

SRM의 설계변수에 따른 고정자의 고유진동수 해석

하경호, 안호진, 강경호, 홍정표, 김규탁, \*장기찬  
 창원대학교 전기공학과, \*한국전기연구소 Mechatronics연구그룹

Natural Frequency Analysis of Stator in Switched Reluctance Motor  
 According to Design Parameters

Kyong-ho Ha, Ho-jin Ahn, Kyong-ho Kang, Jung-pyo Hong, Gyu-tak Kim, \*Ki-chan Chang  
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., \*KERI Mechatronics group

**Abstract** - The interaction of electromagnetic forces and mechanical structure of switched reluctance motors(SRM) is the major cause of the noise and vibration. The stator part in SRM produces the most vibrations. Therefore, it is necessary to know the natural frequencies of the stator. In this paper, the variation of natural frequencies according to the design parameters is investigated to avoid the resonance. The natural frequency of the tested motor is founded by the frequency response function obtained by a experimental modal analysis.

1. 서 론

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. 따라서, 가진원 등이 고유주파수와 일치하지 않도록 설계하는 것이 필요하다.

특히, 여러 가지 전동기들 중에 스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 고속운전이 가능하다는 점등의 많은 장점을 가지고 있지만 진동과 토크 리플이 심하다는 문제점이 단점으로 지적되고 있다. 이는 고정자의 한 상에서 다음 상으로 여자가 전이되는 전류(轉流)시에 발생하는 급격하게 흡인력이 변하기 때문이다. 또한, 고정자에 작용하는 전자기 가진력의 여자 패턴이 고정자의 타원모드에 해당하는 고유진동수와 근접한 주파수에서 운전될 경우에 진동의 영향이 크게 발생하게 된다. 따라서, 진동이나 소음을 줄이기 위해서는 설계 단계에서 고정자의 고유주파수를 예측하여 전자기적 성능을 만족하도록 설계 해야한다 [1,2]. 전동기의 구조물 해석 방법에는 자유진동과 강제 진동이 있으나 본 논문에서는 자유진동에 의한 고유진동수의 변화만을 다루었다[2-3].

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계시 각 설계 변수의 변화가 고유진동수에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, 재질상수와 관련된 영계수, 밀도, 포아송비와 축중길이, 요크폭의 설계 변수의 변화에 따라 이론적 모델 해석을 수행하여 고유진동수의 변화를 분석하였으며 또한 전자기 수치해석을 통하여 전동기 구동특성의 변화를 해석하였다. 재질상수중 전자의 3가지는 구조강판의 재질과 종류에 따라 다른 값을 가지는 기계적 물성치로서 전동기의 구동 특성에 큰 영향을 주지 않고 고유진동수를 회피 할 수 있는 요소이다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

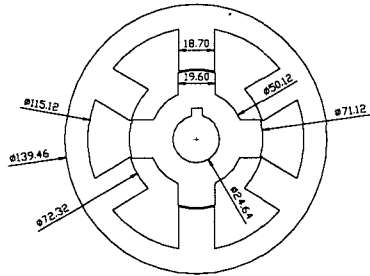


그림 1 SRM 전동기의 기본 치수

표 1 기계적 물성 상수

구조강판 밀도	7850 [ $kg/m^3$ ]	축방향 길이	92.45 [ $mm$ ]
포아송비	0.24	영 계수	200 [ $Gpa$ ]
Possion's ratio		Young's modulus	

그림 1은 6/4 SRM 전동기의 기본 치수를 나타내며, 모드 해석 및 고유진동수 분석을 위한 6/4 SRM 전동기의 기본 사양은 출력이 1(kW), 정격 회전속도 2,000(RPM)으로 3상 구동방식을 채택하고 있으며 표 1은 고정자의 자유진동 해석에 필요한 물성치이다.

2.2 해석 이론

모드와 고유진동수를 구하기 위해 상용 프로그램인 Ansys를 이용한 3차원 유한요소법(Finite Element Method : FEM)이 적용되었으며 감쇠를 고려하지 않은 운동방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$[M]\ddot{x} + [K]\{x\} = 0 \tag{1}$$

이 때,  $[M]$ 은 질량행렬이고,  $[K]$ 는 강성행렬,  $\{x\}$ 는 변위를 나타내고 있다. 변위와 가속도는 시간에 따라 변하므로 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\{x(t)\} = \{x\}e^{i\omega t} \quad \ddot{x} = -\omega^2 \{x\}e^{i\omega t} \tag{2}$$

이상의 결과를 식 (1)에 대입하면 다음 식 (3)이 된다.

$$([K] - \omega^2[M])\{x\}e^{i\omega t} = 0 \tag{3}$$

변위는 0이 아니기 때문에 식 (3)을 만족시키기 위해서는 아래의 행렬식을 만족해야 한다.

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \tag{4}$$

식 (4)의 만족시키는 고유치  $\omega$ 가 시스템의 고유진동수가 된다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 고유진동수의 측정

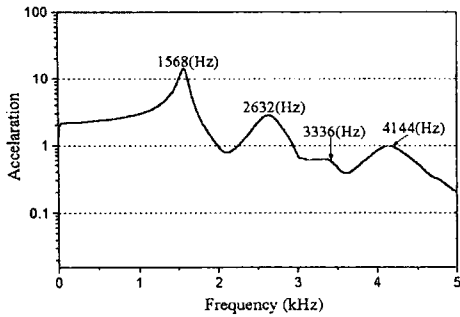


그림 2 실험적 모달 해석을 통한 주파수 응답함수

표 2 실험치와 이론치의 고유진동수 비교

	1차 모드	2차 모드	3차 모드	4차 모드
실험치	1568	2632	3336	4144
이론치	1553	2819	3655	4567
오차	1.0	6.6	8.7	9.3

그림 2는 실험적으로 측정된 주파수 응답 특성 (frequency response function) 결과이며 고정자의 고유진동수를 그림 위에 표기하였다. Impact hammer 에 의한 임펄스 충격으로 발생한 고정자의 기계적 변위에 대한 가속도의 응답신호를 주파수 분석한 것으로 그림에서 피크치 부분이 임펄스 충격에 의해 진동하는 고정자의 고유진동수가 되는 것이다. 특히, 첫 번째 고유진동수인 1568(Hz)는 타원모드로서 SRM의 가진력의 여자 패턴에 의한 고정자의 변형과 이 모드의 움직임이 일치한다. 표 2에 이론적 해석으로부터 얻은 고유진동수와 실험치를 비교한 것이다.

### 3.2 재질특성에 따른 고유진동수 변화

SRM의 고정자 재질의 물질 상수인 밀도, 탄성계수, 프아송 비에 따른 고정자의 고유진동수의 변화양상을 분석하였으며, 이 파라미터 변화의 범위는 본 해석 모델의 초기치를 기준으로 규소강판의 재질이 가질 수 있는 범위 내에서 선정하였다.

표 3과 그림 3은 밀도의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 탄성계수는 200 [GPa], 프아송비는 0.24로 두었다. 고정자의 밀도가 증가할수록 전 모드에 대한 고유진동수는 낮은 값을 가진다.

표 4와 그림 4는 탄성계수의 변화에 따른 고유진동수를 해석한 결과를 나타낸다. 이 때 질량밀도는 7.85(g/cm<sup>3</sup>), 프아송비는 0.24로 두었다. 표 4와 그림 4의 결과에서 탄성계수가 커질수록 고유진동수는 증가하는 양상을 보이고 있다. 탄성계수는 거시적인 관점에서 물체의 강성을 결정하므로(운동방정식의 K) 질량이 동일할 때 구조의 재질이 외부 가진력에 대해 큰 탄성계수를 가지는 경우 고유진동수는 그렇지 않은 경우보다 크게 나타남을 알 수 있다.

표 5와 그림 5는 프아송비의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타내는 결과이다. 표 5와 그림 5의 결과로부터 1, 3, 4차 모드는 프아송비의 증가에 따라 고유진동수가 증가하나 2차 모드는 반대로 고유진동수가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 1, 3, 4차 모드는 반경방향의 모드인 반면 2차 모드는 축방향 모드이기 때문에 판단된다.

### 3.3 설계 변수에 따른 고유진동수 변화

SRM의 설계 변수중 고정자 요크 폭과 적층길이를 변

수로 하여 이들 길이의 변화가 고정자의 고유진동수에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고자 한다.

표 6과 그림 6은 요크 폭을 8.17 - 16.17[mm]까지 변화시켰을 때 각 모드에서의 고유진동수를 나타낸다. 이 때 물성치는 질량밀도 7.85(g/cm<sup>3</sup>), 탄성계수 200[GPa], 프아송 비는 0.24로 하였다. 요크 폭의 증가는 표 6와 그림 6의 결과와 같이 고유진동수의 증가를 가져온다. 요크 폭의 증가는 질량의 증가를 가져오므로 고정자의 고유진동수는 감소하는 양상일 것 같으나 반경방향의 진동 관점에서 보면 요크 폭의 증가는 전체 시스템의 강성을 증가시키기 때문에 오히려 고유진동수가 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히, 3, 4차모드의 고유진동수의 변화가 더욱 급격하다.

표 7과 그림 7은 적층길이의 변화에 따른 고유진동수의 변화를 나타내고 있다. 이 결과에서 적층길이를 증가시켜도 1, 3, 4차 모드는 거의 변화가 없으나 2차 모드는 적층길이의 증가에 따라 고유진동수가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 1, 3, 4차 모드가 반경방향 모드임에 반해 2차 모드는 축방향 모드(lamination vibration mode)이기 때문이다. 따라서, 고정자의 외경에 비하여 축방향 길이가 길수록 축방향 진동은 크게 발생하게 되므로 고정자의 외경과 축방향 길이의 비의 적절한 선정이 필요하다. 또한 축방향 적층 길이의 변화는 1차 모드인 타원모드의 고유진동수 변화에는 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

표 3 밀도변화에 따른 고유진동수

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	1차 모드 (Hz)	2차 모드 (Hz)	3차 모드 (Hz)	4차 모드 (Hz)
7.60	1578.0	2865.7	3714.8	4642.1
7.65	1572.8	2856.3	3702.7	4626.9
7.70	1567.7	2847.0	3690.6	4611.9
7.75	1562.6	2837.8	3678.7	4597.0
7.80	1557.6	2828.7	3666.9	4582.2
7.85	1552.6	2819.7	3655.2	4567.6

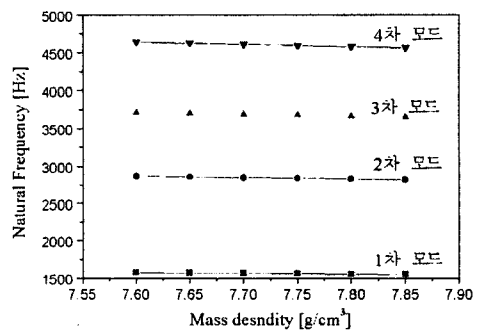


그림 3 질량 밀도에 따른 고유진동수

표 4 탄성계수(영 계수)의 변화에 따른 고유진동수

탄성계수 [GPa]	1차 모드 (Hz)	2차 모드 (Hz)	3차 모드 (Hz)	4차 모드 (Hz)
200	1552.6	2819.7	3655.2	4567.6
201	1556.5	2826.7	3644.3	4579.0
202	1560.4	2833.8	3673.4	4590.4
203	1564.2	2840.8	3682.5	4601.7
204	1568.1	2847.7	3691.6	4613.1
205	1571.9	2854.7	3700.6	4624.4

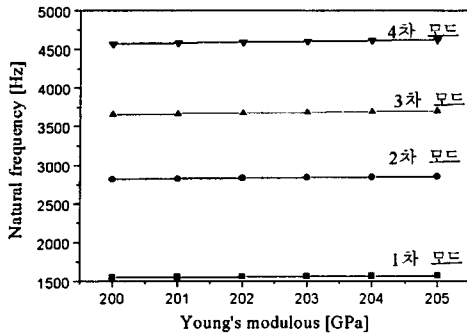


그림 4 탄성계수에 따른 고유진동수

표 5 프아송 비의 변화에 따른 고유진동수

프아송비	1차 모드 [Hz]	2차 모드 [Hz]	3차 모드 [Hz]	4차 모드 [Hz]
0.20	1542.9	2842.8	3632.8	4539.2
0.22	1547.5	2831.0	3643.4	4552.6
0.24	1552.6	2819.7	3655.2	4567.6
0.26	1558.3	2808.9	3668.2	4584.3
0.28	1564.6	2798.8	3682.5	4602.7
0.30	1571.3	2789.1	3698.1	4622.9

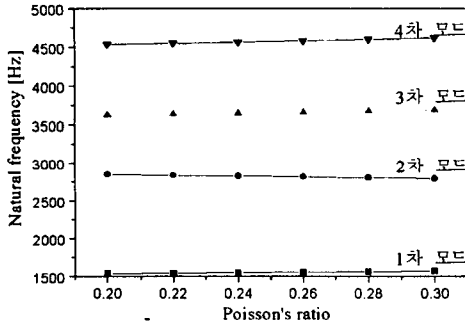


그림 5 프아송비에 따른 고유진동수

표 6 요크 폭의 변화에 따른 고유진동수

요크 폭 [mm]	1차 모드 [Hz]	2차 모드 [Hz]	3차 모드 [Hz]	4차 모드 [Hz]
8.17	1051.1	2171.5	2453.1	3209.3
10.17	1310.6	2523.9	3075.7	3923.8
12.17	1552.6	2819.7	3655.2	4567.6
14.17	1781.7	3105.8	4196.9	5173.4
16.17	1993.5	3352.4	4692.4	5715.0

이상의 결과에서 재질의 기계적 물질상수의 변화는 고정자 고유진동수의 변화에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 고정자 요크폭과 적층길이의 변화는 고정자의 고유진동수를 현저히 증가 또는 감소시키므로 전동기의 구동 특성을 유지하면서 특정 고유진동수를 회피할 수 있는 파라미터로 사용될 수 있으리라 판단된다.

#### 4. 결 론

유한요소법을 이용한 구조해석을 이용하여 설계시 고려 되는 몇 가지 설계 변수들이 6/4 SRM의 고유진동수와

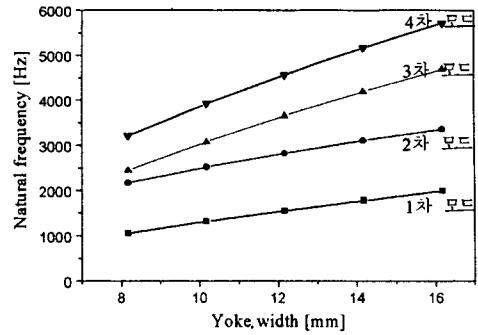


그림 6 요크 폭의 변화에 따른 고유진동수

표 7 적층 길이의 변화에 따른 고유진동수

적층 길이 [mm]	1차 모드 [Hz]	2차 모드 [Hz]	3차 모드 [Hz]	4차 모드 [Hz]
73.45	1550.5	3085.7	3648.6	4570.1
83.45	1552.6	2955.2	3653.9	4574.2
93.45	1552.6	2819.7	3655.2	4567.6
103.45	1555.5	2717.2	3661.2	4580.0
113.45	1556.5	2614.0	3663.8	4582.2

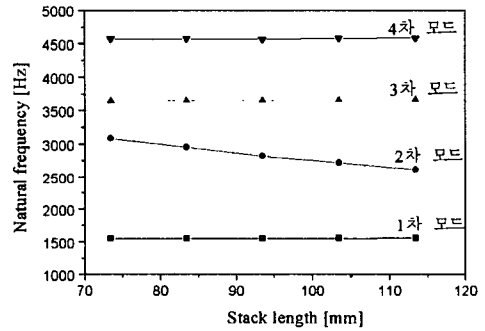


그림 7 적층길이의 변화에 따른 고유진동수

모드에 미치는 영향을 분석하였다. 밀도, 탄성계수, 프아송비 등의 물질 상수 값은 고정자의 고유진동수에 큰 영향을 주지 않으므로 이들의 영향이 전동기의 진동특성에 크게 작용하지는 않지만 요크 폭이나 적층길이의 변화는 그 영향이 뚜렷하게 나타났다. 이상의 결과는 스위치드 전동기의 설계시 전동기의 고유진동수를 고려한 저진동 전동기의 설계에 도움이 될 것이다.

#### (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] 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.
- [3] 홍정표, 하경호, 김규탁, "스위칭에 따른 전자기 가진력에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 변위 해석," *대한전기학회논문지*, Vol. 49, No.1, pp.20-26, 2000.
- [4] 홍정표, 하경호 "전동기의 전자기 가진력에 의한 고정자 변위 및 고유진동수 해석," *대한전기학회지*, Vol. 48, No. 9, pp. 18-24, 1999.