

실험적 방법에 의한 프린터용 PM형 스텝핑 모터의 최적 설계

유용민, 오상열, 채형석
(주)모아텍

Optimal Design of the PM Stepping Motor by use of the experimental method

Yong-Min You, Sang-Yeul Oh, Seok-hyeong Chae
MOATECH

Abstract- The PM(Permanent Magnet) stepping Motor has been used widely to a variety of industries because of the open-loop control characteristic, a relatively large frequency range of velocity control and non-accumulated error of the step angle. Moreover, it has been gradually applied to office automation, machine intelligence, digital appliance, and automobile parts. This paper presents the optimal design results by use of the experimental method. The design variables of the PM stepping motor are shape of the claw-pole, material of core, and air-gap. As a result, a superior claw-pole PM stepping motor for OA machinery was developed.

1. 서 론

스텝핑 모터는 Open-loop 제어가 가능하고, 속도 제어 범위가 넓으며, 높은 응답특성 및 오차가 누적되지 않는 등의 많은 장점으로 인하여 위치제어를 필요로 하는 산업 각 분야에 적용되고 있으며, 기존의 OA기기와 정보통신 분야뿐만 아니라 자동차, 가전 분야 등으로 신규 수요도 지속적으로 확대되고 있다. 스텝핑 모터는 PM형, VR형, Hybrid형으로 크게 분류되는데, 이 중에서 PM형 스텝핑 모터는 회전자에 영구자석을 가지고 있는 형태로, 비교적 저렴한 가격으로 높은 자기 유지 토크 및 미소 스텝각으로 구동할 수 있는 장점이 있어 가장 보편화되어 있다.

본 연구의 개발 모델인 claw-pole를 갖는 PM형 스텝핑 모터의 해석에 관한 연구는 자기동가회로법과 유한 요소해석 등을 적용하여 이미 진행중이다[1][2]. 하지만 모터의 3차원적인 자속 분포로 인하여, 신뢰성 있는 결과를 얻기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 시작품 제작 및 성능 평가 등의 실험적 방법에 의해 프린터용 스텝핑 모터의 최적 설계를 수행하였다. 프레임과 요크의 치형상, 재질의 변화와 공극을 설계변수로 설정하였으며, 특성 평가를 통하여 모터의 최적 사양을 선정하였다.

2. 본 론

2.1 모델 사양 및 개발 목표

본 연구에서 수행한 기술 개발의 목적은 OA기기용 고투출 스텝핑 모터를 개발함으로써 내수시장의 국산화는 물론 주력 수출 품목으로 육성하기 위함이며, 모델의 사양은 표 1과 같다. 해석 모델의 구동 방식은 정전류 유니폴라(Unipolar) 구동 방식을 선택하였으며, 여자방

식은 2-2상 여자방식을 채택하였다. 개발 모델의 목표 사양은 당사 기존 모델 대비 정특성(디텐트 토크, 각도 정도 오차) 및 동특성(풀-아웃 토크, 응답특성)을 20% 향상시켜, 일본 선진사 모델 성능 이상으로 설정하였으며 표 2와 같다.

표 1 모델의 사양
Table 1 Specifications of the model

구 분	단 위	사 양
스텝각	%/step	7.5
저 항	Ω	10.4 \pm 7%
정격 전류	mA	600 (at 22.8V)
모터 외경 / 두께	mm	ϕ 42 / 22
공 극	mm	0.15
영구자석 재질	-	NdFeB
영구자석 극수	poles	24

표 2 개발 목표
Table 2 Target of the development

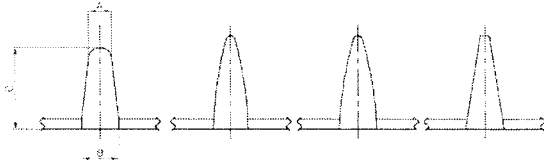
구 분	단 위	개발전	목표 사양
풀-아웃 토크	gf-cm	870	1100
홀딩 토크	gf-cm	1200	1500
응답 특성(2상 여자)	pps	900	1100
각도정도 오차	$^{\circ}$	0.3	0.2
진 동	G	4	3
효 율	%	18	22

2.2 최적 설계

설계변수로써 모터의 특성에 중요한 영향을 미치는 프레임과 요크의 치형상, 재질 및 공극을 설정하였다. 설정한 설계 변수에 따른 모터의 특성 변화를 실험적 방법에 의해 고찰함으로써, 모터의 최적 사양을 도출하여 최적 설계를 수행하였다.

