

정현적으로 착자된 영구자석을 갖는 마그네틱 위치센서 설계

論 文

56-3-9

Design of Rotary Magnetic Position Sensor with Sinusoidally Magnetized Permanent Magnet

鄭承鎬* · 柳世鉉** · 權炳一†

(Seung-Ho Jeong · Se-Hyun Rhyu · Byung-Il Kwon)

Abstract - This paper proposes a rotary magnetic position sensor which has a sinusoidally magnetized permanent magnet with a small number of poles. To make the sinusoidal magnetic flux density distribution from the permanent magnet, a magnetizing fixture is optimized by the DOE(Design of Experiments) method. The magnetization process is analyzed using the Preisach model and 2 dimensional finite element method. The magnetic flux density distribution from the magnetized permanent magnet is very similar to ideal sine wave. The simulation result of the magnetic flux density distribution is compared with the experimental one. Also the availability of the proposed rotary type magnetic position sensor is confirmed by position calculation technique.

Key Words : Design of experiments, finite element method(FEM), magnetic sensor, magnetization, Preisach model

1. 서 론

현대 사회의 자동화 설비 확장으로 인하여 서보모터용 위치센서의 요구가 증대되고 있다. 일반적으로 서보모터용 위치센서로 Optical Encoder(광학식 엔코더)가 널리 사용되고 있다. 그러나 Optical Encoder는 구조가 다소 복잡하고, 높은 속도에서 안정성이 낮으며, 습기나 먼지에 의한 환경적 영향을 많이 받는다[1].

이러한 단점을 보완하고자 다극 착자된 마그네틱 드럼과 MR(Magneto Resistive) 센서를 사용한 Magnetic Encoder(자기식 엔코더)가 연구되었다[2-3]. 이러한 Magnetic Encoder는 높은 분해능을 위하여 다수의 극(약 1000 ~ 5000 극)으로 착자하여야 한다. 그러나 다극 착자를 위한 착자 시스템 내의 서보모터는 높은 위치 정밀도를 요구하며 장시간의 착자 과정을 요한다. 또한 착자 시 착자 요오크 극으로부터의 누설자속에 의해 마그네틱 드럼을 착자하기 때문에 착자된 마그네틱 드럼으로부터 약한 자계가 발생하며, 그에 따라 낮은 자계에서도 민감하게 반응하는 MR 센서를 사용하여 가격이 상승하는 단점을 가진다.

또한, 소수 극의 영구자석을 사용하여, 홀소자가 검출하는 자속밀도를 회전 위치마다 다르게 하는, 마그네틱 위치센서가 연구된 바 있다[4-5]. 그러나 이러한 마그네틱 위치센서는 회전위치를 정현파 신호로부터 연산하지 않았다. 따라서 필터를 이용하여 노이즈나 외란으로 인한 영향을 제거하기 매우 어려우며, 그에 따른 회전위치 검출의 신뢰성이 낮다.

본 논문에서는 소수의 극으로 착자되어 정현적인 자속밀도를 발생시키는 영구자석과 이 정현적인 자속밀도를 검출하는 홀소자를 사용한 저가의 회전형 마그네틱 위치센서(Rotary Magnetic Position Sensor)를 제안한다.

영구자석의 위치에 따라 정현파의 자속밀도를 구현하기 위해 착자 요오크를 실험계획법(Design of Experiments) 중 요인배치법(Factorial Design)을 이용하여 최적화 설계한다. 또한, 영구자석의 착자 과정은 2차원 유한요소법과 프라이자호 모델을 이용하여 해석한다. 착자된 영구자석에서 발생하는 자속밀도는 2차원 유한요소법을 이용하여 해석한다. 마지막으로 전기각 $\pi/2$ 의 위상차를 가지는 두 개의 정현파 신호로부터 정밀한 회전 위치 검출이 가능함을 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

2. 마그네틱 위치센서의 구조와 원리

제안한 마그네틱 위치센서는 서보모터 등의 정밀한 위치 검출 및 제어가 요구되는 분야에 적용을 목적으로 한다. 마그네틱 위치센서는 그림 1과 같이 서보모터와 커플링으로 연결되어 서보모터 회전자의 회전 위치를 검출할 수 있다. 본 연구에서 마그네틱 위치센서는 회전하는 10극의 영구자석과, 영구자석에서 발생하는 자속밀도의 반지름 성분(Radial component)을 검출하기 위한 두 개의 고정된 홀소자로 구성된다. 회전 위치의 검출이 가능하고 고조파 성분의 필터링을 용이하게 하기 위해 홀소자가 검출하는 자속밀도를 정현파로 구현한다. 또한, 회전 위치의 계산을 가능하게 하기 위해 위상차가 전기각 $\pi/2$ 가 되도록 두 개의 홀소자를 배치한다. 회전 위치의 연산에 관한 구체적인 내용은 4장에서 기술한다.

