

스캐너용 Claw-pole PM형 스텝핑 모터의 설계 방법

유용민, 오상열, 김 직
(주)모아텍

Design Method of the Claw-pole PM Stepping Motor for Scanner

Yong-Min You, Sang-Yeul Oh, Jick Kim
MOATECH

Abstract - The claw-pole PM(Permanent Magnet) stepping motor has the advantage of the positioning machine because of a relatively little step angle, facility of control, and detent torque characteristics. Although the research about this motor has been progressed, it was difficult to analyze because of three-dimensional magnetic circuit. This paper proposed a design method of the claw-pole PM stepping motor using 3D-FEA. We established design variables that have an important effect upon the characteristics of the motor, and then performed analysis of the static and the dynamic characteristics. We also manufactured the test products and practiced the performance tests for verification of the analysis results.

1. 서 론

치극(claw-pole)을 갖는 영구자석형 스텝핑 모터는 OA기기, 가전기기, 정보기기 및 자동차 부품용으로 활용 분야가 점점 확대되고 있다. 또한 비교적 미세한 스텝각으로 구동할 수 있고, 제어가 용이하며, 회전자에 영구자석을 배치하여 자기 유지 토크를 가짐으로써 위치결정용 장치로서의 큰 장점을 가지고 있다. 이미 치극을 갖는 영구자석형 스텝핑 모터에 대한 연구가 진행되고 있지만 [1]-[2], 모터의 3차원 자기회로 구조로 인하여 해석시 큰 어려움을 겪고 있다.

본 연구에서는 3차원 유한요소 해석을 이용한 스캐너용 PM형 스텝핑 모터의 설계 방법을 제안하였다. 모터 특성에 큰 영향을 미치는 요소들을 설계변수로 설정하여, 모터의 정특성 및 동특성 해석을 수행하였다. 또한 설계 결과의 검증을 위하여, 시제품 제작 후 성능 평가를 실시하였다.

2. 본 론

2.1 개발 목표 사양

본 연구는 스캐너용 슬리핑 모터의 신규 개발을 그 목적으로 하였으며, 개발 모델의 목표 사양은 일본 선진사 모델의 벤치마킹 후 그 성능 이상으로 설정하였다. 또한 선진사 모델 대비 우수한 성능의 확보와 고객의 요구 사양에 맞는 다양한 특성의 제품의 구비를 위해, 요크의 재질로써 전기아연도금 강판(SECC)과 무방향성 전기강판(S23)을 해석 및 시제품 제작에 각각 적용하였다.

표 1 개발 목표

구 분	단 위	목표 사양
홀딩 토크	gf·cm	170
풀-아웃 토크	gf·cm	150(1,800[pps])
최대 응답 / 자기동 주파수	pps	8,000 / 800

2.2 설계 과정

2.2.1 기본 사양

그림 1은 치극을 가지는 영구자석형 스텝핑 모터를 나타내고 있다. 회전자는 다극 착자된 영구자석, 스페이서와 샤프트로 구성되어 있으며, 고정자는 두개의 스택으로 구성되어 있으며 각 스택은 각각 하나의 요크와 프레임 그리고 코일로 구성되어 있다. 또한 각 상의 치극은 코일에 전류가 인가됨에 따라 N극과 S극으로 순차적으로 변화하며, 극 피치의 1/2만큼 서로 어긋나 있다. 따라서 다극 착자된 영구자석을 가진 회전자는 고정자 코일에 전류가 인가됨에 따라 변화하는 고정자의 치극에 의해 발생하는 자속과의 상호작용에 의해 회전하게 된다. 본 해석 모델의 경우 A·B 두개의 스택이 각각 24쌍의 치극을 가지고 있으므로, 1회전당 96개의 스텝(스텝각: 3.75[°])으로 회전하게 된다.

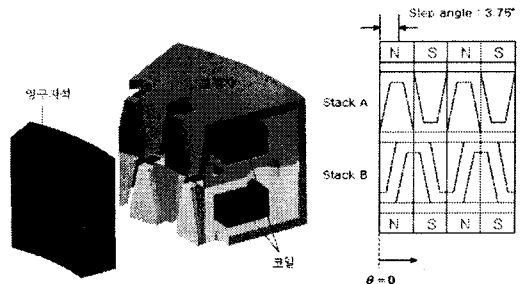


그림 1 해석 모델

표 2 해석 모델의 사양

항 목	단 위	사 양
스텝각	°/step	3.75
저 항	Ω	20
정격 전류	mA	300 (at 24V)
모터 외경 / 두께	mm	φ35 / 8.3
치 수	EA	96
공 극	mm	0.15
영구자석 극수	poles	48
영구자석 잔류자속밀도	T	0.603

2.2.2 설계 과정

모터의 설계변수는 토크에 가장 큰 영향을 미치는 Rotor 외경(Frame/Yoke 내경), 권선 사양, 치 형상 및 요크의 재질로 설정하여 최적 설계를 수행하였으며, 설계과정은 그림 2와 같다. 해석방법은 3차원 유한요소해석을 이용하여 설계변수에 따른 정특성 및 동특성 해석을 수행하였으며, 개발 목표 사양에 적합한 사양을 모터의 최적 사양으로 선정하였다.

홀딩 토크는 정시상태에서 모터에 전류가 인가되었을 때의 토크 특성으로써 스텝핑 모터의 중요한 특성중의 하나이며, 3차원 동특성 해석의 경우 정특성 해석에 비해 많은 시간이 요구된다. 따라서 최적 사양의 선정시 설계 변수에 따른 모터의 홀딩 토크를 도출한 후 목표 사양에 적합하지 고찰하였으며, 도출한 최적 사양을 적용하여 주파수 및 요크 재질에 따른 3차원 동특성 해석을 수행하였다.

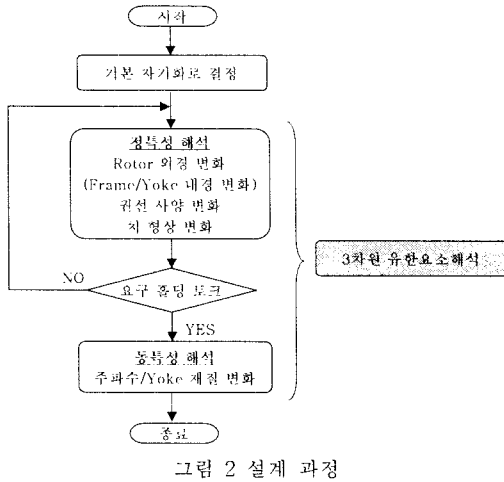


그림 2 설계 과정

2.2.3 정특성 해석

해석 모델의 구동방식은 바이폴라(Bipolar) 방식이며, 여자방식은 2상 여자 방식 및 정전류 구동방법을 선택하였다. 모델의 주기적인 대칭과 해석시간 등을 고려하여, 해석 모델은 1/12 주기모델을 적용하였다. 또한 48극 다극작자된 영구자석의 자화분포는 1차, 3차 및 5차 고조파를 고려하여 설정하였다.

본 개발 모델의 경우 전류 인가방식이 2상 여자 방식이므로, 전류 인가시 각 스택의 치극 사이에서 평형상태를 형성하게 된다. 따라서 홀딩 토크는 회전자와 기계각이 1.875[°]일때(그림 1) 최대값을 가지게 된다. 따라서 해석시간의 단축을 위하여, 실제 변수를 변화시켜가며 회전자와 기계각이 1.875[°]일때의 홀딩 토크만을 추출하여 개발 목표 사양에 만족하는지 살펴보았다.

최적설계를 위한 설계변수로서 모터의 성능에 중요한 영향을 미치는 회전자 외경, 권선사양 및 치의 형상을 선정하였다. 표 3은 모델별 설계변수의 사양을 나타내고 있으며, 공극은 제품의 양산성·작업성을 고려하여 0.15[mm]로 설정하였다

표 3 모델별 설계 변수의 사양

구분	단위	모델 I	모델 II	모델 III	모델 IV	
회전자 외경	mm	19	21	23	25	
Frame/Yoke 내경	mm	19.3	21.3	23.3	25.3	
코일 턴수	turns	300	220	150	100	
치형상	치폭(상부)	mm	0.5	0.6	0.7	0.8
	치폭(하부)	mm	1.4	1.55	1.7	1.85
	치높이	mm	3.0	3.0	3.0	3.0

표 3과 같이 설정한 설계 변수에 따라 각 모델별로 유한요소해석을 수행하였다. 본 해석 모델의 경우 2상 여자 방식이므로, 각 스택의 코일에 정격 전류 300[mA]를 각각 인가한 후 특성 해석을 수행하였으며, 회전자와 기계각이 1.875[°]일때의 모델별 홀딩 토크 특성은 표 4와 같다. 특성해석 결과를 바탕으로, 본 모델의 개발 목표인

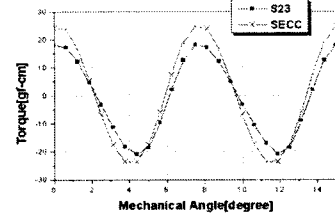
홀딩 토크 170[gf·cm]을 만족하는 모델 III를 모터의 최적 모델로 선정하였다.

표 4 모델별 홀딩 토크 해석 결과($\theta=1.875[^\circ]$)

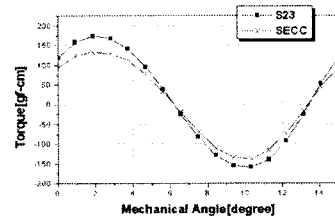
구분	단위	모델 I	모델 II	모델 III	모델 IV
홀딩 토크	gf·cm	142.3	149.8	173.6	122.0

최적 사양으로 선정된 모델 III의 사양을 적용하여 회전자의 위치에 따른 모델의 정특성 해석을 수행하였으며, 요크의 재질로서 전기아연도금강판(SECC)과 S23등급의 무방향성 전기강판을 각각 적용하였다. 그림 3(a)는 회전자 위치에 따른 디텐트 토크의 변화를 나타내고 있다. 회전자의 초기 위치는 $\theta=0$ (그림 1)과 같으며, 회전자의 기계각을 0[°]부터 15[°]까지 0.625[°]간격으로 변화시켜가며 3차원 유한요소해석을 적용한 정특성 해석을 수행하였다. 해석 결과 각 치극의 중심과 영구자석 각극의 중심이 일치하는 초기 위치와 2스텝각 변화 후에 최대값을, 1스텝각과 3스텝각 변화 후에 최소값을 가짐을 알 수 있었으며, 1주기는 2스텝인 7.5[°]임을 확인하였다[2].

해석 모델의 홀딩 토크 특성은 그림 3(b)와 같다. 해석 방법은 각 스택의 코일에 정격 전류 300[mA]를 각각 인가한 후 회전자의 위치를 변화시켜가며 모터의 특성 해석을 수행하였으며, 해석 결과 회전자의 기계각이 1.875[°]일때 최대 토크를 가짐을 확인하였다. 요크 재질로서 S23을 적용한 경우, 요크 치극에서의 자속 밀도 1.5[T] 이상의 포화 영역은 70[%]정도이며, 이 결과는 SECC를 적용한 경우의 40[%]정도보다 자기 포화 특성이 우수하게 나타났다. 결과적으로 요크 재질이 S23인 경우, SECC의 경우보다 더 큰 홀딩 토크를 가지게 된다.



