

축 방향 자속을 고려한 Claw pole 스테핑 모터 설계에 관한 연구

(The Study on the design of Claw Pole Stepping Motor considering Axial flux)

정대성*

(Dae-Sung Jung)

Abstract

A claw pole stepping motor is widely used in various fields such as a compact optical disk drive, computer peripherals, digital cameras, office automation(OA), handheld mobile devices, because it has the suitable structure for compact motor. However 3D analysis is essential for design of Claw pole stepping motor because of axial flux path. Thus, in general, it takes a lot of time in the design of Claw pole motor. In this paper, magnetic equivalent circuit considering axial flux was proposed to reduce design time of Claw pole motor and we has designed by using the magnetic equivalent circuit. In addition, in oder to verify the study, design model was verified by 3D FEM simulation and experiment.

Key Words : Claw Pole Stepping motor, 3D Magnetic Circuit, 3D Finite Element Method

1. 서 론

최근 제품의 스마트한 기능뿐만 아니라 소형화가 요구되면서 Claw pole 스테핑 모터의 적용분야는 지속적으로 확장되고 있다. Claw pole 스테핑 모터는 각 스텝의 비연속적인 순서로 회전 운동을 한다. Open-Loop 디지털 제어가 잘 적용될 경우, 이 모터는 정확한 동작과 위치가 필요한 곳에 널리 적용될 수 있다. 이러한 모터들은 첨단 산업과 컴퓨터와 주변장치,

디스크 드라이버, 프린터, 로봇 장치 그리고 렌즈 포커싱에 사용되는 전자 카메라 등에 적용되고 있다.

Claw pole 스테핑 모터는 다양한 구성과 디자인을 가질 수 있다. 원통형의 방사방향으로 극성을 갖는 다극 영구자석 회전자와 축 방향을 감싸고 있는 구동권선이 감겨진 두 개의 분리된 보빈으로 구성되어 있다. 회전자는 보통 등방성의 세라믹 페라이트, Sm₂Co₁₇ (사마리움 코발트) 또는 네오디뮴(Nd₂Fe₁₄B) 등으로 만들어진다. 이는 각각의 코일이 분리되어 상을 구동하는 2상 모터이다. 각 코일은 두 개의 반대방향의 치를 가지는 요소와 자속이 돌아오는 Flux return 링으로 구성된 soft 자석 고정자 위에 장착된다. 고정자 치의 수는 회전자 극수와 같다. 구동 코일은 하나의 치 부품 위에 자속 리턴 링과 첫 번째 슬라이딩 코일을 조립하고, 남은 치 부품도 마찬가지로 방법으로 조립하여 고정자 치가 같은 공간을 갖도록 한다. 설명한 바와 같이

* 주저자 : 연암공업대학 스마트융합학부 조교수
* Main author : Professor, Department of Smart Convergence, Yonam Institute of Digital Technology
Tel : 055-751-2198, Fax : 055-751-2197
E-mail : campus0191@yc.ac.kr
접수일자 : 2014년 5월 9일
1차심사 : 2014년 5월 30일
심사완료 : 2014년 7월 17일

Claw pole 스텝핑 모터는 일반모터와 달리 구조가 복잡하지만 소형화에 적합한 구조를 갖고 있다[1-2].

Claw pole 스텝핑 모터는 자속패스가 축방향으로 형성되기 때문에 2차원 등가회로나 2차원 유한 요소법으로 설계할 수가 없다. 따라서 3차원 해석이 필요하며 이는 많은 설계시간이 소요된다. 이러한 문제로 인해 다양한 제품에 적용되는 Claw pole 스텝핑 모터는 제품에 최적화 된 사양으로 적용되는 것이 아니라 기존에 비슷한 사양을 가지고 있는 Claw pole 스텝핑 모터를 제품에 적용하는 경우가 종종 있다. 이는 제품의 단가를 상승시키거나 성능이 떨어지는 제품의 출시를 야기시킬 수 있다. 따라서 Claw pole 스텝핑 모터를 설계하는데 있어 시간을 단축하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 축방향 자속을 고려하여 자기등가 회로를 구성하였으며 자기등가회로를 통해 Claw pole 스텝핑 모터를 설계하였다. 3차원 자기등가회로에 의해 설계된 모델을 검증하기 위해 3차원 유한요소법을 사용하여 확인하였다. 또한 본 논문의 타당성을 검증하기 위해 시험 검증하였다.