그림 2는 마그네틱 위치센서의 위치 검출 블록 다이어그램을 나타낸다. 2개의 홀소자는 영구자석의 회전 위치에 따

† 교신저자, 終身會員 : 漢陽大 電子電氣制御計測工學科 教授
E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr

* 學生會員 : 漢陽大 電子電氣制御計測工學科 碩士卒業

** 正會員 : 電子部品研究員 選任研究員 · 工博

接受日字 : 2006年 10月 19日

最終完了 : 2006年 12月 26日

라서 정현적인 자속밀도를 검출하여 그 자속밀도와 비례하는 전기적인 신호인 전압으로 바꾼다. 그 후, 그 홀소자의 아날로그 출력 전압은 AD 컨버터를 통하여 디지털 신호로 바뀌게 된다. AD 컨버터 출력 신호의 고조파 성분과 노이즈를 제거하기 위해 Digital Filter를 사용하며, 그 필터링된 신호는 이상적인 sin wave과 cos wave에 매우 가까워지게 되고, 그 신호들로부터 회전 위치를 계산하게 된다.

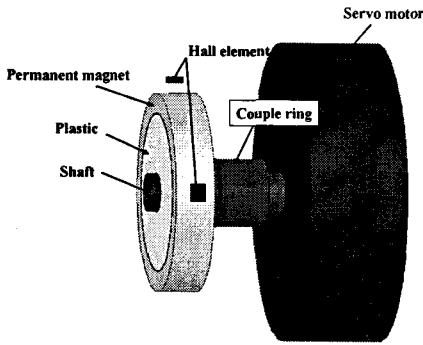


그림 1 마그네틱 위치센서의 구조
 Fig. 1 The structure of the rotary type magnetic position sensor

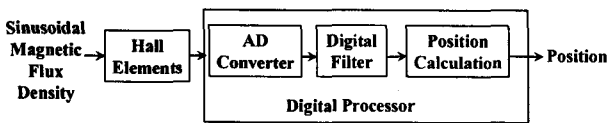


그림 2 마그네틱 위치센서의 블록 다이어그램
 Fig. 2 The block diagram of the rotary type magnetic position sensor

3. 착자 시스템의 설계 및 착자 해석

3.1 착자 시스템의 설계

우선 마그네틱 위치센서에 사용되는 착자할 영구자석으로 링형의 등방성 페라이트 영구자석을 선택하였다. 이는 등방성 페라이트 영구자석이 다른 영구자석에 비해 상대적으로 가격이 싸고 홀소자가 검출할 수 있는 충분한 자속밀도를 발생시킬 수 있기 때문이다. 외경 20mm, 내경 16mm, 두께 4mm의 크기를 가지며, 그림 3에서 보는 바와 같이 최대 잔류 자화값은 약 0.3T이고, 보자력은 약 300,000A/m인 영구자석을 사용하였다.

정밀한 위치 검출을 위하여 착자된 영구자석에서 발생하는 자속밀도는 가능한 한 정현파에 가까워야 한다. 필터를 사용하지만 필터에 의해 고조파 성분을 제거하는데 한계가 있기 때문이다[6]. 따라서 정현적인 자속밀도 발생을 위한 영구자석의 착자 시스템을 다음과 같이 설계한다.

3.1.1 임펄스 착자 시스템

사용한 페라이트 영구자석을 완전히 착자하기 위해서는

약 6×10^5 A/m의 높은 인가 자계가 필요하다. 이를 위해 착자 시스템 도체에 높은 전류가 필요로 하며, 도체에 이런 높은 전류를 유지시키는 것은 도체의 과열이나 손상을 야기시킨다. 따라서 이를 피하기 위해 순간적인 전류가 발생하는 임펄스 착자 시스템을 사용하였다[7].

그림 4는 임펄스 착자 시스템의 등가회로를 나타낸다. 콘덴서에 에너지를 저장하였다가 스위칭에 의해 순간적으로 에너지를 방출하여 착자 시 자계를 발생시키는 임펄스 전류가 발생하게 된다. 그림 4로부터 전류는 착자 시스템의 콘덴서 용량, 콘덴서 충전 전압, 착자 요오크의 인덕턴스, 도체의 저항에 영향을 받음을 알 수 있다. 본 논문에서는, 착자한 영구자석에서 발생하는 영구자석에서 발생하는 자속밀도의 크기를 최대로 하기위한 착자 전류를 얻기 위해 착자 시스템의 콘덴서 용량, 콘덴서 충전 전압, 착자 요오크 권선의 턴수, 직경을 시뮬레이션을 통하여 표 1과 같이 결정하였다. (3.3 시뮬레이션 결과 참조)

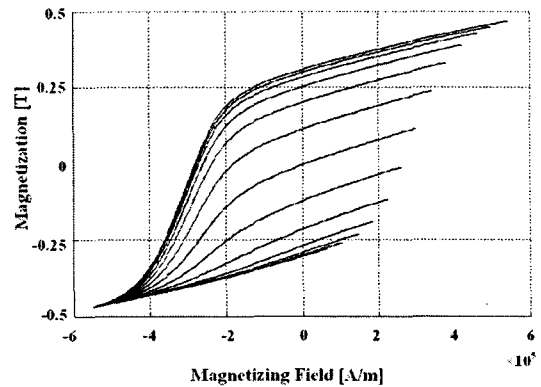


그림 3 페라이트 영구자석의 1차전이곡선
 Fig. 3 The first transition curves of the ferrite permanent magnet

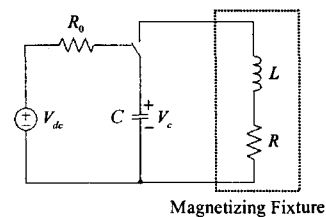


그림 4 임펄스 착자 시스템의 등가회로
 Fig. 4 The equivalent circuit of an impulse magnetizing system

표 1 임펄스 착자 시스템의 설계 파라미터

Table 1 The design parameter of the impulse magnetizing system

설계 파라미터	치 수
콘덴서 용량	1000 μ F
콘덴서 충전 전압	300 V
권선 턴수	5 Turns
권선 직경	2 mm

3.1.2 착자 요오크의 설계

영구자석 자화의 크기는 위치에 따라 같고, 자화의 방향을 위치에 따라 그림 5와 같이 하면 영구자석에서 발생하는 자속밀도가 위치에 따라 정현파가 된다[8]. 또한, 링형의 동방성 영구자석이 이러한 자화 분포를 갖게 하기 위해 영구자석의 외경 주변에 그림 6과 같이 권선을 배치하는 방법이 연구된 바 있다[9]. 그러나 이 방법은 극수가 증가할수록 그리고 보다 정밀한 정현파의 자속밀도가 요구될수록 권선 배치를 위한 공간 확보가 어렵다.

따라서 그림 7과 같이 2극 당 2개의 슬롯만을 필요로 하는 착자 요오크를 설계하였고, 이로부터 권선 공간의 확보가 용이해진다. 착자 요오크 극의 형상을 변화시켜 영구자석의 자화분포를 조절할 수 있고, 이로부터 영구자석에 의한 자속 밀도를 정현파로 만들 수 있다.

착자 요오크는 다음과 같은 과정을 통하여 설계하였다. 우선 착자 요오크 극의 형상 이외의 형상을 설계한다. 그 후, 영구자석에서 발생하는 자속밀도가 최소의 고조파 성분을 갖도록 하기 위한 착자 요오크 극의 형상을, 실험계획법 중 간단하고 효율적인 방법으로 알려진 요인배치법에 의해 최적화하였다[10].

착자 요오크 극의 형상이 그림 6의 형태일 때 착자 시 자속이 그림 5와 유사한 자화 방향으로 흐를 것이라고 가정하고, 착자 요오크 극의 형상을 다음과 같이 설계하였다. 착자 요오크 극의 형상의 결정을 위한 인자로 그림 8과 같이 제작이 가능한 범위 내에서 L, W를 선택한다. 착자 시 필요한 에너지를 최소로 하기위해 극의 중앙, A점을 제작 가능한 착자 요오크의 극과 영구자석 사이의 최소 공극으로 고정시킨다. L과 W에 의해 B와 그 대칭 C점은 그림 8과 같이 결정된다. 그 후, A, B, C 세 점을 잇는 원에 의해 착자 요오크 극의 형상이 결정된다.

표 2는 요인배치법에 의해 계획된 실험을 나타낸다. 각각의 실험은 3.2절에서 기술한 착자 과정과 착자 후 해석을 통해 시뮬레이션 할 수 있다. 이로부터 착자 요오크 극의 형상에 따른 착자 후 영구자석에서 발생하는 자속밀도를 알 수 있고, 이 자속밀도의 분포가 정현파에 가장 가깝게 나타나는 최적의 착자 요오크 극의 형상을 결정하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 L이 0mm, W가 2.5mm일 때 자속밀도의 THD(Total Harmonic Distribution)가 3.48%로 최소임을 알 수 있고, 이 값을 선택하였다.

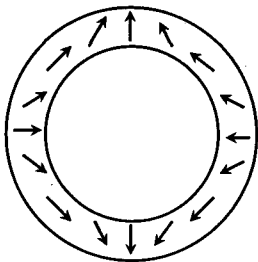


그림 5 정현파 자속밀도 발생을 위한 4극 영구자석의 자화 분포
Fig. 5 The magnetization distribution of 4-pole permanent magnet for the sinusoidal flux density

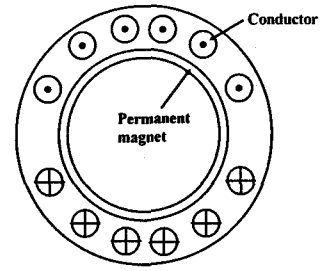


그림 6 권선 위치조절에 의한 2극 영구자석의 착자 요오크
Fig. 6 The magnetizing fixture for 2-pole permanent magnet by adjusting the position of conductor

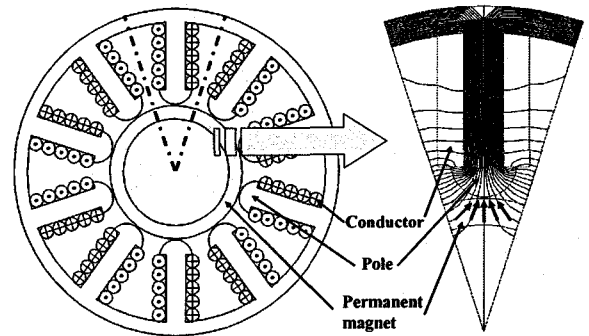


그림 7 착자 요오크와 자속선도(1/10 모델)
Fig. 7 The magnetizing fixture and the flux line analyzed by magnetostatic FEM (1/10 model)

