

진동 저감을 위한 IPM type BLDC 전동기의 가진력 평형화 설계

The Design of Radial Magnetic Force Equilibrium for Reduction of Vibration in IPM Type BLDC Motor

이 경 득* · 이 원 식* · 김 규 탁*
(Gyeong-Deuk Lee · Won-Sik Lee · Gyu-Tak Kim)

Abstract - In this paper, the vibration source of IPM type BLDC motor was analyzed by finite element method. The main causes of the electrical vibration were RMF(Radial magnetic force) and cogging torque. It was designed model of minimized cogging torque and RMF equilibrium. Design models were selected the optimum model using the design of experiment method. And, the vibration experiment was carried out through prototype machine of each model. Finally, the experimental results were compared with the analysis ones.

Key Words : IPM type BLDC motor, Equilibrium of RMF, Reduction of cogging torque, Natural frequency, Vibration

1. 서 론

Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM)은 회전자 철심 내부에 영구자석을 매입하여 기계적으로 강인한 구조로 원심력에 의한 영구자석의 비산을 방지하고 d축과 q축의 인덕턴스 차이로 발생하는 릴럭턴스 토크를 이용할 수 있어 단위 체적 당 발생하는 토크가 Surface Permanent Magnet Synchronous Motor (SPMSM)보다 크다는 장점을 가지고 있다. 따라서, 급 가·감속 운전, 광범위한 속도제어가 요구되는 자동차 전장품 등 정밀 기기의 구동용 모터로 많이 사용되고 있다[1, 2]. 그러나 회전자 철심 내에 영구자석을 삽입시킴으로써 철심에 국부적인 자속 포화 현상이 발생하고 유효 공극이 작아 큰 자속 밀도로 인하여 코깅 토크가 SPMSM보다 크다는 단점이 있다. 이로 인하여 전동기 운전 시 진동 및 소음이 크게 발생한다[3].

전동기의 진동 발생원으로는 크게 기계적인 원인과 자기적인 원인이 있다. 자기적인 원인으로서는 전동기의 고정자와 회전자에 작용하는 반경방향의 힘(Radial magnetic force)인 가진력의 불평형 및 코깅 토크가 주원인이다. 특히, 가진력 및 코깅 토크의 주파수가 전동기의 고유 진동수(Natural frequency)와 비슷한 영역에 있으면 공진(Resonance)하게 되어 부품의 마모와 전동기의 구동 성능의 저하 뿐만 아니라 다른 시스템에도 악영향을 미치게 된다[4, 5]. 진동을 일으키는 자기적인 원인 중 가진력 불평형

에 의한 진동이 코깅 토크 등에 의한 진동보다 크게 나타나고 있다[6].

따라서, 본 논문에서는 자기적인 진동을 저감하기 위하여 코깅토크를 저감하고 가진력 평형화 설계를 진행하였다. 진동원을 비교, 분석하기 위하여, 회전자에 노치를 설치하여 코깅 토크를 최소화한 모델과 노치 설치, 영구자석 배열 변경 및 회전자 표면의 반경을 변화시켜 가진력이 평형화되는 모델을 설계하였고, 전동기의 제반 특성을 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 또한, 진동 실험을 통하여 본 논문의 타당성을 입증하였다.

2. 코깅 토크 최소화 및 가진력 평형화 설계

2.1 설계 모델 및 제원

본 논문에서 사용된 기본 모델의 형상을 그림 1에 나타내었고, 제원을 표 1에 요약하여 나타내었다.

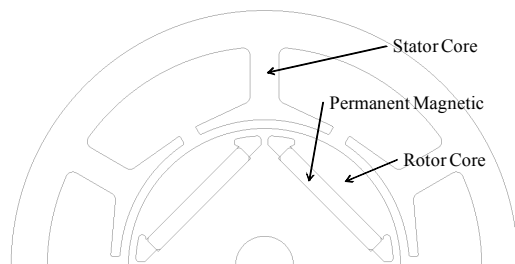


그림 1 기본 모델의 형상

Fig. 1 The shape of basic model

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea

E-mail : gtkim@cwnu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l University, Korea

