

< 논 문 >

회전자 편심을 가지는 IPM, SPM 전동기 진동 특성 비교 : (1) 영구 자석에 의한 전자기력

Comparison of Vibration Characteristics in IPM and SPM BLDC Motors with Rotor Eccentricity:(1) Electro-magnetic Force Due to PM

황근배* · 김경태* · 황상문†

Geun-Bae Hwang, Kyung-Tae Kim and Sang-Moon Hwang

(2001년 8월 1일 접수 : 2001년 11월 11일 심사완료)

Key Words : Brushless DC Motor(브러쉬리스 직류 전동기), Misaligned Eccentric Rotor(편심된 회전자), Mechanical Force(기계적 가진력), Imbalanced Magnetic Force(불평형 전자기력), Finite Element Method(유한 요소 해석)

ABSTRACT

Acoustic noise and vibration of a BLDC motor is a coupled phenomenon between mechanical characteristics and electromagnetic origins through the motor air-gap. When a relative misalignment of rotor in the air-gap center exists on the assemblage, it is considered to influence the motor system characteristics. In this paper, the back electro motive force(BEMF) is analyzed by Finite Element Method(FEM) and verified by experiments for the SPM and IPM type motors. For the magnetic field analysis, a FEM is used to account for the magnetic saturation. Using these results, the FEM is made to determine the appropriate electromagnetic field analysis in BLDC motors with rotor eccentricity ratio. A radial magnetic imbalance force of BLDC motor with rotor eccentricity is analyzed. Results demonstrate that the imbalance force is increased according to the degree of misalignment. An IPM motor, mostly chosen to realize high-speed operation, shows a worse effect on magnetic unbalanced forces and dynamic responses compared with SPM motor due to magnetic saturation when the rotor eccentricity exists.

1. 서론

브러쉬리스 직류 전동기는 최근 여러 가전 제품이나 공장 기계 등 고속 회전 기기 등에 광범위하게 사용되고 있으며, 특히 고속 회전을 구현하기 위하여 고속 회전시 영구 자석 이탈 등의 문제가 되는 기존

의 표면 영구 자석형 (surface permanent magnet, 이하 SPM) 전동기에서 회전자 내부에 자석을 취부하는 매입 영구 자석형(interior permanent magnet, 이하 IPM) 전동기로의 대체가 이루어지고 있다. 그러나 IPM 전동기는 구조 특성상 회전자 철심에서 자기 포화가 발생하게 되므로 SPM 전동기의 대체를 위해서는 자기장 해석과 출력 특성등에 대한 명확한 해석이 필요하다. 또한 고속 회전용 기계는 제조 공정시 제작 오차 및 탄성축-베어링계의 영향으로 인해 유발되는 회전자 편심으로 인하여 회전 속도 제곱에 비례하는 기계적 불평형력이 발생되므로 전동기의 진

* 부산대학교 기계설계대학원

† 책임저자, 정회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : shwang@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-2468, Fax : (051) 514-7640

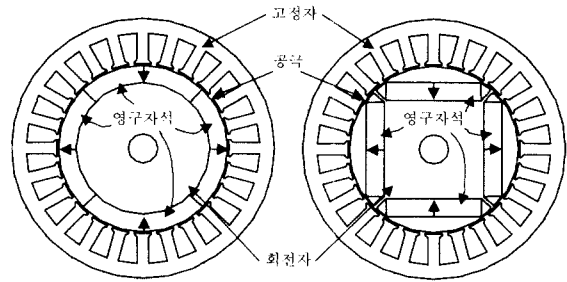
동 가진원으로 작용하여 위치 및 속도 제어에 어려움이 발생하며, 이러한 기계적 불평형은 전자기 불평형력의 발생을 초래하여 회전자의 편심을 더욱 증가시키므로 회전자 편심이 고려된 전자기 불평형력에 대한 정확한 해석이 필요하다.

회전자 편심에 기인하는 전동기의 특성 해석은 오래 전부터 주목을 받아왔으며, 유도 전동기의 특성에 관해서는 많이 보고되어져 있다. 특히 Swann⁽¹⁾은 회전자 편심시 공극의 자속 밀도 분포에 관한 연구 결과를 발표하였고, Bradford⁽²⁾는 유도 전동기의 회전자 편심이 발생하였을 때 전자기 불평형력을 해석하였다. Dorell⁽³⁾은 회전자 편심시 고정자 슬롯(slot), 스큐(skew) 효과를 고려한 전자기 불평형력에 대해 보고하였다. DeBortoli⁽⁴⁾ 등은 유도기에 있어서 회전자 편심에 따른 전자기력을 유한 요소 해석을 행한 후 전자기력을 저감하기 위한 병렬 권선법에 대해 발표하였다. BLDC 전동기의 전자기력에 관한 연구로써 Jang⁽⁵⁾은 균일한 공극에 대하여 전자기 가진력의 고조파 성분을 제거함으로써 고정자 공진의 가능성을 줄일 수 있음을 보고하였다. 또한 Chao⁽⁶⁾는 BLDC 전동기에서 회전자의 편심에 의한 토크 맥동의 야기 가능성에 대해 보고하였다. Kim⁽⁷⁾은 BLDC 전동기 회전자의 편심에 의한 SPM 전동기의 전자기장 특성과 진동 특성에 대하여 섭동법(perturbation method)을 이용한 해석적 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 기존의 연구 결과에 근거하여 BLDC 전동기의 역기전력을 유한 요소 해석을 통해 구한 후 실험 결과와 비교함으로써 유한 요소 해석에 의한 전자기장 해석의 타당성을 검증하였고, 이를 바탕으로 회전자 편심 유무에 따른 SPM, IPM 전동기의 반경 방향 극소 작용력과 전자기 불평형력을 해석하였다. 특히 IPM 전동기의 경우에는 회전자 철심의 극심한 자기 포화로 인해 투자율의 비선형 특성을 고려하여 해석하였다.

2. 전동기 특성 비교

Fig. 1은 해석에 사용된 IPM 및 SPM 전동기를 나타낸 것으로 4극 24슬롯을 가지며, 120° 통전 방식 구동기를 사용하는 전동기이다. Table 1은 자석 형상을 제외하고 동일한 사양을 갖는 두 전동기의 상세 사양 정보를 나타낸 것이다. 두 전동기의 최대 공



(a) SPM motor (b) IPM motor

Fig. 1 Prototype BLDC motors to be analyzed

Table 1 Specification of BLDC motors

Power	180	Watt
Number of poles	4	
Outer dia.	110	mm
Inner dia.	60.6	mm
Stack length	40	mm
Number of slots	24	
Turns/pole	74	
Wire size	0.8	mm
Air-gap	0.5	mm

극 자속 밀도값을 동일하게 하기 위해 IPM 전동기 영구 자석의 잔류 자속 밀도는 0.4 T, SPM 전동기는 0.3 T로 두었다.

2.1 편심이 없을 때의 전동기 특성 비교

(1) 상 역기전력

준 정적 상태에서의 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential) A 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$B = \text{curl } A \quad (1)$$

여기서 B 는 자속 밀도이다. 해석 영역을 준 정적 상태(quasi-static)라 가정하고, 2차원 유한 요소법을 풀기 위하여 Maxwell의 전자기 방정식으로부터 지배 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = J_0 - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

여기서 μ 는 비투자율, J_0 는 전류 밀도, M 은 자기 모멘트(magnetic moment)이다. 하나의 권선에서의 자속 쇄교량 ψ 를 자기 벡터 포텐셜로 나타내면 다

음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Psi = \int_S B \cdot dS = \oint_C A dl \quad (3)$$

여기서 S 는 전류가 흐르는 권선의 면적, l 은 면 S 를 둘러싼 적분 경로, dl 은 적분 경로 C 상의 선분 벡터이다. 적분 경로 C 를 따라 적분하면, 2차원 유한 요소법에 대해 자속은 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\Psi = L_s (A_1 - A_2) \quad (4)$$

여기서 L_s 는 적층 길이, A_1, A_2 는 각각의 질점에서의 자기 벡터 포텐셜을 나타낸다. 한 상의 턴수가 N 일 경우 자속 쇄교량 λ 는 권선 면적에 대해 자기 벡터 포텐셜을 평균함으로써 계산되어진다.

$$\lambda = \left(\frac{\iint_{S_1} A_1 dS}{S_1} - \frac{\iint_{S_2} A_2 dS}{S_2} \right) L_s \quad (5)$$

따라서 역기전력은 단위 시간당 자속 쇄교량의 변화로 정의되므로 이는 연쇄 법칙에 의해 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d\lambda}{d\theta} \quad (6)$$

