

냉장고 컴프레서용 단상 유도형 동기 전동기의 열 해석에 관한 연구

안한웅*, 함상환*, 조수연*, 유광현*, 오세영*, 엄석기**, 이 주*
 한양대학교 전기공학과*, 한양대학교 기계공학과**

Study on Thermal analysis of the single phase Line Start Permanent Magnet Motor for Refrigerator Compressor

Han-Woong Ahn*, Sang-Hwan Ham*, Su-Yeon Cho*, Gwang-Hyeon Ryu*, Se-Young Oh*, Suk-Kee Um**, Ju Lee*
 Department of Electrical Engineering, Hanyang University*, Division of Mechanical Engineering, Hanyang University**

Abstract - This paper presents the characteristic analysis of thermal behavior of a single-phase line-start permanent magnet motor(LSPM) for high-efficiency design. By analyzing of thermal behavior, it can consider demagnetization characteristics of permanent magnets. In addition, by calculating the allowable current density it will be able to reduce the size of the stator. For this reason single-phase LSPM is necessary to examine the thermal analysis. Thermal analysis was performed using heat source mapping, and it is verified by finite element method.

그리고 열역학 제 1법칙에 기초한 에너지 보존 방정식(Energy conservation equation)을 통하여 열 계의 특성을 알아볼 수 있다. 에너지 보존 방정식은 다음의 식 (2)와 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (u_i T) = \nabla \cdot (\alpha_k \nabla T) + S_T \quad (2)$$

여기서 T 는 절대 온도이며, α_k 는 열확산율(thermal diffusivity)로 $k/\rho c_p$ 로 나타낼 수 있다. k 는 열 전도도(thermal conductivity), c_p 는 비열을 나타낸다. 그리고 S_T 는 체적당 열원을 나타낸다.

따라서 전자계 해석을 통하여 구한 열원을 이용하여 단상 LSPM에서의 열전달 및 분포를 구해낼 수 있었다.

1. 서 론

본 논문에서는 냉장고 컴프레서용 모터로 100W급 단상 LSPM을 선정하여 연구를 진행하였다. 단상 LSPM은 회전자에 영구자석이 삽입됨에 따라 온도에 따른 영구자석의 감자 특성을 고려하기 위해 열적인 특성을 고찰할 필요성이 증대된다. 또한 고정자의 사이즈를 결정하는데 영향을 미치는 전류 밀도의 값을 결정하는 것에도 온도가 밀접한 연관성을 갖는다. 위와 같은 이유로 단상 LSPM의 열적인 특성을 검토할 필요성이 있으며 열원(heat source) 매핑(mapping)을 이용한 열 해석을 제안하여 타당성을 검증하였다.

2.3 열 해석을 위한 계수 선정

냉장고 컴프레서용 단상 LSPM의 실제 장착되는 위치 및 구동 조건에 대하여 알아보면 프레임의 표면으로 냉매 또는 공기와 같은 유체가 지나가게 되어 강제 대류가 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 경우에 대한 실험식은 Churchill과 Bernstein에 의해 Nusselt 수는 다음의 식(3)과 같은 경험적인 상수를 갖는다.[2]

2. 본 론

2.1 열 해석 플로우

열계에서는 전자계 해석의 2차원 형상을 동일한 도면으로 공유하면서 이를 z축 방향으로 확장하여 3차원으로 고려할 수 있도록 도면을 변경시키며 열 해석 역시 유한요소 해석을 위하여 영역을 요소로 나누게 된다. 그 때의 요소가 갖게 되는 좌표를 추출하여 이를 다시 전자계 해석에 보내어 각각의 좌표에서의 손실 값을 매핑하여 열전달 해석을 하는 과정으로 열 해석이 수행된다. 이를 그림 1에 나타내었다.

$$Nu_D = \frac{0.3 + 0.62Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^{\frac{1}{4}}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} \quad (3)$$

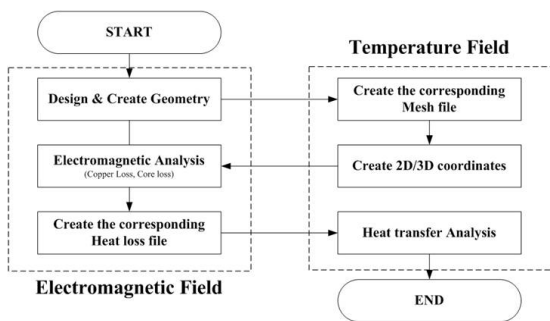
여기서 Re 는 Reynolds 수이며 Pr 은 Prandtl 수로 다음의 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Re = \frac{\rho u D_{os}}{\mu}, Pr = \frac{\nu}{\alpha_k} \quad (4)$$

여기서 u 는 속도, ν 는 동적 점성도(kinematic viscosity)를 나타낸다. 따라서 열 전달 계수(heat transfer coefficient)는 다음의 식(5)와 같이 계산할 수 있다.

$$h = \frac{Nu_D k}{D_{os}} \quad (5)$$

여기서 k 는 열 전도도(thermal conductivity)이다. 위와 같은 관계에 의해 냉장고 컴프레서의 동작 조건을 냉매 R-134a의 이동속도를 0.0508 [m/s], 주변 온도는 10[°C]로 가정하게 되었을 때의 계수값은 다음의 표 1과 같다.



