전자기 시스템의 결합문제 해석기술 동향 (II)

전동기의 열해석 기술

이양수*, 한송엽**

학연구소 연구원, **서울대 전기

1. 서 론

전동기의 열해석(thermal analysis)은 주어진 전동기의 사양이나 운전조건을 기초 데이터로 하여 전동기 각 부분의 국부적 온도값을 시뮬레이션하는 것을 말한다.

전동기의 열해석문제는 근본적으로 전자장해석문제와 결합되어 있다. 전자장해석문제는 특정값으로 가정된 온도하에서 각각의 물성치, 예를 들면 저항값, 열전도계수, 투자율 등을 입력하고 계산하였을 때, 전자기적인 특성치, 즉, 전류, 손실, 효율 등의 결과를 얻어내게 된다. 이 결과 중에 특히 손실은 열해석에 있어서 직접적으로 입력되는 값이기 때문에 이 손실값에 따라 각 부의 온도가 변하게 된다. 결국 물성치와 온도는 상호 결합되어(coupled) 있는 것이다. 전동기 각 부의 물성치는 온도에 대해 크든 작든 그 값이 변하므로, 최종적으로 계산된 온도값과 최초에 물성치를 입력할 때 가정한 온도가 대개 같지 않게 마련이다. 따라서 처음 가정한 물성치 온도로부터 출발하여 최종적으로 계산이 끝나기까지는 온도비선형 수렴과정 (temperature nonlinear iteration process, TNIP)이 필요하게 된다. 이 TNIP과정을 위해서는 기본적으로 각 물질들의 온도에 대한 정보를 미리 알고 있어야 한다. 이 정보의 형태는 데이터화일이 될 수도 있고, 또는 수식으로 주어질 수도 있다. 특정한 부분에 대해서는 이 정보가 알려지지 않을 수도 있다.

전동기의 운전상태에 따라 정상상태와 과도상태 문제로 나눌 수 있다. 전자는 전동기가 일정부하에서 일정속도로 회전하고 있어서 열적으로 평형상태를 유지하는 경우이고, 후자는 가변부하, 가변속도의 조건에서 매 순간 온도가 변하고 있는 상황에 해당한다. 본 고에서는 정상상태만을 다루기로 한다[1].

전동기의 열해석은 기본적으로 3차원문제이다. 전자장해석의 경우는 적층철심만이 자기회로의 경로이므로 축방향의 자장성분을 무시하고 2차원으로 풀 수가 있으나, 열문제에 있어서는 축방향으로의 열유속성분이 비교적 크고 전동기 내부의 모든 부분과 공기가 열경로(thermal path)를 형성하고 있기 때문에 2차원으로는 정확한 해를 구하기 어렵다. 흔히 사용되는 전동기의 열해석 방법에는 세 가지가 있는데, 집중정수법(lumped parameter method)과 분포정수법(distributed parameter method)이 있고, 이 둘을 혼합한 하이브리드법(hybrid method)이 있다. 집중정수법은 흔히 열회로망법(thermal network method, TNM)으로도 알려져 있는데, 이 방법의 장점은 전동기 전체가 계산영역이 되기 때문에 전동기의 전반적인 온도분포, 열의 흐름 등을 매우 쉽게 파악할 수 있을 뿐 아니라, 계산절점의 수나 위치를 자유롭게 선택할 수 있어서 비교적 작은 컴퓨터메모리용량과 손쉬운 전처리과정(pre-processing)을 필요로 한다. 계산시간이 빠르기 때문에 계산횟수가 많은 전동기의 설계문제에 적용시 매우 유리하다고 볼 수 있다. 분포정수법의 예로는 유한요소법(FEM), 유한차분법(FDM)을 들 수 있다. 이 방법은 국부적으로 상세한 온도를 알고자 유용한 방법으로 열응력(thermal stress)계산 등에 많이 사용된다. 다만, 요소분할(meshing)이라는 과정의 특수성 때문에 매우 많은 요소(element)가 필요한 전동기 전체의 3차원 모델링이나 또, 지나치게 좁은(thin) 해석영역을 포함하는 경우는 현실적으로 풀기가 어려워진다. 하이브리드법은 두 가지 방법의 장점을 결합한 것이다[2].

본 고에서는 열회로망법을 적용하여 강제통풍이 있는 유도전동기의 열해석에 대해 서술하고자 한다.

