

전동기 열해석 기술

장기찬*, 방덕제**, 강도현*

*연구소 선임연구원, **한국전기연구

1. 서 론

전동기는 전기에너지를 기계에너지로 변환하는 기기로서 자계와 전류사이의 로렌쯔(Lorentz) 힘을 이용하여 회전력을 발생한다. 전동기에서 회전력을 얻기 위하여 필히 자계와 전류가 공존해야 하며 일반적으로 강자성체로 구성된 철심을 자로하여 자계를 형성하고, 도체로 권선을 구성하여 전류를 형성한다. 따라서 전동기에서는 철손과 동손이 발생하여 전동기의 내부 온도상승의 원인이 된다. 전동기 내부에서 발생한 열량은 열전달을 통하여 전동기 표면으로부터 방출되고 내부 발생열량과 표면의 방출열량이 서로 같을 때 기기의 온도상승은 정지한다.

소형전동기에서는 용량에 비하여 비교적 기기표면적이 넓어 온도상승은 큰 문제가 되지 않지만 중·대용량 전동기에서는 비교적 기기표면적이 적어 온도상승이 문제가 되어 별도의 냉각장치를 갖고 있다. 최근 전동기의 제조원가 절감과 이용환경의 제약으로 인한 소형·경량화 추세에 의하여 전동기 표면적이 감소하여 온도상승이 중요한 문제로 대두되어 냉각장치를 포함한 전동기 열해석 기술을 요구하고 있다.

전동기는 철, 동 뿐만아니라 수 종의 절연물을 포함하고 있어 기기의 온도상승을 정확히 계산하기 곤란하여 과거에는 열전달 기본식에 실험적인 요소를 고려하여 전동기의 온도상승을 예측하였다.^[1] 최근 컴퓨터의 발전과 수치해석 기법의 진보로 인하여 전동기를 요소로 분할하여 등가저항법과 유한요소해석법으로 전동기의 온도분포를 해석하고 있다.^{[2][3][4][5]} 전동기의 온도분포를 해석하는 데 가장 중요한 것은 전동기 내부 손실에 의한 열원과 전동기 표면으로부터 방출하는 열량을 정량화하는 것이다. 전동기 내부의 열원은 내부 자속밀도와 그의 주파수 그리고 도체의 전류밀도에 밀접한 관계가 있다. 그리고 전동기 표면으로부터 방

출되는 열량은 열전달계수와 관계가 있다.

본 논문에서는 전동기 내부의 열원, 열전달의 기본이론, 열전달계수 그리고 열해석 방법에 대하여 논한다.

2. 열 원

온도상승의 원인인 전동기의 손실은 철손, 동손, 기계손 등이 있으며 직접적으로 전동기의 온도를 상승시키는 손실은 철손과 동손이다.

철손은 철심내부의 자속이 시변일 때 히스테리시스손(Hysteresis loss)과 와전류손(Eddy current loss)로 구성된다.

와전류손은 철심내부에서 시변자속에 의하여 유기된 전류가 형성되어 발생한다. 와전류는 철심내부의 에너지를 소비할 뿐만 아니라 철심내부 자속을 감소시키는 현상을 초래한다. 자속 감소 현상과 와전류를 줄이기 위하여 철심을 성층하거나 철심의 저항율이 높은 자성 재료를 사용한다.

와전류손은 철심의 두께 t_w , 자속의 주파수 f , 최대자속 밀도 B_m 그리고 철심의 체적 V 에 관계된다. 따라서 자속을 정현파로 가정하면 단위체적당 와전류손 P_e 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_e = k_e f^2 B_m^2 \text{ [W/m}^3\text{]}$$

$$k_e = \frac{t_w^2 \pi^2}{4\rho_c}$$

여기서, k_e 는 철심의 종류와 크기에 따라 결정되는 상수이고, ρ_c 는 철심의 저항율이다.

히스테리시스손은 철심의 자구가 반전될 때 완전히 방향이 반대로 되지 않는 자성체의 성질에 의하여 발생한다. 때문에 자성체는 히스테리시스 현상을 갖고 그의 손실이 존

제한다. 히스테리시스손은 최대자속밀도 B_m , 자속의 주파수 f , 그리고 철심의 체적 V 에 관계되고 단위체적 당 히스테리시스손 P_h 은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_h = k_h f B_m^n \text{ [W/m}^3\text{]}$$

여기서, k_h 는 자성체의 종류와 크기에 따른 상수이고, n 은 Steinmetz 지수이며 1.5~2.5의 값을 갖는다.

자성체의 철손 P_c 은 히스테리시스손과 와전류손의 합으로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$P_c = k_h f B_m^n + k_e f^2 B_m^2$$

전동기의 동손 P_{cu} 는 도체에 전류가 흘러 주열열로 발생하는 손실이며 전동기의 계자 권선과 전기자 권선에서 주로 발생하며, 도체의 저항률 ρ_c 에 비례하고 전류밀도 J 의 제곱에 비례하며, 다음과 같은 식으로 예측할 수 있다. 고주파 전류가 인가되면 표피효과에 대한 저항증가분도 고려해야 한다.

$$P_{cu} = \rho_c J^2 \text{ [W/m}^3\text{]}$$

3. 열전달

열전달은 온도차에 의하여 일어나는 에너지의 이동이다. 하나의 물질에서나 두 물질 사이에서 온도차가 존재하면 반드시 열전달이 일어난다. 열전달은 복사, 전도, 대류에 의해 발생한다. 복사 열전도는 물체로부터 공간으로 전자파형태로 에너지를 방출하는 것이고, 전도 열전달은 물체내부에서 온도 구배가 존재할 때 그 물체를 통하여 에너지가 이동하는 것이고, 대류 열전달은 물체표면으로부터 액체나 기체로 에너지의 전달을 의미한다.

3.1 전도에 의한 열전달

전동기 내부의 손실에 의하여 발생한 열량은 전동기의 온도를 상승시키고 열에너지가 물체내부에서 표면으로 열전도에 의하여 이동한다. 단위면적당 통과한 열량을 열유속(heat flux) q_{cd} 이라 하고 열유속은 다음과 같은 Fourier 방정식으로 구할 수 있다.^[6]

$$q_{cd} = -k\Delta T = \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

여기서, k 는 열전도율이고 T 는 온도이다. 상기의 Fourier 식으로부터 미소체적당 열전도식을 유도할 수 있다. 미소체적내에서 발생하는 열량 \dot{q} 는 단위체적질량의 온도를 상승시키고 단위체적 표면적으로 이동한다. 이상의 온도상승에

대한 식을 구성하면 다음과 같고 열확산 방정식(heat diffusion equation)이라 하고 열전도 문제에서 열방정식(heat equation)이라한다.

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

여기서, ρ 는 물질의 질량밀도이고, c_p 는 그 물체의 비열을 나타낸다. 상기식에서 미소체적내의 온도 T 가 시간에 대하여 변하면 과도상태이고 변하지 않으면 정상상태라 한다.

3.2 대류에 의한 열전달

전동기에서 고체면과 기체나 액체의 냉매가 접하는 면에서 대류열전달이 발생한다. 실제 전동기의 내부 손실에 의한 열에너지는 주로 대류 열전달에 의하여 방출된다. 대류에 의해 냉각되는 표면온도를 산출하기 위해 에너지 평형을 사용하여 대류열유속 q_{cv} 는 다음과 같다.

$$q_{cv} = h_{cv} (T_w - T_\infty) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

여기서, h_{cv} 는 대류에 의한 열전달계수이고, T_w , T_∞ 는 각각 고체표면과 주위온도이다.

3.3 복사에 의한 열전달

열복사는 유한한 온도의 물질에 의하여 방사되는 에너지이다. 액체와 기체로부터 방사(radiation)가 일어날 수도 있지만 전동기의 온도상승조건하에서는 고체부분으로부터 복사만 고려하지만 실제 복사에 의한 전동기 표면에서 열에너지 방출은 미약하다. 복사장의 에너지는 전자기파(또는 광자)에 의하여 전달된다. 전도나 대류에 의한 에너지전달은 매질이 필요한 반면 복사는 그렇지 않다. 사실상 복사열전달은 진공중에서 가장 잘 이루어진다. 실제의 전동기 열해석에서 복사열유속 q_{rd} 을 정량적으로 해석하기 위하여 Stefan-Boltzmann법칙에서 방사율(emissivity) ϵ 와 주위온도를 고려한 다음식을 사용한다.

$$q_{rd} = \epsilon \sigma (T_w^4 - T_\infty^4) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

여기서, σ 는 Stefan-Boltzmann상수이다. 상기 식은 물체 표면에서 복사열 방출과 복사열 흡수사이 차에 관한 rft이다. 상기 식을 다음과 같이 복사전달계수 h_{rd} 을 사용하여 표시하면 간편해진다.

$$q_{rd} = h_{rd} (T_w - T_\infty)$$

$$h_{rd} \equiv \epsilon \sigma (T_w + T_\infty)(T_w^2 + T_\infty^2)$$

3.4 표면으로부터 열전달

전동기표면에서 열교환은 대류와 복사에 의하여 결정된

다. 따라서 대류와 복사를 고려한 열유속 q 의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q &= q_{cv} + q_{rd} \\ &= (h_{cv} + h_{rd})(T_w - T_\infty) \\ &= h(T_w - T_\infty) \end{aligned}$$

여기서 h 는 대류와 복사를 고려한 열전달계수를 나타낸다.

4. 열전달계수

4.1 무차원 파라미터

열전달계수 h 는 고체표면에서 주위의 냉매인 기체나 액체로 열에너지 교환을 결정하는 변수로서 다음의 무차원 파라미터 인 Nusselt 수 Nu , Prandtl 수 Pr , Reynold 수 Re 등으로부터 구할 수 있다.

$$Nu = \frac{hx}{k} \quad Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad Re = \frac{\rho u x}{\mu}$$

여기서, k : 열전도도, c_p : 비열, μ : 점성, ρ : 밀도, x : 거리를 나타낸다.

4.2 고정자 덕트

4.2.1 원형덕트

관 내에서의 열전달은 여러 공학분야에서 널리 연구되어 왔으며, 매끈한 원형 직선 덕트에서 열전달의 상관식은 이미 잘 확립되어 있다. 일반적인 상관식은 Dittus-Boelter에 의해 제안된 식 (4-1)과 같다.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (4-1)$$

모든 영향과 표면 거칠기를 고려한 보다 유용한 관계식은 식 (4-2)와 같으며 마찰계수 f_r 는 식 (4-3)에 의해 결정된다.

$$Nu = \frac{(f_r/8)(Re - 1000)Pr}{(1 + 12.7(f_r/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1))} \left[1 + \left(\frac{D}{L}\right)^{2/3} \right] \quad (4-2)$$

$$f_r = (1.82 \log_{10} Re - 1.64)^{-2} \quad (4-3)$$

이와 같이 매끈한 덕트에 대한 마찰계수는 식 (4-3)에 의해 구해지며 거친 관에 대한 마찰계수는 Moody 선도에서 구할 수 있다. 적층된 철심에 뚫린 전동기의 고정자 덕트의 표면이 거칠면 열전달을 향상시키게 되며 고정자 덕트의 거칠기는 적층의 punching방법과 결합의 정밀성에 좌우된다. 전동기 덕트의 거칠기를 Rao 등(1980)은 0.75mm 정도로 주장하였으며, 거칠기가 0.005~0.06mm인 경우에 식 (4-2)에 의해 계산된 Nusselt수는 그림 4.1에 나타난 바와 같이 Luke와 Rao 등(1980)에 의해 측정된 Nusselt수와 잘 일치하였다.

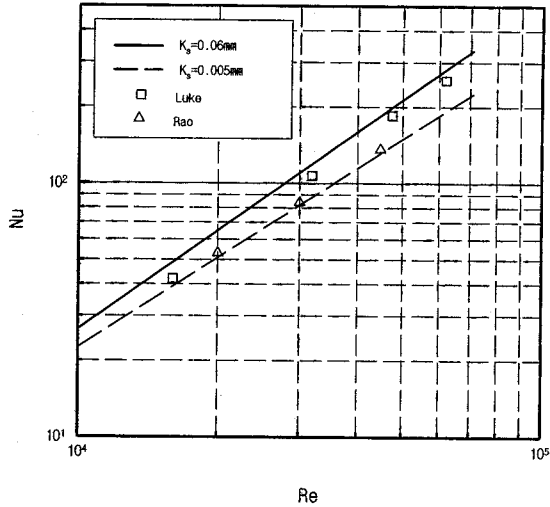


그림 4.1 Re와 Nu와의 관계

4.2.2 비원형 덕트

비원형 덕트의 직경은 수력학적으로 고려하여 식 (4-4)와 같이 정의된다.

$$D_h = \frac{4 \times \text{유동단면적}}{\text{주변길이}} = \frac{4A_c}{P} \quad (4-4)$$

사각형 덕트에 대해 정의된 수력직경 D_h 는 다음과 같이 사용된다.

$$D_i/D_h = \frac{2}{3} + \frac{11}{24} a^*(2 - a^*) \quad (4-5)$$

여기서 a^* 는 덕트의 형상비이며 $a^* = b/a$ (이때 $a > b$)이다.

4.2.3 환상형 덕트

환상형 공간은 철심을 직접 냉각하기 위해 때때로 고정자 철심과 프레임 사이에 구성되기도 하며 Schlunder(1983)는 환상형 덕트에서의 열전달 상관식을 수력직경이 동일한 원형덕트에서의 열전달의 항으로 식 (4-6)과 같이 제안하였다.

$$Nu_{fi}/Nu_{tube} = 0.86 \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{-0.16} \quad (4-6)$$

여기서 Nu_{fi} 는 환상공간 내표면으로부터 공기로의 열전달에 관계되며 d_i 와 d_o 는 환상공간의 내경과 외경이다. 환상공간 외표면으로부터의 열전달에 대해서는 식 (4-7)과 같으며 식 (4-6), (4-7)에서 Nu_{tube} 는 식 (4-2)에 의해 계산된다.

$$Nu_{fo}/Nu_{tube} = 1 - 0.14 \left(\frac{d_i}{d_o} \right)^{0.6} \quad (4-7)$$

4.3 ribbed surfaces에서의 열전달

rib 표면들 사이에서의 열전도는 널리 연구되어 왔으며 예비 설계의 관점에서 1차원 계산만으로도 충분한 정확성을 얻을 수 있다. 그리고 국부적인 온도분포에 관해서 보다 세부적으로 고려되어야 하며 이를 위해 유한요소법이 사용된다. 설계과정에서는 공기의 유동양상에 대한 지식과 전동기의 개방된(non-enclosed) rib 표면들에 대한 열전달계수가 정확히 파악되어야 한다. rib는 외부에서 전동기를 냉각하는 공기의 유동방향과 평행하다고 가정하며 rib 표면으로부터의 열유속은 식 (4-8)을 사용하여 계산한다.

$$q_f = \eta h S_f \theta_o \quad (4-8)$$

여기서 η 는 핀효율, S_f 는 rib 표면적, θ_o 는 rib 부와 공기와의 온도차, 그리고 h 는 평균열전달계수이다. rib 표면과 rib가 없는 부분에서의 총 열전달률은 식 (4-9)와 같이 정의된다.

$$q_f = (\eta S_f N + S_b) h \theta_o \quad (4-9)$$

여기서 N 은 rib의 수, S_b 는 rib사이 부분의 전체면적이며 평균 열전달계수 h 는 완전 발달된 유동에 대해 식 (4-2)를 사용하여 결정된다.