(a) 디텐트 토크 특성



(b) 홀딩 토크 특성
그림 3 정특성 해석 결과

2.2.4 동특성 해석

스텝핑 모터는 주파수에 따른 토크 특성이 중요하므로, 정특성 해석을 통하여 선정한 최적사양을 적용하여 주파수에 따른 동특성 해석을 수행하였다. 정특성 해석 과정을 통하여 도출한 최적 사양을 기본 사양으로 하여, 정특성 해석시와 같이 요크의 재질로서 SECC와 S23을 각각 적용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

스텝핑 모터가 동기화 되었을 때, 모터의 토크는 부하 토크와 같고 그 크기는 반대이다. 모터의 토크는 회전자와 부하의 관성, 그리고 마찰 토크의 합으로 표현될 수 있으며, 식 (1)과 같다[3].

$$T_m = J \frac{dw}{dt} + Dw + T_f \quad (1)$$

여기서, T_m : 모터의 토크, J : 회전자의 관성, w : 회전자의 각속도, D : 점성마찰계수, T_f : 속도에 무관한 마찰부하토크이다.

스텝핑 모터의 특성 중 하나인 풀-아웃 토크는 자기동 영역에서 모터가 기동되고 난 후, 부하토크가 점점 증가하여 동기화를 잃어버리게 될 때의 최대 마찰부하토크를 의미한다. 따라서 식 (1)에 의해 모터의 토크를 구함으로써 풀-아웃 토크를 구할 수 있다.

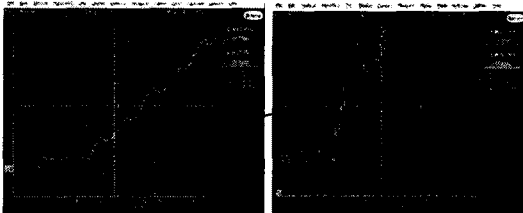
정특성 해석을 통하여 선정된 설계변수의 사양을 적용하여, 동특성 해석을 수행하였다. 해석 방법은 초기 정지 상태에서 각 주파수별 전류를 인가하면서 모터의 특성 변화를 살펴보았으며, 전류는 실험치를 적용하였다. 회전자의 관성계수는 회전자의 형상 및 무게를 고려하여 $3.29 \times 10^{-7} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ 으로 결정하였다.

댐핑 계수는 200[pps]에서 스텝응답특성을 측정 후 해석 값과 비교하여 선정하였다. 측정방법은 모터와 커플링 되어있는 Potentiometer의 출력파형을 오실로스코프를 이용하여 검출함으로써, Potentiometer의 입력 대비 출력전압으로써, 모터의 회전각을 계산할 수 있으며, 식 (2)와 같다.

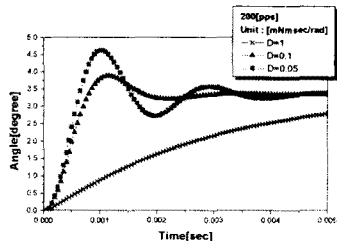
$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{\text{angle}_{\text{motor}}}{360^\circ} \quad (2)$$

여기서, E_o : Potentiometer의 출력 전압, E_i : Potentiometer의 입력 전압, $\text{angle}_{\text{motor}}$: 모터의 회전각이다.

주파수 200[pps]에서의 스텝응답특성의 측정 결과와 해석결과는 그림 4와 같으며, 비교 결과 댐핑 계수는 0.1[mN·m·sec/rad]으로 결정하였다.



(a) 실험 결과

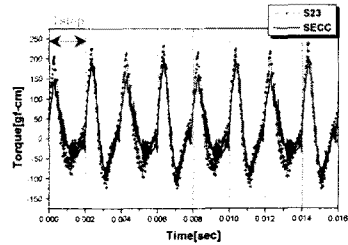


(b) 해석 결과

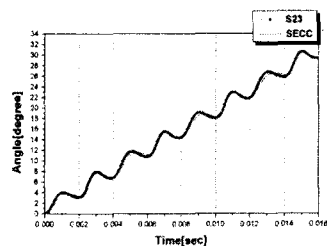
그림 4 스텝응답 특성

실험 및 유한요소해석을 통하여 선정된 댐핑계수를 적용하여, 요크 재질 및 주파수에 따른 모터의 동특성 해석을 수행하였다. 주파수대역별로 각각 동특성 해석을 수행하였으며, 주파수 500[pps]일때의 동특성 해석 결과는 그림 5와 같다. 요크의 재질로써 SECC를 적용한 경우, 1번째와 2번째 스텝의 최대 토크는 각각 151[$\text{gf} \cdot \text{cm}$]와 197[$\text{gf} \cdot \text{cm}$]로 나타났으며, 이와 같은 차이는 그림 3(a)와 같이 회전자의 위치에 따라 디텐트 토크가 변화

