2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

전자기와 열전달을 고려한 단상유도모터의 다분야 위상최적설계

심호경*, 문희곤*, 왕세명*, 김명균**
광주과학기술원 기전공학과*, LG 전자**

Multi-objective Topology Optimization of Single Phase Induction Motor Considering Electromangetics and Heat Transfer

Hokyung Shim*, Heegon Moon*, Semyung Wang*, Myungkyun Kim**
GIST(Gwangju Institute of Science & Technology)*, LG Electronics**

Astract - This paper presents a new approach regarding thermal characteristics associated with a design of the high efficiency motor. The adjoint variable design sensitivity equations for both electromagnetics with respect to permeability and heat transfer considering conduction and convection terms are derived using the continuum method. For multi-objective topology optimization, FEA is validated in terms of electromagnetics and heat transfer by experiments. The proposed method is applied to a single-phase induction motor of the scroll compressor in order to control the direction of heat flow by maximizing/minimizing the temperature of the target area while maintaining the efficiency.

1. 서 론

위상최적설계는 구조문제에 많은 응용을 하였으며, 상당한 성과를 이루어 왔다. 이에 반해 전자기 시스템에 대한 연구는 수년 전에 시작되었으며, 그 가능성이 점점 보여지고 있다 [1-3].

전기기기는 전자기 현상에 의해 실제로 산업 현장에서 필요한 힘이나 토크 등을 발생시키지만, 코일에 흐르는 전류에 의해서 고정자나 회전자 주위에 많은 열들이 발생하기도 한다. 이로 인해 전기기기의 시스템 성능이 저하 될 수도 있다. 다시 말해서, 열 전달 현상에 의해 시스템의 상승된 온도는 제품의 수명 단축은 물론, 전반적인 효율을 감소시키는 원인이 된다.

그리하여 본 연구에서는 모터에서 발생하는 열로 인한 손실을 줄이기 위해, 열이 외부로 잘 전달되거나 또는 특정한 곳으로 열전달이 이루어지는 동시에, 전자기적 성능을 최대화하는 최적설계를 수행하였다. 전자기와 열전달을 고려한 위상최적설계를 하기 위해 다목적함수를 이용하였다. 또한 보조 변수법(Adjoint variable method)을 사용하여 비투자율, 열전도율, 대류 열전달 계수의 물질보간함수(Material Interpolation function)와 민감도를 유도하고 계산하였다. 스크롤 압축기용 단상유도모터에 적용하여 전자기와 열전달 실험을 통하여 유한요소해석을 검증하였고, 이를 바탕으로 위상최적설계를 수행하였다.

2. 설계 민감도 식

2.1 전자기 시스템

전자기 시스템의 목적함수가 식(1)과 같을 경우, 설계 민감도 계산을 위해 보조 변수법을 도입하여 정리하면 식(2)와 같이 된다[4].

$$\psi_{EM} = \iiint_{\Omega} g(A, \nabla A, u) d\Omega \tag{1}$$

$$\psi'_{EM} = \iiint_{\Omega} [g_A A' + g_{\nabla A} \nabla A' + g_u \delta u] d\Omega = \iiint_{\Omega} g_u \delta u d\Omega + l'_{\delta u}(\lambda) - a'_{\delta u}(A, \lambda) \tag{2}$$

여기에서 A는 벡터 포텐셜, u는 투자율 μ의 설계 벡터, λ는 보조 변수이다.

정자기장(magnetostatic field)의 지배 방정식은 맥스웰 방정식들로부터 유도할 수 있으며, 벡터 포텐셜, $B = \nabla \times A$ 을 도입하면 식(3)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times A) = J_s \tag{3}$$

적분형태로 표현된 변분식을 구하기 위해서 식(3)의 양변에 가상 벡터 포텐셜을 곱한 후, 전 영역에 대해 적분하고 경계조건을 대입하면, 변분식(variational equation)을 구할 수 있다[3]. 그리하여 정자기 시스템에서의 에너지 쌍선형 형태 $a_\Omega(A, \bar{A})$와 힘 선형 형태 $l_\Omega(\bar{A})$는 식(4)와 같이 정의된다.