2. 지배방정식

직교좌표계에서 미소 검사체적(control volume)에 대한 에너지보존으로부터 다음과 같은 전도에 대한 3차원 정상

상태 열확산방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k_y\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(k_z\frac{\partial T}{\partial z})=-\dot{q} \quad (1)$$

여기서, k_x, k_y, k_z [W/m · K]는 각 방향으로의 열전도계수, $\dot{q}$ [W/m^3]는 단위체적당 열발생율, ρ[kg/m^3]는 밀도, C_p [J/kg · K]는 비열이다.

해석대상인 유도전동기를 유한한 제어체적요소로 분할하고, 하나의 제어체적내의 온도분포는 그 영역내부와 주위요소에서의 온도값으로 표현된다. 이 식을 이산화하기위하여 제어체적에 대해 적분하되 제어체적내의 온도분포를 부분선형분포로 가정하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_S T_S + a_N T_N + a_T T_T + a_B T_B + b \quad (2)$$

단, $a_E=\frac{k_e \Delta y \Delta z}{(\delta x)_e}$, $a_W=\frac{k_w \Delta y \Delta z}{(\delta x)_w}$, $a_S=\frac{k_s \Delta x \Delta z}{(\delta y)_s}$

$a_N=\frac{k_n \Delta x \Delta z}{(\delta y)_n}$, $a_T=\frac{k_t \Delta x \Delta y}{(\delta z)_t}$, $a_B=\frac{k_b \Delta x \Delta y}{(\delta z)_b}$

$a_P = a_E + a_W + a_S + a_N + a_T + a_B$

여기서 계수 a_i 들은 인접한 제어체적 절점간의 열콘덕턴스(thermal conductance)이며, 열저항의 역수이다. 이 식을 행렬식 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$[G]\{T\}=[P] \quad (3)$$

여기서, G 는 열콘덕턴스행렬[nxn], T 는 각 절점에서의 미지온도[nx1], P 는 제어체적내의 열발생량[nx1]이다.

3. 열회로망법

그림 1은 해석대상인 전동기가 주어졌을 경우, 열해석을 하기 위한 순서도이다.

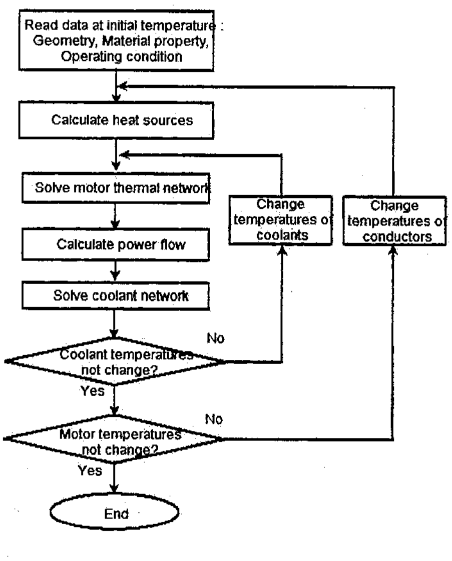
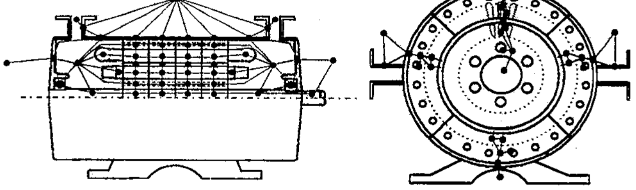


