

다구찌 기법과 3D FEM해석을 이용한 Magnetic position sensor의 고조파 저감에 대한 연구

김민규\*, 성기용\*, 황수진\*, 류동석\*, 황정광\*, 김원규\*\*, 김윤현\*, 김기찬\*  
국립 한밭대학교\*, R&D 대동 모벨 시스템

A Study Using the Taguchi Method and 3D FEM Analysis of Magnetic Position Sensor for harmonic reduction

Min-Gyu Kim\*, Ki-Young Sung\*, Su-Jin Hwang\*, Dong-Seok Ryu\*, Zhan-Hong Huang\*, Won-Kyu Kim\*  
Youn-Hyun Kim\*, Ki-Chan Kim\*  
Hanbat National University\*, R&D Daedong Movel System

**Abstract** - 본 논문에서는 기존의 EPS(Electric Power Steering) 시스템에 IPMSM을 적용하고 속도 및 위치를 검출하기 위하여 Magnetic Position Sensor를 사용하였다. 이때 Magnetic Position Sensor의 신호는 정현파의 출력을 갖지만 고조파의 성분으로 인하여서 파형이 왜곡되고 이러한 파형의 왜곡으로 인해 위치 검출의 오차를 갖게 된다. 본 논문에서는 이러한 오차를 줄이기 위하여 다구찌 기법과 3차원 유한요소법(3D FEM)을 사용하여 고조파를 저감시킬 수 있도록 여러 변수를 변화하여서 최적의 설계를 통하여 실제 설계 센서 출력과 비교하여 자동차 산업 전반에 기여 하고자 한다.

1. 서 론

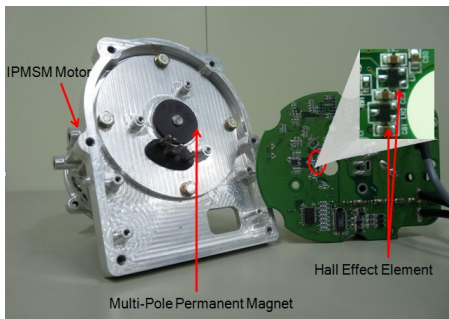
현재의 자동차 산업은 전반적으로 EV/HEV로 변화하는 추세이다. 그러기 위해서는 엔진 구동 방식 시스템에서 모터 구동 방식으로 사용 되어야 한다. 그동안의 차량용 조향 장치는 엔진 구동용 유압식을 사용 하였지만 EV/HEV에서는 MDPS(Motor Direct Power Steering) 및 EHPS(Electric Hydraulic Power Steering) 시스템으로 사용 된다.

이 두가지 시스템은 속도 제어 및 위치 제어를 위하여 회전자 위치를 검출하여야 하는데 이때 엔코더 및 레졸버를 사용한다. 하지만 엔코더는 차량의 진동 및 충격 등의 높은 내환경성을 만족하기 어려운 요인을 가지고 있어[1] 이를 대체하기 위하여 레졸버를 사용하지만 레졸버는 가격적인 면에서 높은 부분을 차지하게 된다. 그래서 Magnetic Position Sensor가 그 대안이 되고 있는데 이는 비접촉식으로 반영구적이며 크기가 작고 강한 내환경성을 가지고 있으면서 낮은 비용의 특징을 가지고 있다. [2] [3]

본 논문에서는 EHPS 시스템의 위치 검출 센서를 Magnetic Position Sensor로 대체하여 구동하는 것을 목표로 하였다. 기존의 연구와 적용 사례등에서 센서 출력의 문제가 되는 고조파의 성분 및 왜곡에 대하여서 검증 및 개선이 되지 않았기 때문에 위치검출 및 속도 오차, 소음 및 진동의 발생으로 나타날 수 있었다.

그래서 본 논문에서는 이를 저감시킬 수 있도록 다구찌 기법과 3D FEM해석을 통하여 최적의 설계를 하였고 앞으로 나아가서는 이를 실제 센서 출력과 비교 분석하고 EHPS 시스템의 성능에 미치는 영향을 분석하고 그 성능의 개선을 모색하고 연구하고자 한다.