2.2.1 치형상에 따른 특성

치의 변화에 따른 스텝핑 모터의 특성 해석에 관한 연구는 국내외의 여러 문헌을 통해 소개되었다[3]. 하지만 치형상이 삼각형과 사각형일 경우의 정특성만을 다루었고, 실험을 통한 해석 결과의 검증도 미비하였다. 따라서 본 연구에서는 실험을 통하여 치의 형상을 변화시켜가며, 모터의 특성변화를 살펴보았다. 그림 1과 같이 기존의 치 모델인 Type #1을 치형상의 기본으로 하여, 치의 폭과 높이를 변화시켜 설계하였다.



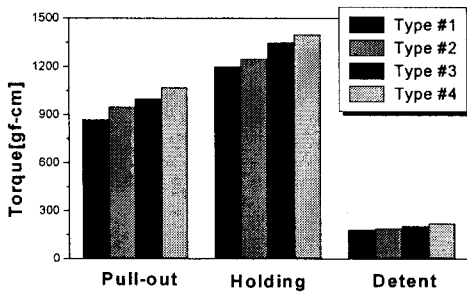
(a) Type #1 (b) Type #2 (c) Type #3 (d) Type #4

단위 : [mm]

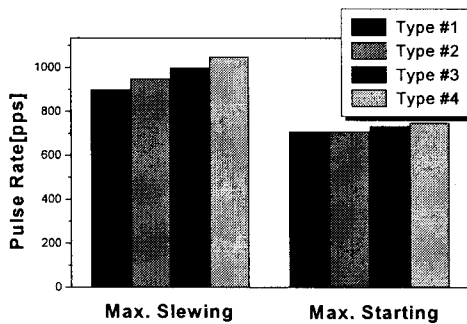
구분	(a)	(b)	(c)	(d)
치 폭(A)	2.0	0.8	0.8	0.8
치 폭(B)	3.2	3.0	3.2	3.3
치 높이(C)	7.0	9.2	9.2	9.2
면적(mm ²)	18.0	17.5	18.4	18.9

그림 1. 치의 형상 및 치수
Fig. 1 Shape and dimensions of claw-pole

그림 1과 같이 설계된 치를 바탕으로 모터를 제작하여 성능평가를 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.



(a) 토크 특성

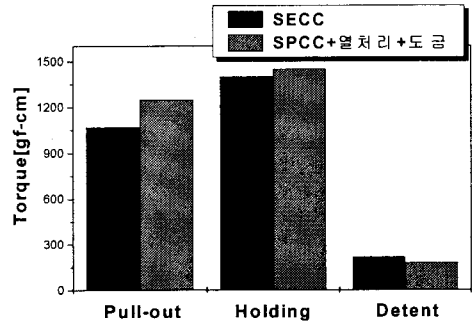


(b) 자기동 및 주파수 응답 특성
그림 2. 치 형상에 따른 특성
Fig. 2 Characteristics according to shape variation of claw-pole

