

스위칭에 따른 전자기 가진력에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 변위해석

論 文

49B - 1 - 4

Stator Displacement Analysis of Switched Reluctance Motor Due to Electromagnetic Force According to Switching

河京鎬* · 洪正杓** · 金奎卓***

(Kyung-Ho Ha · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim)

Abstract - This paper deals with the modal analysis and the displacement of stator due to electromagnetic forces in Switched Reluctance Motor(SRM). A free-free model of the stator based on structural 3-dimensional Finite Element Method(FEM) is used for investigating the natural frequencies and the mode shapes of the stator. In addition, The displacement caused by magnetic force acting on stator pole is analyzed by the structural FEM coupled with the magnetic force. From these results, the resonance speed is obtained by the relation of the natural frequencies of the harmonic frequencies of magnetic force. And, the eccentricity with respect to rotor is predicted from the analysis result of the mechanical displacement of stator. The natural frequencies of stator are compared with experimental ones measured by modal testing.

Key Words : Displacement, Eccentricity, Mode shape, Natural frequency and SRM

1. 서 론

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 영역에 있으면 공진(resonance)하게 되어 부품의 마모와 전동기의 구동 성능의 저하뿐만 아니라 다른 시스템에 영향을 미치게 된다[1-5]. 따라서, 가진원 등이 고유주파수와 일치하지 않도록 설계하는 것이 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 위해서 전기적인 문제와 기계적인 문제를 결합한 해석 기술(coupled problem)이 최근 많이 연구되어 지고 있다[6-12].

특히, 여러 가지 전동기들 중에 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)는 구조가 간단하고 고속운전이 가능하다는 점등의 많은 장점을 가지고 있지만 진동과 토오크 리플이 심하다는 문제점이 단점으로 지적되고 있다[13]. 이는 고정자의 한 상에서 다음 상으로 여자가 전이되는 전류(轉流)시에 발생하는 토오크 리플이 상당히 크기 때문이다. 또한, 전동기의 회전 주파수에 의해 결정되는 가진력의 주파수가 고정자의 고유진동수와 근접한 주파수에서 운전될 경우에 진동의 영향이 크게 발생하게 된다. 특히 공극의 불균일에 의한 편심은 공극에서 기자력의 고조파를 증가시켜 전동기의 전자기 특성을 저하시키고 구조물의 고유진동수와 일치하여 소음 및 진동특성을 악화시킨다[14,15]. 이러한 공극의 불균일은 고정자의 변형에 의한 편심과 회전자와 동적 운동에 의한 편심이 있다. 따라서, 진동이나 소음을 줄이기 위해서는 설계 단계에서 고정자의 고유주파수와 동적 편심에 의한 공극의 변화를 예측하여 이의 영향을 분석하는 것이 필요하다[16]. 그러나 이와 관련한 대부분의 논문은 전자기적 현상과 구조물의 해석이 별개로 해석되어 지고있으며 주로 모달 해석을 통하여 가진력을 고려한 구조변형이나 실험을 통한 전자기 가진력의 영향을 분석하고 있다. 그러므로 본 논문에서는 전기적 문제와 기계적 문제를 결합하여 회전자와 위치에 따른 전자기적 가진력이 고정자의 변형에 미치는 영향을 정량적으로 분석함으로써 공극의 변화를 예측하였다.

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기를 대상으로 전자기적 반경방향의 힘에 의한 고정자의 변위를 해석하고 이론적 모달해석(고유진동수, 고유모드)을 수행하여 실험치와 비교하였다. 즉, 회전자와 위치에 따라 전자기 가진력의 반경방향의 힘에 의한 고정자의 변위량을 해석하여 공극의 변화를

* 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

*** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 1日

最終完了 : 1999年 12月 7日

예측하였으며 반경방향의 힘에 대해 주파수를 분석하고 모달 해석으로부터 구한 고유진동수와 비교하여 공진가능 주파수를 제시하였다. 본 논문에서 해석 과정은 첫째, 전자장 해석을 통한 가진력 계산, 둘째, 전자기 가진력에 의한 기계적 거동 해석, 셋째, 고유진동수 및 모드 해석으로 구성되어 있다. 여기서, 전자기적 가진력의 추출 및 구조해석은 유한요소법을 사용하였다.

2. 해석 대상 및 과정

2.1 해석 대상

그림 1은 SRM의 단면도에 치수를 나타내었으며 표 1은 구조해석을 위한 주요 기계적 물성치를 나타내고 있다. 해석 모델은 3상으로 고정자와 회전자 극수가 각각 6극과 4극을 가지는 구조로 되어 있으며 공극은 0.6 [mm]이다.

