

## BLDC Motor의 전자기적 기진원 분석 및 진동저감 설계

송혁진, 강규홍  
(주)모터넷 인터내셔널

### Design and Analysis on Electromagnetic Vibration source of BLDC motor for Vibration reduction

Hyauk-Jin Song, Gyu-Hong Kang  
Motor-net International CO.,LTD.

**Abstract** - In this paper, electromagnetic vibration source of BLDC motor is analyzed, and a method of reducing vibration is presented. The vibration sources of BLDC motor are cogging torque and commutation torque ripple. The effectiveness of the proposed method were verified with experiments on FFT analysis.

### 1. 서 론

전동기는 많은 기계장치 및 전자기기의 동력원으로서 구동 원리상 반드시 회전 혹은 직선운동을 하게되어 세트의 진동을 유발하는 직접적인 원인을 제공한다.

이중 BLDC 모터는 고에너지 밀도의 영구자석을 사용할 수 있기 때문에 효율을 증가시킬 수 있고 소형화와 장수명의 특성을 기대할 수 있다.

BLDC 모터에서의 토크 리플 발생 요소는 코킹토크, commutation, 펄스폭 변조에 의한 전류 맥동, 비이상적인 역기전력 파형의 4종류로 나눌수 있다. 이중 펄스폭 변조로 인한 전류 맥동에 의해 발생되는 토크리플은 그 주파수가 20kHz 이상의 높은 주파수를 사용하기 때문에 모터의 기계적인 관성이 땜파 역할을 하여 소멸된다. 또한, 비이상적인 역기전력 파형에 의한 토크 리플은 그 크기가 비교적 작기 때문에, 코킹토크와 commutation에 의한 토크 리플이 BLDC 모터에서 발생되는 토크 리플의 가장 큰 원인이 된다.[1][2][3]

본 논문에서는 코킹토크와 commutation 토크 리플이 BLDC 모터의 진동에 미치는 영향을 유추하고 각 문제점에 대한 개선대책을 실험적인 방법으로 제시하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시험모델

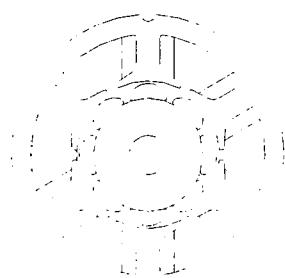


그림 1. 시험 BLDC 모터의 구조

본 논문에서 사용한 표준형 BLDC 모터의 모델은 그림 1에서와 같이 6슬롯, 8극의 구조를 가지고 있으며, 영구자석은 세그먼트형 Nd-Fe-B를 사용하였다. 고정자는 집중권 3상 Y결선이며, 인버터는 3상 2여자 120° 구형파 통전방식이다.

다음의 표 1은 시험대상 모델의 전기적 및 기계적 제원을 나타낸다.

표 1. 시험모델 사양

항 목	내 용	단위
구동 전압	60	W
구동 전압	220	V
부하	3.9	kg.cm
정격 속도	1500	rpm
고정자 외경	57	mm
고정자 적층	28	mm
영구자석 종류	Nd-Fe-B	-
회전 방향	CW	-

#### 2.2 Cogging Torque

코킹토크는 영구자석이 부착된 회전자에 의하여 공극 중에 자속밀도와 고정자 철심 슬롯의 상호작용에 의하여 발생하는 것이다.

코킹토크는 고정자 슬롯수와 회전자의 극수의 조합에 의하여 그 주파수가 결정된다. 본 시험에 사용된 모터는 6슬롯에 8극기 이므로, 한회전당 총 24번의 진동이 발생한다.

그림 2의 Model 2는 그림 1 시험모델의 코킹토크 축 정치를 나타낸다. 측정은 기준위치로부터 180°까지의 범위를 0.1°간격으로 측정한 값이다. 코킹토크의 크기는 0.399 kg.cm이며, 그림에서는 180°까지 12번의 진동이 발생함을 알 수 있다.

이는 1000rpm을 기준으로 400Hz의 주파수를 갖는 진동성분으로 표현된다. 코킹토크가 모터진동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 회전속도별로 FFT 분석을 시행하였으며, 이를 위해 모터의 축면에 가속도계를 부착하여 회전방향의 진동을 측정하였다.

그림 3에 진동측정결과를 표시하였다. 그림 3.(a)에서 가장 큰 진동성분은 400Hz 영역의 진동이며, 그 값은  $2.35 \text{ m/s}^2$ 이다. 코킹토크 이외의 다른 진동성분은 상대적으로 미비하여 거의 나타나지 않고 있다. 그림 3.(b),(c)에서 회전속도가 증가하면 코킹토크에 의한 진동성분도 그 속도에 준하는 주파수영역대로 이동하는 것을 알 수 있다. 또한 그 피크치도 함께 증가한다.

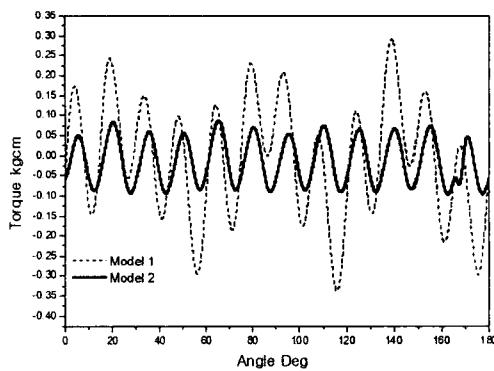


그림 2. 코킹토크 측정결과  
( Model 1: 기존모델, Model 2: 개선모델 )

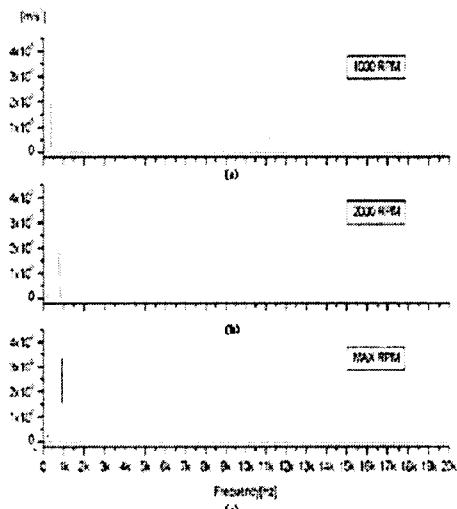


그림 3. 기존모델의 진동성분 (FFT)

현재의 기존모델에서 최소한의 설계변경을 통해 코킹 토크를 저감시키기 위하여, 고정자 및 회전자 형상과 기타 기구적인 변경 없이 영구자석의 재질과 형상만을 변경하여 개선을 시행하였다. 그림 4는 영구자석의 변경을 통하여 설계 변경된 모델이다.

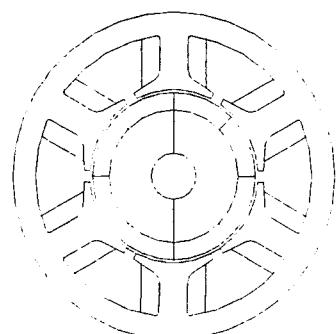


그림 4. 개선모델

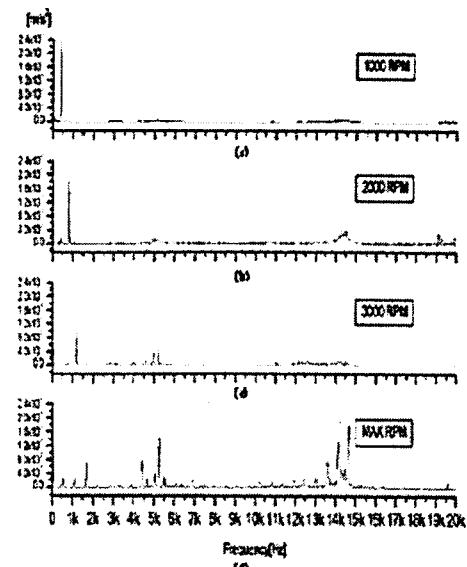


그림 5. 개선모델의 진동성분 (FFT)

개선된 모델은 기존모델과 고정자의 형상 및 회전자의 구조가 같고, 재질만을 변경한 것이므로 6슬롯 8극기의 구조를 그대로 가지고 있다. 따라서 한회전당 진동은 24번이며, 코킹토크의 주파수 또한 기존모델과 동일한 400Hz (1000rpm시)이다.

그림 2의 Model 1이 개선된 모델의 코킹토크 측정파형이다. 코킹토크의 peak to peak 값은 0.184kg.cm로 기존모델에 비하여 54% 정도 감소하였다. 그림 5는 개선모델의 각 회전수별 진동성분을 표시하였다. 그림 5(a)에서 보듯이 코킹토크 주파수인 400Hz 대역에서 peak치 2.35m/s<sup>2</sup>을 나타내었고, 이는 기존모델의 동일 주파수대역에서의 peak치에 비하여 11%정도 해당하는 값이다. 이는 영구자석의 재질과 함께 차자 과정의 형상도 변화를 준 결과라고 할 수 있겠다.

### 2.3 Commutation Torque ripple

구형파 전압이 인가되더라도 역기전력의 공간적 분포 특성과 인덕턴스의 영향으로 commutation시 전류 ripple이 발생한다. 이러한 전류 ripple은 BLDC Motor의 전자기적 토크 ripple을 발생시켜 진동 및 소음원이 된다. Commutation 토크 ripple을 저감시키기 위해서는 자기회로 설계를 통한 역기전력 분포특성을 개선시키는 방법과 commutation angle을 제어하는 방법이 있다. 자기회로 설계의 경우 구조를 변경시켜야하므로 설계 단계에서 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 commutation angle 변화에 따른 진동 특성을 분석하였다.

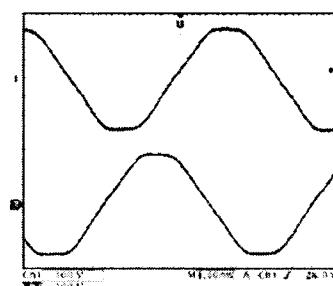
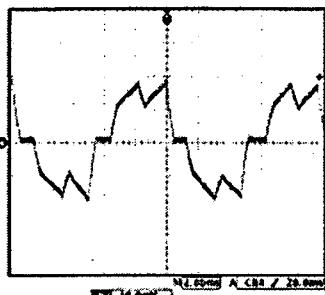


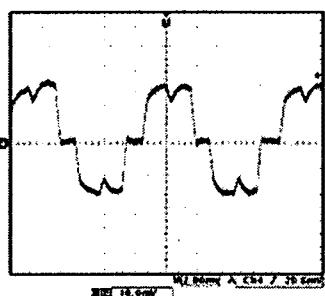
그림 6. 시험모델의 역기전력 과정

그림 6은 BLDC Motor의 무부하 역기전력 특성을 나타내었다. 시험결과 역기전력은 거의 trapezoidal 형태를 가짐을 알 수 있다. 그림 7은 commutation angle 변화에 따른 전류 특성을 나타내었다. 부하 상태에서의 전류파형을 얻기 위하여 모터축에 정격부하를 Magnetic Brake 장비를 이용하여 인가하여 측정하였다.

Commutation angle을 진상(advanced)한 경우 전류 ripple이 많이 개선됨을 알 수 있다.



(a) Angle 0°



(b) Angle 25°

그림 7. Commutation Angle 변화에 따른 전류파형

최적의 전류파형을 얻기 위하여 hall sensor의 위치를 5°씩 변화시키며 전류파형을 비교하였다. 각도는 back-EMF 파형과 hall sensor의 출력신호를 비교하여 산출하였으며, 본 시험모델에 적용한 최적위치는 전기각 25° 지점이다.

진동측정을 위해 모터축에 부하를 인가하기 위해서는 모터를 자유진동상태에 두지 못하고, 측정지그에 결속하여 사용하였는데 이로 인하여 아래의 결과는 진동성분의 감쇄현상을 포함한 결과치이다.

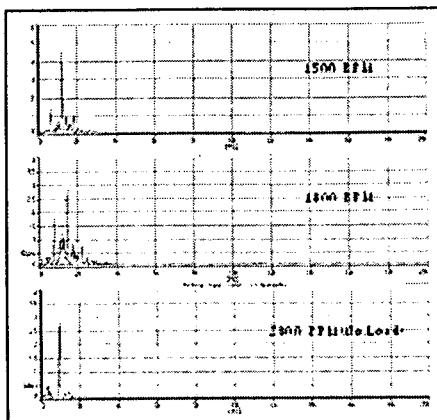


그림 8. Angle 0° 진동분석 (FFT)

Commutation angle 변화에 따른 주파수별 진동 측정결과를 그림 8,9에서 비교하였다. 시험모델의 정격부하 3.9kg.cm 인가시의 회전속도인 1500rpm에서의 진동성분은 angle 0°일 때는 4.52m/s<sup>2</sup>의 피크치를 가지며 angle 25°일 경우에는 3.7m/s<sup>2</sup>로 약 19%의 감소효과를 볼 수 있었다. 부하량을 변화시켜 모터를 1800rpm으로 회전시킨 후 진동량을 측정, 비교하면 angle 0°일 때와 25°일 경우 각각 2.89m/s<sup>2</sup>과 2.68m/s<sup>2</sup>로 약 8%의 감소효과가 있었다. 1800rpm일 경우 결과값이 1500rpm일 때와 차이를 보이는데, 이는 부하량이 변경되면서 상류파형 또한 변화되어 생긴 결과이다.

마지막으로 2300rpm의 무부하 상태에서 진동을 측정하였다. 결과는 피크치로 각각 2.91m/s<sup>2</sup>와 2.77m/s<sup>2</sup>로 약 5%의 감소효과를 보인다. 그림 8,9에서 보듯이 무부하에서는 1500,1800rpm에 비하여 진동이 발생하는 주파수대 영역이 적다. 이는 다른 두 rpm대와는 다르게 부하가 인가되지 않으므로 부하 인가시 발생하는 magnetic brake의 진동성분이 포함되지 않기 때문이다.

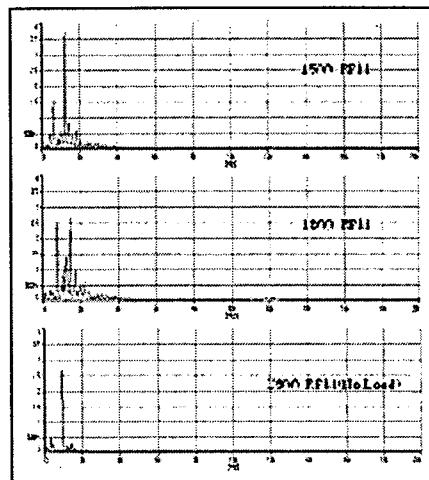


그림 9. Angle 25° 진동분석 (FFT)

### 3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 모터의 진동·소음 저감을 위하여 진동·소음원을 전자기적인 측면에서 분석하였다. BLDC 모터의 토크 리플을 발생하는 코킹토크를 저감한 경우의 진동특성을 비교 분석한 결과 코킹토크가 진동 발생원임을 알 수 있다. 또한 commutation시 발생하는 전류의 고조파 성분을 commutation angle 변화로부터 개선하여 진동특성을 평가한 결과 commutation torque ripple이 BLDC 모터의 진동에 매우 큰 영향을 줌을 알 수 있어 BLDC 모터 설계시 이를 고려한 설계가 이루어져야 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 유지윤, “브리시리스 직류전동기의 토크 리플 저감에 관한 연구”, 한국과학재단, KOSEF 981-0905-017-1, 1999
- [2] 조준재, 최연선, “전동기의 진동 및 소음원에 대한 실험적 고찰”, 한국소음진동공학회, 추계 학술대회논문집, pp.37~42, 1996.
- [3] 김경태, 황상문, “세그먼트 극을 가진 BLDC 전동기의 가진력에 관한 연구”, 전기학회논문지, 48B권10호, pp.530~536, 1999.