 는 축방향으로의 속도감소계수, $v(x=0)$ 는 초기속도를 나타낸다.

2.3.3 복사(radiation)에 대한 열저항

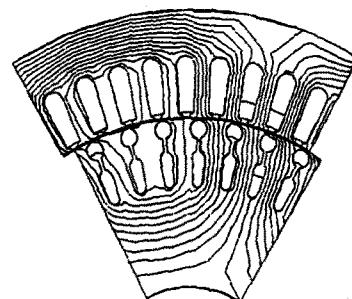
복사는 전자파의 형태로 복사에너지를 전달하는 방식으로, 전동기에서는 복사에 의한 열전달이 미소하므로 무시하였다.

3. 해석결과 및 검토

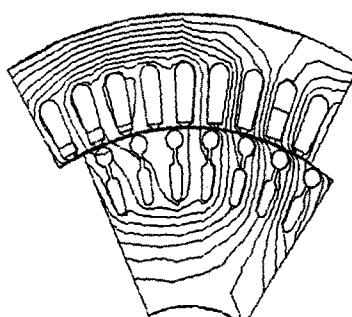
그림 3은 정격시 자속선도로써, 사구슬롯의 영향으로 세 단면에서 자속분포가 불균일하다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 그림 4에서 볼 수 있듯이 철손 또한 세 단면에 대해 상당히 불균일하다.



(a) 첫 번째 단면



(b) 두 번째 단면



(c) 세 번째 단면

그림 3 정격시 자속선도
Fig. 3 flux lines at rated slip

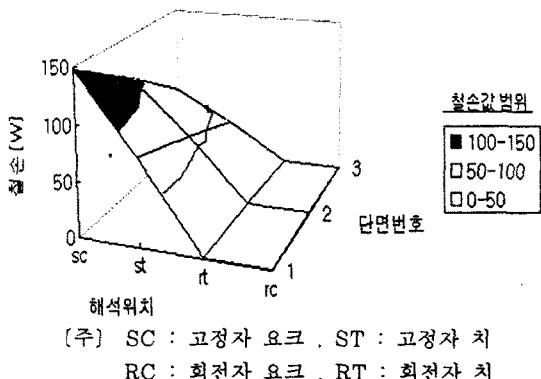


그림 3 정격시 철손의 분포도

Fig. 3 Core loss distribution at rated slip

표2는 정격운전시의 전동기의 열원의 계산치와 실험치를 보이고 있고, 표3은 표2에서 구한 열원을 이용하여 프레임과 코일에서 구한 온도상승치의 해석치와 실험치를 표시하고 있다.

표2와 표3에서 보듯이 열원과 온도상승치의 계산치와 실험치가 근사함을 알 수 있다.

표2 열원의 계산치와 실험치의 비교

Table 2 Thermal source comparison

열원		계산치 [W]	실험치 [W]	오차 [%]
	각 부분	합		
1차동순	코일변	354.95	589.77	618.18
	코일단	234.82		4.59
2차동순	바	290.4	355.5	365.04
	단락환	65.1		2.61
철손	1단면	229.24		
	2단면	169.43	498.21	475.02
	3단면	99.53		4.88

표 3. 온도상승의 계산치와 실험치의 비교
Table 3 Temperature rises comparision

해석위치	계산치 [°C] (평균치)	실험치 [°C]
프레임	26.24	23
고정자코일	71.02	71.41

그림 4는 전동기 각 부분의 온도상승 분포를 나타낸다.

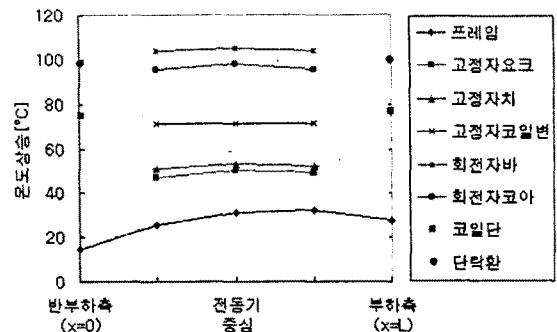


그림 4 열적 정상상태시 축방향에 따른 온도상승 분포도

Fig. 4 Distribution of temperature rises along axial direction at thermal steady state

4. 결 론

본 논문에서는 사구슬롯을 가진 2중농형 3상 농형 유도전동기에서 발생하는 열원분포를 사구슬롯효과를 고려한 유한 요소 해석 결과로부터 계산하고, 열등 가희로를 구성하여 전동기 각 부분에서의 온도상승을 계산하였다. 계산치와 실험치를 비교해본 결과 손실과 온도상승 모두 잘 일치함을 보였다.

[참고 문헌]

- [1] E.Ruppert Filho,et al., "Analysis of squirrel cage induction motor rotor bars thermal behabior", Proc. of ICEM, pp.245-250, Massachusetts, USA, 1990
- [2] A.H. Elton,et al., "Motor temperature estimation incorperating dynamic rotor impedance", IEEE Trans. EC, Vol.6, No.1, pp.107-113, March 1991
- [3] A. Di. Gerlando, I. Vistoli, "Improved thermal modelling of induction motors for design purposes", Conference EMD'93, pp.381-386, Oxford, UK, 1993
- [4] J.A. Dias Pinto,et al., "Transient Heating and Cooling Analysis in an Electromagnetic Device", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.30, No.5 pp.3339-3342, September 1994
- [5] 竹内壽太郎, "大學課程 電機設計學", pp.18-21, オーム社, 1993