$$a_\Omega(A, \bar{A}) = \iiint_{\Omega} \left[(\nabla \times A) \cdot (\frac{1}{\mu} \nabla \times \bar{A}) \right] d\Omega$$
$$l_\Omega(\bar{A}) = \iiint_{\Omega} [J_s \cdot \bar{A}] d\Omega \tag{4}$$

식(2)의 설계 민감도 식과 식(4)의 에너지 변분식을 이용하면, 투자율에 대한 위상설계 민감도 는 식(5)와 같다[3].

$$\frac{\partial \psi_{EM}}{\partial \mu} = \iiint_{\Omega} \left[g_\mu + \frac{1}{\mu^2} (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times \lambda) \right] d\Omega \tag{5}$$

각 요소의 가상물질을 표현하기 위해, 투자율의 보간함수는 다음과 같이 정의된다[2].

$$\mu = \mu_0 + (\mu_0 \mu_r - \mu_0) \rho^P \tag{6}$$

여기에서 P는 벌칙상수, ρ는 물질밀도함수, μ_0 는 공기의 투자율이다.

2.2 열전달 시스템

전자기 시스템과 마찬가지로, 열전달 시스템의 목적함수를 식(6)과 같이 나타내면 식(7)과 같이 일반적인 열전달의 설계 민감도식이 된다.

$$\psi_{TH} = \iiint_{\Omega} g(T, \nabla T, v) d\Omega \tag{7}$$

$$\psi'_{TH} = \iiint_{\Omega} g_v \delta v d\Omega + l'_{\delta v}(\lambda) - a'_{\delta v}(A, \lambda) \tag{8}$$

여기에서 T는 온도이고, v는 열전도 계수(k)와 대류 열전달 계수(h_c)의 설계 벡터이다.

에너지 보존 법칙과 Fourier의 열전도 법칙으로부터 식(8)과 같은, 정상상태에서의 지배 방정식을 얻을 수 있다[5].

$$\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = -q^b \tag{9}$$

여기서 q^b는 단위부피당 발생한 열이다.

Galerkin Method를 이용하여 부분 적분을 취한 후,

경계 조건을 적용하면 식(10)과 같이 에너지 쌍선형 형태 $a_\Omega(A,\overline{A})$와 힘 선형 형태 $l_\Omega(\overline{A})$로 나타난다.

$$a_\Omega(T,\lambda)=\iiint_\Omega(k\cdot\nabla\lambda\cdot\nabla T)d\Omega+\iint_{S2}\lambda\cdot h_c\cdot Td\Gamma$$

$$l_\Omega(\lambda)=\iint_{S1}\lambda\cdot g^f d\Gamma+\iint_{S2}\lambda\cdot h_c\cdot T_b d\Gamma+\iiint_\Omega\lambda\cdot g^b d\Omega \quad (10)$$

여기서 q^f 외부에서 들어오는 열량이며, T_b는 주변 온도이다.

열전달 시스템에서는 물성치인 열전도율이 밀도함수의 변수가 될 뿐만 아니라, 설계 영역에 홀(hole)이 생김으로서 대류 항(convection term)이 달라지기 때문에 대류 열전달 계수도 고려해야 한다. 그리하여 열전도율과 대류 열전달 계수의 위상설계 민감도는 각각 식(11)과 식(12)와 같다.

$$\frac{\partial\psi_{TH}}{\partial k}=\iiint_\Omega(g_k-\nabla\lambda\cdot\nabla T)d\Omega \quad (11)$$

$$\frac{\partial\psi_{TH}}{\partial h_c}=\iiint_\Omega(g_{h_c}+\lambda\cdot T_b-\lambda\cdot T)d\Omega \quad (12)$$

대류항은 수치적으로 대각행렬로 표현되며 [6], 밀도함수로 나타내기 위해 물질보간함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$k=\rho^P k_{initial} \quad (13)$$

$$h_c=h_{c_initial}(1-\rho^{\frac{1}{P}}) \quad (14)$$

여기에서 $k_{initial}$는 초기 열전달 계수이며, $h_{c_initial}$는 초기 대류 열전달 계수이다.

