

# 로봇 구동용 BLDC Motor의 영구자석 오버행에 따른 토크 및 진동·소음 특성

論 文  
55B-7-2

## Characteristics of Torque and Vibration-Noise take into account Permanent Magnet Overhang of BLDC Motor for Robots

姜圭洪\*·金德顯†  
(Gyu-Hong Kang · Duck-Hyun Kim)

**Abstract** - In Brushless DC Motor, there are Permanent Magnets (PMs) with driving circuit and sensor for detecting rotor position and rotation speed. In the case of using hall IC sensor which response to magnetic flux, that is required to additional sensor magnet for rotor position detecting. Most of BLDC motor, However, take asymmetrical overhang of PM in rotor instead of additional sensor magnet for operating of hall IC sensor. The asymmetrical overhang of PM occur rotor thrust to z-axis direction that is lead to not only damage of bearing but also intensive noise and vibration. Therefore, the analysis of magnet overhang effect in the side of vibration and drive to hall IC sensor is required to precise.

In this paper, 2-D Finite Element Method is used to solve precise field computation and thrust of z-axis direction considering asymmetrical magnet overhang. And also the z-axis thrust from the analysis result is compared to experimental result. In conclusion, the purpose of this paper minimize to noise and vibration of BLDC Motor as analyzes to asymmetrical magnet overhang effect.

**Key Words** : BLDC Motor, Asymmetrical Overhang, Thrust to Z-Axis Direction, Noise And Vibration

### 1. 서 론

산업용 로봇, 청소용 로봇 및 다관절 인간형 로봇등과 같은 시스템에서의 구동 액추에이터들은 고출력 및 소형 경량화가 필수적이다. 최근 고 에너지 밀도의 영구자석 개발과 함께하여 고출력 소형 정밀모터에 영구자석형 전동기를 로봇 다관절 및 구동용 액추에이터로 널리 사용되고 있다.

영구자석을 이용한 브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor : BLDC Motor)는 구동회로와 더불어 회전자의 위치를 검출하기 위한 센서를 필수적으로 구비해야 한다. 센서의 경우 엔코더를 사용할 경우 초기위치 검출을 위한 과정이 필요하며 Hall 센서를 사용할 경우 자속을 발생하는 센서용 영구자석을 추가적으로 부착해야한다. 그러나 영구자석을 추가할 경우 구조가 복잡해지고 비용이 증가하는 문제가 있어 센서용 영구자석 대신 회전자의 영구자석에 오버행(Overhang)을 주는 방식이 적용되고 있다. 이 경우는 회전자의 자속이 센서용 Hall IC에 충분히 전달되기 위한 오버행 길이 설계가 필요하다.[1][2]

BLDC Motor는 회전자 위치에 따라 통전되는 전기자 전류

와 영구자석의 자속에 의해서 전자기적 토크가 발생한다. 즉 공극 자속이 균일하고 일정 전류가 공급되면 토크 리플이 없는 일정한 크기의 토크가 발생한다. 그러나 치, 슬롯 구조의 고정자를 갖는 BLDC Motor의 경우 공극저항의 차에 의한 코깅 토크(cogging torque)가 발생하고 구형과 전압이 인가되는 경우에도 역기전력의 분포 특성과 인덕턴스의 영향으로 일정한 크기의 전류를 얻지 못해 발생하는 Commutation torque ripple이 추가적으로 발생하여 BLDC Motor의 진동·소음을 발생하는 주 원인이 된다. 또한 센서 대응으로 회전자의 영구자석이 오버행을 갖는 경우 축방향의 추력(thrust)이 발생하고 이 추력은 회전 토크 및 코깅 토크와 90° 위상차를 가지고 또한 120° 통전방식의 전동기에서 전기자 전류가 인가되는 경우 고정자측의 자속에 의해 추력은 축방향으로 주기적으로 ripple이 발생하여 전동기 회전체가 받는 전체 힘의 공간적 분포 특성은 더욱 왜곡되어 진동·소음은 더욱 증가하게 된다.[3][4]

따라서 본 논문에서는 소형 정밀 BLDC Motor의 영구자석 오버행에 따른 토크의 공간적 분포 특성과 이에 따른 진동·소음 특성을 분석하여 추력이 최소화 되는 모델과 비교·분석하였다. 영구자석의 오버행에 의한 추력특성의 해석은 유한요소법을 이용하여 자기회로 경로를 등가 2차원화 하여 해석하였으며 실험 결과와 비교하여 해석의 타당성을 입증하였다. 본 논문에서 제시한 추력을 최소화한 경우의 시작기를 제작하여 추력이 발생하는 경우와 진동·소음 특성을 비교 분석하여 오버행에 따른 토크 리플 및 진동·소음 특성을 제시하고자 한다.

† 교신저자, 正會員 : 建東大學校 機電工學部 助教授 · 工博  
E-mail : dh0710@kundong.ac.kr

\* 學生會員 : (주) 모터넷인터내셔널 研究所長  
接受日字 : 2006年 3月 10日  
最終完了 : 2006年 6月 8日

## 2. BLDC Motor 특성 해석

본 논문에서 해석 모델로 제시한 BLDC Motor의 구조를 그림 1에 나타내었다. 영구자석의 자화방향은 parallel 방향이며 전동기 제원은 표 1에 나타내었다.

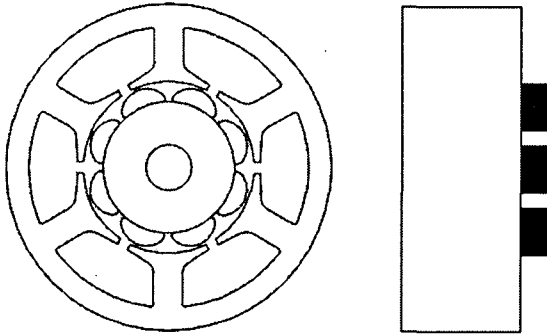


그림 1 해석 모델  
Fig. 1 Analysis model

표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

| 항 목    | 값[단위]    | 항 목         | 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] |

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 축 방향으로의 추력을 발생하여 진동 및 소음을 발생시킨다.[1]

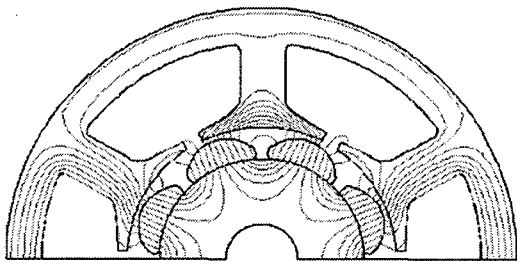


그림 2 등포텐셜 분포도  
Fig. 2 Equi-potential distribution

무부하 역기전력은 거의 trapezoidal에 가까운 특성을 가지며 코깅 토크의 크기는 최대 0.05[kgCm]가 발생하고 있다. 그림 5는 일정전류 인가시의 정토크 특성을 나타내었으며 120° 통전방식에서는 전기각 60°마다 commutation을 하므로 정상상태 운전 시 1회전당의 코깅 토크 및 전자기적 토크가

합성된 토크 특성을 그림 6에 나타내었다. 해석결과 BLDC Motor는 회전각에서 보면 토크의 최대치와 최소치의 차는 0.79[kgCm]로 약 18.5[%]의 토크 ripple이 발생하고 이러한 토크 ripple은 기계적 진동·소음원으로 작용한다.

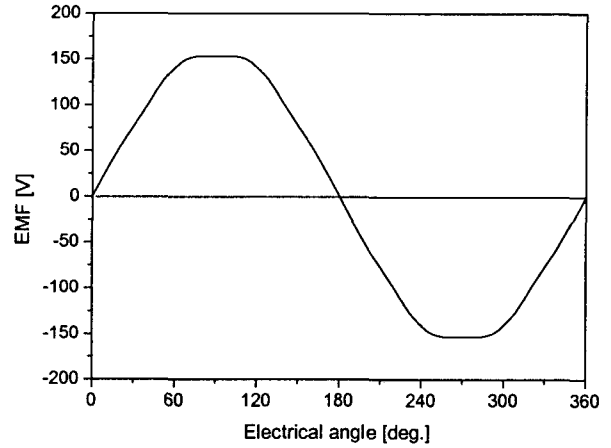


그림 3 무부하 역기전력 특성(3000rpm)  
Fig. 3 No-load electromotive force(3000rpm)

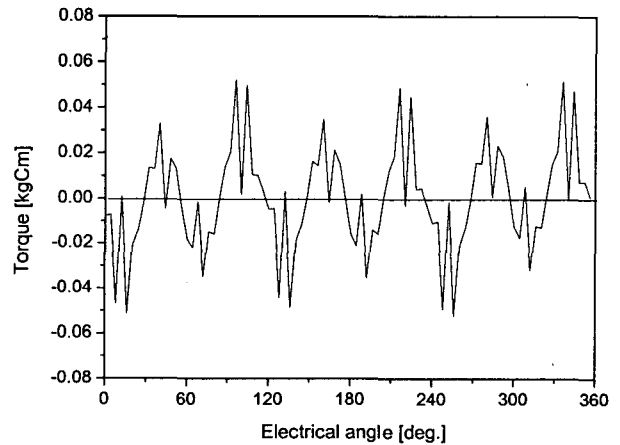


그림 4 코깅토크 특성  
Fig. 4 Characteristics of cogging torque

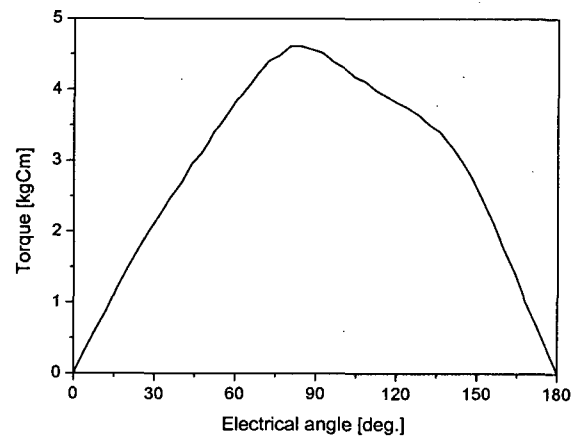


그림 5 정토크 특성(0.53A)  
Fig. 5 Characteristics of constant torque(0.53A)

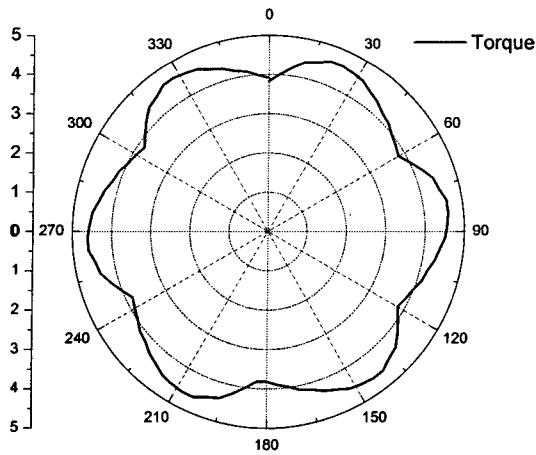


그림 6 commutation 토크 특성(0.53A)  
Fig. 6 Characteristics of commutation torque(0.53A)

3. 영구자석 오버행에 의한 추력 특성 해석

본 연구에서의 해석모델은 자극검출용 센서를 회전자의 영구자석 오버행을 이용하므로 센서가 있는 방향에만 영구자석 오버행이 존재하는 구조를 가지고 있다. 전동기의 구조적 특징은 축 방향으로 추력을 발생시켜 진동 및 소음을 증가시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 영구자석의 길이를 증가시켜 오버행을 대칭적으로 구성하면 추력은 해소할 수 있지만 기구의 size가 증가하는 문제점이 발생한다. 또한 영구자석 길이는 증가시키지 않고 자기적 중심을 기계적 중심과 일치 시켜 추력문제를 해소할 수 있지만 이 경우는 자극위치 검출용 Hall 센서를 통과하는 자속량 및 센서 동작특성을 검토해야 한다.

따라서 본 논문에서는 영구자석 오버행에 의한 추력 특성과 이에 따른 진동·소음 특성, Hall 센서를 통과하는 자속량을 유한요소법을 이용하여 분석하였다.

영구자석 오버행에 의한 추력 및 Hall 센서부의 자속량을 검출하기 위해서는 3차원 해석을 수행해야 하지만 본 논문에서는 자속의 경로를 등가 2차원으로 모델링하여 해석하였다.

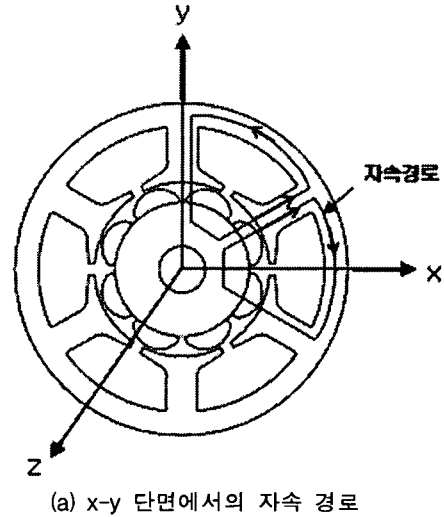
그림 7은 유한요소 해석을 위한 등가 2차원 모델로서 그림 7(a)의 x-y 단면에서의 자속흐름도이다. 영구자석이 방사방향으로 구성되어 있는 회전형 전동기를 영구자석이 z축 방향으로 무한 연속으로 존재하고 있다고 가정하여 z-축 방향 추력 해석을 위한 z-y 단면의 등가자기회로를 그림 7(b)에 나타내었다. 이때 z-y 단면의 등가자기회로에서 공극 길이는 카터계수를 고려하여 보정하였다.[1]

해석 모델의 영구자석의 자화방향 길이가 일정하지 않기 때문에 영구자석 오버행을 고려한 등가 2차원 해석에서는 영구자석의 형상을 공극의 기계적 치수로 고려하여 해석하였다.

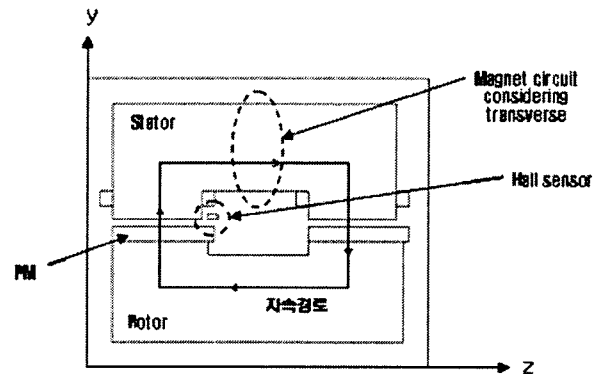
해석 결과 등 포텐셜 분포도를 그림 8에 나타내었으며 2차원 단면에서의 공극자속밀도 특성과 오버행을 고려한 등가 2차원 모델에서의 공극 자속밀도 특성을 그림 (9) 및 (10)에 나타내었다. 2차원 단면을 해석한 경우의 공극자속밀도의 최대치는 1.07[T]이고 오버행 해석을 위한 등가 2차원 모델의 자극 철심 내부의 최대치는 1.05[T]로 등가 2차원 모델 해석

의 타당성을 입증하였다.

등가 2차원 모델에서 공극이 최대인 경우 영구자석 오버행에 의해 Hall IC가 존재하는 영역에서의 자속량은 205[G]로 Hall IC 최소 동작조건이 50[G]보다 커 Hall IC를 이용한 자극위치 검출이 가능함을 알 수 있다.



(a) x-y 단면에서의 자속 경로



(b) z-y 단면에서의 자속 경로

그림 7 오버행 특성 해석을 위한 등가 2차원 모델

Fig. 7 Equivalent 2-D model for analysis of overhang effect

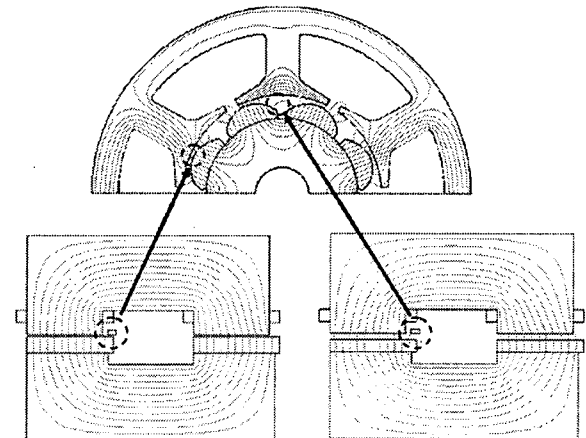


그림 8 등가 2차원 모델 등 포텐셜 분포도

Fig. 8 Equipotential distribution by equivalent 2-D model

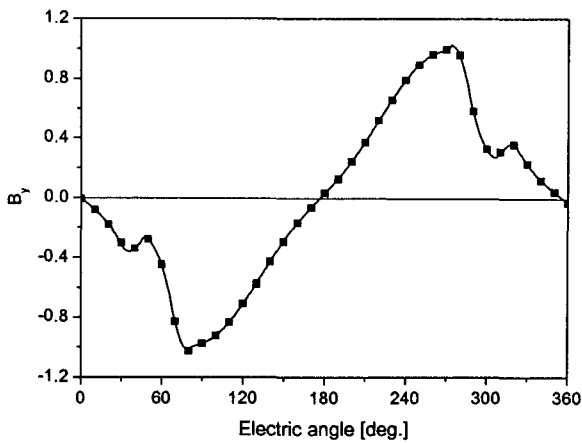
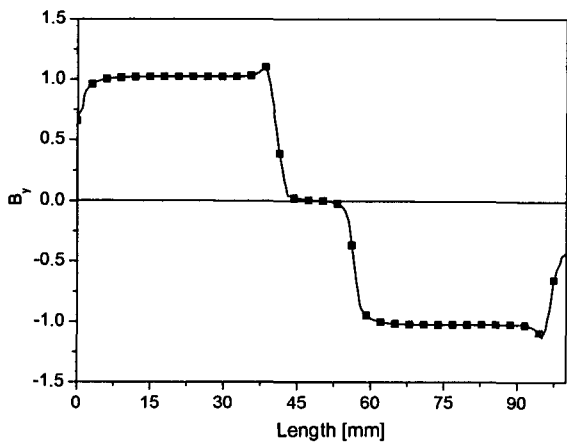
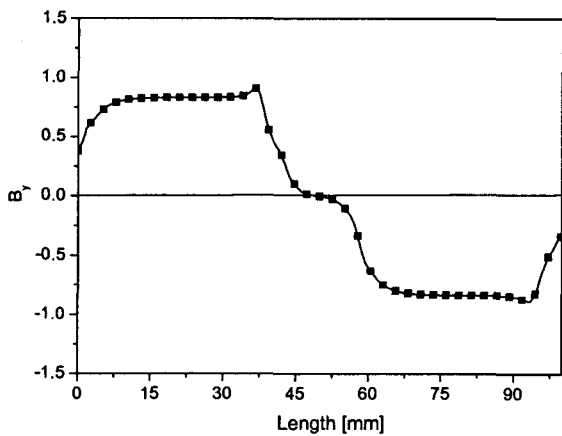


그림 9 2차원 모델에서의 공극자속밀도  
Fig. 9 Airgap flux density of 2-D model



(a) 최소 공극에서의 공극자속밀도



(b) 최대 공극에서의 공극자속밀도

그림 10 등가 2차원 모델의 자속밀도 분포  
Fig. 10 Flux density distribution of equivalent 2-D model

등가 2차원 해석을 통한 추력을 산정하기 위해서는 등가 2차원 모델에서의 발생 추력( $F_x$ )에서 실제의 고정자 슬롯피치( $\tau_p$ )에서의 치 폭( $t_w$ )의 비 및 영구자석의 자극비( $\alpha_p$ )를 고려해서 산정하였다. 등가 2차원 해석을 통한 추력 산정은 다음과 같다.

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

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. 따라서 비대칭적으로 영구자석 오버행을 갖는 BLDC Motor에서 회전자에 발생하는 힘은 commutation에 의한 토크 ripple과 더불어 축방향으로의 추력에 의해 힘의 공간적 분포 특성은 더욱 왜곡되어 진동 및 소음을 증가시킨다.

따라서 본 논문에서는 영구자석의 축방향 자기적 중심을 고정자의 기계적 중심과 일치한 후 추력 특성을 해석하였으며 해석모델 및 결과를 그림 11과 12에 나타내었다. 이때 Hall IC의 위치는 엔드코일의 기계적 치수에 의해 이동이 불가능한 상태이므로 영구자석과의 간격이 멀어져 Hall IC의 자속량이 저하된다. 따라서 추력 저감과 Hall IC의 동작 특성을 고려한 오버행 길이 산정이 매우 중요하다. 비대칭적으로 4[mm] 오버행을 갖는 영구자석을 2[mm] 이동하여 자기적 중심과 기계적 중심을 일치한 경우 Hall IC에서의 자속량은 공극이 최대인 경우 103[G]로 동작특성의 변화는 없다. 또한 추력 특성은 대칭모델의 경우 2.6[N]으로 추력이 발생하는데 이는 등가 2차원 해석의 오차가 된다.

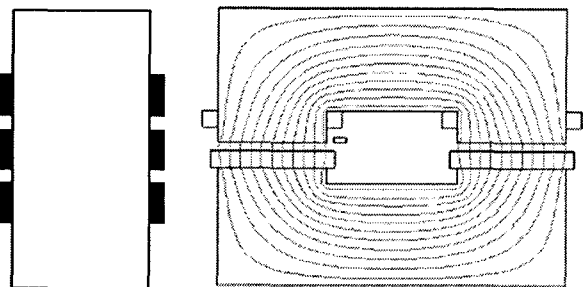


그림 11 오버행 대칭구조의 등가 2차원모델 등포텐셜 분포도  
Fig. 11 Equi-potential distribution by equivalent 2-D model of symmetrical overhang

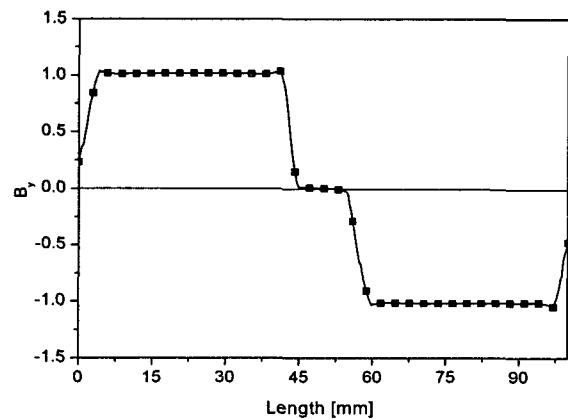


그림 12 오버행 대칭구조의 등가 2차원모델 공극자속밀도  
Fig. 12 Airgap flux density by equivalent 2-D model of symmetrical overhang

### 3. 추력 및 진동·소음 실험 결과 및 분석

본 논문에서 제시한 영구자석 오버행을 고려한 등가 2차원 해석의 타당성을 입증하기 위해서 영구자석 오버행이 비대칭적인 구조를 갖는 모델과 대칭 모델의 추력특성을 실험을 통해 해석치와 비교하여 입증하였다. 추력 측정은 Load cell을 이용하였으며 시작기 및 실험장치를 그림 13에 나타내었다.

영구자석 오버행이 비대칭적으로 구성된 전동기의 추력 측정결과 19.7[N]이 발생하여 해석결과인 23[N]보다는 다소 적게 나타남을 알 수 있다. 이는 등가 2차원 해석에서는 자속의 슬롯 누설과 치 끝단부의 자기포화를 고려할 수 없어 발생한 오차지만 추력특성은 실험치와 비교적 일치함을 알 수 있다.

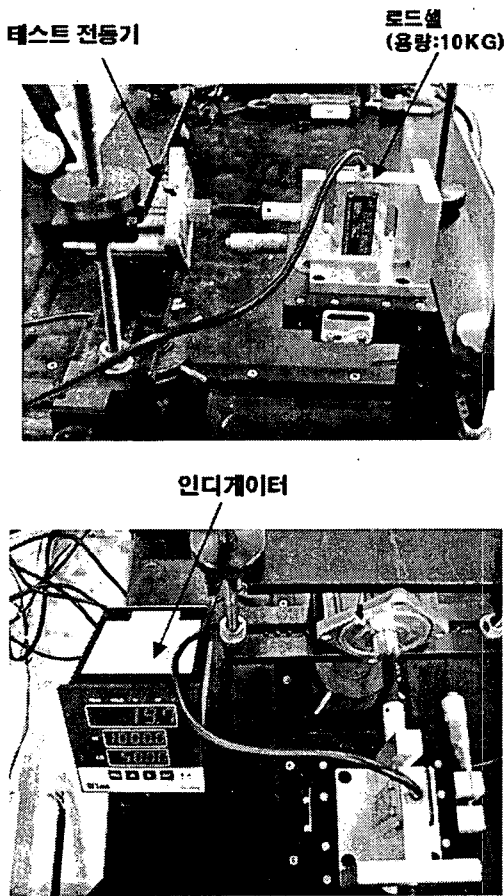


그림 13 추력 측정 장치  
Fig. 13 Experimental equipment

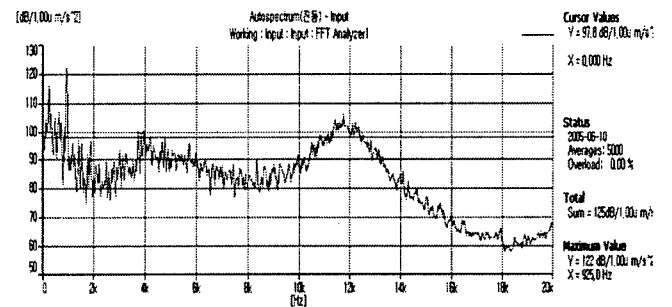
표 2 추력 특성 비교  
Table 2 Comparison of thrust

|                 | 등가 2차원 해석 |       | 실험 결과 |
|-----------------|-----------|-------|-------|
|                 | 비대칭 모델    | 대칭 모델 |       |
| 추력 [N]          | 23        | 2.6   | 19.7  |
| Hall IC 자속량 [G] | 205       | 103.4 | -     |

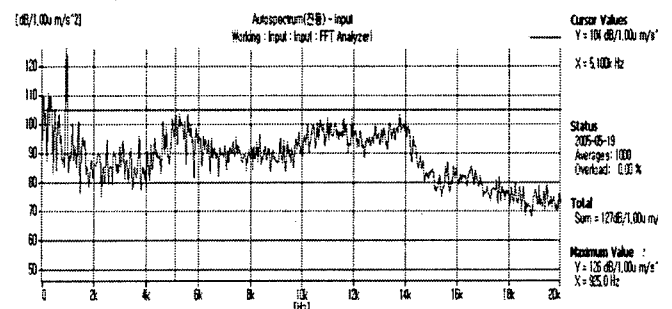
BLDC Motor에서 z-축방향 추력은 베어링의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 진동원인 코깅토크와 commutation torque ripple을 더욱 왜곡시켜 진동·소음에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 논문에서는 추력을 제거한 영구자석 대칭 모델과 비대칭 모델을 비교하여 추력이 진동 및 소음에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 14(a)는 BLDC Motor가 3350[rpm]으로 운전할 때의 영구자석 대칭모델의 진동특성을 주파수 분석한 실험결과이다. 결과이며 그림 15는 대칭구조의 진동 및 소음 주파수 분석 결과이다. 본 논문에서의 해석 모델은 8극 6슬롯의 구조를 가지므로 코깅 및 commutation torque의 주파수는 회전수의 24배가 되어 3350[rpm]에서는 5.35[kHz]의 코깅 및 commutation torque ripple이 발생한다. 실험결과 1[kHz]와 5.35[kHz] 대역에서 큰 진동이 발생한다. 영구자석 비대칭 모델의 진동 실험 결과를 그림 14(b)에 나타내었다. z-축방향 추력이 radial 성분의 코깅 및 commutation torque ripple의 왜곡을 발생시켜 코깅 및 commutation torque ripple에 의한 진동 주파수인 5.35[kHz]를 더욱 가진시켜 영구자석 비대칭 모델의 5.35[kHz] 대역의 진동량이 대칭 구조의 모델에 비해 현저히 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 z-축방향 추력 자체가 진동에 영향도 미치지 않지만 코깅 및 commutation torque ripple의 크기 및 힘의 공간적 왜곡을 발생 시켜 진동을 더욱 증폭시킴을 알 수 있다.

이러한 진동의 주파수 특성이 소음 특성에서도 같은 결과가 나타나 비대칭구조의 46[dB]에 비해 대칭구조는 39[dB]로 7[dB]의 소음차가 발생하는 실험 결과를 그림 15에 나타내었다.

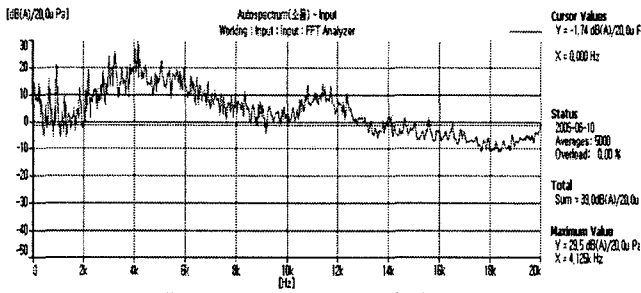


(a) 대칭 모델

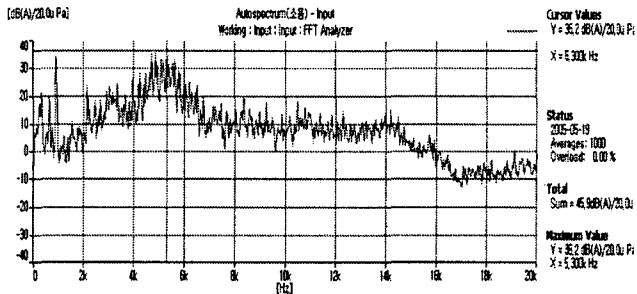


(b) 비대칭 모델

그림 14 영구자석 오버행에 따른 진동 특성  
Fig. 14 Characteristics of vibration according to permanent magnet overhang



(a) 대칭 모델



(b) 비대칭 모델

그림 15 영구자석 오버행에 따른 소음 특성

Fig. 15 Characteristics of noise according to permanent magnet overhang

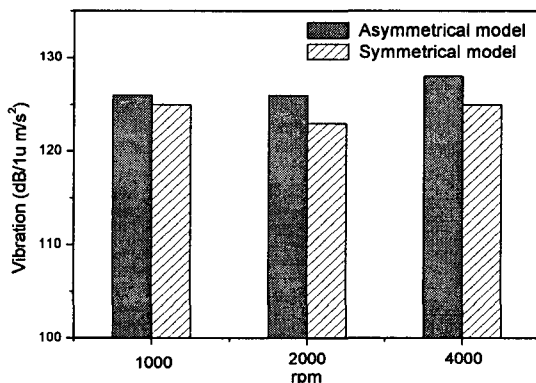


그림 16 회전수에 따른 진동 특성 비교특성

Fig. 16 Comparison of vibration by rotation speed

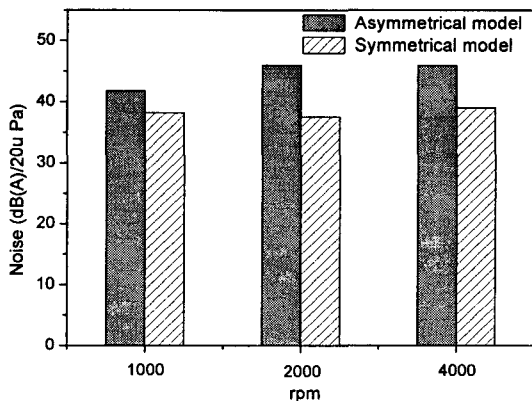


그림 17 회전수에 따른 소음 특성 비교특성

Fig. 17 Comparison of noise by rotation speed

그림 16과 17은 회전수에 따른 진동 및 소음 특성을 영구자석 오버행 비대칭 모델과 대칭모델을 비교하여 분석하였다. 실험결과 영구자석 오버행의 비대칭이 진동과 소음에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 센서 마그네트를 제거하고 영구자석의 오버행을 이용하여 자극 위치를 검출하는 BLDC Motor의 비대칭 영구자석 오버행에 의한 토크 및 추력 특성과 이에 의한 진동·소음의 변화를 등가 2차원 해석과 실험을 통하여 입증하였다. 또한 z-축 방향 추력이 진동·소음에 미치는 영향을 추력이 발생하지 않는 대칭구조의 영구자석 오버행 모델을 설계 및 제작하여 실험을 통해 분석하였다.

해석 및 실험 결과 영구자석이 비대칭적으로 구성된 BLDC Motor는 z-축 방향으로 매우 큰 추력을 발생하며 이러한 추력 특성이 전자기적 토크 리플과 코깅 토크에 의한 진동을 더욱 가진시킴을 실험을 통해서 입증하였다. 따라서 자극검출용 센서 마그네트를 회전자의 오버행으로 구현하는 경우 영구자석 오버행의 비대칭 영향에 의한 진동·소음 특성을 고려하여 설계해야하며 이를 다음 연구로 삼는다.

### 참고 문헌

- [1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendon Press, Oxford, 1994
- [2] Renato Carlson, Michel Lajoie-Mazenc, and Joao C. dos S. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless dc Machines", *IEEE Trans. on IA*, vol. 28, No. 3, pp. 632~638, May/June 1992.
- [3] 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
- [4] 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



### 강 규 흥 (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(공학박). 2001~2004년 창원대 메카트로닉스공학부 BK계약 교수. 2005~현재 (주)모터넷인터내셔널 연구소장  
Tel : 032-621-2829  
Fax : 032-621-2805  
E-mail : ipmsm@korea.com



### 김 덕 현 (金德顯)

1966년 7월 10일생. 1992년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 창원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년~1996년 한화기계자동화 사업부. 1997년~현재 건동대학교 기전공학부 조교수  
Tel : 054-820-8133  
E-mail : dh0710@kundong.ac.kr