

로터리 컴프레서용 단상 유도모터의
유한요소해석 및 위상 최적설계

강재남*, 왕세명*
광주과학기술원 기전공학과*

FEA & Topology Optimization of Single-Phase Induction Motor
for Rotary Compressor

Jenam Kang*, Semyung Wang*
Dept. of Mechatronics, K-JIST(Kwangju Institute of Science & Technology)*

Abstract - The nonlinear transient characteristic of single-phase induction motor for rotary compressor is analysed by using FLUX2D. And the topology optimization is investigated and the TOPEM (Topology Optimization for Electromagnetic Systems) is developed using the finite element method (FEM). The proposed method is validated by applying it to the topology optimizations of single-phase induction motor for reducing the oil circulation rate(OCR).

1. 서 론

본 논문에서는 크게 로터리 컴프레서용 단상 유도모터의 FLUX2D를 이용한 비선형 시변 유한요소해석과 ANSYS를 이용한 위상 최적설계(Topology)를 수행하였다. 전자기 시스템의 위상 최적 설계에 대한 연구는 수년 전에서야 비로소 시작하였는데, 그 방법은 구조 분야의 위상 최적 설계에 기초를 두고 있다. Dyck과 변진규 등이 밀도법(density method)을 이용하여 전자기 시스템의 위상 최적 설계에 대한 연구를 시작하였고, 그 가능성을 보였다 [1-2].

연속체 방법(Continuum Method)을 이용한 위상 설계 민감도 방정식이 유도되어 개발된 위상 최적설계 프로그램(TOPEM)이 현재 ANSYS의 모델에서만 민감도 계산이 가능하도록 되어있기 때문에 FLUX2D로의 해석 결과로부터 얻은 값들을 가지고 ANSYS로의 모델링을 수행하였다 [3]. 또한, TOPEM과 ANSYS로 모델링된 유한 요소 모델을 이용하여 고정자와 회전자에 대한 위상 최적설계를 수행하여 컴프레서 안에 위치한 모터의 상·하단부에서 생기는 오일 유동율(OCR)을 줄이기 위한 방법을 제시하였다. 마지막으로, 고정자의 최종 형상에 따라 직접 모터를 제작하여 모터 특성 실험을 통한 위상 최적설계 결과와의 검증을 하였다.

2. 위상설계 민감도

2.1 전자기 시스템의 설계 민감도 해석

다음과 같이 적분 형태로 표현되는 전자기 시스템의 목적 함수는 식(1)과 같다.

$$\Psi = \int \int_{\Omega} g(A, \nabla A, u) d\Omega \quad (1)$$

A는 벡터 포텐셜, $u = [u, J_s]^T$ 는 투자율과 전류 밀도의 설계 벡터이고 보조 변수에 대한 보조 방정식은 아래와 같다.

$$a_u(\lambda, \bar{\lambda}) = \int \int_{\Omega} [g_A \bar{\lambda} + g_{\nabla A} \nabla \bar{\lambda}] d\Omega \quad (2)$$

식 (1)의 목적함수의 변분식과 직접 미분 결과를 이용하면 설계 민감도는 식(3)이 된다 [4].

$$\begin{aligned} \Psi' &= \int \int_{\Omega} [g_A A' + g_{\nabla A} \nabla A' + g_u \delta u] d\Omega \\ &= \int \int_{\Omega} g_u \delta u d\Omega + \int \int_{\Omega} [g_A A' + g_{\nabla A} \nabla A'] d\Omega \quad (3) \\ &= \int \int_{\Omega} g_u \delta u d\Omega + l'_{\delta u}(\lambda) - a'_{\delta u}(A, \lambda) \end{aligned}$$

2.2 전자기의 맥스웰 방정식과 변분식

전자기장은 다음과 같은 맥스웰 방정식으로 표현된다.

$$\nabla \times H = J_s, \quad H = \frac{1}{\mu} (B - \mu_0 M), \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

여기에서 H는 자계 밀도(magnetic field intensity), J_s 는 입력 전류 밀도(current density), B는 자속 밀도(magnetic flux density), μ 는 재료의 투자율, μ_0 는 공기의 투자율이다. 여기에서 $B = \nabla \times A$ 과 식(4)에서 H를 소거하면 벡터 포텐셜에 대한 하나의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_s + \nabla \times \left(\frac{\mu_0}{\mu} M \right) \quad (5)$$

이제 적분 형태로 표현된 변분식을 구하기 위해서 식 (5)의 양변에 가상 벡터 포텐셜을 곱한 후 전 영역에 대해 적분하고 경계 조건을 대입하면, 다음과 같은 변분식(variational equation)을 구할 수 있다 [4].

$$a_Q(A, \bar{A}) = l_Q(\bar{A}) \text{ for all } \bar{A} \in \bar{X} \quad (6)$$

2.3 전자기의 위상 설계 민감도

식 (2)의 보조 방정식은 이 경우에는 $\nabla \bar{\lambda} = 0$ 이므로,

$$a_u(\lambda, \bar{\lambda}) = \int \int_{\Omega} [g_A \bar{\lambda}] d\Omega \quad (7)$$

이 된다. 만약 등가의 전류 밀도가 $J_{eq} = g_A$ 이면, 보조 변수 λ 는 식 (5)의 오른쪽 항을 $J_{eq} = g_A$ 로 바꾸었을 때의 해이다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = J_{eq} = g_A \quad (8)$$

(3)의 설계 민감도 식과 (6)의 에너지 변분식을 이용하면, 투자율에 대한 민감도 식은

$$\frac{\partial \Psi}{\partial \mu} = \int \int \int_{\Omega} \left[g_{\mu} + \frac{1}{\mu^2} (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times \lambda) - \frac{\mu_0}{\mu^2} M \cdot (\nabla \times \lambda) \right] d\Omega \quad (9)$$

이고, 전류 밀도에 대한 민감도 식은 식(10)이 된다.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial J_s} = \int \int \int_{\Omega} [g_{J_s} + \lambda] d\Omega \quad (10)$$

3. 유한요소해석

3.1 유한요소 모델링

연구 대상인 로터리 컴프레셔용 단상유도모터는 그림 3-1에서처럼 33개의 회전자 슬롯과 24개의 고정자 슬롯으로 구성되어 있다. 자속평행조건과 회전공극경계조건을 통해서 공극과 외곽을 표현했으며 고정자와 회전자(PL54)의 비선형성을 고려하여 모델링하였다. 포화자속밀도는 1.79[T]정도이다. 구동을 위한 외부회로를 구성하여 회로해석을 수행하였으며 유한요소 모델의 코일에 각각 연결시켜주었다. 또한 2D 해석에서의 취약점인 단락환(End-ring)을 저항값과 인덕턴스값으로 보정하여 모델링하였다.

3.2 시변 유한요소 해석

단상 유도모터의 특성상 정상상태의 해석에 어려움이 있으므로 해석의 정확성을 위하여 비선형을 고려한 시변 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 모든 회전속도에 대한 시변해석은 오랜 해석시간이 필요하므로 운전속도에서의 4가지 회전속도(3509, 3482, 3472, 3000rpm)에 대한 시변해석으로 타당성을 검토하였다. 그림 3-2는 3509rpm에서의 시변 토크 해석 결과를 보여준다.

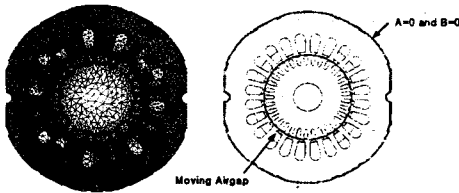


그림 3-1. 유한요소모델과 경계조건

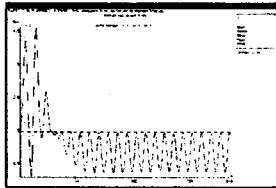


그림 3-2 3509(rpm)에서의 시변 토크해석 결과

표 3-1. 비선형 시변유한요소 해석과 실험값의 비교

회전속도 [rpm]	슬립 (Slip)	토크[N.m]		오차[%]
		해석값	실험값	
3509	0.02528	1.5155	1.5344	1.23
3482	0.03278	1.8826	1.9075	1.3
3472	0.03556	2.0260	2.0431	0.8
3000	0.1667	4.7843	4.8067	2.24

3.3 모터실험 결과와의 비교

표 3-1은 로터리 컴프레셔용 단상 유도모터의 비선형 시변 유한 요소 해석결과와 실험 결과를 비교하여 나타

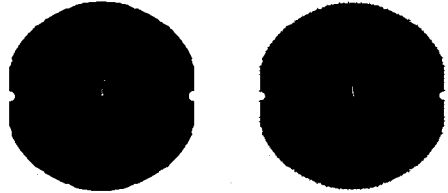
낸 것이다. 실험값과 해석 결과값과의 오차는 대략 2.5%이내에 드는 것을 볼 수 있다. 결국 FLUX2D로 모델링한 유한 요소 모델이 거의 정확한 결과를 내어주고 있음을 알 수 있다.

4. 위상 최적설계

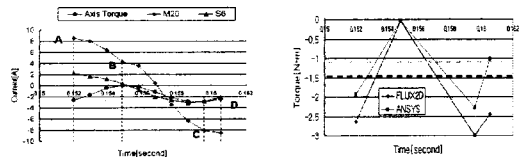
4.1 위상 최적설계를 위한 유한요소 모델 및 해석

본 논문에서 사용된 위상 최적설계 프로그램인 TOPEM은 ANSYS 환경에서 최적설계를 수행하게 만들어져 있다. 따라서, 위상 최적설계를 하기 위해서는 ANSYS로의 유한 요소 모델링이 필요하다. 하지만 단상 유도 모터는 ANSYS로 시변 해석을 하기에는 농형 유도기가 가지는 고유의 특성 때문에(Squirrel Cage 등) 모터 특성의 구현에 어려움이 있다. 결국, ANSYS로의 정자기장 유한 요소 해석을 위해 필요한 각 코일에 들어가는 전류 밀도 값들은 3509 RPM에서 FLUX2D로 구한 전류 값들을 이용해 구해냈다.

위상 최적설계를 위한 ANSYS 모델에서는 FLUX2D에서와는 달리 고정자와 회전자 등에 선형의 물성치(비투자율: 4000정도)를 사용하였다.



(가) 고정자가 설계 변수 (나) 회전자가 설계 변수
그림 4-1. ANSYS 유한 요소 모델



(가) FLUX2D 해석결과 (나) 토크 특성 비교
그림 4-2. 유한요소해석

그림 4-1은 위상 최적설계를 수행하기 위해 ANSYS로 만든 유한 요소 모델이다. FLUX2D에서와는 달리 기본적으로 사각형 요소를 가지고 격자생성을 하였고 위상 최적설계의 용이성을 위해 요소의 분포가 최대한 대칭이 되도록 하였다. 그림 4-2는 유한요소 해석결과를 나타낸다. 그림 4-2 (가)는 FLUX2D로 3509rpm에서 시변 해석을 통해 얻은 주권선(M20)과 보조권선(S6)의 전류값과 축에서 발생하는 토크를 함께 나타낸 것이고 그림 4-2 (나)는 그 중 4가지 경우에 대한 ANSYS와 FLUX2D의 토크값을 비교하여 나타낸 것이다.

4.2 고정자에 대한 위상 최적설계

본 논문에서 사용된 유도 모터는 단상이기 때문에 모터의 기동시 그림 4-3과 같은 입력 전류 파형을 가지게 된다. 여기에 사용된 입력 전류 파형은 FLUX2D를 통해 얻은 그림 4-2의 것과 일치한다. 그림 4-3에서 나타냈듯이 전류 파형은 정현파이기 때문에 t1, t2, t3, t4의 4가지 경우가 반복해서 계속 나타나게 된다. 따라서, 위상 최적설계도 아래의 4가지 경우에 대해서 수행을 하였다.

위상 최적설계를 위한 첫번째 설계 변수는 그림 4-4에서와 같이 고정자(Stator)를 택하였다. 고정자에 대

한 위상 최적설계시의 목적 함수는 공극에서의 자기 에너지이다. 그리고, 구속 조건은 초기 고정자의 부피를 80%이하로 만드는 것으로 정의하였다.

그림 4-5는 t1에 대한 위상 최적설계의 결과인데, 최종 10 iteration까지 수행하는 동안의 중간 과정을 나타낸 것이다. 그림 4-6은 t1에서 위상 최적설계가 진행되는 동안에 목적 함수(자기 에너지)의 변화 추이를 나타낸다. 여기서 자기 에너지의 초기값은 0.1773 [J/m2]이다. 결국, 최종적으로 얻어진 형상은 자기 에너지의 감소를 최소화(0.45%감소) 하면서 부피를 80%정도 줄인 것을 알 수가 있다.

그림 4-7은 t1에서부터 t4까지의 위상 최적설계 결과들을 종합하여 나타낸 것이다. 이것은 각각의 결과에서 얻은 각 요소의 밀도값(Min:0, Max:1)들을 평균을 내서 나타낸 것이다.

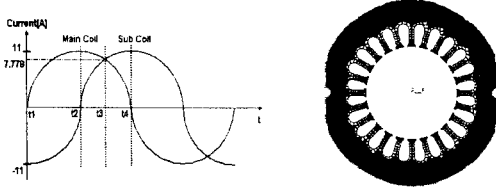


그림 4-3. 입력전류 파형 그림 4-4. 설계변수(고정자)

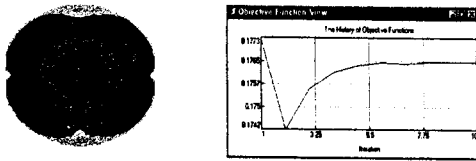


그림 4-5. 위상최적설계결과(t1) 그림 4-6. 목적함수

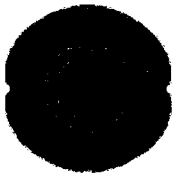
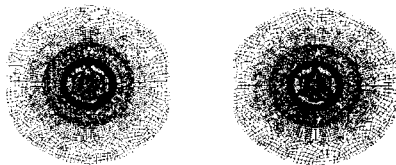