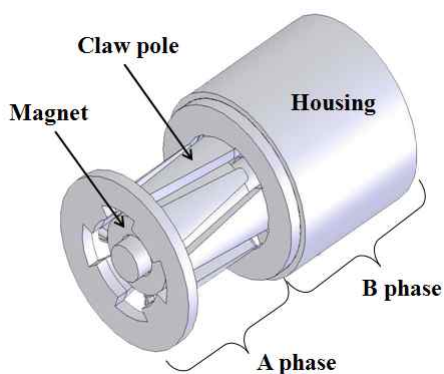


그림 1. Claw pole 스텝핑 모터의 구조
Fig. 1. Structure of claw pole stepping motor

2. 본 론

2.1 축방향 자속을 고려한 자기등가회로 해석

각 상을 여자 시킨 상태에서 회전자의 각도 변화에

따른 토크 특성 식을 유도해내기 위해서는 우선적으로 회전자와 고정자 사이에서의 자속 값 즉 공극에서의 자속을 해석하여 그 값과 분포특성을 알아내어야만 한다. 하지만 이와 같은 해석은 Claw pole 스텝핑 모터의 복잡한 구조적 형상 때문에 쉽지 않다. 이처럼 Claw pole 스텝핑 모터의 복잡한 구조로 인해 3차원 유한요소해석을 수행하여야 공극에서의 타당한 자속 값을 얻을 수 있다. 그러나 3차원 유한요소해석은 시간이 많이 걸리는 작업으로서 본 논문에서는 이와 같이 긴 계산시간을 요구하는 3차원 유한요소해석을 수행하기 전에 선행적으로 축방향 자속을 고려한 자기등가 회로를 구성하여 공극에서의 자속 밀도의 해석적인 해를 구하였다.

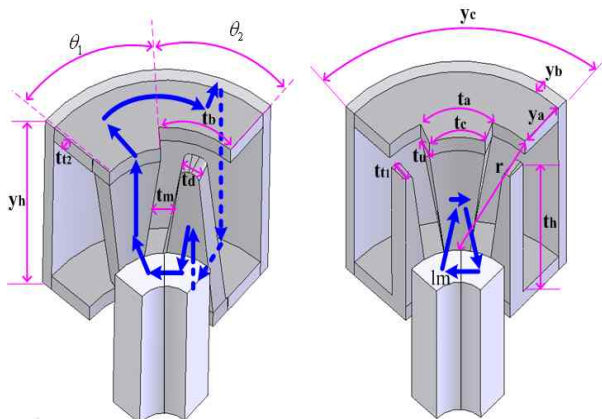
축방향 자속을 고려한 자기등가 회로를 구성하여 공극에서의 자속 밀도의 값을 구하기 위해서는 우선 자속이 흘러가는 경로를 결정해야 하는 작업이 필요하다. Claw pole 스텝핑 모터는 rotor와 stator의 상대적인 위치에 따라 rotor 축의 영구자석에 의한 자속의 경로가 변화하기 때문에 rotor의 위치에 따라 자속의 경로를 다르게 설정해줘야 한다. 본 논문에서는 rotor의 위치(θ_r)에 따라 크게 두 종류의 자속 경로를 가정하여 자기등가 회로를 구성하였다. Claw pole 스텝핑 모터의 구조적인 특성으로 인해 rotor의 A상의 위치가 stator의 teeth와 정렬되어 있을 때 rotor의 B상의 위치는 stator의 teeth와 1/4 pitch 만큼 어긋나 있게 된다. rotor의 극과 stator의 teeth가 정렬되어 있는 상태에서부터 1/4 pitch만큼 어긋날 때까지의 rotor의 위치(θ_r)가 변화하면서 생성되는 경로들은 모두 θ_r 에 관한 식으로 표현이 가능하여 한 종류의 경로로 취급하였으며 rotor의 극과 stator의 teeth가 정확히 1/4 pitch 만큼 어긋나 있는 상태에서의 경로는 앞의 경우와 달리 앞의 경로와 동일한 경로로 취급할 수가 없어 다른 경로로 취급하여 계산을 수행하였다. 이것이 앞에서 설명한 2개의 자속 경로 중 각각 하나씩을 의미한다. 이렇듯 자속 경로를 한 종류가 아닌 두 종류로 선정하게 되어 공극 자속의 식이 rotor 위치(θ_r)에 관한 하나의 식으로 완벽하게 표현이 되지 아니하고 1/4 pitch 만큼 어긋난 위치에서는 다른 값들과는 불연속적인

