

매입형 영구자석 전동기의 소음 저감을 위한 최적 설계

이상호*, 이석희*, 홍정표*, 황상문**, 김영균***
 창원대학교 전기공학과*, 부산대학교 기계공학과**, 삼성전자***

Optimal Design to reduce Acoustic Noise in Interior Permanent Magnet Motor

Sang-Ho Lee*, Suk-Hee Lee*, Jung-Pyo Hong*, Sang-Moon Hwang**, Young-Kyoun Kim***
 Changwon National University*, Pusan National University**, Digital Appliance Business Samsung Electronics Co. Ltd.***

Abstract - This paper presents methods to reduce acoustic noise in interior permanent magnet (IPM) motor. Mechanical and magnetic sources are considered to reduce noise of the machine, and structural and electromagnetic designs are performed. In the structural design to reduce mechanical source, the structural resonances are moved to higher frequency for enhancement of stiffness. Then, the electromagnetic design to reduce magnetic source, the amplitudes of magnetic force harmonics are reduced by using objective function of response surface methodology (RSM). The validity of the design process and objective functions is confirmed with their calculated and experimental results.

1. 서 론

고출력화 및 소형화 추세에 맞춰 이를 구성하는 전동기 또한 높은 출력 밀도가 요구됨에 따라, 이에 부응하는 전동기로서 매입형 영구자석 전동기 (Interior Permanent Magnet Motor : 이하 IPM 전동기)가 각광받게 되었다 [1]. IPM 전동기는 영구자석에 의한 마그네틱 토크 (Magnetic torque)뿐만 아니라 릴럭턴스 토크 (Reluctance torque)를 이용함에 따라 높은 출력 밀도를 가지는 장점이 있다. 그러나 고출력밀도의 IPM 전동기는 구조물에 미치는 전자기력의 영향이 커지고 릴럭턴스 변화로 인해 유도기 또는 표면부착형 영구자석 전동기 (Surface-mounted Permanent Magnet Motor : 이하 SPM 전동기)에 비해 더 많은 진동/소음을 가진다는 단점이 있다 [2].

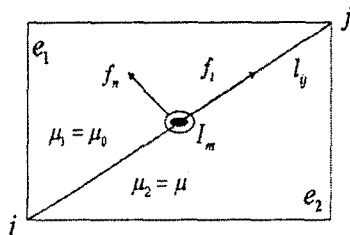
IPM 전동기에서 발생하는 진동/소음의 주요 원인에는 크게 전자기적인 원인, 기계적인 원인, 그리고 공기역학적인 원인 등으로 분류할 수 있다 [3]. 이러한 원인 중에서 회전자 이동에 따른 릴럭턴스의 변화는 고정자와 회전자에 작용하는 반경방향의 힘의 변화를 야기하여 전동기의 구조물을 진동시키는 주요한 원인이 된다. 이는 진동/소음의 전자기적인 원인으로 고정자와 회전자 형상뿐만 아니라 권선 방식과 운전 방식에 따라서 그 영향이 달라지므로, 이를 고려한 신뢰성 있는 설계/해석 기술 확보가 시급하게 요구된다 [4].

본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 소음 저감을 위한 구조적 설계와 전자기적 설계에 대해서 다룬다. 구조적 설계의 목적은 동일한 전자기력에 대해 진동을 억제시키기 위하여 고정자의 강성(stiffness)을 증가시키는 것이다. 그리고, 구조물의 진동은 공진에 의해서 발생하므로 전자기적 설계의 목적은 구조물의 공진주파수 대역에 해당하는 normal force의 고조파 성분을 저감시키는 것이다. 특히 전자기적 설계에서는 반응표면론법(Response Surface Methodology, 이하 RMS)을 이용해서 normal force의 고조파 성분을 저감시킨다.

2. 해석 이론

2.1 등가자화전류법

등가자화전류법(Equivalent Magnetizing Current, 이하 EMC)은 힘을 계산하는 하나의 방법으로 자체해석에서 얻은 자속분포로부터 구해지는 모든 면에서의 자화전류를 이용하여 각 요소에 작용하는 힘들을 구하는 방법이다[5]. 2차원 문제에서 자속분포를 1차 삼각형 요소들 사용하여 구하면 요소내에서 자속밀도 B 와 자화의 세기 M 은 일정하게 된다. 따라서 요소들 사이의 경계면에 자화전류가 존재하게 된다. 그림 1은 요소 e_1 이고 요소 e_2 사이의 경계변위의 전류 \vec{I}_m 을 나타낸 것이다.



