

전폐형 유도전동기의 통풍냉각해석

윤종갑 · 원성필
울산대학교 기계공학과

<요 약>

유도전동기에서 주요부분의 온도상승을 예측한다는 것은 팬의 크기, 열용력, 절연재의 선택 등 다양한 설계사항을 결정하는데 중요하다. 본 논문에서는 2개의 내·외부 냉각팬을 가지는 전폐형 유도전동기의 공기통풍냉각에 대하여 평균온도, 열유동 방정식, 열균형 법칙에 기초를 두고 간단 명료한 방법으로 각 구성요소의 온도분포를 계산하였고 실험 데이터와 수치해석 결과를 비교 분석한 결과, 내부 팬의 유량과 요크부와 코일부의 열전도 계수가 모든 구성요소의 온도분포에 큰 영향을 끼친다는 사실을 제시하였다.

Analysis of Air-Flow Cooling for a Large Induction Motor

J. G. Youn · S. P. Won
Dept. of Mechanical Engineering University of Ulsan

<Abstract>

Preestimation of temperature rise in major parts in an induction motor is essential to determine the various design items, such as fan size, thermal stress, insulation materials to be selected, etc.. In this paper, we have studied air-flow cooling for a closed-type motor with two fans, and the simple and clear method to estimate the temperature distributions of each component is presented, based on mean temperature, heat flow equation, and heat balance law. Also the comparison between test data and analytical result is given, and the some results from sensitivity analysis are presented. Inner volume flow rate of air and conductivities of yoke and coil had a large effect on the temperature distribution of each component.

1. 서 론

전기동력기에서 각 구성요소의 온도분포를 예측한다는 것은 매우 중요하지만 사실상 어려운 일이다. 전기동력기의 꾸준한 개량은 절연코일의 온도제한을 극복하는 것과 맞물려왔다. 코일부의 온도는 기기의 내구력을 높이고 신뢰도를 위해서 최대 허용온도 이하로 유지되어야 한다. 따라서, 모든 구성요소의 전반적인 온도분포에 대한 합리적인 해석결과는 전동기의 크기를 결정하거나 절연재, 공기유로, 팬의 크기 등을 결정하는데 매우 유용하다. 공기는 유도전동기에서 가장 유용하게 사용하는 냉각제 중 하나이다. 공기는 전동기 내·외의 통로를 지나면서 표면으로부터 열을 흡수한다. 그러나 많은 연구가 공기의 온도 상승효과를 무시한 채, 온도와 전기저항을 결부한 통합 회로망 방법(integrated circuit simulation)^[1-7]을 사용하거나 특별한 경우 유한요소법^[8,9]을 사용하였다.

본 연구의 목적은 전동기의 모든 구성요소와 내부공기의 온도분포를 예측할 수 있는 해석적인 시뮬레이션 프로그램을 개발하는 것이다. 온도분포를 계산하기 위한 수학적 모델은 체적 평균온도 개념을 사용한 열균형 법칙에 기초를 두었다. 이 방법은 통합 회로망 방법과는 다르며 모터의 형상, 입구공기의 조건, 내부공기의 체적유량 등을 안다면 모든 구성요소의 온도분포를 추정할 수 있도록 되어있다. 개발된 프로그램을 사용하여 공기유량의 변화와 특정한 물성치의 변화에 따른 온도분포의 결과를 제시한다. 실험과 계산은 현대 중공업에서 제조한 HLB5 유도전동기(두개의 팬을 가지는 전폐형, 3상, 225KW)를 모델로 사용하였다.

Fig. 1은 유도전동기의 개략도를 보여준다.

