

영구자석 오버행에 의한 BLDC Motor의 전자기적 현상 및 진동특성 해석

論 文
55B-11-4

Analysis of Electromagnetic Phenomena and Vibration of BLDC Motor by Permanent Magnet Overhang

姜圭洪[†] · 金德顯* · 金奎卓**
(Gyu-Hong Kang · Duck-Hyun Kim · Gyu-Tak Kim)

Abstract - In this paper, the estimation of Z-axis thrust ripple and vibration of BLDC motor with asymmetrical permanent magnet overhang is performed by 3-D Finite Element Method (3-D FEM) and vibration experimentation. The ripple of Z-axis thrust is due to armature reaction field in BLDC motor driven to sine wave. That is generating to Z-axis vibration. The analysis results of Z-axis thrust and the vibration by Z-axis thrust ripple is validated by comparison with experimental result.

Key Words : 3-D FEM, BLDC Motor, asymmetrical permanent magnet overhang, z-axis thrust, z-axis vibration

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor : BLDC Motor)는 영구자석을 채용한 회전자, 구동회로 및 자극위치 검출을 센서부로 구성되어 있다. 자극 위치검출 센서로는 빛을 이용한 광센서(Photo Sensor)와 자속을 이용한 자기 홀센서(Hall Sensor)가 주로 사용되고 있으며 속도 및 위치제어를 위해서는 엔코드(Encoder)를 사용하고 있다. 엔코드를 사용할 경우 전동기가 회전을 한 이후에는 엔코더 출력신호로부터 회전수 및 순시 각속도들을 제어할 수 있지만 회전자의 초기위치를 검출할 수는 없다. 반면 광센서나 자기 홀센서는 회전자가 정지한 경우에도 초기 위치를 검출할 수 있어 엔코드를 사용하는 경우에도 초기 위치 검출을 위한 센서가 추가로 구비되어야 한다.

자기 홀센서나 광센서를 이용하여 회전자 초기 위치를 검출할 경우 자기 홀센서는 자속을 발생하는 센서 마그네트가 부가되어야 하며 광센서의 경우 빛의 통과 및 차단을 위한 기계부가 존재해야 한다.

BLDC 전동기의 경우 토크를 발생하기 위해서 회전자에 영구자석을 채용하므로 회전자의 영구자석에 오버행을 구성한 후 오버행 주위에 자기 홀센서 IC를 설치하여 회전자의 초기 위치 및 속도를 검출하는 방법이 산업계 전반에 적용되고 있다. 또한 영구자석 오버행으로부터 양단부에서의 누설 자속을 최소화하여 토크를 증가시키기 위해 적용한 연구가 발표되었다. 그러나 영구자석 오버행에 의해 토크는 증가시킬 수 있지만 회전자가 원주방향의 토크 뿐만 아니라 Z-

축 방향으로의 추력이 함께 발생하여 BLDC 전동기의 진동·소음을 발생한다 [1]-[3]. BLDC 전동기와 같이 구형과 120° 도통을 하는 전동기의 경우 60°마다 정류를 행하므로 회전토크도 전류 통전구간에서 토크 리플이 발생한다. 특히 회전자에 영구자석 오버행이 존재하는 경우 Z-축방향의 추력도 전류 통전마다 추력 리플이 발생하여 BLDC Motor의 진동·소음은 더욱 증가하게 된다.

이러한 영구자석 오버행의 영향은 구조적으로 3차원 해석을 수행해야 하며 3차원 유한요소법(3-D FEM), 3차원 등가 자기회로방법(3-D EMCN) 및 3차원 공간고조파법(3-D Space Harmonics Field Analysis)을 이용하여 영구자석 오버행 특성을 해석한 연구가 발표되었지만 이는 대부분이 영구자석 오버행으로부터 토크 및 코깅토크, 직선기의 경우 추력 특성을 해석한 결과로 진동·소음과 연계한 해석이 이루어지지 않는 못했다 [4][5].

따라서 본 논문에서는 영구자석 오버행의 영향을 3-D FEM을 이용하여 해석하였으며 BLDC 전동기의 구동방식에 의해 전류가 통전하는 구간에서 Z-축방향의 추력 리플 특성도 해석하여 실험치와 비교하였다. 또한 영구자석 오버행 길이 변화에 따른 Z-축방향 추력 특성과 진동·소음 특성을 실험을 통하여 분석하여 BLDC 전동기의 경우 센서부의 구조와 영구자석 오버행에 의한 Z-축 방향 진동·소음 영향을 고려한 설계가 이루어져야함을 본 논문을 통해서 입증하였다.

2. 영구자석 오버행 특성해석

본 논문에서 해석 모델로 제시한 BLDC 전동기의 구조를 그림 1에 나타내었다. 영구자석의 자화방향은 parallel 방향이며 전동기 제원은 표 1에 나타내었다. 자극 위치 검출용 센서마그네트를 위해 영구자석의 한쪽 단부가 비대칭적으로 오버행 구조를 갖고 있다.

[†] 교신저자, 正 會 員 : (주) 모터넷인터내셔널 研究所長
E-mail : ipmsm@korea.com

* 正 會 員 : 建東大學校 機電工學部 助教授 · 工博

** 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 9月 1日

最終完了 : 2006年 9月 27日

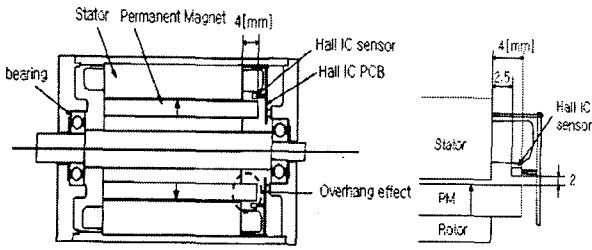


그림 1 해석 모델
Fig. 1 Analysis model

표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

| 항목 | 값[단위] | 항목 | 값[단위] |
|--------|----------|-------------|----------|
| 극 수 | 8 | 고정자 축 방향 길이 | 28 [mm] |
| 상수 | 3 | 회전자 축 방향 길이 | 32 [mm] |
| 회전자 외경 | 28 [mm] | 잔류자속밀도 | 1.17 [T] |
| 공극 | 0.5 [mm] | 자화방향 길이(최대) | 2.5 [mm] |

영구자석 오버행에 의한 Z-축방향 추력 특성을 등가 2차원화하여 유한요소 해석한 결과와 3-D FEM 결과를 실험치와 비교·분석 하였다. 등가 2차원 해석에서는 영구자석에 의한 자속이 고정자 치와 요크를 통해서 폐 경로를 형성하므로 그림 2(a)의 x-y 단면에서의 자속 계산을 그림 2(b)의 z-y 단면으로 폐 회로를 형성하여 Z-축방향 특성을 해석하였다. 등가 2차원 해석 모델을 그림 2에 나타내었으며 3-FEM 해석 모델을 그림 3에 나타내었다 [2].

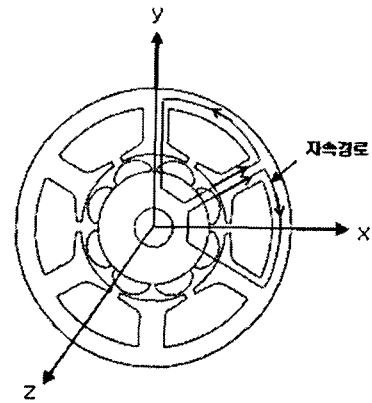
등가 2차원 해석을 통한 추력을 산정하기 위해서는 등가 2차원 모델에서의 발생 추력(F_x)에서 실제의 고정자 슬롯 피치(τ_p)에서의 치 폭(t_w)의 비 및 영구자석의 자극비(α_p)를 고려해서 산정하였다. 등가 2차원 해석을 통한 추력 산정은 다음과 같다 [2].

$$F = F_x \cdot \frac{t_w}{\tau_p} \cdot \alpha_p \quad (1)$$

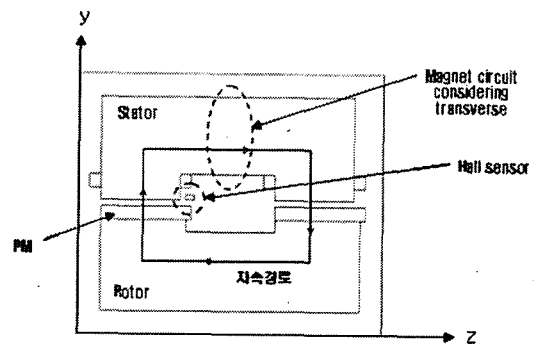
본 논문에서의 해석모델은 고정자 슬롯 피치에 대한 치 폭의 비는 0.87이고 자극비는 0.78이다. 해석결과 최소 공극에서의 발생 추력은 발생추력은 31.6[N]이고 최대 공극에서는 14.2[N]으로 평균 추력은 23[N]이 발생한다.

영구자석 오버행 영향을 3차원 해석하기 위한 해석 모델을 그림 3에 나타내었으며 3-D FEM 해석에 의한 등 포텐셜 분포도를 그림 4에 나타내었다.

그림 1에서 회전자의 위치를 검출하기 위해 Hall IC sensor를 사용하는데 별도의 자극 검출용 영구자석을 사용하지 않고 회전자의 영구자석을 Hall IC sensor가 있는 방향으로 오버행을 주고 있다. 이러한 영구자석 오버행은 축방향으로의 추력을 발생하여 진동 및 소음을 발생시킨다 [1].



(a) x-y 단면에서의 자속 경로



(b) z-y 단면에서의 자속 경로

그림 2 영구자석 오버행 해석을 위한 등가 2차원 모델

Fig. 2 Equivalent 2-D model for analysis of permanent magnet overhang effect

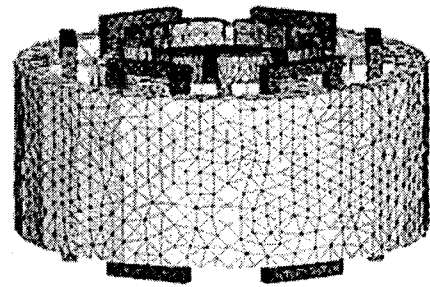


그림 3 3-D FEM 해석 모델

Fig. 3 3-D FEM model

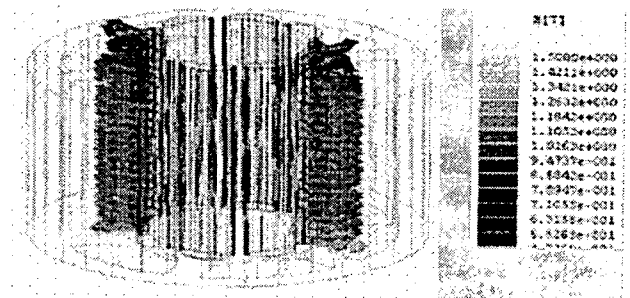


그림 4 3-D FEM 해석에 의한 등포텐셜 분포

Fig. 4 Equi-potential distribution by 3-D FEM analysis

영구자석 오버행을 자극 위치검출 홀 센서용으로 사용하기 위해서는 먼저 센서위치에서의 자속의 평가가 요구된다. 등가 2차원 모델에서는 영구자석 자화방향 길이가 일정하지 않으므로 자화방향 길이가 가장 작은 위치에서 홀 센서에 영역에서의 자속밀도를 산정한 후 센서 단면적을 곱하여 자속을 평가하였다. 이때 센서영역에서의 최고 자속은 205[G]였다. 반면 3-FEM 해석에서 자기 홀센서 위치에서의 자속밀도를 그림 5에 나타내었다. 자기 홀센서 위치의 자속밀도로부터 자속량을 산정하면 자극간의 자속량은 90[G]이고 영구자석 중심의 자속량은 375[G]가 검출된다. 따라서 자기 홀센서를 사용하는 경우 영구자석 오버행 영향으로부터 센서의 최소 동작 조건인 40[G] 이상이 되지만 2차원 해석에서는 영구자석 오버행영향을 정밀하게 해석할 수 없음을 알 수 있다.

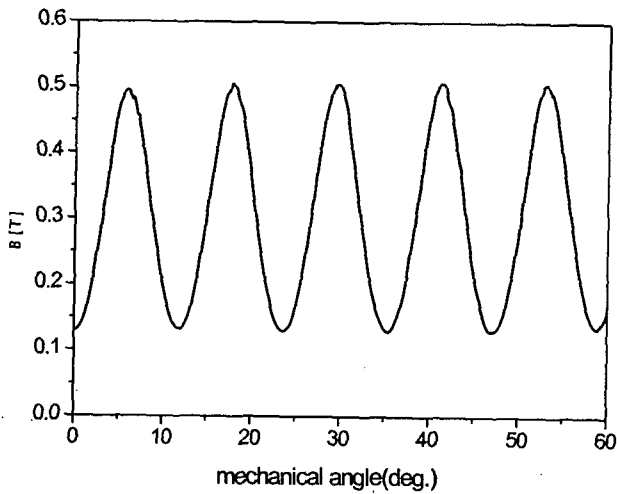


그림 5 3-D FEM 해석에 의한 센서 위치에서의 자속밀도
Fig. 5 Magnetic flux density at sensor position by 3-D FEM analysis

그림 6은 구형과구동 BLDC 전동기의 전류 통전도이다. 각상이 120°의 위상차와 120°의 통전각을 가지고 60°마다 통전하는 상 전환을 하며 항상 두 상이 통전하고 있다. 두 상의 전류에 의한 자속의 중심이 회전자의 자극과 자극사이에 존재할 때를 q축이라 하면 상 전환하는 위치는 q축보다 30° 진상한 위에서 시작하여 q축에서 30° 지상한 시점까지 통전하게 된다. 따라서 q축보다 진상인 시점(30°~60°)에서는 두 상의 전류에 의한 자속이 영구자석에 의한 자속을 감소시키며 지상각(60°~90°) 영역에서는 자속을 증가시키게 된다. 따라서 비대칭 영구자석 오버행을 갖는 BLDC 전동기에서 Z-축방향 추력도 일정하지 않고 전기각 60°마다 자속량의 변화에 의해 Z-축방향 추력의 리플이 발생한다.

그림 7은 3-D FEM을 이용하여 비대칭 영구자석 오버행 모델의 추력특성을 해석한 결과이다. 전기가 전류가 영인 경우에는 18.05(N)의 일정한 추력을 발생하고 있지만 전기가 전류가 인가되는 경우 Z-축 방향으로의 자속이 증가 및 감자를 반복하면서 통전구간에서도 자속의 리플이 발생한다. 이러한 자속의 리플은 Z-축 방향 추력 리플을 발생시키며 Z-축 방향 진동이 발생한다. 이러한 특성은 전류가 증가할 수록 진동은 더욱 증가하게 된다.

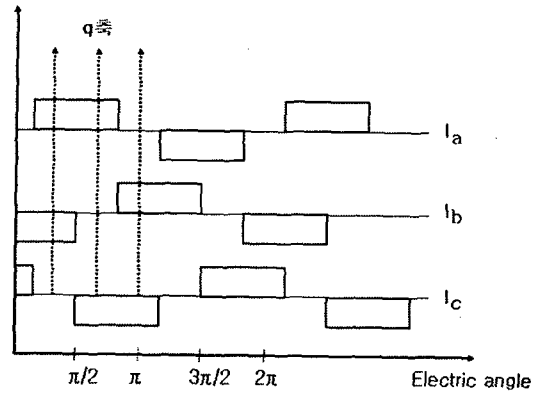


그림 6 BLDC 전동기의 전류통전도
Fig. 6 Current commutation of BLDC Motor

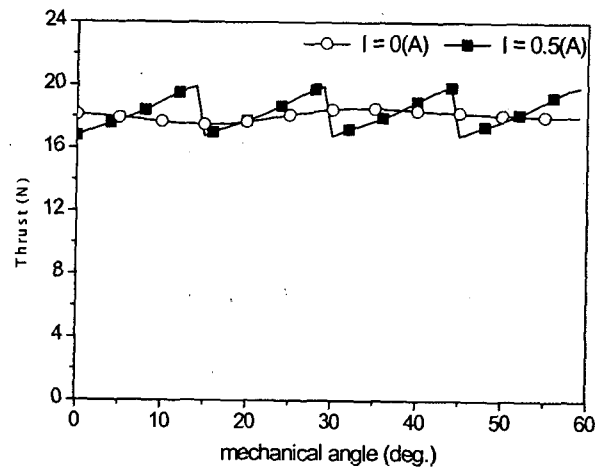


그림 7 비대칭 영구자석 오버행 모델의 Z-축방향 추력특성
Fig. 7 Z-axis thrust of asymmetrical permanent magnet overhang model.

3. 영구자석 오버행에 의한 추력 및 진동 측정

영구자석이 비대칭적으로 존재하는 경우 Z-축방향 추력과 이에 따른 진동 측정을 통하여 본 논문에서 제시한 해석 방법의 타당성을 입증하였다.

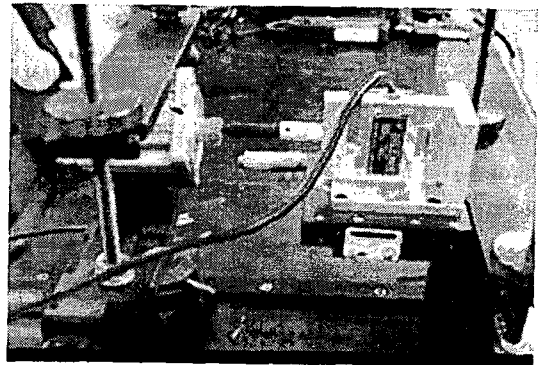


그림 8 추력 측정 장치
Fig. 8 Experimental equipment

그림 8은 Z-축방향 추력을 측정하기 위한 시험 장치이며 실험결과를 등가 2차원 유한요소 해석과 3-D FEM 해석 결과를 각각 비교하여 표 2에 나타내었다. 실험결과 2-D FEM에 의한 해석결과와는 3.3(N)의 오차가 발생하지만 3-D FEM 해석결과와의 오차는 1.65(N)으로 2-D FEM의 결과보다는 매우 근접된 결과를 얻을 수 있다.

표 2 해석 및 실험결과 비교

Table 2 Comparison of analysis and experiments

| | | 해석 결과 | | 실험 결과 |
|-----------------------|-----|---------|---------|-------|
| | | 2-D FEM | 3-D FEM | |
| 추력 [N] | | 23 | 18.05 | 19.7 |
| Hall IC 자속량 [G] | 최소치 | - | 90 | - |
| | 최대치 | - | 375 | - |
| | 평균치 | 205 | 232 | - |

해석 및 실험 결과 본 논문에서의 해석모델인 비대칭 영구자석 오버행을 갖는 BLDC 전동기의 Z-축방향 추력이 운전중에 일정한 값이 된다면 이는 베어링의 부하로만 작용하지만 Z-축방향으로의 추력 리플이 발생하여 일정한 주파수를 갖는다면 Z-축방향의 진동을 발생한다. 본 논문에서의 해석결과로는 전기자에 전류가 여자되면 운전주파수의 6배수의 진동주파수가 발생한다.

BLDC 전동기의 진동 측정을 위한 주파수 분석 장비와 진동센서를 부착한 시작기를 그림 9에 나타내었다.

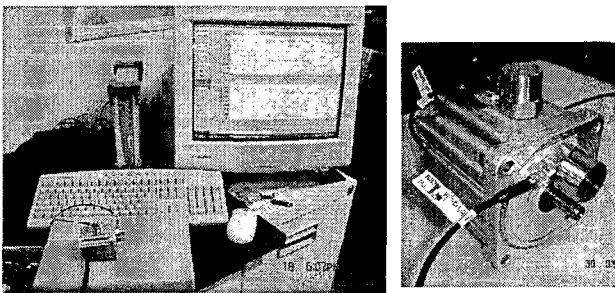
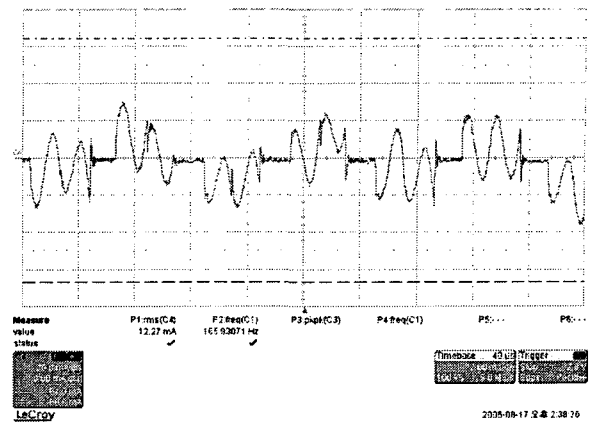
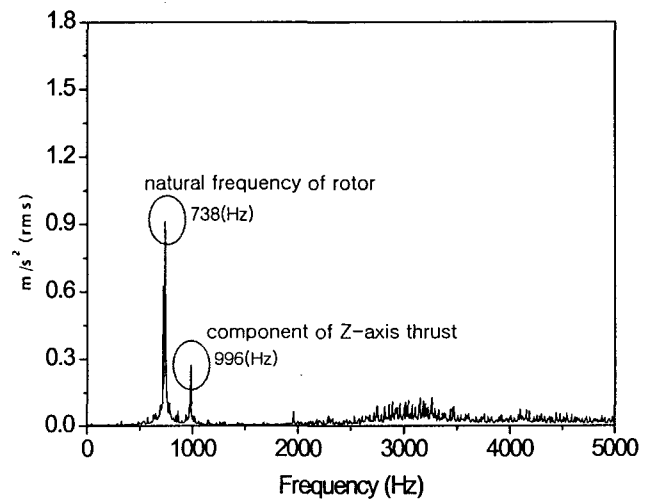


그림 9 진동 측정 장치
Fig. 9 Experimental equipment of vibration

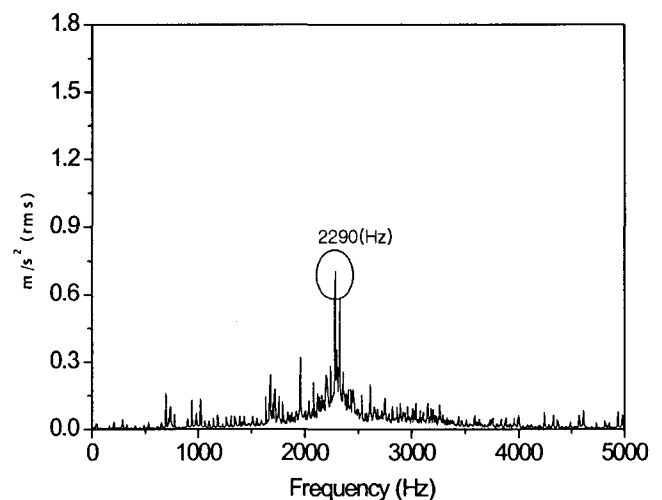
비대칭 영구자석 오버행을 갖는 BLDC 전동기의 Z-축방향 진동 성분을 운전주파수별로 측정하여 분석하였다. 그림 10은 2500(rpm)으로 운전할 때의 전류와 Z-축방향과 Radial 방향 성분의 진동특성을 나타내었다. Z축 방향 성분에서 회전체의 고유진동수는 738(Hz)대역이며 Z-축방향 추력리플에 의해 운전주파수 166(Hz)의 6차인 996(Hz)대역에서 0.273 (m/s^2) 진동성분이 발생함을 알 수 있다. Radial 성분의 진동량은 Z-축방향의 진동량에 비해 상대적으로 매우 적은 값을 가지며 회전체의 Z-축방향 고유진동수의 3배 값을 갖는 2290(Hz) 대역에서의 진동성분이 Radial 방향 진동량을 주도함을 알 수 있다.



(a) 무부하 전류 특성



(b) Z-축 방향 진동성분 (2500rpm, 166Hz)

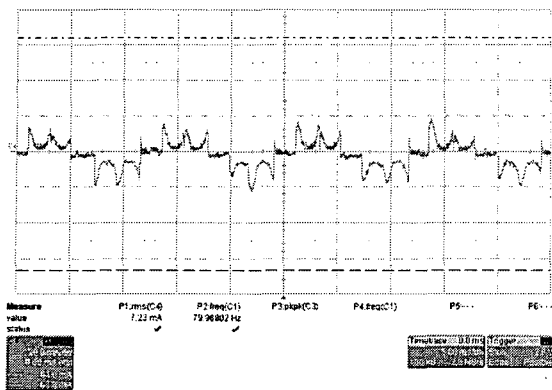


(c) Radial 방향 진동성분 (2500rpm, 166Hz)

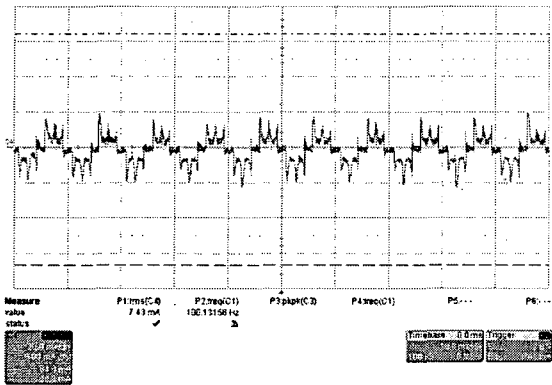
그림 10 무부하 최대속도에서의 전류 및 진동 특성

Fig. 10 Current and vibration at no load maximum speed.

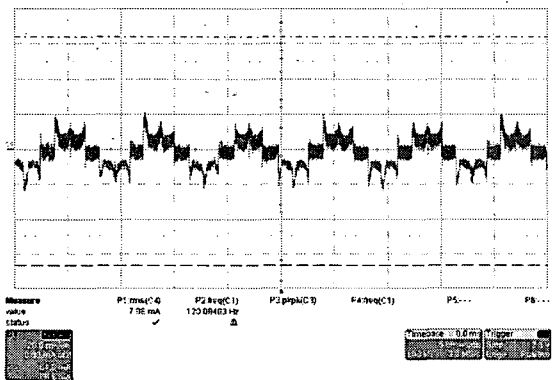
본 논문에서 제시한 BLDC 전동기의 전기자 전류에 의해 Z-축방향 진동성분이 운전주파수의 6배 주파수를 갖는 것을 각 운전주파수별 진동 측정을 통해 입증하였다. 그림 11은 운전 주파수별 진동 실험시의 전류파형을 나타내었다.



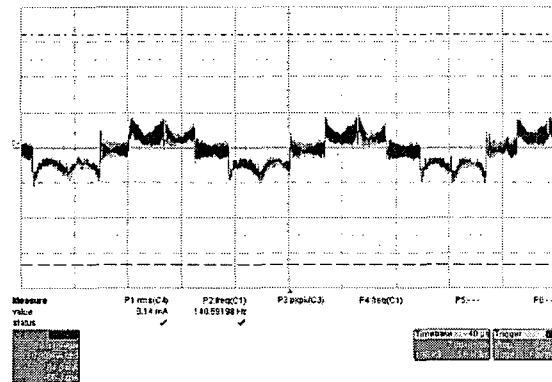
(a) 80Hz



(b) 100Hz



(c) 120Hz



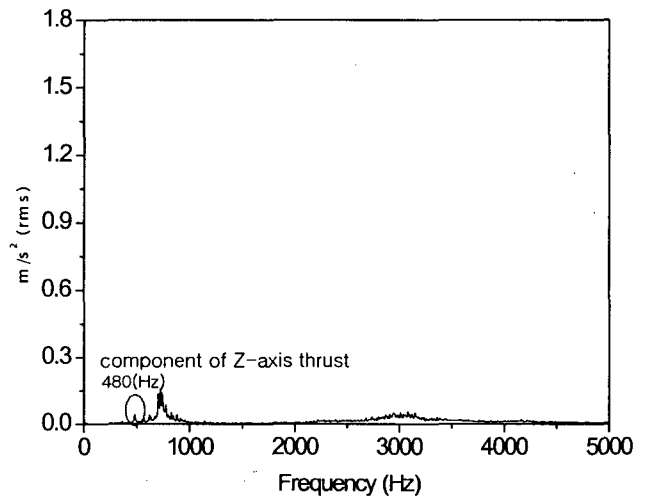
(d) 140Hz

그림 11 주파수별 무부하 전류
Fig. 11 No load current by frequency.

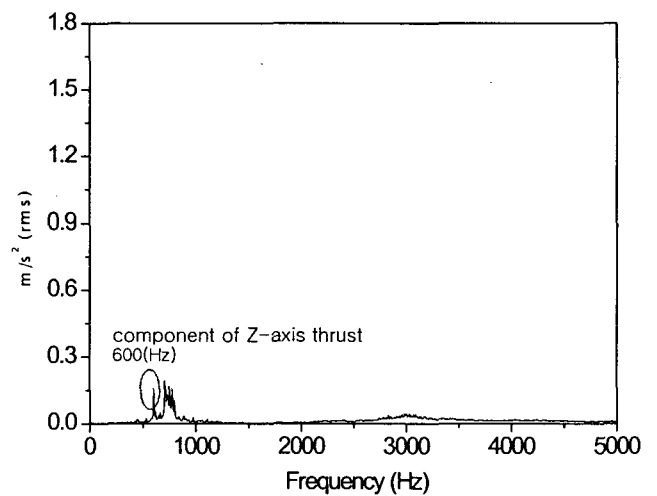
운전주파수별 Z-축방향 진동특성을 그림 12에 각각 비교하여 나타내었다. Z-축방향 진동의 경우 회전주파수의 6배에 해당하는 주파수로 진동이 발생하며 운전주파수가 증가할수록 전기자 전류도 증가하며 전류가 증가할수록 Z-축방향 추력리플의 증가에 의해 진동도 증가한다. 특히, 운전주파수가 증가할수록 Z-축방향의 진동주파수도 증가하며 120(Hz)로 운전시에는 Z-축방향 추력리플에 의한 진동성분과 회전체의 고유진동주파수가 공진이 되어 진동량이 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서 영구자석 전동기의 회전자 설계시 Z-축방향 진동특성을 고려한 설계가 이루어져야 함을 알 수 있다.

Radial 방향 진동특성은 그림 13에 나타내었다. Radial 성분은 회전체 고유주파수의 3차 고조파 성분만을 갖고 있으면 회전속도 및 전류의 크기에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

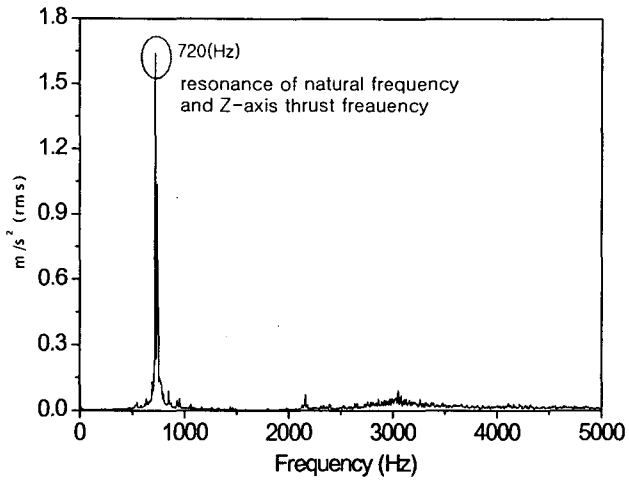
각 운전주파수별 전류 실효치와 Z-축방향 및 Radial 방향의 평균 진동량을 비교하여 표 3에 나타내었다.



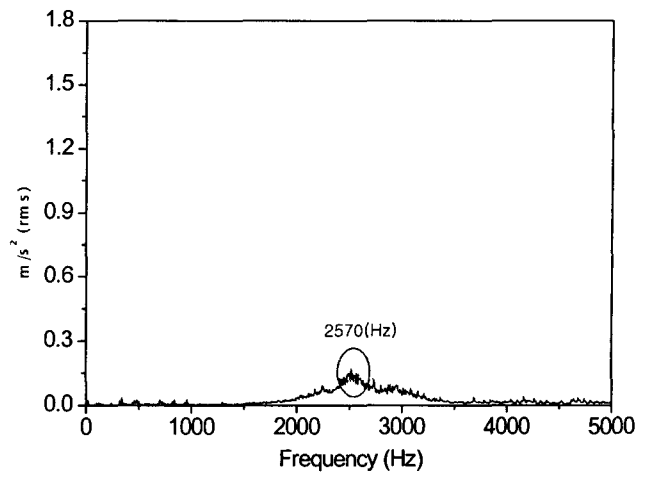
(a) 80Hz (1200rpm)



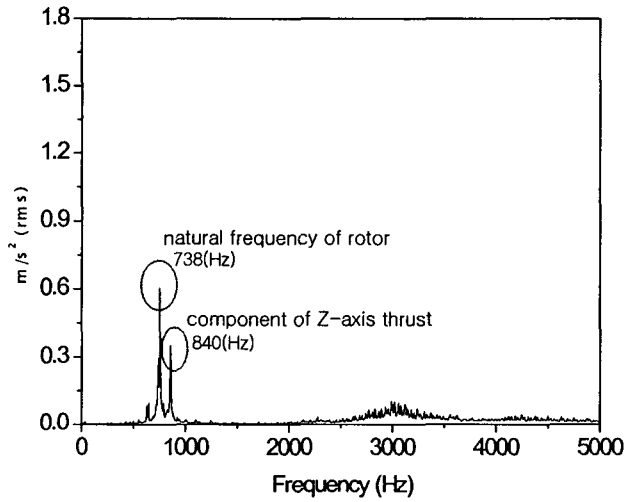
(b) 100Hz (1500rpm)



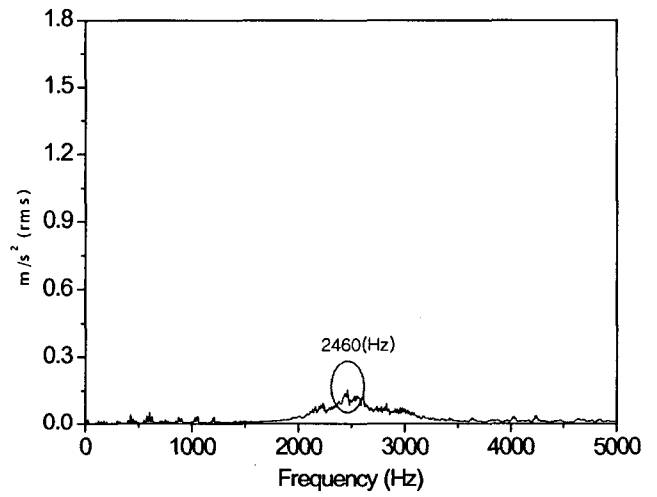
(c) 120Hz (1800rpm)



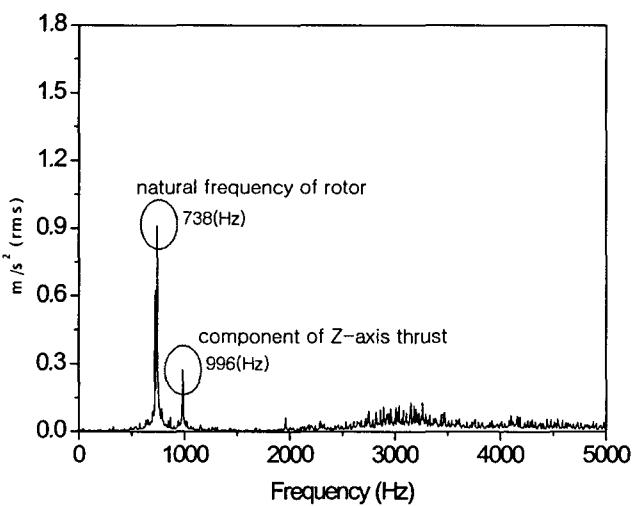
(a) 80Hz (1200rpm)



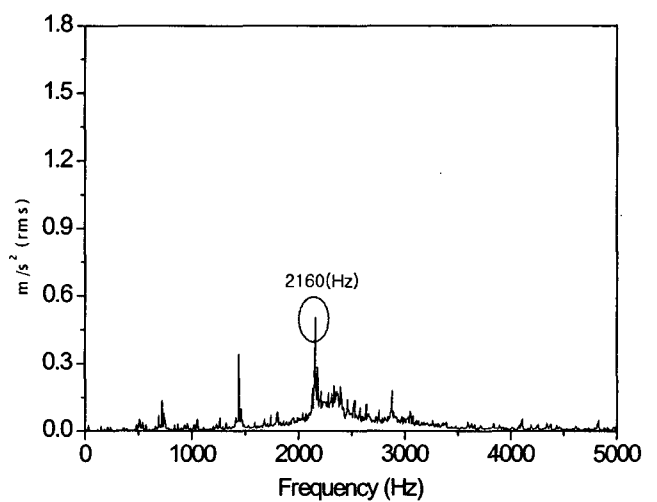
(d) 140Hz (2100rpm)



(b) 100Hz (1500rpm)



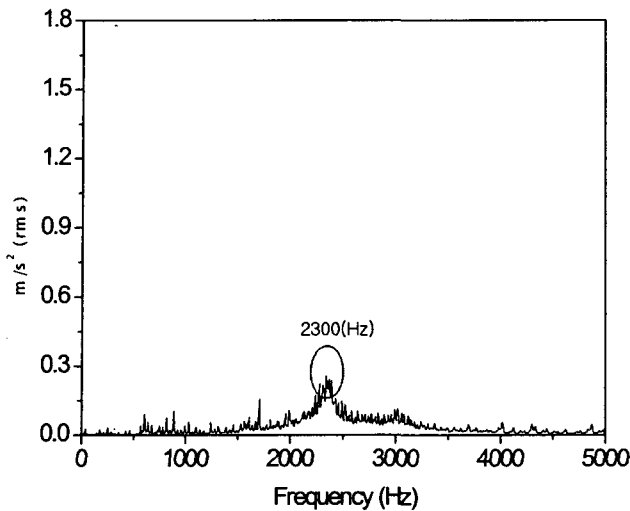
(e) 166Hz (2500rpm)



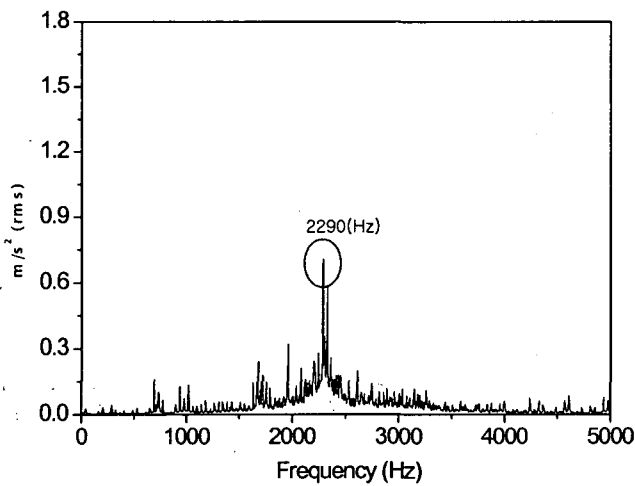
(c) 120Hz (1800rpm)

그림 12 주파수별 Z-축방향 진동 특성.

Fig. 12 Z-axis vibration by frequency.



(d) 140Hz (2100rpm)



(e) 166Hz (2500rpm)

그림 13 주파수별 Radial 방향 진동 특성.

Fig. 13 Vibration of radial direction by frequency.

표 3 운전주파수별 진동실험 결과.

Table 3 The results of vibration test by frequency.

| | 회전수 (rpm) | 전류 (mA) | 평균 진동량 (m/s^2) | |
|-------------------|--------------|------------|--------------------|--------|
| | | | Radial 성분 | Z-축 성분 |
| 운전 주파수 [Hz] | 60 | 900 | 6.87 | 0.62 |
| | 80 | 1200 | 7.23 | 1.17 |
| | 100 | 1500 | 7.43 | 1.13 |
| | 120 | 1800 | 8.27 | 1.52 |
| | 140 | 2100 | 8.66 | 1.5 |
| | 166 | 2490 | 12.5 | 2.02 |

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 비대칭적으로 영구자석 오버행을 갖는 BLDC 전동기의 Z-축방향 추력 해석을 수행하였다. 특히, 구형과 구동 BLDC 전동기는 구동원리에 따라 전기자 전류가 흐르는 경우 전류에 의한 자속이 영구자석에 의한 자속과 중첩되어 공극자속이 통전구간 내에서 증·감을 반복한다. 따라서 Z-축방향 추력도 전류 통전 주파수와 동일한 주파수의 추력 리플이 발생한다. 이러한 추력 리플의 영향은 BLDC 전동기의 진동을 발생시킨다.

Z-축방향 추력특성 해석결과를 실험치와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다. 또한, 진동 실험 결과 Z-축 추력에 의한 Z-축방향 진동주파수는 운전주파수의 6차 고조파 성분을 가지며 진동량은 전기자 전류의 크기에 비례함을 실험을 통해 입증하였다. 따라서 비대칭 영구자석 오버행을 갖는 BLDC 전동기에서 영구자석 오버행을 자극위치 검출용 센서 마그네트로 이용하는 경우 Z-축방향의 추력이 부하상태에서 리플을 가지며 이에 따른 회전자 진동이 증가하게 되므로 BLDC 전동기 설계시 Z-축 진동을 고려해서 설계해야 한다.

참 고 문 헌

- [1] Jack F. Gieras, Chong Wang and Joseph Cho Lai, Noise of Polyphase Electric Motors, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006
- [2] 강규홍, 김덕현, "로봇 구동용 BLDC Motor의 영구자석 오버행에 따른 토크 및 진동·소음 특성", 대한전기학회 논문지 Vol. 55B, No. 7-2, pp.346~353, 2006. 7.
- [3] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendon Press, Oxford, 1994
- [4] Dan M. Ionel, Mircea Popescu, Malcolm I. McGilp, T.J.E. Miller, and Stephen J. Dellinger "Assessment of Torque Components in Brushless Permanent-Magnet Machines Through Numerical Analysis of the Electromagnetic Field", *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 41, No. 5, pp. 1149~1158, Sep./Oct. 2005
- [5] Jason R. Stack, Thomas G. Habetler, and Ronald G. Harley, "Fault-Signature Modeling and Detection of Inner-Race Bearing Faults", *IEEE Trans. on Industry Application*, vol. 42, No. 1, pp. 61~68, Jan./Feb. 2006

저 자 소 개



강규홍 (姜圭洪)

1967년 11월 5일생. 1992년 창원대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~1998년 LG전자(주) 주임연구원. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2001~2004년 창원대 메카트로닉스공학부 BK계약 교수. 2005~현재 (주)모터넷인터내셔널 연구소장

Tel : 032-621-2829

Fax : 032-621-2805

E-mail : ipmsm@korea.com



김덕현(金德顯)

1966년 7월 10일생. 1992년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 창원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1996년 한화기계 자동화 사업부. 1997년~현재 건동대학교 기전공학부 조교수

Tel : 054-820-8133

E-mail : dh0710@kundong.ac.kr



김규탁(金奎卓)

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

Tel : 055-279-7515

Fax : 055-263-9956

E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr