

## IPMSM의 회전자 형상에 따른 인덕턴스 변화에 대한 연구

김희운 · 허진  
울산대학교 전기전자공학부

### A Study on the Inductance Variation According to the Rotor Shape in IPMSM

Hee-Woon Kim · Jin Hur  
Department of Electrical & Electronics Engineering, University of Ulsan

**Abstract** - This paper presents a rotor shape optimization of interior type permanent magnet (IPM) motor for cogging torque minimization and maximization of reluctance torque. In order to minimize the cogging torque, the optimal notches are put on the rotor pole face and the arc type pole face is applied. The variations of cogging torque and d-q axis inductions are analyzed by finite element method (FEM).

#### 1. 서론

최근 전기자동차나 Hybride 자동차와 같은 Traction Motor의 관심이 증가하면서 전동기의 고효율 및 고효율화에 대한 연구가 집중하고 있다. 전동기의 고효율화를 위해 에너지 밀도가 높은 영구자석을 채용한 연구가 주를 이루며 특히 단위 전류당 토크 및 출력 밀도가 높은 매입형 영구자석 전동기(Interior type Permanent Magnet Motor : IPM Motor)의 연구는 매우 광범위하게 이루어지고 있는 실정이다.

매입형 영구자석 전동기의 경우 회전자 구조의 특징으로부터 톨러턴스 토크가 전자기적 토크에 부가되므로 고효율화를 이룰 수 있을 뿐만 아니라 기계적 공극과 자기적 공극의 길이가 동일하므로 매우 높은 공극자속밀도를 확보할 수 있어 고효율화 가능하지만 이에 따른 코깅토크가 증가하고 큰 기계적 진동 및 소음이 발생한다.

IPM Motor의 코깅토크 저감을 위해 한 형상설계로 슬롯 opening의 조절, 회전자의 flux barrier 위치 조절에 따른 자기적 자극비의 조절 및 고정자 치나 회전자 표면에 notch를 형성하는 연구가 주를 이루고 있다. 그러나 이러한 설계는 단순히 코깅토크의 저감만을 위한 설계로 고효율화를 위한 설계와 직접적으로 병행하지 않고 있어 형상설계 시 코깅토크의 저감 뿐만 아니라 d-q축 인덕턴스의 변화 및 톨러턴스 토크와 IPM Motor의 전반적인 특성 분석이 함께 이루어져야 한다.

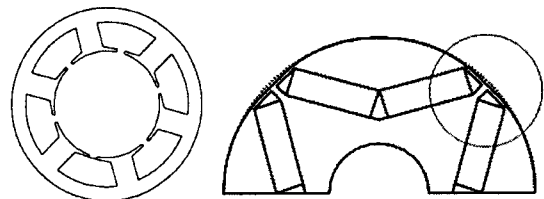
본 논문에서는 IPM Motor의 코깅토크 저감을 위해 회전자 형상설계를 유한요소 해석(Finite Element Analysis : FEA) 으로부터 수행하였다. 회전자의 형상설계 목적은 코깅토크의 저감 뿐만 아니라 d-q축 인덕턴스의 차를 극대화 시켜 단위 전류당 토크 밀도를 증가시키는 구조 설계를 하였다. 본 논문에서 제시한 회전자 형상에 따른 특성 해석결과를 실험치와 비교하여 설계의 타당성을 입증하였다.

#### 2. IPM Motor의 회전자 형상설계

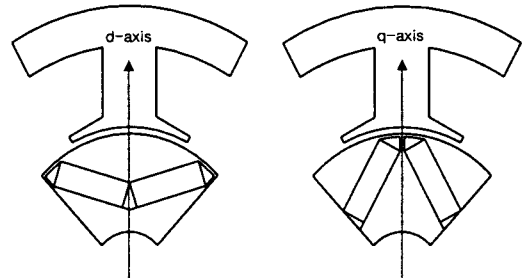
IPM Motor의 코깅토크 저감과 단위전류당 토크밀도 증가를 위한 회전자 형상설계 과정은 다음과 같다. 먼저 공간고조파이론을 이용하여 자극 형상 변화에 따른 코깅토크 최소화 형상을 설계를 한 후 d-q축 인덕턴스 특성을 분석하였다. 형상설계에서 notch의 크기는 d축 인덕턴스 감소시켜 d-q축 인덕턴스의 차를 극대화하도록

notch의 크기를 선정하였다.

그림 1은 4극 6슬롯의 IPM Motor 고정자와 회전자의 초기모형을 나타내었으며 d축과 q축의 자속경로를 그림 2에 나타내었다.