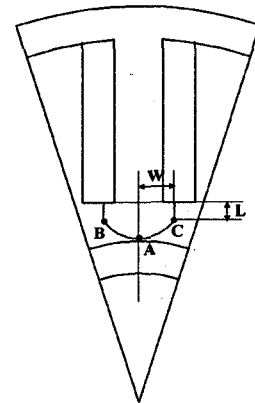


그림 8 실험계획법에 의한 착자요오크 설계
Fig. 8 The design of the magnetizing fixture by the design of experiments

표 2 요인배치법에 의한 실험 계획
Table 2 The design of experiments by the factorial design

L (mm)	W (mm)	THD (%)
0	1.5	6.13
0	2.5	3.48
2.3	1.5	3.79
2.3	2.5	11.49

3.2 착자 과정 및 착자 후 해석

기존의 착자에 대한 해석방법은 영구자석의 자화방향을 식 (1), (2)와 같이 결정하고, 그에 따른 착자 요오크를 설계하였다[9].

$$\theta_{\vec{M}} = (1-p)\theta \quad (1)$$

$$\vec{M} = |\vec{M}|\cos(p\theta)\vec{e}_r - |\vec{M}|\sin(p\theta)\vec{e}_\theta \quad (2)$$

여기에서 \vec{M} 은 자화벡터, p 는 극쌍 수, θ 는 각도, $\theta_{\vec{M}}$ 은 $\theta=0$ 과 \vec{M} 과의 각도, \vec{e}_r , \vec{e}_θ 는 반경방향과 접선방향의 단위 벡터를 나타낸다.

따라서 착자 후의 영구자석 주변의 외부 환경 및 자속밀도의 검출 위치에 따른 자속밀도의 변화를 고려할 수 없으며, 등방성 영구자석의 경우 원하는 자화 방향으로 정확히 착자하기 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는, 자화 방향을 식 (1), (2)와 같이 고정시키지 않았다. 또한, 그림 9와 같이 착자 과정과 외부환경 및 검출 위치를 고려한 착자 후의 과정을 분리하지 않고 통합하여 해석하였다. 따라서 착자 후의 외부 환경을 고려하여 보다 정현파에 가까운 자속밀도를 발생시킬 수 있는 최적의 착자 요오크를 설계하였다.

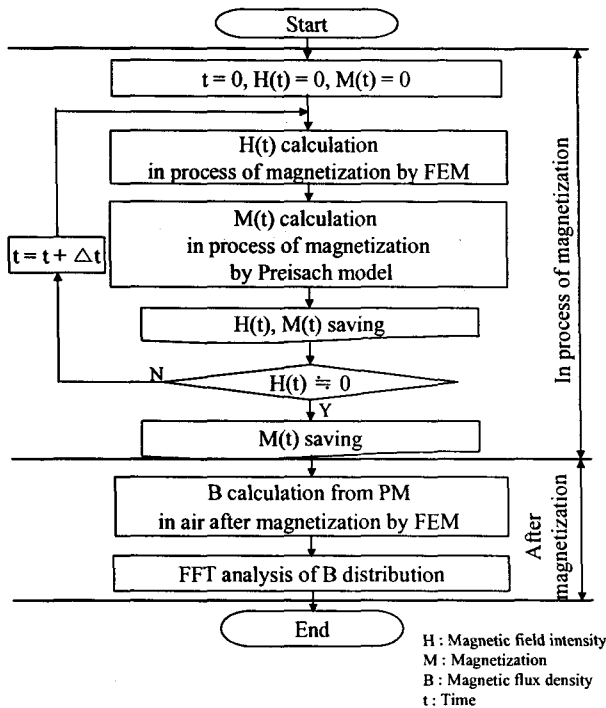


그림 9 해석 순서도

Fig. 9 The process of the analysis

실험계획법에 의하여 결정된 표 2의 각각의 착자 요오크에 대해 다음과 같은 과정을 거쳐 해석하였다. 설계된 착자 요오크에 의한 영구자석의 착자 과정은 2차원 유한요소법에 의해 인가자계를 계산하고, 프라이자호 모델에 의해 인가 자계 변화에 따른 영구자석의 자화값을 계산함으로써 해석하

였다. 또한, 착자 후 공기 중에서 영구자석의 잔류 자화값에 의한 자속밀도는 2차원 유한요소법에 의해 해석하였다. 즉, 표 2에 의해 결정된 각각의 착자 요오크 극의 형상에 대하여 그림 9의 해석과정을 통하여 정현적인 자속밀도 발생을 위한 착자요오크 극의 형상을 FFT 분석을 통하여 비교하고 최적의 착자 요오크 극의 형상을 결정하였다.

여기에서는 해석과정을 다음 3가지로 나누어 설명하고자 한다. 첫 번째로 영구자석의 착자 과정 중에 인가 자계의 계산 방법, 두 번째로 착자 과정 중에 인가 자계에 의한 자화값 계산 방법, 마지막으로 착자 후 영구자석에서 발생하는 자속밀도의 계산 방법을 설명한다.

3.2.1 FEM에 의한 인가 자계의 계산

착자 시스템의 등가회로는 그림 3과 같다. 따라서 그 등가회로와 착자 시의 전자기 현상으로부터 다음 3개의 방정식을 쓸 수 있다[11-12].

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}(t)) + \sigma \frac{\partial \vec{A}(t)}{\partial t} = \vec{J}_s(t) \quad (3)$$

$$\frac{M}{S} \int_s \frac{\partial \vec{A}(t)}{\partial t} ds + RI(t) + L_e \frac{d}{dt} I(t) + V_c(t) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} V_c(t) - \frac{1}{C} I(t) = 0 \quad (5)$$

여기에서, ν 는 자기저항률, \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜, σ 는 도전율, \vec{J}_s 는 도체에 공급되는 전류밀도, N 은 도체의 턴 수, l 은 도체 1턴의 길이, S 는 도체의 전체 면적, R 은 도체의 저항, I 는 도체에 흐르는 전류, L_e 는 착자 요오크의 엔드 와인딩 인덕턴스, V_c 는 콘덴서의 전압, 그리고 C 는 콘덴서의 충전 용량을 나타낸다.

이 3개의 식으로부터 시간에 따라 변화하는 미지수 $\vec{A}(t)$, $I(t)$, $V_c(t)$ 를 구할 수 있다. 또한, 앞에서 구한 자기 벡터 포텐셜 $\vec{A}(t)$ 로부터 영구자석 각 요소의 인가 자계 $\vec{H}(t)$ 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있게 된다.

$$\vec{H}(t) = \nu(\nabla \times \vec{A}(t)) \quad (6)$$

3.2.2 프라이자호 모델에 의한 잔류 자화값 계산

기존의 스칼라 프라이자호 모델의 경우에는 오직 1차원 해석만이 가능하다. 벡터 프라이자호 모델의 경우에는 다차원 해석이 가능하고, 또한 자화 계산 시 자계 방향의 시간에 대한 변화를 고려한 해석이 가능하다. 하지만 벡터 프라이자호 모델을 이용할 경우 해석 시간이 오래 걸리고, 강자성체의 경우에 자계 방향과 자화 방향 사이의 지연각 측정이 매우 어렵다는 단점이 있다[13].

또한 영구자석의 자화에 영향을 미치는 자계는 착자 요오크 코어를 포화시키는 자계보다 훨씬 크다. 즉, 영구자석의 자화에 영향을 주기 전에 착자 요오크의 코어는 포화되며, 영구자석의 자화에 영향을 주는 자계에서는 자계의 크기가 변화가 있을지라도 자계의 방향의 변화는 매우 작게 된다.

따라서 시간에 대한 자계의 방향 변화가 없다고 가정하였

으며, 스칼라 프라이자흐 모델을 이용한 자화값의 2차원 해석을 가능하게 하기 위하여 다음과 같이 해석하였다. 자계의 방향 변화가 무시되었으므로 자계의 방향과 자화의 방향은 일치하게 된다. 따라서 그림 10과 같이 3.2.1절에서 2차원 유한요소법으로 구한 영구자석 각 요소의 인가 자계의 방향과 자화의 계산 축을 일치시킴으로써, 영구자석의 각 요소마다 스칼라 프라이자흐 모델을 적용하여 자화값을 계산하였다. 이로부터 스칼라 프라이자흐 모델로 자화 방향의 2차원 해석을 가능하게 하였다.

즉 영구자석 각 요소의 자화의 방향은 그 요소의 인가 자계의 방향과 일치하게 되고, 자화의 크기는 자계의 크기로부터 다음 식을 이용하여 구할 수 있다[14].

$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \overline{\gamma_{\alpha\beta}} H(t) d\alpha d\beta \quad (7)$$

여기에서 α 와 β 는 각각 인가 자계 $H(t)$ 의 업과 다운 스위칭 필드를 나타내며, μ 는 가중함수, $\overline{\gamma_{\alpha\beta}}$ 는 히스테리시스 연산자를 나타낸다. 이로부터 인가자계의 변화에 따른 자화값을 계산할 수 있고, 잔류 자화값은 인가자계 $H(t)$ 가 0이 될 때의 자화값 $M(t)$ 이다.

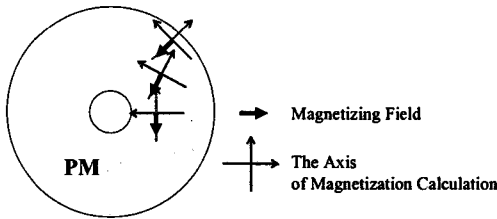


그림 10 스칼라 프라이자흐 모델의 적용 방법
Fig. 10 The magnetization calculation using the scalar Preisach model

3.2.3 FEM에 의한 착자 후 자속밀도 계산

공기 중에서 착자된 영구자석에 의한 자속밀도는 정자계의 2D FEM에 의해 해석되었으며, 그 후 영구자석 표면에서 홀소자의 위치만큼 떨어진 부분의 자속밀도를 추출하여 홀소자에 입력되는 자속밀도를 해석하였다.

3.2.2절에서 구한 영구자석의 잔류 자화값에 의한 유한요소법의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) = \nabla \times \nu \vec{M} \quad (8)$$

여기서 \vec{M} 은 영구자석의 잔류 자화값이다. 이 식으로부터 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 를 구할 수 있으며, 이로부터 다음 식을 이용하여 자속밀도 \vec{B} 를 구할 수 있다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (9)$$

구한 자속밀도 중 홀소자의 위치에서의 반지름 성분 자속밀도를 추출하여 홀소자에 입력되는 자속밀도를 해석하였

다. 마지막으로 추출된 자속밀도의 FFT 분석을 통하여 홀소자에 입력되는 자속밀도가 정현파에 얼마나 가까운지 또는 고조파 성분이 얼마나 포함되어 있는지를 확인하였다.

3.3 시뮬레이션 결과

그림 11은 실험계획법에 의해 최적 설계된 착자 요오크를 보여준다. 그림 12는 착자시스템의 설계 파라미터가 표 1과 같고 설계된 착자 요오크가 그림 11과 같을 때 착자 시스템의 콘덴서 충전 전압의 변화에 따라서 착자된 영구자석으로부터 발생하는 자속밀도의 분포이다. 이로부터 콘덴서 충전 전압이 약 300 V 이상일 때 영구자석으로부터 발생하는 자속밀도의 크기의 변화가 거의 없음을 확인할 수 있다. 그림 13은 설계된 착자 시스템의 콘덴서 충전전압과 전류의 변화를 나타낸다. 충전전압은 초기 충전전압 300 V에서 지수적으로 감소함을 알 수 있으며, 전류는 피크가 약 2700 A이고 통전 시간은 약 0.4 ms인 임펄스 전류가 발생함을 알 수 있다. 또한, 그림 14는 설계된 착자 시스템을 이용하여 영구자석을 착자하였을 때의 자화분포를 보여준다. 그림 14에서 화살표의 크기는 자화의 크기를, 화살표의 방향은 자화의 방향을 나타내고 있다. 착자된 영구자석 내의 잔류 자화의 크기는 위치에 따라 0.3 T로 거의 일정하지만 영구자석 각 부분마다 자화의 방향이 다른 것을 확인할 수 있었다. 그림 15는 착자된 영구자석에서 발생하여 홀소자에 입력되는 자속밀도를 보여준다. 그림 15로부터 홀소자에 입력되는 자속밀도가 이상적인 정현파와 거의 일치함을 알 수 있다.

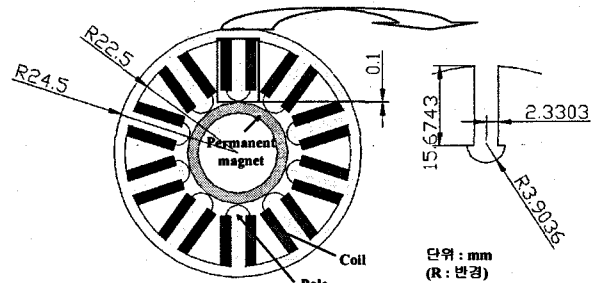


그림 11 설계된 착자 요오크
Fig. 11 The designed magnetizing fixture

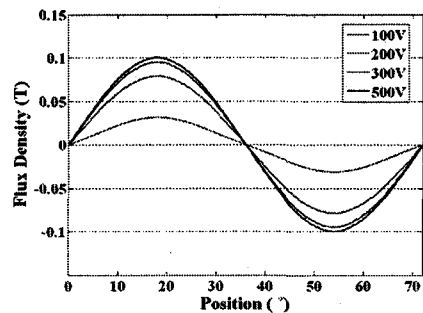


그림 12 Capacitor 충전전압에 따른 착자된 영구자석에서 발생하는 자속밀도
Fig. 12 The magnetic flux density from the magnetized permanent magnet as the charged voltage of capacitor

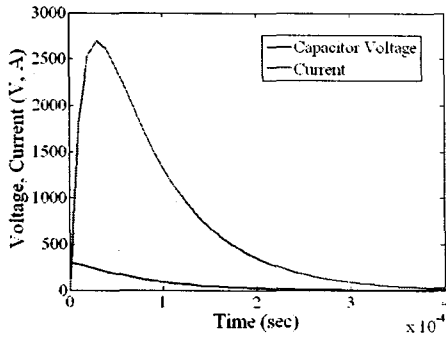


그림 13 착자 시 콘덴서 충전전압과 권선 전류
Fig. 13 The capacitor voltage and magnetizing current

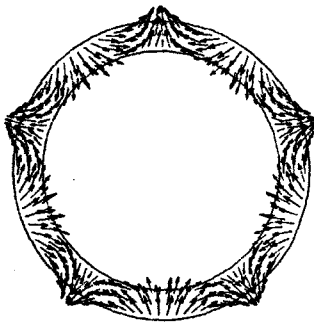


그림 14 착자된 영구자석의 자화분포
Fig. 14 The magnetization distribution in the magnetized permanent magnet

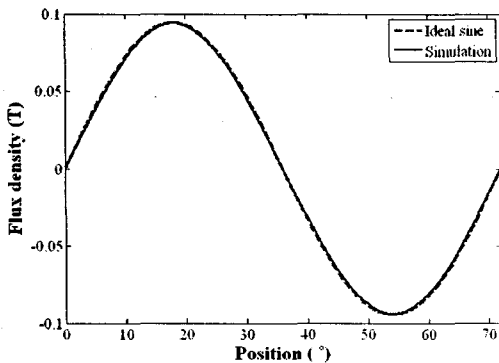


그림 15 착자된 영구자석에서 발생하는 자속밀도
Fig. 15 The magnetic flux density from the magnetized permanent magnet

4. 회전 위치 연산

이 장에서는 전기각 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 두 개의 정현파 신호로부터 회전 위치를 계산할 수 있음을 설명하고자 한다.

정현파 신호와 회전 위치는 일대일 대응 관계가 아니므로 그림 16과 같이 전기각 $\pi/2$ 마다 영역을 나누어 각 영역마다 일대일대응 관계를 만들었다. 즉, 각 영역에서 회전 위치와 신호의 크기는 일대일대응이 되어, 그 영역을 결정할 수 있으면 회전 위치를 계산할 수 있다.

회전 위치가 어느 영역 내에 있는 지를 결정하는 방법은 다음과 같다. P 를 극수라고 하면 영역 $D_k(t)$ 은 총 $2P$ 개로 나누어지게 되고, 따라서 영역 번호 $k(t)$ 는 1과 $2P$ 사이의 정수가 된다. 그림 16과 같이 각 영역 $D_k(t)$ 은 전기각 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 두 신호 $S_1(t)$, $S_2(t)$ 의 부호와 한 신호 $S_1(t)$ 의 zero crossing point의 누적 합에 의해 결정할 수 있다. 또한, 이 영역 $D_k(t)$ 로부터 회전 위치 $\theta(t)$ 는 $(k(t)-1) \times \pi/P$ 와 $k(t) \times \pi/P$ 사이의 값을 가짐을 알 수 있게 된다.

이 영역이 결정되면 회전 위치는 다음 식으로부터 계산할 수 있다.

$$\theta(t) = (-1)^{k(t)+n(t)} \times \frac{2}{P} \times \sin^{-1}\left(\frac{S_1(t)}{S_{1max}}\right) + \frac{2\pi}{P} \times (k(t) - n(t)) \quad (10)$$

여기서 $n(t)$ 는 $k(t)+1$ 을 2로 나누었을 때 몫이다. 예를 들면, 극수 P 가 4이고 필터링된 신호가 그림 16과 같다고 가정하면 시간 t_1 에서의 회전 위치 $\theta(t_1)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다. 영역은 총 8개로 나누어지게 된다. 시간 t_1 에서 zero crossing point의 누적 합은 1이 되고, 두 신호 $S_1(t)$, $S_2(t)$ 의 부호는 +, -가 되므로 회전 위치의 영역은 D_2 가 되어 회전 위치 $\theta(t_1)$ 는 $\pi/4$ 와 $\pi/2$ 사이의 값을 알 수 있게 된다. 여기에서 $k(t_1)=2$, $n(t_1)=1$, $S_1(t_1)=2$, $S_{1max}=5$ 이므로, 식 (10)으로부터 시간 t_1 에서의 회전 위치 $\theta(t_1)$ 는 1.365 radian이 됨을 알 수 있다.

그림 17은 위와 같은 방법을 이용하여 회전 위치를 계산한 시뮬레이션 결과이다. 여기에서 필터링된 두 신호의 고조파 성분은 없으며, 관성 모멘트는 없다고 가정하였다. 이 그림에서 위쪽 그래프는 시간에 대한 필터의 출력 신호를 나타내며 아래쪽 그래프는 그 신호로부터 회전 위치를 계산한 결과를 보여준다. 이 시뮬레이션으로부터 속도 (0 radian/sec, 0.8π radian/sec, 1.6π radian/sec)나 방향(CW, CCW)이 변할 지라도 회전 위치가 정확히 계산됨을 확인할 수 있다.

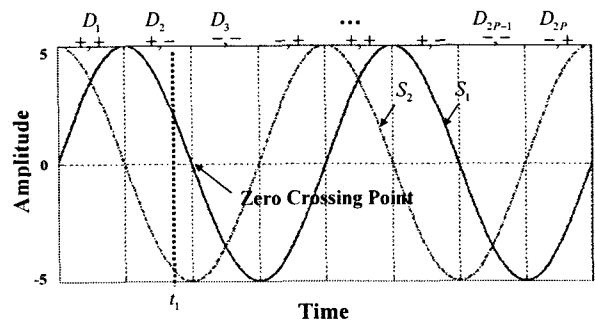


그림 16 전기각 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 두 정현파 신호
Fig. 16 The sinusoidal signals with a phase difference of $\pi/2$ electrical angle

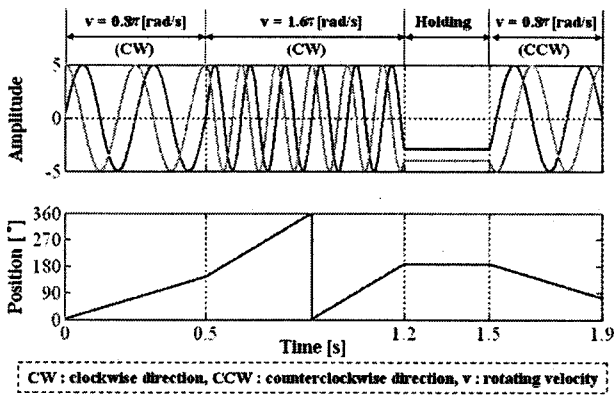


그림 17 회전 위치 연산 시뮬레이션 결과
 Fig. 17 Detection of the rotating position from two sinusoidal signals

5. 결 론

정현적으로 착자된 소수 극의 영구자석을 가지는 저가의 마그네틱 위치센서를 제안하였다. 즉, 제안된 마그네틱 위치센서는 영구자석의 회전 위치에 따라 발생하는 자속밀도를 정현파로 만들어 그로부터 회전 위치를 검출할 수 있다.

마그네틱 위치센서의 영구자석에서 발생하는 자속밀도를 정현파로 만들기 위해 착자 시스템을 설계하였다. 보다 정현파에 가까운 자속밀도를 얻기 위해 착자 요오크 극의 형상을 실험계획법에 의해 최적화하였다. 설계한 착자 시스템에 의한 영구자석의 착자 과정은 2차원 유한요소법과 프라이저흐 모델을 이용하여 해석하였으며, 또한 착자된 영구자석에서 발생하는 자속밀도는 2차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 시뮬레이션을 통하여 설계된 착자 시스템에 의해 착자된 영구자석으로부터 발생하는 자속밀도는 정현파에 매우 가까움을 확인할 수 있었다.

마지막으로 전기각 $\pi/2$ 의 위상차를 가지는 두 개의 정현파로부터 회전 위치 검출이 가능함을 시뮬레이션을 통해 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] Jon S. Wilson, "Sensor Technology Handbook," Newnes, 2005
- [2] Yin-Jao Luo, E-Tuen Hwang, and Shih-Ming Huang, "Multi-pole Magnetization of High Resolution Magnetic Encoder," Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 237-242, Oct. 1993.
- [3] Y. Kikuchi, F. Nakamura, H. Wakiwaka, H. Yamada, "Consideration of Magnetization and Detection on Magnetic Rotary Encoder Using Finite Element Method," Magnetics, IEEE Transaction, pp. 2159-2162, Mar. 1997.
- [4] 한갑수, 노용우, 유휘룡, 박대진, 구성자, 박승수, 조성호, 김동규, 박관수, 박상호, "이방성 자석을 이용한 비접촉식 센서," 공개특허 특2001-0069655, 대한민국 특허청, 2001. 7.
- [5] 이병호, 임채규, 임춘근, 손재현, 이기조, 류세현, 이종배, 정인성, "비접촉식 포지션 센서," 등록특허 10-0468789, 대한민국 특허청, 2005. 1.
- [6] Rulph Chassaing, "Digital Signal Processing and Applications with the C6713 and C6416 DSK," Wiley, 2005.
- [7] Edward P. Furlani, "Permanent Magnet and Electromechanical Devices," Academic Press, 2001.
- [8] Z. Q. Zhu, D. Howe, "Halbach Permanent Magnet Machines and Applications: a Review," Electr. Power Appl., IEE Proceedings, pp. 299-308, July, 2001.
- [9] K. Atallah, D. Howe, "The Application of Halbach Cylinders to Brushless AC Servo Motors," Magnetics, IEEE Transaction, pp. 2060-2062, July, 1998.
- [10] 박상현, "현대실험계획법," 민영사, 2002.
- [11] Joao Pedro, A. Bastos, Nelson Sadowski, "Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods," Marcel Dekker, Inc, 2003.
- [12] Sheppard J. Salon, "Finite Element Analysis of Electrical Machines," Kluwer Academic Publishers, 1995.
- [13] Sunki Hong, Sangwook Lee, Jongsoo Won, "Properties of the Vector Hysteresis Model for Unoriented Magnetic Materials," Magnetics, IEEE Transaction, pp. 1833-1836, May. 1995.
- [14] Isaak D. Mayergoyz, "Mathematical Models of Hysteresis," Magnetics, IEEE Transaction, pp. 603-608, Sep. 1986.

저 자 소 개



정 승 호 (鄭承鎬)

1976년 11월 3일생. 2004년 한양대 전자공학 졸업. 2006년 동 대학원 전자전기 제어계측공학과 졸업(석사).

Tel : 031-409-1277

Fax : 031-409-1277

E-mail : jsh04@hanyang.ac.kr



류 세 현 (柳世鉉)

1970년 11월 16일생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자전기 제어계측공학과 졸업(공학박). 1999년 1월~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 선임 연구원

Tel : 032-621-2848

Fax : 032-621-2855

E-mail : rhyush@keti.re.kr



권 병 일 (權丙一)

1956년 2월 1일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학박). 1990년 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국기계연구소 자기 부상 열차 사업단 선임연구원. 2001년 University of Wisconsin-Madison 객원교수. 1989년 10월~현재 일본 와세다 대학 이공학 연구소 객원연구원. 1991년~현재 한양대 전자컴퓨터공학부 교수

Tel : 031-400-5165

Fax : 031-406-5073

E-mail : bikwon@hanyang.ac.kr