

스크린도어용 다이렉트 드라이브 모터 성능개선을 위한 자기식 센서의 고조파 저감 연구

Study of Magnetic Sensor Harmonic Reduction to Improve Direct Driven Motors Performance Applied to Platform Screen Doors

김 연 수* · 이 주†
(Yun-Soo Kim · Ju Lee)

Abstract - This paper presents the 3-dimensional electromagnetic field analysis method and correction of sensor distortion that is used by a motor speed sensor. The magnetic sensors are being expanded due to lower price than the other speed sensors such as resolver and encoder. Magnetic sensor generates sine and cosine waves when the motor rotates. However, the sine and cosine signals are distorted due to magnetic noise, which makes the angle error of the sensor, generated near by the Hall element. This paper defines an optimal design variables by using the Taguchi method to minimize output distortion of the magnetic sensor and permanent magnet. To enhance reliability of the magnetic position sensor from sensitivity error, assembly amplitude mismatch and the electrical angle, 3-Dimensional electromagnetic finite element method and correction algorithm errors were performed in due of the magnetic sensor in order to improve the quality of the initial production model.

Key Words : Direct drive motor, Harmonic distortion, Magnetic sensor, 3D FEM Analysis

1. 서 론

기존 Platform Screen Door(PSD) 시스템에는 공압 실린더 타입 또는 Brushed DC 모터에 감속기를 결합한 타입이 적용되고 있다. 최근에는 기존 시스템의 구조적 복잡함을 단순화하고, 효율 저하 및 저수명의 한계를 극복할 수 있는 Direct Drive(DD)형 BLAC 모터의 적용이 검토되고 있다. 하지만 BLAC 모터 구동을 위해 회전자의 위치를 검출하는 센서의 성능이 중요하게 되었다. 기존의 고정밀 증분형 엔코더는 분해능을 높일 수 있으나 비교적 고가이며, 자기식 센서에 비하여 내환경성이 낮다는 단점이 있다 [1]. 내환경성 및 고정밀을 요하는 분야에서는 Resolver가 널리 사용되고 있으나 이 또한 비교적 고가이며 별개의 Resolver to Digital Converter(RDC)를 구성해야 하는 단점이 있다 [1]. 본 논문에서 연구하고자 하는 자기식 센서는 자기적인 리니어 출력을 이용하여 전기각 90°의 편차를 가지는 두 파형으로 로터의 위치를 검출한다. 검출된 출력신호는 MCU의 Analogue to Digital Converter(ADC)를 사용하여 디지털 신호와 엔코더의 펄스 형태로 전환이 가능하며, 구현하기 쉬운 장점이 있어 사용 범위가 넓을 것으로 판단된다. 자기식 센서는 비접촉식으로 반영구적이며

내환경성에 강하여 낮은 비용으로 구성이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 반면 정밀도가 낮으며 외부 자기장의 간섭으로 인해 신호의 왜곡을 가져올 수 있다는 단점이 있다 [1, 2].

2. 본 론

2.1. DD Motor 자기식 센서 기초 설계

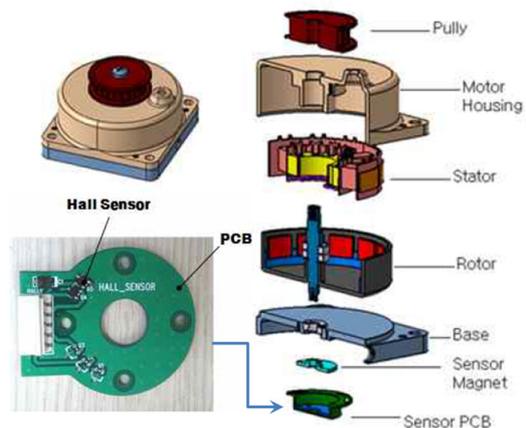


그림 1 PSD용 DD 모터의 자기식 센서

Fig 1 Magnetic sensor for PSD DD motor

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, HanYang University, Korea

E-mail : Julee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, HanYang University, Korea

Received : September 25, 2015; Accepted : October 8, 2015

그림 1은 DD 모터에 자기식 센서를 적용하여 구성한 것으로 외전형의 14극 회전자 사용으로 자기식 센서 역시 14극의 착자를 하게 된다. 자기식 센서의 착자는 작업성 및 비용 등을 고려하여 Ferrite 자석으로 선정 하였다. 적용된 DD 모터는 PSD 시스템 특성상 사용 빈도수가 많아 500만회 이상의 작동 내구 특성이 요구되어 감속기를 적용하지 않고 직접 풀리에 벨트를 체결해 구동하는 형태로서 100 ~ 200 rpm의 낮은 속도로 작동한다. 저속 작동 제어를 위해서 자기식 센서의 요구 특성은 2048 이상의 Encoder 또는 Resolver와 동급이상 분해능과 낮은 오차율이 요구된다.

