

# 치수적 결함에 따른 PMSM의 법선방향 힘의 변화에 관한 연구

논 문
59-11-10

## Analysis of Radial Force on a Permanent Magnet Synchronous Motor Caused by Dimensional Variation

이 치 우\*  
(Cheewoo Lee)

**Abstract** - Main reasons for causing vibration in a permanent magnet synchronous motor (PMSM) are torque ripple and radial force harmonics, and hence, both of them are undesirable in high-precision machine tools and accurate motion-control actuators. Recent research on radial force is the prediction of major vibration frequencies and modes in terms of motor design such as different winding types and a fractional slot number per pole in the stator. Also, proper phase current has been investigated for minimizing radial force harmonics. During the previous studies, all the motors are assumed to be ideally built up in terms of mechanical dimensions, but it is impossible due to dimensional variation within or outside tolerance in production. Therefore, in this paper, the effect of several key factors on radial force is examined and compared regarding manufacturing imperfection.

**Key Words** : PMSM, Vibration, Radial force, Dimensional defects

### 1. 서 론

PMSM은 상대적으로 높은 출력밀도, 브러시의 부재, 무시될 정도의 적은 회전자 손실, 높은 효율, 제어의 용이성 때문에 고성능 응용분야에 널리 사용된다. 그러나 토오크 리플과 법선방향 힘의 고조파로 인한 소음 및 진동은 여전히 개선 대상으로 고려되고 있다. 토오크 리플 저감에 대해서는 실현 가능성 높은 방법들이 많이 연구되고 그 성과가 발표되었다.[1,2] 법선방향 힘에 대한 최근 연구는 다양한 권선 방법과 고정자 극당 분수의 슬롯수 등 모터 설계 관점에서 진동 주파수와 진동 모드를 예측하는 연구가 진행되고 있다.[2,3] 또한, 법선방향 힘을 줄일 수 있는 전류파형에 대한 연구도 활발하다.[4]

PMSM의 토오크는 회전자에 작용하는 힘의 접선방향 성분에 의해 결정되며 이는 공극에서 발생하는 자속의 분포에 의해 영향을 받는다. 하지만 공극에서 생성된 힘의 법선방향 성분은 소음과 진동의 원인이 되므로 그 크기를 줄이는 것이 중요하다. 특히, 그 법선방향 성분이 공극의 둘레를 따라 비대칭으로 분포되면 그로 인한 악영향은 증폭될 수 있어 비대칭 법선방향 힘을 초래하는 원인에 대한 파악 및 이론적 분석이 요구된다. 그리고 제시된 앞선 연구에서는 모든 전동기들이 기계적 치수의 관점에서 이상적인 제작으로 가정했지만 실제 생산할 때는 공차 내에서의 치수변화 또는 공차를 벗어나는 치수변화가 발생한다.

본 논문에서는 PMSM의 고정자 및 회전자의 자기구조를

결정하는 철편의 기계적 치수 중에서 법선방향 힘의 변화에 큰 영향을 미치는 슬롯 오픈닝, 공극치수, 베어링의 유동, 회전자의 편심, 타원형 공극과 같은 주요 인자들을 선정하고 각 인자에 의한 법선방향 힘의 변화를 분석하고 비교하였다.

### 2. 대칭과 비대칭 법선방향 힘

전동기에서 기계적인 비대칭은 발생 토오크, 진동, 전기적인 비대칭, 자속의 불균형 등의 여러 가지 문제를 야기한다. 특히, 법선방향 힘에 대해서는 그 분포를 비대칭으로 만드는 기계적 치수변화에 의해 진동과 소음에 치명적인 결과를 초래하기도 한다.