(a) 고정자 (b) 회전자  
그림 1. IPM Motor의 기본모형



(a) d-축 (b) q-축  
그림 2. 4극 6슬롯 IPM Motor의 d-q축

그림 2 (a)의 d-축 모델에서 회전자의 표면은 고정자의 치와 마주하고 있으며 고정자 전류에 의한 자속은 공극을 지나 영구자석을 지나가게 된다. 회전자 표면에 notch를 시행하면 회전자 표면의 등가자화 분포 형상이 변형되어 코깅토크의 변동을 유발할 수 있다. 이때 회전자 notch에 의해 d축의 자속경로에서 공극이 증가하므로 d축 인덕턴스는 감소하게 되고 결국 d-q축 인덕턴스의 차이는 증가하며 톨러턴스 토크는 증가하게 된다.

코깅토크 저감 및 톨러턴스 토크 증가를 위한 회전자 형상설계 모델을 그림 3에 나타내었다.

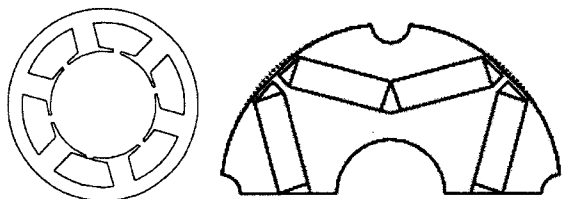


그림 3. IPM Motor의 회전자 형상설계 모델

### 3. 코깅토크 특성 해석 및 검증

전자계 해석에 널리 이용되고 있는 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하여 해석 모델의 코깅토크 특성을 해석하였다. 초기 IPM Motor와 회전자에 notch 설계를 한 IPM Motor의 등 포텐셜 분포도를 그림 4에 나타내었다.

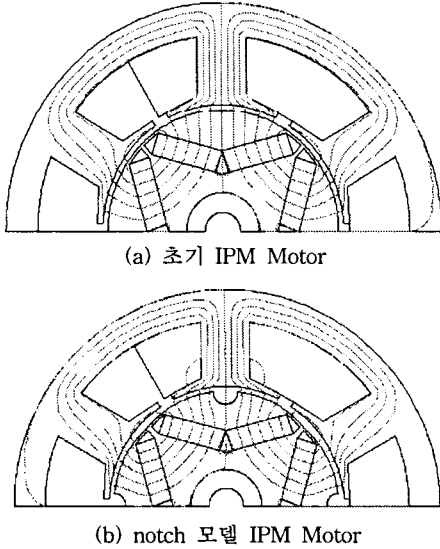


그림 4. 유한요소해석에 의한 등 포텐셜분포도

초기 모델과 회전자에 notch를 설계한 모델의 코깅토크 해석결과를 그림 5에 나타내었다. 초기 IPM Motor의 경우 코깅토크의 Peak-Peak 값이 3.06(kgCm)가 발생하며 회전자에 notch를 설계한 IPM Motor는 1.92(kgCm)의 Peak-Peak 코깅토크가 발생하고 있다. 해석결과 회전자에 notch를 설계한 모델이 초기 모델에 비해 코깅토크가 약 37(%) 감소함을 알 수 있다. 따라서 회전자에 notch를 설계하는 경우 자화분포의 변화로부터 코깅토크의 변동이 발생함을 알 수 있다.

본 논문에서 코깅토크 저감 및 밀력토크스 토크 증가를 위해 설계하고 해석한 회전자 notch 모델의 IPM Motor 코깅토크 특성을 실험을 통해 검증하였다. 실험을 위해 제작된 두 개의 회전자 Core를 그림 5에 나타내었으며, 코깅토크 실험은 전자부품연구원 장치를 이용하여 실험하였다.

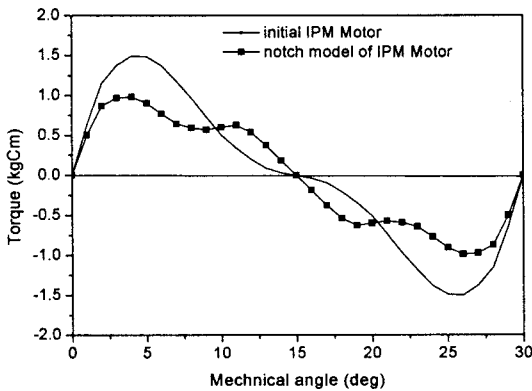
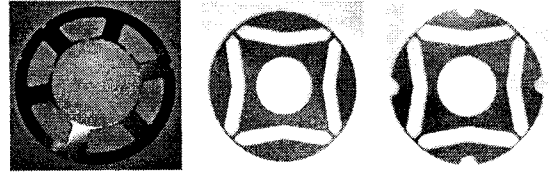


그림 5. 유한요소해석을 이용한 코깅토크 해석결과



(a) 고정자 (b) 초기모델 (c) notch 모델  
그림 6. 제작된 고정자 및 회전자 Core

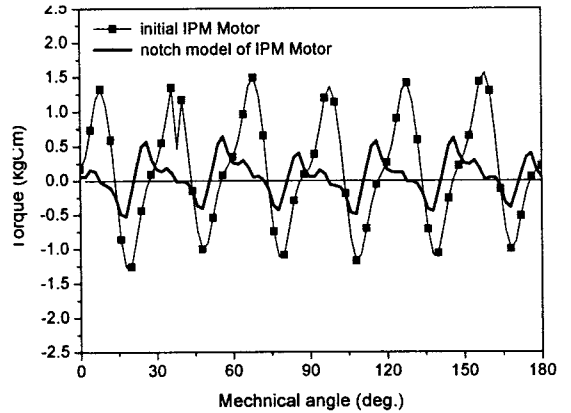


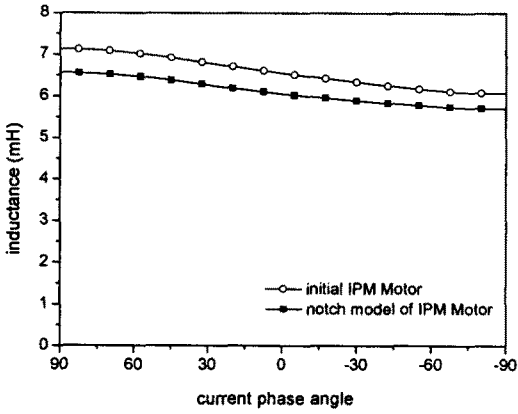
그림 7. 코깅토크 실험결과

코깅토크 실험 결과를 그림 7에 나타내었다. 실험결과 초기모델의 경우 실험치와 해석치가 매우 유사한 값을 가지는 반면 notch model의 경우 해석치 보다 실험치가 더욱 감소함을 알 수 있다. 또한 실험의 결과에서도 notch 모델의 코깅토크가 초기모델에 비해 매우 감소하였다. 따라서 IPM Motor의 코깅토크 저감을 위해서는 회전자 notch 설계가 매우 유용함을 알 수 있다.

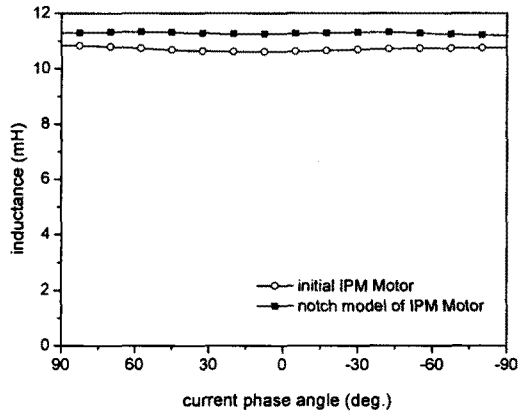
### 4. d-q축 인덕턴스 특성

에너지 중첩법을 이용하여 IPM Motor의 d-q축 인덕턴스 해석결과를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 그림 8은 초기모델과 notch 모델의 전류 크기에 따른 d축 인덕턴스 특성을 나타내었다. 해석결과 notch 모델의 경우 d-축 자속경로의 공극길이가 증가하므로 초기모델에 비해 d-축 인덕턴스가 감소함을 알 수 있다. 또한, 부하 전류가 정격전류(4.5(A))보다도 증가하여도 d-축의 인덕턴스 변화는 미미함을 알 수 있다.

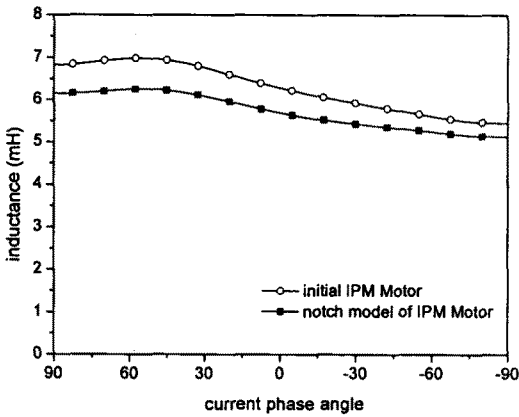
반면, q축 인덕턴스 특성을 그림 9에 나타내었다. q-축 인덕턴스의 경우 notch 모델의 notch가 q-축의 자속경로에 직접적으로 영향을 미치지는 않지만 영구자석에 의한 철심의 자기포화를 고려하는 경우 notch에 의한 자기공극이 증가하므로 영구자석에 의한 철심의 자기포화가 감소하게 된다. 따라서 notch 모델의 철심 자기포화 감소에 의해 notch 모델의 q-축 인덕턴스가 d-축 인덕턴스보다 증가하게 된다. 따라서 IPM Motor의 회전자 자극 중심에 notch를 형성하는 경우 코깅토크의 저감 뿐만 아니라 d-축 인덕턴스의 저감과 q-축 인덕턴스의 증가에 의한 d-q축 인덕턴스 차를 증가시켜 밀력토크스 토크가 증가하게 되어 단위전류 당 토크 밀도를 증가시킬 수 있다. 그러나 부하 전류가 증가하는 경우 q-축 인덕턴스는 전류 위상각 0도 부근에서 급격하게 저감하며 정격전류의 3배가 되는 13.5(A)에서는 초기 모델과 notch 모델의 q-축 인덕턴스 차이는 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 전류에 의한 자속의 증가로부터 자기포화가 발생하여



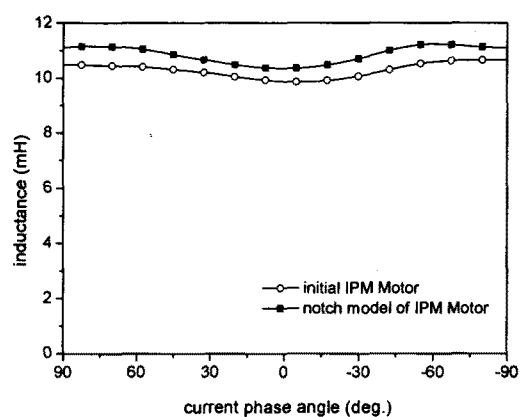
(a) 부하전류 4.5(A)



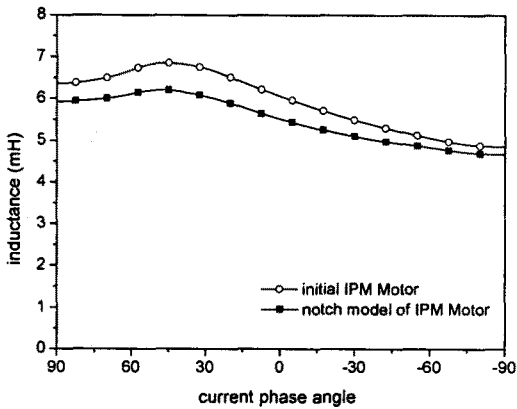
(a) 부하전류 4.5(A)



(b) 부하전류 9(A)

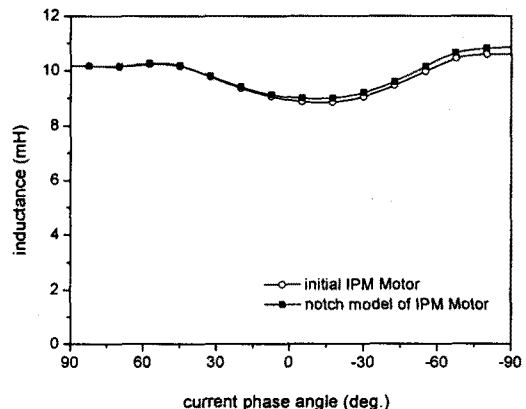


(b) 부하전류 9(A)



(c) 부하전류 13.5(A)

그림 8. d-축 인덕턴스 특성



(c) 부하전류 13.5(A)

그림 9. q-축 인덕턴스 특성

## 5. 결론

본 논문에서는 IPM Motor의 코깅토크 저감 및 톨릭턴스 토크 증가를 위한 회전자 형상설계를 수행하였다. 설계 결과 회전자에 notch를 형성하여 코깅도를 저감시켰으며 d-q축 인덕턴스 차를 극대화 하였다. 코깅토크 해석 결과는 실험으로 검증하였으며 d-q축 인덕턴스는 유한요소법을 이용하여 해석하였다. notch 모델의 d-축 인덕턴스의 저감은 자기회로에서 입증되지만 q-축 인덕턴스는 자기포화에 의해 저감됨을 해석을 통해 입증하였다.

## [참고 문헌]

- [1] A. Kioumars, M. Moallem, and B. Fahimi, "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.42, No.11, pp.3706~3711, Nov.2005.
- [2] Gyu Hong Kang, Young Dae Son, and Gyu Tak Kim, "The Novel Cogging Torque Reduction Method for Interior Type Permanent Magnet Motor", *Industry Applications Conference, 2007. 42nd Annual Meeting*, pp.119~125, Sep.2007.