2. IPMSM 구조 및 초기 모델

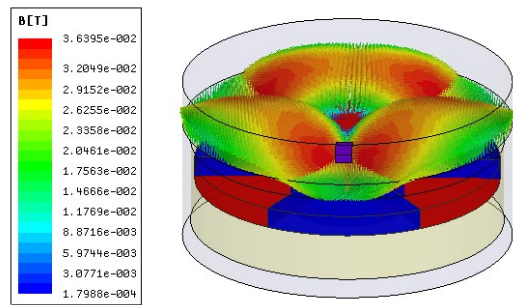


<그림 1> Magnetic Position Sensor를 이용한 IPMSM Motor

그림 1은 Magnetic Position Sensor를 적용한 구조로 6극의 IPMSM Motor의 샤프트에 Ring Magnet를 같은 극수로 하여 고정시키고 제어 보드에 Hall Effect Element를 조립한 구조로 되어 있다. Ring Magnet의 재질은 Ferrite를 사용하였다.

초기 모델로는 Ring Magnet과 Hall Effect Element와의 높이가 4mm

이고 반경 방향의 거리가 11mm인 모델로 설계 및 해석을 해보았다.



<그림 2> 3D FEM을 이용한 Magnetic Position Sensor 형상

<표 1> 기존 모델 출력의 고조파 분석 (THD)

	THD(Sine)	THD(Cosine)
4mm_11mm	7.82%	6.42%

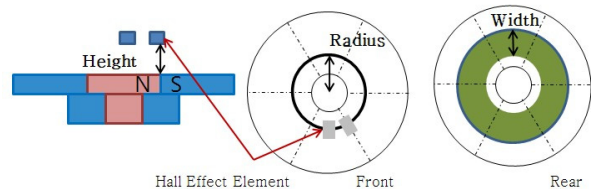
그림 2는 기존 모델을 3D FEM으로 설계한 형상으로 이를 해석하여 센서의 자속을 살펴보았다. 두 개의 Sensor가 전기각으로 90°로 차이를 보여 sin과 cos의 출력을 얻고 있지만 파형의 왜곡으로 인하여서 위치 검출의 오차를 갖게 되고 또한 소음, 진동의 원인이 되고 있다. 표 1은 해석 결과를 고조파 분석한 THD(Total Harmonic Distribution: 전고조파 왜율) 결과이다.

3. 유한 요소법과 다구찌 기법

3.1 유한요소법 이용한 Sensor 위치 변경 및 형상 변화

기존 모델의 해석 결과 고조파가 출력의 많은 부분을 차지하고 있기 때문에 THD를 줄이기 위하여 Sensor의 위치를 변경하여 설계 및 해석을 해보았다. [3]

또한 높은 고투자율의 출력과 외부 자화 현상을 방지하기 위하여 Ring Magnet 뒷면에 Yoke를 부착하여서도 설계 및 해석을 실시하였다.[4]

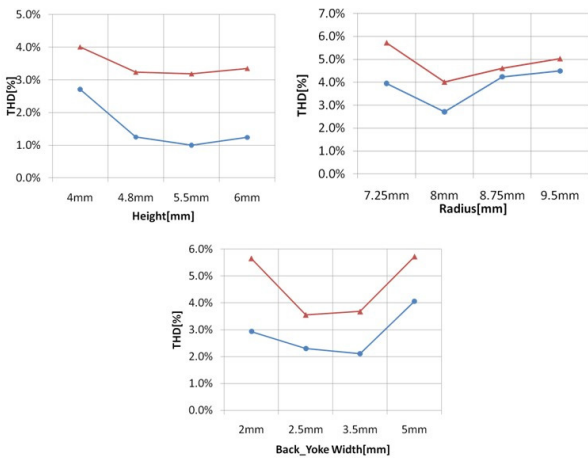


<그림 3> Sensor 위치 변경과 Back\_Yoke 부착

그림 3과 같이 높이, 반경 방향 거리, Back\_Yoke 부착 후 Yoke의 폭을 변경하여서 설계하고 해석을 해보았다. 높이 4mm 반경 방향 거리 11mm인 기존 모델을 바탕으로 3가지의 요인들을 변경하면서 설계 및 해석을 한 결과 THD의 정도는 다음 그림 4와 같다.

그림 4를 보면 높이는 5.5mm 일 때, 반경 방향 거리는 8mm 일 때, Back\_Yoke의 폭은 3.5mm 일 때 전고조파가 가장 작게 나타나는 것을 볼 수 있지만 하나하나의 요인만을 가지고 실험을 한 것이기 때문에 어

러 가지 요인이 동시에 작용하면 다른 결과가 나올 수가 있다. 이렇듯 여러 가지 요인을 동시에 포함하였을 때는 상호간의 다른 영향을 끼치며 다른 결과를 가져올 수 있기 때문에 높이와 반경 방향 거리, 그리고 Yoke의 폭, 이 세 가지 요인을 3가지의 수준으로 나누어서  $3^3 = 27$ 번의 실험을 거쳐야 한다. 하지만 27번의 실험을 3D FEM 해석을 통해 하기 어렵기 때문에 실험계획법 - 다구찌 기법을 사용하였다.



〈그림 4〉 Height, Radius, Yoke\_Width 변경에 따른 THD 변화

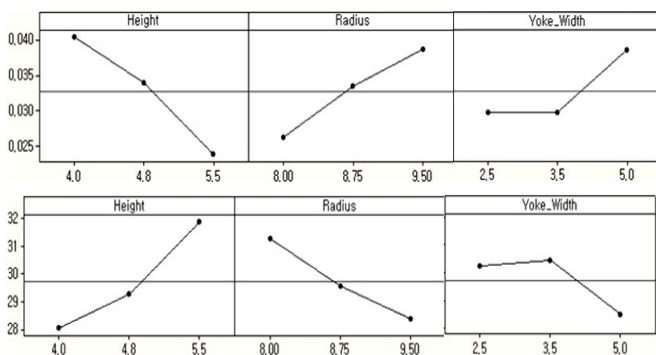
### 3.2 다구찌 기법

다구찌 기법(Taguchi Method)이란 제어 가능한 인자로 제어할 수 없는 잡음(환경)인자에 강건한 설계, 로버스트 설계를 하는 것이다.[5] 표 2와 같이 직교배열법을 이용하여 9가지의 설계 모델을 해석한 후 THD 결과를 확인하였다.

〈표 2〉 직교 배열법을 이용한 신호 인자, 잡음 인자 배치

No	Height	Radius	Yoke_Width	sin(THD)	cos(THD)
1	4.0	8	2.5	0.0355769	0.0229820
2	4.0	8.75	3.5	0.0378065	0.0351880
3	4.0	9.5	5	0.0416879	0.0690846
4	4.8	8	3.5	0.0326952	0.0225507
5	4.8	8.75	5	0.0409390	0.036784
6	4.8	9.5	2.5	0.0469398	0.0235196
7	5.5	8	5	0.0319059	0.0114731
8	5.5	8.75	2.5	0.0329392	0.0164626
9	5.5	9.5	3.5	0.0326528	0.0178434

표 2를 이용하여 다구찌 기법으로 각각의 요인이 서로에게 어떠한 영향을 미치는지를 알아본 결과 그림 5와 같음을 확인할 수 있다.



〈그림 5〉 인자의 수준별 평균값과 SN(Signal to Noise)비

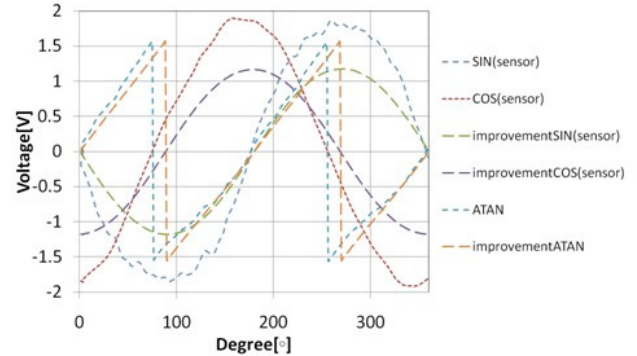
표 2의 인자들을 다구찌 결과 예측으로 높이 5.5mm, 반경방향거리 8mm, Yoke\_Width 3.5mm인 최적의 설계 포인트를 찾아낼 수 있었다.

### 4. 최적 설계

미니탭 다구찌 기법을 이용하여 최적의 위치와 형상을 찾은 후 3D FEM 해석을 해본 결과 개선 모델의 THD가 초기 모델에 비해서 줄어들고 동시에 파형의 왜곡도 사라졌음을 알 수 있다.

〈표 3〉 초기 모델과 개선 모델 비교

	초기 모델	개선 모델
Height (mm)	4	5.5
Radius (mm)	11	8
Yoke_Width(mm)	-	3.5
THD_sine (%)	7.82	3.2
THD_cosine (%)	6.42	0.91



〈그림 6〉 Magnetic Position Sensor 초기-개선 모델 출력 비교

표 3와 그림 6는 다구찌 기법을 이용하여 찾은 최적 설계를 3D FEM을 통하여서 설계 및 해석한 THD 결과로 Magnetic Position Sensor의 최적의 위치와 형상이 출력 성능에 미치는 영향을 보여준다. 두 개의 센서에서 출력되는 파형은 sine과 cosine으로 식 1을 통하여서 전기 위상각  $\omega$  를 구할 수 있다.[6]

$$\omega = \arctan\left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta}\right) \quad (1)$$

초기 모델의 출력은 센서 파형의 왜곡으로 인하여서  $\omega$ 의 파형이 왜곡을 발생하여 모터의 정확한 위치 검출이 어려웠다. 하지만 개선 모델에서는 THD를 줄임으로써 전기 위상각  $\omega$ 를 선형으로 만듦으로 위치 검출의 오차를 줄일 수 있었다.

### 5. 결 론

본 연구를 통하여서 Magnetic Position Sensor의 최적의 위치와 형상이 센서 출력의 왜곡을 일으켜 위치 검출의 오차 및 소음, 진동을 유발한다는 것을 알았다.

차후 개선된 모델을 이용한 센서 출력이 실제 EHPS시스템의 IPMSM의 성능과 진동 및 소음에 영향을 주는지 비교 분석 등을 통하여 자동차 산업 전반에 기여하고자 한다.

### [감사의 글]

본 연구는 지식 경제부 기술혁신사업 "상용차 및 중대형 승용차 EHPS용 고효율 IPMSM의 개발" 과제의 일환으로 수행되었습니다.

### [참고 문헌]

- [1] Seung-ho Jeong, "Design of the Rotary Magnetic Position Sensor With The Sunusoidally magnetized Permanent Magnet", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol, 43, No. 4, April 2007, pp 1837-1840
- [2] C. Schott et al., "A new two axis magnetic position sensor", in *Proc. IEEE Sensor Conf*, vol 2, Jun 2002, pp 12 -14
- [3] Se-hyun Rhyu, "2-D Modeling and Characteristic Analysis of a Magnetic Position Sensor", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol, 41, No. 5 May 2005 pp 1828-1831
- [4] Sheng-ming Yang, "A Hall Sensor-Based three-dimensional displacement measurement system for miniature magnetically levitated rotor", *IEEE Sensor Journal*, Vol, 9, No. 12 December 2009 pp 1872-1878
- [5] 이상복, "Minitab을 이용한 다구찌 기법 활용", 2001
- [6] Todd D. Batzel. "Slotless Permanent Magnet Synchronous Motor Operation without a High Resolution Rotor Angle Sensor" *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol, 15, No. 4. December 2000, pp 366-371