

냉각채널을 지닌 유도전동기의 비정상상태 운전시 열전달

이정호* · 박성훈* · 고상근**

A Study on Heat Transfer of an Induction Motor with Cooling Channels under Transient Operation Condition

Jeongho Lee, Sunghoon Park, S. Ken Kauh

Key Words: Induction motor(유도전동기), Cooling channel(냉각채널), Thermal network(열회로망), Transient state(과도상태)

Abstract

Induction motors having axial cooling channels in stator and rotor are designed for better cooling performance. Traction motors are one of those examples. And, thermal analysis gain more attention with the increased demand of the motors, for reliable operation and life prolongation.

For thermal network, 3-D model was constructed by BRL-CAD, and thermal region was divided by FRED. Directional thermal conductivity of composite material such as coil, endwinding and iron core was induced to effective thermal conductivity through modeling.

Through fundamental comparison experiment, heat source experiment and transient state experiment, the induction motor using inverter was examined to produce heat source with frequency level, and traced to thermal variation at starting and stopping. And thermal analysis using thermal network was compared with a transient state experiment.

| 기호설명 | |
|-----------|-------------------------------|
| c_p | 정압비열[J/kgK] |
| C | 열용량[J/K] |
| d | 관 지름[mm] |
| f | 주파수[Hz] |
| I | 전류[A] |
| k | 열전도계수[W/mK] |
| l | 길이[m] |
| \dot{m} | 질량유량[kg/s] |
| Nu | 누셀수 |
| Pr | 프란틀수 |
| \dot{q} | 단위체적당 열발생량[W/m ³] |

| | |
|------------|----------------------------|
| R | 전기적 저항[Ω] |
| Re | 레이놀즈 수 |
| Ro | 로테이션 수 |
| t | 시간[sec] |
| T | 온도[K] |
| V | 부피[m ³] |
| 회람문자 | |
| ϵ | 표면 거칠기 |
| ϕ | 부피비 |
| ρ | 공기의 밀도[kg/m ³] |

1. 서론

개방형 유도전동기는 고정자와 회전자에 냉각채널을 만들어 외부로부터 냉각공기를 유입하므로 열전달 면에서 유리하다. 그러나 시동과 정지를 계속하는 비정상상태 조건에서는 정지 시에 열점의

* 서울대학교 대학원 기계공학과

** 서울대학교 기계공학과

온도가 증가하여 절연물의 수명을 단축시키게 된다.

이에 따라 전동기 및 회전 기기에 대한 열해석이 많이 이루어지고 있으며, 전동기 전체에 대한 연구 방법으로는 열회로망법이 많이 채택되고 있다. Maier⁽¹⁾은 비정상상태 운전조건에서 견인 전동기의 온도상승에 대한 연구를 위해 열회로망법을 사용하였고, Mellor⁽²⁾ 등은 전폐의선형 유도전동기의 정상상태와 비정상상태의 온도분포 해석을 위해 집중 열용량법을 적용하였다. 최근 들어 윤명근⁽³⁾은 열회로망법을 이용하여 전폐의선형 유도전동기의 열해석을 수행하였으며, 하경표⁽⁴⁾는 고정자와 회전자에 축방향 냉각채널이 있는 유도전동기에 대해 포괄적 열해석을 수행하였다.

2. 열회로망을 이용한 열해석

유도전동기와 같은 복잡한 형상의 열해석을 위해 열의 확산과 전하의 확산 사이에 존재하는 유사성을 이용하여 열저항의 개념을 도입한 열회로망법을 사용하였다.

열발생량과 비정상상태항을 포함하는 1차원 열확산방정식은

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

와 같이 표현되고, 이 항들을 포함하는 열회로망을 구성하여보면 Fig 1과 같다. 열원은 전류원으로 열용량은 커패시턴스로 나타내며, 각 영역의 중심에 열용량이 집중되어 있고 열원도 영역의 중심에만 존재한다고 가정한다.