특이 값을 가지게 된다. 이와 같은 특이 값이 야기하는 문제들에 대한 논의는 본 논문에서는 고려하지 않았으며, 정 토크의 계산 시 야기되는 문제점을 무시하였음을 아울러 밝혀두는 바이다. rotor의 A상의 위치가 stator의 teeth 와 정렬되어 있을 때의 자속 경로를 그림 2의 (a)에 나타냈다. 이 경로를 바탕으로 rotor의 A상과 stator의 teeth가 정렬되어 있는 상태에서부터 1/4 pitch만큼 어긋날 때까지의 자기등가 회로를 꾸며 보면 그림 2와 같으며, 이 회로 상의 각각의 자기 저항의 값들을 구해 보면 다음과 같다.

$$R_{g1} = \frac{\sqrt{l_g^2 + (l_r \theta_r)^2}}{\mu_0 A_g} , \quad A_g = \frac{(t_c + t_d)}{2} t_h$$

R_{g1} 은 rotor와 stator의 teeth 사이에 존재하는 공극에서의 자기 저항을 나타하며, l_g 는 공극 길이, l_r 는 rotor의 반지름의 길이를 뜻하며, rotor의 A상이 stator의 teeth와 정렬되어 있을 때의 각도 θ_r 을 0도로 고려한다.

$$R_{t1} = \frac{t_h + t_{t2}}{2 \mu A_1} , \quad A_1 = \left(\frac{t_c + t_d}{2}\right) \cdot t_{t1}$$



(a) 고정자치&자극 정렬 (b) 고정자치&자극 비정렬

그림 2. 영구자석 위치에 따른 자속경로
Fig. 2. Flux pass according to PM position

R_{t1} 은 rotor의 N극에서 나온 자속이 지나가게 되는 stator의 teeth측 자기저항을 의미한다.

$$R_{y1} = \frac{y_a + t_{t1}}{2 \mu A_2} , \quad A_2 = \left(r + \frac{y_a - t_a}{4}\right) \theta_1 t_{t2}$$

$$R_{y2} = \frac{\left(r + \frac{y_a}{2}\right) \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}}{\mu A_3} , \quad A_3 = y_a t_{t2}$$

$$R_{y3} = \frac{y_a + y_b}{2 \mu A_4} , \quad A_4 = \left(r + \frac{y_a}{2} + \frac{y_b}{4}\right) \theta_2 t_{t2}$$

R_1, R_2, R_3 는 그림 2 (a)에 나와 있듯이 stator 윗면의 자기저항들을 의미한다. 윗면에서의 자속 경로는 편 의상 직선과 아크와 다시 직선으로 산정하였으며 이 각각의 경로에 대한 자기저항들을 구분해서 나타낸 것이다.

$$R_0 = \frac{y_h}{\mu A_5} , \quad A_5 = \left(r + y_a + \frac{y_b}{2}\right) \theta_2 y_b$$

R_0 은 stator의 back yoke 측의 자기저항을 의미한다.

$$R_{y4} = R_{y3} + R_{y1}$$

R_{y4} 는 stator의 아랫면에서의 자기저항을 나타내는 데 stator 윗면에서와는 달리 경로가 직선으로만 이루어져 있고 이 직선들은 각각 stator 윗면의 자기저항을 표현하기 위해 계산한 R_1, R_3 의 값과 동일한 값을 가지게 된다.

