

질량 불평형에 의한 SRM 회전자 의 동적 거동에 관한 연구

論 文

49B-5-3

Dynamic Behavior of Rotor in Switched Reluctance Motor Due to Unbalanced Mass

河 京 鎬* · 洪 正 杓** · 金 奎 卓*** · 張 璠 讚§

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

Abstract - This study deals with the dynamic response of a rotor in Switched Reluctance Motor(SRM) caused by the unbalance force such as the unbalanced mass and electromagnetic force. The method to analyze the mechanical response of the rotor supported on the bearing is based on an extension of the 3-dimensional Transfer Matrix Method(TMM) coupled with the electromagnetic force calculated by Maxwell stress tensor. The displacement of the rotor as a function of frequency according to the position of the unbalanced mass is evaluated from the frequency response function (FRF). The rotor behaviour with the electromagnetic force is compared with that without the electromagnetic force. In addition, the resonance speeds and the vibration modes are analyzed and demonstrated in this paper. These results are useful in designing the mechanical rotor and in balancing properly the rotor to reduce vibration and noise.

Key Words : Dynamic response, resonance speed, switched reluctance motor, transfer matrix method, unbalanced mass and vibration mode

1. 서 론

일반적으로 공극을 매개로 에너지를 변환하는 전자기회로 시스템에서 공극의 변화는 전자기 특성 및 진동에 많은 영향을 미친다. 그 중 고정자와 회전체의 구조를 가지는 전동기의 공극을 변화시키는 요인은 회전체의 회전속도와 구조물이 가지는 고유진동수의 일치에 의한 공진, 가진력에 의한 고정자 구조물의 변위, 회전자의 기계적 불평형이나 질량 불평형 그리고 열적 팽창 등이다 [1-9].

특히, 회전자는 회전축의 중심선에 대하여 질량분포가 비대칭적인 경우 항상 불평형을 가지게 된다. 이러한 비대칭은 설계 또는 제조상의 오차, 재질과 비동질성, 가공 또는 조립 공차로 인하여 발생하며 회전체에 따라 정도의 차이를 보인다 [10]. 대부분의 회전체가 가지는 이러한 불평형은 베어링과 지지구조에 힘을 가할 뿐만 아니라 기계 진동을 일으키기도 하며 전자기적 불평형을 일으키므로 지지부에 하중을 더욱 증가시켜 소음과 진동이 심하게 발생한다. 이러한 진동의 크기가 충분히 크다면 전동기의 공극 변화에 큰 영향을 가져올 수 있으며 이는 결국 전동기 성능을 저하시키는 결과를 낳는다. 따라서, 이러한 회전자의 불평형을 고려한 응답특성

해석이 반드시 필요하다 [11-13].

회전자의 진동해석을 해석하기 위한 모델화 기법은 크게 분포파라미터 모델(distributed parameter model)과 집중파라미터 모델(lumped parameter model) 그리고 일정질량 모델 방법(consistent mass model)이 있다 [14]. 일정질량 모델에 기초를 두는 유한요소법의 경우 시스템의 전체 자유도와 요소에 비례하여 행렬의 크기가 커지므로 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있을 뿐 아니라 선·후처리 작업이 번거로운 문제점이 있다. 그래서, 하나의 강체인 질량과 질량이 없는 스프링으로 구성되는 집중 파라미터 모델의 전달행렬법(Transfer Matrix Method: TMM)이 많이 이용되고 있다 [15-16]. 이 방법은 요소수에 상관없이 하나의 질량에서 결정된 자유도 수가 시스템 행렬의 크기와 같으므로 해석 시간을 단축할 수 있으며 선·후처리 작업이 용이하다.

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor: SRM)는 고속운전이 가능할 뿐만 아니라 다른 전동기와 비교하여 구조적으로 견고하고 제작비용이 저렴한 이점 등이 있으나 진동과 소음의 문제로 상용화에 제약으로 작용한다 [17-19]. 특히 공극이 타 전동기 보다 작기 때문에 전동기의 특성을 정확히 분석하기 위해서는 운전 중 불평형에 의한 공극의 변화에 대하여 정확한 예측이 필요하다.

본 논문에서는 6/4의 극을 가지는 SRM을 대상으로 하여 전자기적 및 기계적 불평형에 기인하는 회전자의 거동을 정량적으로 분석하였다. 베어링 구조를 가지는 회전자를 등가 집중 질량으로 이산화하여 해석할 수 있는 3차원 전달행렬법으로 해석을 수행하였으며, 자유진동 해석으로부터 회전자의 공진 주파수와 모드형상을 제시하였으며 회전자의 질량 불평형 분포 위치에 따라 회전자의 동적 특성을 해석하였다. 즉

* 正 會 員 : 昌 原 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
** 正 會 員 : 昌 原 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博
*** 正 會 員 : 昌 原 大 電 氣 工 學 科 副 教 授 · 工 博
§ 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 所 Mechatronics 그룹 先 任 研 究 員
接受日字 : 1999年 11月 23日
最終完了 : 2000年 4月 3日

불평형에 의한 회전속도 함수의 주파수 응답 함수(frequency response function) 특성 선도를 제시하고 이로부터 공극의 변화량을 예측하였다.