2.1 열회로망 구성

본 연구에서는 열회로망을 체계적으로 구성하기 위해 BRL-CAD 와 FRED(Faceted Region EDiter)를 사용하였다⁽⁵⁾. BRL-CAD는 3차원 입체 형상 생성 프로그램으로써 불 연산에 의해 원하는 3차원 입체를 만들어줄 수 있다.

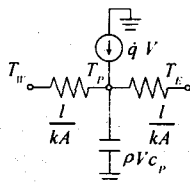


Fig 1 Example of thermal network including heat generation and thermal

BRL-CAD에 의해 만들어진 형상은 FRED에 입력되어 3차원 입체 형상을 작은 영역들로 나누어 준다. FRED는 각 영역별로 재료의 정보를 쉽게 입력할 수 있고, 이에 따라 각 영역의 부피와 밀도, 비열, 열전도계수 및 인접한 영역간 capacitance의 열컨덕턴스를 출력하여 준다. 나누어진 열영역은 모두 564개로, 고체 부분 435개, 냉각공기 부분 129개이며 열회로망을 구성하여 보면 다음과 같다.

$$C_p \frac{dT_i}{dt} = G_{i,j} (T_j - T_i) + Q \quad (2)$$

2.2 열전달 계수

2.2.1 기본 재료의 열전도계수

전동기의 기본 재료는 Table 1에 보인 바와 같이 구리, 알루미늄, 탄소강, 주철, 스테인레스 강, 규소강과 같은 금속재료들과, 폴리에스터, 에폭시, 에나멜 등과 같은 비금속재료들로 구성되었다.

전동기 프레임과 축, 엔드캡, 베어링, 회전자 바와 엔드링, 회전자 핀의 경우는 Table 1에 따랐으나, 고정자 코일과 엔드와인딩, 철심 부분은 모델링을 통하여 유효 열전도계수를 구하였다. 고정자 코일은 기본 재료로써 구리가 사용된다. 그러나 코일을 다발로 만든 후 절연지를 씌워 에폭시로 함침하므로 열전도계수가 방향별로 다르게 나타난다.

먼저 길이 방향(longitudinal direction) 열전달의 경우(k_z)를 살펴보면, 열전도계수가 다른 두 물질에 의해 온도장이 왜곡되지 않기 때문에 직렬 모델(serial model)을 적용할 수 있다.⁽⁴⁾

$$k_c = (1 - \phi)k_c + \phi k_s \quad (3)$$

식 (3)에서 ϕ 는 슬롯내의 코일과 절연지로 사용되는 폴리에스터, 에폭시의 합성물의 부피비로서 본 전동기의 경우 0.35의 값을 갖는다.

가로 방향(transverse direction) 열전달의 경우 (k_r, k_θ), Lewis & Nielson의 모델을 적용할 수 있다.⁽⁴⁾

$$k_c = k_c \times \left[\frac{1 + AB\phi}{1 - B\psi\phi} \right]$$

where. $B = \frac{p-1}{p+A}$, $\psi = 1 + \left(\frac{1 - \phi_m}{\phi_m^2} \right) \phi$ (4)

여기서, 한 방향으로 배열된 실린더의 경우

A=0.5, 실린더간 간격이 불규칙적인 경우 $\phi_m = 0.82$ 이며, p는 열전도계수 비이다.

위 두 모델에 따라 길이 방향 유효 열전도계수는 130W/mK, 가로 방향 유효 열전도계수는 0.32W/mK가 나왔다.

엔드와인딩은 고정자의 슬롯을 지나서 코일 다발에 의해 형성되는 코일 몸치로서 그 형상이 복잡하다. 그러나 엔드와인딩의 형상이 회전 방향으로 규칙성을 지니므로, 하나의 슬롯에서 나온 코일 다발을 기본 단위로 하여 원통 좌표계의 세 방향별 유효 열전도계수를 구하였다.

전동기의 회전자 철심과 고정자 철심은 와전류에 의한 손실을 줄이기 위해 표면에 얇은 절연 물질을 코팅하므로, 판과 판 사이는 전기적으로 절연된다.