2.2. 초기모델 해석

전동기가 14극이기 때문에 샤프트에 Ferrite 재질의 14극 원형 자석이 적용되었고 기계각 12.85°로 배치된 2개의 Hall sensor에서 전기각 90°차인 Sine과 Cosine의 출력 파형을 발생시킨다. 따라서 Arctan 파형은 Sine, Cosine의 출력 파형을 식 (1)를 통해 얻는다.

$$\omega = \tan^{-1} \left(\frac{\sin\theta}{\cos\theta} \right) \tag{1}$$

ω = Magnetic sensor angle, θ = Hall sensor angle

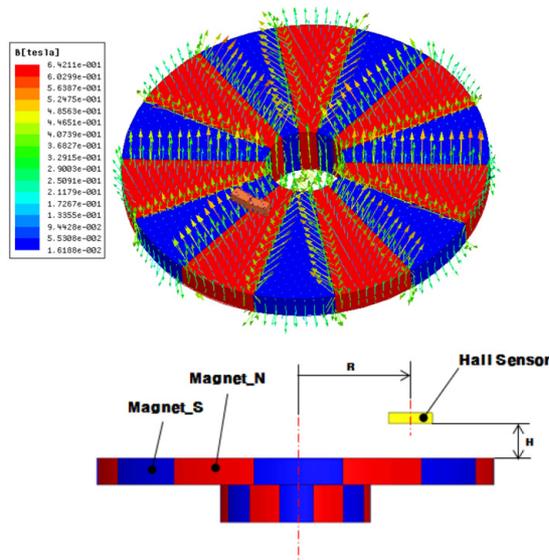


그림 2 유한요소법을 이용한 초기 모델
Fig 2 Initial model FEM Analysis

그림 2에서와 같이 초기 모델의 자기식 센서 FEM 해석 시물레이션을 통하여 나온 결과 값을 식 (2)를 통해서 전 고조파 왜곡률(Total Harmonic Distortion, THD)을 분석한 결과를 표 1에 나타내었다.

$$THD_v = \frac{V_H}{V_1} = \frac{\sqrt{V^2 - V^1}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} V_n^2}}{V_1} \tag{2}$$

V_H = 전고조파의 실효값, V_1 = 기본파의 실효값

V_n = n 고조파의 실효값, n=차수

표 1 초기 모델의 harmonic distortion 분석
Table 1 Initial model harmonic distortion analysis

	Radius (mm)	Height (mm)	THD (%)
FEM	10	2.4	7.2
Real Output	10	2.4	8.5

그림 3은 초기 모델의 실제 출력 특성을 오실로스코프를 이용하여 측정된 데이터이다. THD는 8.5[%]로 표 1에서 알 수 있듯이 FEM Simulation 결과와 유사함을 알 수 있다. 또한, 출력 특성을 통해 3고조파의 왜율이 THD의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 전기각 또한 점선의 이상적인 각도에 비하여 외부의 외란에 의해서 파형 왜곡이 발생하고 있음을 알 수 있고 이 특성은 회전자의 위치를 검출하는데 오차를 발생할 수 있으며, 곧 모터의 소음 및 진동의 원인이 될 수 있다.