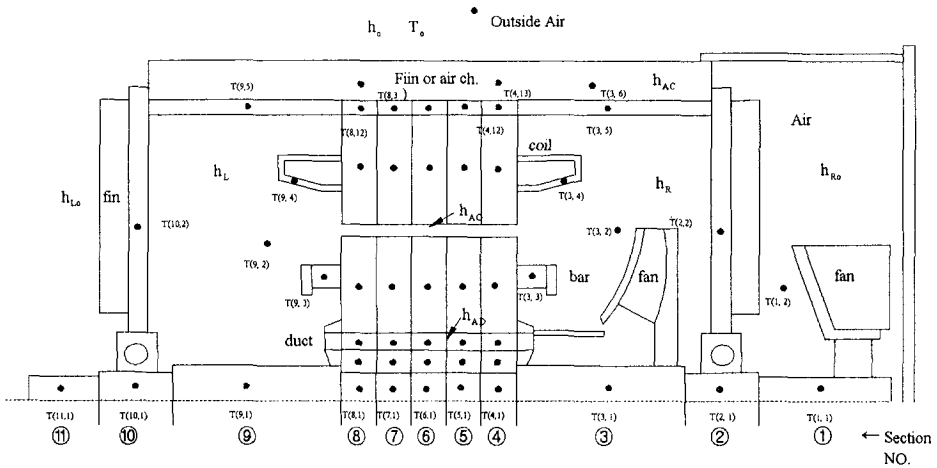


Fig. 1 Schematic diagram of model HLB5

2. 해 석

2. 1 수치적 모델

Fig. 1에서 보는 바와 같이 전동기의 코어부분은 여러 가지 재질로 구성되며 반경방향은 적층으로 되어있다. 또한, 하나의 구성요소는 한 두개의 다른 구성요소로 접촉되어 있다. 예를 들면, 스테이터 요크(stator yoke)의 윗면은 프레임(frame)과 접촉되거나 아랫면은 스테이터 코일(stator coil)과 티스(teeth)표면이 접촉되어 있다. 이런 점에서 통합 회로망 방법을 사용한다면 전체적 네트워크를 공식화하고 계산하는 것이 매우 복잡하다.

본 연구에서는 간단 명료하게 온도분포를 예측할 수 있는 다른 방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 전동기의 모든 구성요소를 세부 검사 체적으로 나누는 것으로 시작된다.

Fig. 1은 자세한 검사 체적과 열전달 계수를 나타낸 것이며 그림으로부터 전동기는 축방향으로 코어부분 5개를 포함하여 11개 영역으로 나누고 한 개의 축방향에 대하여 최대 13개의 반경방향으로 나눈다.

Fig. 2는 코어의 반경방향의 검사 체적을 보여주며 SH(shaft), RY(rotor yoke), AD(air duct), RB(rotor bar), RT(rotor teeth), AG(air gap), SC(stator coil), ST(stator teeth), SY(stator yoke), FR(frame), AC(air channel)를 나타낸다.

각 검사체적은 하나의 평균온도로 균일하게 유지되는 것으로 가정하며 체적 평균온도를 근거로 한 검사체적 사이의 기본 열유동방정식들을 공식화하고 각 검사 체적에 대해서 열균형 법칙을 적용함으로써 온도에 관한 연립방정식을 만든 후 선순법(line by line method)에 의해 계산하게 된다.

본 해석에는 다음과 같은 가정을 사용한다.

- i. 원주 방향으로의 열전달은 없다.
- ii. 축방향과 반경방향의 열전달은 서로 독립적이다.
- iii. 하나의 체적 평균온도는 축방향과 반경방향의 열전달 계산에 이용되며 체적 평균온도의 정의는

$$T_m = \frac{1}{V} \int_V T dV \text{ 이다.}$$

여기서, V는 검사체적이다.

- iv. 단위 체적당 열 발생량

$$q''' \text{ (W/m}^3\text{)} \text{은 균일하다.}$$

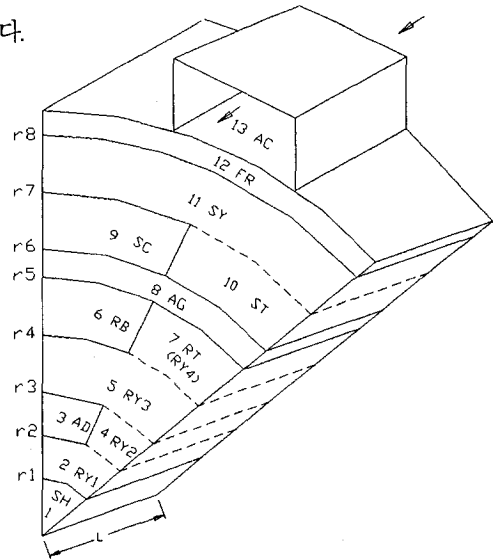


Fig. 2 Detailed control volumes of the core portion

2. 2 열유동 방정식

열유동 방정식은 근접한 검사체적 사이에서 열유동을 근거로 유도하며 코어부분의 열유동이 특히 중요하다. 앞서 언급한 바와 같이 코어부분은 다양한 재질로 만들어지고, 열발생이 있는 곳과 없는 곳이 있다. 따라서 열유동 방정식은 경우에 따라 각기 유도되어야 한다. 유도할 열유동 방정식은 다음과 같다.

- 축방향

- 열원이 없는 경우의 검사체적 사이의 전도(rotor yoke)
- 열원이 없는 경우의 검사체적 사이의 대류(end of rotor yoke)
- 열원이 있는 경우의 검사체적 사이의 전도(rotor bar, stator coil and yoke)
- 열원이 있는 경우의 검사체적 사이의 대류(end of bar, stator coil and yoke)

- 반경방향

- 열원이 없는 경우의 검사체적 사이의 전도(rotor yoke)
- 열원이 없는 경우의 공기와 검사체적 사이의 대류(air of duct or gap and rotor yoke, air of channel and frame, outside air and frame)
- 열원이 없는 경우와 열원이 있는 경우의 검사체적사이의 전도(rotor yoke and bar, frame and stator yoke)
- 같은 물성치와 열원을 가지는 검사체적 사이의 전도(stator teeth and yoke)
- 다른 물성치와 열원을 가지는 검사체적 사이의 전도(stator coil and yoke)
- 공기와 열원을 가지는 검사체적 사이의 대류(rotor bar, stator coil and teeth, and gap-air)

i.와 j. 경우의 열유동 방정식을 예로 들면,

i. 경우의 전도관계식은 (Fig. 3)

$$q = \frac{T_{m1} - T_{m2}}{\frac{a}{2\pi kL}} - q_1''' \pi L b_1 - q_2''' \pi L b_2 \quad (2)$$

여기서,

$$a = \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{k_1}{k_2} e_2 - e_1 + \frac{e_3}{a}$$

$$b_2 = \frac{k_1}{k_2 a} \cdot e_4$$

$$e_1 = \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{2}$$

$$e_2 = \frac{r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \ln \frac{r_3}{r_2} - \frac{1}{2}$$

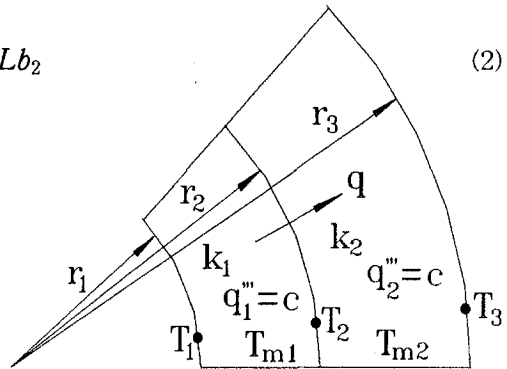


Fig. 3 Conduction between control volumes different property and heat source

$$b_1 = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \left(1 - \frac{k_1 e_2}{k_2 a} + \frac{e_1}{a} \right)$$

$$e_3 = \frac{k_1 r_2^2 e_2}{k_2} - \frac{(1 + 4a) r_2^2 - r_1^2}{4}$$

$$e_4 = \frac{r_3^2 - (1 + 4e_2) r_2^2}{4}$$

가 되고,

j. 경우의 대류 관계식은 (Fig. 4)

$$q_i = \frac{T_i - T_m}{\frac{a_i}{2\pi kL} \cdot \frac{a_i e_i}{a_i e_i - 2\pi kL}} - q''' \pi L b_i \tag{3}$$

$$q_o = \frac{T_m - T_o}{\frac{a_o}{2\pi kL} \cdot \frac{a_o e_o}{a_o e_o - 2\pi kL}} - q''' \pi L b_o \tag{4}$$

여기서,

$$a_i = \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1} - \frac{1}{2}$$

$$a_o = \frac{1}{2} - \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$e_o = \frac{2\pi kL}{a_o} + 2\pi r_2 h_o L$$

$$e_i = \frac{2\pi kL}{a_i} + 2\pi r_1 h_i L$$

$$b_o = \frac{e_o a_o - 2\pi kL}{e_o a_o} \cdot \frac{(1 - 4a_o) r_2^2 - r_1^2}{4a_o}$$

$$b_i = \frac{e_i a_i - 2\pi kL}{e_i a_i} \cdot \frac{r_2^2 - (1 + 4a_i) r_1^2}{4a_i}$$

이다.

2.3 열균형 관계식

검사체적 사이에 관련된 기본 열유동 방정식을 사용하면 각 검사체적에 대하여 한 개의 열균형식이 유도된다.

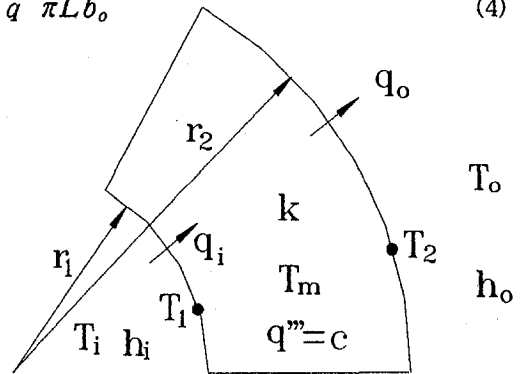


Fig. 4 Convection between air and control volume with heat source

열균형식이 유도된다.

열발생이 없는 경우 검사체적에 대하여 열역학 제1법칙을 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\Sigma q_{in} = \Sigma q_{out} \quad (5)$$

여기서, $q(W)$ 는 열전달 계수를 나타내며, 하첨자 in, out 는 들어오고 나가는 양을 나타낸다.

열발생 q''' 가 있는 경우

$$\Sigma q_{out} - \Sigma q_{in} = q''' \cdot V \quad (6)$$

가 되고,

공기 통로의 검사 체적에 관한 열균형 법칙은

$$\Sigma q_{in} - \Sigma q_{out} = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in}) \quad (7)$$

이 되며,

여기서 \dot{m} 는 질량유량(kg/sec)이고 C_p 는 비열(J/Kg °C)이며 T 는 온도(°C)이다.

Fig. 5에 코어부 반경방향의 열전달 관계를 나타내었으며 각 검사 체적에 열균형 법칙을 적용하면 모든 검사 체적에 대한 열균형식을 얻을 수 있다.

예를 들면, 틈새 공기온도 $T(i, 8)$ 에 대한 열균형식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T(i, 8), \quad & \frac{\theta_{SC}}{2\pi} q_{6SC} + \frac{\theta_{ST}}{2\pi} q_{6ST} - \frac{\theta_{RB}}{2\pi} q_{5RB} - \frac{\theta_{RT}}{2\pi} q_{5RT} \\ & = \dot{m} c_p [T(i-1, 8) - T(i, 8)] \quad (8) \\ & \theta \text{는 구성요소가 점유하고있는} \\ & \text{범위각 (radian)} \end{aligned}$$

식(3),(4)와 같은 열유동 관계식을 식(8)에 대입하여 정리하면, 틈새 공기온도에 대하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} a_{i1} T(i, 6) + a_{i2} T(i, 7) + a_{i3} T(i, 8) \\ + a_{i4} T(i, 9) + a_{i5} T(i, 10) = a_{i6} \quad (9) \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_{i1} &= -\frac{\theta_{RB}}{2\pi b_1} \\ a_{i2} &= -\frac{\theta_{RT}}{2\pi b_2} \end{aligned}$$

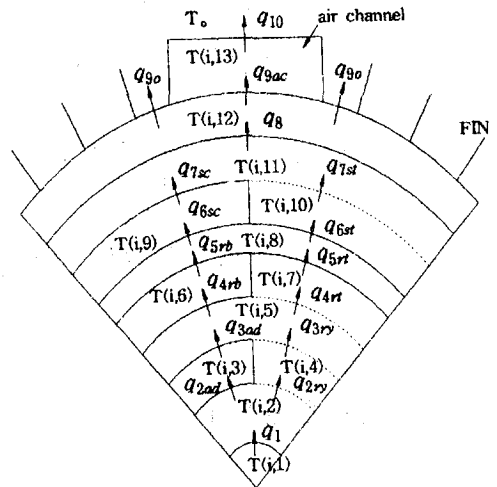


Fig. 5 Energy balance in the core portion

$$a_{i3} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\theta_{RB}}{b_1} + \frac{\theta_{RT}}{b_2} + \frac{\theta_{SC}}{b_4} + \frac{\theta_{ST}}{b_5} \right) + \dot{m} c_p$$