철심의 방향별 열전도계수는 어느 방향이나 온도장이 왜곡되지 않으므로 다음과 같은 직렬 모델과 병렬 모델을 사용할 수 있다.⁽⁴⁾

Table 1 Thermal properties of materials used in the motor

| Materials | k[W/mK] | ρ [kg/m ³] | c_p [J/kgK] | Descriptions |
|-----------------------------|---------|-----------------------------|---------------|---|
| Copper commercial | 372 | 8800 | 385 | Stator winding, Endwinding |
| Aluminum pure | 229 | 2702 | 903 | Rotor bar, Rotor fin, Rotor endring |
| Carbon steel castings | 50 | 7270 | 420 | Frame |
| Cast iron | 52 | 7800 | 420 | Endcap |
| Carbon steel | 54 | 7870 | 447 | Shaft |
| Martensitic stainless steel | 25 | 7500 | 450 | Bearing |
| Silicon steel | 59.8 | 7817 | 446 | Iron core |
| Polyester | 0.17 | - | - | Insulating paper for stator winding and endwinding |
| Epoxy | 0.17 | - | - | Insulating material for stator winding and endwinding |
| Enamel | 0.47 | - | - | Coating material for silicon steel plate |

수평 방향 유효 열전도계수는

$$k_x = (1-\gamma)k_m + \gamma k_{ss} \quad (5)$$

수직 방향 유효 열전도계수는

$$\frac{1}{k_y} = \frac{1-\gamma}{k_{gap}} + \frac{\gamma}{k_{ss}} \quad (6)$$

로 표현된다. 여기서 ss는 규소강판, ins는 절연재, gap은 공기를 나타내며, γ 는 전체 철심의 부피 중 규소강판이 차지하는 부피비로 여기서 0.98의 값을 갖는다.

2.2.2 고정자 냉각 통로

본 연구에 사용되는 전동기의 고정자 냉각통로는 타원형이나, 직경 7mm의 원형관으로 환산하였다. 고정자 냉각통로를 지나서 냉각 공기의 경우 레이놀즈 수가 원형관 직경 기준으로 약 10'이며, 입구의 직각 모서리에서 박리가 일어나고, 관 내부 $l/d=1\sim 2$ 에서 재부착이 일어나므로 원형관 전 영역에서 난류유동이다. 대류 열전달계수를 구하기 위해 Gnielinski식을 사용하였다.⁽⁶⁾

$$Nu_{d,fd} = \frac{(f/8)(Re_d - 1000)Pr}{1 + 12.7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)}$$

where, $Re_d = \frac{4\dot{m}}{\pi d \mu}$ (7)

식 (7)의 적용 범위는 $0.5 < Pr < 2000$, $2300 < Re_d < 5 \times 10^6$ 이다.

그러나 본 실험에서는 $l/d=14$ 이므로 완전 발달 영역이라 볼 수 없으므로, 관 내부를 5등분하고 각 구간별 평균 누셀 수를 구하기 위해 국소 누셀 수를 적분하였다.

관 입구에서의 평균 누셀 수는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\frac{\overline{Nu}_d}{Nu_{d,fd}} = 1 + \frac{C}{x/d}, \text{ where, } C = 6 \quad (8)$$

또한 내벽의 거칠기에 따른 변화를 고려하기 위해 다음 식을 사용하였다.⁽⁷⁾

$$\frac{Nu}{Nu_{smooth}} = \left(\frac{f}{f_{smooth}} \right)^n$$

where, $n = 0.68Pr^{0.215}$. (9)

마찰 인자(f)는 거칠기를 갖는 원관에 대해

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re_d f^{1/2}} \right) \quad (10)$$

로 주어지고, 매끈한 관에 대하여는

$$f = (0.79 \ln Re_d - 1.64)^{-2} \quad (11)$$

로 주어지므로 식 (7)~(11)로부터 대류 열전달계수를 구할 수 있다.

