

Claw Pole Type 영구자석형 스테핑 모터의 정토크 특성 향상에 관한 연구

(A Study on the Improvement of Static Torque Characteristic in Permanent Magnet Stepping Motor with Claw Pole)

임승빈* · 손영규 · 김영태 · 이 주

(Seung-Bin Lim · Yeoung-Gyu Son · Young-Tae Kim · Ju Lee)

요 약

본 논문에서는 3차원 FEM을 이용하여 Claw pole stepping motor의 특성을 해석하였다. Claw pole stepping motor는 구조상 z-축 방향으로 자화가 발생하고 모델의 특성상 3차원 FEM해석이 필수적이다. 해석 시간을 고려해 볼 때 목적하고자 하는 성능을 갖는 모터 설계 시 시간을 효율적으로 줄이기 위한 방법 중 하나는 해석 대상의 개수를 줄이는 것이다. 이에 본 논문에서는 실험계획법(Design of Experiments)을 이용하여 Claw pole stepping motor의 해석 및 설계 시 중요 변수인 영구자석, 폴형상, 권선수의 설계 변수를 설정하여 이 설계변수의 조합으로 나오는 해석 모델의 개수를 최소화하고 이렇게 줄어든 최적의 모델을 선정하여 3차원 FEM으로 해석하여 특성을 살펴보았다.

Abstract

This paper analyzed the characteristics of the claw pole PM stepping motor by using 3D FEM. As the magnetization occurs along the z-axis of the motor, it is necessary to apply 3D FEM for analysis of the claw pole PM stepping motor. Considering the computation time, reducing the number of the analysis model is effective method of the methods of the reducing analysis time. By using the "Design Of Experiments (DOE)", efficient analysis was able to be done. To see the effects of the design factors, the 3D FEM is applied only to the selected models. As the design factors, the teeth selected models, the number of turns and the permanent magnet overhang was selected.

Key Words : Claw pole motor, Stepping motor, Design of Experiments, 3D FEM

* 주저자 : 한양대 전기공학과 박사과정
Tel : 02-2220-0349, Fax : 02-2295-7111
E-mail : sblim@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2006년 7월 25일
1차심사 : 2006년 7월 27일
심사완료 : 2006년 8월 4일

1. 서 론

Claw pole 영구자석형 스테핑 모터는 광학 디스크 드라이버(ODD)나 프린터와 같은 컴퓨터 주변기기, 디지털 카메라, 사무자동화(OA), 휴대용 이동통신

기기 등의 소형화 추세에 맞추어 그 수요가 증가하고 있다. Claw pole을 갖는 소형 스텝핑 모터는 입력 펄스로 구동되며, 고 에너지를 갖는 영구자석을 회전자로 사용할 수 있어 정지 시 높은 유지력을 가지므로 위치결정용 구동원으로써 장점이 매우 높다. 특히 구조가 간단하고 견고하며 고정자 부분이 프레스 공정에 의하여 가공할 수 있으므로 제조비용이 낮아 여러 분야에 이용되고 있다[1,6].

본 논문에서 적용된 해석 모델은 광학 디스크 드라이브의 구동에 사용되는 제품으로 적용대상의 특성상 일반적인 Claw pole stepping motor에 비해 모터 사이즈, 극수, 출력이 매우 작다. 이렇게 작은 사이즈의 Claw pole stepping motor는 설계 변수의 작은 변화에 대해서도 특성 변화가 매우 높을 것으로 예상되기 때문에 정확한 모델링 방법과 해석이 필요하다. 특히 Claw pole stepping motor는 구조상 Housing을 통한 Z축 방향으로 자화가 발생하기 때문에 3차원 해석이 필요하다[3,7]. 3차원 해석은 2차원 해석에 비해 많은 계산 시간이 소요되는 해석법으로써 각 설계변수들의 조합을 통해 나오는 많은 수의 설계모델을 해석하여 목적하는 성능을 이끌어내기 위한 설계방법으로는 적합하지 않다. 그러나 모델의 특성상 3차원 해석이 필요하며 목적하고자 하는 성능을 갖는 모터의 설계 시 비용과 시간을 효율적으로 줄이기 위한 방법 중 하나는 해석 대상의 개수를 줄이는 것이다.