그림 4-7. 고정자의 위상 최적설계 최종결과



(가) 홈이 있을 때 (나) 홈이 없을 때
그림 4-8. 회전자의 위상 최적설계 최종결과

4.3 회전자에 대한 위상 최적설계

회전자에 대한 위상 최적설계시의 목적 함수는 고정자에서와 마찬가지로 공극에서의 자기 에너지를 최대화하는 것으로 정의하였다. 그리고, 구속 조건 중 하나는 현재의 부피의 80%이하로 만드는 것이고 나머지 하나는 회색 지표 지수를 0.2로 정의하였다.

그림 4-8은 t2에서 홈이 있을 때와 없을 때의 위상 최적설계의 결과를 나타낸 것이다. 여기서 중요한 결과는 홈이 있을 때와 없을 때의 위상 최적설계의 두 결과

가 거의 일치한다는 데에 있다. 이는 현재 생산중인 모터의 오일 유동율의 감소를 위한 방안인 3군데의 홈이 잘못되었음을 의미한다.

5. 실험결과

표 5-1에서는 고정자의 위상 최적설계 결과를 반영해 3개의 모터 단품을 직접 제작하여 모터 단품에 대한 실험과 모터를 컴프레서 안에 넣고 한 실험의 결과를 보여 주고 있다. MRT와 LRT는 각각 최대토크와 기동토크를 의미한다. 그리고 EER과 OCR은 컴프레서의 효율과 오일 유동율을 나타낸다. 형상 변경의 결과 모터 단품 자체의 효율은 0.2%정도 감소하였지만 기동 토크의 10%이상의 개선은 설계상 효율과 기동 토크의 반비례 관계성을 통해 기동 토크를 감소시키면서 효율을 개선할 수 있는 특성을 갖게 되어 부가적인 효율 개선 효과가 있는 것으로 판단된다. 또한, 컴프레서 내에서의 실험에서는 효율(EER)의 특성 변화는 거의 없었고 오일 유동율(OCR)은 기존의 것에 비해 감소가 되었다.

표 5-1. 실험 결과

sample	모터 단품 실험, Rate(%)		컴프레서 실험, Performance at 90Hz					
	MRT	LRT	Load Point		EER	OCR	RPM	Temp
			23.1	24.3				
1	-0.1	13.1	0.11	0.18	6.18	1.33	5254	115.7
2	0.2	11.1	-0.19	-0.03	6.21	1.02	5254	116.2
3	0.3	8.9	-0.24	-0.20	6.20	1.27	5254	115.8

6. 결 론

본 논문에서는 크게 로터리 컴프레서용 단상 유도 모터에 대한 비선형 시변 해석과 위상 최적설계를 수행하였다. FLUX2D로의 유한 요소 해석 결과와 실험값의 오차는 대략 2.5%이내로 만족할 만한 수준이었다. FLUX2D로의 해석 결과로부터 얻은 전류 입력값들을 가지고 최적설계를 위한 ANSYS 모델의 코일 부분에 넣어줄 입력 전류 밀도 값들을 구해 내었다. 구해진 전류 밀도 값들을 가지고 ANSYS로 정자기장 유한 요소 해석을 수행하였으며 그 결과를 FLUX2D결과와 비교하였다. 또한, ANSYS로 모델링 된 유한 요소 모델을 이용하여 고정자와 회전자에 대한 위상 최적설계를 수행하여 모터의 상·하부에서 생기는 오일 유동율을 줄이기 위한 방법을 제시하였으며, 최종적으로 고정자의 위상 최적설계를 통해 얻어진 최종 결과를 반영하여 직접 모터를 제작하여 실험을 통한 위상 최적설계 결과에 대한 검증은 하였다.

(참 고 문 헌)

- [1]Derek N. Dyck, David A. Lowther, "Automated Design of Magnetic Devices by Optimizing Material Distribution", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, no. 3, May 1996
- [2]Jin-kyu Byun, Song-yop Hahn, "Topology Optimization of Electrical Devices Using Mutual Energy and Sensitivity", INTERMAG 99, May 18-21, Kyongju, Korea
- [3]왕세명, 김용수, "전자기 시스템의 위상 최적설계", 합동춘계학술대회 논문집, pp. 65-69, 2000
- [4]S. Wang, J. Kang, "Shape Optimization of BLDC Motor 3-D Using Finite Element Method", COMPUMAG 99, pp.788-789, 1999.