Received : August 18, 2015; Accepted : January 21, 2016

표 1 기본 모델의 제원

Table 1 The specification of Analysis model

Item	Specification
Rated speed [rpm]	3200
Rated torque [Nm]	0.4
Pole/Slot	4/6
Air-gap length [mm]	1.2
Winding type	Concentrated winding
Br [T]	1.02

2.2 노치 설치를 통한 코깅 토크 저감 설계

노치는 공극의 자화 분포에 의한 에너지 분포를 푸리에 급수 전개 방식으로 해석하여 코깅 토크를 상쇄할 수 있는 위치와 너비를 계산하여 적용하였다[2]. 노치의 위치 함수는 수식 전개 시 슬롯부분에서의 에너지를 무한대라고 가정하여 유도하므로 실제 노치에 의한 에너지 분포와는 차이가 있으므로 유한요소해석과 실험계획법을 이용하여 노치의 크기를 선정하였다.

그림 2는 노치를 설치한 회전자 형상이며 노치의 직경을 설계 변수로 코깅 토크가 최소가 될 때의 값을 선정하였다. 노치 직경에 따른 코깅 토크의 변화 양상을 그림 3에 나타내었다.

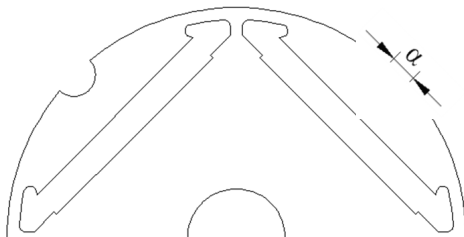


그림 2 코깅 토크 최소화를 위한 설계 변수

Fig. 2 The parameter for design of minimized cogging torque

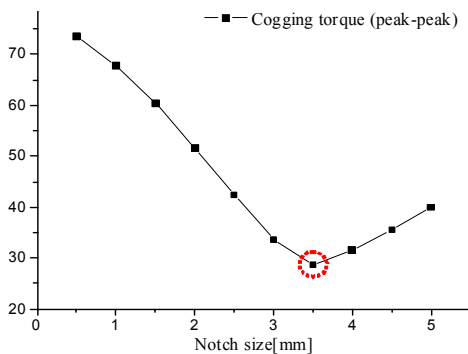


그림 3 노치 직경에 따른 코깅 토크

Fig. 3 The cogging torque according to notch diameter

2.3 가진력 평형화 설계

가진력 축비란 가진력의 장축과 단축의 비로써, 1에 가까울 수록 가진력이 원형 분포가 되어 완전한 평형을 의미하며 0에 가까울수록 불평형이 심화됨을 의미한다.

가진력 평형화 설계를 위한 회전자 설계 변수를 그림 4에 나타내었다. 회전자의 중심에 3.0[mm], 고정자 중심에 3.5[mm] 각각 노치가 설치된 모델에 자속 중심축(d축)으로 부터 회전자 반경이 감소하기 시작하는 각도를 β , 회전자 직경 감소 길이를 L , 영구자석의 기울기를 γ 로 선정하여 실험 계획법을 이용하여 설계를 진행하였다. β 와 L 를 적용하여 가진력 평형화 설계를 이용한 결과 $\beta=30^\circ$ 와 $L=0.4$ [mm]일 때 가진력의 축비가 0.878로 기본모델의 축비 0.35에 비해 2.51배 평형화가 이루어졌다. 이때의 설계변수에 따른 가진력 축비를 표 2에 나타내었다. 회전자 반경 변화에 따른 공극 증가로 인한 자속 밀도의 감소분을 보상하기 위하여 영구자석을 분할하여 자속이 정현적인 분포를 할 수 있도록 V-type 형태로 배치하였다. γ 를 적용한 결과 $\gamma=10^\circ$ 에서 가진력 축비가 0.888로 기본 모델에 비해 2.54배의 가진력 평형화가 이루어졌다.

