

Claw-pole을 갖는 PM형 스텝 모터의 과도응답 특성 해석

안지현¹, 김경민¹, 박승찬¹, 류세현², 정인성²¹동양대학교, 전자부품연구원²

Transient Response Characteristics Analysis of Permanent Magnet Type Stepping Motor with Claw Poles

Ji-Hyun Ahn¹, Kyung-Min Kim¹, Seung-Chan Park¹, Se-Hyun Rhyu², In-Sung Jung²
¹Dongyang University, ²Korea Electronics Technology Institute

Abstract – This paper analyzes static and transient response characteristics of a permanent magnet type stepping motor with claw poles using three-dimensional finite element method. The outer diameter of the stepping motor to be analyzed is approximately 6 mm. In this paper we analyzes only 2 poles of the stepping motor, which has 10 magnetic poles made up of NdFeB material, using periodic boundary condition. We clarify transient response and static torque characteristics using Maxwell 3D and Matlab Simulink.

1. 서 론

PM(Permanent Magnet)형 스텝 모터는 open-loop로서 정도 높은 위치 제어를 할 수 있으며 주파수에 비례한 회전속도로 광범위한 속도 제어 등의 장점이 있어 위치 제어용 액츄에이터로서 용이하다. 그러나 구조적으로 3차원의 자기 경로를 형성하기 때문에 2차원 해석에 의한 특성계산은 불가능하기 때문에 3차원 유한요소법에 의한 정확한 설계 및 해석이 필요하다.

본 논문에서는 직경이 6mm이고 10극으로 축자된 PM형 스텝 모터를 3D 유한요소법(Finite Element Method)에 의한 상용 프로그램인 Maxwell 3D를 사용하여 모터의 정특성과 Matlab Simulink를 이용하여 과도 응답 특성을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

일반적인 claw-pole을 갖는 PM형 스텝 모터는 원주방향으로 자화된 영구자석 회전자와 권선을 감는 고정자로 구성되어진다. 스텝 모터에서 하나의 입력펄스에 대한 스텔 각은 회전자 자극수와 고정자의 치수에 따라 결정되어진다. 본 논문에서는 A·B 스택이 각 10개의 치로 구성되어 18°의 스텔 각을 가진다. 표 1은 해석 모델의 사양을 나타내고 있다. 그림 1은 외경 6mm급의 claw-pole을 갖는 PM형 스텝 모터의 모델을 나타낸다. 3차원 유한요소법을 적용하여 효율적인 해석을 위해 전체 모델의 1/5인 2극만을 해석하였다[1]. 해석 모델의 영구자석의 재질은 NdFeB로서 10극으로 축자되어 있으며, 영구자석 내부의 shaft는 비자성체이다.

실제로 축자 된 후의 잔류자속밀도는 0.45[T] 이상이 되지 않을 것으로 예상되어 3차원 유한요소 해석시 잔류자화를 358,000[A/m]로 가정하여 해석하였다. 또한 자화벡터의 분포는 반경 방향 성분을 갖는 것으로 가정하였다. 본 논문에서는 해석의 정확성과 계산시간의 단축을 위하여 적응 요소분할법(adaptive mesh)을 사용하였다. 최종 mesh의 요소수는 약 49,000개로 증가되었다. 또한 칠심의 자기적 비선형 특성을 고려하기 위하여, B-H 곡선을 고려하여 해석하였다.

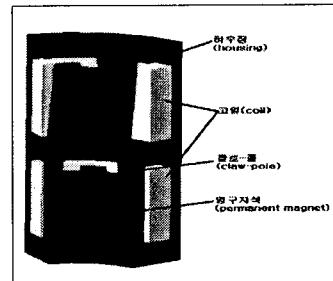


그림 1. Claw-pole을 갖는 PM형 스텝 모터 모델
Fig. 1. PM type stepping motor with claw-poles model

표 1. Claw-pole을 갖는 PM형 스텝 모터의 모델 사양
Table. 1. Specification of the PM type stepping motors with claw-poles

설계 변수명	설계 치수	단위
모터 외경	6.0	mm
모터 길이	7.0	mm
영구자석 자극수	10	poles
영구자석 잔류자화	0.45	T
코일 턴 수	350	Turn
최대 전류	70	mA
step angle	18	degree

2.2 유한요소법 해석 결과

해석 모델의 경우 2상 바이폴라(Bipolar) 여자 방식으로 각 스택의 코일에 70mA를 각각 인가하여 특성 해석을 하였다. 그럼 2는 2상 바이폴라 구동방식의 회로를 나타낸다. 모노파일러 권선권으로 8개의 스위치가 필요하고 브리지 회로로 대각선의 Tr1, Tr4와 Tr2, Tr3가 교대로 된 온 되어지는 회로이다. 그림 3은 스텝 모터의 1상과 2상 여자전류 순서도를 나타낸다. 1상여자방식일 경우 A-B-A-B 순서로 여자되고 2상여자방식일 경우 A-B-A-B-A-B 순서로 여자되어진다[2].

그림 4는 스텝 모터의 2상여자시의 홀딩토크(holding torque), 그리고 디텐트 토크(detent torque)를 보여준다. 각 상의 여자코일 전류가 70mA인 상태에서 회전자의 회전 각도에 따른 정 토크를 계산한 것이다. 회전자를 6도씩 회전한 경우에 대하여 2상여자시 홀딩 토크는 약 2.6 [gf·cm]로 예상되어진다. 전류를 인가하지 않고 계산하는 디텐트 토크 경우에는 약 0.26 [gf·cm]정도로 예상되어진다. 그림 5는 스텝 모터의 1상여자일 경우의 홀딩 토크이다. A상 코일에만 전류를 인가하여 해석한 홀딩 토크는 약 2.02 [gf·cm]의 결과를 나타낸다. 그림 6는 2상여자시의 claw-pole 및 yoke에서의 자속밀도 벡터도이다. 그림에서 보듯이 claw-pole의 끝곡 지점 근방과 치 끝쪽 영역에서 자기적 포화가 일어나고 있음을 알 수 있다.

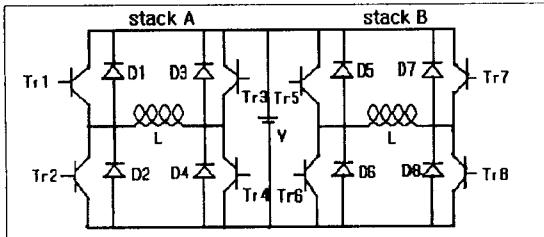


그림 2. 2상 바이풀라 구동회로

Fig.2. Bridge driver scheme for a two-phase stepping motor

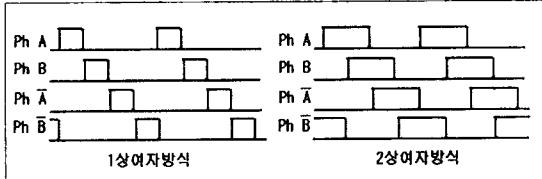


그림 3. 스텝 모터의 여자 순서도

Fig. 3. Excitation current waveform to a stepping motor

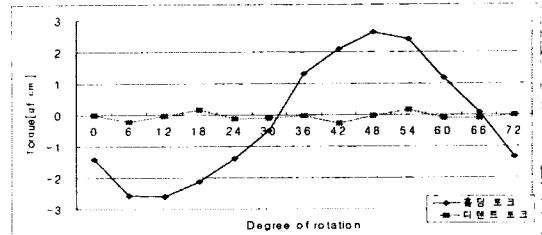


그림 4. 2상여자시 훌딩 토크 해석 결과그래프(여자전류=70mA)

Fig. 4. Holding torque characteristics of two-phase on

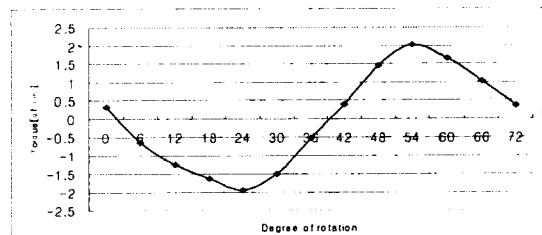


그림 5. 1상여자시 훌딩 토크 해석 결과그래프(여자전류=70mA)

Fig. 5. Holding torque characteristics of one-phase on

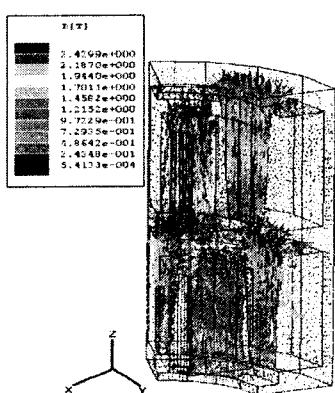


그림 6. 자속 벡터 분포도

Fig. 6. Distribution of magnetic flux vector

2.3 스텝 모터의 과도 응답 특성

본 논문에서는 스텝 모터의 과도 응답 특성에 대하여 고찰하였다. 스텝 모터에 발생되어지는 토크는 각각의 권선에 흐르는 전류에 의해 결정되어진다.

각 상에 대한 역기전력은 식(1)과 식(2)를 다음과 같이 사인함수로 표현할 수 있다[3].

$$e_1 = wK_E \sin(p\theta) \quad (1)$$

$$e_3 = -wK_E \sin(p\theta) \quad (2)$$

$$e_2 = -wK_E \cos(p(\theta - \delta)) \quad (3)$$

$$e_4 = wK_E \cos(p(\theta - \delta)) \quad (4)$$

w 는 모터의 각속도이며, θ 는 회전각, p 는 극쌍수이다. K_E 는 역기전력 상수이고, 모든 상에 대해 동일하다고 가정한다. 식(2)에서는 stack B의 기계적 조립 오차 δ 를 포함한다. 여기서 K_E 를 유도하는 방법은 $\frac{T}{\theta}$ 의 그래프의 기울기로 근사화 하여 구할 수 있다.

$$T_1 = -K_E I_o \sin(p\delta\theta) \quad (5)$$

여기서 회전자 위치 $\delta\theta$ 가 영점 근방에 있다고 가정하면 $\sin(p\delta\theta) \approx p\delta\theta$ 이라 정의한다. 따라서 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$T_1 = -K_E p I_o \delta\theta \quad (6)$$

여기서 $K_E = \frac{T_1}{p I_o \delta\theta}$ 가 된다. 인가 전압 V_m 과 전류 i_m 권선 저항 R_m 사이의 관계는 식(5)와 같이 회로방정식으로 유도되어진다.

$$\frac{di_m}{dt} + R_m i_m = V_m - e_m \quad (7)$$

여기서, $m = 1, 2, 3, 4$ (phase number)이다.

모터 출력 토크 T_n 은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$T_n = K_E \sin(p\theta_{n-1})(I_{1n} - I_{3n}) - \cos(p(\theta_{n-1} - \delta))(I_{2n} - I_{4n}) \quad (8)$$

운동방정식에 의한 속도와 위치 연산을 위해

$$T = J_M \frac{dw}{dt} + Dw + T_L + T_F + T_C \quad (9)$$

식(7)에서 J_M 은 관성 모멘트이고, D 는 전기기계적 마찰력, T_L 은 부하 토크를 T_F 는 베어링에 의한 정지 마찰력, T_C 는 디센트 토크를 나타낸다.

위 식(7)에서 구해진 토크로부터 속도와 회전자의 회전각을 구하면 식(8)과 식(9)와 같이 표현되어진다.

$$w_n = \frac{J_M w_{n-1} + (T_n - T_L - T_F - T_C)_n \Delta t}{J_M + D \Delta t} \quad (10)$$

$$\theta_n = \theta_{n-1} + w_n \Delta t \quad (11)$$

유한요소법으로 구한 상수 값을 가지고 Matlab Simulink에 적용하여 과도 응답 특성을 고찰하였다.

그림 7는 Matlab Simulink를 사용하여 구현되어진 구동 블록도를 나타낸다. 표 2는 모터 파라미터 값들을 나타낸 표이다. 파라미터 값들은 Maxwell 3D에서 해석한 값들을 유도하여 계산한 값이다. 실제 모터의 파라미터 값들을 구하기는 매우 어렵기 때문에 프로그램으로 계산하여 구한다. 그림 8-그림 13은 1상과 2상여자시 시뮬레이션한 각각의 전류 파형과 토크 파형, 스텝 응답을 나타낸 그래프이다.

표 2. 모터의 파라미터
Table 2. Motor parameters

파라미터	파라미터값	단위
Supply DC voltage	5	V
Self-inductance	0.97	mH
Coil resistance	78	Ω
Motor inertia	25×10^{-9}	kgm^2
Detent torque	2.6×10^{-6}	N·m
Back-emf constant(K_E)	0.002828	Vs/rad
Damping constant	0.0000089	Nms/rad
Friction torque	1.2×10^{-7}	Nm
Pairs of poles	5	
Step angle	18	degree
Step rate	20	pps

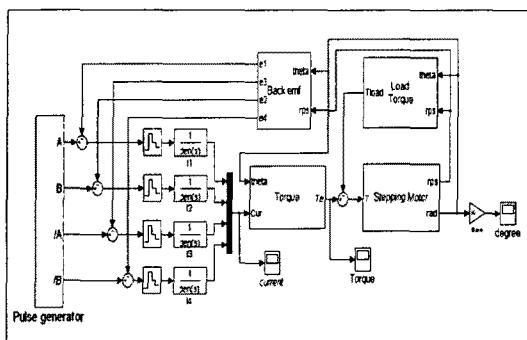


그림 7. Matlab Simulink로 구현된 스텝모터 구동 모델
Fig. 7. Drive model of stepping motor using Matlab Simulink