#### 2.1 법선방향의 힘

법선방향 힘은 공극의 자속밀도에 직결되므로 본 논문에서는 공극의 변화에 가장 민감한 기계적 치수로서 슬롯 오픈닝, 공극치수, 베어링의 유동, 회전자의 편심, 타원형 공극을 선정하여 법선방향 힘과의 상관관계를 분석하였다. 슬롯 오픈닝과 공극치수는 대칭형 힘 벡터의 크기를 변화시키고, 나머지 3개의 치수는 법선방향 힘의 비대칭 분포를 초래한다. 베어링 유동은 ABEC (Annular Bearing Engineering Committee) 표준에 의해 그 변위를 선정하며, 회전자 편심과 타원형 공극에 대해서는 아래에서 자세히 정의한다.

그림 1은 4극으로 구성된 PMSM의 공극에 작용하는 4개의 법선방향 힘 벡터를 나타내며, 각 벡터는 기계적 각도에서 90° 간격으로 이동하면서 360°내에 4개가 위치한다. 4극 PMSM에서 법선방향 힘 벡터가 완전히 대칭을 이루면 상에서 언급한 4개의 벡터들은 그 크기가 모두 같아진다. 관

\* 정 회 원 : 삼성전기 중앙연구소, 책임연구원

E-mail : cwlee1014@gmail.com

접수일자 : 2010년 9월 15일

최종완료 : 2010년 10월 18일

런하여 식 (1)에서는 완전 대칭의 법선방향 힘에 대한 수식적 표현을 보여주고 있으며, 이중 하나의 벡터라도 그 값이 다를 경우 이를 비대칭 법선방향 힘이라 말할 수 있다.

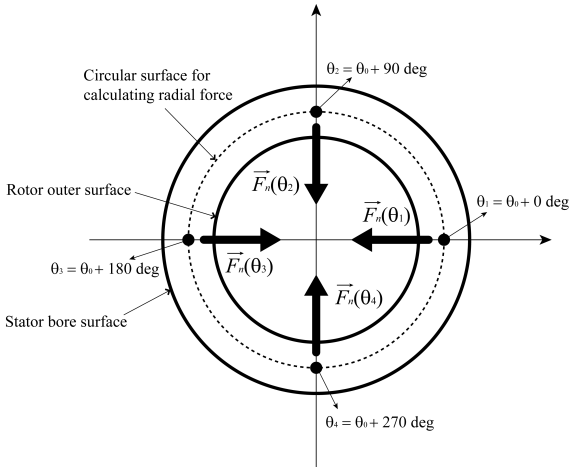


그림 1 공극에서의 법선방향 힘 벡터  
Fig. 1 Radial Force Vectors in Air Gap

$$|\vec{F}_n(\theta_1)| = |\vec{F}_n(\theta_2)| = |\vec{F}_n(\theta_3)| = |\vec{F}_n(\theta_4)| \quad (1)$$

여기서  $|\vec{F}_n(\theta_1)|$ ,  $|\vec{F}_n(\theta_2)|$ ,  $|\vec{F}_n(\theta_3)|$ ,  $|\vec{F}_n(\theta_4)|$ 는 공극에 위치한 가상의 원위에 작용하는 법선방향 힘 벡터이다.

### 2.2 회전자 편심과 타원형 공극

그림 2(a)는 회전자 편심에 따른 공극의 변화를 3차원으로 표현하고 있다. 조립상의 부주의 또는 부품의 불량 등으로 인해 고정자와 회전자의 중심축이 서로 일치하지 않을 때 전동기의 앞쪽에서는 목표 공극보다 큰  $\delta_1$  만큼의 공극이 생기는 위치가 있고, 같은 회전자 위치에서 전동기의 뒤쪽에서는 목표 공극보다 작은  $\delta_2$  만큼의 거리가 생기는 회전자 편심이 발생한다. 이렇게 형성된 전동기 앞쪽과 뒤쪽의 회전자 편심을 그림 2(b)와 2(c)에서 2차원으로 나타내었고, 공극의 변화( $\delta_1$ 과  $\delta_2$ )는 회전자 편심계수( $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ )에 의해 결정됨을 이 그림에서 쉽게 확인할 수 있다. 회전자 편심과 공극의 변화에 대한 수학적 관계는 식 (2)와 (3)에서 자세히 제시되며, 각 공극의 최소값과 최대값이 회전자 편심계수에 의해 정해짐이 수식적 전개를 통해 재확인 되었다. 베어링 유동은 회전자 편심의 한 원인으로 볼 수 있으므로 편심계수를 사용하여 충분히 정의가 된다. 따라서 본 논문에서는 베어링 유동의 경우 그 변위 값은 ABEC 표준에 의해 판단하되 편심계수를 동일하게 적용하여 베어링 유동을 정의하고 그에 따른 법선방향 힘의 변화를 분석한다. 여기서 해석을 용이하게 하기 위해 편심계수를 일원화 시킨다. 즉, 전동기의 앞쪽과 뒤쪽의 두 편심계수가 동일한 조건( $\epsilon_1 = \epsilon_2$ )에서 회전자 편심과 베어링 유동에 따른 법선방향 힘의 분포를 해석한다.

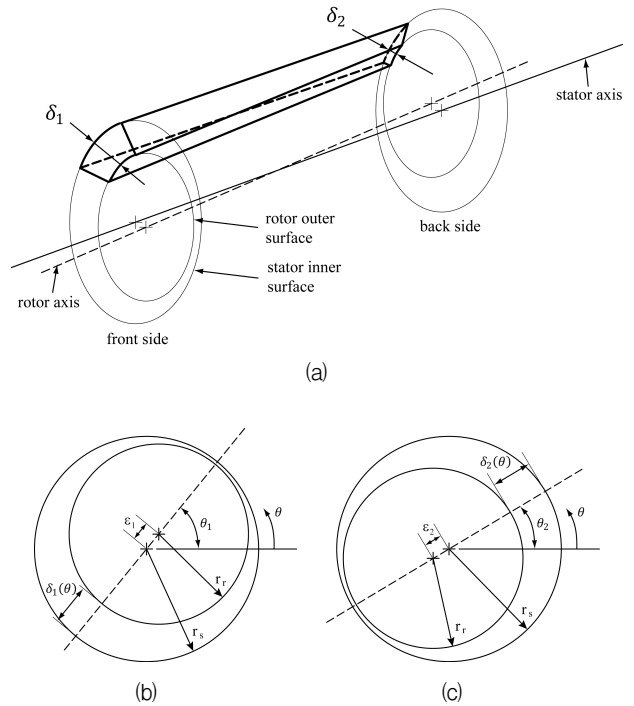


그림 2 회전자 편심

- (a) PMSM에서 편심지게 조립된 회전자 (3차원)
- (b) 앞쪽에서 본 회전자 편심 (2차원)
- (c) 뒤쪽에서 본 회전자 편심 (2차원)

Fig. 2 Rotor Eccentricity

- (a) Eccentric Rotor in a PMSM
- (b) Rotor Eccentricity on the front side
- (c) Rotor Eccentricity on the back side

$$\delta_1 \dots \begin{cases} \min = (r_s - r_r) - \epsilon_1 @ \theta = \theta_1 \\ \max = (r_s - r_r) + \epsilon_1 @ \theta = \theta_1 \pm \pi \end{cases} \quad (2)$$

$$\delta_2 \dots \begin{cases} \min = (r_s - r_r) - \epsilon_2 @ \theta = \theta_2 \\ \max = (r_s - r_r) + \epsilon_2 @ \theta = \theta_2 \pm \pi \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ 는 편심져 있는 공극의 회전자 위치 따른 길이이다.

타원형 공극에 의한 법선방향 힘의 변화를 분석하기 위해 그림 3에서 제시된 것처럼 고정자 철심의 타원형 내경을 고려한다. 도면에서 규제된 목표 고정자 내경을 2b라고 가정하고, 타원의 장축에 해당하는 2a 값의 변화에 따른 법선방향 힘의 분포를 분석한다. 타원의 일반식인 (4)를 이용해서 고정자 내경의 둘레를 표현하고, 식 (5)에서 보듯이 계수  $\sigma$ 를 이용하여 고정자 내경의 타원율을 정의하고 그 변화에 따른 법선방향 힘의 분포를 해석한다.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

$$\sigma = a - b \quad (a > b) \quad (5)$$

여기서 2b는 목표 고정자 내경이며,  $\sigma$ 는 고정자 내경의 타원 정도를 나타낸다.