이에 본 논문에서는 Claw pole stepping motor의 핵심 성능인 위치 결정능력에 많은 영향을 미치는 디텐트 토크(Detent Torque)와 홀딩 토크(Holding Torque)의 개선을 위해 실험계획법(Design of Experiments)을 이용하여 설계 및 해석 시 중요 변수인 영구자석, 폴 형상, 권선 수 등을 설계변수를 설정하여 이 설계변수의 조합으로 나오는 해석 모델의 개수를 최소화하고 이렇게 줄여진 최적의 모델들을 선정하여 3차원 모델링 프로그램(Solid works)과 3차원 유한요소법을 이용하여 Claw pole stepping motor에 대한 해석을 수행하였으며, 기존의 단순 조합 식 해석에 비해 다소 적은 횟수의 해석으로도 목적했던 결과를 얻는 개선모델을 찾을 수 있었다.

2. 본 론

2.1 Claw pole stepping motor의 구조 및 구동

Claw pole stepping motor는 다른 스텝핑 모터와는 다르게 스텝각(step angle)은 작게 하기가 어렵지만 비교적 구조가 간단하고 견고하다. 이것은 캔 스택(can stack) 모터로도 불리며 문자 그대로 각 상의 스테이터 코어는 판금 세공한 캔과 같은 구조로 되어 있다[2]. 즉 손톱(claw) 모양의 치형은 원판형의 철판을 타발하고, 벨형으로 소성 가공하여 만든다. 각 상은 2개의 벨 형 소재로 조립되며, 이때 상하의 클로폴은 이빨이 맞도록 조합된다. Claw pole을 갖는 stepping motor는 회전자로 다극으로 착자된 영구자석과 샤프트로 구성되어 있으며, 고정자는 보통 2상(stack) 구조를 가지며, 톱니모양의 치극(Claw pole)이 서로 마주보는 구조로 각 상의 극이 서로 1/4피치 간격으로, 상에서 치와 치는 1/2 피치 간격으로 어긋나 있다. 회전자의 극수 P는 각 상의 치수와 같다. 따라서 A, B 2개의 상이 각각 8쌍의 Claw pole을 가지고 있으므로 본 논문에서 사용된 모델의 스텝각은 $22.5^\circ[(360/2P)]$ 이다. Claw pole stepping motor의 특징은 치와 하우징 사이에 링 모양으로 코일이 감겨져 있어 그림 1에서 보는 것과 같이 여자 시 고정자에도 회전자와 같은 헤테로포러자계를 형성하여 동작한다.

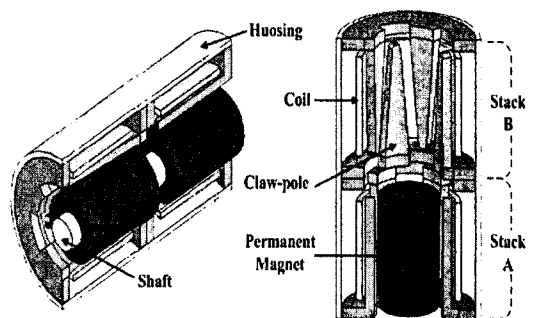


그림 1. Claw pole stepping motor의 구조
Fig. 1. Structure of Claw pole stepping motor

그림 2는 2상 Bipolar 구동방식에 따른 구동 원리도를 나타내고 있으며 여자 순서에 따라 회전방향을 변화시킬 수 있다. 2상 Bipolar 여자 방식은 항상 2조의 상에 직류를 흘리는 방식(전류의 방향은 교대로 변화한다)으로 A, B상 모두 여자 되는 방식으로 제동특성이 좋다. unipolar에 비해 저속 시 토크 특성이 우수하고 코일 이용률이 아주 높다.

Step I에서 A(+상과 B(-)상을 여자 하였을 때 A상의 치 N극과 영구자석의 S극은 인력에 의해, B상의 N극과 영구자석의 N극은 척력에 의해 오른쪽으로 22.5[°] 이동하게 되어 Step II처럼 정렬되며 이때 A(-)상으로 바꿔주면 A상의 치 S극과 영구자석의 S극은 척력에 의해, B상의 N극과 영구자석의 S극은 인력에 의해 같은 방향인 오른쪽으로 22.5[°] 이동하게 된다. 위와 동일하게 Step III와 Step IV도 22.5[°] 씩 오른쪽으로 이동하게 된다.

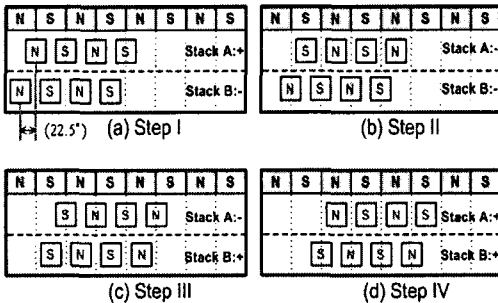


그림 2. 구동 원리도
Fig. 2. Principle of driving

2.2 기존모델 시뮬레이션의 타당성 검토

2.2.1 기존모델 시뮬레이션

표 1은 본 논문에서 연구된 Claw pole stepping motor의 주요 제원을 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 것과 같이 영구자석은 상(Stack) 마다 분리되어 있지만 각상(Stack) 고정자의 단면이 결합되어 있어서 서로에 대한 누설 자속의 영향이 존재한다[4,7]. 그로 인해 자기적으로 독립적이지 못하기 때문에 2개의 상(Stack)을 동시에 고려하여 해석을 수행하였다.

그림 3은 해석 모델의 자속경로를 나타내고 있으며, 3차원 모델의 자속경로는 모터 특성 파악에 중요

하며, 또한 다소 보기가 어렵기 때문에 그림 3 (a), (b)의 실선과 점선부분을 cutting하여 2차원 평면으로 나타내었다. 그림 3에 (c), (d)는 각상의 수직 단면도를 나타내고 있으며 그림 3에 (e), (f)는 각상의 수평 단면도를 나타내고 있다. 그림 3에서 보는 것과

표 1. 해석 모델의 제원
Table 1. Specification of Analysis Model

구분	제원	
고정자	상수	2
	상당극수	8
	내경[mm]	3.55
	외경[mm]	7.45
회전자	극수	8
영구자석(NdFeB)	잔류자속밀도[T]	0.43
공극	길이[mm]	0.195

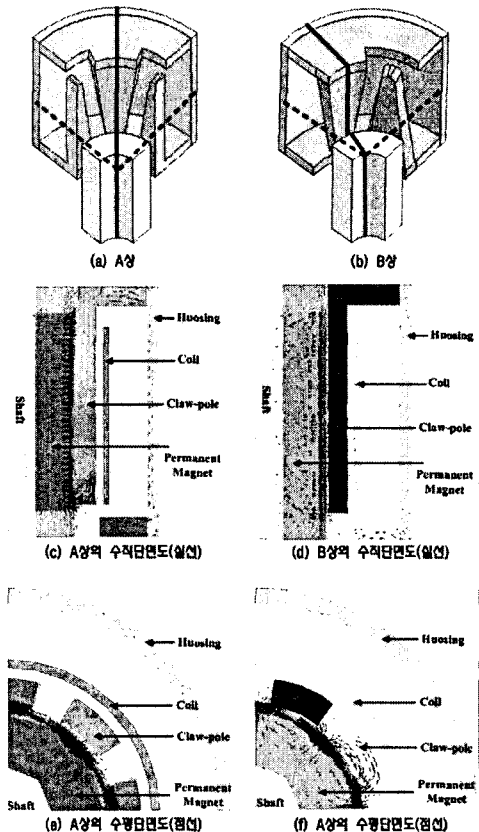


그림 3. Claw pole stepping motor의 자속경로
Fig. 3. Flux pass of Claw pole stepping motor

같이 A상에서는 Housing을 통한 자속경로를 볼 수 있으며, B상에서는 영구자석과 풀에서 경유하는 자속경로를 볼 수 있다.

규정된 여자방법(1상, 2상 여자)에서 정격전류로 여자 된 모터 축에 초기 위치를 회복할 수 있는 상태를 유지하면서 외부에서 가할 수 있는 최대 토크를 홀딩 토크라 한다. 홀딩 토크가 크면 클수록 외란에 강인해져 위치 제어의 용이성이 커지게 되며 이런 연유로 홀딩 토크를 증가시키기 위한 설계가 요구된다. 그림 4는 기존모델의 홀딩 토크를 나타내고 있으며, 본 해석 모델의 경우 2상 Bipolar 구동 방식으로 A, B스택의 코일에 정격 전류 0.27[A]를 각각 인가한 후 해석을 수행하였다.

영구자석형 모터의 경우 Stator의 Teeth가 연속적인 배열로 되어 있어서 자기 저항이 일정하지 않게 되어 영구자석에 의한 Co-Energy가 회전함에 따라 변하게 됨으로써 토크가 발생한다. 이를 디텐트 토크(Detent Torque)라 부른다. 그림 5는 기존모델의 디텐트 토크를 나타내고 있다. 디텐트 토크는 영구자석을 사용하는 모터에 진동과 소음을 유발시키고, 모터의 제어성을 악화시키는 원인이 되기 때문에 저감을 위한 설계가 필요하다. 본 해석 모델의 주기는 90[°]이며 디텐트 토크의 주기는 홀딩 토크의 1/2인 45[°]이다. 그림 6은 기존모델의 역기전력을 나타내고 있다.

2.2.2 기존모델과 실험 결과 비교

본 연구에서는 실험계획법에 의해 제안된 개선모델의 타당성을 입증하기 위해, 기존모델의 시뮬레이션 결과와 실제 모델 실험 결과를 비교 검토하여 개선모델의 타당성을 검증하였다.

그림 7은 Claw pole stepping motor의 외관과 실제 실험 장치의 구성을 나타내고 있으며 본 모델은 실제 광학 디스크 드라이버의 구동에 사용되는 제품이다. 실험 장치의 구성은 Dynamometer, Power supply 2개, Claw pole stepping motor, 출력장치이며 Claw pole stepping motor는 2상 Bipolar 구동방식이므로 각 A상, B상 코일을 동시에 DC 4[V](이때의 전류는 0.27[A])의 전압을 인가하여 여자시켜야 되기 때문에 Power supply는 2개가 필요하다.

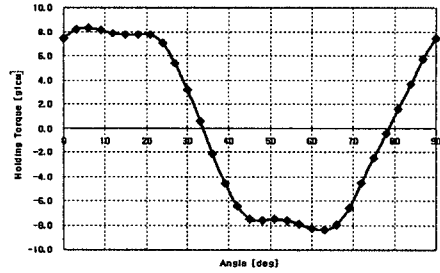


그림 4. 기존모델의 홀딩 토크
Fig. 4. Holding torque of original model

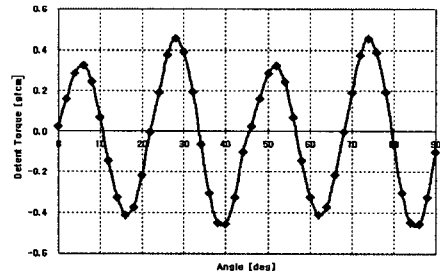


그림 5. 기존모델의 디텐트 토크
Fig. 5. Detent torque of original model

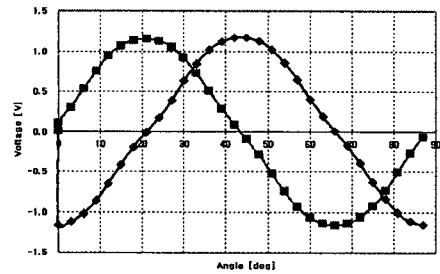


그림 6. 기존모델의 역기전력
Fig. 6. Back EMF of original model

홀딩토크는 정격전류로 여자 된 모터 축에 초기 위치를 회복할 수 있는 상태를 유지하면서 외부에서 가할 수 있는 최대 토크이므로 각상을 여자시켜 측정하였으며, 디텐트 토크는 무 여자 시 모터의 초기 위치를 회복, 유지하면서 모터 축에 가할 수 있는 최대 토크이므로 각상에 전원을 인가하지 않고 측정하였다. 또한 미소 토크[gfcm] 량을 측정하였기 때문에 토크 디텍터의 샤프트와 모터 샤프트 연결 시 정확히 맞지 않고 측정할 경우 주기가 일그러지거나 일정하지 않으므로 이에 유의하여 측정하였다.

