

마그네틱 위치 센서용 영구자석의 착자 시스템 설계

정승호*, 이철규*, 권병일*

*한양대학교 대학원

Design of the Magnetization System of the Permanent Magnet in Magnetic Sensors

Seung Ho Jeong*, Chul Kyu Lee*, Byung Il Kwon*

*Graduated School of Hanyang University

Abstract – A magnetic position sensor is a apparatus that detect the rotating position by measuring the value of the flux density of the rotating position. In this paper, the magnetization system of the permanent magnet in the magnetic position sensor which detects the rotating position was designed. The permanent magnet was magnetized for the flux density into the hole element to be sinusoidal distribution according to the rotating position. To make the sinusoidal distribution of flux density, the magnetization values according to the position in permanent magnet were varied by adjusting the air gap between the pole of the magnetization fixture and the surface of the permanent magnet.

소자와의 거리만큼 떨어진 부분의 반지름 방향 자속밀도의 크기가 위치에 따라 정현파로 분포하므로, 영구자석이 회전하면서 고정된 홀소자에 입력되는 자속밀도의 크기를 측정하여 회전 위치를 검출할 수 있다.

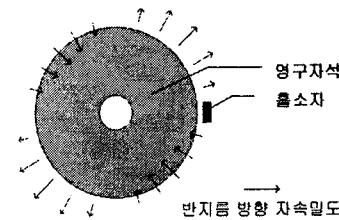


그림 1. 마그네틱 위치 센서의 위치 검출 방법

2.2 해석할 영구자석 사양

표 1은 해석할 마그네틱 위치센서용 영구자석의 재질과 크기를 나타낸다. 본 연구에서는 등방성 Ferrite 영구자석을 사용하였다.

표 1. 영구자석 재질 및 크기

재 질	Ferrite
내 경	4 [mm]
외 경	20 [mm]
두께	4 [mm]

그림 2는 VSM 장비로 측정한 해석할 Ferrite 영구자석의 1차 전이곡선의 데이터 값으로, 이 데이터는 프라이저 모델의 분포함수를 계산하기 위하여 사용된다[2]. 잔류 자속밀도가 약 0.075 [T]이고 보자력이 200 [kA/m]인 영구자석을 사용하였다.

1. 서 론

현대 사회의 자동화 설비의 확장으로 인하여 산업용 로봇 및 각종 수치 제어 공작기계, 가정용 기기 등 모든 분야에서 서보 전동기는 필수적인 위치로 자리 잡고 있다. 이러한 서보 전동기의 속도 및 토크를 제어하기 위해서는 회전자의 속도뿐만 아니라, 회전자의 위치 정보가 요구된다.

최근 전동기 회전자의 정밀한 위치 및 속도의 검출을 위해 레զ버나 엔코더 등이 사용되고 있다. 하지만 이 경우 고가로 인한 경제적인 문제점이 있다. 그래서 최근에는 정밀한 위치 검출과 비용 절감을 위하여 마그네틱 위치 센서가 연구되고 있다.

본 논문에서는 마그네틱 위치 센서용 영구자석의 착자 시스템을 연구하였고, 착자 해석 방법으로 2차원 유한요소법과 자성재료의 히스테리시스 특성을 모델링하는 프라이저 모델을 사용하였다[1-3].

2. 본 론

2.1 마그네틱 위치 센서

본 논문에서는 위치 검출을 위해 영구자석에 의해 발생하여 홀소자로 입력되는 자속밀도 값이 위치에 따라 정현파로 분포로 나타나게 하였고, 이를 위해 영구자석의 형상을 변화시키는 대신 영구자석의 자화값을 변화시키는 저가형 마그네틱 위치센서용 영구자석의 착자 시스템 설계를 연구하였다.

영구자석 표면과 홀소자와의 거리는 1 [mm]로 정하여, 영구자석 표면에서 1 [mm] 떨어진 거리에서 위치에 따라 반지름 방향 자속밀도가 정현적인 파형이 나타날 수 있도록 착자 시스템을 설계하였다.