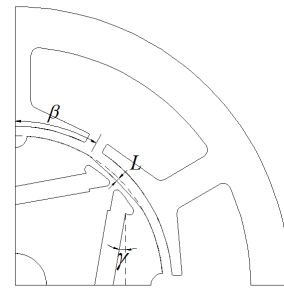


그림 4 가진력 평형화를 위한 설계 변수

Fig. 4 The parameter for design of RMF equilibrium

표 2 β 와 L 의 변화에 따른 가진력 축비

Table 2 The RMF axial ratio according to β and L

L [mm] \ β [$^\circ$]	0	7.5	15	22.5	30
0.0	0.700	-	-	-	-
0.1	0.689	0.702	0.695	0.700	0.649
0.2	0.660	0.656	0.656	0.694	0.792
0.3	0.674	0.670	0.673	0.689	0.835
0.4	0.688	0.683	0.691	0.682	0.878
0.5	0.694	0.695	0.708	0.694	0.801

2.4 고유 진동수 해석 및 모드 해석

비감쇠 구조물 전체의 진동 운동 방정식을 행렬로 표현하면 아래 수식 (1)과 같다.

표 3 γ 에 따른 가진력 축비

Table 3 The RMF axial ratio according to γ

γ [°]	2	4	6	8	10
축비	0.878	0.876	0.879	0.880	0.888

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

[M]과 [K]는 각각 전체 질량행렬과 강성행렬이며, x)는 각 질점에서의 변위 벡터로서 두 번 미분한 것은 가속도를 나타낸다. 이 방정식은 자유 경계조건을 가지는 고정자의 해석 모델에 대한 고유치 문제가 된다. 선형 시스템에서 자유진동의 해는 다음과 같이 주기적으로 변화하는 수식 (2)와 같이 조화운동으로 나타낼 수 있다.

$$\{x(t)\} = \{\Phi\}_i e^{i\omega t} \tag{2}$$

ω_i 는 i 번째의 고유 진동수, $\{\Phi\}_i$ 는 i 번째 고유진동수의 모드 형상을 나타내는 고유 벡터이며 t 는 시간을 나타낸다. 운동 방정식에 위의 식을 대입하면 수식 (3)과 같다.

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

수식 (3)에서 $\{\Phi\}_i$ 는 “0”이 될 수 없으므로 행렬식은 수식 (4)와 같다.

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

이 방정식은 고유치의 문제로 고유 진동수는 n 개의 자유 도수만큼 생긴다.

모드는 진동계를 이루는 시스템의 고유한 동적인 양상을 나타내는 것으로 어떤 주파수를 가진 가진력에 의해 고정자가 진동할 때 그 고정자의 거동은 가진력의 주파수 대역에서 가지는 고유 모드의 양상으로 나타난다[7].

고정자의 고유 진동 주파수가 진동 및 공진에 지배적인 역할을 하기 때문에 고정자의 모달 해석을 수행하였다. 고정자의 재질은 규소강판(S23-50PN800)으로 mass density는 7850(Kg/m³), Young’s modulus는 200(Gpa), Poisson ratio는 0.24로 각각 입

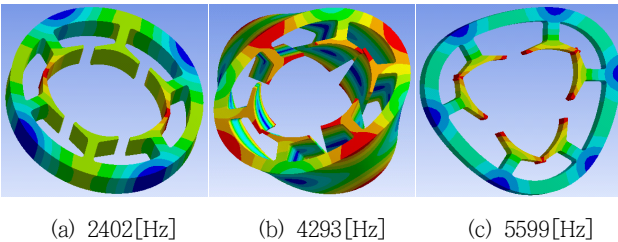
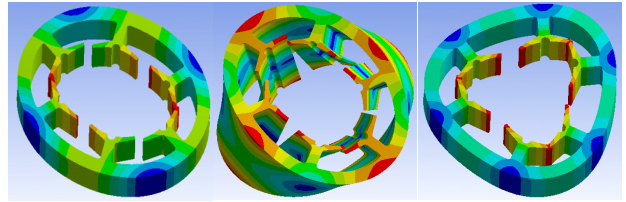


그림 5 기본 모델과 코깅 토크 최소화 모델의 모드 형상

Fig. 5 Mode shapes of basic model and minimized cogging torque model

력하였다.

그림 5와 6은 모달 해석 결과이다. (a)와 (b)는 타원운동을 하는 모드로 다른 주파수의 모드에 비하여 진동 및 소음을 일으키는 주요 모드가 되므로 이 모드에서의 공진을 가 급적 피해야한다.



(a) 2439[Hz] (b) 4312[Hz] (c) 5735[Hz]

그림 6 가진력 평형화 모델의 모드 형상

Fig. 6 Mode shapes of RMF equilibrium model

3. 진동원 분석 및 진동 실험

각 주파수 별 진동원의 분석을 위해서 각 모델의 코깅토크와 가진력을 유한요소해석을 통해 계산하였고 고유 진동 주파수 대역의 진동원을 분석하기 위해 고조파분석을 진행 하였다.

3.1 코깅 토크에 의한 진동 분석

그림 7은 각 모델의 코깅토크를 계산한 결과로 peak-peak치를 비교하면 기본 모델은 76[mNm], 코깅토크 최소화 모델은 28.6[mNm], 가진력 평형화 모델은 134.4 [mNm]이다. 본 논문은 4극 6슬롯이므로 코깅 토크의 주파수는 구동주파수의 6배로 나타난다. 정격 상태에서의 구 동주파수는 106.66[Hz]이므로 코깅토크의 주파수는 640 [Hz]이다. 이는 수식 (5)을 통해 알 수 있다.

$$f_{cogging} = n \cdot L_{cm} \cdot \frac{f_e}{P} \tag{5}$$

여기서 L_{cm} 은 극수와 슬롯 수에 따른 최소 공배수, f_e 는 구동 주파수, P 는 쌍극수이다. 따라서 코깅토크가 저감된다면 640[Hz]대의 진동이 저감될 것으로 사료된다.

3.2 가진력에 의한 진동 분석

3.2.1 공극상의 가진력

고유 진동수 해석에서는 회전자의 영향을 고려하지 않았기 때문에 회전자의 변화에 따른 진동의 영향을 비교하기 어렵다. 그러므로 각 모델의 공극자속 변화로 생기는 진동을 분석하기 위하여 가진력의 분포 및 양상을 비교하였다. 전자기적 가진원은 기

계적인 요인과 전자기적 현상의 상호 유기적 관계로부터 발생한다. 무부하시나 부하시에 공극 자체로부터의 고정자 표면 반경방향 힘 밀도(radial force density) 분포는 전자기적 진동의 주된 발생원이며, 수식 (6)과 같이 Maxwell's stress method 로 계산할 수 있다[8].

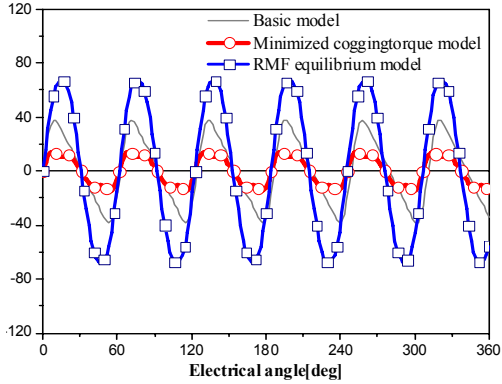


그림 7 각 모델의 코깅 토크
Fig. 7 The cogging torque of each model

$$F_{rad}(\theta_s, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2(\theta_s, t) - B_\theta^2(\theta_s, t)] \quad (6)$$

여기서 F_{rad} 는 힘 밀도의 반경방향 성분, B_r 과 B_θ 는 공극 자속 밀도의 반경방향과 접선방향의 성분이고, μ_0 는 자유 공간(free space)에서의 투자율, θ_s 는 각도에 따른 위치, t 는 시간이다.

그림 8은 공극 상에서 기본 모델과 코깅 토크 최소화 모델의 가진력 밀도의 분포를 비교한 결과이며, 그림 9는 기본 모델과 가진력 평형화 모델의 가진력 밀도의 분포를 비교한 결과이다. 기본 모델과 비교하여 코깅 토크 최소화 모델은 세로축인 장축과 가로축인 단축의 크기가 증가하였고, 가진력 축비를 계산해 보면, 코깅토크 최소화 모델은 기본 모델보다 축비가 0.35에서 0.43으로 다소 평형해졌으며, 가진력 평형화 모델은 축비가 0.888으로 기본 모델보다 2.54배 정도 평형화됨을 알 수 있다. 가진력 평형화 모델의 장축은 감소하며 단축은 증가한 결과이다.