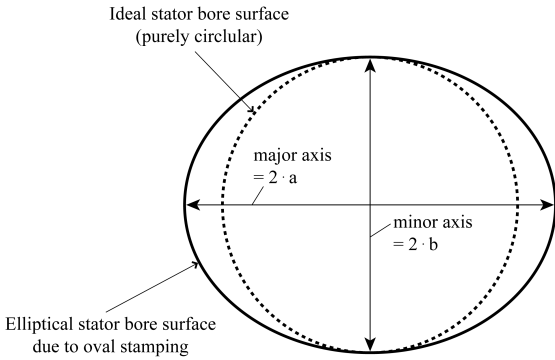


그림 3 타원으로 타발된 고정자 내경  
Fig. 3 Oval Stamping of a Stator Inner Bore

3. 법선방향 힘 분석 및 비교

PMSM의 토오크는 회전자에 작용하는 힘의 접선방향 성분에 의해 결정되며 이는 공극에서 발생하는 자속의 분포에 직결된다. 하지만 공극에서 생성된 힘의 법선방향 성분은 소음과 진동의 원인이 되므로 그 크기의 저감에 대한 연구가 활발하다. 특히, 그 법선방향 성분이 공극의 둘레를 따라 비대칭으로 분포되면 그로 인해 소음 및 진동 특성이 악화되므로 비대칭 법선방향 힘을 초래하는 원인에 대한 파악 및 이론적 분석이 요구된다.

3.1 PMSM의 주요 사양

12슬롯 3상 4극 PMSM이 그림 4에서 주어진다. 4개의 영구자석 편들이 회전자 철심 표면에 부착되어 있으며, 고정자 상권선의 극에 맞춰서 영구자석 편들의 자극의 교번순서가 정해진다. 제시된 PMSM은 다양한 응용분야에서 널리 사용되는 구조이므로[2,4] 본 연구에서도 해당 PMSM 구조를 이용하여 주요 치수적 결함에 따른 법선방향 힘의 분석을 수행한다.

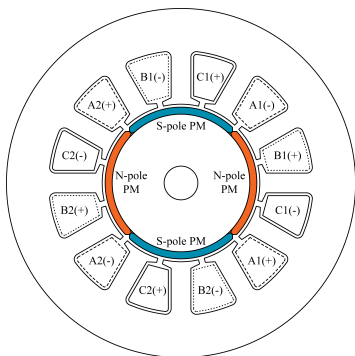


그림 4 12 슬롯을 갖는 3상 4극 PMSM  
Fig. 4 3-phase 12-slot 4-pole PMSM

본 PMSM의 주요 재원은 표 1에서 소개되며, 전동기의 부피를 결정하는 고정자 외경과 적층 길이는 각각 124mm와 55mm 이고, 목표 공극은 0.5mm 이다. 철심과 영구자석의 등급은 각각 M19와 NdFe30 이다.

표 1 대상 PMSM의 주요 재원

Table 1 Specification of PMSM

주요 재원	단위	목표 값
고정자 외경	mm	124.0
적층 길이	mm	55.0
슬롯 오픈닝	mm	2.10
공 극	mm	0.50
축 외경	mm	12.0
철판 재질	-	M19
상당 턴수	-	176
영구자석	-	NdFe30

3.2 시뮬레이션 분석 및 비교

그림 5는 PMSM의 공극에서 발생하는 법선 및 접선방향 힘의 벡터를 보여준다. 각각의 힘 벡터의 크기는 Magnetic Stress Tensor (MST) 방법으로 계산된다. MST[4]는 고정자 권선에서 발생하는 회전자계와 영구자석의 상호작용에 의해 형성되는 공극의 자속밀도를 법선과 접선 방향으로 구분하여 계산한 뒤 각 방향의 자속밀도 성분을 이용하여 공극에서 발생하는 법선과 접선 방향의 힘 벡터를 쉽게 산술 계산하는 방법이다. MST 기법을 쉽게 적용하기 위해 본 논문에서는 유한요소해석 프로그램을 이용하여 공극의 법선 및 접선 방향 자속밀도를 계산한다.

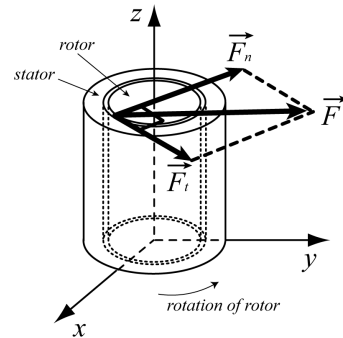


그림 5 법선 및 접선방향의 힘 벡터  
Fig. 5 Normal and Tangential Force Vectors

자속밀도 벡터를 구할 때 고정자와 회전자 사이에 있는 공극 내에 가상의 원을 두고 그 원주를 따라 가면서 해당 자속밀도를 구해야 하는데, 본 연구에서는 힘 벡터 계산시 오차를 최소화하기 위해 공극의 정중앙에 위치하는 원을 선택하였다. 이와 같은 MST 기법에서 자속밀도 벡터와 힘 벡터사이의 수학적 관계는 식 (6)과 (7)에서 제시된다. 식 (6)에서 법선방향 힘 벡터의 크기는 법선방향 자속밀도의 곱에 접선방향 자속밀도의 곱을 뺀 값에 의해 결정되는 반면, 식 (7)에서 접선방향 힘 벡터의 크기는 법선방향 자속밀도와 접선방향 자속밀도의 곱에 비례함을 알 수 있다.

$$F_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0} \quad (6)$$

$$F_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} \quad (7)$$

여기서  $F_n$ ,  $F_t$ ,  $B_n$ ,  $B_t$ ,  $\mu_0$ 는 각각 법선방향 힘, 접선방향 힘, 법선방향 자속밀도, 접선방향 자속밀도, 공기의 투자율이 다.

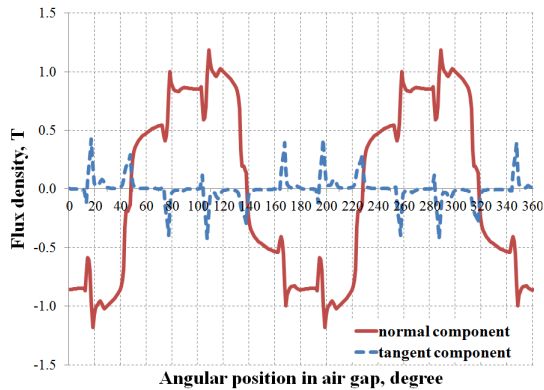
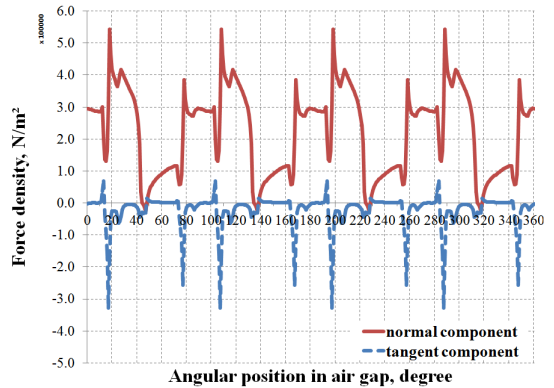


그림 6 치수적 결함이 전혀 없는 경우 공극 자속밀도 분포 (7 Arms 상전류)

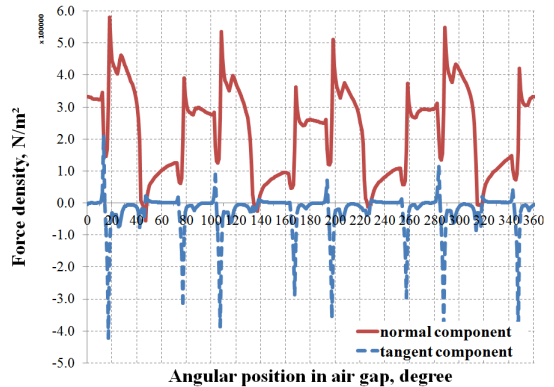
Fig. 6 Flux Density in Air Gap without any Dimensional Defects (7 Arms phase current)

그림 6은 치수적 결함이 없고 상권선에 7 Arms 전류가 흐를 경우 2000 rpm으로 회전자가 돌 때 공극의 둘레를 따라 발생하는 자속밀도의 법선 및 접선방향 성분에 대한 시뮬레이션 결과이며, 그 결과에 식 (6)과 (7)을 적용하여 예측한 법선 및 접선방향 힘의 분포가 그림 7(a)에 제시되었다. 이때 x축 좌표는 앞서 언급했던 공극 내의 정중앙에 위치하는 가상원의 둘레를 360°로 나타낸 것이다. 본 그림에서 알 수 있듯이 법선방향 힘의 분포에서 최대값을 나타내는 원주의 4 곳인 18°, 108°, 198°, 288°에서 모든 힘 벡터가 같은 값을 가지므로 그림 7(a)에서 제시된 법선방향 힘의 분포는 대칭임을 알 수 있다. 하지만 주어진 조건에서 회전자 편심( $\epsilon$ )이 0.25 mm 만큼 가해졌을 경우 접선 및 법선방향 힘의 결과가 그림 7(b)에서 주어졌는데 이때의 법선방향 힘의 분포는 회전자 편심의 영향에 의해 더 이상 대칭이 아님을 확인할 수 있다. 이와 같은 방법으로 각 치수의 변화에 대한 법선방향 힘의 분포를 분석할 수 있고 그에 대한 해석 결과들이 아래에서 자세히 언급된다.

표 2에서는 각 치수의 변화 범위를 보여준다. 슬롯 오픈닝과 공극은 목표치의 90%에서 110%까지 변화를 주며 그에 따라 법선방향 힘의 분포를 관찰한다. 베어링의 유동은 ABEC 표준에 준해 그 최대값을 0.008mm로 정하고 그 값을 0.005mm까지 낮춰가면서 살펴본다. 회전자 편심과 타원형 고정자 내경은 없는 것이 목표이며, 그 변화폭은 공극의 목표치를 기준으로 회전자 편심의 경우 10%에서 50%까지 변화시키고 타원형 고정자 내경은 2%에서 10%까지 범위에서 PMSM의 법선방향 힘과의 상관관계를 살펴본다.



(a)



(b)

그림 7 법선방향 힘 밀도 (7 Arms 상전류)

- (a) 치수적 결함이 전혀 없는 경우,
- (b) 0.25mm의 회전자 편심이 있는 경우

Fig. 7 Radial Force Density (7 Arms phase current)

- (a) In case of no Dimensional Defects
- (b) In case of Eccentric Rotor with 0.25mm

표 2 각 치수의 변화 범위

Table 2 Variation of Five Key Dimensions

목표치, mm	치수의 변화 범위
슬롯 오픈닝	목표치 대비 90%(1.890) ~ 110%(2.310)
공극	목표치 대비 90%(0.450) ~ 110%(0.550)
베어링 유동	0.005 ~ 0.008 (ABEC 기준)
회전자 편심	공극 목표 대비 10%(0.05) ~ 50%(0.25)
타원형 타발	공극 목표치 대비 2%(0.01) ~ 10%(0.05)

표 3과 4에서는 슬롯 오픈닝과 공극의 변화에 따른 법선방향 힘의 시뮬레이션 결과를 제공하며, 이 두 가지 치수적 결함의 경우는 법선방향 힘이 대칭 분포를 가지므로 그림 1에서 제시된 4곳의 벡터 크기가 모두 같다. 따라서 원주의

18° 위치에서 나타나는 최대값을 표에서 비교한다. 슬롯 오픈닝의 경우 그 값이 커질수록 법선방향 힘의 벡터값이 커지는 경향이지만, 공극의 경우는 그 값이 작을수록 힘의 크기가 커짐을 알 수 있다. 그리고 힘 벡터의 최대값은 각각의 목표치 대비 슬롯 오픈닝 2.310mm에서 2.6%, 공극 0.450mm에서 7.3% 변화하였다.

**표 3** 슬롯 오픈닝의 치수에 의한 법선방향 힘의 변화 (대칭형 법선방향 힘)

**Table 3** Radial Force Variation Caused by the Dimension of Slot Opening

단위	슬롯 오픈닝에 따른 법선방향 힘 밀도				
오픈닝, mm	1.890	1.995	2.100	2.205	2.310
힘, kN/m <sup>3</sup> (18°)	515.1	529.8	542.6	552.1	556.8
%	94.9	97.7	100.0	101.8	102.6

**표 4** 공극의 치수에 의한 법선방향 힘의 변화 (대칭형 법선방향 힘)

**Table 4** Radial Force Variation Caused by the Dimension of Air Gap

단위	공극 변화에 따른 법선방향 힘 밀도				
공극, mm	0.450	0.475	0.500	0.525	0.550
힘, kN/m <sup>3</sup> (18°)	582.0	561.8	542.6	525.7	507.5
%	107.3	103.5	100.0	96.9	93.5

비대칭 법선방향 힘의 분포를 갖는 치수적 결함인 베어링 유동, 회전자 편심, 타원형 고정자 내경에 대한 시뮬레이션 결과는 표 5, 6, 7에서 제공된다. 이 경우는 법선방향 힘이 비대칭 분포를 가지므로 그림 1에서 제시된 4곳의 벡터 크기가 다르다. 따라서 법선방향 힘의 값에서 가장 큰 차이를 보이는 원주의 18°와 198° 위치에서의 두 값을 표에서 나타내고 그 두 벡터값의 차이도 표에서 비교된다.

베어링 유동의 경우 그 값이 커질수록 법선방향 힘의 비대칭 정도가 커지며 0.008mm의 베어링 유동이 발생할 경우 치수적 결함이 전혀 없는 대칭의 법선방향 힘의 최대값(542.6 kN/m<sup>3</sup>)에 비교했을 때 0.4% 수준의 비대칭으로 표현된다. 이러한 비대칭 수준이 0.25mm의 회전자 편심과 0.05mm의 타원형 타발에서는 각각 13.0%와 4.6% 만큼 비대칭이 생기므로 이런 결과는 소음과 진동을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 비대칭 법선방향 힘을 일으키는 3 가지 치수 중에서 회전자 편심과 타원형 타발이 비대칭 법선방향 힘을 유발하는 주요 인자라는 것이 확인되었다. 따라서 실제 생산시에 주의해서 관리해야 할 치수적 결함은 회전자 편심과 타원형 공극이다.

**표 5** 베어링 유동에 의한 법선방향 힘의 변화 (비대칭형 법선방향 힘)

**Table 5** Radial Force Variation Caused by Bearing Movement

단위	베어링 유동(ε)에 따른 법선방향 힘 밀도				
σ, mm	0.005	0.006	0.007	0.008	0.000
힘, kN/m <sup>3</sup> <1>	543.0	543.1	543.2	543.3	542.6 <4>
힘, kN/m <sup>3</sup> <2>	542.0	541.9	541.6	541.4	
힘, kN/m <sup>3</sup> <3>	1.0	1.2	1.8	1.9	0.0
% (<3>/<4>)	0.2	0.2	0.3	0.4	0.0

<1>은 18° 공극의 위치에서 법선방향 힘이고, <2>은 198° 공극의 위치에서 법선방향 힘이다. 그리고 <3>=<1>-<2> 이다.

**표 6** 회전자 편심에 의한 법선방향 힘의 변화 (비대칭형 법선방향 힘)

**Table 6** Radial Force Variation Caused by Rotor Eccentricity

단위	회전자 편심(ε)에 따른 법선방향 힘 밀도					
ε, mm	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.00
힘, kN/m <sup>3</sup> <1'>	550.3	556.4	562.9	570.4	580.5	542.6 <4'>
힘, kN/m <sup>3</sup> <2'>	535.5	528.7	522.6	515.9	510.1	
힘, kN/m <sup>3</sup> <3'>	14.8	27.7	40.3	54.5	70.4	0.0
% (<3'>/<4'>)	2.7	5.1	7.4	10.0	13.0	0.0

<1'>은 18° 공극의 위치에서 법선방향 힘이고, <2'>은 198° 공극의 위치에서 법선방향 힘이다. 그리고 <3'>=<1'>-<2'> 이다.

**표 7** 타원형 타발에 의한 법선방향 힘의 변화 (비대칭형 법선방향 힘)

**Table 7** Radial Force Variation Caused by Oval Stamping

단위	타원형 고정자 내경(σ)에 따른 법선방향 힘 밀도					
σ, mm	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.00
힘, kN/m <sup>3</sup> <1''>	536.0	529.6	526.1	519.3	513.4	542.6 <4''>
힘, kN/m <sup>3</sup> <2''>	541.8	540.9	540.0	539.1	538.1	
힘, kN/m <sup>3</sup> <3''>	-5.8	-11.3	-13.9	-19.8	-24.7	0.0
% (<3''>/<4''>)	-1.1	-2.1	-2.6	-3.7	-4.6	0.0

<1''>은 18° 공극의 위치에서 법선방향 힘이고, <2''>은 198° 공극의 위치에서 법선방향 힘이다. 그리고 <3''>=<1''>-<2''> 이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 3상 4극 PMSM의 법선방향 힘을 변화시키는 치수적 결함의 주요 인자를 선정하고 MST 기법을 이용하여 각 인자가 미치는 법선방향 힘의 변화에 대해 비교 및 분석하였다.

슬롯 오픈닝과 공극의 치수변화는 PMSM의 법선방향 힘의 비대칭 분포에는 아무런 영향이 없고 대칭의 힘 분포에서 그 크기만 변화시킴을 확인하였다. 비대칭 법선방향 힘을 유발하는 치수적 결함 중에서 회전자 편심과 타원형 공극이 큰 영향을 주는 인자임이 검증되었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Joachim Holtz and Lothar Springob, "Identification and Compensation of Torque Ripple in High-Precision Permanent Magnet Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 309-320, April 1996
- [2] Freddy Magnussen and Heinz Lendenmann, "Parasitic Effects in PM Machines With Concentrated Windings", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 43, no. 5, pp. 1223-1232, Sep./Oct. 2007
- [3] Y. S. Chen, Z. Q. Zhu, and D. Howe, "Vibration of PM Brushless Machines Having a Fractional Number of Slots Per Pole", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 42, no. 10, pp. 3395-3397, Oct. 2006
- [4] Weidong Zhu, Babak Fahimi, and Steve Pekarek, "A Field Reconstruction Method for Optimal Excitation of Permanent Magnet Synchronous Machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 21, no. 2, pp. 305-313, June 2006

#### 저 자 소 개



##### 이 치 우 (李 致 雨)

1972년 10월 14일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 부산대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2010년 Virginia Tech 전기공학과 대학원 졸업(박사). 1998~2003년 LG Electronics 선임연구원. 2010.01~2010.05 Ramu Inc (USA) senior engineer, 2010.07~현재 삼성전기 중앙연구소 책임연구원