$$a_{i4} = -\frac{\theta_{SC}}{2\pi b_4}$$

$$a_{i5} = -\frac{\theta_{ST}}{2\pi b_5}$$

$$a_{i6} = \frac{L}{2} (\theta_{SC} \overset{'''}{a}_{SC} b_{SC} + \theta_{ST} \overset{'''}{a}_{ST} b_{ST} - \theta_{RB} \overset{'''}{a}_{RB} b_{RB}) + \dot{m} c_p T(i-1, 8)$$

$$a_{RB} = a_{RT} = \frac{1}{2} - r_4^2 \ln \frac{r_5}{r_4} / (r_5^2 - r_4^2)$$

$$a_{SC} = a_{ST} = r_7 \ln \frac{r_7}{r_6} / (r_7^2 - r_6^2) - \frac{1}{2}$$

$$b_{1,4,5} = \frac{a_{RB,SC,ST} \cdot d_{1,4,5} / 2\pi k_{RB,SC,ST} L}{d_{1,4,5} a_{RB,SC,ST} - 2\pi k_{RB,SC,ST} L}$$

$$b_{SC,ST} = \frac{d_{4,5} a_{SC,ST} - 2\pi k_{SC,ST} L}{d_{4,5} a_{SC,ST}} - [r_7^2 - (1 + 4 a_{SC,ST}) r_6^2] / 4 a_{SC,ST}$$

$$b_{RB} = \frac{d_1 a_{RB} - 2\pi k_{RB} L}{d_1 a_{RB}} - [(1 - 4 a_{RB}) r_5^2 - r_4^2] / 4 a_{RB}$$

$$d_{1,4,5} = \frac{2\pi k_{RB,SC,ST} L}{a_{RB,SC,ST}} + 2\pi r_{5,6,6} h_{AG} L$$

$$d_2 = \frac{2\pi k_{RT}}{a_{RT}} + 2\pi r_5 h_{AG} L$$

그리고, L 은 검사 체적의 축방향 길이 (m)

모든 축영역에서 위와 같은 과정이 반복되고 각 검사 체적에 대응하는 모든 열균형 방정식이 얻어지며 평균온도에 대한 행렬식으로 표시된다.

2. 4 시뮬레이션

언급한 해석을 통하여 모든 구성요소의 온도분포를 계산하는 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며 외부공기의 온도와 속도, 팬의 속도, 내부 체적유량 등과 같은 초기조건과 형상에의한 길이, 면적, 체적 등과 같은 데이터를 가지고 계산한다. 반복법에 따라 프로그램은 각 축영역에 반경방향의 온도분포를 연속적으로 계산하며 이전의 온도와 새롭게 계산한 온도사이에 총편차를 계산한 다음 수렴 여부를 판단하게 된다. 결과의 정확도를 높이기 위해 Fig. 1에서 보이고 있는 여덟 개의 서로 다른 열전달 계수를 구해야 하며, 공기와 접촉하는 형상과 전동기내의 유동조건이 복잡하기 때문에 이들 사이의 적합한 상호 관계식

을 얻기가 쉽지않다. 따라서 본 연구에서는 다음과 같은 일반적인 관계식을 사용한다.

- 공기통로와 유로의 경우 (h_{AD}, h_{AC})

$$Nu_{D_H} = 0.023 Re_{D_H}^{0.8} Pr^{0.4} \quad (10)$$

D_H 는 수력 직경

- 틈새 공기의 경우 (h_{AG})

$$Nu_D = 0.026 Re_D^{0.805} Pr^{1/3} \quad (11)$$

D 는 직경

- 다른 경우 ($h_o, h_R, h_{Ro}, h_L, h_{Lo}$)

$$Nu_{L_c} = 0.664 Re_{L_c}^{1/2} Pr^{1/3}, \text{ 층류} \quad (12)$$

$$Nu_{L_c} = 0.037 Re_{L_c}^{0.8} Pr^{1/3}, \text{ 난류} \quad (13)$$

L_C 는 특성 길이

한편, 전동기내의 stator coil, stator yoke, rotor bar에서의 열발생량(KW/m^3)은 다음의 식으로 계산한다.