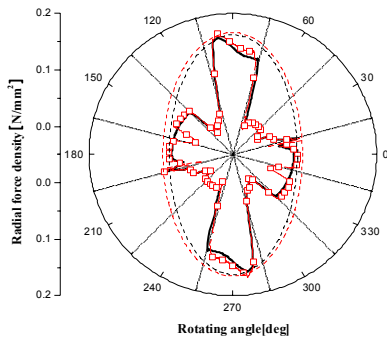


그림 8 기본 모델과 코깅 토크 최소화 모델의 가진력 분포
Fig. 8 The radial force density of the basic model

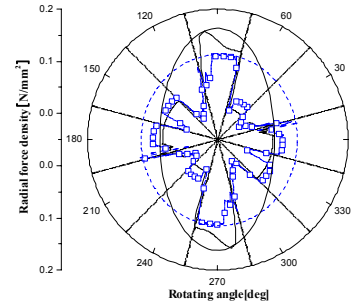


그림 9 기본 모델과 가진력 평형화 모델의 가진력 분포
Fig. 9 The radial force density of the basic model and the RMF equilibrium model

3.2.2 치 하나에 작용하는 가진력

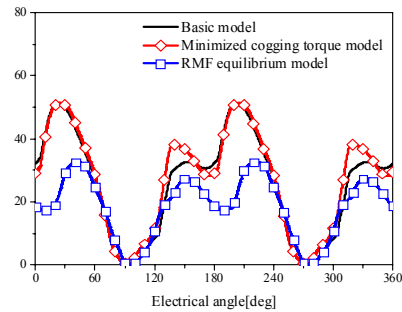


그림 10 각 모델별 치 하나에 작용하는 가진력
Fig. 10 Comparison of RMF acting on the teeth

그림 10은 치 하나가 받는 가진력을 시간에 따라 계산한 결과이다. 치 하나가 받는 최대 가진력을 비교하면 기본 모델은 50.65[N], 코깅 토크 최소화 모델은 51.25[N], 가진력 평형화 모델은 32.67[N]이다. 가진력의 주파수는 다음 수식 (7)과 같다.

$$f_{rad} = 2 \cdot n \cdot f_e \quad (7)$$

따라서 가진력이 저감된다면 213.33[Hz]에서 진동이 저감될 것으로 예상된다.

3.3 가진력에 의한 진동 분석

그림 11은 코깅 토크의 반경방향의 힘에 대한 고조파 분석 결과를 나타낸 것이다. 그림 12는 가진력의 고조파 분석 결과를 나타낸 것인데, 코깅 토크 주파수인 640[Hz]에 비해 가진력의 주파수인 213.33[Hz]는 낮기 때문에 진동의 주 발생 지점인 고유 진동 주파수 대역에서의 고조파 성분만 표시하였다. 1차 고유 진동 주파수 대역에서의 진동 원인을 분석하기 위해 코깅 토크의 고조파 분석을 수행하였다.

1차 고유 진동 주파수 대역에서 각 모델의 코깅 토크와 1차

고유 진동 주파수 대역에서 각 모델의 코깅 토크와 가진력의 고조파 분석 결과를 비교하면, 가진력의 고조파 성분이 코깅 토크의 고조파 성분보다 크기 때문에 1차 고유 진동 주파수 대역에서 진동의 주 요인은 가진력으로 판단된다.

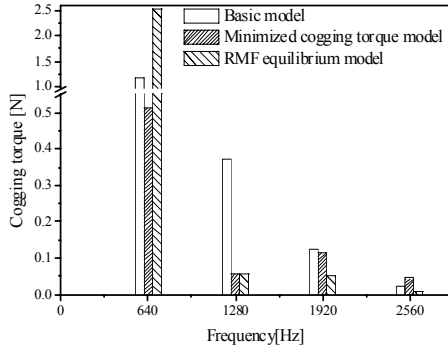


그림 11 코깅 토크 고조파 분석
Fig. 11 Harmonic analysis of cogging torque

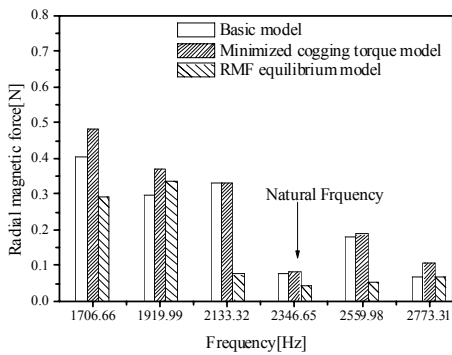


그림 12 가진력의 고조파 분석
Fig. 12 Harmonic analysis of RMF

3.4 진동 실험 및 결과 분석

그림 13은 진동 실험에 사용된 모터와 실험 장치이다. 가속도 센서는 PV-97C model을 사용하였고, 진동 신호는 UV-06A amplifier를 통하여 증폭하였다. Signal analyzer로 SA-01A-4 model을 사용하였다. 최대 토크로 구동 시 발생하는 전자기력 흡인력에 의한 충격을 방사방향에서 진동 신호를 측정하였다.

진동 실험 결과를 분석하면, 가진력 주파수인 213.33[Hz]에서 가진력 평형화 모델의 진동이 크게 저감된 것을 알 수 있다. 이는 공극상에 작용하는 가진력이 기본 모델에 비해 2.54배 평형하며 치 하나에 작용하는 최대 가진력의 크기가 약 40%이상 감소되었기 때문이다. 반면 코깅 토크의 주파수인 640[Hz]에서는 가진력 평형화 모델의 코깅 토크가 두 모델에 비해 크기 때문에 진동이 크게 발생함을 알 수가 있다.

고유 진동 주파수 대역 근방인 2400[Hz] 근방인 1900[Hz]에서 2800[Hz]까지의 진동은 가진력 평형화 모델이 두 모델에 비

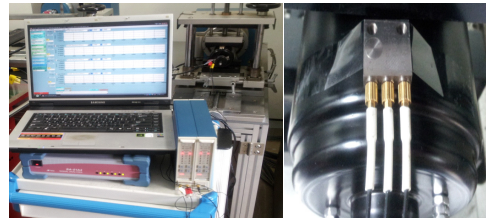
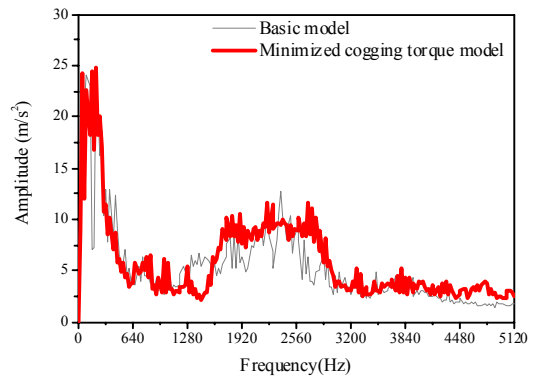
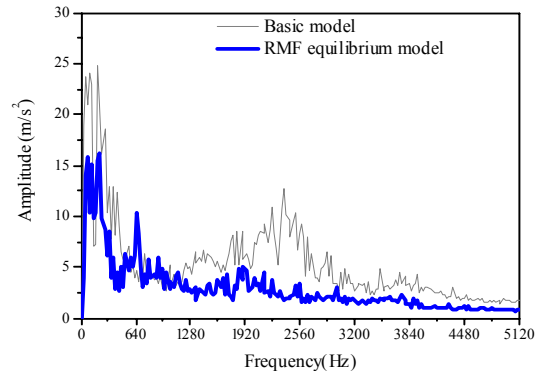


그림 13 실험 장치와 가속도센서
Fig. 13 Experimental equipment and acceleration sensor

해 크게 저감된 것을 볼 수 있다. 이는 고유 진동 주파수 대역에서 진동원 분석 결과와 유사한 양상인 것을 알 수 있다. 특히 그림 14(a)를 보게 되면 공진의 요소가 될 수 있는 2346.66[Hz]의 값을 비교 하면 가진력 평형화 모델의 값이 작은 것을 알 수 있다. 그와 동시에 주변의 값들도 두 모델에 비해 작기 때문에 진동이 저감된 것으로 사료된다. 따라서 가진력의 평형화 및 저감이 코깅 토크의 저감보다 진동에 더 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 추가적인 질량 증가나 감소를 통하여 공진주파수를 회피하는 방법 외에도 전자기적인 가진력의 평형화 및 저감을 통하여 공진의 크기를 줄일 수 있음이 입증되었다.