2.2.3 회전자 냉각 통로 및 간극

회전 원판에서의 대류 열전달계수는 Morris⁽⁸⁾에 의해 정리되었다. 완전 발달된 유동에서 닷셀 수는 정지 관에 대한 비로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \frac{1.367 Pr^{2/3}}{Pr^{2/3} - 0.05} \left(1 + \frac{0.0286}{X^{1/3}} \right) X^{1/20}$$

where, $X = \frac{Ra_r^{1.818}}{Re^{2.273} Pr^{0.606}}$, $Ra_r = \frac{\omega^2 H \beta \tau a^4}{\alpha \nu^2}$ (12)

고정자와 회전자 사이의 간극에서 회전 효과에 의한 열전달 향상이 미미하므로 정지한 동심관 사이의 열전달 관계식을 사용한다⁽⁴⁾.

동심관 내면과 외면에서의 열전달 계수를 원관의 열전달 계수에 대한 비로 표현하면,⁽⁹⁾

$$Nu_i / Nu_0 = 0.86 (d_i / d_o)^{-0.16} \quad (13)$$

$$Nu_o / Nu_0 = 1 - 0.14 (d_i / d_o)^{0.6} \quad (14)$$

가 된다. 식 (7)~(14)를 통해 회전자 냉각 통로와 간극에서의 대류 열전달계수를 구할 수 있다.

2.2.4 나머지 영역

회전자 핀과 엔드링 주위의 대류 열전달계수는 윤명근⁽³⁾의 논문을 참고하였다. 윤명근⁽³⁾의 논문에서는 전폐외선형 유도전동기의 여러 인자에 따른 열전달계수를 구하였다. 그러나 본 연구는 냉각 공기를 주입하여주는 형태이므로 보다 큰 닷셀 수를 가질거라 가정하여 부하측과 반부하측에 모두 550을 주었다.

엔드와인딩 주위는 내면, 측면, 외면에서 각각 많은 차이를 나타내고 있다⁽³⁾. 본 경우에 해당하는 엔드와인딩 내면, 측면, 외면의 닷셀 수는 750, 350, 300이나, 마찬가지로 전폐외선형의 경우이므로 이보다는 더 큰 값을 가질 것으로 예상된다.

전동기 외부 표면에서는 자연 대류에 의해 열전달이 일어난다. 엔드캡 외면에서는 수직 평판의 자연 대류식을 적용하였으며, 프레임 외면에서는 원통의 자연 대류식을 적용하였다.

2.3 열원 및 열용량

전동기의 입력에서 기계적인 출력을 뺀 부분은 손실로서 최종적으로 모두 열로 방출된다. 이를 열

원 혹은 열손실이라 하는데, 그 종류를 살펴보면 1차 동손, 2차 동손, 철손, 표류부하손 및 기계손 등이 있다.

비정상 상태에서는 열용량이 중요한 요소로, 열용량은 정상상태까지 도달하는데 걸리는 시간과 관계가 있을 뿐 아니라, 전동기 시동시 걸리는 큰 시동 전류에 의한 큰 발생열의 히트 싱크로서의 역할도 한다. 열용량은 다음 식으로 표시된다.

$$C = \rho c_p V \quad (17)$$

전동기 각 재료별 밀도와 비열은 Table 1에 정리해 놓았다.

3. 실제 유도전동기 실험

3.1 실험장치 및 실험방법

실험장치의 개략도는 Fig 2와 같다. 전동기에 인버터를 연결하여 인버터의 주파수를 제어함으로써 회전수를 조절하였다. 전동기는 3상, 4극, 5마력 전동기로서 자세한 사양은 Table 2에 정리하였다. 전동기에 부하를 가하기 위해 Fig 2와 같이 직류 발전기를 이용하였다.

Table 2 Specification of the motor

| | |
|---|-------|
| Hp | 5 |
| Number of poles | 4 |
| Frequency [Hz] | 60 |
| Voltage [V] | 220 |
| Air gap length [mm] | 0.4 |
| Core lamination length [mm] | 100 |
| Stator outer diameter [mm] | 195 |
| Stator inner diameter [mm] | 120 |
| Number of cooling holes (stator/rotor) | 24/6 |
| Diameter of cooling holes (stator/rotor) [mm] | 7/10 |
| Insulation class | B |
| Thickness of slot insulation paper [mm] | 0.25 |
| Number of slot (stator/rotor) | 48/40 |