$$R_{t2} = R_{t1}$$

R_{t2} 는 rotor의 S극으로 들어가는 자속이 지나가는 teeth측 자기저항을 의미한다.

$$R_{leakage} = \frac{t_m}{\mu_0 A_6} , \quad A_6 = t_h t_{t1}$$

$R_{leakage}$ 은 stator의 teeth와 teeth 사이의 공극을 통

해서 흐르는 즉 누설 경로의 자기저항을 의미한다.

$$R_{g2} = R_{g1}$$

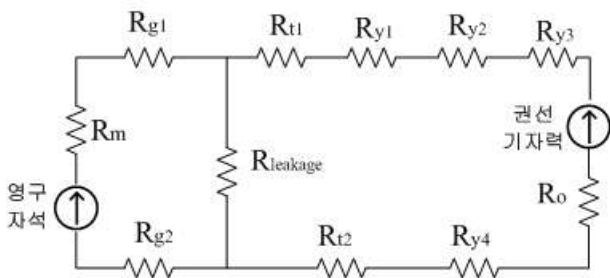
R_{g2} 은 rotor와 stator의 teeth 사이에 존재하는 공극에서의 자기 저항을 나타낸다.

전체 합성 저항은 위 저항들 중 누설을 제외한 모든 자기저항들 즉 영구자석 내부의 자기저항도 포함하여 모두 직렬연결이므로 영구자석 내부의 자기저항을 구한 후 전체 합성 자기 저항 값을 구할 수 있게 된다.

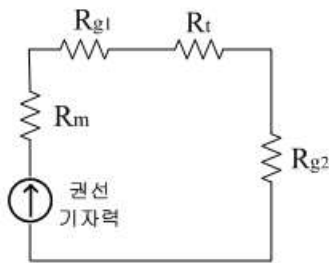
$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 A_m}, \quad A_m = d_m t_h$$

여기서 d_m 은 자속이 영구자석 내로 침투한 깊이이다. 그림 3 (a)는 자기등가 회로를 나타내고 있으며, 이 모든 자기저항들의 전체 합성 저항은 다음과 같다.

$$R_T = (R_{g1} + R_{t1} + R_{y1} + R_{y2} + R_{y3} + R_0 + R_{y4} + R_{t2} + R_{g2} + R_m) \parallel R_{leakage}$$



(a) 고정자치&자극 정렬



(b) 고정자치&자극 비정렬

그림 3. 영구자석 위치에 따른 자기등가회로
Fig. 3. Magnetic circuit according to PM position

이제 rotor와 stator가 1/4 pitch 만큼 어긋나 있는 그 순간의 자속 경로와 그때의 등가자기저항을 구해보면 다음과 같다.

그림 2 (b)에 나타나 있듯이 자속 경로는 rotor와 stator가 정렬되어 있을 경우와는 달리 rotor의 N극에서 자속이 나와 stator의 teeth를 경유해 다시 rotor의 S극으로 들어가게 된다. 이 경로의 자기저항 값들을 각각 구해보면 다음과 같다.

$$R_{g1'} = \frac{\sqrt{l_g^2 + (\frac{l_m}{2})^2}}{\mu_0 A_{1'}} , \quad A_{1'} = \frac{1}{2} (\frac{t_c + t_d}{2}) t_h$$

$$R_t = \frac{\frac{1}{2} (\frac{t_c + t_d}{2})}{\mu A_{2'}} , \quad A_{2'} = t_{t1} t_h$$

$$R_{g2'} = R_{g1'}$$

$$R_{m'} = \frac{l_m}{\mu_0 A_{m'}} , \quad A_{m'} = d_m t_h$$

이 자속 경로 상에서는 앞의 경우와는 다르게 뚜렷한 누설경로가 존재하지 않는다고 가정하고 등가회로를 구성하였다. 누설이 존재하지 않으므로 해서 위의 자기저항들은 모두 직렬로 연결되며 전체 합성 자기 저항은 다음과 같으며 그림 3 (b)는 자기등가 회로를 나타내고 있다.

$$R_T = R_{g1'} + R_t + R_{g2'} + R_{m'}$$

이제 위에서 구한 식들에 Claw pole 영구자석형 스테핑 모터의 각 수치들을 대입하여 실제 자기저항을 구하고 이 자기 저항과 영구자석의 기자력과 stator 측에 있는 감겨져 있는 권선에 의한 기자력 항을 가지고 계산을 수행하면 우리가 원하는 공극에서의 자속 밀도를 구할 수 있게 된다. 표 1은 Claw pole 스테핑 모터를 설계한 각 수치들의 명칭과 그 값들을 나타내고 있다.

표 1. 자기등가회로에 의한 설계결과
Table 1. Design result by magnetic circuit

기호	명 칭	치 수
y_c	Housing 둘레	3.4mm
y_h	한 Stack의 높이	6.1mm
y_a	안쪽 치의 길이	1.18mm
y_b	Housing 두께	0.5mm
t_h	치의 높이	4.8mm
t_{t1}	치의 두께	0.46mm
t_{t2}	치의 아랫변 두께	0.5mm
t_a	치의 윗변 바깥쪽 둘레1	1.714mm
t_b	치의 윗변 바깥쪽 둘레2	1.84mm
t_c	치의 윗변 안쪽 둘레	1.452mm
t_m	치와 치사이의 거리	0.82mm
t_u	바깥쪽 치의 길이	0.53mm
θ_1	치의 윗변 안쪽 각도	44°
θ_2	치의 윗변 바깥쪽2 각도	46°

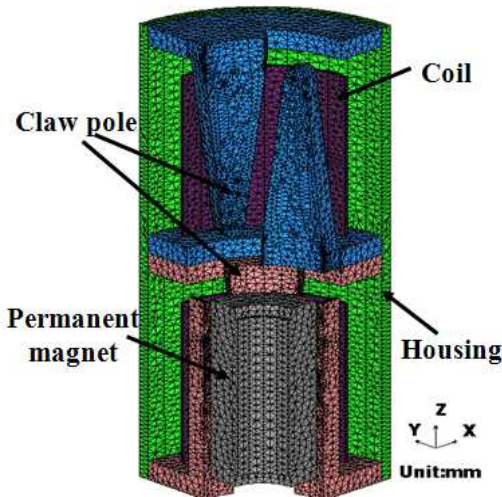


그림 4. Claw pole 스테핑 모터의 해석 모델
Fig. 4. Analysis model of claw pole stepping motor

2.2 Claw pole 스테핑 모터 3D FEM

자기등가회로에 의해 설계된 결과를 토대로 3D 모델링을 하였으며 3차원 유한요소법으로 해석하였다. 그림 4는 자기등가회로에 의해 설계된 모델을 보여주

고 있으며 유한 요소 해석을 수행하기 위해 요소 분할을 한 모습이다.

그림 4에서 보여주고 있는 A, B상에 정격전류를 인가할 경우 모터 축에 초기 위치를 회복할 수 있는 상태를 유지하면서 부하측에 가할 수 있는 최대 토크를 홀딩토크라 한다[3-4]. 부하가 클수록 큰 홀딩토크가 필요하다. 그림 5는 설계된 모델의 홀딩토크를 보여주고 있다.