<그림 1> 열원 매핑을 통한 열 특성 해석 수순

2.2 열계의 수학적인 해석

열 계의 수학적인 표현은 편미분 방정식으로 표현될 수 있다. 계의 유체 움직임에 대한 수학적인 표현으로 나타낸 것이 Navier-Stokes 방정식이다.[1]

$$\frac{\partial (\rho \vec{u}_i)}{\partial t} + \rho (\vec{u}_i \cdot \nabla) \vec{u}_i = \mu \nabla^2 \vec{u}_i + S_u \quad (1)$$

여기서 ρ 는 밀도, μ 는 유체의 역학점도(dynamic viscosity), \vec{u}_i 는 속도, 그리고 S_u 는 압력이나 중력 등과 같은 힘의 소스의 밀도값을 나타낸다.

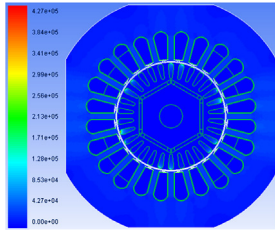
<표 1> 강제 대류 조건 하에서의 열전달 계수(R-134a, 기포, 10°C)

Pr [-]	Re [-]	Nu_D [-]	u_i [m/s]	h [W/m ² ·K]
0.655	13234.18	60.696	0.0508	6.786

2.4 정격 부하 조건 하에서의 열 특성 해석

전자계 해석을 통하여 계산된 전기가 한 주기 동안의 손실의 평균값을 Ansys사의 fluent를 이용하여 매핑한 결과는 다음의 그림 2와 같다. 주권선과 보조권선의 손실량이 없다고 나오는 것은 고정자, 회전자, 영구자석 그리고 농형바에 대해서만 매핑을 수행하였기 때문이며 고정자 주권선과 보조권선의 손실은 따로 입력한다. LSPM의 각 부분에서의 손

실은 표 2에 나타내었다. 철손의 경우 고정자 철심에서 대부분 발생하게 되며 농형바의 끝 부분에서 국부적인 큰 손실 밀도를 보이고 있으나 절대적인 손실량은 작다. 회전자의 회전을 고려하기 위하여 회전자의 경계면에 유체의 이동에 관한 경계조건을 인가한다.



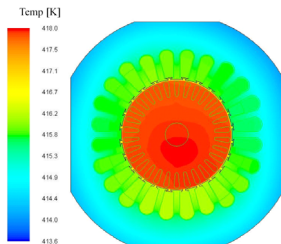
〈그림 2〉 정격 부하 조건 하에서의 열원 분포

〈표 2〉 정격 부하 조건하에서의 파트별 손실량

Stator [W]	Rotor [W]	Cage [W]	Magnet [W]	Main Winding [W]	Aux winding [W]
6.18	0.13	0.38	0.0004	3.02	2.33

2.5.1 정격 부하 조건 하에서의 2차원 열 해석

위와 같이 정격 부하 조건하에서의 열원 매핑을 통한 조건을 인가하여 2차원 열해석을 수행하면 그림 3과 같다. 2차원 해석 결과를 살펴보면 가장 높은 곳과 낮은 곳의 온도 차는 약 4.4[°C] 차이가 나게 되며 가장 높은 온도가 나는 곳은 약 145[°C] 가량으로 회전자부분이 된다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 회전자의 열이 방출될 수 있는 방향이 공극을 통하여 고정자로 나가는 방향밖에 존재하지 않기 때문이다. 하지만 실제 현상에서는 회전자 축과 전동기의 상부와 하부 단면을 이용한 방열이 일어나기 때문에 이를 적절히 고려할 수 있어야 한다. 따라서 2차원 해석으로는 정확하게 현상을 예측하기에 어려움이 따르고 이로 인해 3차원 해석을 필요로 한다.



〈그림 3〉 정격 조건 하에서의 2차원 열 해석 결과

2.5.2 정격 부하 조건 하에서의 3차원 열 해석

해석 시간의 효율적 배분을 검토하기 위하여 3차원 전체 모델이 아닌 전동기의 전기 강판의 두께 하나에 대하여 우선적인 검토를 수행하였다. 즉 0.35T의 강판 두께로 전동기를 설계한 후 열원을 매핑한 후 이를 해석하여 z축 방향으로의 열의 방산과 영향을 검토하였다.

3차원 설계에 앞서 단위 길이로 적층하는 모델에 대하여 이론적인 수렴 온도를 먼저 파악하였다. 단위 적층 모델에서의 발열량은 전체 발열량에 대하여 적층길이의 비로 나누면 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{unit} = q_{total} \times \frac{L_{unit}}{L_{stk}} = 0.09364 \text{ [W]} \quad (6)$$

여기서 q 는 전동기에서의 손실량을 나타낸다.