(a) 기본 모델과 코깅 토크 최소화 모델의 비교



(b) 기본 모델과 가진력 평형화 모델의 비교

그림 14 진동 실험 결과
Fig. 14 The measured vibration spectrum

5. 결 론

본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기에서 발생하는 진동원에 대한 연구를 진행하였다. 전자기적인 진동원인 코깅 토크와 불평형한 가진력을 해소하기 위하여 유한요소법과 실험계획법을 이용하여 설계를 진행하였고 시작기를 제작해 진동실험을 통해 본 논문의 타당성을 비교, 검토하였다.

진동 실험 결과, 코깅 토크 최소화 모델은 기본 모델보다 오히려 고유 진동수 대역에서 넓게 진동이 발생하는데 이는 코깅 토크가 저감되더라도 고유 진동 주파수 대역에서의 가진력의 고조파 성분이 증가하였기 때문이다. 하지만 가진력 평형화 모델의 경우 코깅 토크가 증가하여 640[Hz]대역에서 진동이 기본모델에 비해 크게 발생하지만 고유 진동 주파수 대역에서의 가진력 고조파 성분이 감소하였기 때문에 2400[Hz] 근방의 대역에서 진동이 작게 발생하였다. 따라서 고유 진동수 대역에서의 진동원을 저감하기 위해서는 가진력의 저감이 필수적임은 물론 평형화가 되어야 한다.

감사의 글

본 논문은 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업(2015H1C1A1035824) 및 창원대학교 2015~16년 교내연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

References

- [1] Hong-seok Ko et al., "Characterization of Noise and Vibration Source in Interior Permanent-Magnet Brushless DC motors", IEEE Transaction on. Magnetics, Vol. 40, No. 6, pp. 3482-3489, 2004.
- [2] Gyu-Hong, Gyu-Tak Kim et al., "A Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", IEEE Transaction on. Industry Applications, Vol. 45, No 1, pp. 161-167, 2009.
- [3] J. P. Hong et al., "Analysis of radial force as a source of vibration in an induction motor with skewed slots", IEEE Transaction on. Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 1650-1653, 1997.
- [4] D. E. Cameron, J. H. Lang and S. D. Umans, "The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable reluctance motors", IEEE Transaction on. IA, Vol. 28, No, 6, pp. 1250-1255, 1992.
- [5] R. S. Colby, F. M. Mottier and T. J. E. Miller, "Vibration modes and acoustic noise in a four-phase switched reluctance motor", IEEE Transaction on. IA, Vol. 32, No, 6, pp. 1357-1363, 1996.
- [6] Jin Hur, Jin-Wook Reu, Byeong-woo Kim and Gyu-Hong Kang, "Vibration Reduction of IPM-Type

BLDC Motor Using Negative Third Harmonic Elimination Method of Air-Gap Flux Density", IEEE Transactions on. IA, Vol. 47, No, 3, pp. 1300-1309, 2011.

- [7] G. W. Cho, S. H. Woo, S. H. Ji, K. W. Park, K. B. Jang, G. T. Kim, "The optimization of rotor shape for constant torque improvement and radial magnetic force minimization", J. Cent. South Univ.Tecno. Vol. 19, No. 2, pp. 357-364, 2012.
- [8] Gieras. J. F, Wang. C, Lai. J. C, "Noise of Polyphase Electrical Motors", Taylor & Francis Group, 2006. ISBN 0-8247-2381-3

저 자 소 개



이 경 득 (Gyeong-Deuk Lee)

1989년 4월 11일생. 2014년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : lkd0114@naver.com



이 원 식 (Won-Sik Lee)

1990년 6월 3일생. 2015년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : wis0603@naver.com



김 규 탁 (Gyu-Tak Kim)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~2000년 일본 早稻田大 客員研究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr