

매입형 영구자석 동기전동기 전자기력 특성 연구

이승호*, 정상용*
동아대학교*

A Study on Electromagnetic Force of Interior Permanent Magnet Motor

Seungho Lee*, Sang-Yong Jung*
Dong-A University*

Abstract - 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM) 전자기력 특성 해석을 수행하였다. 전동기에서 발생하는 전자기력(Electromagnetic force)은 기기의 성능 뿐만 아니라 소음 및 진동을 유발하며 전기기기의 stress를 야기한다. 본 논문에서는 전자기력 특성을 맥스웰 응력 텐서법을 이용하여 각 노드에서 발생하는 전자기력 분포에 대해 분석하였다. 그리고 매입형 영구자석 전동기의 운전상태 및 구조파트 중 고정자 치에서 발생하는 전자기력 분포에 대해 분석하였다.

$$dW_H = F dL = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} S dL \quad (4)$$

여기서, 투자율 μ 는 공기 투자율인 μ_0 이며, 자속밀도 B는 공극을 통과하는 자속밀도이다. 맥스웰 응력 텐서법을 이용하여 치 표면에서의 각 노드에서의 전자기력을 해석하였다 [4].

1. 서 론

친환경 전기차량의 구동시스템은 전기동력계의 구동모터와 MCU가 있으며, 구동모터는 높은 출력밀도, 고효율, 넓은 운전영역을 지니는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)가 HEV, FCEV 등에 주종을 이루게 된다 [1][2]. 차량에 사용되는 전기 동력계 구동모터의 소음특성과 관련한 사항은 기계적 요소 외에 근원적인 전자기력(Electromagnetic Force)에 기인하며, 이는 구동모터의 회전자 토크 맥동(Torque Ripple)특성에 직결된다. 즉, 소음특성 개선을 위해서는 근원적인 전자기력 발생원리 및 특성을 파악해야 하며, 이를 설계 및 제어특성과 결부시켜 종합적인 규명이 이루어져야 한다 [3]. 본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 구동 운전상태 및 전동기 구조 파트에서의 전자기력 분포특성을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 매입형 영구자석 전동기 토크맥동 분석

회전자에 매입한 영구자석의 영향으로 발생하는 코깅토크(Cogging Torque)는 무부하시 회전자에 매입한 자석과 고정자 슬롯 구조간의 자기저항 차에 의해 전동기가 떨리는 현상을 말하며, 부하전류와 상관없이 자기에너지가 최소인 위치로 이동하려는 반경 방향의 힘을 말하며, 아래의 식 1와 같은 주기성을 가지게 된다.

$$K_{Cogging} = \frac{360}{LCM_{pole, slot}} \quad [기계각] \quad (1)$$

여기서, LCM은 극/슬롯의 최소공배수를 의미한다. 또한 부하시 발생하는 토크맥동은 역기전력 고조파 성분인 공간고조파와 코깅토크 성분등 복합적인 고조파 발생에 의해 발생된다. 전동기에서 발생하는 토크맥동 성분은 전동기 운전시 진동으로 이어지고 이러한 진동으로 인하여 전동기에서 소음이 발생하게 된다.

$$K_{Ripple} = \frac{360}{2 \times Ph} \frac{2}{P} \quad [기계각] \quad (2)$$

여기서, Ph는 상수, P는 극수를 나타낸다.

2.2 전자기력(Electromagnetic Force) 특성

정상자계 내에 축적되는 총 자계에너지는 아래의 식과 같으며, $B = \mu H$ 의 관계식을 이용하면, 총 에너지는 아래와 같이 B와 H 변수로 정리된다.

$$W_H = \frac{1}{2} \int_{vol} \frac{B^2}{\mu} dv \quad (3)$$

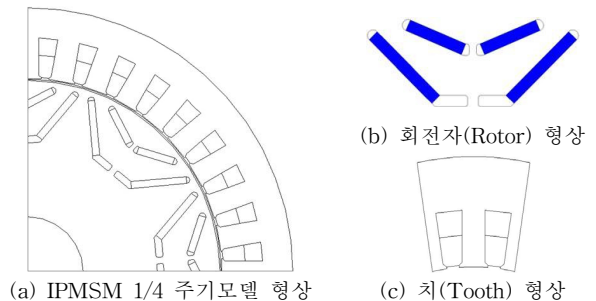
이 뿐만 아니라, 에너지는 힘과 이동거리의 선형적 관계가 성립하므로 아래와 같이 에너지에 관하여, 미소의 거리 dL에 대해서 힘 F는 다음과 같이 식이 정리가 가능하다.