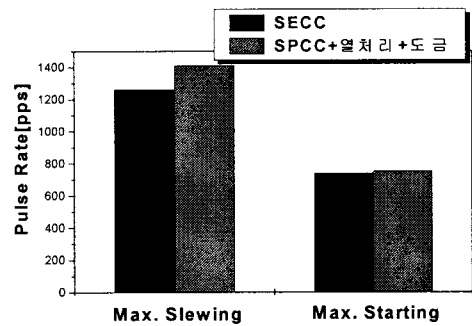
성능평가를 수행한 결과, 그림 1(d)의 Type #4와 같은 치 형상을 가지는 경우 토크와 자기동 및 주파수 응답 특성 및 효율이 가장 우수함을 알 수 있다. 또한 기존의 치형상을 가지는 모델과 비교하여, 효율도 18%에서 22%로 개선되었다. 그 이유는 Type #4의 치형상을 가지는 경우, 자기회로의 경로인 프레임과 요크의 치 사이에서의 자기적인 흐름이 가장 원활하게 이루어지므로, 그에 따라 토크 및 기타 특성들이 다른 치 형상을 가지는 경우보다 더 우수하다고 사료된다.

2.2.2 재질에 따른 특성

일반적으로 스테핑 모터의 강판 재질로는 제품 단가 및 가공상의 이유로 전기아연도금 강판(SECC)을 많이 사용하고 있으며, 특성 개선이 필요한 경우 무방향성 전기강판과 냉간압연 강판(SPCC) 재질에 열처리 및 도금 처리를 한 후 사용한다. 따라서 가장 우수한 성능을 나타낸 Type #4와 같은 치 형상을 기본으로 하여, 요크와 프레임의 재질로써 SECC와 열처리 후 니켈(Ni) 도금을 한 SPCC를 각각 적용하여, 재질에 따른 특성 변화를 살펴보았다.



(a) 토크 특성



(b) 자기동 및 주파수 응답 특성
그림 3. 프레임과 요크 재질에 따른 특성
Fig. 3 Characteristics according to material of frame and yoke

실험 결과, 그림 3과 같이 열처리 후 니켈 도금을 한 SPCC 재질을 적용한 경우 SECC의 경우보다 풀-아웃 토크 특성이 17%정도 향상 되었고, 자기동 및 주파수 응답 특성 또한 우수함을 알 수 있다. 특성 개선의 이유는 열처리를 통해 철손이 적어지며 자속밀도가 향상되었기 때문이라고 생각되며, 또한 니켈 도금을 함으로써 장기간동안 강판부식이 억제되는 내식성의 향상을 기대할 수 있다.

2.2.3 공극의 최소화를 통한 모터 성능 향상

공극이 작을수록 회전자와 고정자 사이의 누설 자속량이 적으며 높은 자속밀도분포를 가지게 되므로 모터의 성능 또한 향상되지만, 소음 및 동작 불량 등의 기계적인 문제가 발생하게 된다. 따라서 제품의 양산시에는 부품의 산포, 양산성, 작업성을 신중히 고려한 설계가 필요하다. 따라서 공극을 기존의 0.2mm에서 0.15mm로 변경하기 위해 공극에 영향을 주는 주요 부품의 치수, 공차 및 구조를 재검토하여 재설계하였으며, 주요 변경 및 개선 항목은 표 3과 같다.

표 3 공극 최소화를 위한 개선 항목
Table 3 Improved item for the minimization of the air-gap

개선항목	기존	변경	비고
	공극:0.2mm	공극:0.15mm	
Frame, Yoke 치대경 치수 및 공차관리 강화	Φ24.4±0.05	Φ24.3±0.03	
Frame+Cover 용접 후 동심도	◎0.03	◎0.015	용접봉 재설계
Frame+Cover+ 메탈베어링(Bush) 압입 후 동심도	◎0.03	◎0.015	메탈베어링 (Bush)압입지그 재설계
Magnet 외경 흔들림(Runout)	∕0.15	∕0.08	
Rotor Assy 흔들림(Runout)	∕0.2	∕0.12	
Stator Assy +Frame Assy 조립 후 고정방법	코킹작업 (Case형)	TIG용접 (Frame형)	저속, 고속 회전시 떨림 방지

2.2.4 최적 사양 결정

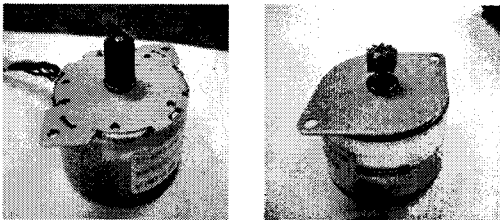
이상의 시험 결과 및 Shaft 가공 방법과 Clearance 개선을 통하여, OA기기용 PM형 스테핑 모터의 최적 사양을 표 4와 같이 결정하였다.

표 4 모터의 최적 사양
Table 4 The optimal specification of the motor

구분	기존 모델	최적 사양	비고
치형상	3.2×7.0 (18)	3.3×9.2 (18.9)	치폭[mm] ×치높이[mm] (단면적[mm ²])
공극	0.2[mm]	0.15[mm]	부품, 지그 재설계
Motor 구조	Case형 (코킹작업)	Frame형 (Tig용접)	진동/소음 방지
Shaft 흔들림	60μm	20μm	가공방법 변경
Bush 내경	φ3.0+0.016 ⁺ 0.022	φ3.0+0.006 ⁺ 0.011	Clearance ave. : 13μm

2.3 시작품 제작 및 특성 평가

실험적인 방법을 통해 도출한 모터의 최적 사양을 바탕으로 시작품을 제작하였으며, 그림 4와 같다.



(a) 기존 모델 (b) 개선 모델

그림 4. 기존 모델과 개선 모델의 외관
Fig. 4 Outside-view of the existing model and developed model

시작품 제작 후 모터의 특성 평가를 수행하였으며, 그 결과는 표 5와 같다. 특성 평가결과 기존품 대비 개선품

의 풀-아웃 토크는 23% 증가하였으며, 자기동 및 주파수 응답 특성, 각도정도 오차, 진동 및 효율등도 전반적으로 개선되었다. 또한 이 개선 모델은 SECC 재질을 적용한 것이므로, 열처리 후 니켈 도금을 한 SPCC 재질을 적용할 경우 개선 모델 대비 15~20%정도의 토크 및 기타 특성의 향상이 기대된다.

표 5 특성 평가 결과
Table 5 Results of the performance test

구분	기존품	개선품	개선율	비고
Pull-out Torque[gf-cm]	870	1070	23%	580PPS / 22.8V
Holding Torque[gf-cm]	1200	1400	16%	24.0V
Detent Torque[gf-cm]	180	220	22%	24.0V
Max. Slewing Pulse Rate[pps]	900	1050	16%	
Max. Starting Pulse Rate[pps]	710	750	6%	
각도정도 오차[°]	0.3	0.15	50%	
진동[G]	4	3	25%	
효율[%]	18%	22%	22%	

3. 결 론

본 연구에서는 OA기기에 적용이 가능한 고토크 claw-pole PM형 스테핑모터의 최적 설계를 실험적인 방법에 의해 수행하였다. 설계 변수로써 치형상, 프레임과 요크의 재질, 그리고 공극으로 설정하여, 설계 변수에 따른 모터의 특성을 살펴보았다. 특성 해석 결과를 바탕으로 각 설계변수의 최적 사양을 도출하였으며, 최적 사양을 적용하여 시작품 제작 및 특성 평가를 실시하였다.

평가 결과 당사의 기존 모델에 대비하여 토크 특성 뿐만 아니라, 각도정도 오차, 진동 특성 등 스테핑 모터의 중요한 특성들이 전반적으로 향상되었다. 따라서 본 연구를 통하여 그동안 일본 등 외국의 선진사 대비 토크, 진동, 소음 등의 특성 저하로 인하여 시장 진입이 어려웠던 OA기기용 스테핑 모터의 국산화 개발에 성공하였으며, 다양한 성능의 모터를 구비함으로써 고객의 요구 사양에 맞는 제품을 제공할 수 있는 기반을 마련하였다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] 공정식, "Claw Pole 영구자석형 스텝모터의 동특성 해석", 전기학회 논문지, 제48Brnjs 제 11호, pp. 597-603, 1999.
- [2] Tatsuya Kikuchi, "Developing an Educational Simulation Program for the PM Stepping Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 45 No. 1, pp. 70-78, 2002.
- [3] 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.