그림 1. 전동기 열해석 순서도

먼저 냉각공기의 초기온도를 가정한다. 일반적으로 냉각공기는 이동하면서 전동기의 열을 흡수하고 자신의 온도가 상승한다. 정상상태에서 냉각공기 한 입자를 추적하며 온도를 살펴보았을 경우에 입자의 온도는 계속 상승하지만, 고정된 한 지점을 지나가는 냉각공기의 온도는 정상상태에서 일정하기 때문에 이 제어체적내의 공기평균온도를 가정한 것이다. 요구사양중에서 'geometry'는 전동기의 설계도면 수준의 상세한 치수데이터를 의미하고, 'material property'는 열적 상수, 전기적 상수를 모두 포함한다. 'operating condition'은 출력이나 속도, 냉각공기의 풍량 등의 제반 가변조건의 정상상태값을 의미한다. 'heat sources'는 주어진 제어체적내에서 발생하는 손실 평균치를 말한다. 열저항과 열원에 대한 행렬을 조립한 후, 전체 전동기 열회로망을 푼다. 이 결과로는 각 절점에서 온도가 계산된다. 현재의 온도는 초기 냉각공기온도로부터 계산된 것이므로 이 냉각공기의 온도를 수정하기 위한 작업이 필요하다. 전동기 몸체(body)로부터 냉매(coolant)인 냉각공기로 흐르는 열량(power flow)을 계산하여 냉매방정식을 구성한다. 냉매방정식을 풀면 냉각공기의 온도가 계산되고 이 온도를 경계조건으로 하여 다시 전동기 열회로망을 푼다. 이 과정을 반복하여 전동기의 온도가 수렴하면 계산을 마친다.

3.1 제어체적 분할

전동기 열회로망(motor thermal network)을 구성하기 위해서는 먼저 전동기의 각 부분을 적당한 제어체적으로 분할하여야 한다. 제어체적을 잡는 방법은 두 가지가 있는데 하나는 절 점을 먼저 잡은 후 제어체적면을 각 절점 사이에 두는 것이다. 이 방법은 열플럭스를 계산할 때 유리한 점이 있다. 또 하나의 방법은 먼저 제어체적을 잡은 후 그 중심에 절점을 할당하는 것이다. 이 방법은 복합물질을 다루거나 경계조건을 처리할 때 유리하며 사용하기에도 전자보다는 훨씬 간편하다. 본 논문에서는 후자의 방법으로 제어체적 분할을 하였다. 해석영역의 경계에 인접한 제어체적을 구성할 때에는 제어체적이 그 경계점을 통과하도록 설정하면 된다. 그림 2는 유도전동기를 다수의 제어체적으로 분할한 것이다. 그림에서 고정자부분은 둘레방향으로도 4등분을 하였다.



(a) 종단면도 (b) 횡단면도

그림 2. 제어체적 분할

3.2 열저항

중심점과 인접한 점 사이에 존재하는 열저항(thermal resistance)은 전도(conduction),대류(convection) 및 복사(radiation)열저항이 있다.

먼저, 전도열저항 $R_{t,cond}$ 은 고체와 고체, 유체와 유체사이에서 열이 전달되는 정도를 나타낸 것으로 다음과 같이 정의한다.

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA} \ [\mathrm{K/W}] \tag{4}$$

여기서, A 는 열교환면적, L 은 두 제어체적절점사이의 거리, k는 열전도계수, q는 열량[W], ΔT는 온도차[K]이다.
대류열저항과 복사열저항은 각각

$$R_{t,conv} = \frac{1}{h_{conv}A} \tag{5}$$

$$R_{t,rad} = \frac{1}{h_{rad}A} \tag{6}$$

이며, 여기서 복사열전달계수 h_{rad} 은

$$h_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{sur})(T_s^2 + T_{sur}^2) \tag{7}$$

로 정의된다[3].

프레임과 철심사이, 베어링과 베어링하우징사이, 회전자바와 철심사이, 회전자철심과 축사이 등에는 접촉열저항(contact resistance)이 존재하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_{t,cont} = \frac{1}{h_{cont}A} \tag{7}$$

이 때, h_{cont}는 전동기의 경우 대략 2000~4000정도이다[4].

3.3 열전도계수

열전도계수는 전동기 각 부의 재료에 대한 물성데이터만 정확히 알고 있으면 된다. 대개의 경우는 단일물질로 이루어져 있기 때문에 별 무리가 없으나, 고정자슬롯권선이나 엔드와인딩, 적층철심 등과 같이 복합적으로 구성된 부분은 문제가 된다. 이 경우는 '등가열전도계수'라는 개념을 도입하여 처리하게 되는데, 이 부분에 대한 기존의 연구가 조금은 있으나 아직은 만족스럽게 해결되지 못한 부분이 있다[5].

