

전자기 시스템의 결합문제 해석기술 동향 (Ⅲ) 전자기 시스템의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석

하경호*, 홍정표**

*공과대학 공과대학, **창원대 전기공학부

1. 서론

최근 산업사회의 고도화와 더불어 멀티미디어기기, 가전기기, 컴퓨터 주변기기, OA, FA를 위한 자동화기기 및 공장기기 등의 기능이 복잡해지고 다양해질수록 구동원으로 이용되고 있는 각종 전동기의 성능이 제품의 품질을 크게 좌우하게 된다. 특히, 제품의 품질을 결정하는 요인 중에서 진동 및 노이즈문제(전기적, 기계적)가 품질과 성능을 저하시키는 결정적인 역할을 하고 있다.

전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 전자기시스템은 우수한 자기적 특성을 가지는 자성 재료와 전동기 설계 기술의 발전과 더불어 고성능, 소형, 경량화 하는 추세에 있다. 이에 따라 단위 체적당 전자기 에너지가 커져서 진동 및 소음의 특성이 악화되고 있다.

진동의 주요 원인은 전동기의 고정자 또는 회전자에 작용하는 반경방향의 힘(radial force)이 가진력(exciting force)이 되어 전동기의 구조물을 진동시키게 되기 때문이다. 특히, 이 전자기적 가진력의 진동수가 전동기 구조물의 고유진동수(natural frequency)와 비슷한 영역에서 있으면 공진(resonance)하게 되어 부품의 마모와 전동기의 구동 성능의 저하뿐만 아니라 다른 시스템에 영향을 미치게 된다[1-5]. 따라서, 가진원동이 고유주파수에 일치하지 않도록 설계하는 것이 반드시 필요하다.

그러므로, 만족하는 구동 성능뿐만 아니라 저소음, 저진동 특성을 가지는 전동기를 설계하기 위해서는 전자기 고조파를 줄이거나 가진원의 전달경로를 차단하고 가진원의 주파수와 일치하지 않도록 자기회로 설계에 반영하는 것이다. 이를 구현하기 위해서는 전기적인 문제와 기계적인 문제를 결합한 해석 기술(coupled problem)이 필요하다[6-10].

본 논문에서는 전동기의 진동 원인 분석과 전자기적 가진력과 관련된 결합문제에 대한 연구동향에 대하여 기술하

였다. 또한, 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)를 대상으로 전자기적 흡입력에 의한 고정자의 변위를 해석하고 이론적 모달해석(고유진동수, 고유모드)을 수행하여 실험치와 비교하였다. 가진력의 추출 및 구조해석은 유한요소법을 사용하였다.

2. 진동 관련 연구 동향

1980년대 초반 Yang은 전동기를 대상으로 다양한 설계 변수들이 전동기의 전자기 특성과 기계적 구조물의 거동(behavior)에 미치는 영향을 대부분 실험적인 방법과 간단한 해석적인 방법으로 상호관계를 조사하였다[11]. 또한 Girgis와 Verma는 에너지법을 이용해 슬롯이나 권선의 영향을 해석적으로 알아보고, 여러 가지 단순화된 모형에 대한 실험을 통해 고정자의 고유진동수와 진동특성을 살펴보았다[12-13].

그러나 1980년 후반 이후 컴퓨터 성능의 향상과 측정장비의 보급으로 S. Noda는 단순화된 모형에 대한 실험과 유한요소 해석을 이용해 권선이 고정자의 고유 진동수에 미치는 영향을 살펴보았다[14]. F. kako는 가진력을 측정하여 전자기적 원인에 의한 소음에 대해 연구하였으며[15] Cameron은 VRM(Variable Reluctance Motor)을 대상으로 입력 전류를 변형시켜 소음을 줄이기 위한 연구를 하였다[1]. 이와 같이 고유진동수의 정확한 해석 방법이나 제어 방법에 의한 진동 저감에 관한 연구가 점진적으로 진행되어 왔다.

최근에는 유도전동기 및 SRM을 대상으로 전자기적 가진력의 고조파 추출 및 진동원인 분석, 전자기 가진력과 기계적 구조물의 연계 해석을 통한 진동 예측, 제어 기술에 의한 진동 저감, 진동 저감을 위한 형상 설계, 회전자와 관련한 회전체 진동, 실시간 진동 측정을 통한 고장진단 및 원

전동기의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석

인 분석 등을 다룬 논문이 많이 발표되고 있다[1-20].

그러나 국내에서는 진동 저감과 관련하여 전자기 가진력의 분석이나 제어 기법에 관한 연구 정도로 국한되어 있는 실정이다. 선진 기술에 비교하면 전기적인 문제와 기계적인 문제를 종합적으로 고려하여 전동기의 설계에 반영할 수 있는 진동저감에 대한 연구가 미흡하다.

3. 전동기의 진동 원인

전기기기가 가지는 진동의 원인은 크게 전자기적 요인, 기계적 요인, 공기역학적 요인으로 분류할 수 있으며 이들의 원인에 의한 진동 및 소음의 전달 과정을 그림 1에 나타내었다[16].

- 전자기적 요인 : 불평형 전원, 전류의 고조파 성분, 부하의 갑작스러운 변동, 공극의 불균일등.
- 기계적 요인 : 베어링의 마찰, 회전자의 불균형, 전동기 부품의 불안정한 결합등.
- 공기역학적 요인 : 치 및 슬롯 구조에 의한 공기압력변화, 냉각 팬에 의한 공기의 유동등.

진동 저감을 위해서는 다각적인 방면으로 진동의 원인을 분석하고 기계적 시스템과 전자기 시스템이 통합적으로 다루어 해석을 수행하여야한다.

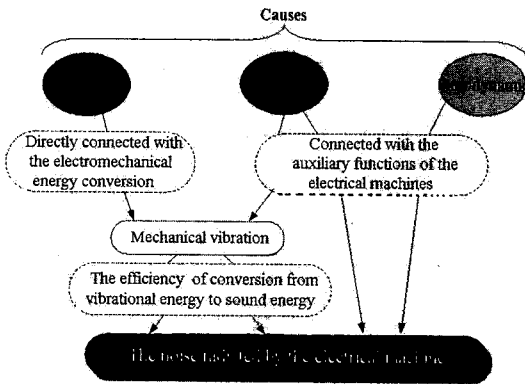


그림 1. 진동 및 소음의 발생 과정

그림 2는 여러 가지 기계적 요인에 의한 공극의 불균형이 전동기의 전자기 가진원에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 그림에서 전동기에 작용하는 전자기적 가진원은 기계적 요인과 전자기적 현상의 상호 유기적 관계로부터 발생함을 알 수 있다.

공극의 변화 상태에 따라 정적 편심과 동적 편심으로 분류할 수 있다.

- 정적 편심은 고정자의 전자기적 흡인력에 의한 고정자의 변형, 가공시 고정자 내경의 비대칭 등으로 편심량이 일정한 상태를 말한다.
- 동적 편심은 회전자가 가지는 재료의 비동질성, 가공 또는 조립오차로 인하여 시간과 위치의 함수로 편심량이 일정하지 않는 상태를 말한다.

이러한 기계적 편심은 공극 자속밀도에 많은 고조파 성분을 만들기 때문에 전동기의 구동 특성 저하와 가진력의 불평형을 야기하고, 고조파 성분의 가진력에 의한 소음 및 진동특성을 악화시킨다 따라서, 진동 저감의 한 방법으로 편심에 기인한 전자기적 가진력으로부터 기계적 거동을 해석하고 편심의 상태를 예측하는 것이 필요하다[17-18].

본 논문에서는 전자기 가진력의 반경방향 힘이 고정자의 변형을 일으키므로 이에 의한 공극의 변화를 알아보기 위하여 전자기 흡인력에 의한 고정자 변위를 해석하였다.

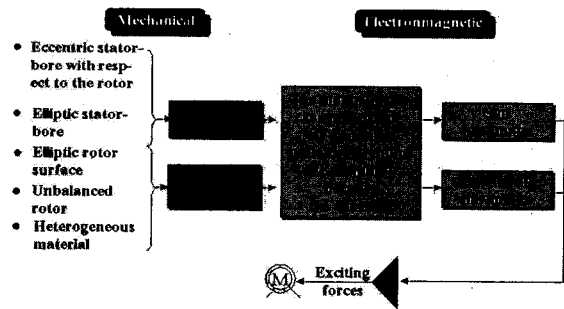


그림 2. 전자기 원인에 의한 가진력의 영향

4. 해석과정과 이론

4.1 해석 대상

스위칭 여자에 의한 SRM은 효율이 높고 견고한 구조를 가지고 있으며, 가변속 구동으로 다기능화가 용이하고 고속 운전이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나, SRM의 이러한 많은 장점이 있음에도 불구하고 토크 리플과 소음에 의한 문제점들이 지적되고 있어 SRM을 해석 대상으로 설정하였다.

그림 3은 SRM의 단면도에 치수를 나타내었으며 표 1은

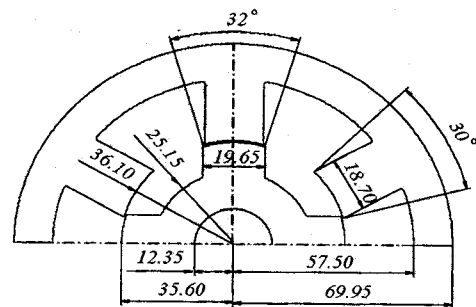


그림 3. SRM 형상 및 치수

표 1. 해석모델의 사양 및 기계적 물성치

규소강판 밀도	7800(kg/m ³)	축방향 길이	92.45(mm)
포아송비	0.25	영 계수	205[Gpa]
Possion's ratio		Young's modulus	

구조해석을 위한 주요 기계적 물성치를 나타내고 있다. 해석 모델은 고정자와 회전자극의 크기가 각각 6극과 4극을 가지는 SRM이고 고정자에는 3상권선이 감겨져 있으며 공극의 길이는 0.6 [mm]이다.

4.2 해석 과정

그림 4는 전자기 가진력에 의한 고정자 코아의 변위 해석과 고유진동수 해석과정을 나타낸 과정이다.

위치에 따른 인덕턴스의 함수와 전압방정식을 이용하여 전류 파형을 산정하고 이 전류가 가진력 계산을 위한 구동원이 된다. 전자장 해석으로부터 구해진 가진력을 고정자극(pole)에 분포하중으로 인가하여 구조해석으로부터 고정자 변위량을 회전자 위치에 따라 산정하였다.

또한, 전동기의 고유진동수와 전자기 가진력의 고조파 성분을 비교하여 공진 가능 주파수를 제시하였다.

전자기 가진력과 관련된 해석 과정은 크게 다음과 같이 구성된다.

- 전자장 해석을 통한 가진력 계산
- 가진력에 의한 기계적 거동 해석
- 고유진동수 및 모드 해석

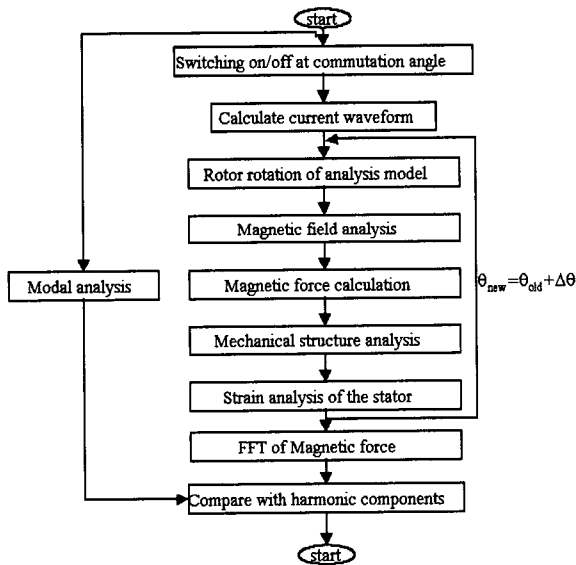


그림 4. 해석 과정

4.3 해석 이론

4.3.1 듀티비에 따른 전류계산

온-오프 시간에 따른 전류 파형을 얻기 위하여 SRM 한 상에 대한 전압방정식 V_s 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

한 상에 스위치가 온-오프 될 때 회전자 위치 함수의 전류 파형은 (1) 식으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$i(\theta) = \frac{V_s}{R + \omega M} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{R + \omega M}{\omega L}\right)(\theta - \theta_{on})} \right\} + i_{on/off}(\theta) e^{-\left(\frac{R + \omega M}{\omega L}\right)(\theta - \theta_{on/off})} \quad (2)$$

여기서, R 은 1상의 권선 저항, L 은 한 상에 대한 회전자 위치에 따른 인덕턴스 프로파일, $i_{on/off}$ 는 스위칭 온 또는 오프시 초기치 전류, M 은 $M = dL/d\theta$ 을 나타낸다.

