

## IPM type BLDC 전동기의 진동저감을 위한 회전자 형상설계

류진욱\*, 강규홍\*\*, 허진\*  
울산대\*, 조선기자재연구원\*\*

### The Rotor Shape Design of IPM Type BLDC Motor for Minimization of Vibration

Jin-Wook Reu\*, Gyu-Hong Kang\*\*, Jin-Hur\*  
University of Ulsan\*, Korea Marine Equipment Research Institute\*\*

**Abstract** - this paper presents a rotor shape optimization of interior type permanent magnet (IPM) motor for vibration minimization. the vibration of permanent magnet motor is generated by cogging torque, radial force and commutation torque ripple which are electromagnetic source of vibration. In order to minimize the vibration, the optimal notches are put on the rotor pole face and the arc type pole face is applied. The variations of cogging torque and radial force of each model vibration frequency are computation by finite element method (FEM) and the validity of the analysis and rotor shape design is confirmed by vibration experiments.

#### 1. 서 론

IPM 전동기는 약계자 운전 시 넓은 속도 범위를 가지며 d-q 축 인덕턴스 차에 의한 돌극성으로 톨릭턴스 토크가 부가되며 원심력에 의한 영구자석의 비산을 방지하는 장점을 가지고 있어 미래형 자동차의 추진 및 전동시스템의 구동원으로 연구가 집중되고 있으나 이러한 장점에도 불구하고, IPM 전동기는 매우 큰 코깅토크와 토크 ripple에 의해 SPM type Motor에 비해 큰 진동·소음을 발생하므로 IPM type 전동기의 진동·소음 저감이 중요한 issue가 된다.

IPM type BLDC Motor는 commutation torque ripple, 코깅토크 및 반경 방향의 힘 (Radial force)의 변동이 진동의 전자기원 이 된다. IPM 전동기의 코깅토크를 저감하기 위해서 회전자의 flux barrier형상이나 위치를 변화시키는 연구 [2],와 Radial force에 의한 진동 해석, 즉 공극의 길이가 불균일하거나 비 대칭적인 경우, 회전축과 베어링이 회전운동 중심에 고정되지 못하고 편심 운동을 하는 경우 [3],를 가정하여 Radial force 변동을 해석하여 진동으로 유추하는 연구가 이루어 지고 있으나 진동의 주 원인인 Radial force를 직접적으로 저감하는 설계는 거의 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 IPM Motor의 진동원인 코깅토크와 Radial force를 동시에 저감하기 위한 IPM 전동기의 회전자 형상설계를 수행하였다. 설계 변수로는 회전자극의 표면을 선정하여 d축에서의 Radial force 저감과 영구자석에 의한 공극 자속의 형상 변화로부터 코깅토크를 저감하는 구조설계를 하였다. Radial force 및 코깅토크 해석은 유한요소법(FEM)을 적용하였으며 진동특성은 실험을 통해 연구 결과의 타당성을 입증하였다.

#### 2. 코깅토크와 강성불균일 감소를 위한 회전자 설계

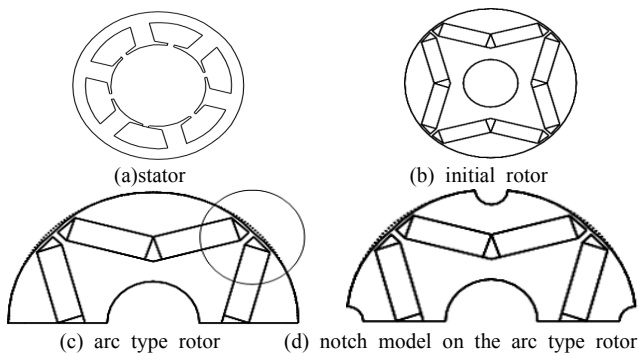


그림 1. 초기 모델과 arc type rotor와 notch 모델

IPM 전동기의 진동의 전자기원인 코깅토크와 Radial force는 영구자석과 공극 Permeance 및 slot 고조파와의 상호작용에 의해 발생한다. 본 논문에서 코깅토크 저감을 위해 초기 IPM 모델의 회전자에 flux barrier 부분의 공극을 증가시키기 위해 arc type 회전자를 설계하였으며, 공극에서의 자속 분포형상 변화를 위해 회전자 철심에 notch를 시행하였다[1].

각각의 모델들은 그림1에 나타내었으며 notch의 위치는 공간 고조파 이론과 코깅토크 특성식으로 부터 결정하였으며[4], notch의 폭과 깊이는 FEM 해석으로 결정하였다. Radial force와 코깅토크의 변화는 기계적 진동으로 이어지며 Radial force의 변동, 즉 힘의 변화는 자석과 고정자 teeth에 의한 상호작용에 의해 생성된다. 자극의 중심, 즉 d축이 고정자 teeth에 위치할 때 radial force는 최대가 되며 그리고 고정자 teeth가 q축에 위치할 때 radial force는 최소가 된다. 전동기가 1회전을 할 때 고정자 teeth는 d축과 q축을 극수만큼 지나가게 된다. 따라서 1회전당 d축의 radial force와 q축의 radial force의 변동은 기계적 진동으로 이어지기 때문에 진동저감을 위해서는 radial force의 변동을 저감시키는 것이 매우 중요하다.