3. 수치 예제

3.1 실 험

본 연구의 대상인 단상유도 모터는 60[Hz]의 상용주파수를 가진 220[V]의 입력전압을 인가하여 정격속도 3470[rpm]에서 기계적 출력 4.5[Hp]을 내는 전기기기이다. 고정자의 슬롯과 회전자의 슬롯의 조합비는 0.8이다. 실험을 수행하기 위해 그림 1과 같이 실험 장치를 구성하였다. 모터의 전자기적인 특성을 측정하기 위해 동력계(Dynamometer)를 사용하였으며, 모터에서 발생하는 열을 측정하기 위해 그림 2와 같이 21개의 온도보상권선(Thermo-couple)을 코일과 철심의 표면에 부착하였다. 사각형으로 표현된 점들은 코일에 부착된 것을, 원형으로 표현된 점들은 철심표면에 부착된 것을 가르킨다.

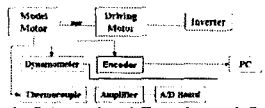


Fig. 1. Schematic of Experimental Setup

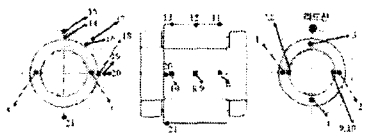


Fig. 2. Thermocouple Positions on Motor

모터의 전자기 실험 결과는 그림 3와 같이 나타났으며, 정격 속도는 3470[rpm]이며 이때 효율이 거의 최대점에 위치하는 것을 알 수 있다. 효율은 식(15)를 이용하여 전기적 입력인 입력 전압(V), 전류(I)와 역률(cosθ)에 대한 기계적 출력인 토크(T), 각주파수 성분(W)의 비로 계산할 수 있다. 모터에 절연을 파괴하지 않기 위해 최대온도가 110°C까지 측정하였으며, 이로 인해 발생된 온도의 포화 분포는 정확히 확인하지 못하였다. 가장 많은 열이 발생하는 곳은 고정자(Stator)의 엔드턴(End-turn)임을 확인하였으며, 철심을 통해 열이 전달되어 모터의 측면 표면과의 온도차가 약 20°C 정도임을 확인하였다.

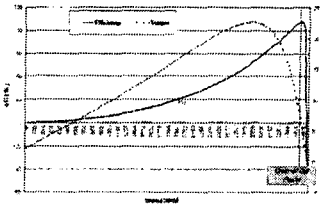


Fig. 3. Experimental Result

$$\eta=\frac{T\cdot W}{VI\cdot\cos\theta}\times 100\% \quad (15)$$

3.2 유한요소해석 및 검증

2.2.1 전자기 해석

단상유도모터는 5가지 재료로 구성 되어 있다. 회전자와 고정자의 자화강판(Poss23), 회전자 슬롯의 알루미늄, 고정자 슬롯의 코일(구리), 회전축(shaft)의 강판(S45C), 그리고 코일과 공극 사이의 공기와 공극에서의 공기이다. 이 중 자화강판은 자속밀도가 대략 2.0 [Tesla] 이상이 되면 포화가 되고, 강판은 약 1.5 [Tesla] 부근에서 포화가 되어 더 이상 증가하지 않는 비선형 특성을 가진다. 유한요소 모델을 검증하기 위해 FLUX2D를 사용하여 비선형 시변 유한요소해석을 수행하였다. 단상유도모터는 3상과는 달리 정적(Static) 또는 정상 상태(Harmonic) 유한요소해석의 정확성에 문제가 있기 때문에, 비선형 시변 유한요소 방법으로 단상유도모터의 토크 특성을 해석하였다. 정격속도인 3470[rpm] 토크 분포는 시변 상태를 거쳐 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 공극의 자속밀도는 대략 0.5~0.8[Tesla]정도로 나타났다.

