

소형 IPMSM의 전자기적 진동원과 가진력의 상관관계 분석

Correlation Analysis for Electromagnetic Vibration Source and RMF of Small IPMSM

이 원 식* · 조 규 원** · 전 병 길* · 김 규 탁†
(Won-Sik Lee · Gyu-Won Cho · Byung-Kil Jun · Gyu-Tak Kim)

Abstract - The vibration source of motor has a electromagnetic and mechanical causes. The most widely known, electromagnetic reasons are cogging torque and RMF(Radial magnetic force). Recently, analysis of the cogging torque has been made actively. but analysis of the RMF was not filled. So, in this paper, analyzed RMF. the vibration test were performed for the basic and reduced model of cogging torque and RMF. And it analyzed for the effect of each factor on the vibration. Finally, the vibration was formulated for stator's weight and RMF. To this end, natural ,cogging torque and RMF of frequency were analyzed and these relationships were considered.

Key Words : IPMSM, Cogging torque, Radial magnetic force, Natural frequency, Vibration, weight

1. 서 론

전동기의 진동 발생원으로는 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인으로 분류할 수 있고, 가장 널리 알려진 전자기적 진동원은 코깅 토크와 반경 방향의 힘인 가진력(Radial Magnetic Force)이다. 특히, 가진력이나 코깅 토크의 주파수가 고정자의 고유 진동수 또는 하우징(Housing)등의 구조물의 공진 영역에 근접해 있으면, 매우 큰 진동을 발생한다. 이는 마찰에 의한 부품의 마모와 전동기의 구동 성능의 저하뿐만 아니라 결합된 타 시스템에 악영향을 미치게 된다[1-2]. 그러므로, 코깅 토크와 가진력의 감소는 시스템의 안정성과 내구성 확보를 위해 매우 중요함을 알 수 있다.

희토류 자석의 발전과 함께 코깅 토크에 대한 연구가 활발히 진행됨에 따라, 코깅 토크 저감을 위한 형상 및 기자력의 최적화 등은 많은 논문에서 연구 및 분석되어, 진동 분석에 적용되어 널리 활용되고 있다. 그러나 전자기력 변화에 의한 전동기 전체 진동의 발생 양상 및 가진력 감소 등에 대한 연구는 상대적으로 부족하였다.

본 연구에서는 기본 모델과 코깅 토크와 가진력 저감이 동시에 수행된 모델의 진동 실험을 수행하여, 각 인자가 진동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 최종적으로 진동을 고정자의 무게와 가진력의 크기로 수식화하였고, 이를 위해 고유 진동 주파수 분

석은 물론 코깅 토크와 가진력의 주파수 분석을 통해 이들의 상관관계를 고찰하였다.

2. 모 델

2.1 모델 선정

그림 1과 표 1은 두 모델의 형상 및 제원을 나타낸다. 두 모델은 동일한 출력을 발생하지만, 가진력 최소화 모델은 자속을 집중시키는 V type 영구자석을 활용하여 공극 자속 벡터의 반경 방향 성분을 감소시켰다, 또한 자속 장벽의 최적화를 통해 공극 자속이 차등적으로 회전자 표면에 분포하여 정현적인 기자력을 가지게 설계하였으며, 고정자 치폭의 두께를 증가하여 철심 자속 밀도의 포화도를 낮추어 가진력 파형의 왜곡을 최대한 방지할 수 있게 설계하였다. 그리고 정격 출력은 동일하게 유지하였다[3].