그림2는 IPM 전동기의 one teeth에서 d축과 q축의 중심을 나타내었다. d축상에 고정자 teeth가 존재하는 경우 회전자와 teeth 사이의 자기흡인력은 매우 큰 반면 q축상에 teeth가 존재할 경우의 자기 흡인력은 d축에 비해 상대적으로 적은 값을 가진다. 따라서 전동기 1회전당 고정자 각각의 teeth에서는 극수만큼의 자기 흡인력의 변동이 발생하여 고정자의 진동을 유발하게 된다.

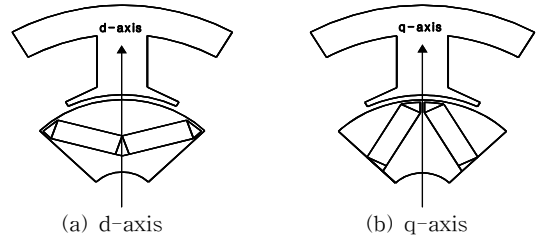


그림 2. d-q축의 Radial force

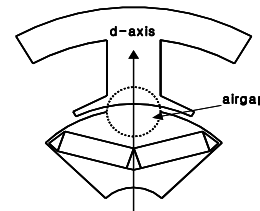


그림 3. d축의 Radial force의 감소방법

따라서 본 논문에서는 전동기 1회전당의 radial force 변동량을 저감하기 위해서 회전자 중심에 notch를 시행하여 d축상에 teeth가 존재할 경우의 radial force를 저감시켰다. Teeth가 d축상에 존재 할 경우의 radial force 저감을 위한 회전자 구조를 그림 3에 나타내었다. Radial force의 변동 저감으로부터 진동을 저감시키기 위한 회전자 구조설계 결과 코깅토크 저감을 위한 회전자 구조 설계의 설계 변수와 일치함을 알 수 있다. 따라서 회전자의 중심에 notch를 시행한다면 코깅토크 저감뿐만 아니라 radial force의 변동량 저감을 동시에 기대 할 수 있어 진동은 매우 감쇄 될 것이다.

### 3. 기계적 진동의 전자기원 해석 및 분석 결과

IPM 전동기의 초기 모델과 flux barrier 영역에서의 공극을 증가시킨 arc type rotor 그리고 arc type rotor에 notch를 시행한 모델에 대한 코깅토크 해석 결과를 그림 4에 나타내었다. 해석결과 arc type rotor는 기본모델에 대해 약간의 코깅토크 감소 효과만 나타나는 반면 notch를 시행한 모델은 기본모델의 약 60(%)의 코깅토크 발생하므로 IPM 전동기의 코깅토크에 의한 진동 저감을 기대할 수 있다. 또한 기본모델과 notch를 시행한 모델의 radial force의 공간적 분포 특성을 그림 5의 x-y plane에 나타내었다. notch에 의해 공극 길이의 증가로부터 영구자석에 의한 공극자속밀도가 감소하여 radial force가 저감함을 알 수 있다. 특히 notch가 teeth의 중앙에 있을 때 radial force의 분산 및 감소뿐만 아니라 slot opening에 존재할 경우 radial force의 감소는 급격히 감소함을 알 수 있다.

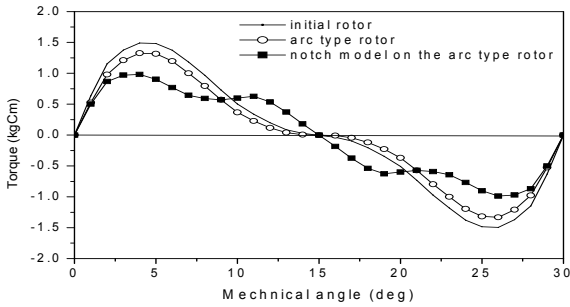
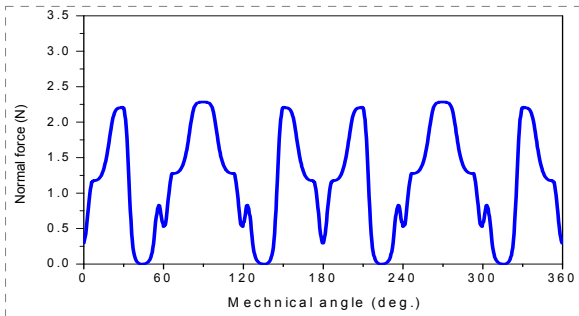
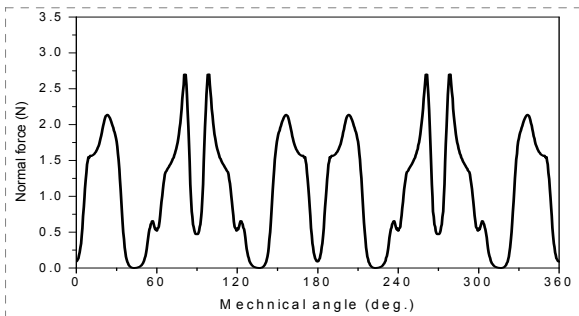


그림 4. FEM분석에 의한 각 모델의 코깅토크 특성



(a) x-y plan에서 초기 모델의 Radial force의 분산



(b) x-y plan에서 notch 모델의 Radial force의 분산

그림 5. 초기 모델과 notch모델의 Radial force 분포 특성

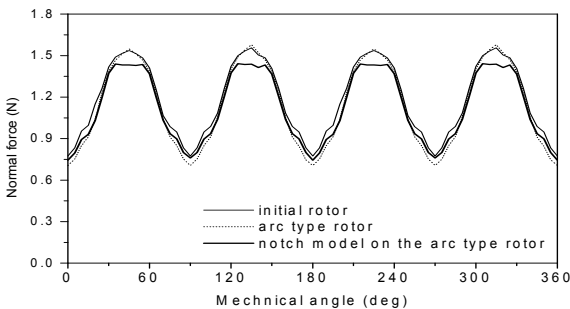


그림 6. 1회전시의 Radial force 변동량

IPM 전동기의 1회전시의 radial force의 크기 및 변동량을 그림 6에 나타내었다. notch를 시행한 모델은 radial force의 감소와 변동량 저감을 동시에 가져오므로, IPM type 전동기의 진동 저감에 매우 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

### 4. 실험의 결과 및 분석

본 논문에서 제시한 진동의 전자기적 source 저감에 따른 진동 저감을 평가하기 위해서 제작한 회전자 core를 그림 7에 나타내었으며, 코깅토크 시험 결과를 그림 8에 나타내었다.

시험 결과 초기모델의 코깅토크가 가장 크게 발생하며 arc type rotor 모델은 초기모델 보다 약간 적은 코깅토크가 측정되어 해석의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 반면, notch 모델의 경우 가장 적은 코깅토크가 발생함을 알 수 있지만 실험의 결과가 해석의 결과보다 다소 적은 코깅토크가 발생한다. 이는 notch 모델의 코깅토크는 매우 적은 notch에 따른 철심 각부의 자기포화 현상과 측정 시 회전자를 기계각 1°씩 회전을 하면서 토크를 측정하므로 계측기의 측정범위에 포함될 정도의 적은 값으로 판단되어진다. 실험의 결과로부터 진동의 전자기원인 코깅토크와 radial force의 변동 저감을 위해 회전자극 중심에 notch를 형성 설계한 IPM type 전동기의 진동이 급격히 저감됨을 알 수 있다.



(a) 초기모델 (b) arc type rotor (c) notch model

그림 7. 제작된 회전자 core

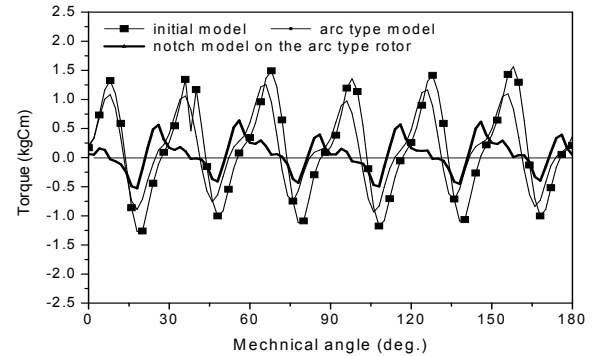


그림 8. 코깅토크 실험 결과

### 5. 결 론

본 논문은 영구자석 전동기의 전자기적 진동원 저감으로부터 IPM type BLDC 전동기의 진동 저감을 위한 회전자 형상설계를 수행하였다. 형상 설계 변수는 회전자극 면으로 선정하였으며 목적함수로는 진동의 전자기원인 코깅토크와 radial force의 변동의 저감을 적용하였다. 설계결과 회전자의 d축상에 notch를 시행하는 경우 진동의 전자기원은 극명하게 저감되었으며 이에 따른 진동량 저감은 실험으로 검증하여 설계의 타당성과 IPM 전동기의 전자계 현상과 기계적 현상이 결합된 새로운 설계법을 제시하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Jin Hur, Hee-Woon Kim, "IPMSM의 회전자 형상에 따른 인덕턴스 변화에 대한 연구", 춘계학술대회 논문집, pp.274 ~ 276, april.2009
- [2] A. Kisoumarsi, M. Moalle, and B. Fashimi, "Midigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optical Shape Design", IEEE Trans. on magnetics, vol. 42, NO. 11, pp. 3706 ~ 3711, Nov.2005
- [3] Jack F. Gears, Chong Wang and Jpseph Coh Lai, Noise of polyphase Electric Motors, CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006
- [4] Gyu Hong Kang, Young Dae Son, and Gyu Tak Kim, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", Industry Appli Conference, 2007.42<sup>nd</sup> Annual Meeting, pp.119 ~ 125, sep.2007