유한 요소 해석을 통해 구해진 자속 쇄교량에 대해 식 (6)을 이용하여 구한 역기전력의 해석 결과와 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 IPM 전동기의 경우 회전자의 극심한 자기 포화로 인해 극 천이 구간에서 형성되는 역기전력의 최대값 부근이 매우 불안정함을 확인할 수 있으며 이러한 해석 결과는 실험 결과와 매우 유사함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 해석하고자 하는 회전자의 편심이 없는 경우의 전동기의 전자기장 특성들은 유한 요소 해석법을 이용하여 구하더라도 충분히 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 3은 BLDC 전동기의 역기전력의 유한 요소 해석의 타당성을 검증하기 위한 실험 장치로써, 서보 모터의 회전수 제어에 의한 피측정 전동기 회전자의 회전수 제어가 가능하도록 자체 제작한 것으로 모든 실험은 회전수를 500 rpm으로 고정하여 행하였다.

(2) 공극 자속 밀도

역기전력의 해석 결과의 타당성을 이용하여 전동기

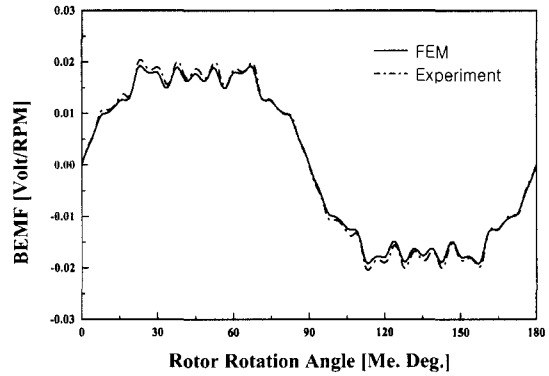


Fig. 2 Comparison of BEMF in IPM motor

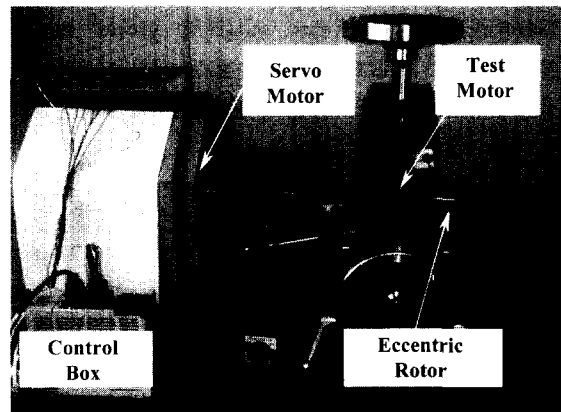


Fig. 3 Experimental set-up

의 공극 자속 밀도를 유한 요소법(FEM)으로 해석하였으며, 이의 계산은 다음 식 (7)과 같다.

$$\{B\} = \nabla \times [N_A]^T \{A_e\} \quad (7)$$

여기서 $\{B\}$ 는 공극 자속 밀도, $[N_A]$ 는 형상 함수(shape function), $\{A_e\}$ 는 자기 벡터 포텐셜(magnetic vector potential)이다. Fig. 4는 FEM 해석을 통한 공극 자속 밀도를 회전자 회전 위치각에 따른 결과를 보여주고 있다. Fig. 4를 살펴보면 고정자 슬롯으로 인해 자기 투자율이 불안정하게 되므로 자속 밀도 값이 치 끝단에서 극심한 변화를 보이지만, IPM 전동기의 경우가 SPM 전동기에 비해 다소 완만한 변화를 보임을 알 수 있다.

(3) 반경 방향 국소 작용력

회전자의 강력한 영구 자석과 적층된 철판으로 이루어진 고정자 사이에 반경 방향으로 서로 당기면서

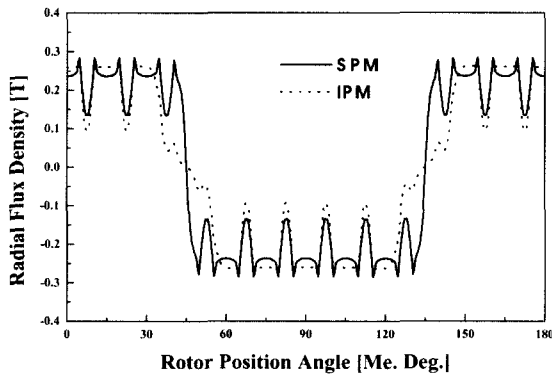


Fig. 4 FEM results of radial flux density in air-gap without rotor eccentricity

돌아가는 불필요한 힘인 국소 작용력은 맥스웰 응력 텐서를 이용하여 구할 수 있다. 일반적인 등방성, 균질성 물질의 자기장에 존재하는 맥스웰 응력은 아래와 같이 주어진다.

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\mu} \left[B_i B_j - \frac{1}{2} \delta_{ij} B_k B_k \right] \quad (8)$$

여기서 μ 는 물질의 자기 투자율이다. 서로 다른 물질인 전동기내의 철과 공기사이의 경계에서의 자기력은

$$f_i = [\sigma_{ij}^{air} - \sigma_{ij}^{iron}] n_i n_j \quad (9)$$

로 되며, 특히 이 지점에서는 $\mu_{air} \ll \mu_{iron}$ 이고, 그 비율이 양질의 철의 경우 약 5000배 가까이 되므로 식 (9)에서 우측 첫 번째 항의 영향은 0.02 % 미만이 되어 무시할 수 있다.

브러쉬리스 전동기의 경우에 편리한 원통 좌표계를 사용하면, 고정자 표면에 작용하는 반경 방향 및 접선 방향의 자기력은 다음과 같이 주어진다.

$$f_r \approx \sigma_{rr}^{air} = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_\theta^2 - B_z^2) \quad (10)$$

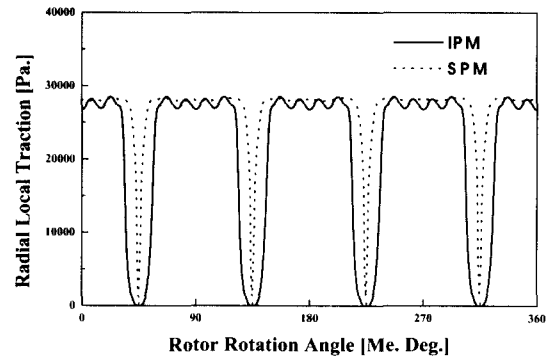
$$f_\theta \approx \sigma_{r\theta}^{air} = \frac{1}{\mu_0} B_r B_\theta \quad (11)$$

여기서 B_r 은 반경 방향의 자속 밀도이고, B_θ 는 접선 방향, B_z 는 축 방향의 자속 밀도이다. 고정자 표면에 작용하는 시변 가진 국소 작용력은 주파수 분석을 통하여 분석할 수 있다.

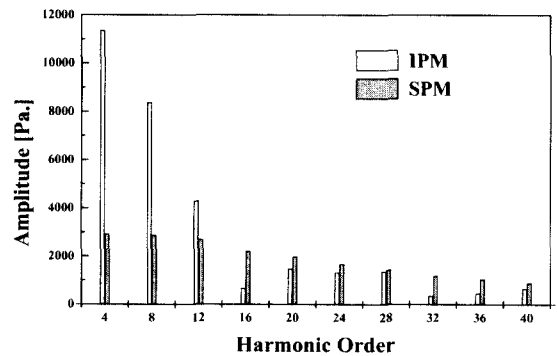
$$q(t)_A = A_n(t) \cos[(n-1)\Omega t - \varphi_n] \quad (12)$$

여기서, Ω 는 회전자의 회전 각속도이고, $A_n(t)$ 는 n 번째 고조파의 Fourier 계수, φ_n 은 거기에 해당하는 위상 변이이다. 또한 고조파 차수는 회전 수에 극 수의 상수 배를 곱한 것이다. Fig. 5는 상기의 식 (8)~(12)를 이용하여 고정자 치의 정 중앙에 작용하는 반경 방향 국소 작용력과 그 주파수 성분을 나타낸 것이다.

상기의 결과로부터 두 전동기의 힘의 최대값은 공극 자속 밀도값이 동일하므로 유사한 크기를 가지지만, IPM 전동기의 경우에는 자기 포화로 인해 최대값에서의 변동을 야기시킴을 알 수 있고 극 천이 구간의 차이로 인해 고주파의 계수값에 많은 차이를 보이고 있는 데, IPM 전동기의 경우는 저차의 계수값이 매우 크게 나타나는 반면 SPM 전동기의 경우는 모든 차수에 대해 계수값들이 존재함을 알 수 있다.



(a) Local traction force



(b) Frequency analysis

Fig. 5 Radial local traction force of IPM and SPM without rotor eccentricity

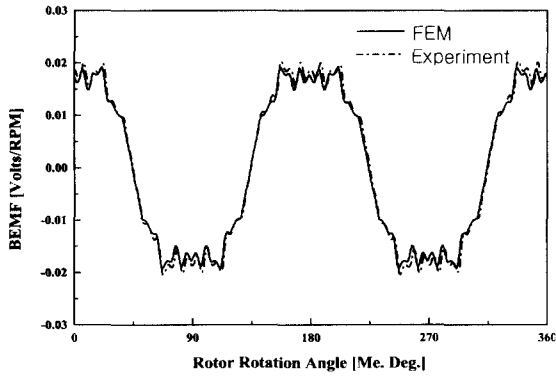


Fig. 6 BEMF of IPM motor with rotor eccentricity

따라서 SPM전동기의 경우 고주파 영역에서 전동기 시스템에 공진을 발생시킬 우려가 매우 크다고 할 수 있다.

2.2 편심이 있을 때의 전동기 특성 비교

(1) 역기전력

회전자의 편심은 회전 위치에 따라 동일한 편심률로써 원 궤적선상을 따라 회전한다는 가정을 하여 유한 요소 해석을 수행하였다. Fig. 6은 회전자에 편심이 존재할 경우 회전자의 회전 위치에 따른 역기전력을 유한 요소 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 보여주고 있다.

위 결과로부터 역기전력에 대한 유한 요소 해석 결과와 실험 결과는 매우 잘 일치함을 알 수 있으나, 회전자 편심은 상 역기전력에 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그 이유는 고정자 치에 감겨 있는 권선은 4극을 갖는 분포권선으로써 고정자에 균등하게 분포하여 각 슬롯에 감겨져 있기 때문에 편심이 치우친 쪽과 그 반대쪽과는 일정한 비율로 회전자가 위치하므로 편심의 영향이 상쇄되어 나타나기 때문이다. 따라서 회전자 편심이 존재하더라도 전동기의 역기전력에는 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 편심의 영향 상쇄로 인해 유한 요소 해석 결과의 타당성 검증에는 다소 미흡하다고 판단되어 단일 극의 권선만을 이용하여 유한 요소 해석한 결과와 IPM전동기의 경우에 대한 실험으로 구한 결과를 비교하여 나타낸 것이 Fig. 7이다.

Fig. 7을 살펴보면 단일 극에 의한 역기전력의 유한 요소 해석 결과도 또한 실험 결과와 유사하나 해석상의 가정과는 달리 실제 실험의 경우에는 동일한

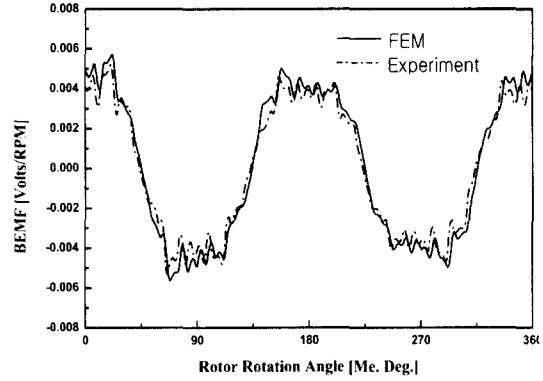


Fig. 7 BEMF of IPM motor at single-pole with rotor eccentricity

편심량으로 회전자가 회전하지는 않음으로 극 천이 구간에서 다소 차이가 있음을 보이고 있다. 이 결과를 전동기의 회전자에 편심이 없는 경우의 역기전력 결과(Fig. 2)와 비교해보면 파형의 형상은 유사하나 최대값에서 감소하는 방향으로 편심되어 나타난다는 것을 알 수 있다. 따라서 유한 요소 해석을 통한 브러쉬리스 전동기의 전자기장 해석 결과들은 충분한 신뢰성을 가지고 있음을 알 수 있고, 단일 극만의 역기전력 파형을 통해 회전자 편심 유무를 쉽게 확인할 수 있음을 보이고 있다. 이상의 결과를 바탕으로 회전자에 편심이 존재하는 경우의 SPM 및 IPM 전동기의 반경 방향 전자기력등은 유한 요소 해석으로 구하여 그 특성을 파악하였다.

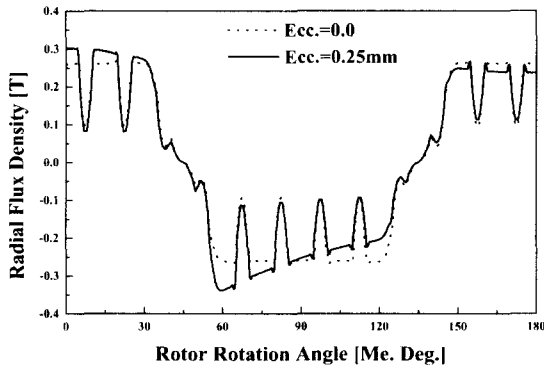
(2) 반경 방향 자속 밀도

Fig. 8은 회전자의 편심 유무에 따른 회전자 회전 기계각 0°에서의 IPM 및 SPM 전동기 각각의 공극 반경 자속 밀도를 유한 요소 해석법으로 계산한 결과를 서로 비교하여 보여주고 있다.

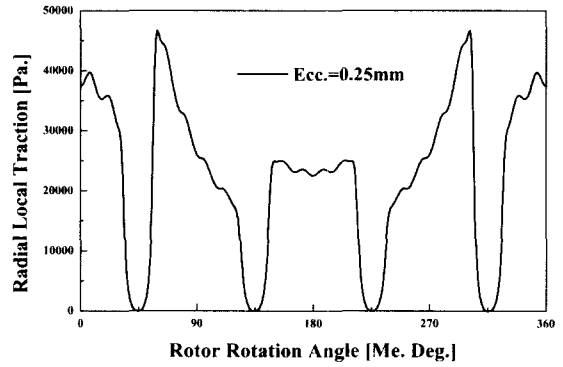
Fig. 8의 결과로부터 IPM 전동기의 경우 회전자에 편심이 존재할 경우 회전자의 극심한 자기 포화의 영향으로 인해 자속 밀도의 변화가 심하게 됨을 알 수 있다. 따라서 회전자 편심은 IPM 전동기의 회전자에서 발생하는 자기 포화를 더욱 촉진시켜 자속 밀도의 값의 변동이 매우 크게 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 SPM 전동기의 경우에는 편심에 따른 자속 밀도의 변화에 그다지 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

(3) 반경 방향 국소 작용력

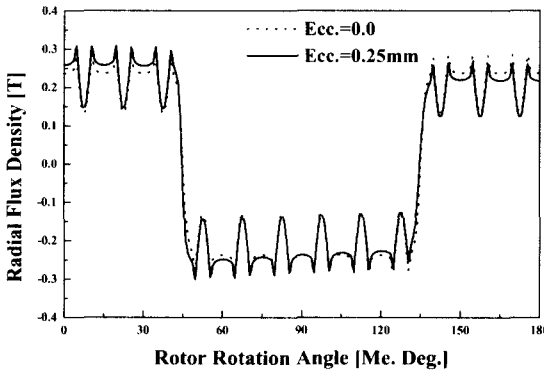
Fig. 9는 회전자의 편심률이 0.5일 때 고정자 치 표면 정 중앙 위치에서의 반경 방향 국소 작용력의 변



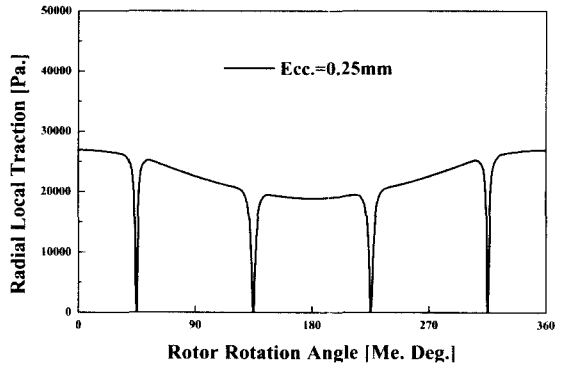
(a) IPM motor



(a) IPM motor



(b) SPM motor



(b) SPM motor

Fig. 8 FEM results of radial flux density with and without rotor eccentricity

Fig. 9 FEM results of radial local traction force with rotor eccentricity

화를 회전자의 회전 위치에 따라 나타낸 것이고, 이를 주파수 성분으로 나타낸 것이 Fig. 10이다.

Fig. 9를 살펴보면 특히 IPM 전동기의 경우 자기포화로 인해 자속 밀도값이 변동하게 되어 국소 작용력의 변동을 가져올 뿐만 아니라 크기의 변화가 심하게 됨을 알 수 있다. 이러한 국소 작용력의 변동 결과는 국소 작용력의 주파수 분석 결과인 Fig. 10에 나타난 바와 같이 저주파에 집중된 상당한 크기의 성분들이 존재하게 되고 이는 전동기의 진동 소음에 악영향을 미칠 가능성이 편심이 없는 경우에 비하여 매우 크다고 할 수 있다. 또한 SPM 전동기의 경우에는 국소 작용력의 완만한 변화로 인해 저주파 성분은 크게 나타나지는 않지만, 고주파 성분이 편심이 존재하지 않는 경우에 비해 다소 큰 값을 가지므로 반경 방향 국소 작용력에 의한 전동기의 진동 공진 가능성은 더욱 크다고 할 수 있다.

(4) 전자기 불평형력

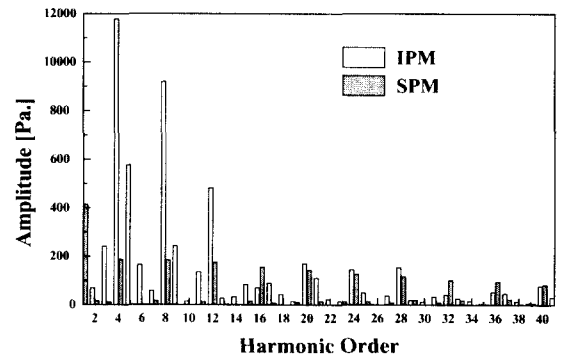


Fig. 10 Frequency analysis of radial local traction forces

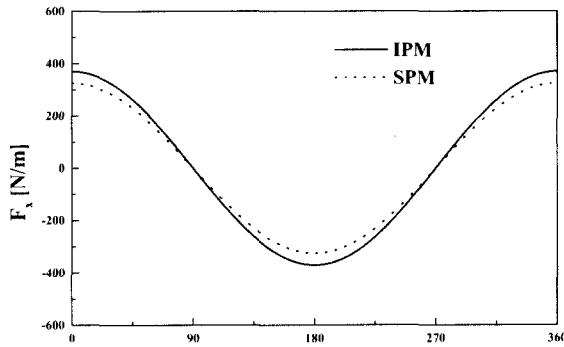
회전자의 편심에 의해 발생하는 전자기 불평형력은 공극 내의 분포 반경 방향 국소 작용력을 공극의 폐구간을 따라 적분함으로써 다음의 식 (13)으로 표현할 수 있다.

$$F_x = \int_0^{2\pi} f_r r \cos\theta d\theta$$

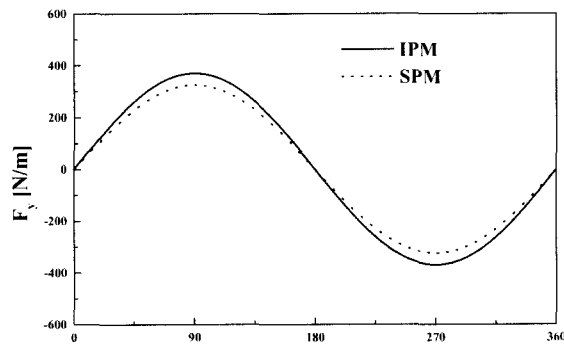
$$F_y = \int_0^{2\pi} f_r r \sin\theta d\theta \quad (13)$$

식 (13)을 이용하여 회전자 편심률이 0.5일 때의 전자기 불평형력을 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11에서 알 수 있듯이 IPM 전동기의 경우에는 회전자 편심으로 인해 자기 포화 현상이 더욱 급증하기 때문에 SPM 전동기에 비해 전자기 불평형력은 다소 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 전자기 불평형력에 의해 회전자의 편심을 더욱 증가시키는 결과를 초래할 수 있다고 할 수 있다. Fig. 12는 편심률에 따른 전자기 불평형력의 최대값을 비교하여 도시한 것으로 편심률이 증가함에 따라 SPM 전동기의 경우에는 선형적으로 증가하지만 IPM 전동기의 불평형력은 비선형적으로 증가한다는 것을 보이고 있다. 따라서 회전자 편심이 구조적으로 크게 될 가능



(a) x direction component



(b) y direction component

Fig. 11 Magnetic imbalance force with rotor eccentricity

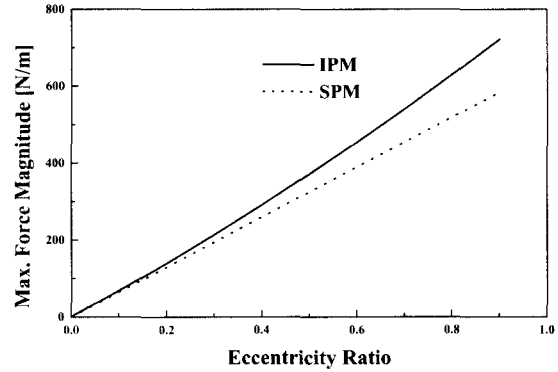


Fig. 12 Maximum magnitude of imbalance force according to eccentricity ratio

성을 내포하고 있는 탄성축-베어링계의 경우에는 전동기 전체의 진동 및 소음에 더욱 큰 악영향을 미칠 수 있으므로 특히 주의가 요구됨을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 유한 요소 해석을 이용하여 회전자 편심 유무에 따른 IPM 및 SPM BLDC전동기의 전자기적 특성을 알아 보기 위해 우선 역기전력의 해석 결과를 실험 결과와 비교함으로써 해석의 타당성을 검증코자 하였다. 그 결과 편심 유무에 관계없이 역기전력의 유한 요소 해석 결과는 실험 결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 회전자에 편심이 존재할 경우에는 단일 극만의 역기전력 파형이 최대값에서 편심되어 나타나므로 단일 극만의 역기전력만을 측정함으로써 회전자의 편심 유무를 확인할 수 있음을 보였다. 이러한 유한 요소 해석 결과의 타당성을 바탕으로 전자기 가진력인 반경 방향 극소 작용력, 전자기 불평형력을 유한 요소 해석을 통하여 구하였다. 특히 회전자에 편심이 존재하는 경우 반경 방향 극소 작용력에 있어서는 저차의 고조파 성분은 IPM 전동기의 경우가 크게 나타났으나 SPM 전동기의 경우 IPM 전동기에 비해 고주파 영역의 계수가 더 크게 존재함으로써 전동기의 구조적 공진 발생 가능성이 더 큼을 알 수 있었다. 한편 회전자의 편심으로 인해 발생하는 전자기 불평형력에 있어서는 IPM 전동기의 경우 회전자에서 발생하는 자기 포화가 더욱 촉진되어 전자기 불평형력의 최대값이 SPM 전동기가 선형적으로 증가하는 것에 비해 비선형적으로 증

가하므로, 제작 공정 및 운전 환경에 의해 발생할 수 있는 회전자의 편심으로 인하여 결과적으로 전동기에서 발생하는 진동 및 소음에 악영향을 미칠 수 있을 것으로 사료된다. 따라서 향후 회전자의 편심에 의한 반경 방향 국소 작용력의 영향이 실제 영구 자석형 전동기 시스템의 진동 및 소음에 미치는 영향에 대한 연구를 실험과 병행하여 계속 수행할 계획이다.

후 기

본 논문은 2000년도 한국과학재단 특정기초(2000-2-30400-003-2) 연구의 지원을 받았으며, 관련자 분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Swann, S. A., 1963, "Effect of Rotor Eccentricity on the Magnet Field on Air Gap of a Non-salient Pole Machine", IEE Proc., Vol. 110, No. 5, pp. 903~915.
- (2) Bradford, M., 1968, "Unbalanced Magnetic Pull in a 6-pole Induction Motor", IEE Proc., Vol. 115, pp. 1619~1627.
- (3) Dorell, D. G., 1996, "Calculation of Unbalanced Magnetic Pull in Small Cage Induction Motors with Skewed Rotors and Dynamic Rotor Eccentricity", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, pp. 483~488.
- (4) DeBortoli, M. J., 1993, "Effects of Rotor Eccentricity and Parallel Windings on Induction Machine Behavior: A Study Using Finite Element Analysis", IEEE Trans on Magn., Vol. 29, No. 2, pp. 1676~1682.
- (5) Jang, G. H., and Lieu, D. K., 1991, "The Effect of Magnet Geometry on Electric Motor Vibrations", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 27, No. 6, pp. 5202~5204.
- (6) Chao, Z. J. Liu., and Low, T. S., 1996, "Unbalanced Magnet Pull in PM Synchronous Machines-Its Relation with Stator Teeth and Armature Winding", Proc. of IMCSD 25th Annual Conf., pp. 79~84.
- (7) Kim, U. T., and Lieu, D. K., 1998, "Magnetic Field Calculation in Permanent Magnet Motors with Rotor Eccentricity", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 4, pp. 2253~2266.