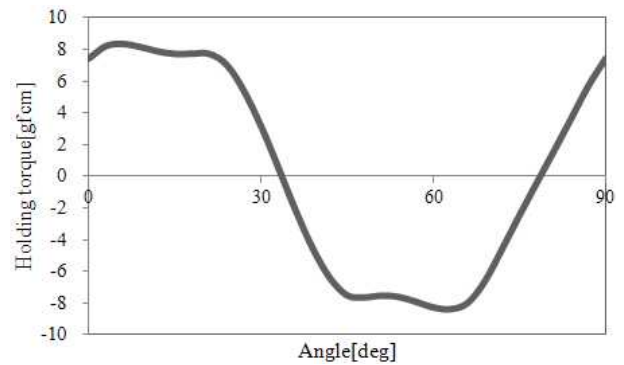


그림 5. 홀딩토크
Fig. 5. Holding torque

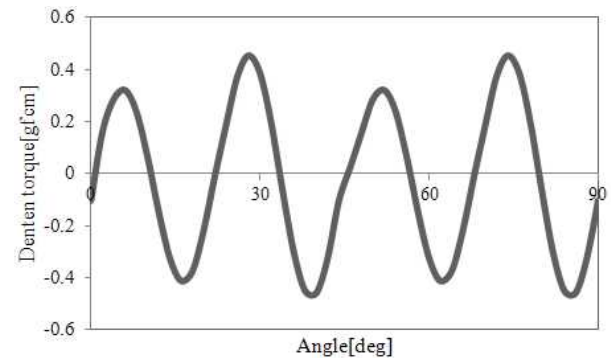


그림 6. 디텐트 토크
Fig. 6. Detent torque

영구자석 모터의 경우 무부하시 영구자석에 의한 자속이 고정자 치와 정렬하려는 힘이 발생되는데 이를 디텐트 토크라 한다. 디텐트 토크는 소음/진동의 원인이 되며 제어에 악영향을 주기 때문에 줄이는 설계가 필요하다. 일반적으로 디텐트 토크를 줄이기 위한 방법은 다양하게 존재하나 Claw pole 스테핑 모터의 경우는 제한적이다. Claw pole 스테핑 모터는 고정자의

형상을 통해 디텐트 토크를 줄일 수 있다. 그림 6은 설계된 Claw pole 스테핑 모터의 디텐트 토크 파형을 보여주고 있다.

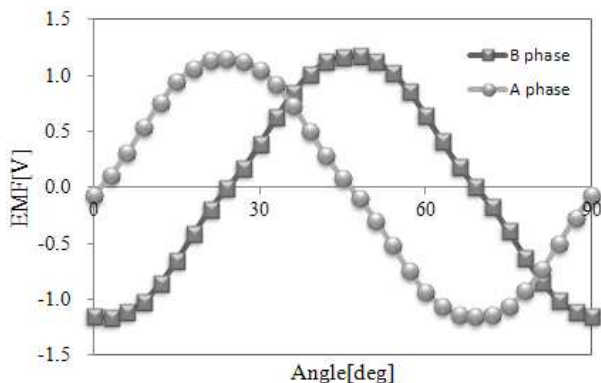


그림 7. 역기전력
Fig. 7. EMF

Claw pole 스테핑 모터는 A상과 B상에 코일이 권선되어 있기 때문에 2개의 역기전력이 발생된다. A상과 B상은 서로 22.5도(1/4 pitch) 위상차를 가지고 있다. 그림 7은 Claw pole 스테핑 모터의 역기전력을 보여주고 있다.

2.3 Claw pole 스테핑 모터 설계검증

본 논문의 타당성을 검증하기 위해 설계된 모델을 시제작하여 시험 평가하였다. 그림 8은 제작된 모델을 보여주고 있으며 Claw pole 제작 공정을 보여주고 있다. Claw pole 뿐만 아니라 보빈 및 코일선경 등 모든 것이 작은 사이즈이기 때문에 공차를 맞춰 제작하는 것이 어려우며 양산 시 불량률을 낮추는 공정이 필요하다. 그림 9는 홀딩토크의 시험 결과와 해석 결과를 보여주고 있으며 결과는 잘 맞는다.

3. 결 론

본 연구에서는 Claw pole 스테핑 모터의 설계 결과를 빠르게 도출하기 위해 축방향 자속을 고려한 자기 등가회로를 구성하였다. Claw pole 스테핑 모터의 경