하기 때문이며, 비교적 디텐트 토크의 영향을 작게 받는 S23 재질의 경우, 스텝별 최대토크의 차이 역시 작게 나타났다. 또한 그림 5(b)와 같이 회전자의 기계적인 위치가 각 스텝마다 3.75도 간격으로 변화함으로써, 해석 결과의 타당함을 입증하였다.



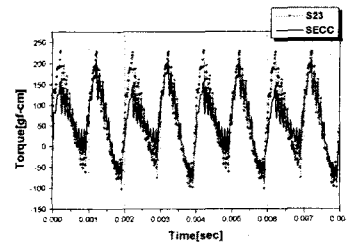
(a) 토크 특성



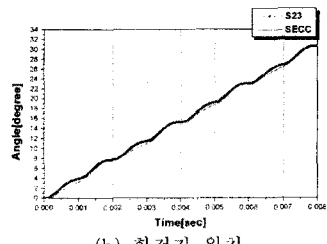
(b) 회전자 위치

그림 5 요크 재질에 따른 동특성 해석 결과(500[pps])

그림 6과 7은 주파수가 각각 1,000[pps]와 2,000[pps]일 때의 모터 특성을 나타내고 있다. 모터의 토크 특성을 살펴보면, 주파수가 1,000[pps]인 경우에 비해 2,000[pps]일때 스텝별 최대토크의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 주파수가 증가할수록 기동 토크 또한 크게 나타나며, 결과적으로 회전자가 동기화되기까지 여러 스텝이 소요됨을, 모터의 토크 특성 및 회전자 위치 특성을 통해 알 수 있다. 또한 주파수 3,000[pps]일때 회전자는 인가되는 펄스에 동기화되지 못하였으며, 그 특성은 그림 8과 같다. 동특성 해석 결과, 2,000[pps]에서 모터의 스텝별 최대토크는 최소 162[$\text{gf} \cdot \text{cm}$] 이상으로써, 풀-아웃 토크의 개발 목표 사양(표 1)을 만족함을 알 수 있다.

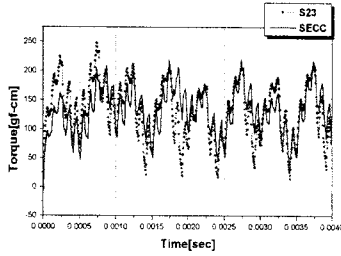


(a) 토크 특성

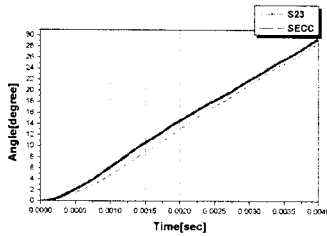


(b) 회전자 위치

그림 6 요크 재질에 따른 동특성 해석 결과(1,000[pps])

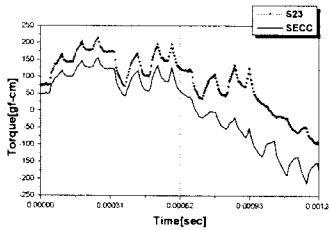


(a) 토크 특성

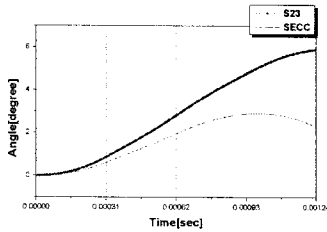


(b) 회전자 위치

그림 7 요크 재질에 따른 동특성 해석 결과(2,000[pps])



(a) 토크 특성



(b) 회전자 위치

그림 8 요크 재질에 따른 동특성 해석 결과(3,000[pps])

2.3 성능 평가

그림 9는 제작된 스캐너용 슬림형 스테핑 모터의 외관을 나타내고 있다.