냉각 공기는 송풍기에 의해 공급되고, 공기의 질량 유량을 조절하기 위해 인버터로 송풍기의 구동 전동기 입력 주파수를 제어하였다. 송풍기에서 나온 공기는 항온조에 의해 온도 제어가 된 열교환기를 통과하였다. 유량은 Meriam Instrument사의 층류 유량계를 이용하여 측정하였다. 층류 유량계 상류의 절대압과 온도, 상 하류의 차압을 측정하여 유량계를 통과하는 질량 유량을 구한다. 온도 측정은 T형 열전대를 Fluke사의 Hydra에 접속하여 측정하였다.

전동기 고정자 및 프레임 부분의 온도는 14개의 T형 열전대를 부착하여 측정하였으며, 회전자 부분의 온도를 측정하기 위해 반부하측에

회전무선계측기를 연결하였다⁽¹⁰⁾. 또한 전동기의 내부에 유입되는 냉각 공기의 온도를 측정하기 위해 고정자 부분에 6개, 회전자 부분에 2개의 열전대를 설치하였다. 자세한 설치 위치는 Fig 3에 나타내었으며, 기호 설명은 Table 3에 정리하였다.

3.2 열원측정 실험 및 결과

열회로망을 구성하여 해석을 수행하기 위해서는 열원 분포를 정확히 예측하여야 한다. 그러나 실험에 의해 모든 열원을 파악하기는 어렵다. 2.3절에서 열원의 종류와 그 양에 대해서 서술하였으나 그 중 실측에 의해 구할 수 있는 것은 1차 동손과 기계손이다.

열원을 측정하기 위해 실험 전동기에 연결된 인버터의 주파수를 5Hz부터 60Hz까지 5Hz 간격으로 1시간 30분 가량 작동시켜 정상상태에 도달한 후, 전동기 입력을 단속하고 저항을 측정하여 이들 데이터로부터 외삽하여 입력 전력이 단속된 시점의 코일의 저항을 계산하였다.

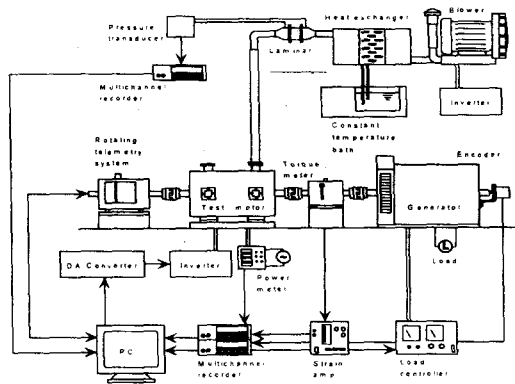


Fig 2 Schematic diagram of experimental setup

부하는 직류발전기의 필드 전압을 경우별로 일정하게 유지하였으며 60Hz 기준으로,

- 1) case1 : 무부하 (필드 전압 = 0V)
- 2) case2 : 50% 부하 (필드 전압 = 68V)
- 3) case3 : 100% 부하 (필드 전압 = 134V)

의 세 가지로 주었다.

세 가지 경우 모두 5Hz에서는 많은 시동 전류가 필요하다는 것을 Fig 4에서 보여주고 있다. case1 (무부하)의 경우에는 주파수가 증가함에 따라 입력 전류는 계속 감소하고 있으며 부하가 증가함에 따라 입력 전류는 점점 증가한다. case3의 경우 15Hz를 기준으로 입력 전류가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보여준다.

Table 3 Description of symbols

| | Name | Description |
|-----------------|-----------|--|
| Stationary Part | S1/S2/S3 | Frame outer surface from inlet to outlet |
| | S4/S5/S6 | Endwinding inlet part (outside/top/inside) |
| | S7 | Coil |
| | S8/S9/S10 | Endwinding outlet part (outside/top/inside) |
| | S11/S12 | Stator yoke surface from inlet to outlet |
| | S13/S14 | Endcap surface from inlet to outlet |
| | Sa1/Sa2 | Motor inlet/outlet [Air] |
| | Sa3/Sa4 | Endwinding surround from inlet to outlet [Air] |
| Rotatory Part | R1/R11 | Shaft surface from inlet to outlet |
| | R2/R10 | Rotary yoke surface from inlet to outlet |
| | R3/R9 | Rotor fin surface from inlet to outlet |
| | R4/R8 | Endring surface from inlet to outlet |
| | R5/R6/R7 | Rotor surround surface from inlet to outlet |
| | Ra1/Ra2 | Rotor hole from inlet to outlet [Air] |

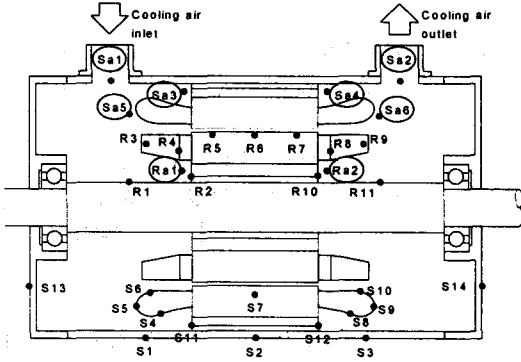


Fig 3 Temperature measurement locations in the motor

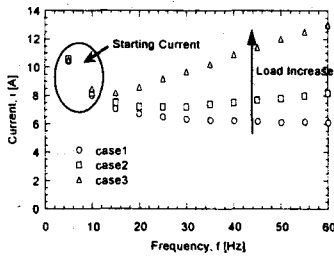


Fig 4 Input current with frequency level

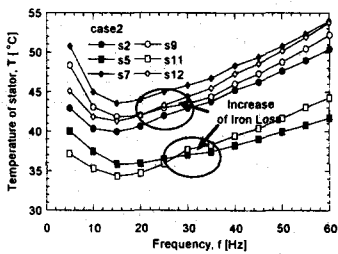


Fig 5 Temperature distribution with frequency level (case2)

Fig 5는 case2의 주파수별 온도분포를 나타낸다. 고정자 부분에서 엔드와인딩과 고정자 철심의 온도를 살펴보면 대략 20~30Hz부근에서 서로 역전되는 현상을 보이고 있다. 이는 주파수가 증가함에 따라 철손이 증가하고 있음을 나타내주고 있는 것으로서 식 (15)~(16)에 철손이 주파수의 제곱에 비례하고 있는 것과 일치한다. 따라서 고주파수로 모터를 운전하면 철심부의 냉각이 더욱 중요하다.

다음으로 기계손을 측정하는 실험을 하였다. 먼저, 전동기를 무부하 상태에서 약 3시간정도

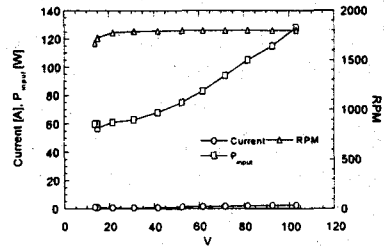


Fig 6 Mechanical loss of the motor

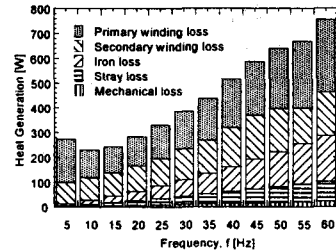


Fig 7 Distribution of heat generation

운전하여 예열을 시켰다. 정격전압의 약 절반정도에서 전압을 서서히 낮추면서 전력을 측정한다. 인가전압이 매우 낮은 범위(정격의 약 10분의 1정도)에 이르게 되면 전동기의 속도가 탈주하여 정지하게 되는 임계점이 존재하고, 이 지점이하에서는 실험을 더 이상 진행할 수 없게 된다. Fig 6에 기계손 측정 결과를 나타내었다.

지금까지 수행한 실험 결과와 참고 문헌을 토대로 열원을 계산하였다. 열원은 코일에서 발생하는 1차 동손이 가장 큰 부분을 차지하고, 2차 동손과 철손이 주요한 열원으로 존재하게 된다. 특히 주파수가 증가함에 따라 철손은 2차 동손보다 커지고 있으며 고정자 철심부에서 발생하게되는 철손과 표류부하손을 합한 값은 30Hz부터 2차 동손보다 커지고 있다. 이는 Fig 5의 온도 분포 결과와 일치함을 보여준다. 열원 분포 결과는 Fig 7에 나타내었다.

3.3 과도상태 실험 및 결과

전동기의 과도상태 실험을 위해 두 가지 경우의 실험을 수행하였다.

- 1) case 4 : 전동기의 시동과 정지를 반복
- 2) case 5 : 정상상태까지 운전한 후 정지

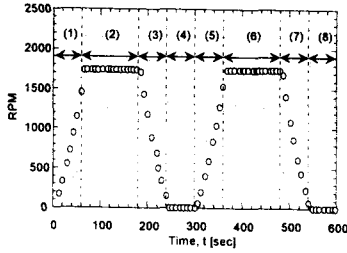


Fig 8 Operating mode (case4)

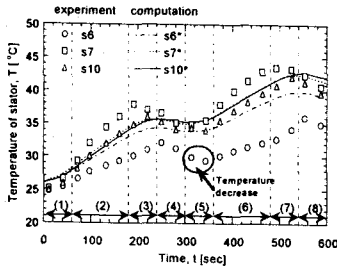


Fig 9 Temperature variation of stator(coil & endwinding) with time (case4)

전동기의 시동과 정지를 반복하는 실험은 가속, 정속, 감속, 정지 상태를 두 번에 걸쳐 반복하였다. Fig 8은 동작 모드를 설명하여 주는 것으로서 (1), (5)는 가속 구간, (2), (6)은 정속 구간, (3), (7)은 감속 구간, (4), (8)은 정지 구간이다. 가속, 감속, 정지 구간은 모두 1분간이며, 정속 구간은 2분으로 했다.

감속 구간을 보면 국지적으로 온도가 역전되는 현상이 발생한다. 엔드와인딩의 경우 회전자 핀의 회전에 의해 냉각효과가 증대되나 회전 속도가 감소함에 따라 냉각효과가 줄어들고 오히려 온도가 증가하는 모습을 보이고 있다. 이는 회전자 핀이 팬(fan)으로서의 중요한 역할을 하고있음을 말해주고 있는 것으로서, Fig 9에 나타난 (5)구간(가속 구간)을 보면 엔드와인딩의 온도가 오히려 감소하는 모습을 확인할 수 있다. 수치해석 결과도 비슷한 경향을 보이고 있으나 입구 쪽 엔드와인딩 부분의 온도가 3~4°C정도 높게 나타난다. 이는 전폐회전형 유도전동기의 대류 열전달계수를 사용하였기 때문으로 생각된다.

전동기의 감속과 정지시의 상태를 좀더 알아보기 위해 전동기를 정상상태가 될 때까지 운전한 후 1분간 감속 운행한 다음 정지하였다. 전동기에 100% 부하를 걸어놓고 정상상태가 되도록 약 1시

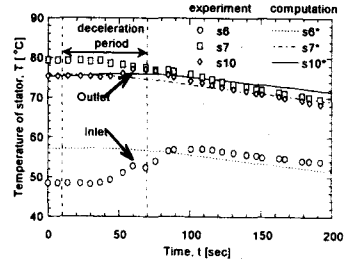
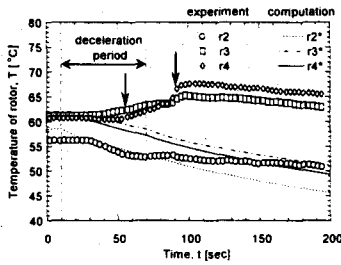


Fig 10 Temperature variation of stator with time (case5)

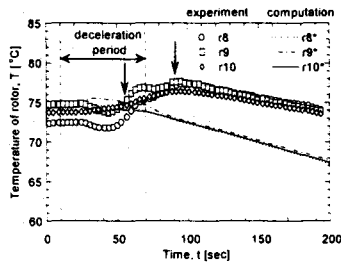
간 30분 가량 운전한 후 데이터 입력을 받기 시작한 10초 후부터 전동기를 감속하였다. 고정자 부분은 Fig 10에 나타난 바와 같이 냉각공기 입구 쪽과 출구 쪽이 다른 양상을 보인다. 입구 쪽은 감속 구간부터 온도변화가 많이 일어나고 있다. 엔드와인딩의 온도가 증가하고 있고, 특히 완전히 정지된 상태에서는 오히려 약 10°C의 상승이 있다. 그러나 출구 쪽은 감속 구간에 엔드와인딩의 온도가 약간 상승하는 정도로 그치고 있으며 정지 후에는 모두 감소하는 경향을 보이고 있다. 수치해석 결과와 비교해보면 출구 측은 비슷하나 입구 측은 온도가 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 회전자 핀의 회전속도가 줄어들때 따른 대류 열전달계수의 변화를 반영하지 못한 결과로 생각된다.

회전자 부분은 두 단계의 온도 변화가 있다. Fig 11(a)~(b)를 보면 감속 후 50초가 지난 시점과 정지 후 20초가 지난 시점에서 회전자핀과 엔드링의 온도 상승이

나타나고 있다. 이는 1740rpm으로 회전하다가 회전 속도가 감소하고 결국 정지함으로써 대류에 의한 냉각이 나빠졌음을 보여준다. 그러나 수치해석 결과를 보면 그 변화를 반영하지 못하고 시간이 지남에 따라 온도는 계속 감소하고 있다. 즉 변속과 정지가 계속적으로 이루어지는 전동기의 비정상상태 열해석을 위해서는, 회전수에 따른 엔드와인딩 주위 및 회전자 핀 주위의 대류 열전달계수에 대한 연구가 좀 더 진행되어야 할 것이다.



(a) inlet



(b) outlet

Fig 11 Temperature variation of rotor with time (case5)

4. 결론

열원측정실험을 통해 저주파수에서 시동전류에 의한 손실이 크다는 것을 확인할 수 있었으며, 인버터의 각 주파수별 열원분포를 구할 수 있었다. 과도상태실험에서는 시동과 정지 시의 열적 변화를 살펴보았다. 시동 시에는 비록 많은 입력전류가 필요하지만 극히 짧은 시간동안 흐르며 전동기의 큰 열용량에 의해 온도상승이 억제된다. 하지만 정지 시에는 팬 역할을 해주는 회전자 핀의 회전속도가 감소함에 따라 냉각효과가 급격히 줄어들어 엔드와인딩의 온도상승이 크게 일어나게 되었다. 또한 회전수 감소에 대한 영향이 열회로망 해석에 반영되지 못하여 차이를 보였으며, 앞으로 연구되어야 할 문제이다.

참고 문헌

(1) Maier, F., 1966, "Temperature Rise fo Traction Motors under Non-steady Operation Condition," The Brown Boveri Review, Vol. 53, No. 9, pp.

574-589.

(2) Mellor, P. H., Roberts, D., and Turner, D. R., 1991, "Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines of TEFC Design," IEEE Proceedings-B, Vol. 138, No. 5, pp. 205-218.

(3) 윤명근, 1997, "소형 전폐형 유도전동기의 열전달 특성에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교 대학원.

(4) 하경표, 1999, "축방향 냉각통로를 갖는 유도전동기에 대한 포괄적 열해석," 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.

(5) 정진수, 1998, "3차원 물체의 적외선화상 모사를 위한 형상생성기법과 열등가회로의 적용," 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.

(6) Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1990, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

(7) Kays, W. M., and Crawford, M. E., 1993, Convective Heat and Mass Transfer, 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York.

(8) Morris, W. D., 1981, Heat Transfer and Fluid Flow in Rotating Coolant Channel, Research Studies Press, Great Britain.

(9) Hay, N., Lampard, D., Pickering, S. J., and Roylance, T. F., 1993, "Convection Heat Transfer Correlation Relevant to Cooling Situation in Electric Motor," ASME Paper No.93-WA/HT-18

(10) 하경표, 1995, "Telemetry System의 개발을 통한 회전체의 온도측정에 관한 연구," 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.