4.3.2 전자기 가진력 계산

벡터포텐셜을 계변수로 가지는 SRM의 기본적인 지배방정식은 식 (3)과 같다.

$$\nabla^2 \times \vec{A} = \vec{J}_0 \quad (3)$$

자계 해석을 수행 후 맥스웰 응력을 이용하여 고정자에 작용하는 가진력을 계산하였다. 자성체 절점에 대한 고정자의 반경 방향으로 작용하는 전자기적 가진력의 힘밀도 p_r 은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p_r = \frac{1}{\mu_0} \left[(\vec{n} \cdot \vec{B}) \vec{B} - \frac{1}{2} B^2 \vec{n} \right] \quad (4)$$

여기서, \vec{n} 은 고정자 극의 표면에 대한 법선 방향 단위 벡터, \vec{B} 는 공극에서 자속밀도를 나타낸다.

4.3.2 구조해석

구조물 내의 임의의 점에서의 변위, 응력, 변형률 등은 유한요소해석을 통하여 얻을 수 있다.

재료는 등방성인 선형탄성 재료로 가정하였으며 3차원 해석모델의 임의 요소에서 극좌표계로 표현한 변형률 성분은 식 (5)와 같다[21].

$$\{\epsilon\} = \{\epsilon_r \ \epsilon_\theta \ \epsilon_z \ \gamma_{rz} \ \gamma_{r\theta} \ \gamma_{\theta z}\} \quad (5)$$

응력과 변형률의 관계를 후크의 법칙(Hook's law)에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\{\bar{\sigma}\} = [\bar{D}]\{\bar{\epsilon}\} \quad (6)$$

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{bmatrix}$$

$$[B] = \frac{1}{2}(1-2\nu)[1]$$

전동기의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석

여기서, $\{\epsilon\}$ 와 $\{\sigma\}$ 는 응력과 변형을 벡터, $[D]$ 는 탄성행렬 (elasticity matrix), E 는 재료의 탄성계수(Young's modulus), ν 는 포아송비(Poisson's ratio)이다.

구조물 내부의 임의 요소 내부의 변위 분포를 나타내는 매개 변수 식이 형상 함수를 이용하여 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\{\bar{\epsilon}\} = [N]\{\bar{u}\} \quad (7)$$

여기서, $[N]$ 은 변형률-변위 행렬로써 형상함수이며, $\{u\}$ 는 각 절점의 변위 벡터이다.

진동 시스템의 운동방정식에 대한 강성행렬과 강성방정식을 유도하기 위하여 식 (8)의 Hamilton의 원리를 적용한다. 즉, 변위를 가정하고 변위의 절점 값은 전 영역의 포텐셜 에너지를 절점 변위에 대해 최소화하는 최소 포텐셜의 원리를 의미한다[22].

$$\int_{t_1}^{t_2} [\delta(T - U) + \delta W] dt = 0 \quad (8)$$

여기서, U 는 물체내 변형에 의한 포텐셜 에너지(strain potential energy), T 는 변형에 의한 에너지와 외력으로 가해지는 하중의 포텐셜의 합인 전 포텐셜 에너지(kinetic energy), W 는 작용하중 에너지의 음의 값이다.

포텐셜 에너지 U 와 전 포텐셜 에너지 T 는 각각 다음과 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T [D] \{\epsilon\} dV \quad (9)$$

$$T = \frac{1}{2} \int_V \rho(\dot{r}^2 + \dot{\theta}^2 + \dot{z}^2) dV \quad (10)$$

식 (8)의 Hamilton의 원리에 식 (9)와 (10)의 에너지를 대입하여 식 (7)의 형상함수로 표현하여 정리하면 다음과 같은 요소방정식을 유도할 수 있다.

$$[M_e]\ddot{u} - [K_e]\dot{u} + [F_e] = 0 \quad (11)$$

여기서, $[K_e]$ 는 요소에서 강성행렬, $[M_e]$ 은 요소에서 질량행렬, $[F_e]$ 은 요소에 작용하는 외부 하중이다.

식 (12)와 같이 해석영역 전체에 대한 시스템 행렬을 구성하고, 우측항의 외부하중은 전자기적 가진력을 구동 항으로 하여 고정자의 변위를 해석하게 된다.

$$([K] - \omega^2[M])\{u\} = [F_e] \quad (12)$$

한편, 식 (12)의 가진력을 "0"으로 두고 식 (12)의 특성방정식을 구하면 식 (13)과 같이 주파수의 함수로 표현되는 다항식이 되므로 이 방정식의 해(解)로부터 전동기의 고유진동수를 구하게 된다.

$$\det([K] - \omega_i^2[M]) = 0 \quad (13)$$

각 고유 주파수(고유치: eigenvalue)에 대한 값을 가진력이 없는 식 (12)에 대입하여 각 절점에서의 상대적 위치를 계산하면 고유모드(고유벡터: eigenvector)를 구할 수 있다.

5. 해석 결과

5.1 고정자의 모달해석

진동과 그 결과로 나타나는 소음은 외력에 대한 기계요소들의 기계적 응답이 줄도록 설계 변수를 변화시킴으로써 줄일 수 있다. 그러므로 고정자의 고유진동수나 고정자가 가지고 있는 고유 특성의 동적 거동을 나타내는 모드의 정확한 예측이 진동 및 소음 저감을 위한 연구에 선행되어야 한다.

본 논문에서 전동기의 고유 진동수 및 고유 진동 모드를 구하기 위하여 Impact hammer를 이용한 실험적인 방법과 ANSYS를 사용한 3차원 유한요소법으로부터 두 결과를 비교하였다. 유한요소해석을 수행하기 위하여 하나의 절점에 3개의 자유도를 가지고 8개의 절점으로 구성된 육면체 요소(hexahedron: solid45)를 사용하였다.

그림 5는 전동기의 운전 상태에 따른 진동 및 소음 측정과 실험적으로 고유진동수를 측정하기 위한 종합적 실험 장치의 구성을 나타낸 것이다.

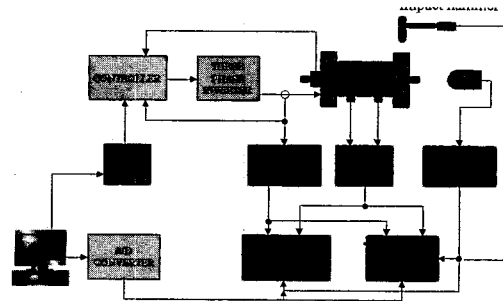


그림 5. 전동기의 진동관련 측정 실험 장치 구성도

그림 6은 실험적으로 측정된 주파수 응답 특성(frequency response function) 결과이며 고유진동수를 그림에 표기하였다.

표 2는 유한요소법을 이용하여 이론적으로 구한 고유진동수와 실험치를 비교한 것으로 두 결과가 잘 부합됨을 알 수 있다.

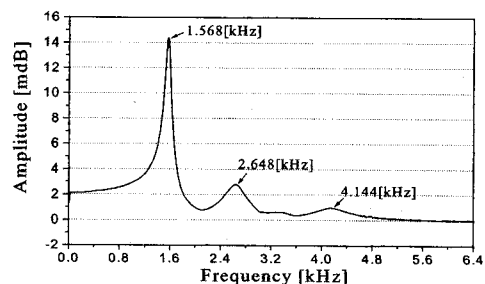


그림 6. 주파수 응답 특성

표 3. 고유진동수의 비교

	1차 모드	2차 모드	3차 모드	4차 모드
실험치	1568	2648	4144	-
이론치	1612.85	2870.5	3757.78	4730.85
오차	2.78	7.75	8.358	-

그림 7은 가진력이 없이 해석한 자유진동, 즉 고정자의 고유 진동수와 각 고유진동수에 대한 네 가지의 모드형상을 나타낸 그림이다. 그림 7.(a)와 (b)는 타원운동을 하는 모드이다. 이 모드는 고정자의 서로 반대편에 위치한 두 극을 여자하기 때문에 radial 성분의 가진력에 의하여 고정자가 변형되는 모양과 동일하다. 그러므로 그림 7.(c), (d)의 모드에 비하여 (a)와 (b)는 진동 및 소음을 크게 일으키는 주요 모드가 된다.

또한, 그림 7.(b)의 모드는 고정자의 앞면과 축방향에 대한 뒷면의 모양이 서로 반대로 움직이고 있으므로 굽힘(bending mode) 현상이 있음을 알 수 있다. 이 모드는 축방향 길이에 대한 자속을 불균일하게 만들게되므로 회전자 비틀림이나 가진력의 불평형으로 기계적 응력이나 베어링의 하중을 증가시키고 전동기의 특성을 악화시킨다.

그림 7.(c)와 (d)의 모드는 비대칭 운동이므로 고조파 가진력의 분포에 의하여 상쇄되기 때문에 진동에 크게 영향을 미치지 않는다.

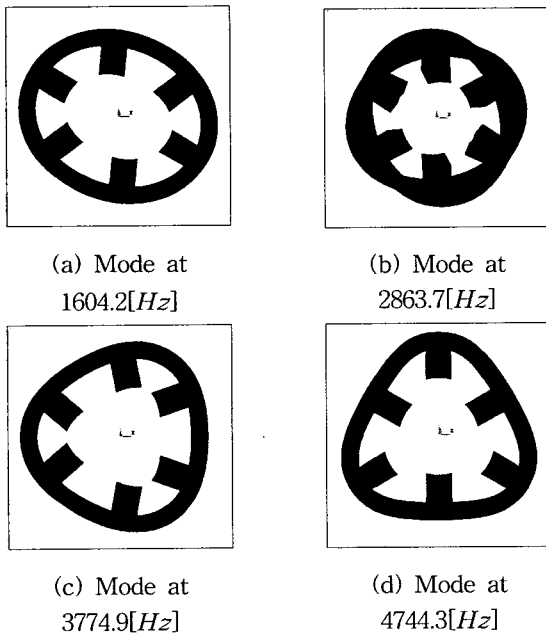


그림 7. 고유진동수에 대한 모드형상

5.2 고정자의 변위 해석

그림 8은 고정자에 한 상이 스위칭 된 경우 전압의 듀티비에 따른 입력 전류의 파형을 회전자의 위치의 함수로 나타낸 것이다.

그림 9는 전동기가 4700[RPM]일 때 그림 8의 전류의 입력으로부터 유한요소 해석을 통하여 계산된 전동기의 가진력(global radial force)이며, 그림 10은 그림 9의 가진력을 주파수 분석하여 주파수로 표현한 전자기 가진력의 고조파 성분이다.

해석 모델인 6/4 SRM의 전동기가 4700[RPM]로 회전하는 경우 전자기 가진력의 주파수는 입력 주파수는 313.3[Hz]와 동일하므로 n차 고조파 성분의 전자기 가진력의 주파수는 n*313.3[Hz]가 된다. 따라서, 그림 7.(a)의 고유진동수와 공진 하게 되는 5차 전자기 가진력의 주파수 1566.68[Hz]에서 공진 하게 될 것이다.

동일한 원리에 의하여 임의 속도에서 공진 가능 주파수를 예측할 수 있다.

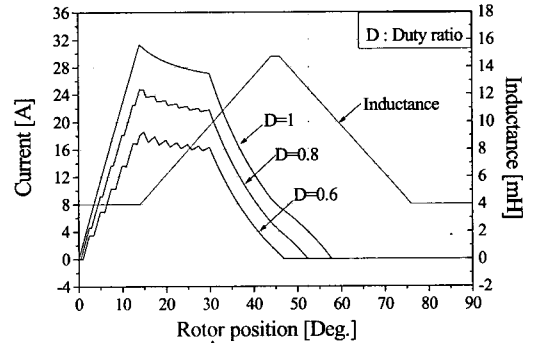


그림 8. 듀티비에 따른 전류 파형

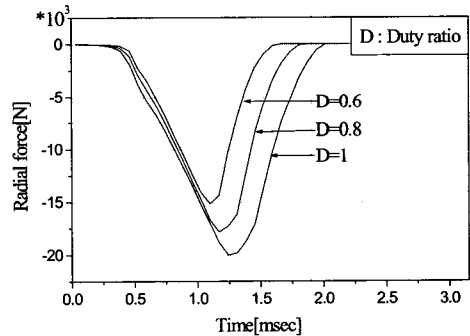


그림 9. 전체 흡인력(global radial force)

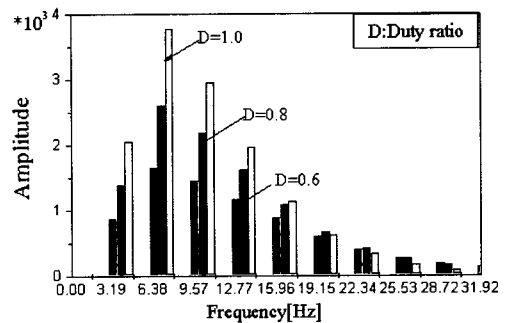


그림 10. 가진력의 고조파 성분

전동기의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석

전자기 흡입력에 의한 고정자 변위 해석은 해석 시간을 단축하기 위하여 축방향으로 힘의 변화나 고정자 코아의 변형은 없는 것으로 가정하였으므로 규소강판 한 장(규소강판 두께:0.5[mm])을 모델링하여 해석을 수행하였다.

그림 11은 회전자의 위치에 따른 고정자 코아의 한 장에 작용하는 극부적인 흡입력의 평균값을 나타낸 것이다.

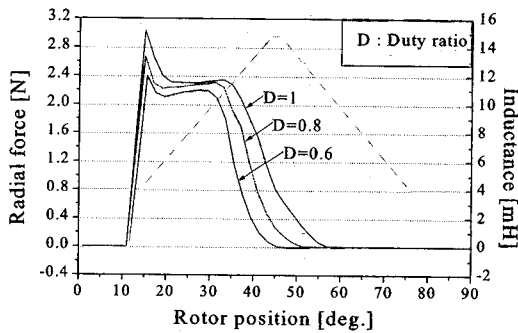


그림 11. 반경방향의 전자기적 가진력

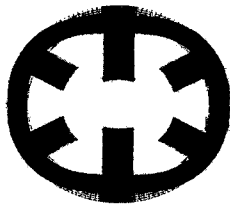


그림 12. 전자기적 흡입력에 의한 고정자 변형

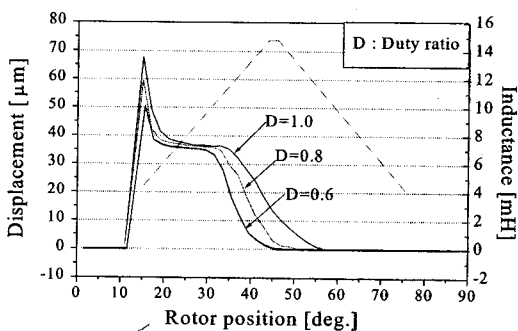


그림 13. 흡입력에 의한 고정자 변위

그림 12는 회전자와 고정자가 일치한 경우 전자기적 흡입력에 의한 고정자의 변형을 나타낸 그림이며, 그림에서 화살표는 가진력의 방향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 고정자 변형의 모양이 그림 7.(a)의 모드와 비슷한 변형의 양상을 보이고 있다.

그림 13은 흡입력에 의한 고정자의 변위를 나타낸 그림이다. 고정자의 극과 회전자의 극이 만나기 시작할 때 최대 변위를 일으키고 있으며 고정자 극과 회전자 극이 일치할수록 거의 일정한 변위량을 가진다. 또한 입력전류가 많을

수록 고정자 코아의 변위가 크게 나타난다. 최대 변위량은 약 67.0[μm]이며 회전자 극과 고정자의 극이 일치한 경우 약 36.0[μm]가 된다. 따라서, 전자기 흡입력은 공극을 줄이는 역할을 하므로 전동기 운전 중 실제 공극의 수치는 최대 변위량과 공극의 차이로 약 0.533[mm]가 될 것이다.

그림 12에서 한 상을 여자한 경우 전자기 가진력에 의한 고정자 변위의 해석 결과에 대한 고찰로부터 상전류가 온 또는 오프될 때 진동 또는 소음이 크게 발생할 것이다. 즉, 전류의 변화가 급격히 일어나는 회전자의 위치에서 진동이 크게 발생한다.

6. 결론

최근 전동기의 진동 및 소음 저감을 위한 관심과 필요성이 증대함에 따라 전기적 문제와 기계적 문제를 결합한 해석기술(coupled problem) 및 전기 기계 설계(electro-mechanical design)의 필요성과 연구동향에 대하여 언급하였으며 전동기의 진동원을 알아보았다.

전자기 에너지 변환 장치(electromechanical energy conversion device)가 가지는 공극은 진동 특성 및 전동기의 성능을 결정하므로 공극의 편심 원인중 전자기 흡입력에 기인한 고정자의 변위를 해석하였다. 전자기 가진력을 유한요소법을 사용하여 계산 후 고정자의 극에 하중으로 적용하여 구조해석을 수행하였다. 또한 공진 주파수를 예측하기 위하여 고정자의 고유진동수를 3차원 유한요소 해석으로 구하였으며 이 결과를 실험으로 구한 결과와 비교 검토하였다.

본 논문이 국내 전자기 시스템과 기계시스템의 결합된 연구 방향에 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

- [1] D. E. Cameron, J. H. Lang and S. D. Umans, "The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 6, pp. 1250-1255, 1992.
- [2] K. C. Maliti and C. Sadarangani, "Modelling magnetic noise in induction machines," *IEE EMD97 Conf.* No. 444, pp. 406-410, 1997.
- [3] B. S. Rahman and F. K. Lieu, "The origin of permanent magnet induced vibration in electric machines," *ASME Trans.*, Vol. 113, pp. 476-481, 1991.
- [4] R. S. Colby, F. M. Mottier and T. J. E. Miller, "Vibration modes and acoustic noise in a four-phase switched reluctance motor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, No. 6, pp. 1357-1363, 1996.
- [5] S. P. Verma and A. Balan, "Experimental investigation on the stator of electrical machines in relation to vibration and noise problems," *IEE EMD97 Conf.*,

No. 444, pp. 74-80, 1997.

[6] A. Hadjamor, P. L. Timar, M. Poloujadoff, "Induction squirrel cage machine design with minimization of electromagnetic noise," *IEEE Trans. on Energ. Conv.*, Vol. 10, No. 4, pp. 681-687, 1995.

[7] M. Besbes *et al.*, "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors," *IEE Proc. Electr. power Appl.*, Vol. 145, No. 5, pp. 462-468, 1998

[8] C. G. C. Neves *et al.*, "Vibrational behavior of switched reluctance motor by simulation and experimental procedure," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 34, No. 5, pp. 3158-3161, 1998.

[9] Y. Tang, "Characterization, numerical analysis and design of switched reluctance motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 6, pp. 1544-1552, 1997.

[10] R. Yacamini and S. C. Chang, "Noise and vibration induction machines fed from harmonic sources," *IEEE Trans. on Energ. Conv.*, Vol. 10, No. 2, pp. 286-292, 1995.

[11] S. J. Yang, *Low-noise electrical motors*, Clarendon press, Oxford, 1981

[12] R. S. Girsis and S. P. Verma, "Experimental verification of resonant frequencies and vibration behaviour of stator of electrical machines. Part 1-Models, experimental procedure and apparatus," *IEE Proc.*, Vol. 128, No. 1, pp. 12-21, 1981.

[13] R. S. Girsis and S. P. Verma, "Experimental verification of resonant frequencies and vibration behaviour of stator of electrical machines. Part 2-Models, experimental investigations and results," *IEE Proc.*, Vol. 128, No. 1, pp. 22-32, 1981.

[14] S. Noda *et al.*, "Effects of coils on natural frequencies of stator core in small induction motors," *IEEE Trans. Energ. Conv.*, Vol. 2, No. 1, pp. 93-99, 1978.

[15] F. Kako *et al.*, "Experimental study on magnetic noise of large induction motors," *IEEE Trans. PAS.*, Vol. 102, NO. 8, pp. 2805-2810, 1983.

[16] P. L. Timar, *Noise and vibration of electrical machines*, Elsevier, 1989

[17] D. G. Dorrell, W. T. Thomson and Steven Roach, "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 1, pp. 24-34, 1997.

[18] A. Arkkio, "Unbalance magnetic pull in cage induction motors with asymmetry in rotor structures," *IEE EMD97 Conf.*, No. 444, 1997.

[19] J. P. Hong *et al.*, "Mechanical vibration and stress analysis of the link of interior permanent magnet type synchronous motor," *proc. of IEEE IEMDC*, Seattle, U. S. A, May, pp. 150-152, 1999.

[20] J. P. Hong *et al.*, "Vibration and stress analysis due to electromagnetic force in the link of interior permanent type synchronous motor," *proc. of IEEE INTERMAG, EQ-03*, Kyungju, Korea, May, 1999.

[21] 이원驛, 응용 탄성학, 숭실대학교 출판부, 1995.

[22] M. Petyt, *Introduction to finite element vibration analysis*, Cabridge Univ. Press, 1990.

저 자 소 개



하경호 (河京鎭)

1972년 5월 19일생. 1997년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 창원대 공대 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.



홍정표 (洪正杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년-1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원. 1990년-1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1995년 한양대 산업과학연구소 선임연구원. 1996년-현재 창원대 공대 전기공학과 조교수.