그림 4에서 정상상태의 정확한 주기를 선택하여 토크와 코일에 흐르는 전류를 계산하여 실험결과와 비교하면 표 2과 같이 약 5%의 오차이내에 정확성을 가짐을 알 수 있었다.

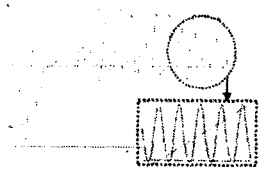


Fig. 4. Torque Profile vs. Time

Table 1 Comparison between Experiments and FEA

	Voltage [V]	Current[A] Main	Current[A] Auxiliary	Torque [N m]
Experiment at 3470rpm	220	12.2	7.3	9.0
FEA at 3470rpm	219.6	13.3	7.6	9.4
Error	-	4.7%	4.4%	4.7%

2.2.2 자계-열 해석

자계-열 해석을 수행하기 위해 2차원 단상유도모터의 형상을 구현하였으며, 4 절점(Node)로 구성된 사각형 요소(Element) 10079개로 각각의 미세 요소로 분할하였다.

단상유도모터에서 발생되는 열원에 가장 많은 영향을 주는 인자는 모터 외곽 경계를 따라 지정하는 대류 열전달 계수(Convection Coefficient)이기 때문에, 표 2과 같이 열 대류 계수 산정에 중점을 두었다. 열 전달 해석을 수행하기 위해 표 3와 같이 물성치를 부여하였다[6].

ANSYS를 이용한 유한요소모델을 검증하기 위해 정적(Static) 해석을 수행하였다. 그리하여 고정자 코일에 전류를 가하고 그 전류에 의한 동손이 줄열(Joule's

Heat)로써 열해석의 열원이 된다. 고정자의 코일과 회전자의 동바에 입력한 전류는, 실제로 FLUX2D에서 비선형 시변 해석을 통해 나온 결과를 사용하였다. 해석 결과 회전자의 온도가 상당히 높았고, 이로 인해 고정자의 열 분포가 잘 나타나지 않기 때문에, 그림 5은 철심을 통해 전도된 고정자부 열 분포만 보이고 있다. 정확한 모터의 열전달을 해석하기 위해서는 엔드턴(End-turn)을 고려한 3차원 모델링이 필수적이다. 하지만 본 연구에서는 2차원 해석을 하여, 단지 모터의 축 방향을 기준으로 중간 지점의 단면에 대한 검증을 하였다. 그 결과는 표 5와 같으며 오차는 1%이내 임을 확인하였다.

Table 2. Boundary Condition

Bulk Temperature	Convection Coefficient [W/m^2 · C]	
[· C]	Stator	Airgap
25	58	105.5

Table 3. Material Property

	Thermal Conductivity [W/m · C]			
Stator Core	Shaft	Rotor Bar	Coil	Air gap
23	63	237	390	0.0784

Table 4. Comparison between Experiments and FEA

	Temperature on coil in slot	Temperature on motor Surface
Experimental Result	89 [· C]	78 [· C]
FEA Rrult	87.5 [· C]	78.9 [· C]

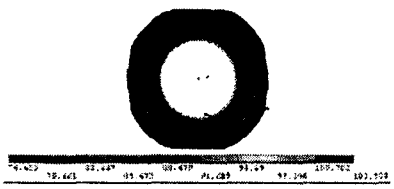


Fig. 5. Temperature Distribution

4. 다분야 위상최적설계

다분야 위상최적설계는 식(16)과 식(17)와 같이 정의된다. 다목적 함수는 자기 에너지와 절점의 온도로 구성되며, 가중치 계수 α_1과 α_2를 두어 설계자가 원하는 목적에 맞게 최적설계를 하도록 프로그램을 구현하였다. 본 연구에서는 가중치를 각각 0.5로 두어 자기에너지와 열전달의 비율을 동일하게 적용하였다.

설계 영역은 고정자(stator) 철심 중 권선이 존재하는 부분을 제외한 나머지 영역으로 지정하였으며, 구속 조건으로 초기 체적의 80% 미만이 되도록 제한하였다. 그림 6는 비선형 시변 해석을 통하여 구한 정현파 전류이며, 이 중 모터의 특성에 많은 영향을 미치는 6지점의 전류값에 대해 각각의 위상최적설계를 수행하였다.