$$\overset{'''}{q}_{SC} = 3 R_1 i_1^2 / V_{SC} \quad (14)$$

R_1 는 1 kW당 1차 단상 저항

i_1 는 1 kW당 1차 단상 전류

$$\overset{'''}{q}_{RB} = 3 R_2 i_2^2 / V_{RB} \quad (15)$$

R_2 는 1 kW당 2차 단상 저항

i_2 는 1 kW당 2차 단상 전류

$$\begin{aligned} \overset{'''}{q}_{SY} = \overset{'''}{q}_{ST} &= (\text{stray loss} + \text{core loss} + \text{teeth loss}) / (V_{SY} + V_{ST}) \\ &= [0.005 \times \text{motor output} + ((6.7 B_1 - 2.4) B_1 + 1.44) \cdot M_{SY} \cdot F \\ &\quad + ((8.5 B_2 - 2.15) B_2 + 1.2) \cdot M_{ST} \cdot F] / (V_{SY} + V_{ST}) \end{aligned} \quad (16)$$

M 은 질량 (kg)

B_1, B_2 는 자기 밀도 (tesla)

F 는 와전류 손실계수 (= 0.9288)

그리고, 열전도계수 k ($W/m^\circ C$)는 다음과 같은 조건으로 하였다.

$$k_{RY} = k_{SY} = k_{ST} = 30$$

$$k_{SC} = 100, k_{RB} = 175, k_{SH} = 70, k_{FR} = 43$$

3. 결과와 토의

Fig. 6은 스테이터 코일(stator coil), 베어링, 내부공기의 실험값과 계산값의 상호관계를 보여주며 정성적, 정량적으로 잘 일치함을 알 수 있다.

각 그림에서 VFR_i는 내부팬에 의한 체적유량(Volume Flow Rate)을 의미한다.

Fig. 7은 온도 20°C에서 체적유량의 변화에 따른 주요한 부분들의 온도변화를 보여준다. 다른 조건과 물성치는 Fig. 6과 같으며 코일 와인딩(coil winding)에서 내부팬에 의한 체적유량의 증가에 따른 온도감소를 보여주며 전동기의 내부온도는 내부팬에 의한 체적유량이 0.4 m³/s이하 일 때는 로터 바(rotor bar)가 최고온도를 나타내나 체적유량이 0.4 m³/s이상 되면 스테이터 코일(stator coil)에서 전동기의 최고온도가 나타난다.

Fig. 8은 전동기내의 스테이터 코일(stator coil)에 대한 온도분포의 특성을 보여준다. 만약, 내부팬의 체적유량이 0.25m³/s이하에서는 코일의 최대온도가 와인딩(winding)의 끝에서 나타나고 0.25 m³/s이상일 경우 최대온도는 코일의 중앙에서 나타난다. 이것은 내부팬의 체적유량 0.25 m³/s가 임계유량이 됨을 나타내며 내부팬의 체적유량이 임계유량보다 적을 경우 내부팬은 아무 의미가 없다는 것을 의미한다.

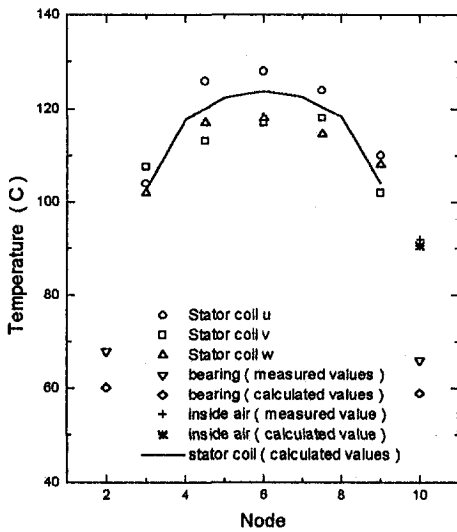


Fig. 6 Comparison between test and computation under the condition of VFR_i=0.7 m³/s, T₀=18°C, v₀=20m/s, 1800 rpm

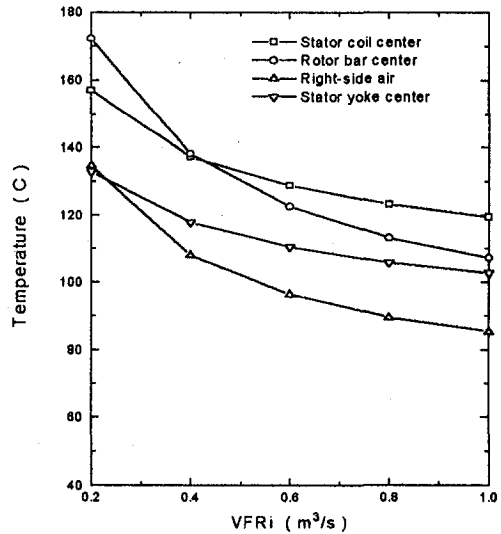


Fig. 7 Temperature variations according to the change of the inner volume flow rate

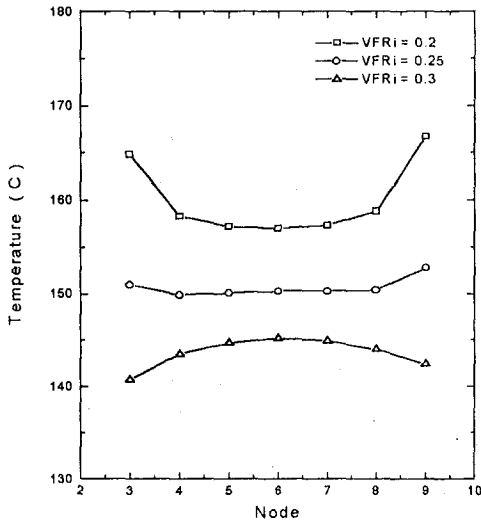


Fig. 8 Characteristics of temperature variations of the stator coil for the inner volumeflow rate

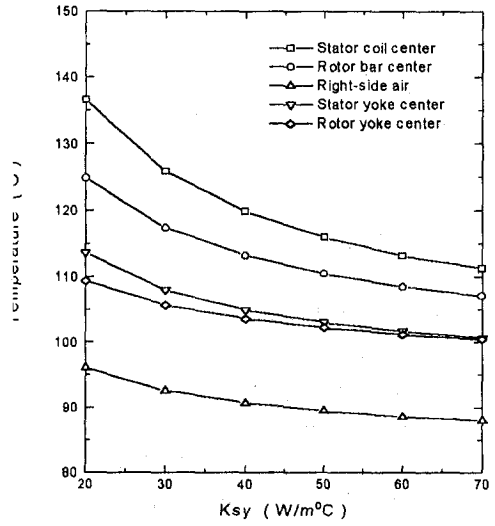


Fig. 9 Temperature variations according to the change of thermal conductivity of the yoke

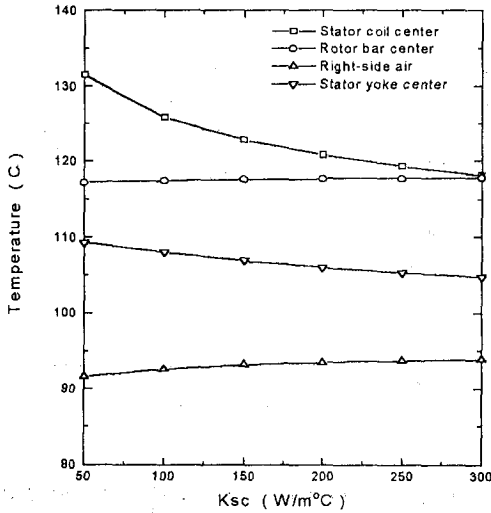


Fig. 10 Temperature variation according to the change of thermal conductivity of the coil