그림 1은 본 논문에서 연구한 마그네틱 위치 센서의 위치 검출 방법을 보여주고 있다. 영구자석 표면에서 홀

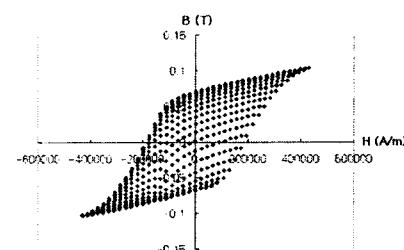


그림 2. 1차 전이곡선 데이터

2.3 착자 해석 방법

착자 과정에 대한 유한요소 전자기 지배방정식과 회로 방정식은 각각 식 (1), 식 (2)와 같다[1].

$$\nabla \times (\nu(\nabla \times A)) = -J_0 + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} + (R + R_c) \frac{dQ(t)}{dt} + L_0 \frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{Q(t)}{C} - \frac{Q_0}{C} \quad (2)$$

여기서, ν 는 자기저항률, A 는 자기 벡터 포텐셜, J_0 는 권선의 전류밀도, σ 는 도전율, Φ 는 자속, R , L_0 는 착자기 외부회로의 저항 및 누설 인덕턴스, R_c 는 권선의 저항, Q 는 콘덴서에서 방전되는 전하량, Q_0 는 콘덴서의 초기 충전 전하량이다. 이 식을 이용하여 자기 벡터 포텐셜 A 와 전하량 Q 를 구할 수 있고, 그것으로부터 자계의 세기 H 를 구할 수 있다.

앞에서 측정한 1차 전이곡선으로 분포함수 $P(h_a, h_b)$ 를 구할 수 있고, 이 분포함수 $P(h_a, h_b)$ 와 유한요소 해석을 통하여 얻은 자계의 세기 H 를 이용하여 자화값 M 을 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다[2].

$$M(t) = \text{dint}_{h_a \geq h} P(h_a, h_b) r(h_a, h_b) H(t) dh_a dh_b \quad (3)$$

M 은 자화값, $P(h_a, h_b)$ 는 분포함수, $r(h_a, h_b)H(t)$ 는 히스테론, h_a, h_b 는 스위칭 필드를 나타낸다.

즉, 프라이자흐 모델과 유한요소법을 이용하면 영구자석의 위치마다 자화값을 계산할 수 있다.

그림 3은 인가자계에 따라 자화값을 계산하는 순서도이다. 각 시간 스텝마다 인가자계의 현재 값과 이전 값을 비교하고 그에 따라 자화값을 계산하여, 각 스텝에서의 인가자계와 자화값을 저장하는 방식이다.

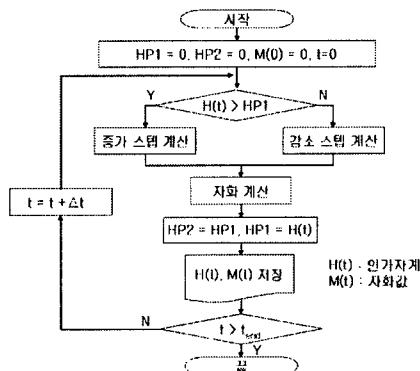


그림 3. 인가자계에 따른 자화값 계산 순서도

이 자화값으로, 착자 후 영구자석에 의한 자속밀도를 식 (4)를 이용하여 2차원 유한요소법으로 구하였다[3].

$$\nabla \times \nu B = \nabla \times (\nu \mu_0 M) \quad (4)$$

여기서, ν 는 자기저항률, B 는 자속밀도, μ_0 는 자유 공간에서의 투자율이다.

2.4 착자 시스템 설계

착자 요오크의 형상과 착자 자계의 세기에 의해 착자 후 영구자석에 의해 발생하는 자속밀도 분포가 달라진다. 본 연구에서는 위치에 따라 홀소자에 입력되는 자속밀도 분포가 정현파가 되도록 시행착오를 통하여 최적의 착자 요오크의 형상과 착자기 회로를 설계하였다.

2.4.1 착자 요오크 설계

= 영구자석에 의해 홀소자로 입력되는 자속밀도를 정현적으로 하기 위하여 착자 요오크의 극과 영구자석 사이의 공극을 다르게 하는 방법을 선택하였다. 즉, 최소 공극인 부분에서 착자 후 영구자석에 의한 최대 자속밀도가 발생하고, 공극이 커질수록 자속밀도가 작아지도록 설계하였다.

그림 4는 착자 요오크 형상과 영구자석의 1/8, 즉, 0°에서 45° 까지 착자 요오크 극의 형상에 따라 착자 자속이 어떻게 변하는지 보여주고 있다. 위치에 따라 착자 요오크의 극과 영구자석 표면 사이의 공극의 변화를 (c)와 같이 줄 경우, 착자 후 영구자석에 의해 발생하는 자속밀도의 반지를 성분 크기가 정현적으로 발생할 것을 예상할 수 있으므로 극의 형상을 이 형태로 선택하였다.

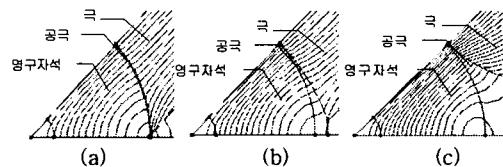


그림 4. 착자 요오크 극의 형상에 따른 자속선도

- (a) 위치에 따라 공극 변화가 없는 경우,
- (b) 위치에 따라 공극 변화가 작은 경우,
- (c) 위치에 따라 공극 변화가 큰 경우

구체적인 설계방법은 다음과 같다. 착자 요오크의 극과 영구자석 사이의 최소 공극의 길이는 제조 가능한 최소 값으로 설정하였다. 착자 요오크 극은 영구자석 전체가 원하는 자화값으로 충분하게 착자되도록 설정하였고, 요오크의 폭은 자기 포화가 일어나지 않도록 설정하였다. 그리고 극의 길이는 슬롯 점적률을 고려하여 설정하였다. 그림 5는 각각 최종 설계된 착자 요오크의 형상을 나타내고 표 2는 착자 요오크의 세부 치수를 나타낸다.

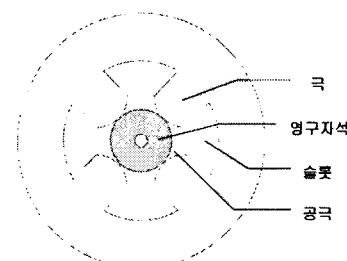


그림 5. 착자 요오크의 형상

표 2. 착자 요오크 설계 치수

최소 공극의 길이	0.1 [mm]
극 폭	14 [mm]
극 길이	14 [mm]
극 표면의 반경	10 [mm]

요오크 폭	15 [mm]
축 방향 길이	4 [mm]

2.4.2 축자기 회로 설계

그림 6은 콘덴서 방전형 펄스 축자기와 축자 요오크를 전기 등가회로로 나타낸 것이다. 콘덴서 뱅크에 축적된 에너지를 방전시켜 축자 요오크의 권선에 임펄스 전류가 인가된다.

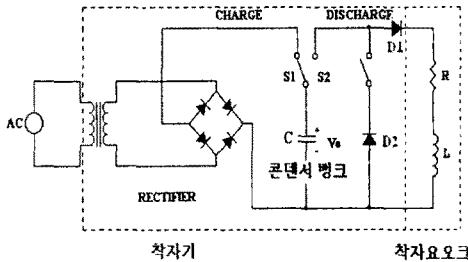


그림 6. 축자 시스템 등가회로

자계의 세기에 따라 영구자석의 자화값이 변하므로 적정한 전류의 선정이 요구된다. 축자 요오크 권선에 흐르는 전류는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin \omega t, \quad \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}, \\ &\quad (4L \geq CR^2) \\ i(t) &= \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t}, \quad (4L = CR^2) \\ i(t) &= \frac{V_0}{\omega L} e^{-\frac{R}{2L}t} \sinh \omega t, \quad \omega = \sqrt{-\frac{1}{LC} + (\frac{R}{2L})^2}, \\ &\quad (4L \leq CR^2) \quad (5) \end{aligned}$$

여기서, i 는 권선 전류, V_0 는 충전 전압, R 은 권선 저항, L 은 축자 시스템의 총 인덕턴스, C 는 콘덴서의 정전용량이다.

축자 시스템의 총 인덕턴스와 권선 저항은 권선의 턴수와 권선의 직경에 따라 변화한다. 따라서 전류는 권선의 턴수, 충전 전압, 권선의 직경, 콘덴서의 정전용량에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

구체적인 설계 방법은 다음과 같다. 축자기가 공급해야 할 에너지가 영구자석 축자에 필요한 에너지와 손실의 합보다 커야 하므로, 이를 고려하여 충전전압과 정전용량 값을 선정하였다[1]. 턴 수는 권선 저항과 슬롯 접적률, 인덕턴스를 고려하여 선정하였고, 권선 직경은 슬롯 접적률과 권선 저항을 고려하여 선정하였다. 표 3은 이를 바탕으로 유한요소 해석을 통해 설계된 축자기 회로 설계 값이다.

표 3. 축자기 회로 설계 값

충전 전압 (V_0)	100 [V]
정전용량 (C)	500 [μF]
턴 수	10 [Turns]
권선 직경	1.6 [mm]

2.5 해석 결과

그림 7은 앞에서 설계된 축자 시스템을 시뮬레이션 한 결과 파형(실선)과 정현파(점선)를 비교한 그래프로, 영구자석 표면에서 1 [mm] 떨어진 부분의 반지름 방향 자속밀도 값을 위치에 따라 나타낸 것이다. 정현파에 매우

가깝게 나온 것을 알 수 있다.

그림 8은 FFT 분석 결과로써, 전체 고조파 성분의 합을 1로 보고 각 고조파 성분의 크기를 나타낸 것이다. 분석 결과 기본파 성분이 90.03 [%]가 되는 것을 알 수 있었다.

기본파 이외의 고조파 성분을 제거하기 위해 센서 회로에 필터를 설치한다면 더 정밀한 위치 제어가 가능할 것으로 예상된다.

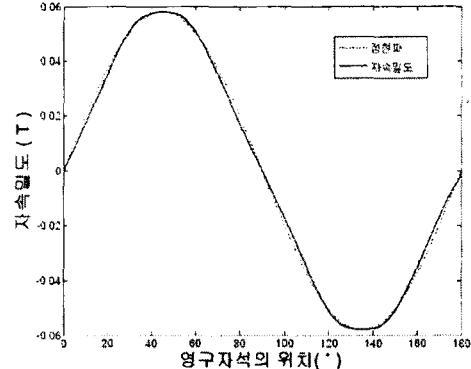


그림 7. 영구자석의 위치에 따른 반지름 방향 자속밀도

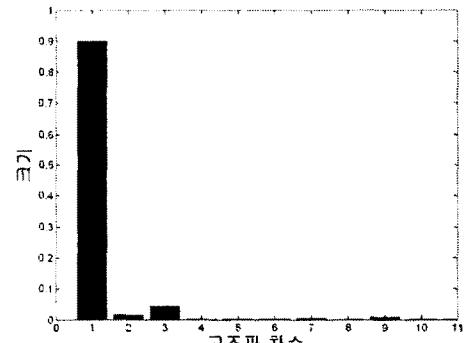


그림 8. FFT 분석 결과

3. 결 론

저가형 위치센서 개발을 위해, 기존 엔코더나 레.AddColumn 가 아닌 마그네틱 위치 센서를 선택하였다. 마그네틱 위치 센서의 영구자석의 형상을 변화시키지 않고, 영구자석의 자화값을 위치에 따라 변화시켜 홀소자에 입력되는 자속밀도의 값이 정현파가 되도록 축자 시스템을 설계하였다. 영구자석의 표면과 축자 요오크 극 사이의 공극을 조정하여 축자 요오크를 설계하고, 시뮬레이션을 반복 실행하여 적절한 자계 세기를 줄 수 있는 축자기 회로를 설계하였다.

시뮬레이션 방법은 2차원 유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용하여, 축자 후 영구자석의 잔류 자화값을 계산하였으며, 또한 그 잔류 자화값에 의해 발생하는 자속밀도를 계산하였다.

향후 축자 시스템을 실제 제작하여 실험 결과 값과 시뮬레이션 결과 값과 비교할 예정이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이철규, “영구자석 매입형 3상 유도동기 전동기의 축자 시스템 설계와 자화 분포 해석”, 한양대학교 박사학위논문, 2004
- [2] 홍선기, “동방성 성장재료에서의 일반화된 벡터 히스테리스 모델링”, 서울대학교 박사학위논문, 1993
- [3] S. J. Salom, “Finite Element Analysis of Electrical Machines”, 1995