3.4 열전달계수

열전달계수는 열해석 파라미터중에서 접근하기가 가장 어려운 부분인데, 그 이유는 이 계수가 매우 다양한 변수를 가진 실험상수이기 때문이다. 유체가 흐르는 관을 예로 들면, 관내의 한 표면에서의 열전달계수는 유체의 속도, 유체의 물성치, 관표면의 거칠기, 관의 형상과 치수 등에 의해 결정되기 때문에 이 값을 얻기가 여간 어렵지 않다. 대개의 경우에는 단순한 형상이나 유사한 유동조건하에서 실험으로부터 얻어진 실험식을 적절히 사용하게 된다. 고정자나 회전자에 설치된 통풍용 덕트내의 열전달계수의 경우에는 원형채널수식을 쓰면 되는데 이 경우 유속을 알아야 한다. 주어진 전동기에 대한 유속정보는 알기가 쉽지 않다. 전폐외선형유도전동기의 연구결과를 보면 외부프레임표면근처의 공기흐름이 매우 복잡한 양상을 띠고 있으며, 외부강제형타입의 경우 내부의 공기유동의 패턴은 더욱 복잡하다. 최근 국내에서는 전동기의 내부열유동해석을 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics,CFD)기법을 적용한 사례가 있고, 엔드와인딩이나 엔드캡에서의 열전달계수를 연구한 예도 있다[6]~[7].

3.5 열원

열해석을 수행하기 위해서는 열원을 알아야 한다. 열원(heat sources)이라 함은 전동기에 있어서는 흔히 손실(loss)이라고 부른다. 전동기의 손실에는 크게 동손(copper loss), 철손(iron loss), 기계손(mechanical loss), 표류부하손(stray load loss)등이 있다. 동손이라 함은 전류가 흐르는 도체에서 발생하는 주울열손실(Joule heat loss)을 의미하고, 권선에 따라 1차동손(primary copper loss), 2차동손(second copper loss)이라 부른다. 철손은 적층된 철심내에서 발생하는데 히스테리시스손(hysteresis loss)과 와전류손(eddy current loss)으로 구성된다. 기계손은 베어링에서 발생하는 마찰손(friction loss)과 공기의 교란에 소비되는 풍손(windage loss)이 있다. 표류부하손은 그 위치가 분명치 않으므로 이를 각 제어절점에 분포시키는 방법은 쉽지 않다. 문헌에 따라 차이가 있지만, 본 고에서는 고정자와 회전자의 치에 절반씩 분배하였다.

4. 냉각공기의 온도상승 계산

전동기의 형태에 따라 열해석의 접근방식이 다르다. 유도전동기를 예로 들면 전폐형(totally enclosed)과 외부강제형(externally forced)으로 나누어 볼 수 있다. 전폐형의 경우는 외부주위공기와 내부의 교란되는 공기간의 상호 이동이 없다. 이 경우는 비록 내부에서 공기가 교란된다 하더라도 내부공기의 평균온도는 거의 일정하다고 볼 수 있다. 외부강제형의 경우는 외부에서 타력으로 냉각공기(cooling air)를 전동기내부로 주입하여 이 공기가 전동기의 열을 흡수하여 외부로 배출되는 방식이다. 전동기의 통풍관 입구에서 저온의 상태로 주입된 냉각용 공기는 엔드캡이나 회전자축 고정자의 철심, 엔드와인딩 등에 부딪치면서 열을 흡수한 후, 공극사이와 고정자철심 및 회전자철심에 설치된 냉각덕트사이를 지나가면서 열을 흡수한다. 따라서 냉각공기의 온도는 상승하게 된다. 출구쪽 엔드캡 내부공간내에서 교란되면서 마지막으로 열을 흡수한 후 전동기 외부로 토출된다. 그림 3은 냉각공기가 열을 흡수하면서 온도가 상승해 가는 과정을 나타낸 그림이다.

그림에서 냉각공기가 영역 1을 지나면서 열원으로부터 P_1[W]를 흡수하여 온도가 $T_{1,end}$로 상승되어 영역 2로 들어간다. 본 논문에서는 영역내에서의 냉각공기의 온도가 선형적으로 상승한다고 가정한다. 영역의 중간지점에 절점 1을 잡고, 영역 2와 3에 대해서도 마찬가지로 절점을 잡는다.