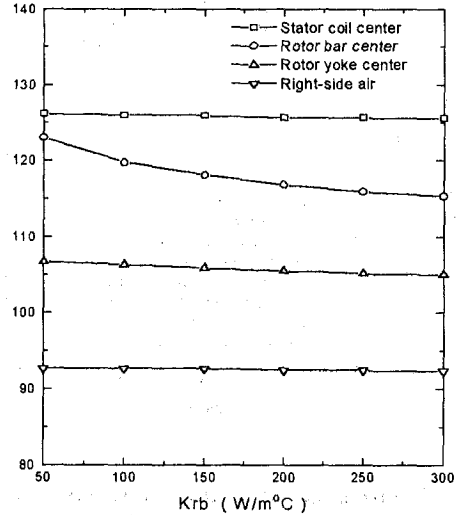


Fig. 11 Temperature variations according to the change of thermal conductivity of the rotor bar

Fig. 9, 10, 11은 체적유량 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$, $T_o = 20^\circ\text{C}$, $v_o = 20\text{m/s}$, 1800 rpm일때 열전도 계수의 변화에 따른 주요 부분의 온도변화를 보여준다.

여기서, 요크(yoke)부의 열전도 계수는 온도강하에 큰 영향을 나타내지만 로터 바(rotor bar)의 열전도 계수는 로터 바(rotor bar)이외에는 거의 영향을 끼치지 않는다는 사실을 알 수 있다. 이것은 요크부가 전동기의 대부분을 차지하고 있기 때문이며, 열전도 계수가 증가함에 따라 더 많은 열이 프레임(frame)을 통하여 방출된다는 것을 의미한다. 코일의 열전도 계수의 변화는 다른 경향을 나타내며 열전도 계수가 증가함에 따라 스테이터 코일(stator coil)과 스테이터 요크(stator yoke)의 온도는 감소하지만, 내부공기와 로터 바(rotor bar)의 온도는 약간 증가한다. 이러한 경향은 로터 바(rotor bar)의 와인딩(winding) 끝부분이 코어부의 로터 바(rotor bar)보다 훨씬 길기 때문에 다소 많은 열이 와인딩으로부터 내부공기로 전달되어 내부공기의 온도가 증가되고 결국 이것이 로터 바(rotor bar)의 온도 상승을 초래한다.

4. 결 론

평균온도, 열유동 방정식, 열균형 법칙을 기초로 모든 구성요소와 유동공기의 온도분포를 간단히 예측하기 위한 방법이 제시되었고 이러한 해석으로부터 각 구성요소의 최대온도는 내부 냉각팬을 가지고 있는 경우에 코어의 중앙지점에서 나타나고 내부 체적유량과 요크의 열전도 계수의 변화가 온도변화에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

본 논문에서 사용된 해석은 열전달 계수에 관한 실험적인 상호관계에 의하여 보정되고 각 유로의 체적유량과 압력강하를 예측하기 위한 공기유동 해석과 결부시켜 개방형 유도전동기에까지 확장될 수 있을 것이다.

<참고 문헌>

1. 藤山辰之 外 四人, "全閉外扇誘導電動機の通風冷却解析", 三菱電機技報, Vol.18, No.10, 1974.
2. 後藤忠幸 外 三人, "電動機の冷却性能改善", National Technical Report, Vol.33, No.10, 1978.
3. 島原捨 外 二人, "電動機絶縁體の熱傳導性向上による溫度低減效果", National Technical Report, Vol.35, No.9, 1980.
4. 石田弘明 外 一人, "中大刑誘導電動機の通風冷却", 安川電機, Vol.46, No.2, 1982.
5. 佐藤忠幸 外 二人, "全閉外扇刑電動機のフレーム冷却設計の最適化", National Technical Report, Vol.109, No.1, 1989.
6. Mellor, P.H., Roberts, D., and Turner, D.R., "Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines of TEFC Design", IEE Proceed. Part B, Vol.138, No.5, pp.205-218, 1991.
7. Baerjee, B., Chalapathi, K.V., and Sastri, V.M.K., "Digital Solution of Temperature

- Distribution in an Electrical Machine Using Network Analogy", *Warmeund Stoffubertragung* 23, pp.137-142, 1988.
8. Sakar, D., Mukherjee, P.K., and Sen, S.K., "Use of 3-Dimensional Finite Element for Computation of Temperature Distribution in the Stator of an Induction Motor", *IEE Proceed. Part-B*, Vol.138, No.2, pp.75-86,1991.
 9. Sarkar, D., Mukherjee, P.K., and Sen, S.K., "Temperature Rise of an Induction Motor during Plugging", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.7, No.1, pp.116-124, 1992.