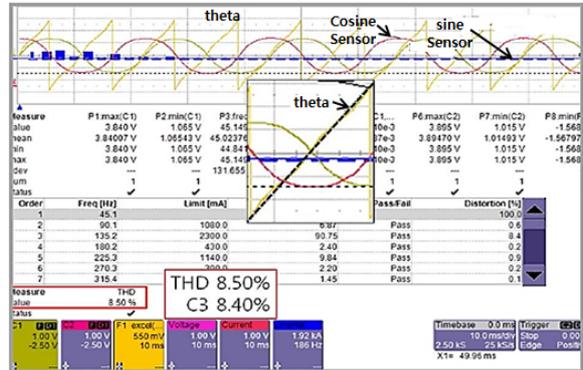


그림 3 초기 모델에서 측정된 THD
Fig 3 Measured THD of Initial model

2.3 자기식 센서 오차 감소

2.3.1 외란 영향의 최소화

파형의 왜곡은 정확한 위치 추종이 불가능하여 회전자의 위치에 따른 정확한 전류지령을 내려주지 못하게 하여 전동기의 운전 에 나쁜 영향을 준다. 원활한 운전과 소음 및 진동을 줄이기 위하여 THD를 줄여 외란에 굳건하고 특성이 개선되기 위한 설계가 요구 된다. 외란의 영향에 강인한 자기식 센서를 위해 초기 모델의 마그넷 후면부에 iron 재질로 이루어진 요크를 추가시킴으로써 자속을 집중시켜 THD를 개선하고자 한다. 명확한 분석을

위하여 3차원 전자기장 특성해석과 3가지 특성요인의 상관도를 분석하기 위해 Taguchi 기법을 이용하였다. 각각의 요인이 서로 관련 없이 작용하면 문제가 되지 않지만 동시에 교호작용하면 다른 결과가 나올 수 있다. 따라서 3가지의 인자(높이, 반경, 요크 두께)를 3가지 수준으로 나누어 경우의 수인 27가지 모델이 발생이 된다. 일반적으로 연구의 효율성을 위해 3차원 유한요소법을 이용한 전자기장 특성 해석을 통하여 실험계획법인 Taguchi 기법과 연동해석을 진행하였다[4, 8]. 이는 신호 대 잡음(SN: Signal to Noise)비를 통하여 출력파형의 THD 특성을 더 작은 인자를 선출하는 것이다. 이는 다음 식 (3)을 통하여 얻을 수 있다.

$$SN = -10 \log_{10} \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \quad (3)$$

y_i = Measured value, n = Number of sample

그림 4와 같이 Taguchi 기법을 위한 3인자, 즉, 높이, 반경, 요크 두께의 3수준을 설정하였다. 높이 2.4mm를 중심으로 0.4mm씩 증감시켜 2.0~2.8mm로 설정하고 반경 길이는 10mm를 중심으로 5mm씩 증감시켜 5~15 mm로 설정하여 반경의 증감에 따른 THD를 분석하였다. 요크의 재질은 iron으로 하였으며, 회전축의 간섭을 피하기 위하여 중공형으로 설계하여 마그넷 후면에 설치하였으며 두께를 2.0mm 기준으로 0.5mm씩 증감시켜 1.5~2.5 mm로 분석하였다.

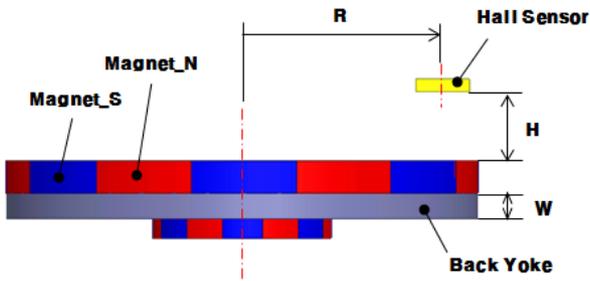


그림 4 Taguchi 3가지 인자 설정
Fig 4 Designation of Taguchi 3 factors

2.3.2 Taguchi 기법을 적용한 3D FEM

직교 배열법을 적용하여 3가지 요인의 3수준을 9가지의 모델을 설계한 뒤 3D FEM 해석한 후 THD 결과를 확인하였다. 표 2는 직교 배열법을 통한 3차원 유한요소법 해석 결과이다. 표 2를 보면 4번 모델은 높이 2.4mm, 반경 10mm, 요크 두께 2.0mm, Total THD가 2.91%로 기본 모델에 비하여 THD가 감소된 것을 알 수 있었으며, 5번 모델이 제일 작은 값을 나타낸다. 따라서 Taguchi 기법으로 각각의 요인이 서로에게 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 SN(Signal to Noise) 비를 망소특성으로 하여 결과를 나타내면 그림 5와 같다.

표 2 SN(Signal to Noise)에 따른 모델별 분석

Table 2 Analysis result according to Signal to Noise

Model	Height (mm)	Radius (mm)	Yoke th (mm)	THD % (Total)
1	2.0	10	1.5	6.57
2	2.0	12.5	2.0	5.74
3	2.0	15	2.5	6.73
4	2.4	10	2.0	2.91
5	2.4	12.5	2.5	2.62
6	2.4	15	1.5	3.24
7	2.8	10	2.5	4.78
8	2.8	12.5	1.5	4.47
9	2.8	15	2.0	3.76

표 2의 결과와 그림 5를 보면 Height로 변화하였을 때, 폭의 변화가 가장 크므로 THD에 가장 큰 영향을 미치고 그 다음의 영향 요소는 Radius로 나타는 것을 알 수 있다.

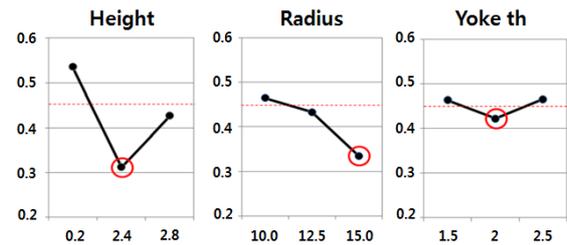


그림 5 최적화 설계를 위해 SN ratio를 통한 분석
Fig 5 SN ratio analysis for optimum design

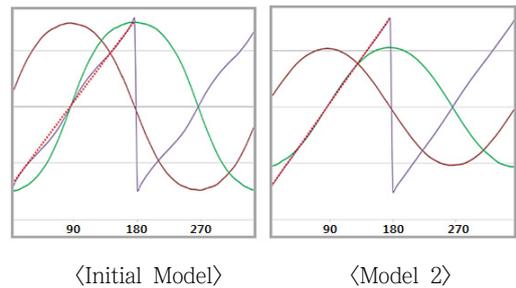


그림 6 초기 모델과 최적화 모델의 출력 신호 비교
Fig 6 Comparison the output signal of the initial model and optimum model

따라서 Height 2.4mm가 다른 모델과 비교시 월등히 THD 특성이 우수하여, 평균적인 결과를 도출하는 Taguchi 기법을 통해 도출한 결과 Height 2.4mm, Radius 15.0mm, Yoke 두께 2.0mm의 모델이 최적 모델로 판단된다.

그림 6은 개선전 모델과 Taguchi를 통해 최적화된 모델의 출력파형을 나타내고 있는 것으로 개선 전과 비교하여 최적화 후는

Sine과 Cosine 파형이 정현적으로 변화한 것을 확인할 수 있다. 또한, Sine과 Cosine을 통하여 얻어진 Arctan파형을 비교시 개선 전 모델에 비하여 현저하게 선형적인 자기식 센서의 출력 특성의 결과를 확인할 수 있다.

2.3.3 개선된 자기식 센서 실험

14극으로 자된 원형 마그넷을 잔류자속밀도 측정기에 그림 7의 형태로 장착하여 본 연구를 통한 자기식 센서의 최적 설계된 시제품을 측정 하였다. 그림 8과 같은 검사장비를 이용하여 자기식 센서의 Sine과 Cosine을 측정하여 각각의 에러율을 표시하고 Arctan에 대입하여 전체 에러율을 계산하여 자기식 센서의 합격 여부를 판단한다. 측정결과 Arctan값이 선형성을 유지하고 있으며 정해진 사양을 안정적으로 만족하고 있음을 알 수 있다.

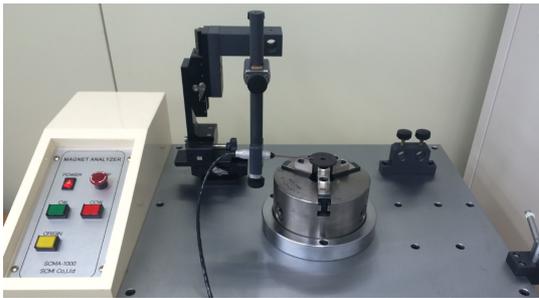


그림 7 자기식 센서 테스트 장비
Fig 7 Magnetic sensor test instrument

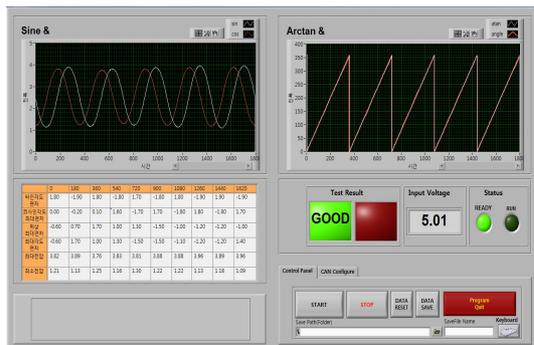


그림 8 자기식 센서 테스트 결과
Fig 8 Magnetic sensor test result

2.3.4 자기식 센서 출력신호의 보정

그림 9는 자기식 센서를 사용하여 모터를 제어하기 위해 제안 되는 회로이다. 앞서 자기식 센서의 최적 설계를 통하여 성능을 개선하였으나 실제 양산시는 설계에서 고려하지 못하는 부분들로 인하여 그림 10과 같이 자기식 센서 소자의 Sensitivity 오차가 나타난다. 이는 착자 기술 및 조립성의 한계 등으로 분석되며 이상적인 전기각 특성을 출력하지 못하는 자기식 센서의 성능을 개선하기 위하여 보정 알고리즘을 제시하고자 한다. 그림 11은 자

기식 센서 출력 Sine, Cosine의 이상적인 전기각 벡터도를 나타 내고 있으며, 식 (4)와 같이 자기식 센서 출력의 sine, cosine으로 전기각을 구할 수 있다.

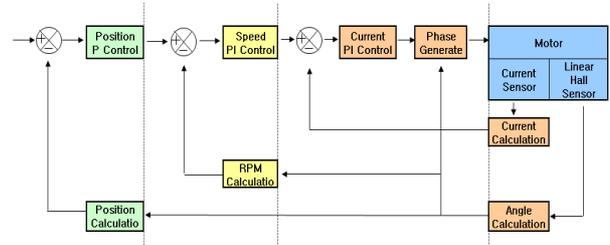


그림 9 자기식 센서가 적용된 모터 제어 회로
Fig 9 Magnetic sensor applied motor control circuit

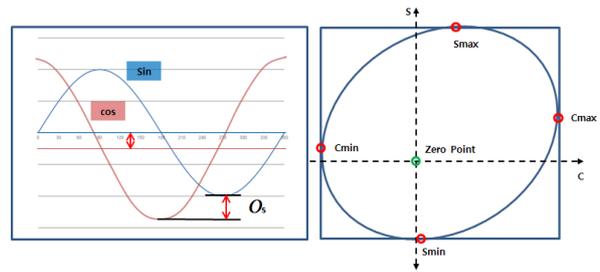


그림 10 자기식 센서의 출력신호 에러
Fig 10 Output signal error of magnetic sensor

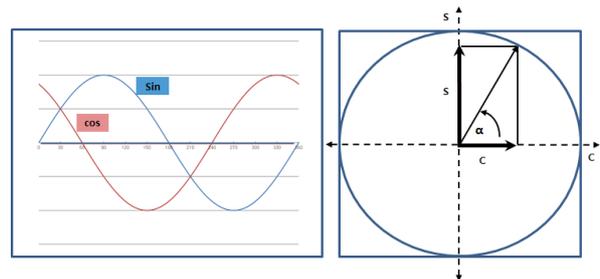


그림 11 이상적인 자기식 센서의 출력신호
Fig 11 Ideal output signal of magnetic sensor

$$a = \tan^{-1} \left(\frac{S_o}{C_o} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_o &= A_c \times \cos(\alpha + \varphi_c) + O_c \\ S_o &= A_s \times \sin(\alpha + \varphi_s) + O_s \end{aligned} \quad (5)$$

C_o = Sensor cosine output, S_o = Sensor sine output
 A_c = Cosine Amplitude, A_s = Sine Amplitude
 φ_c = Cosine phase, φ_s = Sine phase
 O_c = Cosine offset, O_s = Sine offset
 D_r = Vector S, D_i = Vector C

식 (5)를 이용하여 그림 10과 같이 Amplitude의 불균일을 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$A_c = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2}, \quad A_s = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (6)$$

그림 10의 Zero Point 오차도 식 (7)과 같이 Min-Max method로 도식화 하였다.

$$O_c = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{2}, \quad O_s = \frac{S_{\max} - S_{\min}}{2} \quad (7)$$

기존의 수식들을 MCU에서 쉽게 구현하기 위하여 DFT (Discrete Fourier Transform)을 통하여 식 (8)~(10)과 같이 수식화하고 최종 파라미터를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_o D_r &= [C_o(1) \cdot \cos(\alpha_1) + C_o(2) \cdot \cos(\alpha_2) + \dots + C_o(n) \cdot \cos(\alpha_n)] \\ &\quad \cdot 2/n \\ C_o D_i &= [C_o(1) \cdot \sin(\alpha_1) + C_o(2) \cdot \sin(\alpha_2) + \dots + C_o(n) \cdot \sin(\alpha_n)] \\ &\quad \cdot 2/n \\ S_o D_r &= [S_o(1) \cdot \cos(\alpha_1) + S_o(2) \cdot \cos(\alpha_2) + \dots + S_o(n) \cdot \cos(\alpha_n)] \\ &\quad \cdot 2/n \\ S_o D_i &= [S_o(1) \cdot \sin(\alpha_1) + S_o(2) \cdot \sin(\alpha_2) + \dots + S_o(n) \cdot \sin(\alpha_n)] \\ &\quad \cdot 2/n \\ \dots & \end{aligned} \quad (8)$$

$$A_c = \sqrt{C_o D_r^2 + C_o D_i^2}, \quad A_s = \sqrt{S_o D_r^2 + S_o D_i^2} \quad (9)$$

$$\varphi_c = \tan^{-1} \frac{C_o D_i}{C_o D_r}, \quad \varphi_s = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{S_o D_i}{S_o D_r} \quad (10)$$

3. 결 론

자기식 센서를 적용한 BLAC 모터의 제어는 비교적 낮은 가격에 높은 분해능 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있으나 자기식 센서에 외란이 인가될 경우 자속의 변화에 의해 Sine, Cosine 출력 파형이 변화 하게 되어 출력 파형 Error가 발생되며 결과적으로 전동기의 특성 저하와 진동 소음을 발생시키게 된다. 본 논문에서는 PSD에 적용되고 있는 14극 DD모터 시스템의 비용 저감과 높은 내환경성 확보할 수 있는 자기식 센서를 적용하기 위하여 유한요소 해석법과 Taguchi 기법을 적용하여 정밀도 개선 모델을 도출하고 출력 성능을 비교 분석하였다. 따라서 Taguchi 기법을 통하여 적절한 마그넷 Back Yoke의 형상과 크기를 선정하였고 Hall sensor와 14극 원형 마그넷 간의 배치 위치를 분석하여 센서 출력 파형의 THD를 최소화 하였다. 또한, 제조의 오차에 의한 출력성능의 저하를 보상하고자 보정 알고리즘을 제시 하였으며, 지속적인 연구를 통하여 PSD용 DD BLAC 모터 뿐만 아니라 고정밀 BLAC 모터에도 마그넷 센서의 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2013R1A2A1A01015171)

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2013R1A2A1A01015171)

References

- [1] Y. J. Luo, E. T. Hwang, and S. M. Huang, "Multi pole magnetization of high resolution magnetic encoder", Electrical Electronics Insulation Conf. And Electrical Manufacturing & Coil Winding Conf, pp.237-242, Oct. 1993
- [2] ABruno Frazier, Z. Liub ea al, "Miniaturized linear magnetic position sensor for automotive application", IEEE Sensor Conf, Vol.2, pp. 1565-1570, Jun. 2002,
- [3] C.Schott, "Anew two axis magnetic position sensor", IEEE SensorConf, vol.2, pp.12-14 Jun. 2002
- [4] Sang-Oh Shim, Ki-Chan Kim, "3D Electromagnetic Analysis of Magnetic Sensor for Improvement of Motor", Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.14. pp. 2391-2387, 2013
- [5] E.Hirota, H.Sakakima, K.Inomata, "Giant Magneto-Resistance
- [6] Schott, C., "A new twe-axis magnetic position sensor, "Sensors, 2002.Proceedings of IEEE, vol. 2, pp.911-915, Jun, 2002.
- [7] Kikuchi, Y., Nakamura, F., Wakiwaka, H., and Yamada, H., "Consideration of magnetization and detection on magnetic rotary encoder using finite element method" ,IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, no. 2, pp. 2159-2162, Mar, 1997.
- [8] Omekanda, A. M., "Robust torque and torqueper-inertia optimization of a switched reluctance motor using the Taguchi methods," IEEE Transactions on Industry Applications, vol, 42, no. 2, pp. 473-478, Mar, 2006.

저 자 소 개



김 연 수 (Yun-Soo Kim)

1968년 4월 5일생. 2002년~현재 대동모벨 시스템(주) 연구소. 2002년 한국산업기술대학교 전자공학과 졸업. 2013년 8월 한양대학교 공학대학원 철도시스템공학과 졸업(석사). 2013년 9월~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 031-496-8611

E-mail : yskim@ddmvs.co.kr



이 주 (Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.

Tel : 02-2220-0349

E-mail : Julee@hanyang.ac.kr