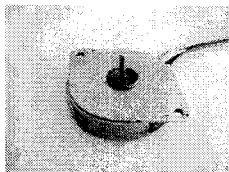


그림 9 스캐너용 슬림형 스테핑 모터의 시작품 외관

2.3.1 정특성 결과

디텐트와 홀딩 토크의 측정은 각각 무여자 상태와 정격 전류 300[mA](정격 전압 24V) 여자 상태에서 토크 게이지(Torque Gauge)를 이용하여 측정하였으며, 표 5를 통해 실험치와 해석치가 유사함을 알 수 있다.

표 5 정특성 해석 결과와 실험 결과 비교

구분	단위	요크 재질	해석	실험	오차
디텐트 토크	gf-cm	S23	20.8	25	16%
	gf-cm	SECC	24.2	27.6	12%
홀딩 토크	gf-cm	S23	173.6	152	14%
	gf-cm	SECC	133.3	114	16%

2.3.2 동특성 결과

시작품의 풀-인 토크와 풀-아웃 토크는 Pulse Motor Analyzer를 이용하여 측정하였으며, 그림 10과 같다. 모터 토크의 해석결과는 성능 평가 결과인 풀-아웃 토크에 비해 약 30[%] 크게 나타났으며, 이 결과는 해석시 주파수에 따라 증가하는 모터의 점성 마찰, 속도에 무관한 마찰부하토크 및 성능 평가시 모터와 풀리(pulley)간의 마찰 등의 기계적인 손실을 고려하지 못하였기 때문이라고 사료된다.

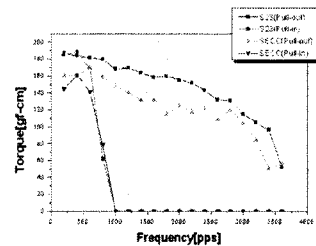


그림 10 풀-인 특성과 풀-아웃 특성
(정격 전압 : 24[V], 정격 전류 : 300[mA])

3. 결론

본 연구에서는 스캐너용 슬림형 claw-pole PM형 스테핑 모터의 설계 방법을 제안하였다. 3차원 유한요소해석을 통해 설계 변수에 따른 모터의 정특성 해석을 수행하여 최적 사양을 선정하였으며, 선정된 최적 사양을 적용하여 주파수에 따른 동특성을 수행하였다. 또한 시작품 제작 후 성능 평가를 실시하였으며, 설계 결과와 비교·검토하였다.

검토 결과 모터 토크의 정특성 해석 결과와 실험 결과는 유사하였으나, 동특성의 경우 측정시의 기계적인 손실 등으로 인하여 결과의 차이가 발생하였다. 스테핑 모터는 주파수에 따른 동특성이 중요하므로, 이 부분에 대한 연구가 더욱 진행되어야 할 것이다. 또한 해석 결과를 통하여 얻어지는 것은 모터의 토크이며, 실험을 통한 결과물은 풀-인과 풀-아웃 토크이므로, 이 두 결과의 비교 방법에 대한 고찰이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 우수제조기술연구센터(ATC)에 관한 기술개발사업(과제번호 : 10007719)의 지원으로 수행되었음

[참고 문헌]

- [1] Takeo Ishikawa, "Static Torque Characteristics of Permanent Magnet Type Stepping Motor with Claw Poles", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 36 No. 4, pp. 1854-1857, 2000.
- [2] Tatsuya Kikuchi, "Developing an Educational Simulation Program for the 영구자석형 Stepping Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45 No. 1, pp. 70-78, 2002.
- [3] Takashi Kenjo, Akira Sugawara, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", Oxford Science Publications, ch. 2.4.6., 1994.