

IPMSM의 하우징 구조 변경에 따른 진동 변화

The Vibration Change According to Housing Structure of IPMSM

전 병 길* · 조 규 원** · 김 규 탁*
(Byung-kil Jun · Gyu-won Cho · Gyu-tak Kim)

Abstract - The aspect of vibration is analyzed according to the structural length difference of IPMSM housing. For this purpose, the frequencies that have the greatest influence on the RMF were analyzed using electromagnetic analysis result. And the change of resonance frequency was analyzed through structural analysis. The vibration experiment was also performed. Compared with the analysis result, it was verified whether it is the actual aspect and validity result.

Key Words : IPMSM, Vibration, Radial magnetic force, Natural frequency, Resonance

1. 서 론

현재 많은 산업현장에서 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)는 널리 사용되고 있는 전동기 종류 중 하나이다. 이 때 다른 영구자석 전동기와 마찬가지로 IPMSM 역시 단위체적당 에너지가 크기 때문에, 이 점이 전동기의 진동 원인으로 작용하고 있다[1].

전동기의 진동원인으로는 기계적인 원인과 전자기적인 원인으로 분류할 수 있다. 그 중 전자기적인 진동원인은 코깅 토크 및 가진력(Radial Magnetic Force, RMF)이 있다. 이러한 원인들이 외부의 가진 원인으로 작용하여 전동기의 구조물을 진동시킨다. 이 때 가진력 및 코깅토크의 주파수가 전동기의 고유진동수 대역에 포함되면 공진을 일으켜 부품의 마모, 전동기의 구동 성능 저하 등을 일으킨다[2].

본 논문의 목적은 IPMSM의 하우징 구조의 길이 차이에 의한 진동의 양상을 분석하는 것이다. 이를 위해 전자기적 해석결과를 이용하여 가진력에 가장 영향을 미치는 주파수를 분석할 것이다. 그리고 구조 해석을 통하여 공진 주파수의 변화를 해석한다. 또한 진동실험을 실시하여 전자기적 해석과 구조해석에 대한 주파수와 비교하여 실제 양상과 타당성이 있는 결과인지 검증한다. IPMSM의 특성 및 가진력은 FEM software인 Maxwell을 이용하여 실시하였고, 공진주파수를 찾기 위한 3D 모드해석은 Ansys workbench를 사용하였다.

2. 전자기적 해석

2.1 모델 특성

전자기적 해석을 실시할 때에는 하우징이 고려되지 않았으므로 하우징 증대 전 후의 전자기적 특성이 동일하다. 그 이유는 고정자 및 회전자에의 전자기적인 특성은 하우징 증대 전, 후가 동일하고 오직 하우징의 길이 차이만 있기 때문이다. 이 때 고정자 및 회전자 형상은 그림 1과 같으며 자속 포화 및 Mesh, 자기력선 등을 나타내었다.

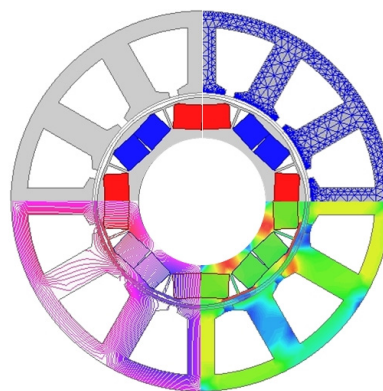


그림 1 해석 모델 형상

Fig. 1 The analyzed model shape

표 1은 해석 모델의 제원을 나타낸 것이다. 정격속도 3000 [rpm], 정격토크는 1.91[Nm], 정격 전류 24이다. 그리고 극 슬롯은 8극 12슬롯이며, 공극 두께는 1[mm], 고정자 지름은 83.6 [mm]이며, 적층두께는 45[mm], 턴 수는 12턴을 사용하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University, Korea.

E-mail: gtkim@cwnu.ac.kr

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

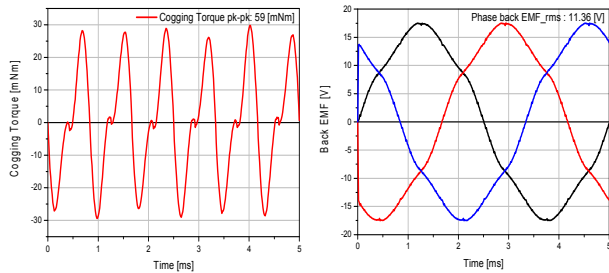
** Motor R&D Center, S&T Motiv, Korea.

Received : January 24, 2017; Accepted : July 24, 2017

표 1 모델 제원

Table 1 Specification of analyzed model

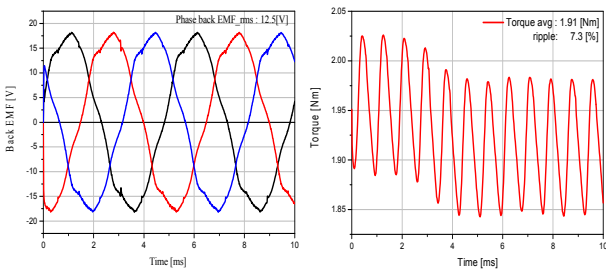
Specification	Value
Rated speed [rpm]	3,000
Rated torque [Nm]	1.91
Rated current [Arms]	24
Pole / Slot	8 / 12
Air gap thickness [mm]	1
Stator diameter [mm]	83.6
Stack length [mm]	45
Turns	12



(a) Cogging torque (b) Noload back EMF

그림 2 해석모델의 무부하 특성

Fig. 2 No load characteristic of analyzed model



(a) Load back EMF (b) Torque and torque ripple

그림 3 해석모델의 부하 특성

Fig. 3 Load characteristic of analyzed model

그림 2는 무부하 특성 해석 결과를 나타낸 것이다. 코깅토크는 59[mNm], 무부하 역기전력은 11.36[Vrms]로 해석되었다. 그리고 그림 3은 부하 특성 해석 결과이다. 부하 역기전력은 12.5[Vrms], 토크는 1.91[Nm]이며, 이 때의 토크리플은 7.3[%]였다. 최종 출력 특성은 표 2를 통하여 정리하였다.

표 2 해석모델의 출력 특성

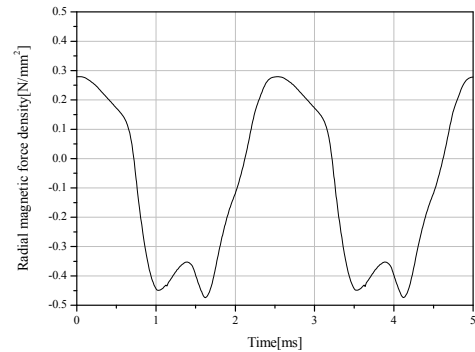
Table 2 Output characteristic of analyzed model

Specification	Value
Back EMF [Vrms]	11.36
Cogging torque [mNm]	59
Current [A]	17.7
Torque [Nm]	1.91
Torque ripple [%]	7.3
Copper loss[W]	30.27
Core loss [W]	28.59
Mechanical loss[W]	17.15
Total loss [W]	75.91
Output [W]	600
Efficiency [%]	88.7

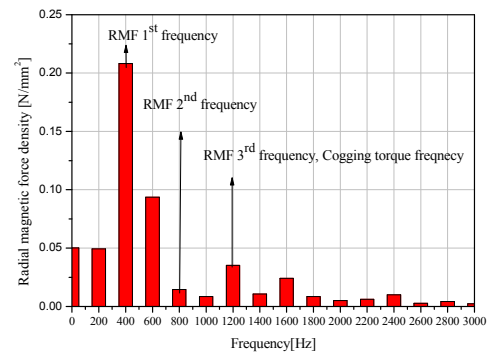
2.2 가진력

Stress tensor 법을 이용한 가진력은 식 (2)와 같다[4].

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0}(B_r^2 - B_t^2) \tag{2}$$



(a) RMF density



(b) RMF density FFT

그림 4 가진력 밀도 및 고조파 분석

Fig. 4 The radial magnetic force density and FFT

f_r 은 반경방향에 작용하는 힘 밀도인 가진력 밀도를 나타내는 것이며, μ_0 는 공기의 투자율, B_r 는 반경 방향의 자속밀도, B_t 는 접선방향의 자속밀도를 의미한다. 그리고 FEM을 이용하여 계산한 가진력 밀도와 그에 대한 FFT 결과는 그림 6과 같다.

가진력의 주파수는 구동 주파수의 2배에서 나타난다. 이 때 구동 주파수는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$f = \frac{N_s \times p}{120} \quad (3)$$

이 때 N_s 는 구동속도, p 는 극수를 의미하며, 이에 의해 계산된 구동주파수는 200[Hz]이며, 따라서 가진력의 기본 주파수는 400[Hz]이다.

고조파 분석 결과를 살펴보면 가진력에 가장 많이 영향을 미치는 주파수는 가진력의 기본주파수인 400[Hz]였으며, 그 외에도 200[Hz], 600[Hz], 1,200[Hz] 또한 어느 정도 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이러한 주파수가 공진주파수와와의 영향도가 어느 정도 미치는 지 분석하기 위해 구조해석을 실시하였다

3. 구조적 해석

3.1 하우징 증대 전 모델의 모드해석

모드란 진동계를 이루는 요소의 고유한 동적 양상을 나타낸 것이다. 고정자에서 진동이 발생할 시 구조물이 가지는 고유진동 주파수 대역에서 공진이 나타나며, 이 공진에 의해 변형되는 형상이 모드해석을 통하여 나타난다.

모드해석에서 공진주파수는 식 (4), (5)와 같이 구해진다.

$$f_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

$$k = \sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)}} \quad (5)$$

이 때 f_n 은 고유진동주파수, k 는 강성계수, m 은 질량이며, 강성 계수를 구하기 위한 값에서 E 는 Young's modulus, ν 는 Poisson's ratio를 의미한다.

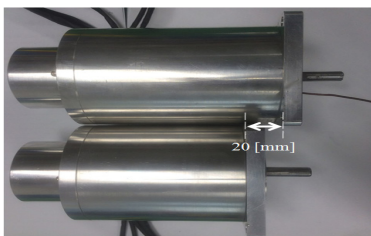


그림 5 하우징 길이 차이
Fig. 5 The length difference of housing

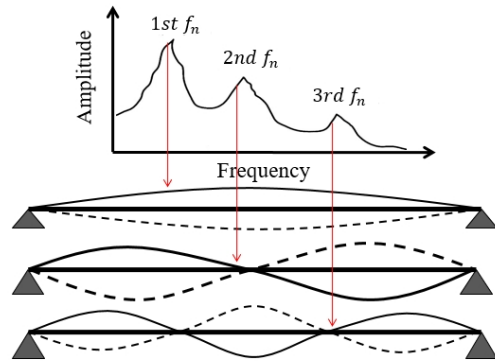


그림 6 모드에 따른 진폭 변화
Fig. 6 The amplitude change according to mode

모드 차수가 높아질수록 구조물에 가해지는 힘의 방향은 점점 많아지나, 그의 영향력은 상대적으로 줄어들기 때문에 낮은 모드일수록 상대적인 진폭이 크다[5]-[6]. 따라서 고대역의 주파수보다 낮은 대역의 주파수를 분석하는 것이 더욱 바람직하다 사료된다.

본 논문에서의 모드 해석은 그림 6에서 나타나는 길이 차이에 의한 고유 진동수 차이를 분석하기 위해 실시하며, 모드 해석에 고려되는 물성 데이터는 표 3과 같다[4].

표 3 모드해석을 위한 물성 데이터

Table 3 The data for mode analysis

Specification	
Young modulus [Gpa]	300
Poisson's ratio	0.24
Mass density [kg/m ³]	7,850

증대 전 모델의 모드 해석에 의한 형상 및 주파수를 그림 8에 나타내었다. 모드 해석 결과로 나온 공진주파수들과 가진력 고조파 분석을 통한 주파수를 고려하였을 때 가진력의 기본주파수인 400[Hz]와 모드 해석을 통한 주파수 값들과는 다소 거리가 있는 것을 확인하였다. 그러나 가진력 제 3고조파인 1,200[Hz]의 대역에 2차 공진 주파수인 1,119[Hz]가 포함되며, 이 때 전동기에 공진이 일어나 진폭의 크기가 클 것으로 사료된다.

3.2 하우징 증대 후 모델의 모드해석

하우징 증대 후 모델에 대한 모드해석 형상 및 주파수를 그림 9에 나타내었다. 증대 후 모델은 증대 전 모델에 비해 하우징이 증가하였기 때문에 질량증가로 인해 전체적인 공진주파수가 변화하였으며, 이는 공진주파수 공식에 의해 예측된다.

또한 2차 모드에서의 주파수 값이 1145[Hz]에서 906[Hz]로 감소하였다. 따라서 증대 전 모델의 경우는 가진력 제 3 고조파

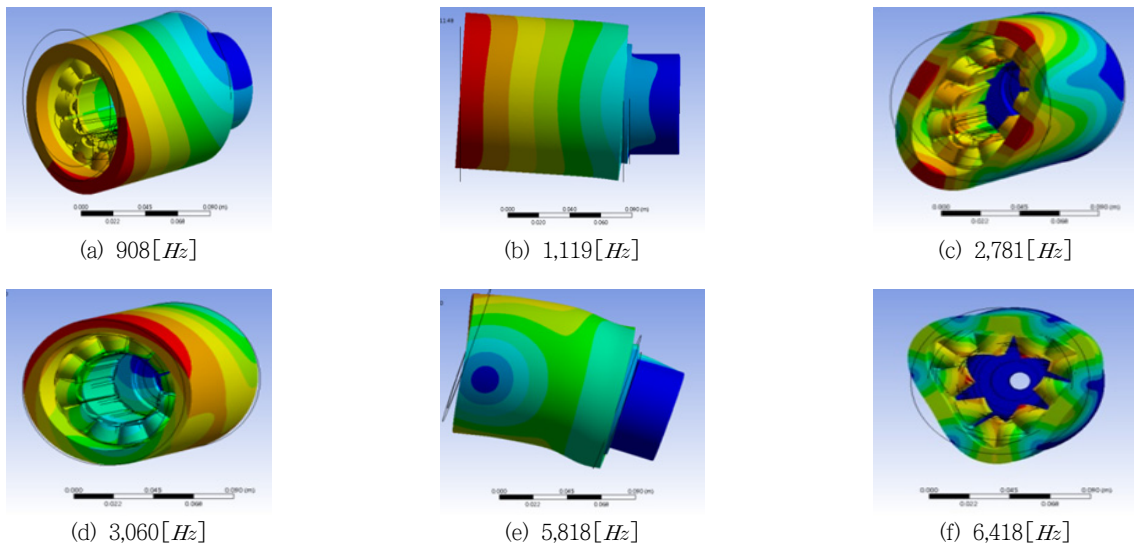


그림 7 하우징 증대 전 모델의 모드 해석 형상
 Fig. 7 The mode shape of model before housing increase

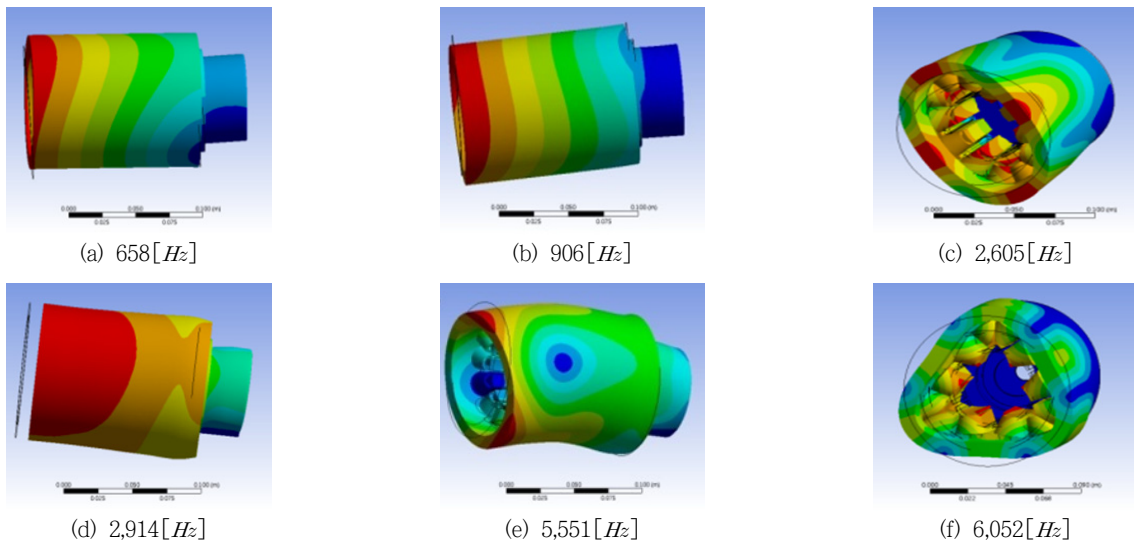


그림 8 증대 후 모델의 모드 해석 형상
 Fig. 8 The mode shape of model after housing increase

와 2차 모드가 공진하던 것을 회피할 것이라 예측되므로 진폭은 다소 감소할 것으로 예상된다.

4. 진동 실험

4.1 하우징 증대 전, 후 모델의 실험 비교

실험 검증을 통하여 해석결과가 실질적인 진동 측정에서도 영향을 끼치는지에 대한 확인이 필요하다. 실험은 가속도 센서는

PV-97C 모델을 사용하고 Signal Analyzer는 SA-01A-4 모델을 사용하였으며, 진동 신호는 UV-06A- Amplifier를 사용하여 측정하였다.

그림 11는 하우징 증대 전, 후 모델에 대한 진동 실험 결과이며, 전체적인 진동이 다소 감소하였음을 눈으로 확인할 수 있으며, 특히 진폭의 변화가 많이 감소한 것 또한 확인할 수 있었다. 이러한 결과의 이유는 우선 전동기 자체의 질량이 증가하였기 때문에 전체적인 주파수가 감소하였고 질량의 증가로 인한 자체적인 정지 관성력이 증가하였기 때문에 진폭 변화의 감소가 일어났다 사료된다.

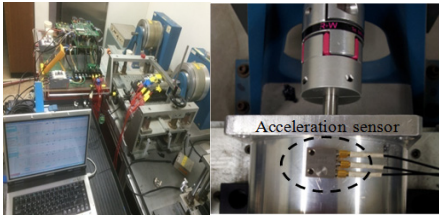


그림 9 진동 실험 장비
Fig. 9 The vibration experiment equipment

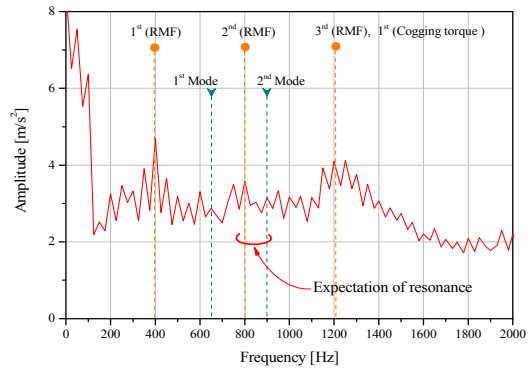


그림 12 증대 후 모델의 실험 결과 확대
Fig. 12 Expanded experiment result of model after housing increase

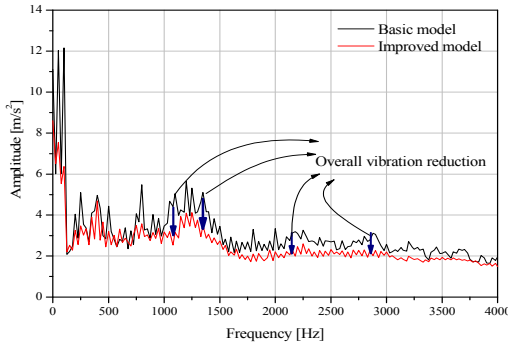


그림 10 하우징 증대 전, 후 모델의 진동 실험 결과
Fig. 10 The experiment result of model before and after housing increase

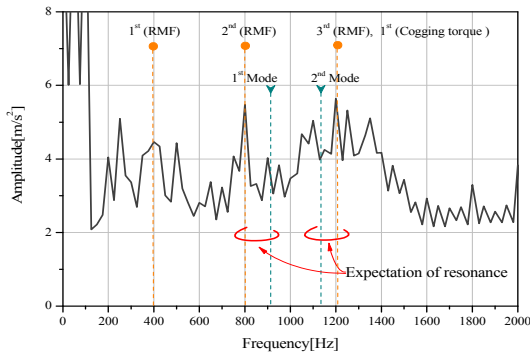


그림 11 증대 전 모델의 실험 결과 확대
Fig. 11 Expanded experiment result of model before housing increase

4.2 실험 개별 분석

앞선 실험 결과에서 진폭의 변화가 큰 부분인 0[Hz]부터 2000[Hz]까지의 실험결과를 확대하였다.

그림 11의 실험결과에서 전동기의 기동 시 발생하는 높은 진동은 기구부의 강성 및 구조물에 의한 비선형적인 진동으로 사료 되어 본 논문에서는 분석하지 않는다.

그림 12의 실험 결과와 같이, 가진력의 기본파(1st RMF) 주파수인 200 [Hz] 근처의 잔여 진동과 고조파 차수인 400, 800,

1,200 그리고 2,000 [Hz]에서 상대적으로 진폭이 크게 관측 되었다. 가진력의 기본파는 고정자의 공진과는 무관하나 상대적으로 높은 진폭을 발생시키는 것으로 보아 가진력은 회전기기의 진동에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 가진력의 제 2 고조파(2nd RMF)에 해당하는 800 [Hz]와 제 3 고조파(3rd RMF)와 코깅 토크의 기본파 주파수가 일치하는 1200 [Hz]에서는 각각 고유진동수 1차 모드(1st Mode)와 2차 모드(2st Mode)와 공진되어 높은 진폭을 가지는 것으로 판단된다.

그림 13은 하우징 증대 후 모델의 실험 결과를 확대한 것이며, 전반적인 진폭의 크기가 하우징 증대 전 모델보다 낮은 것을 확인하였다. 실험 결과와 같이, 가진력의 기본파는 공진과는 상관 없이 큰 진폭을 나타내고 있다. 그 크기는 증대 전 모델 대비 5%의 변동을 확인하였으나 측정 및 계기의 오차 범위 내로 판단된다. 그러므로 증대에 따른 하우징의 질량 증가에 따른 가진력의 변화는 미비한 것으로 판단된다. 이를 통해 상기 계산에 도출된 가진력의 주파수와 크기는 실험에서 충분히 검증되었음을 알 수 있다.

그림 5의 가진력 FFT 결과에서 가진력의 기본파 및 고조파 성분 외에 600[Hz]의 성분 또한 상대적으로 큰 성분을 가지는 것을 확인하였다. 그리고 이 때 1차 모드 주파수의 공진 대역에 포함되어 있기 때문에 가진력 주파수 성분이 아닐지라도 공진의 영향으로 인하여 고주파수 영역보다 상대적으로 높은 진폭 값을 가지리라 예측된다. 증대 전 모델 대비 진폭이 줄어든 이유는 하우징 축 방향 길이 증가에 의한 질량의 변화로 인한 정지 관성력이 증가하였기 때문이라 사료된다.

그리고 제 2 고조파에서는 진폭의 크기가 45% 감소함을 관측 하였다. 이는 증대 전 모델에서는 고유진동 1차 모드 주파수와 가진력 제 2 고조파가 공진하였으나, 하우징 증대 모델에서는 고유 진동 2차 모드 주파수와 가진력 제 2고조파가 공진하는 것으로 판단된다. 이는 고유진동수의 모드가 높아지면 공진에 의한 진폭의 크기가 급격히 줄어드는 것을 실험적으로 재현하였음을 의미한다.

또한, 가진력의 제 3차 고조파 주파수에서는 27%의 진폭이 감소하였다. 이는 고유진동 주파수는 회피하였으나, 코깅 토크 및

구동주파수의 고조파 등에 의한 공진효과로 인해 제 2고조파 대비 진폭이 소폭 감소한 것으로 판단된다. 상기 비교된 실험을 통해 이론에서 서술한 질량에 의한 고유진동수의 거동을 실험에 의해 검증하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 하우징 구조 변경에 의한 진동 양상을 분석하기 위하여 전자기적 해석 및 구조적 해석을 실시하고, 해석치를 검증하기 위하여 진동 실험을 실시하였다.

해석결과에서 나온 주파수 값들 중 전자기적 가진 주파수와 구조해석을 통한 공진주파수 값이 비슷한 대역에 존재할 때 공진이 일어날 것이라 예측하였으며, 실제 실험에서 공진이 일어나는 것을 검증할 수 있었다. 또한 이 때 질량의 변화로 인하여 공진이 회피 되어 진폭이 감소하는 것 또한 측정할 수 있었다. 이 때 1차 공진주파수가 2차 공진주파수보다 진동에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

그리고 공진 주파수와는 무관하게 가진력이 진동에 큰 영향을 미친다는 것 또한 진동 실험을 통하여 검증하였으며, 이와 같은 결론을 바탕으로 공진 주파수 대역을 회피하고, 가진력 주파수 성분을 저감 시킬 수 있는 설계가 이루어진다면 전동기의 진동 저감에 유효할 것이라 사료된다.

감사의 글

이 논문(저서)는 2015년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신타인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2015 H1C1A1035824).

References

[1] Soon-O Kwon, Jeong-Jong Lee, Tao Sun, Jung-Pyo Hong, "Characteristics and radial magnetic force of interior permanent magnet synchronous motor according to pole/slot combination.", VPPC'09. IEEE, pp. 1491-1495, 2009.10.

[2] Lee Won Sik, Lee Gyeong-Deuk, Jun Byung Kil, Kim Gyu Tak, "Sharp design of IPM type BLDC motor for vibration reduction", Electrical Machinery & Energy Conversion Systems Society Annual Conference Journal, pp. 161-164, 2016.3.

[3] Hong-Soon Choi, Il-Han Park, Won-Kyu Moon, "On the Physical Meaning of Maxwell Stress Tensor", The Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58, No. 4, pp. 725-734, 2009.4.

[4] Tae-Seok Jeong, Kyeong-Deuk Lee, Gyu-Won Cho,

Gyu-Tak Kim, "The design of radial magnetic force equilibrium for reduction of vibration and noise im IPM type BLDC motor", Electrical Machinery & Energy Conversion Systems Society Annual Conference Journal, pp. 85-88, 2013.10.

[5] Bo-Seok Yang, "Vibration condition monitoring and diagnostics of machines and installations", Intervention, pp. 25-33, 374-375, 2006.4.

[6] Bo-Seok Yang, "Vibration of rotary machine", Intervention, pp.65-69, 2002.11

저 자 소 개



전 병 길 (Byung-Kil Jun)

1992년 4월 23일 생. 2016년 창원대 전기공학 학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : nono215@naver.com



조 규 원 (Gyu-won Cho)

1984년 3월 2일 생. 2009년 창원대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).

Tel : 055-213-3640

Fax : 055-263-9956

E-mail : gyuwon.cho@sntmotiv.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(공박). 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 055-213-3635

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@changwon.ac.kr