2.3 매입형 영구자석 전동기 모델

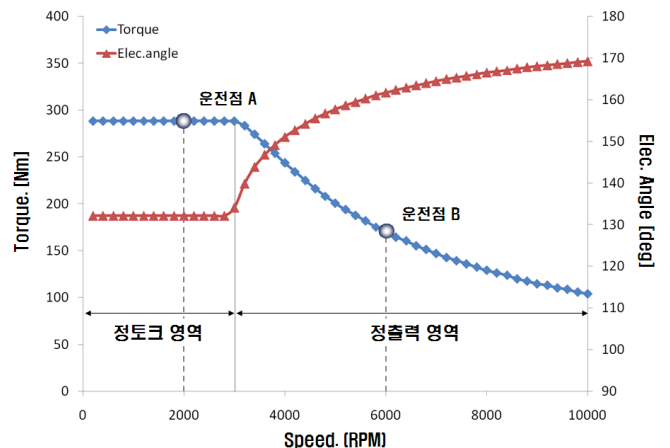
매입형 영구자석 전동기는 매극매상 슬롯수(q)가 1.5인 분수 슬롯 모델이며, 영구자석이 다층(2 layer)로 매입한 모델이다. 일반 블록형 자석보다 토크맥동 및 역기전력 고조파 결과에서 우수한 성능을 가진다. 본 논문에서 사용된 매입형 영구자석 전동기의 제원과 형상은 아래의 표 1와 그림 1에 나타내었다.

<표 1> 매입형 영구자석 전동기 제원

항 목	전동기 제원
모터 유형	IPMSM
극수/상수/슬롯수	8극 3상 36슬롯
코어(Core)	Silicon Steel
자석(Magnet)	NdFeB (2 layer)



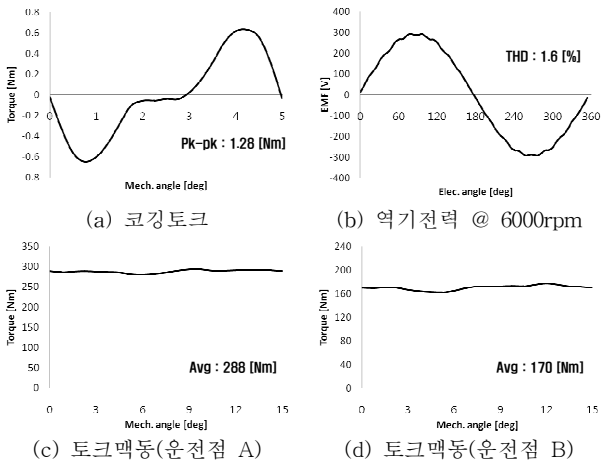
<그림 1> 매입형 영구자석 전동기 형상



<그림 2> 매입형 영구자석 전동기 성능곡선

2.4 매입형 영구자석 전동기 토크 특성 해석

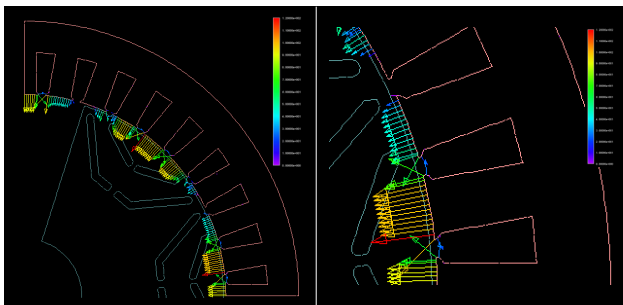
코깅토크 및 토크맥동은 영구자석 전동기에서 진동 및 소음의 원인이 되므로, 전자계 유한요소법을 바탕으로 일차적으로 그 값을 구하였다. 무부하시 본 논문에서 사용된 전동기 모델의 코깅토크는 Peak-peak 값이 1.28 [Nm]이며 역기전력의 전고조파 왜곡율(THD)은 1.6[%]로 공간고조파의 크기가 낮다. 또한, 부하시 정토크 영역인(MTPA 운전) 운전점 A에서의 토크맥동 해석결과는 평균 토크 및 맥도율은 288 [Nm], 4.5 [%]이며, 정출력 영역인(CPSR 운전) 운전점 B에서 토크와 맥도율은 170[Nm], 9[%]이다. 아래의 그림 3은 무부하 및 부하조건에서의 전동기의 전자계 해석 결과를 나타낸 것이다.



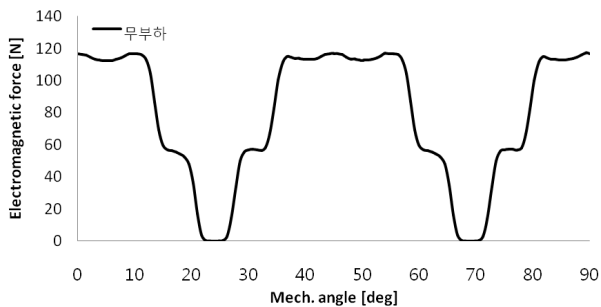
〈그림 3〉 무부하 & 부하 조건 전자계 해석 결과

2.5 고정자 치(Tooth)에서의 전자기력 특성 해석

전자기력은 전동기에 전원을 인가할 때 고정자 슬롯에서 발생하는 자기력과 영구자석의 자기력이 주 원인이 되어 발생하는 힘이 된다. 이는 회전자의 회전과 함께 진동 및 소음의 한 원인이 되고, 전동기의 용량이 커질수록 그 힘은 더욱 커지게 된다. 때문에 전동기 설계시 이를 고려하지 않게 되면 공극에서 고정자와 회전자의 마찰까지 유발할 수 있으며 시스템에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 무부하 및 부하상태에서의 전동기 치에 미치는 전자기력 특성 해석하였다. 전동기 치 표면에서의 전자기력을 해석하기 위해 기계각 90도(전기각 360도) 기준으로 최대 전자기력이 나타나는 부분을 선정 가능하다. 또한 치 표면에서의 전자기력 성분은 주기성을 띄고 있으므로, 본 논문에서는 주기모델을 이용하여 전자기력 분포 해석을 수행하였다.