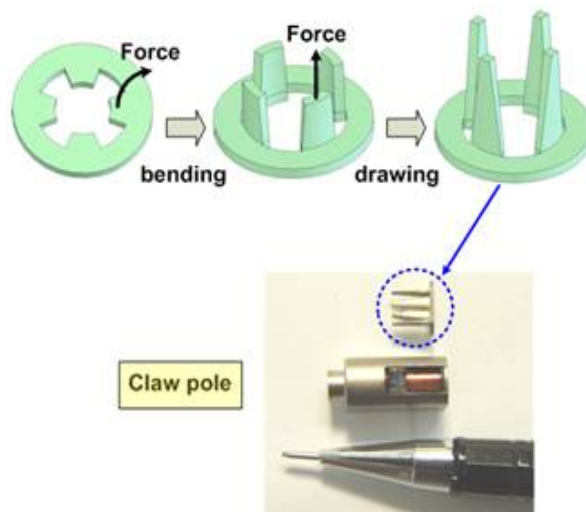
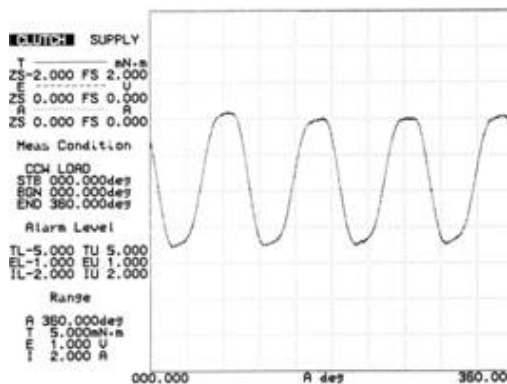
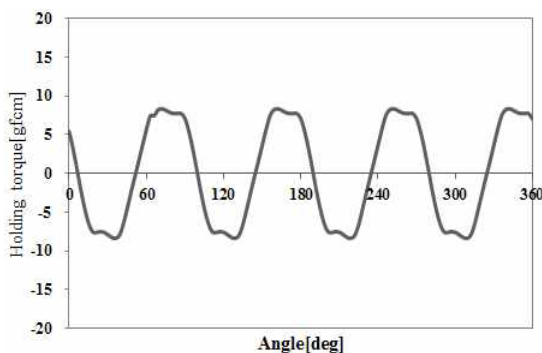


그림 8. Claw pole 스테핑 모터
Fig. 8. Claw pole stepping motor



(a) 실험파형



(b) 해석 파형

그림 9. 홀딩토크의 실험 및 해석 파형
Fig. 9. Measured and analysis waveform of holding torque

우 2개의 상이 존재하기 때문에 회전자 위치에 따른 자기등가회로를 각각 구성하였으며 설계된 모델을 3차원 유한요소법으로 검증하였다. 또한 본 연구의 타당성을 검증하기 위해 설계된 모델을 제작하였으며 시험 결과와 설계 결과가 잘 맞는 것을 확인하였다. 이상의 연구결과를 통해 제품 사양에 적합한 Claw pole 스텝핑 모터를 설계하는데 아주 효과적일 것이라 사료된다.

References

- [1] Takeo Ishikawa, and Ryuichi Takakusagi "Static Torque Characteristics of Permanent Magnet Type Stepping Motor with Claw Poles", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 36 (2000) 1854-1857.
- [2] Tatsuya Kikuchi, and Takashi Kenjo "Developing an Educational Simulation Program for the PM Stepping Motor" IEEE Transaction on Education, vol. 45, no. 1, pp. 70-78, February 2002.
- [3] Tatsuya Kikuchi, and Takashi Kenjo "Developing an Educational Simulation Program for the PM Stepping Motor" IEEE Transaction on Education, vol. 45, no. 1, pp. 70-78, February 2002.
- [4] Dae-Sung Jung, S.B.Lim, K.C.Kim, J.S.Ahn, S.C.Go, Y.G.Son and Ju Lee, "Optimization for improving static torque characteristic in permanent magnet stepping motor with claw poles," IEEE Transaction on Magnetics, vol. 43, no. 4, April 2007.

◇ 저자소개 ◇



정대성(鄭大成)

1977년 4월 10일생. 2009년 한양대 전기공학과 졸업(박사). 2009~2014년 현대모비스 연구개발본부 선임연구원. 2014년~현재 연암공업대학 스마트융합학부 조교수.

Tel : (055)751-2198

E-mail : campus0191@yc.ac.kr