2.2 해석과정

그림 2는 회전자의 위치에 따른 전자기 가진력에 의한 고정자 코어의 변위 해석과 고유진동수 해석과정을 나타낸 과정이다.

첫째, SRM 고정자의 고유진동수(고유치)와 각 고유치에 대한 모드 형상은 3차원 유한요소법을 이용하여 구하였다.

둘째, 전자기적 가진력을 계산하기 위하여 유한요소 해석 수행에 필요한 회전자 위치에 대한 전류는 전압방정식과 고정자와 회전자의 위치에 따른 공극에서의 인덕턴스 관계로부터 산출하였으며, 이때 인덕턴스의 자기포화와 프린칭현상은 무시하였다. 그리고 고정자 표면에서 이 전류에 의해 발생하는 전자기적 가진력의 국부적인 힘은 맥스웰 응력으로 구하였다.

셋째, 전자장 해석에 의해 구해진 전자기 가진력을 고정자 극(pole)의 표면에 분포하중으로 인가하여 전자기 가진력에 의한 구조해석으로부터 고정자 변위량을 회전자 위치에 따라 해석하였다. 마지막 단계로 전동기의 고유진동수와 전자기 가진력의 고조파 성분을 비교하여 공진 가능 주파수를 제시하였다.

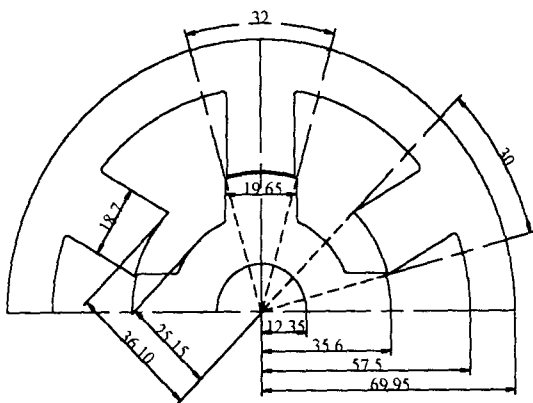


그림 1 SRM 형상 및 치수
Fig. 1 Configuration and dimension of SRM

표 1 기계적 물성치

Table 1 Mechanical material properties of analysis model

| | | | |
|------------------------------------|------|------------------------------------|-----------|
| 규소강판 밀도 [kg/m ³] | 7800 | 축방향 길이 [mm] | 92.45 |
| 고정자 코어의 포아송비 Poisson's ratio | 0.25 | 고정자 코어의 영 계수 Young's modulus | 205 [Gpa] |

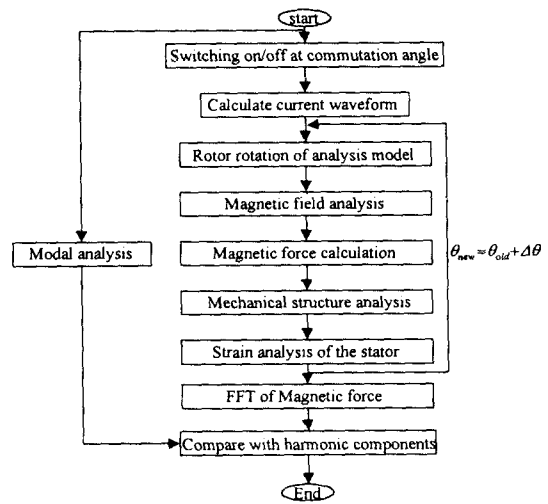


그림 2 해석 과정
Fig. 2 Analysis procedure

3. 해석이론

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 식 (1)로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

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

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

3.2 전자기 가진력 계산

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

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu_0 \vec{J}_0 \quad (3)$$

여기서 J_0 는 식 (1)에서 계산된 회전자 위치의 함수인 전류가 구동항이 되어 입력된다.

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

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

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

3.3 구조해석

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

재질은 등방성인 선형탄성 재료로 가정하였으며 3차원 해석모델의 임의 요소에서 극좌표계로 표현한 변형률 성분은 식 (5)와 같다[17].

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_r \ \varepsilon_\theta \ \varepsilon_z \ \gamma_{rz} \ \gamma_{r\theta} \ \gamma_{\theta z}\} \quad (5)$$

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

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

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

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

구조물 내부의 임의 요소에서 변위 분포를 나타내는 매개변수에 대한 식을 형상 함수를 이용하여 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\{\bar{\varepsilon}\} = [M]\{\bar{u}\} \quad (7)$$

여기서, $[M]$ 은 변형률-변위 행렬로서 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 절점값은 전 영역의 포텐셜 에너

지를 절점 변위에 대해 최소화하는 최소 포텐셜의 원리를 의미한다[18].

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

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.

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

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

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.

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

한편, 식 (12)의 가진력을 "0"으로 두고 식 (12)의 특성방정식을 구하면 식 (13)과 같이 주파수의 함수로 표현되는 다항식이 되므로 이 방정식의 해로부터 전동기의 고유 진동수를 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.

4. 해석결과

4.1 고정자의 고유진동수 해석

본 논문에서 전동기의 고유진동수 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.

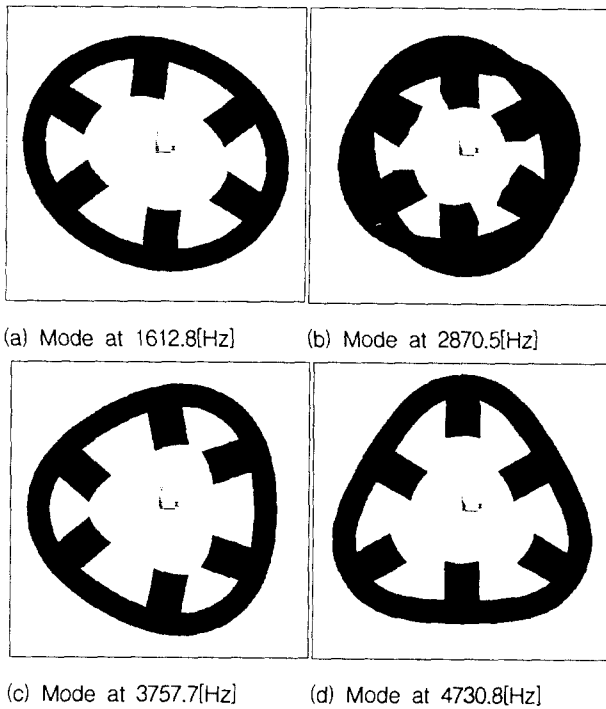


그림 3 고유진동수에 대한 모드형상
Fig. 3 Mode shapes corresponding to natural frequencies

그림 3은 가진력이 없이 유한요소 해석한 자유진동, 즉 고정자의 고유진동수와 각 고유진동수에 대한 네 가지의 모드형상을 나타낸 것이다.

그림 3(a)와 그림 3(b)는 타원운동을 하는 모드이다. 이 모드는 고정자의 서로 반대편에 위치한 두 극을 여자하기 때문에 반경방향(radial) 성분의 가진력에 의하여 고정자가 변형되는 모양과 동일하다. 그러므로 그림 3(c)와 그림 3(d)의 모드에 비하여 그림 3(a)와 그림 3(b)는 진동 및 소음을 크게 일으키는 주요 모드가 되므로 이 모드에서의 공진을 피해야 한다.

또한, 그림 3(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 자속 분포를 불균일하게 만들게 되므로 회전자의 비틀림이나 가진력의 불평형으로 기계적 응력이나 베어링의 하중을 증가시키고 전동기의 특성을 악화시킨다.

그림 3(c)와 (d)의 모드는 비대칭 운동이므로 고조파 가진력의 분포에 의하여 상쇄되기 때문에 진동에 크게 영향을 미치지 않는다.

그림 4는 전동기의 고유진동수를 측정하기 위한 실험장치 구성과 장비를 나타낸 사진이다. 기계 구조물은 주파수 응답 함수(Frequency Response Function: FRF)로부터 고유한 진동 특성을 가지는 고유진동수를 찾을 수 있다. 고유진동수를 측정하기 위한 실험 장치는 SRM 고정자를 가진하기 위한 가진기와 진동시호를 측정하기 위한 측정센서 및 신호분석기(B&K 2035)로 구성된다. 본 실험에서는 Impact hammer를 가진기로 사용하였으며 측정 센서로는 가속도계(Accelerometer)를 사용하였다. 고유진동수 측정시 주위 구조물의 영향이나 잡음을 최소화하기 위하여 방진 패드를 사용하여 자유

경계단 조건을 만들어 주었으며 고정자의 표면에 가속도계를 부착한 전동기를 방진 패드 위에 놓고 Impact hammer를 사용하여 고정자의 표면을 반경 방향으로 가진하여 B&K 2035 장비로 주파수 응답 함수를 측정하였다.

그림 5는 실험적으로 측정된 주파수 응답 특성(frequency response function) 결과이며 고정자의 고유진동수를 그림 위에 표기하였다. Impact hammer에 의한 임펄스 충격으로 발생한 고정자의 기계적 변위에 대한 가속도의 응답신호를 주파수 분석한 것으로 1568, 2648, 4144[Hz]에서 임펄스 충격에 의해 진동하는 고정자의 고유진동수가 되는 것이다.

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

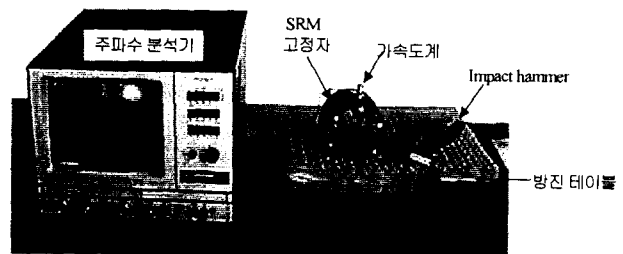


그림 4 고유진동수 측정을 위한 실험장치
Fig. 4 Experimental unit for measuring natural frequency

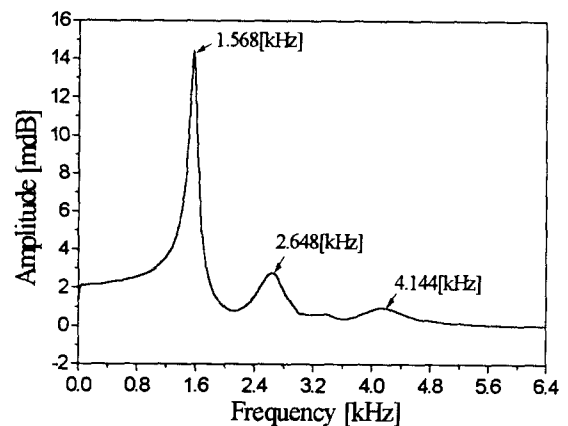


그림 5 주파수 응답 특성(실험치)
Fig. 5 Frequency response function (experimental value)

표 2 고유진동수의 비교
Table 2 Comparison of natural frequency

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

4.2 고정자의 변위 해석

그림 6은 고정자에 한 상이 여자되는 경우 회전자 위치에

다른 스위칭의 온(on), 오프(off) 시간은 일정하게 두고 인덕턴스로부터 전압의 듀티비(on과 off의 비율)에 따른 입력 전류의 파형을 회전자의 위치의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 사용된 회전자 위치에 따른 인덕턴스 프로파일은 스위치드 릴럭턴스 전동기를 설계한 후 상용 설계/해석 프로그램 PC-SRD(Speed)를 이용하여 계산된 결과이다.

그림 7은 전동기가 4700[RPM]일 때 그림 6의 전류의 입력으로부터 유한요소 해석을 통하여 계산된 전동기의 가진력(global radial force)이며, 그림 8은 그림 7의 가진력을 주파수 분석하여 주파수로 표현한 전자기 가진력의 고조파 성분이다.

해석 모델인 6/4 SRM에서 1회전당 한 상의 스위칭 회수는 4회이므로 전동기가 4700[RPM]로 회전하는 경우 입력 주파수는 313.3[Hz]가 된다. 또한 전자기 가진력의 주파수는 입력 주파수와 동일하므로 n 차 고조파 성분의 전자기 가진력의 주파수는 $n \times 313.3$ [Hz]가 된다. 따라서, 5차 전자기 가진력의 주파수 1566.68[Hz] 대역 근처에서 그림 3.(a)의 고유진동수와 공진하게 될 것이다. 동일한 원리에 의하여 임의 속도에서 공진 가능 주파수를 예측할 수 있다.

전자기 흡인력에 의한 고정자 변위 해석은 해석 시간을 단축하기 위하여 축방향으로 힘의 변화나 고정자의 변형(bending vibration)은 없는 것으로 가정하였으므로 요소강판 한 장(요소강판 두께:0.5[mm])만을 모델링하여 해석을 수행하였다. 그림 9와 같이 임의 회전각에서 고정자의 극과 회전자의 극이 마주보고 있을 때 전자기 해석을 통하여 마주 보고 있는 고정자 표면에 있는 요소선상에 작용하는 평균 반경방향의 힘을 구하고 이 힘을 각 절점들에 분포하중으로 적용하여 해석을 수행하였다.