단위 적층 모델에 대하여 고정자 및 회전자의 상, 하부 면은 다음의 적층강판과 맞닿기 때문에 이에 대하여서는 주기적인 조건을 인가하고 대류가 일어나는 면적만을 계산한다면 대류가 일어나는 면적은 강판의 축방향 길이로 외각 평면과 회전자 축의 단면적을 고려해야 한다.

$$A_{conv} = (2 \times \pi r_{os}^2) + (\pi D_{os} L_{unit}) = 282.43 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]} \quad (7)$$

여기서 A_{conv} 은 강제 대류가 발생하는 면적이다.

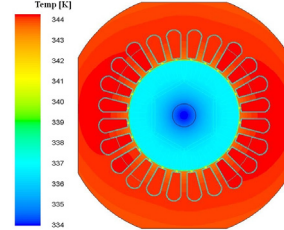
손실값에 의해 이론적인 수렴 온도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$q_{unit} = h A_{conv} (T - T_{\infty}) \quad (8)$$

$$T = T_{\infty} + \frac{q_{unit}}{hA} = 348.4 \text{ [K]} \approx 75.4 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (9)$$

여기서 T_{∞} 는 주변 온도, 또는 대기 온도로 30 [°C]의 값으로 가정하였다. 경계조건은 2차원 열전달 해석과 동일하게 인가하였다.

이에 대한 결과를 아래의 그림 4에서 나타내었다. 최대 온도가 약 71 [°C]로 2차원의 145[°C]에 비하여 약 74[°C]가 감소하게 됨을 알 수 있다. 이론적인 수렴 온도와 비교하여 약 4.4[°C] 차이가 발생하게 되는데 이는 계수의 정확도에 의한 오차라고 볼 수 있다.

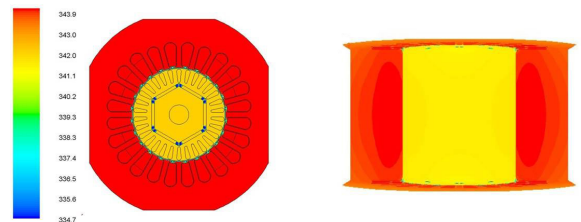


〈그림 4〉 정격 조건 하에서의 3차원 열 해석 결과 (단위 적층 모델)

전체 모델에 대한 이론적인 접근을 위하여 단위 적층 모델에 대한 이론적인 접근 방법과 동일하게 전체 모델에 대해서도 마찬가지로 수행하면 단면적의 경우 상부와 하부의 단면, 그리고 옆면 모두가 대류 조건으로 인가되기 때문에 다음의 식 (10)과 같이 계산할 수 있다.

$$A_{full} = (2 \times \pi r_{os}^2) + (\pi D_{os} L_{stk}) = 0.0396 \text{ [m}^2\text{]} \quad (10)$$

따라서 이론적인 수렴 온도는 식(9)를 이용하여 구할 수 있다. 이론적인 수렴온도는 74.7[°C]로 계산된다.



〈그림 5〉 정격 조건 하에서의 3차원 열 해석 결과 (전체 모델)

그림 5에 전체 모델에 대한 열 해석 결과를 나타내었다. 결과에서와 같이 최대 온도는 약 70.9[°C] 까지 올라가며 초기 온도에 비하여 약 40.9[°C]가 상승함을 나타내고 있다. 또한 상부와 하부로는 열이 빠져 나가기 때문에 축방향으로 중간 부분에 열이 더 높은 현상을 보인다.

3. 결 론

본 논문에서는 냉장고 컴프레서용 단상 LSPM의 열 특성 해석을 수행하였다. 열유동 해석을 위한 열원 매핑을 통하여 열 특성 해석을 수행하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법에 의해 정격 부하 조건 하에서의 2차원 모델, 3차원 단위 적층 모델과 3차원 전체 모델의 열 특성 해석 결과를 얻었다. 2차원 모델은 회전자 축 방향으로 나가는 열을 고려하지 못하기 때문에 적절하지 못하고, 3차원 단위 적층 모델은 주기조건을 주었을 때 지나치게 많은 방열면적이 발생하기 때문에 적절하지 못하다는 것을 확인 할 수 있었다. 이로 인해 열 해석에 있어서는 3차원 전체 모델이 더욱 유효할 것으로 생각된다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 부품소재기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구입니다. (No.10037020)

[참 고 문 헌]

[1] Batchelor, G. K., "An introduction to Fluid Dynamics," Cambridge University Press, 1967
 [2] S. W. Churchill, M. Bernstein, "A correlating equation for Forced Convection from gases and liquids to a circular cylinder in Cross flow," Journal of heat Transfer, pp. 300-306, 1977
 [3] 함상환, 김광수, 이중우, 양승국, 엄석기, 이주, "건인용 IPMSM의 전자기 해석 및 열해석", 2010년 대한전기학회 하계학술대회 논문집