

영구자석 불균일 착자에 따른 브러시리스 DC 모터의 코깅토크와 불평형 자기력 분석

Analysis of Cogging Torque and Magnetic Force of a Brushless DC Motor due to Imperfect Magnetization of Permanent Magnet

이청일*·성상진**·이현민**·강수남**·장건희†

Chungill Lee, Sangjin Sung, Hyunmin Lee, Soonam Kang and Gunhee Jang

Key Words : cogging torque(코깅토크), unbalanced magnetic force(불평형 자기력), BLDC(브러시리스 DC 모터), imperfect magnetization(불균일 착자), magnetically induced vibration(자기력에 의한 진동)

ABSTRACT

This paper investigates the characteristics of cogging torque and magnetic force of a brushless DC (BLDC) motor due to imperfect magnetization of permanent magnet (PM) numerically and experimentally which results in the magnetically induced vibration. A predicted magnetization pattern of the PM of the BLDC motor, which is derived from the measured surface magnetic flux density along the PM, is applied to the finite element analysis in order to calculate the cogging torque and the unbalanced magnetic force. This research also develops the experimental setup to measure the unbalanced magnetic force as well as the cogging torque. It shows numerically and experimentally that the imperfect magnetization of permanent magnet generates the driving frequencies of cogging torque with integer multiple of slot number in addition to the least common multiple of pole and slot. It also shows that the driving frequencies of unbalanced magnetic force are integer multiple of slot number ± 1 due to imperfect magnetization of PM even in the rotationally symmetric design.

기호설명

- i : 정수
- k : 슬롯 수
- ω : 회전 주파수
- ϕ : 회전 주파수
- F_r : 반경방향 자기력
- F_x : 고정 좌표계의 X 방향 자기력
- F_y : 고정 좌표계의 Y 방향 자기력

1. 서 론

모터의 고정자와 회전자의 영구자석간의 상호작용에 의해 발생하는 불평형 자기력 혹은 코깅토크는 모터 본체 혹은 지지구조를 가진 하여 진동 혹은 소음을 유발한다. 특히 모터에서 발생하는 불평형 자기력은 공극 자속밀도의 제곱에 비례하여 발생하므로 회전자에 사용되는 영구자석의 잔류자속밀도가 높을수록 공극 자속밀도는 커지게 되

어 불평형 자기력 및 코깅토크는 증가하게 된다. 종래에는 모터에 사용되는 영구자석의 잔류자속 밀도가 상대적으로 낮은 재료가 사용되었으나 최근 높은 보자력과 잔류자속밀도를 가지는 높은 등급의 희토류 자석의 사용이 증가하면서 불평형 자기력에 의한 진동이 중요하게 인식되고 있다.

자기력에 의한 진동원에 대한 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되었다. Jang 등은 12극 9슬롯 구조와 같은 회전 대칭형 브러시리스 DC 모터에서 회전자의 편심이 존재하지 않으면 불평형 자기력은 존재하지 않는다는 사실과 코깅토크에 의한 가진 주파수는 회전주파수와 극 수와 슬롯 수의 최소공배수의 곱과 그 정수 배에 해당하는 사실을 수치적인 방법으로 증명했다(1). Yoon은 회전자의 편심과 고정자의 편심, 불균일 착자에 의한 불평형 자기력과 코깅토크에 의한 진동과 소음의 상관관계를 연구하였다(2). Hartman 등은 회전자의 편심과 고정자의 편심, 불균일 착자에 의한 불평형 자기력과 코깅토크의 발생 주파수를 편심과 착자기 코일의 위치변화를 고려해 유한요소 해석과 convolution method를 이용해 계산하였다. 또한 그들은 자기력에 의한 가진원이 불균일 착자에 의해 주로 발생한다고 언급했다. 그러나 불균일 착자에 의한 불평형 자기력 및 코깅토크와 그 특성을 불평형 자기력과 코깅토크를 측정하는

† 교신저자; 한양대학교 기계공학과
E-mail : ghjang@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-0431, Fax : (02) 2292-3406

* 한양대학교 기계공학과

** 한양대학교 기계공학부

실험적 방법으로 증명한 경우는 없었다. 본 연구에서는 유한 요소해석을 통해 불균일 착자에 따른 불평형 자기력과 코깅토크의 특성을 해석하고 이를 증명하기 위해 불균일 착자 된 회전자 영구자석을 가지는 브러시리스 DC 모터의 반경방향 자기력과 코깅토크를 측정하였다.

2. 영구자석의 불균일 착자

2.1 불균일 착자의 원인

그림 1은 본 연구에 사용된 12극 9슬롯 구조의 2.5인치 하드디스크 드라이브 스핀들에 사용되는 브러시리스 DC 모터의 구조를 나타낸다. 브러시리스 DC 모터에 사용되는 영구자석은 ring 형상을 가지고 있으며 착자 공정을 거쳐 자극이 형성된다. 불균일 착자는 착자 공정에서 주로 발생하며 그 원인은 착자기의 형상이나 발생 자속의 불균일성 또는 영구자석의 변형 등에 의해 발생할 수 있다. 그 중 주요한 원인으로 착자기와 영구자석 사이의 공극이 불균일한 경우를 고려해보면 불균일한 공극에 의해 각 자극 위치의 릴럭턴스가 변화하게 되어 각 자극을 형성하기 위한 자속이 균일하게 흐르지 않게 되고 결과적으로 여러 개의 극을 가지는 영구자석의 착자가 불균일하게 이루어지게 된다. 착자기와 영구자석간의 공극이 불균일한 경우는 영구자석과 착자기 사이의 편심이 존재하는 경우 혹은 착자기의 각 자극위치의 표면이 고르지 않거나 영구자석의 표면이 고르지 않은 경우에 발생할 수 있다. 그림 2는 착자기와 영구자석간 공극이 균일하지 않은 경우를 착자기와 영구자석간의 편심이 발생한 경우와 착자기의 표면이 고르지 않은 경우, 영구자석의 표면이 고르지 않은 경우에 대한 개략도를 나타낸다.

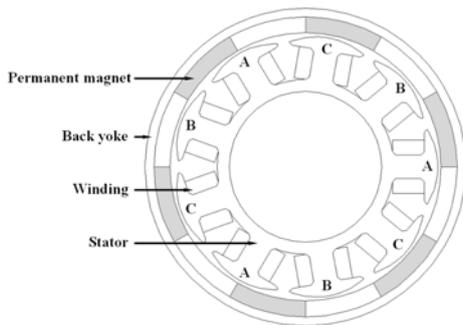


Fig. 1 BLDC motor with 12 poles and 9 slots

2.2 불균일 착자의 고려

본 연구에서는 불균일 착자를 확인하기 위해 양산되는 모터의 불량샘플을 추출하여 표면 자속 밀도를 측정하고 측정된 표면 자속밀도로부터 예측된 착자과형을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 3은 본 연구에 사용된 샘플의 가우스 미터를 이용한 표면자속밀도 측정 결과이다. 그림 3에 나타난 결과로부터 극 피치의 크기는 거의 변화가 없으며 각 극의 최대 자속밀도의 크기가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 그림 3에 나타난 바와 같이 불균일 착자가 발생한 양상은 각 극의 최대값이 다르게 나타나고 있으며 각 극의 표면자속밀도를 최대값에 대한 비로 표현하면 착자 불균일도는 8.3%임을 알 수 있다.

3. 유한요소 해석

3.1 해석 모델 및 해석 방법

영구자석의 불균일 착자에 의한 불평형 자기력과 코깅토크의 특성 변화를 확인하기 위해 그림 1에 나타난 브러시리스 DC 모터의 유한요소 해석모델을 개발하였다. 개발된 유한요소 해석모델은 3절점 삼각형 요소를 사용해 개발되었으며

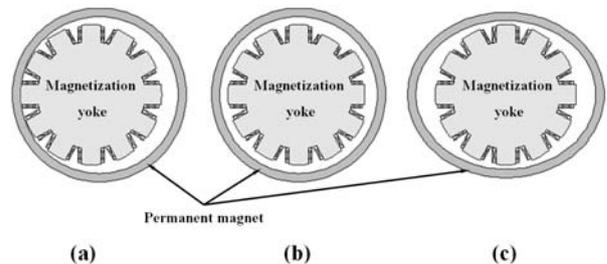


Fig. 2 Example of imperfect magnetization (a) eccentricity, (b) surface failure of magnetization fixture and (c) deformation of PM

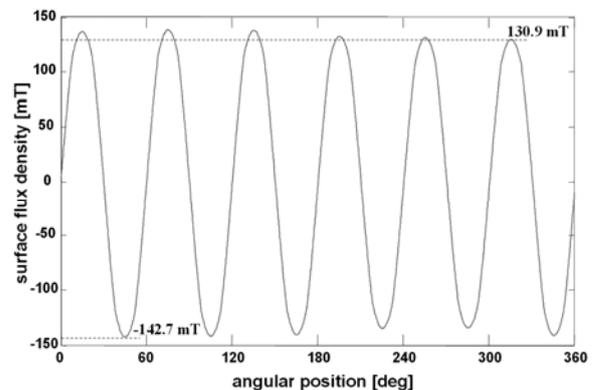


Fig. 3 Measured surface magnetic flux density along PM

총 요소 수는 15,296 개이다. 브러시리스 DC 모터의 영구자석 불균일 착자를 모사하기 위해 영구자석 표면에서 측정된 표면 자속밀도로부터 예측한 착자 패턴을 적용하였다. 착자 패턴을 예측하기 위해 영구자석 표면에서 측정된 표면 자속밀도를 영구자석을 해석모델로 하는 유한요소 해석에 적용하여 영구자석의 잔류 자속밀도를 계산하였다. 코깅토크와 불평형 자기력은 Maxwell stress tensor 법을 이용해 계산 하였으며 360 도 회전에 대해 0.4 도 간격으로 해석을 수행 하였다.

3.2 해석 결과

그림 4 는 영구자석이 완벽하게 착자된 경우와 불균일하게 착자된 경우에 대한 코깅토크 해석결과와 해석결과의 주파수 분석을 나타낸다. 그림 4(a)는 착자가 완벽한 경우에 비해 불균일 착자에 의한 코깅토크의 크기가 크다는 사실을 나타낸다. 이전 연구결과에 따르면 완벽한 착자 패턴을 가지는 영구자석이 사용된 브러시리스 DC 모터는 코깅토크는 극 수와 슬롯 수의 최소공배수에 해당하는 주파수 성분을 가지며 12 극 9 슬롯의 경우 36X 성분을 가지게 된다. 그러나 그림 4(b)에 나타난 코깅토크의 주파수 분석결과는 영구자석이

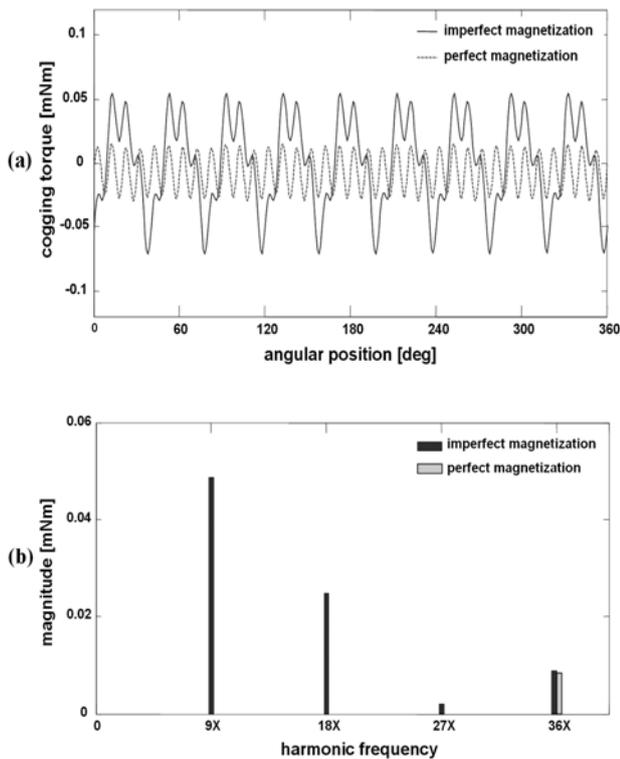


Fig. 4 (a) Simulated cogging torque due to magnetization of PM, and (b) its frequency spectra

불균일 하게 착자 된 경우 36X 성분 뿐만 아니라 9X 성분과 그 배수성분이 존재하는 결과를 보인다. 그림 5 는 영구자석이 완벽하게 착자된 경우와 불균일하게 착자된 경우에 대한 불평형 자기력 해석결과와 해석결과의 주파수 분석을 나타낸다. 그림 5(a)는 착자가 완벽한 경우에는 회전 대칭성에 의해 불평형 자기력이 발생하지 않지만 영구자석이 불균일하게 착자된 경우 불평형 자기력이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 영구자석이 불균일하게 착자된 경우 슬롯수의 정수 배 ± 1 에 해당하는 고조파 성분이 존재하는 것을 나타내고 있다. 본 연구에 사용된 12 극 9 슬롯 구조의 브러시리스 DC 모터에서는 9 ± 1 , 18 ± 1 등의 성분이 이에 해당한다.

4. 실험

4.1 실험 방법

본 연구에서는 불균일 착자 패턴을 가지는 브러시리스 DC 모터의 코깅토크 해석결과를 검증하기 위해 상용 코깅토크 미터(Sugawara PC-ATM3)를 이용해 코깅토크를 측정하였다.

또한 불균일 착자 패턴을 가지는 브러시리스

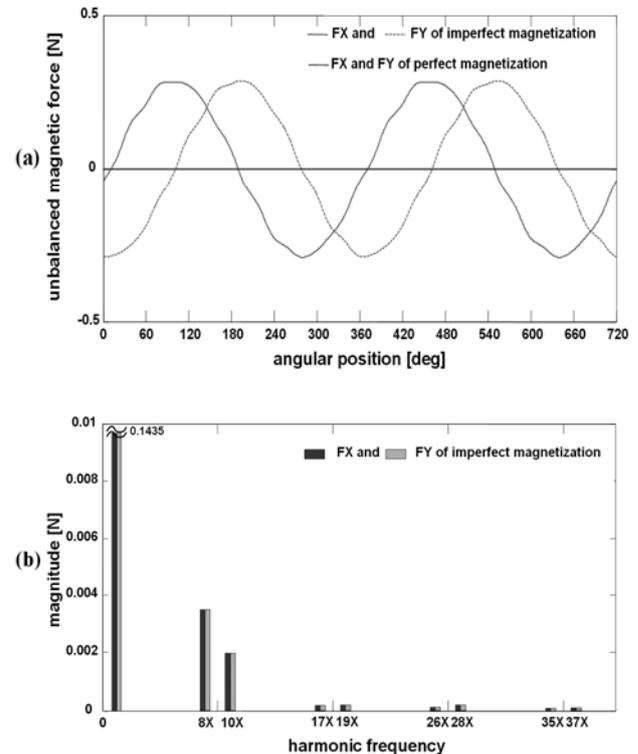


Fig. 5 (a) Simulated unbalanced magnetic force due to magnetization of PM, and (b) its frequency spectra

DC 모터의 불평형 자기력 해석결과를 검증하기 위해 본 연구는 측정장치를 개발하고 불평형 자기력을 측정하는 실험을 수행하였다. 불평형 자기력은 회전자와 고정자가 베어링에 의해 결합된 상태에서는 측정할 수 없다. 그 이유는 불평형 자기력에 의해 힘이 가해진 회전자나 고정자가 베어링의 변형에 의한 다른 평형점으로 이동하기 때문이며 정상상태 구동 시 고체간 접촉이 존재하지 않는 유체 동압 베어링이 적용된 브러시리스 DC 모터의 경우도 2~3 μm 수준의 베어링 간극 내에서 베어링의 영향 없이 불평형 자기력을 측정하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 베어링을 제거한 상태에서 실험을 수행 하였으며 실험을 수행하기 위한 실험장치를 개발 하였다. 본 연구에서 개발한 불평형 자기력 측정장치는 그림 6 과 같은 구성으로 이루어져 있으며 측정방법은 다음과 같다. 브러시리스 DC 모터의 고정자를 로테이팅 스테이지에 고정하고 로테이팅 스테이지의 회전중심과 고정자의 회전 중심이 일치하도록 편심

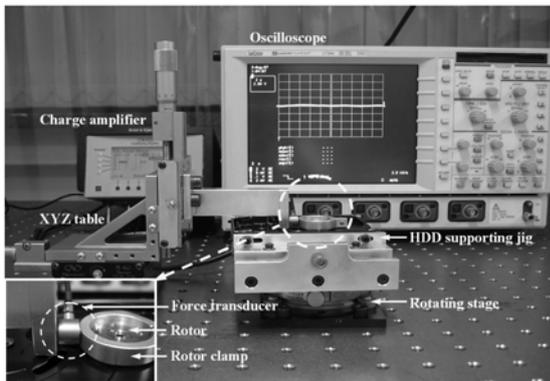


Fig. 6 Experiment setup to measure unbalanced magnetic force

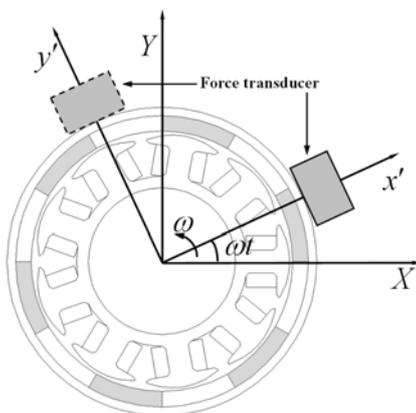


Fig. 7 Relation between the rotating and stationary coordinate

보정을 한다. 편심보정에는 1~10 nm(rms) 분해능을 갖는 capacitance gap-sensor 를 사용하여 고정자 치의 길이가 동일하지 않음을 고려하여 편심 보정을 한다. 로테이팅 스테이지의 연속적인 회전을 위해 편심 보정이 완료된 고정자-로테이팅 스테이지와 스테핑 모터를 벨트를 이용해 연결한다. 고정자와 분리된 회전자는 force transducer 가 설치된 클램프로 고정하고 xyz-테이블에 회전자 조립체를 고정한다. 회전자의 중심이 고정자 조립체의 회전 중심과 일치하도록 xyz-테이블을 0.2mm 크기를 가지는 공극 범위 내에서 미세하게 이송해 조정한다. 조정이 끝난 후, 로테이팅 스테이지가 일정한 속도로 회전할 수 있도록 스테핑 모터를 구동하고 회전자 조립체에 설치된 force transducer 로부터 출력되는 불평형 자기력의 변화를 측정한다. Force transducer 와 charge amp 는 3.3pC/N 의 sensitivity 를 가지는 B&K 8203 과 band-pass filter 가 내장된 B&K NEXUS 를 사용하였다. 그러나 charge amp 는 내장된 band-pass filter 에 의해 DC 성분이 제거된 신호를 출력하므로 측정 결과는 AC 성분만을 가지게 된다. DC 성분은 회전자와 고정자가 축 방향으로 정렬되어 있을 때 force transducer 에 항상 가해지는 성분이다. 만일 순간적으로 고정자와 회전자 사이의 힘을 제거하면 그 때의 자기력 변화량은 force transducer 에 의해 작용하고 있던 힘과 반대방향으로 검출된다. 따라서 축 방향으로 중심에 정렬되어있던 회전을 순간적으로 들어올리면 DC 성분의 크기를 측정할 수 있다. 그림 7 은 $x'y'$ 으로 표현되는 회전 좌표계와 XY 로 표현되는 고정좌표계 사이의 관계와 force transducer 의 위치를 나타낸다. 본 실험에서는 회전하는 고정자와 고정된 회전자 사이에서 발생하는 불평형 자기력을 측정하기 때문에 force transducer 가 출력하는 불평형 자기력은 회전 좌표계에서 측정된 값이다. 영구자석의 착자 패턴이 불균일한 경우 고정자의 회전에 따라 착자가 가장 강하게 된 방향에 고정자 치가 통과함에 따라 불평형 자기력의 세기가 달라지게 되며 force transducer 가 위치하는 x' 방향과 y' 방향의 불평형 자기력이 측정된다. 전술한 바와 같이 측정된 불평형 자기력은 x' 방향과 y' 방향의 성분이며 실제 회전자에 작용하는 불평형 자기력은 x' 방향과 y' 방향성분의 합력 F_r 로 나타나며 회전 좌표계에서 불평형 자기력을 Fourier series 로 표현 하면 다음과 같다:

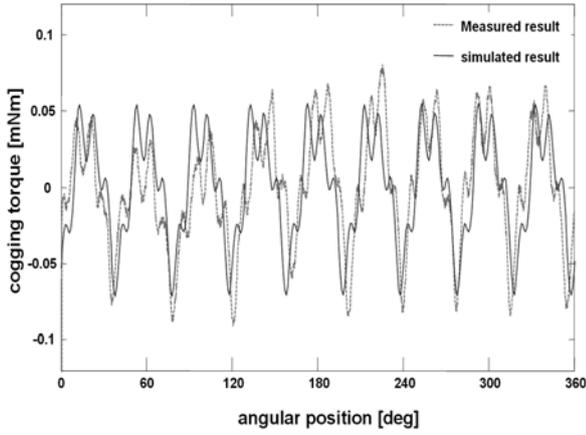


Fig. 8 Measured and simulated cogging torque

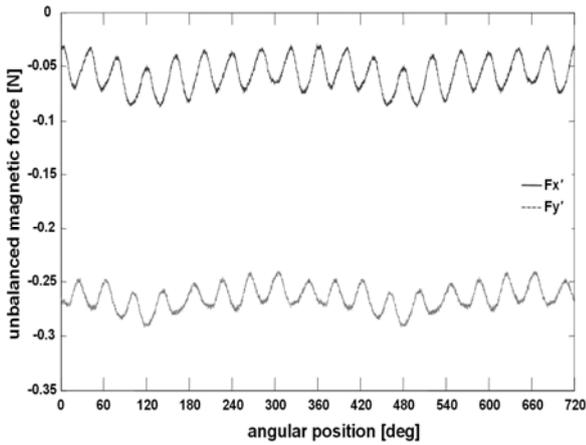


Fig. 9 Measured unbalanced magnetic force in the rotating coordinate

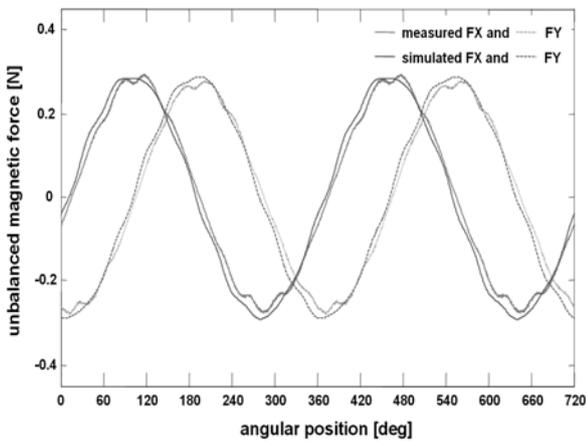


Fig. 10 Comparison between measured and simulated unbalanced magnetic force

$$F_r = \sum_{i=1}^n F_i \sin(ik\omega t + \phi_i) \quad (1)$$

회전 좌표계의 반경방향 자기력은 고정좌표계의 X, Y 방향 성분으로 변환할 수 있으며 변환식은 다음과 같다:

$$\begin{aligned} F_x &= \cos \omega t \sum_{i=1}^n F_i \sin(ik\omega t + \phi_i) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n F_i [\sin\{(ik-1)\omega t + \phi_i\} + \sin\{(ik+1)\omega t + \phi_i\}] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_y &= \sin \omega t \sum_{i=1}^n F_i \sin(ik\omega t + \phi_i) \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n F_i [\cos\{(ik-1)\omega t + \phi_i\} - \cos\{(ik+1)\omega t + \phi_i\}] \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)은 회전 좌표계에서 슬롯이 불평형 자기력에 미치는 효과를 나타내고 있다. 회전 좌표계에서 영구자석의 착자 패턴이 불균일 하면 불평형 자기력은 슬롯의 정수 배에 해당하는 고조파 성분을 포함하게 된다. 고정 좌표계에서 F_r 은 식 (2)와 식 (3)과 같이 고정 좌표계의 성분으로 변환된다. 식 (2)와 (3)은 고정 좌표계에서 불균일 착자에 의한 불평형 자기력의 고조파 성분이 회전대칭형 구조를 가지는 브러시리스 DC 모터에서 슬롯의 정수 배±1에 해당하는 고조파 성분을 포함하는 것을 나타내고 있다.

4.2 실험 결과

그림 8은 코깅토크의 측정 결과와 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과는 측정 결과와 비슷한 결과를 보이고 있으며 그림 8의 결과로부터 불균일 착자에 의해 슬롯 수의 정수 배에 해당하는 고조파 성분이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 회전 좌표계에서 측정된 $F_{x'}$ 과 $F_{y'}$ 을 나타내고 있으며 본 실험에서 측정된 x', y' 방향의 DC 성분은 각각 -0.076N 과 -0.283N 이다. 그림 10은 고정 좌표계에서 해석된 불평형 자기력과 회전좌표계에서 측정된 불평형 자기력을 고정좌표계로 변환한 결과를 나타내고 있다. 해석 결과와 실험결과는 거의 비슷한 결과를 보이고 있으며 그림 10에서 불균일 착자에 의한 불평형 자기력은 본 연구에서 수식적으로 확인한 바와 같이

회전주파수 성분과 슬롯의 정수 배±1 에 해당하는 고조파성분을 포함하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 회전 좌표계에서 가장 크게 발생하는 고조파 성분인 9X 성분은 고정 좌표계에서 8X 성분과 10X 성분으로 변환된다.

5. 결 론

본 논문은 영구자석의 불평형 착자에 따른 브러시리스 DC 모터의 코깅토크와 불평형 자기력의 특성에 대한 연구를 수행 하였다. 코깅토크와 불평형 자기력의 특성을 예측하기 위해 유한요소해석을 수행하였고, 해석결과를 검증하기 위해 실험장치를 개발했다. 본 논문은 영구자석의 불평형 착자에 따른 코깅토크와 불평형 자기력의 특성을 수치적인 방법과 실험적인 방법으로 확인하였으며 본 논문에서 확인한 사실은 다음과 같다. 코깅토크는 극 수와 슬롯 수의 최소공배수에 해당하는 고조파 성분 이외에도 슬롯수의 정수 배에 해당하는 고조파성분이 존재하며 영구자석의 불평형 착자에 따른 불평형 자기력은 회전 대칭형 구조를 가지는 브러시리스 DC 모터일지라도 회전주파수에 해당하는 성분과 성분과 슬롯의 정수 배±1 에 해당하는 고조파성분을 포함한다. 본 연구는 영구자석의 불균일 착자에 따른 자기력에 의해 발생하는 진동 및 소음을 감소하는데 활용 될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Jang, G. H., Yoon, J. W., Park, N.Y., and Jang, S. M., 1996, "Torque and unbalanced magnetic force in a rotational unsymmetric brushless dc motors," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp 5157-5159.
- (2) Yoon Taeyong, 2005, "Magnetically Induced Vibration in a Permanent-Magnet Brushless DC Motor With Symmetric Pole-Slot Configuration", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 41, No. 6, pp 2173-2179.
- (3) Hartman A. and Lorimer W., 2001, "Undriven vibrations in brushless DC motors," IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 37, No. 2, pp 789-792.