그림 10은 회전자의 각 위치에서 고정자 코어의 한 장에 작용하는 국부적인 힘(average local force)의 평균값을 나타낸 것으로 회전자와 고정자의 극이 만나기 시작할 때 고정자 표면에 가장 많은 국소적 힘이 작용함을 보이고 있다. 여기서 계산된 회전자의 각 위치에서의 국부적인 평균 힘을 고정자의 표면에 분포 하중으로 인가하여 고정자의 변위를 해석하였으며 접선방향의 힘(tangential force)에 의한 영향은 무시하였다.

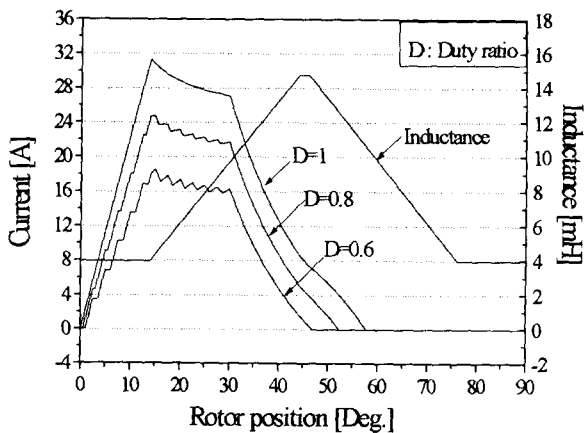


그림 6 듀티비에 따른 전류 파형
Fig. 6 Current waveforms varying with rotor position for duty ratio

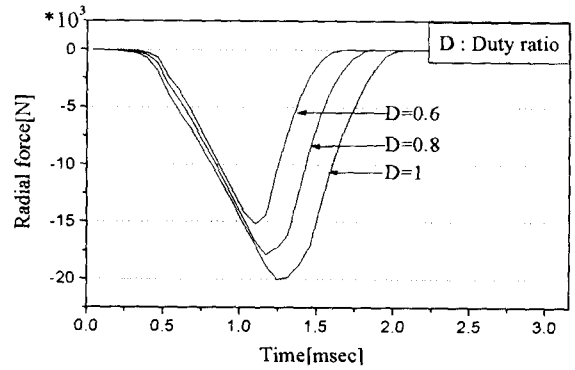


그림 7 전체 흡인력
Fig. 7 Global radial force according to duty ratio

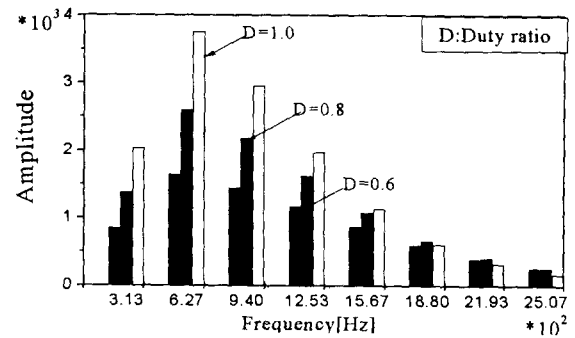


그림 8 전자기적 가진력의 고조파 성분
Fig. 8 Harmonic components of electromagnetic exiting force

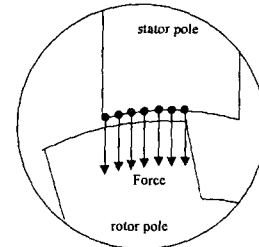


그림 9 전자기적 가진력 계산 및 하중의 위치
Fig. 9 Position to calculate local radial forces and to apply their load

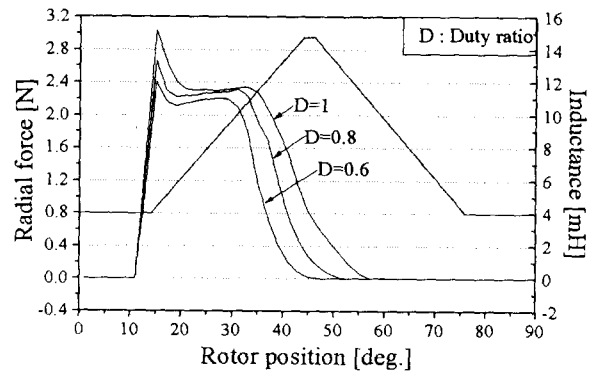


그림 10 반경방향의 국부적인 평균 힘
Fig. 10 Average local radial force as rotor position variation