<그림 1> 두 재질사이의 등가자화전류

철심 내부 요소의 등가자화전류는 상쇄되고 투자율이 다른 요소 경계에 만 전류가 분포한다. 이 때 등가자화전류는 식(2.1)과 같다.

$$\vec{I}_m = \frac{1}{\mu_0} \int_s \nabla \times \vec{M} \cdot \vec{ds} = \frac{1}{\mu_0} (M_{1i} - M_{2i}) e_{ij} \quad (2.1)$$

여기서 M_{1i} , M_{2i} 는 각각 경계면에서의 요소 e_1 과 요소 e_2 의 자화 세기 접선성분을 나타낸다.

등가자화전류를 이용한 Normal force는 다음과 같이 표현된다.

$$f_n = \frac{1}{2} (H_{n1} B_{n1} - H_{t1} B_{t1}) - \frac{1}{2} (H_{n2} B_{n2} - H_{t2} B_{t2}) \quad (2.2)$$

여기서 B_{n1} , B_{t1} , H_{n1} , H_{t1} 은 공기역역 성분이고 B_{n2} , B_{t2} , H_{n2} , H_{t2} 은 철심영역에 대한 성분이다.

2.2 목적함수

등가자화전류를 이용해 산정된 normal force의 고조파는 RSM의 목적함수로 이용된다. 인간의 귀는 음압에 대해서 선형적이 아니라 대수적으로 반응하므로 목적함수는 청감보정곡선(Frequency Weighting Curve)에서 소리 신호의 측정치와 상가심과 유효성이 가장 좋은 상관관계를 나타내는 A weighting curve를 반영한다. 그리고 고정자의 공진주파수 대역에 고조파 영향을 부각시키기 위하여 factor를 더하였다. 식(2.3)은 목적함수를 산정하는 방법을 나타낸 것이고 목적함수의 제약조건은 정격토크 만족이다.

$$F_{obj} = 10 \log \sum 10^{\frac{h}{10}} \quad (2.3)$$

여기서 h 는 고정자 치에 영향을 미치는 normal force의 고조파로서 청감보정곡선의 A weighting curve와 고정자의 공진주파수 대역에 factor를 더한 것이다.

3. 본 론

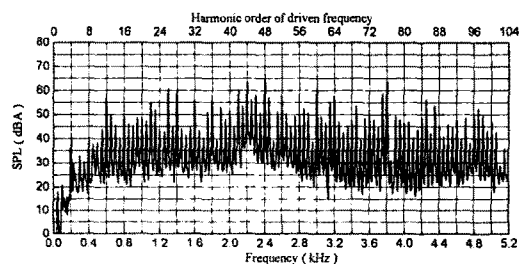
3.1 Prototype model의 특성 분석

Prototype model의 사양과 전동기 결합상태에 따른 고정자의 공진주파수는 표 1과 같다. 4극 6슬롯 구조인 Prototype model의 권선 방식은 집중 권이며 구동방식은 6-step으로 구동된다.

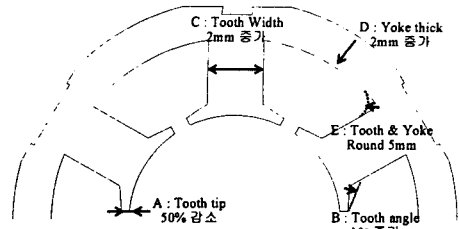
그림 2는 정격운전 상태에서 Prototype model의 소음 측정결과를 나타낸 것이다. Prototype model은 운전 주파수의 4배수로 간격으로 소음이 발생하는데 이는 고정자 치에 미치는 normal force의 주파수와 일치한다. 주파수 4kHz에서 소음이 발생하는 것은 제어기의 PWM(Pulse Width Method) 주파수에 의한 것이며 주파수 1.8~2.6kHz에서의 소음은 전동기 및 전동기를 지지하고 있는 구조물의 공진영향이다.

<표 1> Prototype model의 특성

정격부하	80 kgf-cm	고정자의 공진 주파수 (1차 모드)	
정격속도	3000 rpm	고정자 단품	1.5 kHz
정격전류	14 Arms	고정자, 하우징 결합	1.8 kHz
PWM frequency	4 kHz	전동기, Jig 결합	2.6 kHz



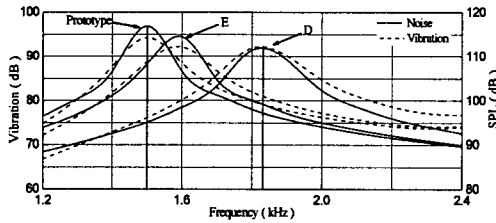
<그림 2> Prototype model의 소음 측정결과(@3000rpm, 80kgf-cm)



〈그림 3〉 구조적 설계의 설계인자 (@Prototype model)

〈표 2〉 Modal analysis

f_0 (Hz)	Prototype	A	B	C	D	E
1st,2nd	1503	1523	1492	1503	1843	1579
3rd	3370	3454	3325	3339	4265	3459
4th	4339	4387	4311	4436	5257	4872



〈그림 4〉 공진주파수-진동-소음 분석

3.2 구조적 설계

그림 3은 고정자 설계변수 및 치수 변화 정도를 나타낸 것이고 표 2는 설계변수에 대한 modal analysis 결과를 나타낸 것이다. 표 2에서 변수 A, B, C에 의한 1차 공진 주파수(f_0)는 Prototype model에 비해 큰 변화가 없다. 그러나 변수 D와 E에 의한 1차 공진 주파수는 각각 1843, 1579Hz로 Prototype model보다 증가하였으므로 설계변수 D와 E는 고정자의 공진 주파수를 변화시키는 주요 인자임을 알 수 있다.

설계 변수 변화에 따라 고정자의 공진에 의한 진동/소음의 변화 양상을 알아보기 위해 주파수 응답(Frequency Response Function : 이하 FRF)을 비교하였다. 해석 조건은 unit force를 치의 표면 중심에 가진력으로 사용하였다. 그림 4는 공진주파수, 진동 그리고 소음의 상관관계를 보여주는 것으로서 공진 주파수가 높아질수록 진동량이 감소한다는 것을 나타내고 있다. 특히 설계 변수 D인 yoke 두께를 2mm증가시켰을 때 고정자의 강성증가로 인하여 진동량이 감소하고 소음도 작게 발생하였다. 이로부터 진동은 소음을 발생시키는 원인이 된다는 것을 알 수 있다.

위와같은 결과를 토대로 고정자의 yoke 두께 증가 및 고정자와 치를 연결하는 link부 보안을 통해서 Prototype model에 비해 구조적으로 1차 공진 주파수가 높아지고 강성이 증가한 고정자 형상을 설계하였다. 구조적 설계를 통해 설계된 고정자의 1차 공진 주파수는 약 1.9kHz이다.

3.3 전자기적 설계

구조적 설계를 통하여 강성이 증가된 고정자 형상을 이용해서 고정자 치에 미치는 normal force의 고조파 성분을 저감시키기 위한 자기적 설계를 수행한다.

그림 5는 DOE(Design of Experiment)와 RSM(Response Surface Methodology)을 이용한 전자기적 설계 과정을 나타낸다. 먼저 설계 인자들 중에서 normal force의 고조파 성분에 영향을 미치는 주요 인자를 추출한 다음 목적함수를 이용해서 RSM을 수행한다.

목적함수에 영향을 미치는 주요 인자를 찾아내기 위해 그림 6의 전자기적 설계의 설계인자와 표 3에 있는 설계영역을 이용하여 DOE 수행하며 실험방법은 완전요인실험(Full factorial design)이다. 고정자 치에 영향을 미치는 normal force의 고조파 성분은 pole arc와 slot open 변화에 따른 유효 자속량의 영향을 받으므로 목적함수에 영향을 미치는 주요 인자가 된다.

표 3에 나타나 있는 RSM의 설계변수 및 영역에 대해 중심합성법(Central composite design)에 의한 13번의 실험을 수행한다. 그림 7은 RSM의 반응표면을 나타내며 normal force의 고조파 성분을 저감시키기 위해서는 slot open을 감소시키고 pole arc를 증가시켜야 한다. Pole arc와 slot open의 최적 설계 형상치수는 각각 72°, 4.2mm이다.

3.4 실험결과

기술된 설계방법 및 목적함수에 대한 신뢰성을 검증하기 위하여 Prototype과 Optimal model(이하 OPT)에 대한 소음실험을 수행하였다. 소음실험은 암소음이 41.0dBA인 무향실에서 이뤄졌으며 전동기로부터 1m 떨어진 위치에서 마이크로폰을 이용하여 소음을 측정하였다.

그림 8은 정격운전 상태에서 Prototype model과 OPT의 소음 측정결과를 1/3 Octave band로 나타낸 것이다. Prototype model 및 OPT의 전체 소음은 각각 74.6, 69.7dBA로 소음이 약 5dBA 저감되었다. OPT는 Prototype model에 비해 고정자의 공진 주파수 대역인 1.6~2.4kHz에서의 소음이 저

감되었고 자기회로 변화에 따른 인덕턴스 증가로 인하여 PWM주파수 부근에서의 소음도 저감되었다.

4. 결 론

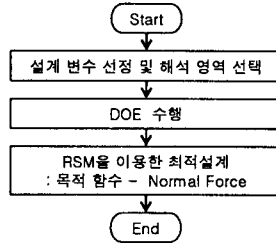
본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 소음을 저감을 위한 최적설계에 대해 다루었다. 기술된 설계안을 토대로 자기 회로를 설계하고 소음 실험을 한 결과 전체 소음이 약 4~5dBA 감소되었다.

IPM 전동기의 소음을 저감시키기 위해서는 전동기의 구조적인 측면과 전자기적 측면에 대한 개선이 필요하다. 구조적인 측면에서는 고정자의 강성 및 기구적 안정성을 증대시키는 설계가 요구된다. 그리고 전자기적 측면에서는 고정자의 공진 주파수 대역에 해당하는 normal force의 고조파 성분을 저감시키는 설계가 필요하다.

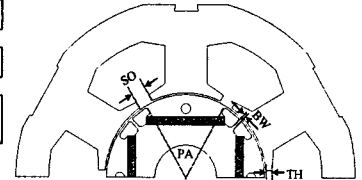
본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업 (RT104-01-03) 지원으로 수행되었습니다

참 고 문 헌

- [1] Sung-Il Kim, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong, Yoon Hur and Yeon-Hwan Jung, "Optimization for Reduction of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motor by Using Taguchi Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, No. 5, pp.1796-1799, May 2005.
- [2] Y. Okada, Y. Kawase and S. Sano, "Development of optimizing method using quality engineering and multivariate analysis based on finite element method," in *Proc. ISEF 2003*, vol. 2, pp. 737-739, Nov. 2003.
- [3] M. N. Anwar and Iqbal Husain, "Radial Force Calculation and Acoustic Noise Prediction in Switched Reluctance Machines," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 36, No. 6, pp. 1589-1597, Nov./Dec. 2000.
- [4] A. Strassis and A. M. Michaelides, "The Design of low vibration doubly salient motors," *Electric Machines and Power system*, vol. 27, pp. 967-981, 1999.
- [5] 하경호, "매입형 영구자석 동기전동기의 링크부에서 진동 및 전자기 특성 해석", 창원대학교 석사학위 논문, 1998.



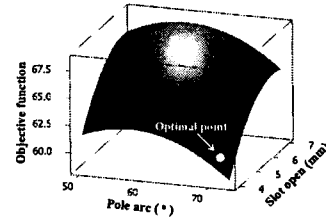
〈그림 5〉 전자기적 설계 과정



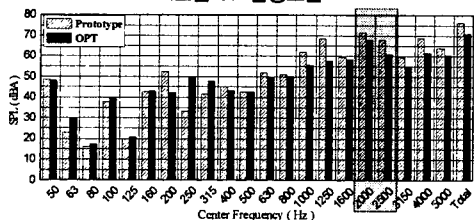
〈그림 6〉 전자기적 설계의 설계인자

〈표 3〉 전자기적 설계인자 및 영역

	설계인자	단위	Coded values				
			-1.682	-1	0	1	1.682
DOE	Bridge width (BW)	(mm)	-	0.5	2.5	4.5	-
	Slot open (SO)	(mm)	-	4.0	5.5	7.0	-
	Tooth height (TH)	(mm)	-	1.5	2.5	3.5	-
RSM	Pole arc (PA)	(°)	-	45.0	60.0	75.0	-
	Slot open (SO)	(mm)	3.89	4.35	5.45	6.55	7.00
	Pole arc (PA)	(°)	50.08	53.4	61.4	69.4	72.71



〈그림 7〉 반응표면



〈그림 8〉 소음 실험 결과 (@ 3000rpm, 80 kgf-cm)