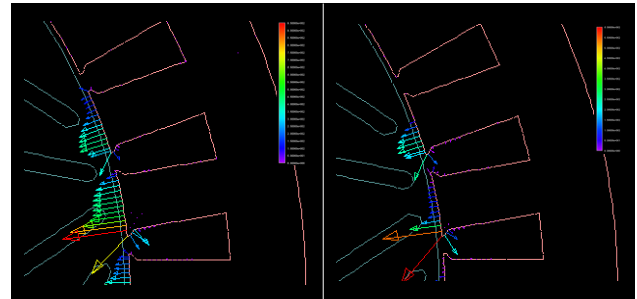
(a) Initial Point ($\theta_m = 0.00^\circ$) (b) Max. point ($\theta_m = 75.00^\circ$)



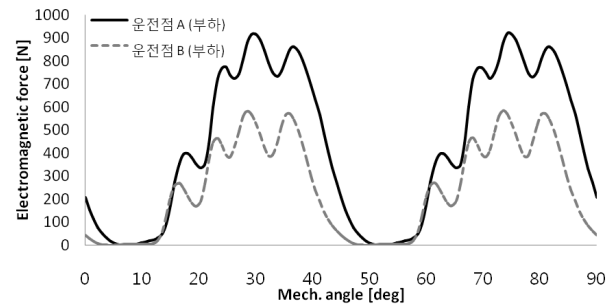
(c) Max. point에서의 무부하 치 전자기력 분포

〈그림 4〉 고정자 치 표면에서의 전자기력 분포 (운전상태-무부하)

위의 그림 4는 입력 전원이 없는 무부하 상태일 때의 치에서 발생하는 전자기력 분포를 나타낸 것이다. 여기서 그림 3 (a)는 로터 초기 위치에서 발생하는 치의 전자기력을 도식한 것이다. 무부하 상태일 때 치에서의 전자기력은 균일한 분포를 가지게 된다. 로터 축 기준으로 기계각 $\theta_m = 75.00^\circ$ 지점에서 치 끝단 전자기력 크기가 다른 부분에 대비 가장 높은 것을 그림 3 (b)에서 확인 할 수 있다. 그림 3(c)는 전자기력이 가장 높게 발생하는 지점에서의 전자기력 분포를 기계각 90도 기준으로 작성 하였으며, 최대/평균 전자기력은 117/79[N]이다.



(a) 운전점 A ($\theta_m = 74.25^\circ$) (b) 운전점 B ($\theta_m = 73.5^\circ$)



(c) Max. point에서의 부하(A,B) 치 전자기력 분포

〈그림 5〉 고정자 치 표면에서의 전자기력 분포 (운전상태-부하)

위의 그림 5는 정토크 영역인 운전점 A와 정출력 영역의 운전점 B의 전자기력 결과에 대하여 정리하였다. 운전점 A와 B는 로터의 위치가 각 $74.25^\circ / 73.5^\circ$ 에서 최대 전자기력을 지며, 치의 가장자리에서 높은 값을 가진다. 이는 전동기 구동시 치에서 받는 stress로 나타낼 수 있을 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 전자기력 특성에 대한 연구를 수행하였다. 이러한 전자기력 성분은 전동기의 각 구조에 힘을 가하여, 소음 및 진동을 유발하여 전동기의 기계적 성능을 저하시킬 수 있다. 향후 전자계와 기계진동의 복합적인 다중 물리를 고려하여 전동기의 해석 및 설계가 필요할 것이다.

〈 Acknowledgement 〉

본 논문은 교육과학기술부의 한국연구재단(2011-0005679)과 지식경제부의 산업원천기술개발사업(10035411)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[참 고 문 헌]

- [1] N.Bianci, S.Bolognani, "Interior PM Synchronous Motor for High Performance Applications," *PCC_Osaka 2002*, Proceedings of the, Vol.1, pp. 148-153, 2002
- [2] Wen L. Soong, Mesimi Ertugrul, "Field-Weakening Performance of Interior Permanent-Magnet Motors", *IEEE Trans. on IA*, Vol. 38, No.5, September 2002
- [3] 최홍순, 박일환, 문원규, "맥스웰 응력텐서의 물리적 의미의 고찰", *전기학회논문지, 대한전기학회*, 제58권, 제4호, pp725-734, 2009/04
- [4] Yan Xiuke, Xie Dexin, Zhang Yihuang, Yu Cunzhan, "Application of Nodal Force Method to Switched Reluctance Motor", *ICEMS 2003*, Vol 1, pp. 174-176, 2003