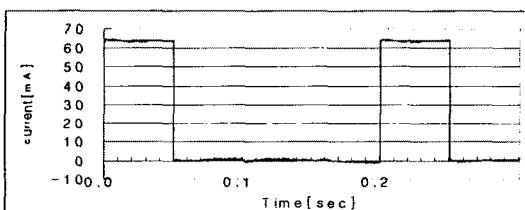


그림 8. 1상여자 구동방식 (phase A)
Fig. 8. One-phase excitation current waveform

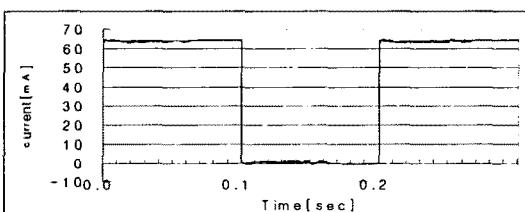


그림 9. 2상여자 구동방식 (phase A)
Fig. 9. Two-phase excitation current waveform

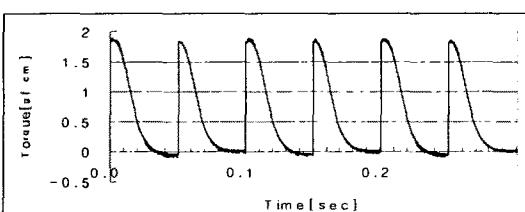


그림 10. 1상여자 토크 특성
Fig. 10. Torque characteristic (one-phase on)

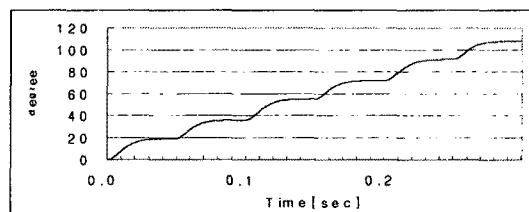


그림 11. 1상여자 스텝 응답 특성
Fig. 11. Step Response characteristic (one-phase on)

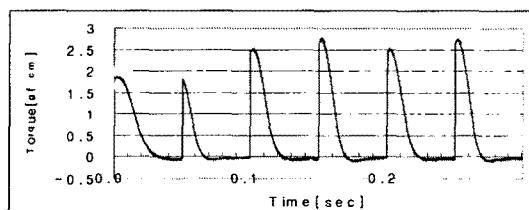


그림 12. 2상여자 토크 특성
Fig. 12. Torque characteristic (two-phase on)

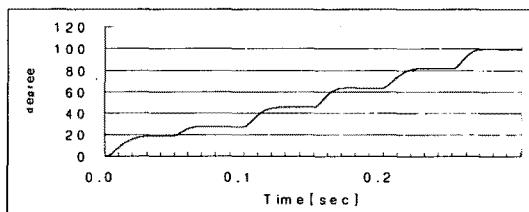


그림 13. 2상여자 스텝 응답 특성
Fig. 13. Step response characteristic (two-phase on)

3. 결 론

본 논문에서는 외경 6mm급으로 설계되어진 소형의 claw-pole을 갖는 PM형 스템핑 모터를 3차원 유한요소법을 이용하여 모터의 정특성을 검토하였고, 모델링된 스템핑 모터의 과도 응답 특성을 Matlab Simulink를 이용하여 1, 2상여자시의 입력 전류, 토크 그리고 스텝 응답 특성을 살펴보았다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 산업기술개발사업의 기술개발과제.(과제번호:ETI-RD-2004018)

[참 고 문 헌]

- [1] Tekeo Isthikawa, Ryuichi Takakusagi, "Static Torque Characteristics of Permanent Magnet Type Stepping Motor with Claw poles", IEEE Transaction on Magnetics, vol 36, No 4, pp.1854-1857, 2000
- [2] 류세현, 정인성, 성하경, 권병일, "Claw-Pole을 갖는 스템핑 모터의 소형화에 관한 연구", 대한전기학회논문집, pp.929-931, 2004
- [3] Tatsuya Kikuchi, Takashi Kenjo, "Developing an Educational Simulation Program for the PM Stepping motor", IEEE Transaction on Magnetics, vol 45, No.1, pp.70-78, 2002