표 1 모델 제원

Table 1 The specifications of the model

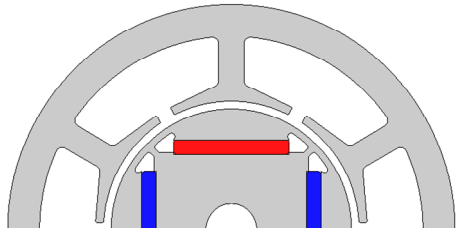
제원	Specification
Rated Speed(rpm)	3200
Rated Torque(Nm)	0.4
Pole/Slot	4/6
Air-gap Length(mm)	1.2
Winding Type	Concentrated winding
Material(stator & rotor)	50PN1300
Stack length(mm)	41
Stator diameter(mm)	70

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.
E-mail : gtkim@changwon.ac.kr

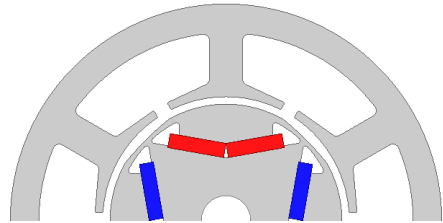
* Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

** Dept. of Electrical Engineering, S&T motiv, Korea.

Received : July 18, 2016; Accepted : October 31, 2016



(a) 기본모델



(b) 가진력 최소화 모델

그림 1 모델 형상

Fig. 1 The shape of the model

2. 고유진동 주파수 및 가진원

2.1 고유 진동 주파수(Natural frequency)

고정자의 고유 진동 주파수가 진동 및 공진에 지배적인 역할을 하기 때문에 고정자의 모달(Modal) 해석을 수행하였다[4]. 고정자의 재질은 구소강판(S23-50PN800)으로 mass density는 7850[Kg/m³], Young's modulus는 200[Gpa], Poisson ratio는 0.24로 각각 입력하였다. 그림 2와 3은 모달 해석 결과이다. 각 그림의 (a)와 (b)는 타원 운동을 하는 모드로 다른 주파수의 모드에 비하여 진동을 일으키는 주요 모드가 되므로 이 모드에서의 공진을 가급적 피해야 한다.

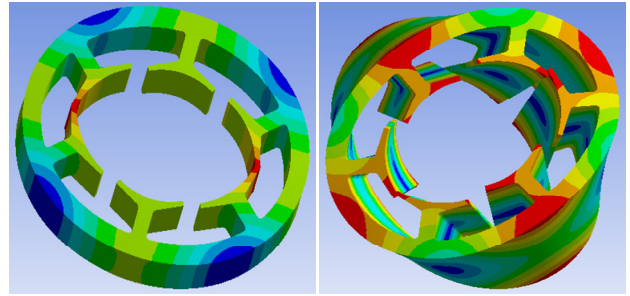
기본 모델의 1차 고유 진동 주파수는 2402[Hz]이고, 가진력 최소화 모델의 고유 진동 주파수는 2202[Hz]로 200[Hz]의 차이가 발생한다. 이는, 가진력 최소화 모델의 요크의 두께가 기본 모델보다 작아지면서 감소한 것을 알 수 있는데 이는 수식 (1)로부터 알 수 있다.

여기서 f_n 은 고유 진동 주파수, K_{eq} 는 기계적 강성, m 은 질량이다.

$$f_{natural} = \sqrt{\frac{K_{eq}}{m}} \quad (1)$$

K_{eq} 는 수식 (2)과 같은데 철심의 사용량은 동일하나 요크의 두께가 감소하여 고유 진동 주파수가 감소한 것으로 사료된다.

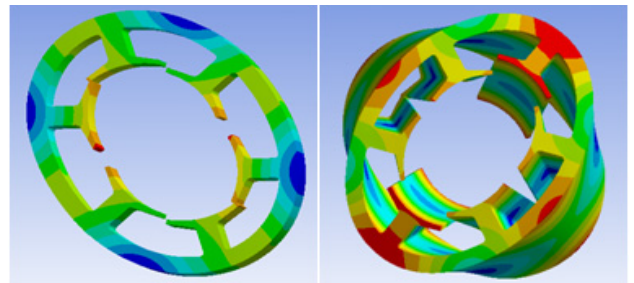
$$K_{eq} = \frac{E_c h^3}{12l^2} \quad (2)$$



(a) 1차 mode 2402[Hz] (b) 2차 mode 4293[Hz]

그림 2 기본 모델의 고유 진동수에 대한 모드 형상

Fig. 2 Modes shapes for the natural frequency of the basic model



(a) 1차 mode 2202[Hz] (b) 2차 mode 4106[Hz]

그림 3 가진력 최소화 모델의 고유진동수에 대한 모드 형상

Fig. 3 Modes shapes for the natural frequency of the Minimized RMF model

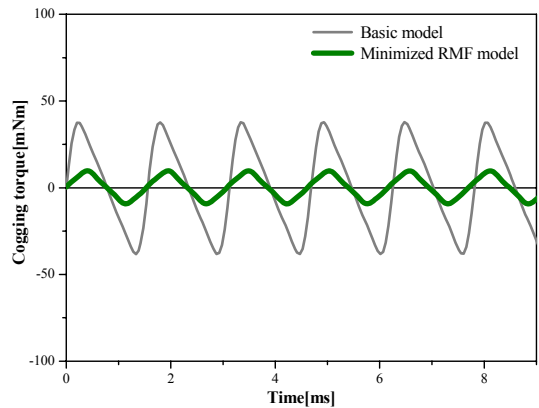


그림 4 모델 별 코깅토크

Fig. 4 Cogging torque of Models

여기서 E_c 는 탄성영률, h 는 요크의 두께, l 은 요크의 평균 원주이다.

2.2 코깅토크(Cogging Torque)

그림 4에 기본 모델과 가진력 최소화 모델의 코깅토크를 비교

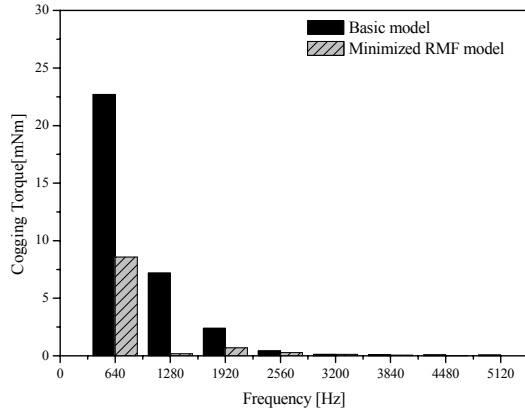


그림 5 모델 별 코깅 토크의 고조파
Fig. 5 The Cogging torque harmonic of models

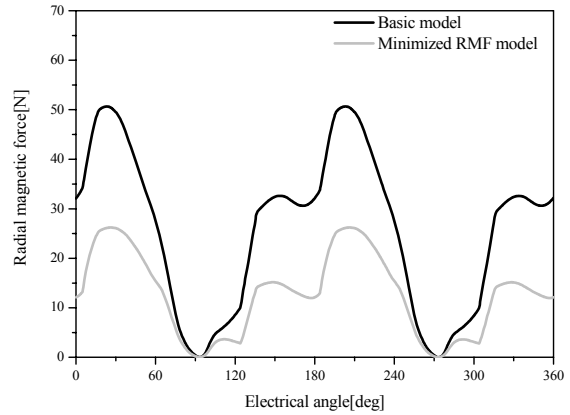


그림 7 시간에 따라 치 하나에 작용하는 가진력
Fig. 7 Comparison of RMF acting on the teeth

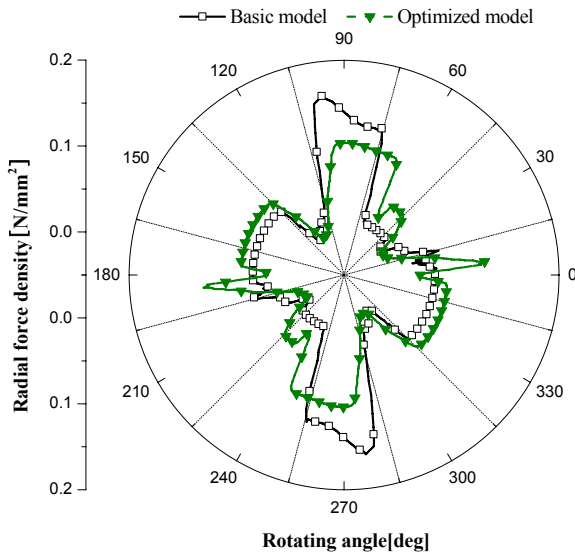


그림 6 기본 모델과 최적 모델의 가진력 비교
Fig. 6 RMF of basic model and minimized RMF model

하여 나타내었고, 그림 5에 코깅 토크 고조파 분석 결과를 나타내었다. 코깅토크는 기본모델 76[mNm]에서 가진력 최소화 모델이 19.04[mNm]로 74.95[%] 저감되었다. 코깅 토크의 기본 주파수인 640[Hz]에서 그 크기가 급격히 감소하였음을 알 수 있다.

2.2 가진력(Radial Magnetic Force)

2.2.1 가진력의 원선도

기본 모델 가진력 분포와 비교하여 가진력 최소화 모델의 가진력은 장축이 감소하고 단축이 증가하는 결과를 보였다. 장축과 단축인 축비가 0.350에서 0.907으로 기본 모델보다 2.59배 평형화됨을 알 수 있다.

부하상태의 공극 자계로 부터의 고정자 표면 반경방향 힘의

밀도(Radial Force Density) 분포는 전자기적 진동·소음의 주된 발생원이며, 수식 (3)과 같이 Maxwell's stress method로 계산할 수 있다[5].

$$F_{rad}(\theta_s, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2(\theta_s, t) - B_\theta^2(\theta_s, t)] \quad (3)$$

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.

2.2.2 치에 작용하는 가진력

그림 7은 전기각 한 주기에 따라 한 치에 작용하는 가진력을 나타낸 것이다. 결과에서 볼 수 있듯이 가진력의 최대값을 비교할 경우 기본모델은 50.65[N], 가진력 최소화 모델은 26.21[N]으로, 기본 모델 대비 48.25[%] 저감되었다.

3. 진동 실험

그림 8은 진동 실험에 사용된 모터와 실험 장비이다. 가속도 센서는 PV-97C model을 사용하였고, 진동 신호는 UV-06A Amplifier를 통하여 증폭하였다. Signal analyzer로는 SA-01A-4 model을 사용하였다. 진동 실험은 다이아모 미터를 사용하여 정격 토크로 구동 시 발생하는 전자기력 흡인력에 의한 충격을 PV-97C model 가속도 센서를 모터의 외관에 부착하여 방사 방향에서 진동 신호를 측정해 수행하였다.

그림 9에 진동 실험 결과를 나타내었다. 진동 실험은 전동기의 최대 효율이 발생하는 동작 지점에서 수행하였다. 기본 모델의 경우 전류 위상각 18[degE]에서 수행하였으며, 가진력 최소화 모델의 경우 전류 위상각 14[degE]에서 수행하였다. 진동 실험 결과, 가진력의 기존 주파수인 213[Hz], 코깅토크의 기본 주파수인 640[Hz] 그리고 1차 고유 진동 주파수의 1981~2640[Hz] 대

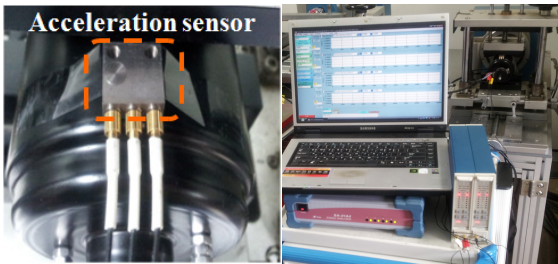


그림 8 실험 장비와 모터
Fig. 8 Experiment equipment and motor

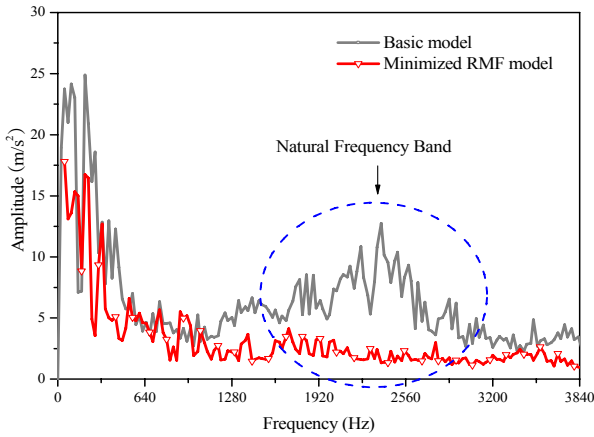


그림 9 진동 실험 결과
Fig. 9 The result of vibration experiment

표 2 진동 특성

Table 2 Vibration characteristics

	고유진동 주파수 [Hz]	대역 [Hz]	진동크기 [m/s^2]	가진력 [N]
기본 모델	2402	2160~2640	12.74	0.078
가진력 최소화 모델	2202	1981~2422	3.19	0.062

역에서의 진동의 크기가 크게 감소하였다. 이는 가진력 최소화 모델에서 가진원인 고유 진동 주파수 대역에서의 가진력 저감은 물론, 코깅 토크 또한 효율적으로 저감하였기 때문으로 사료된다.

4. 고유 진동수 대역 분석

4.1 고유진동수 대역에서 코깅토크 및 가진력

표 2는 각 해석 모델의 고유진동 주파수 대역에서 진동이 가장 큰 부분의 크기와 가진력을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 고유진동수에서 $\pm 10\%$ 영역을 고유진동 주파수 대역으로 판정하였다. 결과와 같이 가진력 최소화 모델의 가진력 크기의 감소는

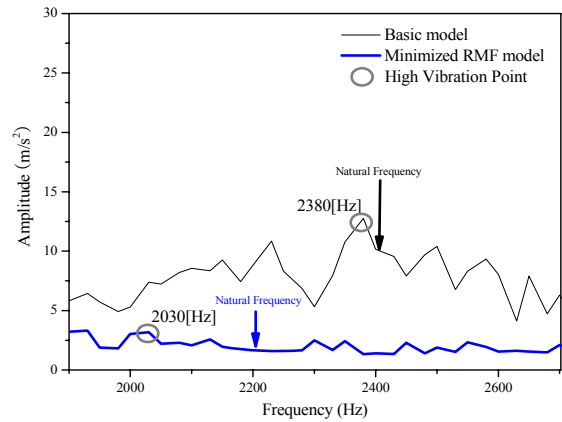
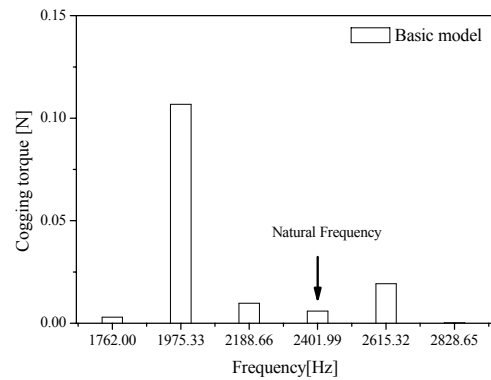
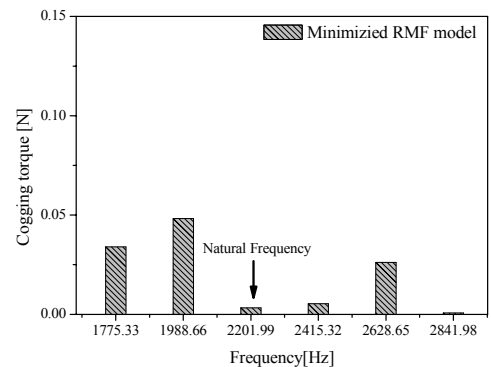


그림 10 고유진동주파수대역에서의 진동
Fig. 10 Vibration at the natural frequency band



(a) 기본모델의 코깅토크 FFT



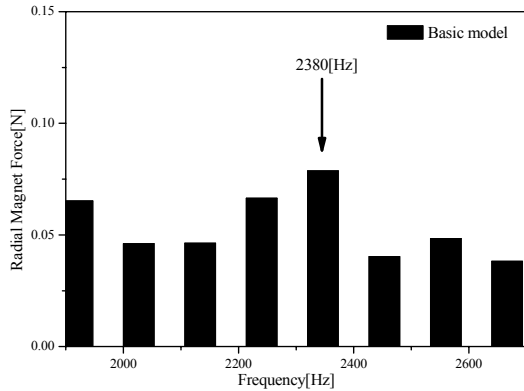
(b) 가진력 최소화 모델의 코깅토크 FFT

그림 11 1차 고유진동수 대역에서의 코깅토크 FFT

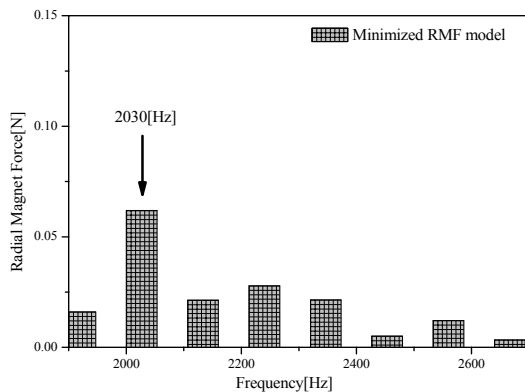
Fig. 11 Harmonic analysis of Cogging torque on the 1st natural frequency

진동의 크기를 감소하였고, 고유 진동수가 변화함에 따라 공진 가능 영역이 기본 모델 보다 상대적으로 낮은 주파수에서 형성됨을 알 수 있다.

그림 10은 진동 실험의 결과를 고유진동 주파수대역에서 확대하여 나타낸 것이다. 기본모델의 고유진동 주파수는 2402[Hz]이



(a) 기본모델의 가진력 FFT



(b) 가진력 최소화 모델의 가진력 FFT

그림 12 1차 고유진동수 대역에서의 가진력 FFT

Fig. 12 Harmonic analysis of RMF on the 1st natural frequency

고, 가진력 최소화 모델은 2202[Hz]이다. 진동실험결과 고유 진동 주파수 대역 근처에서, 진동이 가장 크게 발생한 주파수는 기본모델은 2380[Hz], 가진력 최소화 모델은 2030[Hz]이다. 기본 모델은 고유진동주파수에서 22[Hz] 떨어진 2380[Hz]에서 최대 진동이 발생하였고, 가진력 최소화 모델은 고유진동주파수에서 172[Hz] 떨어진 곳에서 최대 진동이 발생하였다.

그림 11는 고유진동수 대역에서의 코깅토크 FFT를 각 모델 별로 나타낸 것이다. 코깅토크 FFT 결과를 보면 기본모델의 경우 가장 FFT 결과가 큰 곳은 1975.33[Hz]이고, 크기는 0.106 [N]이다.

또한, 가진력 최소화 모델의 경우에는 1988.66[Hz]이고 크기는 0.0482[N]이다. 이러한 결과를 두고 진동의 크기를 비교해보면 코깅토크가 가장 크게 일어나는 주파수에서는 진동이 크지 않다는 것을 알 수 있다. 이러한 FFT결과로 보아 고유진동 주파수에서 진동의 크기는 코깅토크의 영향을 거의 받지 않는다는 것을 알 수 있다.

그림 12은 고유진동수 대역에서의 가진력을 FFT를 각 모델별로 나타낸 것이다. 가진력 FFT 결과를 보면 진동이 가장 큰 곳

표 3 고유진동수에서의 진동 특성

Table 3 In the 1st natural frequency of vibration characteristics

	진동 크기 [m/s ²]	가진력 [N]	고유진동 주파수 [Hz]	고정자무게 [kg]
기본 모델	8.811	0.0521	2402	1.05
가진력 최소화 모델	1.52	0.0153	2439	0.95

의 주파수에서 가진력의 크기도 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이 부분에서 도출할 수 있는 내용은 코깅토크보다 가진력이 더욱 진동에 많은 영향을 미친다는 것이다[6].

4.2 진동에 대한 진동과 무게의 상관관계

표 3은 고유진동 주파수에서의 진동 크기와 가진력을 나타낸 것이다. 각 모델의 고유진동 주파수에서 가진력의 크기는 기본모델은 0.0521[N], 가진력 최소화 모델은 0.0153[N]이다. 기본 모델은 가진력 최소화 모델 보다 약 340% 이상 가진력이 크지만, 진동은 580% 이상 크을 알 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 가진력의 크기와 고유 진동 주파수의 관계를 일반화 하기 위해 고정자의 무게를 고찰하였다. 기본모델의 고정자 무게는 1.05 [kg], 가진력 최소화 모델은 0.95[kg]으로, 기본모델이 가진력 최소화 모델보다 111% 무거운 하중을 가진다. 이를 통해 진동을 가진력과 무게의 관계로 본 논문에서 적용된 모델에 한하여 수식화 하면 일반화 하면 수식 (4)와 같다.

$$V_i = R_j \times W \times K \tag{4}$$

여기서, V_i 는 진동의 크기, R_j 는 고유진동주파수에서의 가진력 크기, W 는 무게, K 는 상수를 나타낸다. 단, 이는 가진력과 무게만을 고려한 단순한 결론으로서, 기타 변수들은 상수 고려하였다. 그러므로 본 연구에 적용된 전동기에 한하여만 유효하다.

5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 전동기의 전자기적인 진동원인 가진력, 코깅토크를 분석하여, 진동을 가진력과 질량의 관계로 표현하였다. 코깅 토크 보다 가진력이 전동기의 진동에 매우 큰 영향을 미치고 있었으며, 이를 분석하기 위해 동일 모터에 코깅 토크와 가진력을 동시 저감하여, 각 진동 저감 요소들을 주파수 분석하고, 진동 실험 결과와 비교하여 나타내었다. 결과적으로, 본 연구에 적용된 전동기의 진동은 가진력과 고정자 질량으로 수식화 되었으며, 차후 연구에서 기타 변수들에 대한 진동의 영향을 분석하여, 진동 수식의 구성을 확장할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구(2015H1C1A1035824)로, 연구 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Thomas M. Johns, Wen L. Soong, "Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 43, pp. 321-330, April 1996.
- [2] Gyu-Hong Kang, Young-Dae Song, Gyu-Tak Kim and Jin-Hur, "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] Gyeong-Deuk LEE, Won-Sik LEE, Gyu-Tak Kim, "The Design of Radial Magnetic Force Equilibrium for Reduction", The Transaction of the korean institute of electrical engineers, Vol. 65, pp. 298-303, 2016
- [4] Bouzek. L, "Natural frequency of stator core of asynchronous machine" MECHATRONIKA, 2011 14th International Symposium, pp. 13-15, 2011
- [5] Gieras, J. F.; Wang, C.; Lai, J. C.: "Noise of Polyphase Electrical Motors", Taylor & Francis Group, 2006.
- [6] Gyeong-Deuk Lee, Gyu-Tak Kim, "The Equilibrium Design of Radial Magnetic Force for Reduction of Vibration in IPM type BLDC Motor", Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 11, 377-382, 2016.

저 자 소 개



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



조 규 원(Gyu-Won Cho)

1984년 3월 2일생. 2009년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 S&T모티브(주) 근무.

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : gyuwon.cho@sntmotiv.com



전 병 길(Byung-Kil Jun)

1992년 4월 23일생. 현재 창원대학교 전기공학과 학부 과정

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). 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-Mail : gtkim@changwon.ac.kr