4.4 공극에서의 열전달

Kuzay(1977)는 $10^4 < Re < 10^5$ 인 경우에 대해 Nu_{fr} 를 축방향 유동만 고려한 Nu_f 에 회전파라미터 ζ 를 곱하여 식 (4-10)과 같이 제안하였다.

$$Nu_{fr} = Nu_f (1 + \zeta^2)^{0.8714} \quad (4-10)$$

4.5 slotted surfaces

대부분의 전동기 공극의 표면은 slot opening으로 인해 매끄럽지 못한 형상을 하고 있으며 그 형상이 다양하여 slot opening의 열전달에 대한 영향이 평가되어야 하지만 현재까지는 이에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 일반적으로 slot opening의 바닥이 절연되어 있고 slot 표면으로부터 전체 열전달율이 감소하더라도 slot opening은 열전달계수를 증가시킬 것이다.

4.6 회전자 덕트

회전하는 channel에서는 원심력과 코리올리의 힘(Coriolis force)이 유체유동에 작용한다. 이 두 힘들이 유체가 유동하는 방향으로 작용할 때에는 유체를 가속시키거나 감속시킬 것이다. 그리고 이 힘들이 유체 유동방향의 수직으로 작용

하게 되면 channel에서 열전달과 압력강하를 증대시키는 2차 유동이 발생하게 된다. 통풍구가 휘어져 있다면 곡률에 기인하는 추가적인 원심력이 유동에 영향을 미치고 열전달과 압력강하에 영향을 미쳐 2차 유동이 발생할 것이다. 회전하는 channel에서 압력강하의 또 다른 원인은 유동이 channel로 유입되는 지점에서 발생하며 이는 방출계수(discharge coefficient) C_d 의 형태로 표현된다. 덕트에서의 입구속도는 방향이 덕트의 축방향으로의 각도에 있기 때문에 회전은 방출계수에 영향을 미친다. 입구속도의 직교유동 성분은 덕트의 유동을 방해하며 방출계수를 감소시킨다.

4.6.1 평행 회전덕트에서 열전달에 대한 회전의 효과

전동기의 냉각시, 회전하는 덕트에서의 유동은 대부분이 난류유동이며 Morris(1981)는 원형관과 사각형관에서의 완전발달 난류유동에 대해 포괄적인 관계식을 제시하였다.

4.6.2 회전하는 분기형 사각 channel에서의 열전달

이러한 channel의 형상은 고전압 전동기의 회전자에서 나타나며 부력의 효과는 channel에서 2차 유동을 발생시키며 열전달에 영향을 미친다. 이 부분에 대한 연구는 아직 미흡하며 비회전 분기형 사각 channel에서의 열전달에 대해서는 Roberts(1969)가 연구를 수행하여 상관식을 제안하였다.

4.7 end-winding 부분에서의 열전달

전동기의 end-winding 부분에서는 공기의 유동이 fan이나 회전자 바(bar)의 돌출로 인해 교반(攪拌)되며 이러한 유동양상은 화학공업이나 교반용기의 열전달과 유사하다. 교반용기에서의 열전달에 대한 Nusselt수의 상관식은 식 (4-11)과 같으며 이때 상수 K 의 범위는 $0.3 < K < 0.75$ 이다.

$$Nu = K Re^{0.67} Pr^{0.33} \quad (4-11)$$

Oslejsek(1973)은 end-winding 표면으로부터의 열전달에 대한 Nusselt수를 실험을 통해 식 (4-12)와 같이 제안하였으며 Re 와 K_1 의 적용범위는 $25 \times 10^3 < Re < 125 \times 10^3$, $0.031 < K_1 < 0.040$ 이다.

$$Nu = K_1 Re^{0.8} \quad (4-12)$$

공기의 Prandtl수를 $Pr = 0.7$ 로 고려하고 Reynolds수를 식 (4-11)에 대입하여 얻어진 Nusselt수를 Oslejsek의 실험 결과와 비교하여 그림 4.2에 나타내었으며 실험결과 $0.3 < K < 0.5$ 인 범위의 식 (4-11)에 의한 결과와 잘 일치하였다.

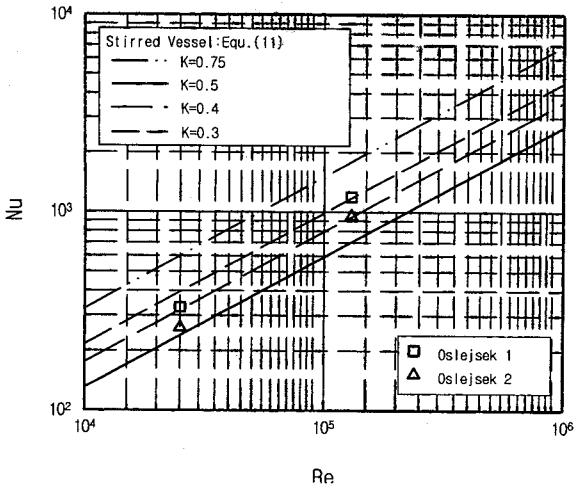


그림 4.2 Re와 Nu와의 관계

5. 전동기 열해석 기법

5.1 등가열저항법

5.1.1 등가열저항

전동기의 열해석 위하여 등가열저항을 이용할 수 있으며 각 열전달의 등가저항은 다음과 같이 정식화 된다.

$$\begin{aligned} \text{전도열저항 } R_{cd} &= \frac{L}{kA} \\ \text{대류열저항 } R_{cv} &= \frac{1}{h_{cv}A} \\ \text{복사열저항 } R_{rd} &= \frac{1}{h_{rd}A} \end{aligned} \quad (5-1)$$

여기서, L 은 길이이고 A 는 단면적이다.

5.1.2 온도해석 정식화

등가 열저항 회로망을 이용한 열해석의 기본 개념은 그림 5.1의 나타낸 일반적인 전도열전달의 경우 관심을 가진

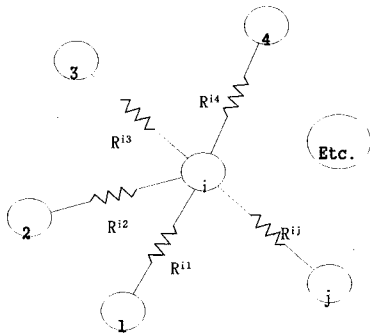


그림 5.1 일반적인 전도열전달의 절점

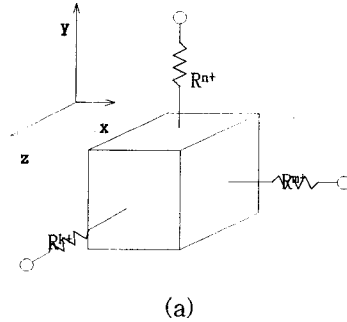
절점을 첨자 i 로 표시하고 인접한 절점을 첨자 j 로 표시하면 정상상태에서 교점 i 로 들어가는 열전달은 0이 되어야 한다. 즉, 다음과 같은 방정식을 구성할 수 있다.

$$q_i + \sum_j \frac{T_j - T_i}{R_{ij}} = 0 \quad (5-2)$$

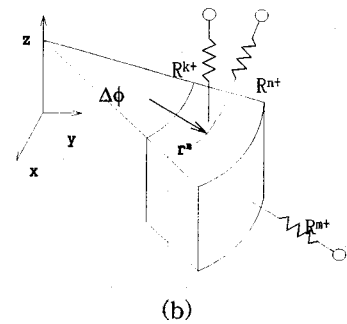
전동기를 그림 5.2에 보여진 것과 같은 미소 체적요소로 분할하여 각 요소에 대하여 등가열저항을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{n_{r+}} &= R_{(n_r+1), n_\theta, n_z} \\ R_{n_{r-}} &= R_{(n_r-1), n_\theta, n_z} \\ R_{n_{\theta+}} &= R_{n_r, (n_\theta+1), n_z} \\ R_{n_{\theta-}} &= R_{n_r, (n_\theta-1), n_z} \\ R_{n_{z+}} &= R_{n_r, n_\theta, (n_z+1)} \\ R_{n_{z-}} &= R_{n_r, n_\theta, (n_z-1)} \end{aligned}$$

그림 5.2(b)의 원통좌표계의 어느 미소체적의 주위 절점은 6개로 구성되고(식 (5-2)의 $j=6$) 해당 미소체적의 절점을 i 라 하면 등가열저항은 다음과 같다.



(a)



(b)

그림 5.2 체적 및 저항요소

$$\begin{aligned} R_{i,1} &= \frac{\Delta r_1}{(r_m - \Delta r_i/2)\Delta\theta_i \Delta z_i k} \\ R_{i,2} &= \frac{\Delta r_2}{(r_m - \Delta r_i/2)\Delta\theta_i \Delta z_i k} \end{aligned}$$

$$R_{i,3} = \frac{r_3 \Delta\theta_3}{\Delta r_i \Delta z_i}$$

$$R_{i,4} = \frac{r_4 \Delta\theta_4}{\Delta r_i \Delta z_i k}$$

$$R_{i,5} = \frac{\Delta z_5}{r_i \Delta\theta_i \Delta r_i k}$$

$$R_{i,6} = \frac{\Delta z_6}{r_i \Delta\theta_i \Delta r_i k}$$

이상과 같은 식에 의하여 전인전동기의 열해석 모델에서 모든 요소에 대한 온도의 연립방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + \dots + a_{1n_m}T_{n_m} = C_1$$

$$a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + \dots + a_{2n_m}T_{n_m} = C_2$$

$$a_{31}T_1 + a_{32}T_2 + \dots + a_{3n_m}T_{n_m} = C_3$$

$$\dots$$

$$a_{n_m1}T_1 + a_{n_m2}T_2 + \dots + a_{n_m n_m}T_{n_m} = C_{n_m}$$

상기 연립방정식을 수학기호로 간략화하면 다음 행렬식과 같다.

$$[A][T] = [C]$$

상기 식의 각 행렬은 다음과 같다.

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n_m} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n_m} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{3n_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n_m1} & a_{n_m2} & \dots & a_{n_m n_m} \end{bmatrix} \quad [C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \dots \\ C_{n_m} \end{bmatrix} \quad [T] = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \dots \\ T_{n_m} \end{bmatrix}$$

상기 식에서 온도계수 행렬인 $[A]$ 의 역행렬 $[A]^{-1}$ 을 구하면 다음 식에 의하여 각 요소의 온도 T 를 구할 수 있다.

$$[T] = [A]^{-1}[C]$$

5.2 유한요소법에 의한 열해석

유한요소법을 이용하여 전동기의 열해석을 위한 기본 열방정식은 3장에서 논한 식과 같다. 즉,

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

상기식에서 온도 T 는 공간, 시간에 대한 함수이다.

경계 Γ_1 상에서 온도는 \bar{T} 로 일정하고, 경계 Γ_2 상에서 열유속 \bar{q} 가 유출(입)하고, 경계 Γ_3 상에서 대류열전달이 있

고, 경계 Γ_4 상에서 복사열 방출이 있는 경계조건이다.

해석영역을 유한한 요소로 분할하고 요소내의 온도분포를 다음과 같다고 가정한다.

$$T(x, y, z, t) = [N(x, y, z)]\{\psi(t)\} \quad (5-3)$$

여기서 $[N]$ 은 절점온도와 요소내 온도를 결합시키는 내삽함수 행렬이고, $\{\psi\}$ 는 시각 t 에서 요소의 절점온도 vector를 나타낸다.

Galerkin 법을 이용하여 요소방정식을 유도하면 다음식과 같다.

$$[s]\{\psi\} + [c] \left\{ \frac{\partial \psi}{\partial t} \right\} = \{f\}$$

여기서,

$$[s] = \int_{\Omega} k \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) d\Omega$$

$$[c] = \int_{\Omega} \rho c_p [N]^T [N] d\Omega$$

$$\{f\} = \int_{\Omega} q [N]^T d\Omega - \int_{\Gamma} q_r [N]^T d\Gamma$$

상기 요소식을 전체 요소식으로 구성하여 행렬식을 수치해석법으로 온도를 구할 수 있다. 그림 5.3은 FEM을 이용하여 유도전동기의 회전자 열해석을 수행한 예이다.

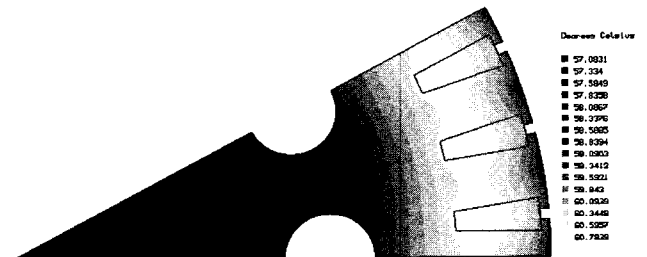


그림 5.3 FEM을 이용한 전동기 열해석 예

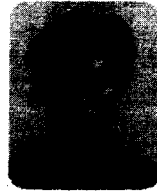
6. 결 론

본 고에서 전동기 열해석기술인 등가열저항을 이용한 유한차분법과 유한요소법에 대하여 논하였다. 현재 컴퓨터 기술의 진보와 수치해석기법의 발달로 인하여 전동기 열해석 기술 또한 많은 발전을 하였다. 전동기의 열해석의 핵심부분은 대류와 복사에 의한 열전달계수를 각 부분에 적절하게 결정하는 것이다. 즉 열전달계수는 열유체역학에서 무차원수에 의하여 결정되는데 무차원수의 결정은 필히 유동해석을 수행하여 결정되어야 한다. 따라서 현재 전동기의 열해석 기술은 CFD(Computational Fluid Dynamics)의 결과를 도입하여 실험적 연구와 병행하여 진행 중이다.

참고문헌

- [1] 廣瀬敬一, 電機設計概論, 電氣學會, p.15~28,
- [2] T. Sato, Calculation of Temperature Rise in Totally Enclosed Fan-Cooled Induction Motors, National technical Report Vol. 17 No. 4, Aug. 1971
- [3] K. W Cowan, A. J. Main, The Development of a New Range Hydrogen Cooled Generators, Electrical Machines and Drive, 11-13, Sept 1995, Conference Publication No. 412, IEE, 1995
- [4] 강도현, 홍정표, 비접촉 제동시스템 개발, 고속전철개발 보고서, 1997
- [5] 장기찬, 김남해, 이기호, 고속전철 견인전동기 열해석에 관한 연구, 대한전기학회 하계학술 논문지 A, July 1998
- [6] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Willy & Sons, 1996
- [7] J. P. Holman, "Heat transfer", 7th edition, McGraw-Hill Pubic Co., pp. 13~325, 1990.
- [8] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Introduction to heat transfer", 2nd edition, John iley & Sons Inc., pp. 1~425, 1990.

저 자 소 개



장기찬(張琪讚)

1962년 10월 20일생. 1986년 울산대 공대 전기 및 전자공학과 졸업. 1988년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년-현재 한국전기연구소 선임연구원.



방덕제(方德濟)

1971년 5월 17일생. 1996년 부경대 공대 기계설계공학과 졸업. 1998년 부경대 대학원 냉동공학과 졸업(석사) 1998년-현재 한국전기연구소 연구원



강도현(姜道鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년-1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년-1996년 독일 Braunschweig대 졸업(공학). 1989-현재 한국전기연구소 선임연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹 그룹장)