그림 11은 회전자와 고정자가 완전히 일치한 경우 그림 10에서 계산된 전자기적 힘에 의한 고정자의 변형을 나타낸 그림이며, 그림에서 화살표는 힘의 방향을 나타낸 것이다. 이 그림에서 고정자 변형의 모양이 그림 3.(a)의 모드와 비슷한 변형의 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 회전자 위치에 따른 전자기적 힘에 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 많을수록 고정자 코어의 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 결과로부터 상전류가 온 또는 오프될 때 진동 또는 소음이 크게 발생할 것으로 판단된다. 즉, 전류의 변화가 급격히 일어나는 회전자의 위치에서 국부적인 힘이 가장 크게 나타나기 때문에 진동이 크게 발생할 것이다.

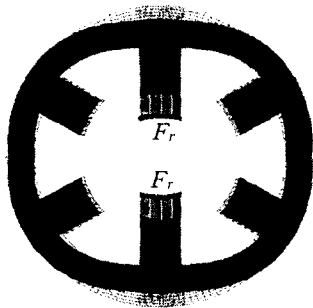


그림 11 전자기적 흡입력에 의한 고정자 변형
Fig. 11 Deformation of stator due to radial force

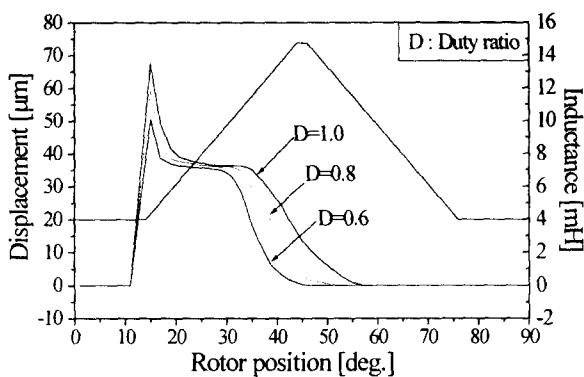


그림 12 흡입력에 의한 고정자 변위
Fig. 12 Displacement of stator due to radial force

5. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)를 대상으로 전자기 가진력에 의한 고정자 변위를 해석하였으며 3차원 유한요소해석과 실험적인 방법에 의한 모달해석을 수행하여

고정자의 고유진동수와 각 고유진동수에 대한 모드 형상을 나타내었다. 또한 전자기 가진력의 고조파 성분과 고정자의 고유진동수를 비교하여 공진 가능 주파수를 제시하였다.

공극의 편심 원인중 전자기 흡입력에 기인한 고정자의 변위를 해석하기 위하여 유한요소법을 사용하여 전자기 가진력을 계산하고, 이 가진력을 고정자 극의 표면에 분포 하중으로 적용하여 구조해석을 수행함으로써 고정자의 변위를 계산하였다. 이상의 일련의 과정을 SRM의 회전자 위치에 따라 동일한 해석 과정을 반복 수행하여 공극의 변화를 예측하였다. 또한 공진 주파수를 예측하기 위하여 고정자의 고유진동수를 ANSYS를 사용한 3차원 유한요소 해석으로 구하였으며 이 결과를 실험으로 구한 결과와 비교 검토하였다.

본 해석 결과 고정자의 극과 회전자의 극이 일치하기 시작할 때 고정자는 67.0[μm]의 최대 변위를 일으키고, 두 극이 일치한 경우 고정자의 변위는 36.0[μm]으로써 이때 공극은 0.533[mm]가 된다. 또한 모달실험을 통한 해석 대상 모델의 고유진동수는 1568, 2648, 4144 [Hz]를 가지며 이론적으로 구한 해석 결과를 잘 부합됨을 보였다.

본 논문에서 제시된 해석 방법 및 결과는 SRM의 전기적 및 기계적 특성을 고려한 전기기계(electromechanical device) 설계와 해석에 참고 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계 기술 센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [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] 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.

[12] 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.

[13] T. J. E. Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Clarendon press, Oxford, 1993.

[14] 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.

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

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

[17] 이원驛, 응용탄성학, 숭실대학교 출판부, 1995.

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

저 자 소 개



하 경 호(河京鎬)
 1972년 5월 19일생. 1997년 창원대 전기공학과 졸업. 1999년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 0551-279-7519
 E-mail: haroom@netian.com



김 규 탁(金奎卓)
 1961년 11월 12일생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 早稲田大 客員 연구원
 Tel : 0551-279-7515
 E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr



홍 정 표(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(공학박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수
 Tel : 0551-279-7517
 E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr