

로터리 컴프레서용 단상 유도모터의 유한요소해석 및 위상 최적설계

論 文
51B-7-3

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

王世明* · 姜制男**
(Se-Myung Wang · Je-Nam Kang)

Abstract - The oil circulation rate (OCR) of the rotary compressor is a crucial factor affecting the performance and reliability of air-conditioning systems. In this paper, topology optimization of the single-phase induction motor of rotary compressor is carried out for reducing the OCR. The nonlinear transient characteristic of single-phase induction motor for rotary compressor is analyzed by using FLUX2D. The topology optimization for electromagnetic systems is developed using the finite element method (FEM). The topology optimization is applied to a single-phase induction motor for reducing the OCR. For validation, optimized induction motors are manufactured and tested.

Key Words : 단상유도모터, 오일 순환율(OCR), 위상최적설계, 유한요소법, 로터리 컴프레서

1. 서 론

로터리 컴프레서의 오일 순환율(Oil Circulation Rate, OCR)은 냉방시스템의 성능이나 수명에 영향을 주는 아주 중요한 요소이다 [1]. 그림 1에서 보여 지듯이 오일은 컴프레서 내부에서 냉각과 윤활 기능을 수행하게 된다. 하지만 컴프레서 중간에 위치한 모터의 상단부와 하단부의 압력차가 크게 되면 모터 하단부에 있는 많은 양의 오일이 압력차에 의해 상단부에 전달되며 결국 컴프레서 상단부에 달려 있는 토출부를 통해 밖으로 유출이 된다. 컴프레서의 성능 향상 및 수명 연장을 위해서는 OCR의 양을 최소화시켜야만 한다. OCR의 양을 줄이기 위해서는 모터의 상하부에서 생기는 압력차를 줄여야만 한다. 압력차를 줄이기 위해서는 모터의 고정자와 회전자에 추가적인 절단(Cut-area)이나 새로운 구멍(Vent-hole)들이 필요하다 [1].

본 논문에서는 로터리 컴프레서용 단상 유도모터의 FLUX2D를 이용한 비선형 시변 유한요소해석과 ANSYS를 이용한 위상최적설계(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 [2-3].

연속체 방법(Continuum Method)을 이용한 위상설계 민감도 방정식이 유도되었다 [4]. 개발된 위상최적설계 프로그

램(TOFEM)이 현재 ANSYS의 모델에서만 민감도 계산이 가능하도록 되어있기 때문에 (프로그램 자동화를 위한 결과 파일과 실행 파일에의 접근과 수정의 용이성) FLUX2D로의 정확한 해석 결과로부터 얻은 정보들을 이용해 ANSYS 유한요소 모델을 생성하였다. 또한, TOFEM과 ANSYS로 모델링 된 유한 요소 모델을 이용하여 고정자와 회전자에 대한 위상최적설계를 수행하여 컴프레서의 OCR을 개선하는 방법을 제시하였다. 마지막으로, 고정자의 최종 형상에 따라 실제적으로 모터 샘플을 제작하였고, 이를 가지고 모터단품 실험과 컴프레서 실험을 수행하여 위상최적설계 결과에 대한 검증을 하였다.

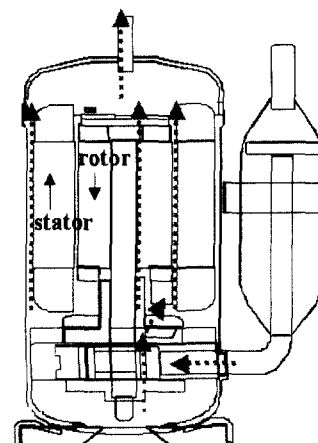


그림 1 로터리 컴프레서 내부 및 오일흐름

Fig. 1 Rotary Compressor and Oil Flow

* 正 會 員 : 光州科學技術院 機電工學科 副教授 · 工博

**正 會 員 : 光州科學技術院 機電工學科 博士課程

接受日字 : 2001年 9月 26日

最終完了 : 2002年 5月 13日

2. 위상설계 민감도

2.1 전자기 시스템의 위상설계 민감도 해석

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

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

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

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

식 (1)의 목적함수의 변분식과 직접 미분 결과를 이용하면 설계 민감도는 식(3)이 된다 [5].

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

2.2 정자기의 맥스웰 방정식과 변분식

정자기장은 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 H 는 자계 밀도(magnetic field intensity), J_s 는 입력 전류 밀도(current density), B 는 자속 밀도(magnetic flux density), μ 는 재료의 투자율, μ_0 는 공기의 투자율이다. 여기에서 $B = \nabla \times A$ 과 식(4)에서 H 를 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 [5].

$$a_{\Omega}(A, \bar{A}) = l_{\Omega}(\bar{A}) \quad \text{for all } \bar{A} \in \bar{\mathcal{A}} \quad (6)$$

2.3 정자기의 위상설계 민감도

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

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

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.

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

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

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

이고, 전류 밀도에 대한 민감도 식은 식(10)이 된다.

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

3. 유한요소해석 및 위상최적설계

3.1 유한요소해석

3.1.1 유한요소 모델링

연구 대상인 로터리 컴프레서용 단상유도모터는 그림 2에서처럼 33개의 회전자 슬롯과 24개의 고정자 슬롯으로 구성되어 있다. 그리고 그림 1의 경계조건에서 나타나듯이 모터 고정자의 외곽에는 자속평행조건을 주었고 고정자와 회전자 사이의 공극에는 회전공극경계조건(Moving airgap boundary condition)을 주어서 표현했다. 또한 고정자와 회전자(PL54)의 비선형성을 고려하여 모델링 하였다. 포화자속밀도는 1.79 [T]정도이다. 구동을 위한 외부회로를 구성하여 회로해석을 수행하였으며 유한요소 모델의 코일에 각각 연결시켜주었다. 또한 2차원 해석에서의 취약점인 단락환(End-ring)을 저항과 인덕턴스로 보정하여 모델링 하였다.

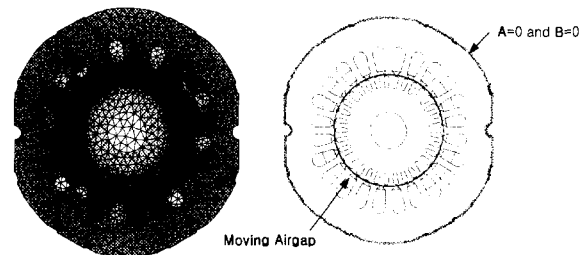


그림 2 유한요소모델과 경계조건

Fig. 2 Finite Element Model and Boundary Conditions

3.1.2 시변 유한요소 해석

단상유도모터의 특성상 정상상태의 해석에 어려움이 있으므로 해석의 정확성을 위하여 비선형을 고려한 시변 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 모든 회전속도에 대한 시변해석

은 오랜 해석시간이 필요하므로 운전속도에서의 4가지 회전속도(3509, 3482, 3472, 3000 rpm)에 대한 시변해석으로 다당성을 검토하였다. 그림 3은 3509rpm에서의 시변 토크 해석 결과를 보여준다. 토크가 음의 값을 가지는 것은 모터의 회전방향이 반시계 방향임을 나타내는 것이다.

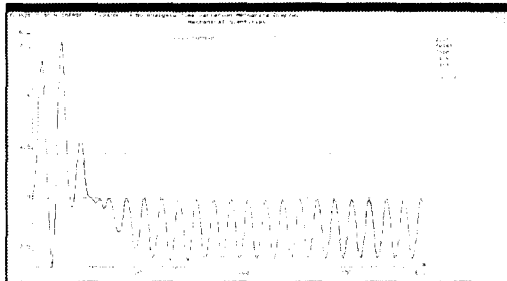


그림 3 3509[RPM]에서의 시변 토크해석 결과
Fig. 3 Result of Transient Torque Analysis at 3509 [RPM]

3.1.3 모터실험 결과와의 비교

표 1은 로터리 컴프레서용 단상 유도모터의 비선형 시변 유한 요소 해석결과와 실험 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 실험 값과 해석 결과 값과의 오차는 대략 2.5%이내에 드는 것을 볼 수 있다. 결국 FLUX2D로 모델링한 유한 요소 모델이 정확한 해석 결과를 내어주고 있음을 알 수 있다.

표 1 비선형 시변유한요소 해석과 실험값의 비교

Table 1 Comparison between Nonlinear Transient FEA and Experimental Results

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

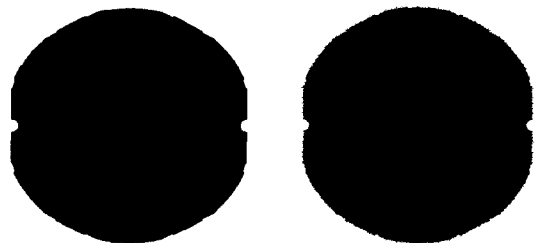
3.2 위상최적설계

3.2.1 위상최적설계를 위한 유한요소 모델링 및 해석

본 논문에 사용된 위상최적설계 프로그램인 TOFEM은 ANSYS에서 정자기장의 위상최적설계를 수행하게 만들어져 있다. 따라서, 위상최적설계를 수행하기 위해서는 ANSYS로의 유한 요소 모델링이 필요하다. 하지만 단상유도모터는 ANSYS로 시변해석을 하기에는 농형 유도기가 가지는 고유의 특성 때문에(Squirrel Cage 등) 모터 특성의 구현에 어려움이 있다. 따라서 ANSYS로의 시변해석 접근은 어렵기 때문에 FLUX2D의 결과에 최대한 근접한 ANSYS 모델을 얻기 위해 FLUX2D로 구한 시변해석 결과를 이용하여 ANSYS 모델에 필요한 정보들을 얻어내었다. 결국, ANSYS로의 정자기장 유한요소해석을 위해 필요한 각 코일에 들어가는 전류 밀도 값들은 3509 RPM에서 FLUX2D로

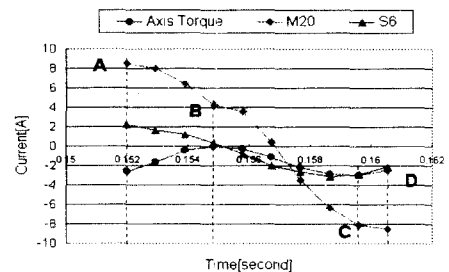
구한 전류값들을 이용해 구해내었으며, ANSYS 모델의 고정자와 회전자가 가지는 선형의 물성치(사용된 비투자율: 4000)도 FLUX2D 해석에서 최종 수렴 후에 가지는 각 요소들의 비투자율을 평균(평균해서 얻은 비투자율: 4134) 내어 사용하였다.

그림 4는 위상최적설계를 수행하기 위해 ANSYS로 만든 유한 요소 모델이다. 그림 4의 (가)는 고정자가 설계 변수일 때 사용할 모델이기 때문에 고정자 부분의 요소를 상대적으로 많이 생성하였고, 그림 4의 (나)는 회전자가 설계 변수이기 때문에 고정자 부분의 요소는 줄이고 회전자 부분의 요소를 많이 생성하였다. FLUX2D에서와는 달리 기본적으로 사각형 요소를 가지고 격자생성을 하였고 위상최적설계 결과의 대칭성을 위해 요소의 분포가 최대한 대칭이 되도록 하였다. 하지만 구조의 복잡성 때문에 완전 대칭으로 요소가 분포되지는 않았다.

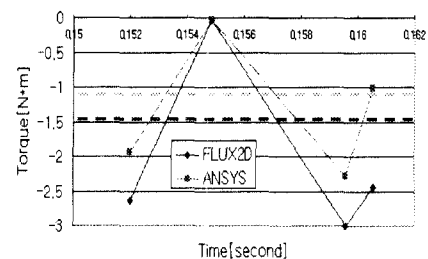


(가) 고정자가 설계 변수 (나) 회전자가 설계 변수
그림 4 ANSYS 유한 요소 모델

Fig. 4 Finite Element Model of ANSYS



(가) FLUX2D 해석결과



(나) 토크 특성 비교

그림 5 유한요소해석

Fig. 5 Finite Element Analysis

그림 5는 유한요소 해석결과를 나타낸다. 그림 5 (가)는 FLUX2D로 3509rpm에서 시변해석을 통해 얻은 주권선(M20)과 보조권선(S6)의 전류값과 축에서 발생하는 토크를

함께 나타낸 것이고, 그림 5 (나)는 그 중 4가지 경우[A(주 권선의 전류가 최대), B(토크가 최대), C(토크가 최소), D(주 권선의 전류가 최소)]에 대한 ANSYS와 FLUX2D의 토크값을 비교하여 나타낸 것이다. ANSYS와 FLUX2D 결과의 오차는 작게는 5%에서 크게는 20% 정도로 나타났지만 토크의 경향은 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있다. 결국, ANSYS로의 단상유도모터의 구현은 어느 정도 한계를 가지고 있지만 위상최적설계에 적용하기 위한 근사화된 모델을 얻을 수 있었다.

3.2.2 고정자에 대한 위상최적설계

본 논문에 사용된 유도 모터는 단상이기 때문에 모터의 기동시 그림 6과 같은 입력 전류 파형을 가지게 된다. 여기에 사용된 입력 전류 파형은 FLUX2D를 통해 얻었다.

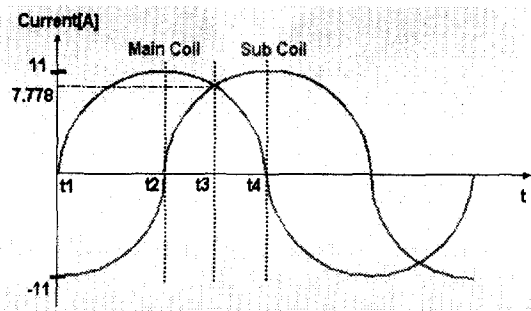


그림 6 입력전류 파형
Fig. 6 Profile of Input Current

불평형 자계를 가지는 단상유도모터의 시변해석 자체만으로도 많은 해석시간이 소요되기 때문에 시변시스템의 민감도로의 접근 방법은 그 효율 가치가 그다지 크지 않다. 따라서 본 논문에서는 정자기 시스템의 위상전개를 시변시스템으로 확장하기 위하여 정현파의 한 주기 중 몇 군데를 선택하여 그 결과를 중첩하는 방법을 사용하였다.

정현파를 가지는 모터에 대한 정자기 위상최적설계를 수행하게 되면 매 시간에 따라 각각 다른 결과를 가지기 때문에 최적화된 결과를 얻는 것이 쉽지가 않다. 그림 6에서 나타냈듯이 입력 전류 파형은 정현파이기 때문에 t1, t2, t3, t4의 4가지 경우가 반복해서 나타난다. 본 논문에서 사용한 정자기 위상최적설계는 앞에서 언급한 4가지 경우에 대해서 각각 수행하였고 그 각각의 결과를 중첩하여 최종적인 위상을 구하였다. 본 논문에서 제시된 접근 방법의 실효성을 보기 위하여 직접 모터를 제작하여 검증하여 보았다.

위상최적설계를 위한 첫번째 설계 변수는 그림 7에서와 같이 고정자(Stator)를 택하였다. 고정자에 대한 위상 최적설계의 목적 함수는 공극에서의 자기 에너지이다. 그리고, 구속 조건은 초기 고정자의 부피를 80%이하로 만드는 것으로 정의하였다.

그림 8은 t1에 대한 위상 최적설계의 결과인데, 최종 10 iteration까지 수렴하는 동안의 중간 과정을 나타낸 것이다. 그림 8의 위상최적설계 결과가 완전 대칭이 아닌 것으로 나

타난 것은 요소의 분포가 완전 대칭이 아니기 때문이다. 그림 9는 t1에서 위상 최적설계가 진행되는 동안에 목적 함수(자기 에너지)의 변화 추이를 나타낸다. 여기서 자기 에너지의 초기값은 0.1773 [J/m²]이었다. 결국, 그림 9에서와 같이 최종적으로 목적함수가 수렴한 값은 0.45%정도 감소하였지만 부피를 80%정도 줄였다. 이는 자기 에너지의 감소를 최소화하면서 부피를 20%정도 줄인 것이다.

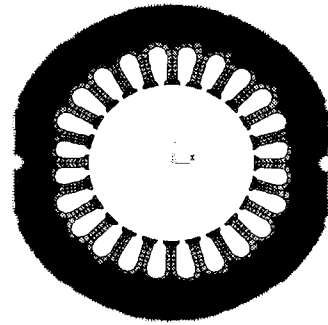


그림 7 설계변수(고정자)
Fig. 7 Design Variable (Stator)

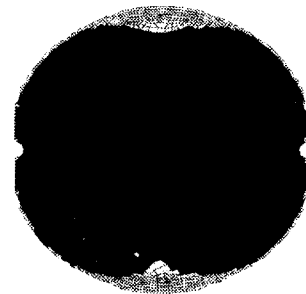


그림 8 위상최적설계결과(t1)
Fig. 8 Result of Topology Optimization at t1

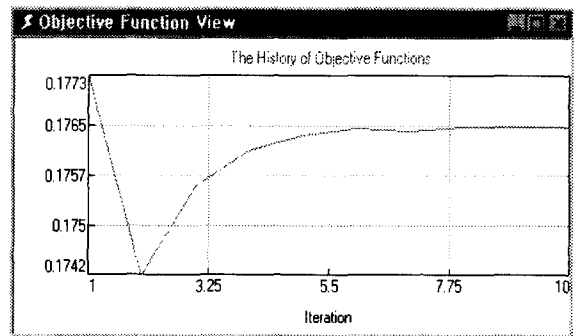


그림 9 목적함수의 변화추이(t1)
Fig. 9 History of Objective Function at t1

그림 10은 t1에서부터 t4까지의 위상최적설계 결과들을 종합하여 나타낸 것이다. 이것은 각각의 결과에서 얻은 각 요소의 밀도값(Min:0, Max:1)들을 평균을 내서 나타낸 것이다. 그림 10의 최종결과에서 요소가 가지는 색이 검정(밀도가 1에 가까움)에 가까울수록 자기 에너지에 영향을 많이

주는 것을 의미한다. 반대로 요소가 흰색을 가지면(밀도가 0에 가까움) 자기 에너지에 영향을 덜 주는 것을 의미하는 것이다. 이 결과로부터 자기 에너지의 감소를 최소화하면서 동시에 OCR을 줄이기 위해서는 상대적으로 자기 에너지에 영향을 덜 주는 부분을 없애야 된다는 것을 알 수 있다.

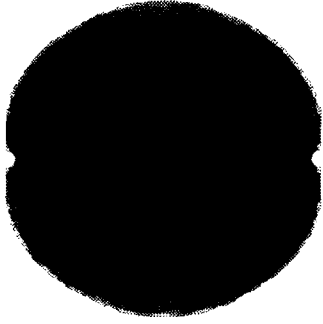
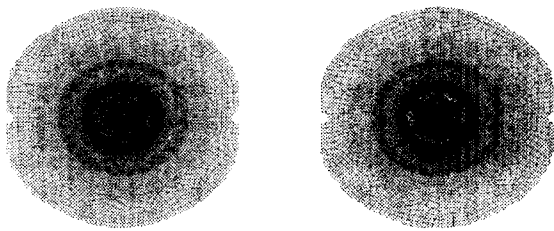


그림 10 고정자의 위상 최적설계 최종결과
Fig. 10 Final Result of Topology Optimization of Stator

3.2.3 회전자에 대한 위상 최적설계

회전자에 대한 위상 최적설계의 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 11은 t2에서 홈이 있을 때와 없을 때의 위상 최적설계의 결과를 나타낸 것이다. 그림 11에서 역시 요소 분포가 완전 대칭이 아니기 때문에 그 결과가 완전 대칭적이지 않다. 여기서 중요한 결과는 홈이 있을 때와 없을 때의 위상 최적설계의 두 결과가 거의 일치한다는 데에 있다. 이는 현재 생산중인 모터의 설계치가 잘못되었음을 의미한다.



(가) 홈이 있을 때 (나) 홈이 없을 때

그림 11 회전자의 위상 최적설계 최종결과
Fig. 11 Final Result of Topology Optimization of Rotor

3.3 실험결과

앞에서 언급한 것과 같이 컴프레서 안의 모터 상하부의 압력차를 줄여 OCR을 줄이기 위해서는 고정자와 회전자에

추가적인 절단이나 새로운 구멍들이 필요하다. 따라서 위상 최적설계 결과를 이용해 그림 12와 같이 고정자의 외곽부분을 wire-cut을 이용해 절단하였고, 그림 13과 같이 회전자에 새로운 구멍들을 생성하였다. 실험을 위해 똑같은 모터 단품을 3개 제작하였고 이를 각각 sample 1, 2, 3이라 지칭하였다.

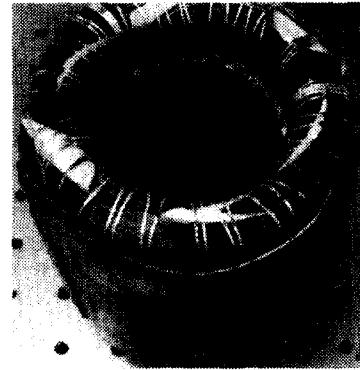


그림 12 새로 제작된 고정자
Fig. 12 New Stator

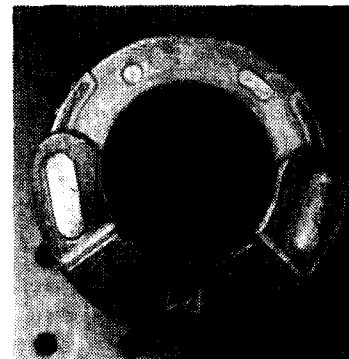


그림 13 새로 제작된 회전자
Fig. 13 New Rotor

표 2에서는 모터단품에 대한 실험과 모터를 컴프레서 안에 넣고 한 컴프레서 실험 결과를 보여주고 있다. 여기서 MRT와 LRT는 각각 모터의 최대토크와 기동토크를 의미한다. 그리고 EER과 OCR은 컴프레서의 효율과 오일 순환율을 나타낸다.

그림 12에 나타낸 고정자는 초기 모델보다 더 많은 부분을 wire-cut에 의해서 형상 변경하였기 때문에 모터 단품 자체의 효율은 표 2에서처럼 대략 0.2%정도 감소하는 결과를 나타내었다. 이는 그림 9의 위상최적설계 결과에서처럼 예상되었던 결과이다. 하지만, 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 변화

는 거의 없었고 컴프레서의 오일 순환율(OCR)은 기존의 것에 비해 30% 감소가 되었다. (감소할수록 개선된 효과가 있음)

결론적으로 위상최적설계를 통해 모터 성능의 손실(0.2%)을 최소화하면서 컴프레서의 OCR을 효과적으로 낮출 수 (30%) 있었다.

표 2 실험 결과

Table 2 Experimental Results

	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

4. 결 론

본 논문에서는 로터리 컴프레서용 단상 유도 모터에 대한 비선형 시변해석과 위상최적설계를 수행하였다. FLUX2D로의 유한 요소 해석 결과와 실험값의 오차는 대략 2.5% 이내로 만족할 만한 수준이었다. FLUX2D로의 해석 결과로부터 얻은 전류 입력값 들을 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 컴프레서의 오일 순환율(OCR)을 개선하는 방법을 제시하였으며, 최종적으로 고정자의 위상 최적설계를 통해 얻어진 최종 결과를 반영한 모터를 직접 제작하여 실험을 통해 위상최적설계 결과에 대한 검증을 하였다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] K. Min, I. Hwang, "Oil Circulation Rate in Rotary Compressor: Its Measurement and Factors Affecting the Rate", 2000 International Compressor Engineering Conference, 2000

[2] 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

[3] Jin-kyu Byun, Song-yop Hahn, "Topology Optimization of Electrical Devices Using Mutual Energy and Sensitivity", INTERMAG 99, May 18-21, Kyongju, Korea

[4] 왕세명, 김용수, "전자기 시스템의 위상 최적설계", 합동춘계학술대회 논문집, pp. 65-69, 2000

[5] S. Wang, J. Kang, "Shape Optimization of BLDC Motor 3-D Using Finite Element Method", COMPUMAG 99, pp.788-789, 1999.

저 자 소 개



왕 세 명 (王世明)

1957년 10월 1일 생. 1982년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1985년 Wayne State Univ. 기계공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Iowa 기계공학과 졸업(공학박사). 1995년~1998년 광주과학기술원 기전공과 조교수. 1999년~현재 광주과학기술원 기전공학과 부교수.

Phone: 062-970-2390.

Fax. 062-970-2384. E-mail: smwang@kjist.ac.kr



강 제 남 (姜制男)

1974년 7월 22일 생. 1997년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1999년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(석사). 1999년~현재 광주과학기술원 기전공학과 박사과정.

Phone: 062-970-2429.

E-mail: jnkang@kjist.ac.kr