본 연구 대상인 모터는 스크롤 압축기의 동력원으로 사용된다. 그리하여 모터에서 발생한 열을 압축기의 흡입구 반대방향으로 방출시키는 것이 효과적인 방법이기 때문에, 다목적 함수의 목표 절점을 그림 7(a)와 같이 설정하였다. 그림 6의 각 지점의 최적 위상 결과를 중첩할 경우 그림 7(b)과 같으며, 이로부터 그림 7(c)과 같은 최종 형상을 도출하였다.

$$\text{Maximize} \quad \psi = \alpha_1 \frac{\psi_{EM}}{\psi_{EM.initial}} + \alpha_2 \frac{\psi_{TH}}{\psi_{TH.initial}} \tag{16}$$

$$(\psi_{EM} = \frac{1}{2}\iint_{\Omega} B \cdot H d\Omega,\ \psi_{TH} = \text{Nodal temperature})$$

$$\text{Subject to} \quad g = \frac{\iint_{\Omega_1} \rho A t d\ \Omega_1}{0.8 V_0} - 1 \le 0 \tag{17}$$

$$\text{Bounded to } 0 \le \rho \le 1 \text{ for all } \rho \in \Omega_1$$

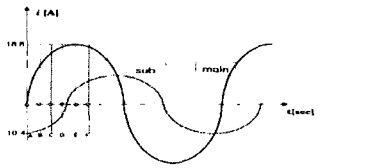
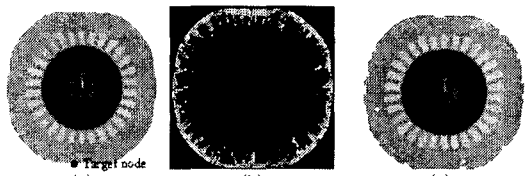


Fig. 6. Current Profile



(a) (b) (c)

Fig. 7. (a) Initial Design (b) Optimized Topology (c) Optimal Design

Table 5. Comparison between Initial and Optimal Design

	Torque [N.m]	Target node Temp [· C]	Min Temp [· C]	Max Temp [· C]
Initial	13.92	78.9	76.77	216.53
Optimal	13.73	86.3	67.57	214.96

5. 결 론

본 연구에서는 전자기와 열전달을 고려하여 전기기기의 다분야 위상최적설계 프로그램을 구축하고 스크롤 컴프레서용 단상 유도 모터에 적용하였다. 연속체방법을 사용하여 설계 민감도식을 유도하였으며, 위상최적기법을 위해 대류항의 물질보간함수를 제시하였다. 전자기와 열 실험을 수행하여 유한요소해석을 검증하였으며, 이를 바탕으로 위상최적설계를 수행하였다. 최적 형상은 회전자의 구멍과 국부적인 외곽 절단을 통해, 토크는 약간 줄었지만 원하는 방향으로 열을 방출시키는 동시에 전체적인 온도 하강효과를 확인할 수 있었다.

6. 후 기

이 연구는 한국학술진흥재단의 선도연구자지원 사업과 LG전자 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] D. N. Dyck, D. A. Lowther, "Automated Design of Magnetic Devices by Optimizing Material Distribution", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, no. 3, 1996.

[2]S. Wang, and Y. Kim, "A Study on the Topology Optimization of Electromagnetic Systems", CEFC'2000, pp. 336, 2000.

[3]S.Wang, J.Kang, J.Noh, "Topology Optimization of Induction Motor of Rotary Compressor", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 40, No. 3, pp. 1591-1596, 2004.

[4]Edward J. Haug, K. K. Choi, Vadim Komkov, 1986, Design Sensitivity Analysis of Structural Systems. ACADENIC PRESS, INC.

[5]Y. A.Cengel, 1999, Heat Transfer; A Practical Approach.

[6]ANSYS Theory Reference, ANSYS Inc., ANSYS Ver 7.0