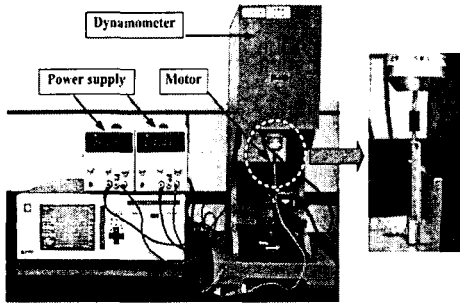


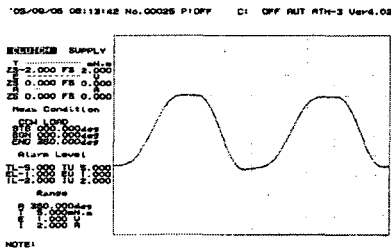
그림 7. 실험장비의 구성
Fig. 7. Test equipment

그림 8과 9는 홀딩토크와 디텐트 토크의 실험 결과와 해석 결과를 비교한 것으로 실험결과는 해석결과와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 그러나 파형의 양상이 해석 치와 시뮬레이션 치가 다소 다르게 나타남을 보이고 있는데, 이것은 실험 과정에서 미소 토크 량의 계측용으로 토크 디텍터와 모터 샤프트 간의 체결을 위하여 사용한 고무(rubber) 커플링 등의 영향으로 사료되며, 대부분의 실제 측정값이 시뮬레이션 값과 비교해 볼 때 이론치보다 작게

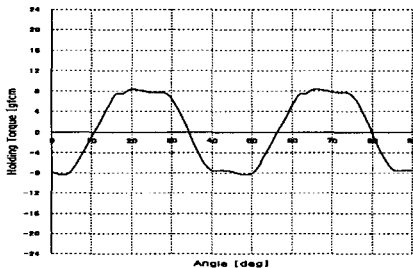
생성됨을 알 수 있으며 이는 모터의 디텐트, 기계적 마찰력, 공극의 불 균일, 자속의 효율적 분배 등의 원인으로 사료된다.

2.3 실험계획법(Design Of Experiments)

표 2는 출력에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 pole 형상과 턴 수, 영구자석 등의 여러 설계 변수들 중 5개의 인자와 그 수준을 나타내고 있다. 5개 설계 인자들의 수준을 모두 2수준으로 정하였는데 이는 각 설계 인자들의 물리적으로 이용 가능한 구간이 그리 크지 않다는 가정으로 선정한 인자들의 분석결과를 그 다음에 시행한 고수준의 실험들의 인자선정의 기준으로 삼았기 때문이다[8]. Claw pole stepping motor의 구조적 전기적 특성 때문에 pole width는 어느 한정된 크기 안에서 결정되어야 한다. 너무 큰 width는 구조적 제약과 함께 누설자속의 증가하며 반대로 너무 작은 width 역시 출력의 한계 때문에 적합하지 않다. 본 논문에서는 이런 물리적 제약 조건들로 인해 이용 가능한 설계 변수들의 선택 구간

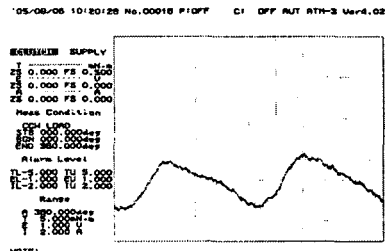


(a) 실험파형

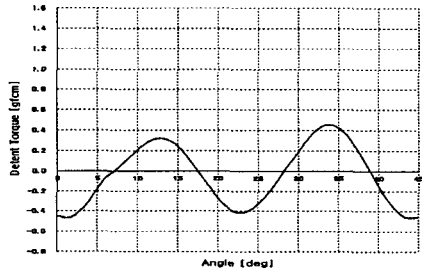


(b) 해석파형

그림 8. 홀딩토크의 실험파형 및 해석 파형
Fig. 8. Measured and Analysis waveform of holding torque



(a) 실험파형



(b) 해석파형

그림 9. 디텐트 토크의 실험파형 및 해석 파형
Fig. 9. Measured and Analysis waveform of detent torque

이 그리 크지 않다는 가정 아래 설계 수준을 2수준으로 통일 하였으며 상정한 설계 인자들을 가지고 실험계획법을 시행하였다. 이 실험계획법의 결과를 토대로 핵심 인자에 대한 높은 수준의 실험계획법을 수행할 것이며 이 실험계획법을 토대로 우리가 목적하고자 하는 설계모델을 찾을 것이다.

표 2. 설계 인자와 수준
Table 2. The design factors and levels

설계 인자	설계수준
Pole width	2
Top width	2
턴 수	2
영구자석 오버행	2
영구자석 내경	2

2.4. 기존모델과 개선모델 결과 비교

2.4.1 개선모델

그림 10은 설계 인자로 선정된 5개의 변수들이 홀딩토크와 디텐트 토크에 미치는 영향과 그 경향을 나타내고 있다. 홀딩 토크에 영향을 미치는 인자들을 순서대로 나열해 보면 Pole width, Magnet overhang, Top width 순이며, 디텐트 토크는 Magnet overhang에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 그림 11은 Pareto 차트를 나타내고 있으며, Pareto 차트는 분석자가 한 눈에 효과 크기의 중요도를 확인할 수 있게 해준다. 예를 들어 그림 11(b)에서 실선 라인은 그 라인을 지나 뺀어 나가는 A, C,

AC는 중요하다고 판단된다는 표시이다.

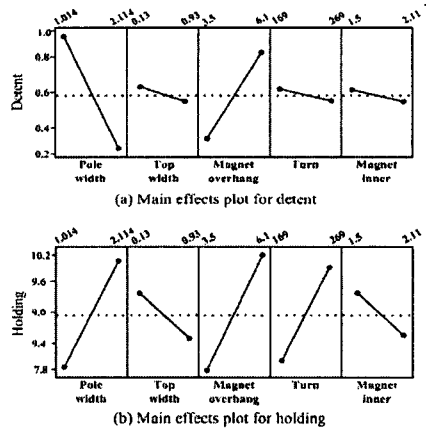


그림 10. 설계 인자들의 영향 분석
Fig. 10. Effect analysis of design factors

그림 10을 볼 때 5개의 설계 인자들 중 오직 Pole width만이 Pole width를 크게 했을 때 홀딩 토크는 증가 하고 디텐트 토크는 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 홀딩토크 개선과 디텐트 토크 저감을 동시에 향상시키는 경향을 나타내므로 중요한 설계 인자임을 알 수 있다. 홀딩 토크를 개선하고 디텐트 토크 저감시키는데 있어 큰 영향을 보이지 않는 Top width 와 Turn, Magnet inner는 적당한 선에서 값을 선정하였으며 영구자석 같은 경우 Magnet overhang을 크게 했을 때에 홀딩토크와 디텐트 토크가 동시에 증가함을 볼 수 있다. 본 논문에서는 홀딩 토크를 개선하고 디텐트 토크 저감을 동시에 얻는 설계 점을 찾는 것이 목적 이었으므로 Magnet overhang을 적당한 크기로 선정하였다.

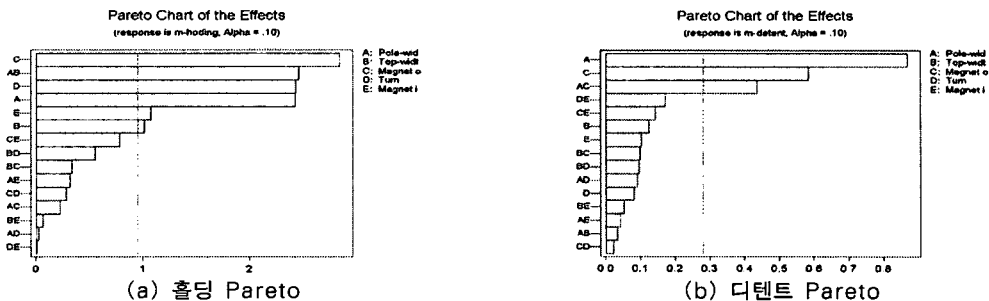


그림 11. Pareto 차트의 영향도
Fig. 11. Effects of Pareto Chart

적정한 홀딩 토크를 가지면서 디텐트 토크를 저감하는 모델을 선정하기 위해 MINITAB에서 지원하는 반응 표면 최적화 루틴을 이용하여 그림 12와 같은 결과를 얻었다.