2. 해석이론

2.1 해석 대상

그림 1은 해석대상인 SRM의 회전자 주요 치수와 회전자-베어링 시스템의 거동을 전달행렬법으로 해석하기 위하여 등가화된 그림으로써 n 개의 집중질량(lumped mass)과 질량이 없는 강성요소(massless elastic beam)로 연결되어 있다. 표 1은 구조해석을 위해 필요한 각종 기계적 재질 상수와 베어링의 강성계수를 나타내고 있다. 해석 모델은 3상으로 고정자와 회전자의 극수가 각각 6극과 4극을 가지는 구조로 되어 있으며 공극은 $0.6 [mm]$ 이다.

탄성계를 가지는 해석대상의 등가화된 해석모델은 그림 1과 같이 n 개의 집중 질량과 관성이 없는 강성요소로 구성되어 있으며 이들의 기본요소들은 서로 연결되어 있다. 또한 회전자의 양단에 지지되어 있는 베어링을 고려하여 해석을 수행하였다. 본 논문에서 해석상의 가정은 다음과 같다.

- 재질은 등방성이며 선형(Hook's law)이다.
- 베어링 부분은 강성만을 고려하였으며 등방성이며 속도에 관계없이 일정한 값을 가진다.
- 베어링의 댐핑(damping)은 무시하였다.
- 굽힘 진동만을 고려하였다.(x 축 방향으로의 변위는 없다.)
- x 축 방향으로의 자속의 변화는 없다.

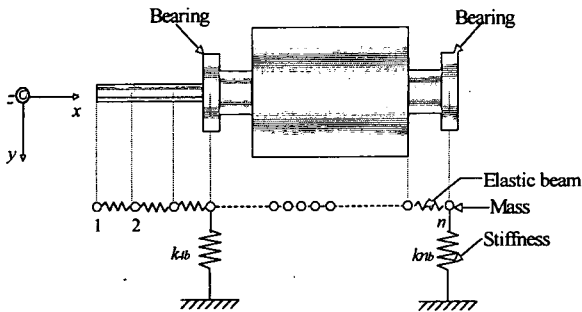


그림 1 SRM 회전자의 등가해석모델
Fig. 1 Equivalent analysis model of the rotor in SRM

표 1 SRM 회전자의 물성치
Table 1 Mechanical property of the rotor in SRM

Shaft	밀도 $[kg/m^3]$	7850
	영계수 $[N/m^2]$	2.03×10^{11}
Stator/Rotor	밀도 $[kg/m^3]$	7310
	영계수 $[N/m^2]$	2.03×10^{11}
Bearing	강성계수 $[N/m]$	5.36×10^9

2.2 불평형 가진력 계산

본 논문에서 불평형력은 회전자의 불평형 질량에 의한 원심력과 불평형 질량에 기인한 편심으로부터 발생한 불평형 전자기 가진력의 합으로 보았다.

2.2.1 불평형 전자기 가진력

잔류 불평형 질량을 가진 회전자가 회전할 경우 회전자의 휘돌림 현상이 발생하여 회전자는 편심을 일으키게 되므로 공극의 차이에 의한 불평형 전자기 가진력은 그림 2(a)와 같이 F_{n1} 과 F_{n2} 의 차로 나타난다. 이때 회전자에 작용하는 전자기적 가진력은 그림 2(a)과 같이 분포하는 것으로 보았으며 그림 2(b)는 질량 불평형에 기인한 원심력을 설명하기 위하여 그림 2(a)에서 AB를 자른 단면적을 x 축에서 바라본 그림이다.

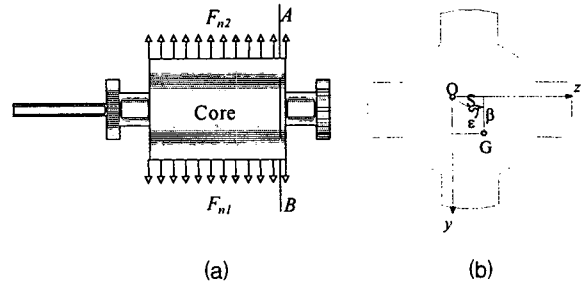


그림 2 불평형 전자기적 힘과 질량 불평형에 의한 편심
Fig. 2 Unbalance electromagnetic force and eccentricity due to unbalanced mass

회전자에 작용하는 전자기적 가진력을 계산하기 위하여 벡터포텐셜을 계변수로 하는 SRM의 기본적인 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \vec{J}_0 \quad (1)$$

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 \vec{p}_r 은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{p}_r = [\vec{H}_1 (\vec{B}_1 \cdot \vec{n}_{12}) - \vec{n}_{12} (\vec{B}_1 \cdot \vec{H}_1)] - [\vec{H}_2 (\vec{B}_2 \cdot \vec{n}_{12}) - \vec{n}_{12} (\vec{B}_2 \cdot \vec{H}_2)] \quad (2)$$

여기서, \vec{H}_i 와 \vec{B}_i 는 각각 경계면에서 인접한 요소의 자계의 세기와 자속밀도를 나타내고, \vec{n}_{12} 는 경계면에 수직한 단위 벡터를 나타낸다.

2.2.2 질량 불평형

공간에 고정된 직교좌표계 (x, y, z) 를 고려하면, x 축은 회전자의 축중심선 방향에 일치하고 다른 두 개의 좌표계는 그림 2(a)의 횡단면으로 그림 2(b)와 같다. 좌표계의 원점 O 는 축의 힘이 없을 때의 원판의 도심(축중심점)으로 S 에 일치한다. 원판의 자중에 의한 정적인 힘이 없다면 축 중심점 S 는 좌우 양단 베어링의 중심을 연결한 직선 상에 있다. 원판과 축과의 교점 S 의 좌표를 z 및 y 로 할 때 원판의 무게중심 G 는

축중심점 S로부터 어느 일정거리 ϵ 만큼 떨어져 있다. 이 ϵ 을 편중심이라고 하며 불평형질량의 무게 중심거리인 반경이다. 편중심 ϵ 과 불평형 질량 m 의 곱은 질량 불평형으로 각 성분에 대한 불평형은 식 (3)과 같이 나타난다 [15].

$$U_z = m\epsilon \cos \beta, U_y = m\epsilon \sin \beta \quad (3)$$

여기서, U 를 질량 불평형으로 정의하며 ϵ 는 불평형질량의 무게 중심거리인 반경, m 은 불평형 질량이며 β 는 불평형 질량이 이루는 각도이다.

임의 질량 M 을 가지는 물체가 반경의 r 의 회전 반경으로 ω 의 각속도로 회전할 경우 원심력은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = Mr\omega^2 \quad (4)$$

여기서, F 는 원심력, M 은 임의질량, r 은 물체의 회전 반경이며 ω 는 회전 각속도이다.

식 (4)에서 불평형 질량은 임의 질량에 해당되며 반경 r 은 편중심 ϵ 에 해당되므로 이 회전자가 각속도 ω 로 회전할 경우 x - y 평면에서 원심력 성분 F_m 은 식 (5)와 같다 [15].

$$F_m = \omega^2 U_y \cos \omega t + \omega^2 U_z \sin \omega t \quad (5)$$

이 원심력은 회전자 속도의 함수로써 회전자에 가진력으로 작용하며 x - z 평면에서도 동일한 방법으로 불평형 가진력을 계산할 수 있다.

2.3 응답해석

3차원 전달행렬법을 적용하기 위해서 회전축 방향을 x 축이라고 할 때 각 x - y 평면, x - z 평면에서 강성요소에 대한 필드행렬(field matrix)과 질량요소에 대한 포인트 행렬(point matrix)을 구한다. 각 기본요소 양단의 물리상태를 규정하는 양은 내력(internal force)과 변위(displacement)로 계의 상태량을 표현할 수 있으며 이로부터 행렬을 구성할 수 있다.

2.3.1 필드행렬(Field matrix)

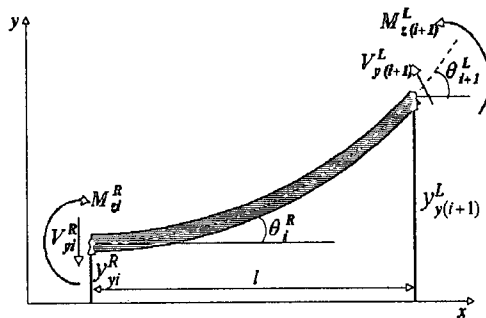


그림 3 x - y 평면에서의 i 번째 필드 요소
Fig. 3 i th Field element in x - y plane

x - y 평면에서의 i 번째 요소에 대한 상태변수(자유도) $\{S\}_i$ 는 y 처짐, θ_y 각변위, V_y 전단력, M_x 모멘트이며 x - z 평면에서의 상태변수는 z , θ_z , V_z , M_y 이다. 그림 4는 x - y 평면에서 강성 요소의 상태변수와 힘의 평형상태를 나타내며 R 과 L 의 첨자는 각각 요소의 오른쪽과 왼쪽을 의미한다. 각 평면의 필드 요소 $[F]$ 는 전달변형을 고려한 행렬 탄성곡선의 미분방정식과 면적모멘트로부터 보 요소에 대한 지배방정식을 유도하여 정리하면 9×9 의 식 (6)과 같이 주어진다 [5].

$$\{S\}_i^L = [F]\{S\}_{i+1}^R \quad (6)$$

$$[F] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L & \frac{L}{Gak_s} - \frac{L^3}{6EI} & 0 & \frac{L^2}{2EI} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -L & 0 & 0 & \frac{L}{Gak_s} - \frac{L^3}{6EI} & 0 & \frac{L^2}{2EI} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{L^2}{2EI} & 0 & \frac{L}{EI} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -\frac{L^2}{EI} & 0 & \frac{L}{EI} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, L 은 각 필드요소의 길이이고 G 는 전단계수 [N/m^2], A 는 요소의 단면적, k_s 는 티모센코계수, E 는 영계수 [N/m^2], I 는 요소의 2차 면적 모멘트 [m^4]이다.