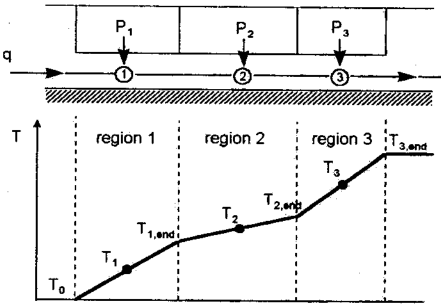


그림 3. 냉각공기의 온도상승 모델

밀도 ρ ,비열 C_p , 유량 q [m3/sec]인 냉각공기가 관(Tube)을 입구온도 T_i , 출구온도 T_o 로 통과할 때의 열전달은 일반적으로 다음의 식으로 표현된다.

$$\rho C_p q(T_o - T_i) = h\ (T_s - T_m)\ = P \qquad (9)$$

여기서, h 는 관내벽의 대류열전달계수, T_s 는 관내벽온도, T_m 은 냉각공기의 평균온도, P 는 냉각공기로 전달되는 열량[W]이다.

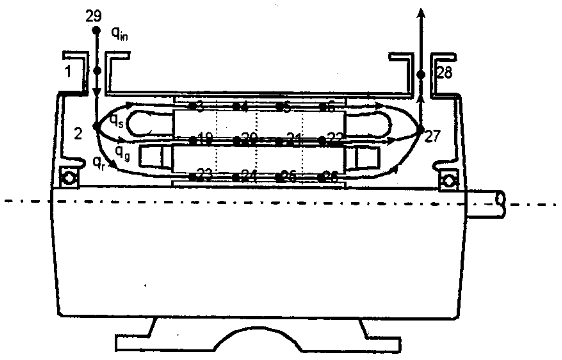


그림 4. 전동기의 냉각공기망(coolant network)

그림 4는 실제 전동기의 냉각공기망(coolant network)을 나타낸 것이고, 절점수는 29개이다. 송풍기로부터 전동기통풍관입구(T_{29})로 강제송풍된 냉각공기가 통풍관 내부(T_1)를 지나 입구측 공간(T_2)에 유입되어 고정자채널($T_3 \sim T_{18}$), 공극 및 회전자채널로 분산된다. 채널을 지난 후 출구측공간(T_{27})과 통풍관(T_{28})을 거쳐 외부대기중으로 방출된다. 이 회로에 대해 냉각공기방정식(coolant network)을 세워서 풀면 각 절점에서의 냉각공기온도가 얻어진다.

5. 사례 연구

표 1은 실험을 위해 특수제작된 유도전동기의 사양이다. 통풍용 원형덕트는 고정자철심에 지름 7mm짜리 24개와 회전자철심에 지름 10mm짜리 6개가 설치되어 있다. 그림 5는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

표 1. 전동기의 사양

마력	5	극수	4
주파수[Hz]	60	전압[V]	220
고정자외경[mm]	195	공극[mm]	0.4
고정자내경[mm]	120	축경[mm]	32
철심장[mm]	100	결선	△
병렬회로수	1	철심종류	S60
철심강판두께[mm]	0.5	절연등급	B종
고정자슬롯수	48	회전자슬롯수	40

그림 6은 통풍관을 위쪽 하나만 사용한 경우로서 유량이 0.0125[m^3/sec], 부하 95%에서 고정자권선의 축방향 온도분포를 나타낸 것이다. 냉각공기 입구쪽에 닿는 엔드와인딩의 표면온도가 가장 낮고 슬롯내에서는 서서히 높아지며 출구쪽 엔드와인딩은 냉각공기의 대류에 의해 슬롯권선보다는 낮은 경향을 보인다. 실험에서 측정된 엔드와인딩의 표면온도는 슬롯권선보다 낮으나, 중심의 온도는 더 높은 것으로 계산된다.

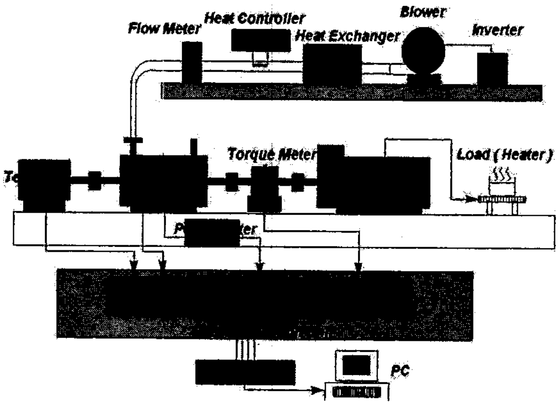


그림 5. 실험장치의 개략도

그림 7과 8은 유량의 변화에 따른 회전자의 온도변화와 냉각공기의 온도변화를 나타낸 것으로 냉각공기량이 증가할수록 온도는 낮아지고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 부하에 따른 고정자권선의 온도변화를 나타낸 것으로 부하가 증가할수록 부하전류가 증가되어 전기적 손실, 즉 열원이 증가하므로 결과적으로 온도상승이 일어난다.

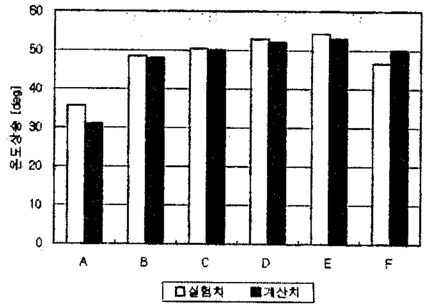
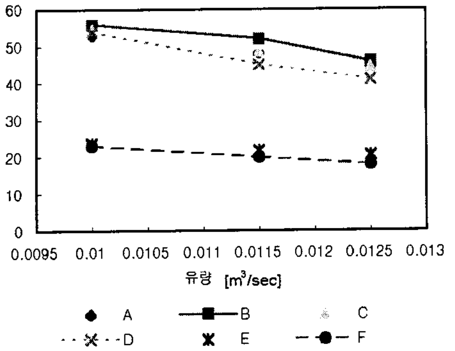
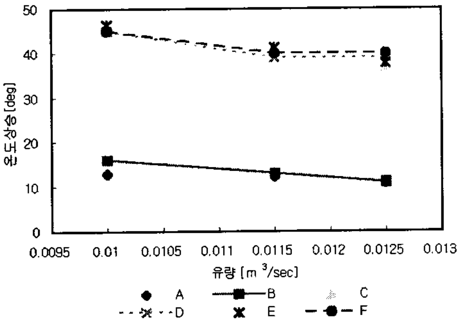


그림 6. 고정자권선의 온도분포



실험치/계산치(A/B: 프레임, C/D: 회전자중앙표면 E/F: 노출된 부하축)

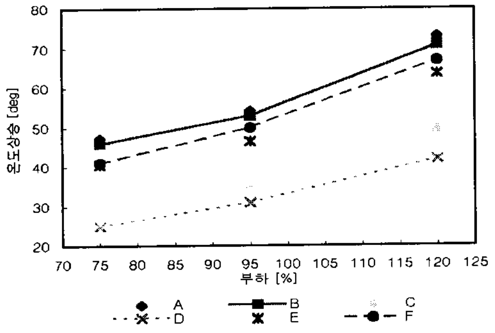
그림 7. 유량에 따른 프레임, 회전자 및 축의 온도변화



실험치/계산치(A/B:입구공간, C/D:출구공간, E/F: 최종출구)

그림 8. 유량에 따른 냉각공기의 온도변화

그림 10은 전동기 전체의 온도분포를 나타낸 것으로 좌측통풍관으로 들어온 냉각공기는 냉각용덕트와 공극을 지나 우측통풍관을 통해 배출된다. 실험치와 계산치가 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 11은 냉각공기의 온도가 초기 가정치에서 최종점이 수렴치로 변동해 가는 과정을 보여준다. 약 15회정도 냉각공기방정식과 전동기 열회로방정식을 반복하여 풀면 거의 수렴함을 알 수 있다.



실험치/계산치(A/B:슬롯권선, C/D:입구엔드와인딩, E/F: 출구엔드와인딩)

그림 9. 부하에 따른 고정자권선의 온도변화

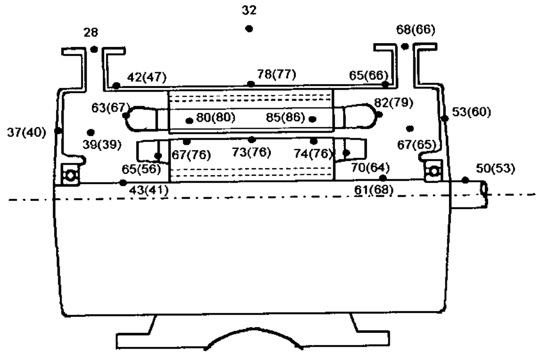


그림 10. 전동기 전체의 온도분포

(유량= 0.0125m³/sec, 부하 95%, 괄호안은 실험치)

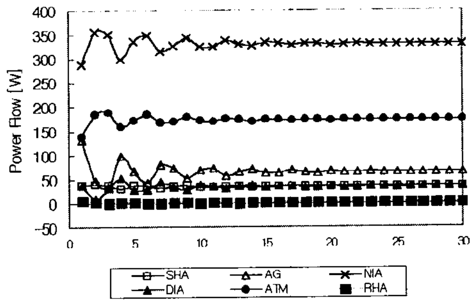
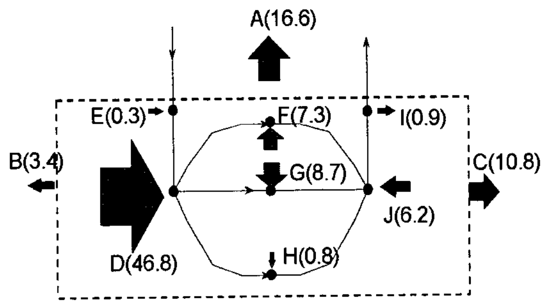


그림 11. 냉각공기의 온도수렴과정

그림 12는 실선을 통해 이동하는 냉각공기가 전동기의 열을 흡수하는 양을 나타낸 것으로, 입구측 냉각공기로의 열흐름이 대부분이고, 의외로 각 덕트로의 열흐름은 적음을 알 수 있다. 그리고 좌우의 불균형이 매우 심하므로 열적 재설계가 필요함을 알 수 있다.



A: 프레임⇒ 외기, B: 입구 엔드캡⇒ 외기
C: 출구 엔드캡⇒ 외기, D: 입구 엔드와인딩⇒내기
E: 입구 통풍관⇒ 내기, F: 고정자덕트⇒ 내기
G: 공극⇒ 내기, H: 회전자덕트⇒ 내기
I: 출구 통풍관⇒ 내기, J: 출구 엔드와인딩⇒ 내기

그림 12. 열 흐름도(기준 100%)

(점선: 전동기 표면, 실선: 냉각공기 경로)

6. 결 론

본 고에서는 전동기의 열해석을 위한 일반적인 기법을 소개하였다. 정상상태조건하에서 열회로망법을 사용하였고, 외부에서 강제송풍에 의해 전동기를 냉각시키는 방식에서 냉각공기의 온도상승계산을 위한 냉각공기망개념을 도입하였다. 전동기의 열회로망과 냉각공기망은 상호결합되어 있기 때문에 반복계산을 통해 수렴시키면 냉각공기의 온도와 전체 전동기의 온도가 계산된다.

5마력 유도전동기에 대한 온도측정실험을 통해 실험치와 계산치가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 이양수, 고정자와 회전자에 축방향 냉각채널이 있는 유도전동기의 열해석, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원, 서울, 1998

[2] Y. Liu, Y. Lee, H.K Jung, S.Y. Hahn, G.H. Lee, K.W. Kim, J.L. Kwon, D. Bae, J.I. Lee, "3D Thermal Stress Analysis of the Rotor of an Induction Motor", *The 12th COMPUMAG*, Sapporo, Japan, Oct. 25~28, 1999 (in press)

[3] Incropera and De witt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, 1990

[4] 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Review, 29권, 4호, pp.364~369, 1974

[5] T.H.Bauer, "A General analytical approach toward the thermal conductivity of porous media," IJHMT, Vol.36, No.17, pp.4181~4191, 1993

[6] 윤명근, 고상근, 이양수, 한송엽, "전폐형 유도전동기의 온도분포에 관한 수치 및 실험적 해석," 대한기계학회 논문집(B),제 21권 제 3호, pp.457~473, 1997

[7] 심대곤, 이경헌, 조남효, "견인전동기 내부 열유동해석," 대한기계학회 '98년도 유체공학부문 학술강연회 강연집, pp. 145~157

저 자 소 개

이양수(李良洙)
1968년 2월 17일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학부 졸업(공박). 1998년-현재 서울대학교 공학연구소 연구원

한송엽(韓松曄)
1939년 3월 14일생. 1963년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1967년 동대학원 졸업(석사). 1979년 불란서 로렌공과대학 대학원 졸업(공박). 1968년-현재 서울대 공대 교수. 1993년 1월-1995년 12월 대한전기학회 회장.