Optimal D 1.0000	HI (cur 1.0	Pole width 2.114 (2.004) 1.014	Top width 0.93 [0.14] 0.13	Magnet over 6.1 [6.04] 3.5	Turn 269 [169] 169	Magnet inner 2.11 [1.5] 1.5
Detent Minimum Y = 0.3692 d = 1.0000						
Holding Maximum Y = 12.2513 d = 1.0000						

그림 12. MINITAB의 반응 표면 최적화
Fig. 12. Response surface optimization of MINTAB

표 3. 최적 모델 설계 인자들의 값
Table 3. Design dimension of optimum model

설계 인자	설계 값
Pole width[mm]	2.004
Top width[mm]	0.14
턴 수[N]	169
영구자석 오버행[mm]	6.04
영구자석 내경[mm]	1.5

MINITAB에 의해 선정된 모델의 각 설계 인자들의 값들은 다음 표 3과 같으며 다음 사양으로 적당한 홀딩 토크를 가지면서 디텐트 토크를 저감하는 개선 모델을 선정하였다. Claw pole stepping motor의 중요 설계 변수인 Pole width의 크기를 크게 했을 때에

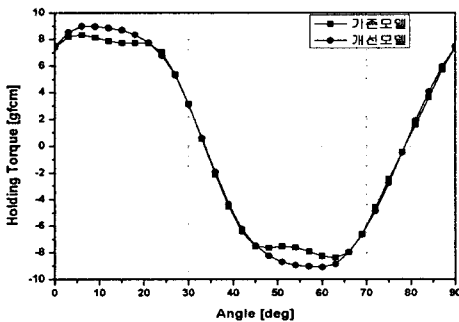


그림 13. 홀딩 토크의 비교
Fig. 13. Comparison of Holding torque

주기성이 없어지므로 Full모델로 모델링하였다.

요소 개수는 30만개 이고 절점 수는 9만개 정도이다. 3차원 해석 시 해석 결과의 정확도가 요소개수에 의해서도 적지 않은 영향을 받으므로 적당한 요소개수 선정도 중요하다.

2.4.2 기존모델과 개선모델 결과 비교

그림 13은 기존모델과 개선모델의 홀딩 토크를 비교하였으며 개선모델이 기존모델에 비해 홀딩토크가 약 12[%] 증가 했다. 그림 14는 기존모델과 개선모델의 회전자 위치에 따른 디텐트 토크 변화를 비교 하였다. 기존모델보다 실험계획법을 이용한 개선모델의 디텐트 값이 18[%] 감소하였다. 그림 15는 기존모델과 실험계획법을 이용한 개선모델의 역기전력을 나타내고 있으며 모터 회전 속도는 4,050 [RPM]이다.

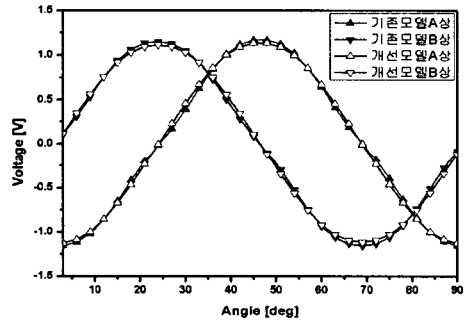


그림 15. 역기전력
Fig. 15. Comparison of Back EMF

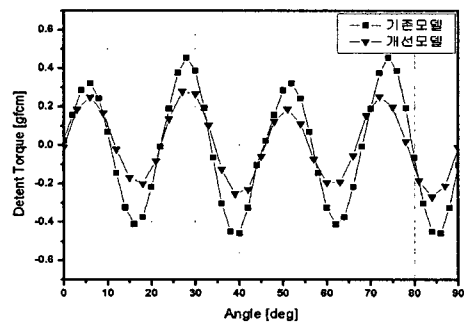


그림 14. 디텐트 토크
Fig. 14. Comparison of detent torque

3. 결 론

본 논문에서는 Claw pole 영구자석형 스텝핑 모터 모델에서 홀딩토크를 개선하고 디텐트 토크를 저감시키기 위해 실험 계획법(Design of Experiments)과 3차원 유한요소법을 병행 사용하는 방법을 제안, 수행 하였다. Claw pole 영구자석형 스텝핑 모터의 여러 가지 설계 변수들 중 5개의 설계 인자를 선정, 이를 가지고 실험 계획법을 시행하여 16개의 실험 모델을 선정하였으며 16개의 실험 모델들을 홀딩 토크와 디텐트 토크를 구하기 위해 각각 16번씩 유한 요소법을 이용하여 해석하였다. FEM해석을 통해 구한 결과들은 실험 계획법을 이용 분석하여 본 논문에서 요구되는 홀딩토크 개선 및 디텐트 토크 저감을 동시에 얻을 수 있는 설계 점을 찾을 수 있었으며, 기존모델의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교 검토 하여 실험 계획법에 의해 제안된 개선모델의 타당성을 검증하였다. 이상의 연구 결과를 통하여 제안된 실험 계획법과 유한 요소 해석을 병행 사용하는 설계 방법이 적은 시간과 비용으로 요구하는 결과를 얻는데 매우 효과적이라는 사실을 알 수 있었으며 더 나아가 기타 여러 시스템 설계에 적용될 경우 아주 효과적인 설계 방법이 될 것으로 사료된다.

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업(기초전력)에 의한 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Takeo Ishikawa, and Ryuichi Takusagi "Static Torque Characteristics of Permanent Magnet Type Stepping Motor with Claw Poles", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 36 (2000) 1854-1857.
- [2] Takashi Kenjo, Stepping motors and Their Microprocessor Controls, Clarendon press · Oxford 2 Edition pp44, 1994A.
- [3] Tatsuya Kikuchi, and Takashi Kenjo "Developing an Educational Simulation Program for the PM Stepping Motor" IEEE Transaction on Education, vol. 45, no. 1, February 2002.
- [4] YouGuang Guo, and Jian Guo Zhu "Comparative Study of 3-D Flux Electrical Machines With Soft Magnetic Composite Cores" IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 39, no. 6,, November/December 2003.

- [5] D.Ebihara, Y.Nakate and M. Watada "FLUX DISTRIBUTION TO INDUCTOR IN CLAW POLE LINEAR PULSE MOTOR" IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 29, no. 6, November 1993.
- [6] Takeo Ishikawa, Masahiro Matsuda and Michio Matsunami "Finite Element Analysis of Permanent Magnet Type Stepping Motors" IEEE Transaction on Magnetics, vol. 34, no. 5, September 1998.
- [7] K. Koibuchi and K. Sawa, "Three dimensional FEM claculation of permanent magnet type stepping motor with claw poles," in Proc. 2nd Small Motor International Conference, Seoul, Korea, pp. 171-174, September 1996.
- [8] Fisher, R.A "The Design of Experiments", 4th Edition, Oliver and Boyd, Edinburgh, 1947.

◇ 저자소개 ◇

임승빈 (任承彬)

1974년 6월 16일생. 2001년 한양대 전기공학과 졸업. 2003년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
Tel : (02) 2220-0349
E-mail : sblim@ihanyang.ac.kr

손영규 (孫榮奎)

1964년 11월 11일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989~1995년 금성부품. 1995~1999년 삼성전기. 1999년~현재 LG Innotek 책임연구원. 2004년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

김영태 (金永太)

1960년 1월 29일생. 1984년 한양대 전기공학과 졸업. 1986년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년~현재 국립원주대 전기과 부교수.
Tel : (033) 760-8426
E-mail : ytkim@sky.wonju.ac.kr

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 부교수.
Tel : (02) 2220-0342
E-mail : julee@hanyang.ac.kr