2.3.2 포인트 행렬(Point matrix)

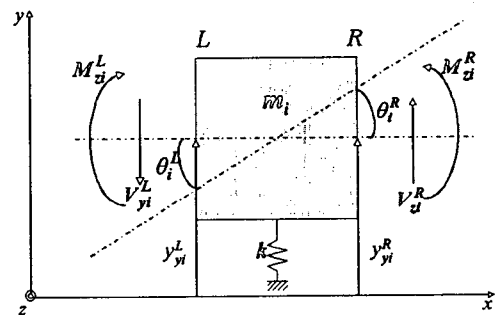


그림 4 x - y 평면에서의 i th 포인트 요소
Fig. 4 i th Point element in x - y plane

그림 4는 x - y 평면에서의 i 번째 질량요소에서 힘의 평형상태를 나타내는 그림이다. 그림에서 R , L 의 첨자는 각 요소의 오른쪽과 왼쪽을 의미하는 것이다. x - y 평면과 x - z 평면에서 포인트 요소의 내력과 변위의 관계로부터 자이로스토크프 모멘트(I_p)를 고려한 뉴턴의 운동방정식을 적용하여, 행렬로 나타내면 포인트 행렬 $[P]$ 는 식 (7)과 같이 9×9 행렬로 표현된다[5].

$$\{S\}_i^R = [P]\{S\}_i^L \quad (7)$$

$$[P]_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m\lambda^2 + K_{yy} & K_{yz} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & F_y \\ K_{zy} & m\lambda^2 + K_{zz} & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & F_z \\ 0 & 0 & -I_p\omega\lambda & I_r\lambda^2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_r\lambda^2 & -I_p\omega\lambda & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

여기서, K_{yy} , K_{yz} , K_{zy} , K_{zz} 는 베어링의 강성[N/m]을 나타내며, I_p 는 극 관성 모멘트[$kg \cdot m^2$], I_r 는 횡관성 모멘트[$kg \cdot m^2$], ω 는 회전체의 휘돌림각속도[rad/sec], λ 는 축의 각속도[rad/sec], 즉 고유진동수이다. 본 논문에서는 휘돌림의 각속도와 축의 각속도가 동기속도로 회전하는 것으로 가정하여 두 속도가 같다고 보았다. 관성을 가지는 집중질량을 표현하는 포인트 행렬에서 F_x , F_y 항은 전자기 및 기계적 가진력이 된다.

2.3.3 전체전달 행렬(Overall matrix)

i 번째 요소에 대한 전달행렬은 식 (6)의 필드행렬과 식 (7)의 포인트행렬의 곱으로 나타내어진다.

$$\{S\}_{i+1}^R = [F]_i [P]_i \{S\}_i^R \quad (8)$$

그림 1과 같이 해석모델의 양 끝단이 질량 요소로 표현된 경우 전체 n 개 질량요소 연결에 대하여 전체 시스템에 대한 전달행렬은 식 (8)을 다음 요소로 전달하여 해석영역 전체의 전달행렬을 얻을 수 있으며 전체전달 행렬의 일반적 수식 표현은 식 (10)과 같다.

$$\{S\}_n^R = [P]_n [F]_{n-1} [P]_{n-1} \dots [P]_2 [F]_1 [P]_1 \{S\}_1^L$$

$$\{S\}_n^R = [T] \{S\}_1^L = [P]_n \prod_{i=n-1}^1 [F]_i [P]_i \{S\}_1^L \quad (9)$$

여기서 포인트 행렬 [P], 필드행렬 [F]는 9×9 행렬을 가지므로 전체 전달행렬 [T]도 9×9행렬이 된다. 따라서 전체 행렬은 요소수에 상관없이 자유도와 외력에 의해 결정된 9×9로서 전체해석영역을 표현할 수 있으므로 식 (9)을 다시 표현하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} y \\ z \\ \theta_y \\ \theta_z \\ V_y \\ V_z \\ M_x \\ M_y \\ 1 \end{bmatrix}_n^R = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & \dots & T_{19} \\ T_{21} & & & & \\ T_{31} & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ T_{91} & & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \\ \theta_y \\ \theta_z \\ V_y \\ V_z \\ M_x \\ M_y \\ 1 \end{bmatrix}_1^L \quad (10)$$

전동기의 회전자의 양 끝단, 즉 첫 번째 질량과 n 번째 질량은 자유단 경계조건이므로 변위와 경사도는 제한을 받지 않고 굽힘모멘트와 전단력은 식 (11)과 같다.

$$V_{y1,ym} = V_{z1,zn} = 0, \quad M_{y1,ym} = M_{z1,zn} = 0 \quad (11)$$

따라서, 강제 응답(forced vibration) 특성은 식 (11)의 경계조건과 회전자에 작용하는 가진력을 식 (10)에 대입하여 각 요소에서의 변위량을 구할 수 있으며, 또한 자유 응답(free vibration)은 가진력을 대입하지 않고 경계 조건만을 전체 전달행렬에 대입하여 전체전달행렬의 고유치를 계산하므로써 고유진동수를 찾을 수 있다.

3. 해석 결과 및 고찰

해석 대상인 SRM의 회전자에 그림 5과 같이 회전자 코어의 전단, 중간, 후단에 위치한 3가지 경우의 질량 불평형이 있다고 가정하였으며 이때 불평형은 1[g.cm]이다. 각 경우의 불평형 질량에 기인한 축의 기준점에서 주파수 응답특성과 임의 회전주파수에서 고정자 위치에 따른 변위를 해석하였다. 표 2에 각 질량 불평형의 크기와 중심 축에서 이루는 각도를 정의하였다.

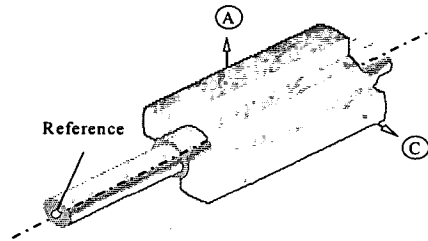


그림 5 회전자에 작용하는 질량불평형 위치
Fig. 5 Position of unbalanced mass acting on the rotor

표 2 질량 불평형의 값과 각도
Table 2 Unbalanced mass value and angle

질량 불평형 구분	불평형 [g · cm]	각도 [°]
A	1	90
B	1	45
C	1	0

3.1 공진속도 및 모드

회전자의 동적 거동을 분석하기 위한 첫 번째 방법으로 회전자에 외부 가진력이 없는 자유진동해석을 수행하였다. 식 (10)에서 전체 전달행렬에 식 (11)의 고정경계 조건을 부여하고 포인트 행렬에 나타나는 가진력의 항을 "0"으로 전체 전달행렬을 구성한 다음 이 전체 전달행렬에 대한 고유치를 구하여 각 고유치에 관한 고유벡터를 계산하여 정규화한다. 계산 과정에서 도출된 고유치가 고유진동수가 되면 각 고유진

동수에 대한 정규화된 고유벡터가 모드형상이 된다.

그림 6은 가진력이 없는 자유 진동 해석으로부터 산출된 고유진동주파수와 각 주파수에 대응하는 고유모드형상을 2차원 평면에 나타낸 그림이다. 그림에서 1차 및 2차 모드는 회전체 자체의 변형은 발생하지 않는 강성모드(rigid mode)로서 109.34[Hz]의 1차모드는 병진 휘돌림 운동(translatory whirling vibration)을 가지고, 187.37[Hz]의 2차 모드는 원추 휘돌림 운동(conical whirling vibration)하는 양상을 가진다. 처음 두 모드에 대한 3차원 공간적 운동의 양상을 그림 7에 나타내었다. 2250[Hz]의 3차모드일 때에는 회전체가 변형하는 특성을 가지며 회전체의 중심축에 변형이 없는 모달점(modal point) 두 곳을 가지게 된다. 이 절점들은 베어링의 위치와 비슷한 위치에 놓이게 되므로 회전체의 진동을 줄이기 위해서는 이 절점을 적절히 피하도록 베어링의 위치를 설계하는 것이 바람직하다. 즉, 베어링은 베어링의 강성(stiffness) 뿐만 아니라 회전체에 놓이는 위치에 따라 회전체의 변위와 운동에 아주 중요한 영향을 미치고 또한 고유진동수를 변화시키므로 자유진동 해석을 통하여 모드의 양상과 고유진동수를 분석하는 것이 필요하며 특히 고속용 전동기에서는 이에 관한 해석이 필수적이다.

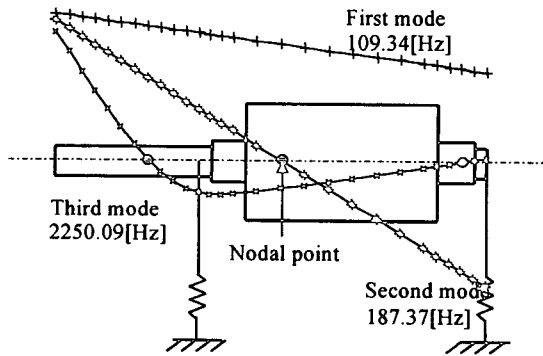
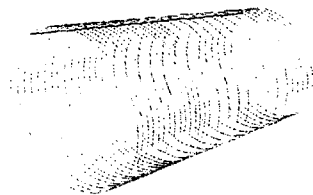
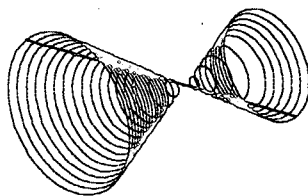


그림 6 2차원 모드형상과 고유진동수
Fig. 6 2-D Mode shapes and resonance frequencies



(a) 1th mode at 109.3[Hz]



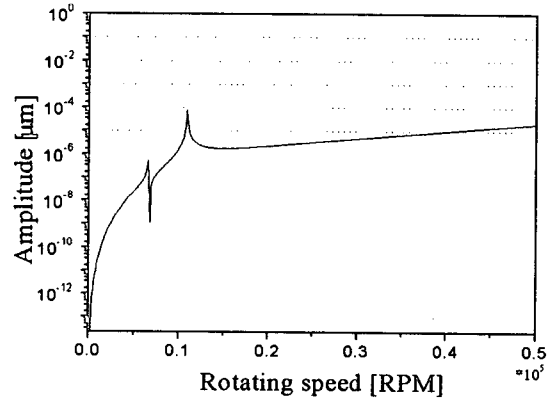
(b) 2nd mode at 187.37[Hz]

그림 7 고유진동수에 대한 3차원 모드형상
Fig. 7 3-D Mode shapes corresponding to natural frequency

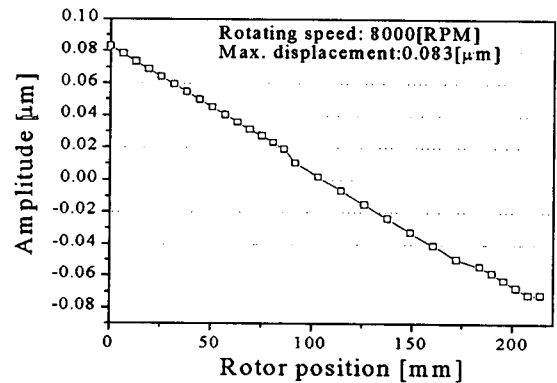
3.2 가진력에 의한 회전자의 응답특성

3.2.1 불평형 질량

그림 8(a), 9(a)와 10(a)는 그림 5의 각 부분에서 질량 불평형 1[g.cm]에 기인한 회전자의 속도에 따른 기준점(reference)에서의 주파수 응답특성을 속도의 함수로써 지수적인 척도(logarithmic scale)로써 표현한 것이다.

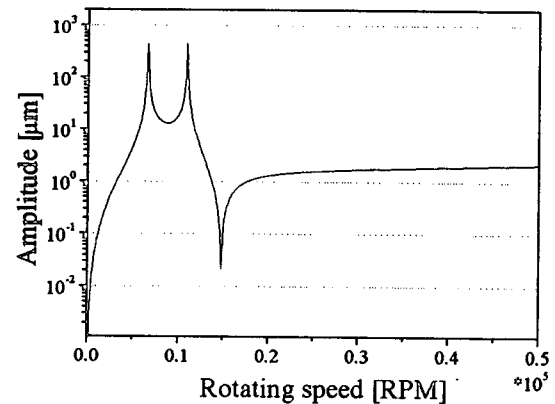


(a) 기준위치에서 주파수 응답특성

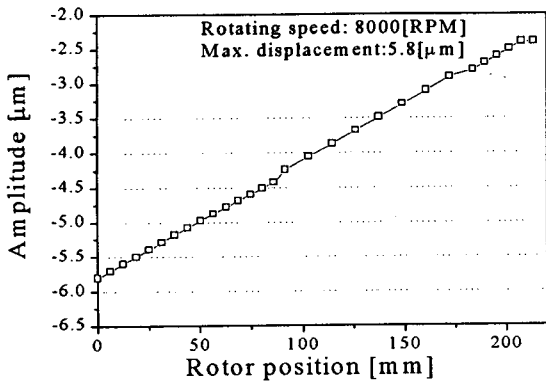


(b) 회전자 위치에 따른 응답특성 (8000 [rpm])

그림 8 A점 질량 불평형에 의한 응답 특성
Fig. 8 Rotor response characteristics due to unbalanced mass at point A



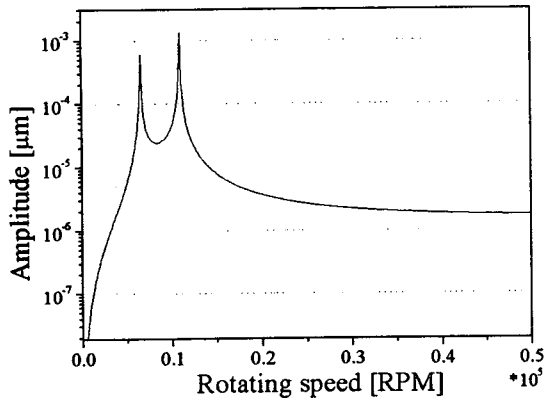
(a) 기준위치에서 주파수 응답특성



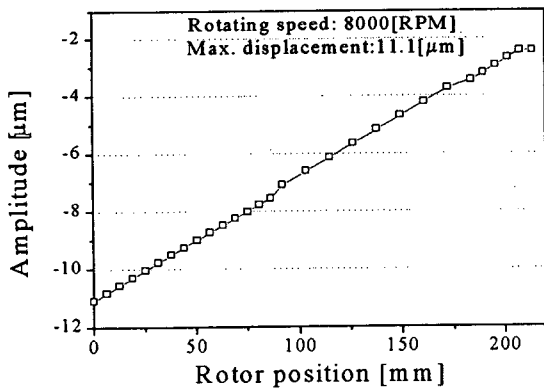
(b) 회전자 위치에 따른 응답 특성 (8000rpm)

그림 9 B점 질량 불평형에 의한 응답 특성

Fig. 9 Response characteristics due to unbalanced mass at point B



(a) 기준위치에서 주파수 응답특성



(b) 회전자 위치에 따른 응답특성 (8000rpm)

그림 10 C점 질량 불평형에 의한 응답 특성

Fig. 10 Response characteristics due to unbalanced mass at point C

표 3에 제시된 질량 불평형 값을 (5) 식에 대입하여 주파수의 함수인 원심력을 전달행렬에 적용하여 회전속도에 따라 기준점에서의 변위량을 계산한 결과이다.

이 결과에서 침두치로 급상승하는 부분은 질량 불평형에

의한 가진력의 휘돌림 주파수가 고유진동주파수 대역을 통과할 때 고유진동수와 일치하여 공진하는 주파수 대역임을 알 수 있다. 즉, 그림 6에 제시된 회전자의 고유진동수에서 공진하게 되어 소음 및 진동이 심하게 발생하게 되고 전동기의 성능을 저하시킨다. 또한 질량 불평형의 위치가 회전자 코아의 뒤로 이동할수록 기준점에서 응답 특성이 큰 양상을 보이는 것은 질량 불평형이 회전자의 뒤로 이동할수록 기준점의 휘돌림 반경이 증가하기 때문이다. 질량 불평형이 A점에서 C점으로 이동할수록 1, 2차 고유진동수 대역에서 회전자의 변위가 증가함을 알 수 있다.

그림 8(b), 9(b)와 10(b)는 회전자가 8000[rpm]으로 회전하는 경우 질량 불평형에 의한 회전자의 위치에 따른 변위량을 나타낸 결과이며 최대변위량을 그래프 위에 표시하였다. 세 가지 경우 모두 회전자의 가장 앞부분에서 최대변위를 가지며 불평형이 C점에 위치한 경우 최대변위는 11.1[μm]를 가진다. 회전자의 앞부분의 변위량은 질량 불평형이 B에서 C로 갈수록 증가하는 반면 회전자의 뒷부분에서의 변위량은 감소하는 양상을 보이고 있다. 그림 7의 1차와 2차 모드형상에서 회전자 코아의 후단은 전단에 비하여 상대적인 변위가 더 크게 작용하므로 A에서 C의 불평형 위치로 갈수록 불평형에 의한 가진력의 영향을 더욱 증가시켜 변위를 일으키기 때문이다.

이상의 결과에서 불평형 질량은 회전자의 회전주파수 또는 불평형 질량이 발생하는 위치에 따라 편심을 일으키는 정도가 다르며 되므로 공극은 일정하지 않게 된다. 그러므로 그림 3과 같이 전자기 흡인력 F_{n1} 과 F_{n2} 가 같지 않으므로 불평형 전자기 가진력이 발생하게 된다. 따라서, 이 불평형 전자기 흡인력의 차이는 회전자를 더욱 편심 시키므로 이에 대한 영향을 조사하였다.

그림 11은 회전자가 8000[rpm]으로 회전하고 있을 때 B점에 10[g.cm]의 질량 불평형과 전자기적 불평형으로 발생한 회전자의 변위를 계산한 것이다. 회전자의 최대 변위는 그림 6에 보이는 바와 같이 축의 앞부분인 기준점에서 175 [μm]이며, 전자기적 힘에 의하여 회전자의 뒷부분에서 변위가 약 10 [μm] 증가하였다. 이 결과에 대한 해석 과정은 다음과 같다.

- ① 불평형 질량에 기인한 원심력 계산
- ② 전달 행렬법으로 부터 회전자 위치에 따른 변위 계산
- ③ ② 단계에서 계산된 변위로부터 전자기적 흡인력의 차이를 계산
- ④ 불평형 질량에 의한 원심력과 불평형 전자기 가진력을 중첩하여 전달 행렬법 재 계산 수행.

SRM은 회전자의 극과 고정자의 극이 일치할 때 흡인력(global radial force)이 회전자에 가장 크게 작용하게 되므로 두 극이 일치된 상태에서 전자기장 수치해석으로부터 그림 2과 같이 전자기 흡인력 F_{n1} 과 F_{n2} 의 흡인력의 차이를 계산하였다. 본 논문에서는 ③단계 해석의 편의를 위하여 전자기 흡인력이 가장 크게 발생하는 고정자의 극과 회전자의 극이 일치된 상태에서 전자기장 수치해석을 통하여 공극을 변화시켜가며 불평형 전자기 가진력을 공극의 함수로 만들어 사용하였다.

그림 12는 유한요소 해석으로부터 등포텐셜 분포를 도시한 것이며, 그림 13은 질량 불평형으로 175[mm] 회전자의 편심

이 발생하였을 때 편심 전·후의 공극 자속밀도의 분포를 비교한 그림이다. 이 그림에서 공극 자속밀도의 차이만큼이 불평형 전자기 가진력의 차이로 회전자에 작용하게 되므로 편심은 더욱 크게 발생하게 된다.

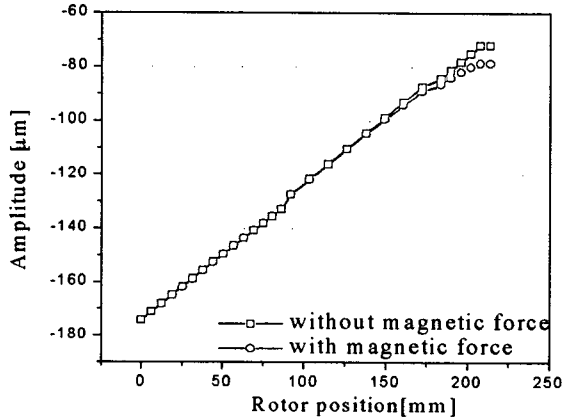


그림 11 전자기 가진력에 의한 회전자의 변위
 Fig. 11 Rotor displacement due to electromagnetic force

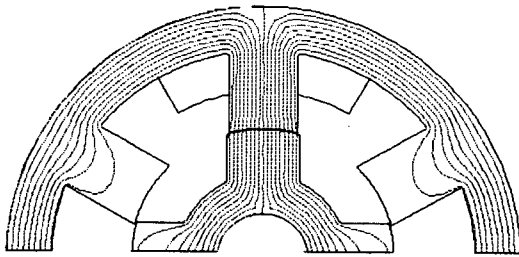


그림 12 정렬된 위치에서의 등포텐셜 분포도
 Fig. 12 Equipotential distribution at aligned position

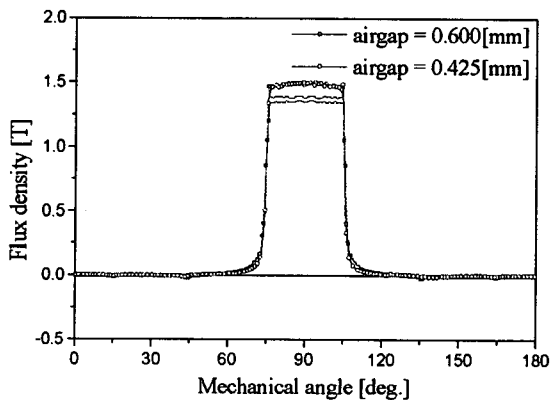


그림 13 공극자속 밀도의 비교
 Fig. 13 Comparison of air-gap flux density

4. 결 론

회전체와 탄성축, 베어링으로 이루어진 회전자는 위험속도

(고유진동수)를 가지고 있다. 만약 회전자의 중심이 어떤 원인에 의하여 조금이라도 편심되어 있다면 위험속도에서는 매우 큰 축휨이 발생하게 되는데 이는 회전하고 있는 불평형이계의 고유진동수와 동조하여 회전자를 여진하기 때문이다. SRM 회전자의 경우 다른 전동기에 비하여 작은 공극을 가지고 있으므로 이러한 회전자의 불평형을 고려한 응답특성해석이 반드시 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 6/4 SRM의 회전자-베어링 시스템을 대상으로 전달행렬법을 사용하여 회전자의 동적 거동을 살펴보았다. 질량불평형에 기인한 회전자 속도에 따른 주파수 응답특성 해석으로부터 공진 주파수 대역에서 큰 변위가 발생함 보였으며 회전자 위치에 따른 변위 분포로부터 공극의 변화를 예측할 수 있었다. 이러한 질량불평형 위치가 회전자의 동적 거동에 미치는 영향을 회전자의 모드형상과 연계하여 원인을 분석하였다. 또한 불평형 전자기적 유·무에 따른 회전자의 편심을 비교하였다.

그러나, 본 논문에서는 회전자 코아와 축이 완전히 결합된 상태이며 코아의 적층을 고려하지 않은 하나의 강체로 가정하여 굽힘 진동만을 해석한 것이므로 이들을 고려한 정확한 해석 방법과 불평형 질량의 영향을 측정할 수 있는 방법에 관한 연구의 지속적인 진행이 필요하다. 또한, 전자기적 Radial force 외에도 Tangential force가 회전체에 미치는 영향에 관한 분석도 추후 이루어져야 할 것으로 판단된다.

본 논문에서 제시된 해석 방법과 결과는 불평형에 의한 회전자의 거동과 공극의 변화를 예측하고 회전자의 평형잡이 (balancing) 기술에 이용할 수 있을 뿐만 아니라 진동을 고려한 회전자의 설계 자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

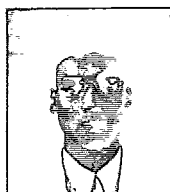
본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계 기술 센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] A. Arkkio, "Unbalance magnetic pull in cage induction motors with asymmetry in rotor structures," IEE EMD97 Conf., No. 444, 1997.
- [3] K. C. Maliti and C. Sadarangani, "Modelling magnetic noise in induction machines," IEE EMD97 Conf. No. 444, pp. 406-410, 1997.
- [4] Y. Tang, "Characterization, numerical analysis and design of switched reluctance motors," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 33, No. 6, pp. 1544-1552, 1997.
- [5] 하경호, 홍정표, "전동기의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석," 대한전기학회지,

- Vol. 48, No. 9, 1999.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Y. Liu, Y. S. Lee, H. K. Jung and S. Y. Hahn, "3D Thermal stress analysis of the rotor of an induction motor," proc. of IEEE COMPUMAG, Sapporo, Japan, Oct., pp.582-583,1999.
- [9] Hatto Schneider, Balancing Technology, Schenck, 1994
- [11] D. C. Han and H. J. M, "Lateral vibration analysis of the rotor system with magnetic forces," Proc. of the 16th International Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Vo. 1, pp. 87-96, 1996.
- [12] R. Subbiah, A. S. Kumar and T. S. Sankar, "Transient dynamic analysis of rotors using the combined methodologies of finite elements and transfer matrix," Appl. Mecha. Trans. ASME, June 1988, pp.448-452.
- [13] H. K. Ha, J. P. Hong, G. T. Kim and K. C. Chang, "Orbital analysis of rotor due to unbalance electromagnetic force for switched reluctance motor," proc. of IEEE COMPUMAG, Sapporo, Japan, Oct., pp.48-49,1999.
- [14] 양보석, 펌프의 진동, 세종 출판사, 1992.
- [15] J. S. Rao, Rotor dynamics, John Wiley&Sons, 1991.
- [16] M. J. Goodwin, Dynamics of rotor-bearing systems, John Wiley&Sons, 1991.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] M. Besbes et al., "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors," IEE Proc. Electric Power Application., Vol. 145, No. 5, pp. 462-468, 1998.

저 자 소 개



하 경 호 (河京鎬)

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

Tel : 0551-279-8281, Fax : 0551-263-9956
E-mail : haroom@netian.com



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(공학박사). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수

Tel : 0551-279-7517, Fax: 0551-263-9956
E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr



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(공학박사). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~1997년 일본 早稻田大 客員研究員

Tel : 0551-279-7515, Fax : 0551-263-9956
E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr



장 기 찬 (張琪讚)

1962년 10월 20일생. 1986년 울산대 전기 및 전자공학과 졸업. 1988년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 창원대 대학원 박사과정 수료. 1988년~현재 한국 전기연구소 선임연구원

Tel : 0551-280-1482
E-mail : kcchang@keri.ac.kr