

축방향 공극 구조의 정자계형 wobble 모터의 3D 유한요소 해석

우성봉*, 이은웅, 김성종, 최재영, 김준호
 충남대학교

3D FEM of Electromagnetic Wobble Motor with Axial Air-Gap Type

Woo, Sung-Bong* · Lee, Eun-Woong · Kim, Sung-Jong · Choi, Jae-Young · Kim, Jun-Ho
 Chung-Nam National University

Abstract - We designed the prototype of electromagnetic wobble motor which could be applied to ultrasonic catheter in the before study. So, In this paper we perform 3D FEM of the designed prototype model with the computer analysis tool(Magnet 6.4). Therefore we prove the characteristics and theorems of the wobble motor with 3D FEM.

1. 서 론

의료장비의 다기능화·고정밀화의 요구에 공학기술의 접목은 의공학이란 학문분야를 형성시키고 있다. 따라서, 의학 전문분야의 측정장치와 치료장치의 구동원으로 특수기능의 모터가 필요하다. 그 중의 한가지로 측정장치와 치료장치의 직경이 100[μ m]에서 2[mm]정도의 마이크로 액츄에이터(actuator)의 일종인 마이크로 모터의 연구개발이 진행되고 있다. 하지만, 의료장비의 대부분을 수입품에 의존하는 국내에서는 고정밀 의료장비의 가장 중요한 기능에서 구동용으로 사용되는 이런 마이크로 모터분야의 연구 및 개발이 미미한 실정이다[1][2].

본 연구팀은 고정밀 의료장비에 적용 가능한 마이크로 모터의 시작기 개발을 위해 정전형(electrostatic) 및 정자계형(magnetostatic) wobble 모터의 기하학적 구조와 재료특성에 따른 구동특성 및 기계적인 특성에 대한 연구를 수행하여 왔다[2].

선행 연구를 통해 축방향 공극을 가진 정자계형 wobble 모터가 정전형 wobble 모터보다는 체적당 발생 토오크가 $10^3 \sim 10^4$ 배정도 크고 제작과정의 실현성과 경제성에서 유리점이 많다는 것을 알 수 있었다[3]. 또한, 정전형은 구동하기 위해 필요한 고전압(high voltage), 고주파(high frequency)가 초음파 카테터(ultrasonic catheter)와 같은 고정밀 의료장비에 적용되기에는 어렵다는 것을 확인하였다[4].

그리하여, 본 연구팀은 모터의 토오크 특성 및 힘분포 해석과 같은 구동특성 및 기계적인 특성에 대한 연구를 통해 얻은 기초자료를 고려하여, 혈관에 관련된 질병의 진단과 치료에 이용하는 초음파 카테터(the ultrasonic catheter)와 같은 고정밀 의료장비에 적용 가능한 크기의 정자계형 wobble 모터의 시작기 모델을 설계하였다[4].

따라서, 본 연구에서는 컴퓨터 해석 툴(Magnet 6.4)을 이용하여, 선행연구에서 설계되어진 축방향 공극 구조의 정자계형 wobble 모터의 시작기 모델에 3차원 유한요소 해석을 적용하여 모터의 일반적인 특성 및 타당성을 검증하고자 한다.

2. 모터의 구조 및 구동원리

2.1 기본 구조

그림 1은 L. Paratte[5]등이 제안한 축방향 공극 구

조인 정자계형 wobble 모터의 분해도이다. 고정자는 모터의 기저(base)에 위치한 철 합금 재질의 디스크이고, 같은 재질인 원통형 지지기둥(post)은 고정자의 윗면에, 원통형 핀(pin)은 지지기둥의 윗면에 각각 놓여져 있다. 핀의 직경은 접촉마찰을 가장 최소화시킬 수 있도록 가능한 한 축소시키고, 자기포화에 대한 포텐셜을 가능한 한 감소시킬 수 있도록 기둥의 직경을 최대한 크게 한다. 중심을 일정한 크기로 구멍을 뚫은 고정자와 같은 재질의 디스크인 회전자는 핀의 윗면에 놓여져 있다. 핀 위에 회전자를 느슨하게 안착시키는 것은 회전자를 한쪽 방향으로 기울이거나 자유롭게 회전할 수 있게 하기 위해서이다.

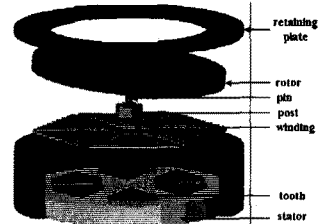


Fig. 1 Exploded view of axial air-gap type magnetostatic wobble motor

고정자에 부착시킨 평면한 버팀판(retaining plate)은 회전자위에 적층되어있다. 버팀판은 회전자가 고정자로부터 벗어나는 것을 방지하고 버팀판의 표면을 따라 회전자의 비틀림 운동(wobbling motion)이 가능하도록 한다. 따라서, 회전자는 고정자의 치가 아니라 버팀판과 접촉을 하게 된다. 회전자의 윗면은 버팀판의 홈(hole)을 통해 부하의 직접적인 접촉이 가능하도록 하였다.

고정자의 표면은 치료 구성원 삼각형의 단면도를 가진 돌기부를 포함하고 있다. 각각의 치들은 권선으로 둘러싸여져 있어서 전체 고정자의 표면은 지지기둥과 치 그리고 권선으로 구성되어 있다. 본 연구의 축방향 공극 구조의 정자계형 wobble 모터는 6개의 치들을 가진 구조이다.

2.2 동작 원리

축방향 공극 구조인 정자계형 wobble 모터는 한 상의 권선에 전원을 인가할 때, 발생하는 리턴스 힘을 이용하는 리턴스 구동원리에 의해 동작한다. 자로는 전원이 인가된 권선으로 둘러싸인 치와 치 위의 공극 및 회전자, 핀 그리고 고정자를 연결하고 있다. 고정자는 회전자에 있어서 자성체의 높은 투자율로 인해 공극의 퍼머먼스는 자로의 퍼머먼스를 좌우한다.

합성 리턴스 힘은 공극을 감소시키고 활성화된 권선 쪽으로 고정자를 잡아당긴다. 연속적인 권선의 전원인가는 그림 2와 같이 모터의 비틀림운동이 가능하도록 한다. 한번의 완전한 비틀림운동은 각각의 권선이 정확히 한번씩의 스텝구동을 하는 것으로부터 얻어낼 수 있다.

회전자의 기울기는 회전자의 가장자리가 버팀판을 따라 그리는 원의 반경이 회전자 원래의 반경보다 약간 작게 만든다.

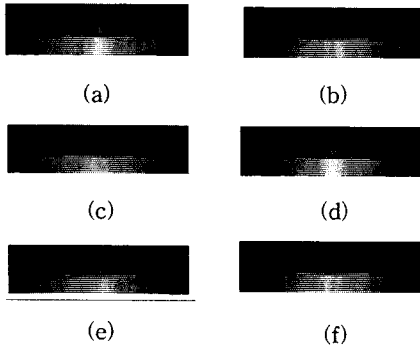


Fig. 2 Wobbling motion of rotor as each winding is energized in sequence

회전자의 가장자리에 의해 그려진 버팀판의 경로가 회전자의 원주보다 작기 때문에 비틀림운동으로 인해 회전자의 회전운동이 발생한다. 그림에서 회전자의 검은 점은 비틀림운동으로 인해 회전자의 회전을 나타내고 있다. 회전자의 완전한 1회의 회전을 위해 필요한 비틀림운동의 횟수의 관계를 비틀림운동 대 회전운동의 비라 한다[2][5].

3. 3차원 유한요소 해석

3.1 지배방정식

해석영역의 지배방정식은 구성관계에 따라 Maxwell 방정식 (1), (2)로 유도된다. 영구자석재의 자속밀도 B , 자계강도 H , 보자력 자계강도 H_c 의 관계는 식 (3)으로 된다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$B = \mu H + \mu_0 H_c \quad (3)$$

여기서, μ , μ_0 는 각각 투자율과 공극 투자율이다.

전류 연속성으로부터 전류 벡터 포텐셜(T)을 정의하면 식 (4)와 같다.

$$J = \nabla \times T \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)에 대입하여 정리한 벡터량을 새로운 자기 스칼라 포텐셜(Ω^*)로 정의하면 식 (5)가 얻어진다[6].

$$H - T = -\nabla \Omega^* \quad (5)$$

식 (5)를 H 로 나타내어 식 (2)에 대입하면 지배방정식 식 (6)을 얻는다.

$$\nabla \cdot [\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c] = 0 \quad (6)$$

이 지배방정식을 정식화하기 위해 Galerkin법을 이용하여 각 요소에 대한 잔차 G_{ei} 를 구하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} G_{ei} &= \int_{V_i} [N_i \nabla \cdot \{\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c\}] \cdot dv \\ &= \int_{V_i} [\nabla \cdot (N_i \{\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c\})] \cdot dv \\ &\quad - \int_{V_i} [\{\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c\} \nabla N_i] \cdot dv \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, N_i 는 형상함수이다.

식 (7)의 우변 첫항에 대해 Gauss 정리를 사용하여 정리하면 식 (8)과 같다. 경계조건을 적용하면 식 (8)은 "0"이 되므로 잔차 G_{ei} 는 식 (9)가 된다.

$$\begin{aligned} &\int_{V_i} [\nabla \cdot (N_i \{\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c\})] \cdot dv \\ &= \int_{S_i} [N_i \{\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c\}] \cdot nds \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} G_{ei} &= \int_{V_i} [\{\mu(T - \nabla \Omega^*) + \mu_0 H_c\} \cdot \nabla N_i] \cdot dv \\ &= \mu \int_{V_i} [\nabla \Omega^* \cdot \nabla N_i] \cdot dv - \int_{V_i} [(\mu T + \mu_0 H_c) \cdot \nabla N_i] \cdot dv = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

일차식으로 근사화시킨 자기스칼라포텐셜 Ω^* 을 식 (9)에 대입하고 모든 요소에 대해 적용하면 식 (10)과 같은 행렬식이 얻어진다.

$$\mu[S][\Omega^*] - [F] = 0 \quad (10)$$

여기서, $[S]$ 는 계수행렬이고, $[F]$ 는 구동벡터이다.

3.2 유한요소 해석을 위한 3차원 모델링

그림 3은 유한요소 해석을 위한 축방향 공극 구조의 정자계형 wobble 모터의 3차원 모델링을 나타내고 있다. 본 연구에서는 설계하고자 하는 정자계형 wobble 모터의 재질은 고정자와 회전자는 밀링작업이 다른 철합금 재질보다 용이한 특수 철합금 재질인 Armco Iron이며, 코일은 경도가 강하고 원통형의 몰당이 쉬운 맨드릴(mandrel) 알루미늄을 사용한다. 그리고 버팀판은 절연성이 강한 특수 유리재질인 프렉시그라스(plexiglass)를 이용한다[2].

하지만, 설계되어진 모터의 재질에 대한 정확한 특성 데이터가 없으므로, 해석의 편의를 위해 투자율이 큰 일반적인 모터 재질을 사용하였다. 재질에 대한 특성 데이터를 입력할 수 없어 정확한 해석결과를 얻을 수는 없지만, 설계되어진 모터의 일반적인 특성 및 설계모델에 대한 이론의 타당성을 검증할 수 있을 것이다.

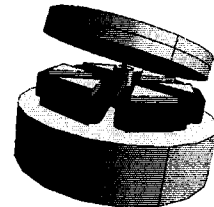


Fig. 3 3-D modeling of design model

회전자의 기울기는 본 연구에서는 15°로 제한하였고 버팀판과 모터의 원통형 외함(shield)은 고려하지 않았다. 해석을 위해 고정자, 회전자 및 지지기둥에 비투자율(μ_r)은 1000인 선형 재질을 사용하였고 권선의 턴수는 10(turn), 전류는 0.5[A]를 인가하였다. 그리고, 해석의 정확도를 높이기 위해 고계차(polynomial order)는 2로 설정하여 해석하였다.

3.3 유한요소 해석 결과

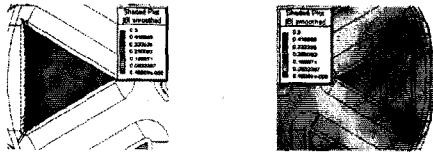
3.3.1 지지기둥

지지기둥은 회전자와 접촉하는 상부와 고정자와 접촉하는 지지기둥의 하부 두 부분으로 나눌 수 있다. 코일의 여자방향인 자속이 고정자판으로 들어가는 방향이므로 발생되어진 자속이 고정자→하부기둥→상부기둥→회전자의 순으로 흐르므로 해석결과에서 자속의 흐름이 하부에서 상부로 화살표로 표현된 것을 볼 수 있다. 다만, 상부 지지기둥과 하부 지지기둥의 반경이 차이가 있으므로 넓은 반경을 가진 하부 지지기둥이 상부보다 자속밀도가 낮게 나타남을 볼 수 있다.



Fig. 4 Distribution of flux density of post

3.3.2 치



(a) Upper tooth (b) Lower tooth

Fig. 5 Distribution of flux density of tooth

그림 5는 삼각형 모양의 치에서의 자속밀도 분포를 나타낸다. 그림 5(a)는 회전자로부터 공극을 통해 내려오는 자속이 삼각형에 안쪽 모서리보다 공극길이와 작은 바깥쪽에 밀도가 높은 것을 볼 수 있고 원형의 회전자와 삼각형의 치형상에 의해 공극길이의 분포가 바깥쪽에서도 모서리 부분이 중앙 부분에 비해 상대적으로 작기 때문에 바깥쪽 전체가 아닌 양쪽 모서리 부분에서 포화가 이루어지는 것을 볼 수 있다.

그림 5(b)는 고정자와 맞붙어 있는 치의 하부에서 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 여기에서는 큰 체적을 가진 고정자측으로 자속이 흘러가므로 치의 어느 한쪽으로 자속이 집중되어지지 않아야 하는데, 삼각형의 구조를 가진 치의 형상으로 인해 3모서리 부분에서 자속밀도가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

3.3.3 고정자판

고정자에서는 치와 지지기둥 부분에서 자속밀도 분포가 높게 나타나지만, 자속이 가장 짧은 거리로 흐르므로 치와 지지기둥을 통과하는 최단거리와 그 주변에만 분포함을 알 수 있다. 특히, 치와 맞붙은 부분은 치와 마찬가지로 삼각형의 모서리 부분에서 자속밀도는 높게 분포한다.

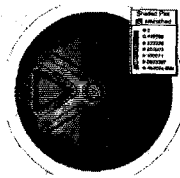
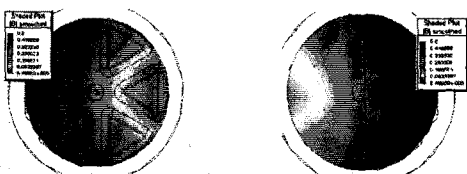


Fig. 6 Distribution of flux density of upper stator

3.3.4 회전자



(a) Lower rotor (b) Upper rotor

Fig. 7 Distribution of flux density of rotor

그림 7(a)는 회전자 하부에서의 자속밀도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보여지듯이 지지기둥과 여자되어진 코일이 감겨진 3시 방향의 삼각형 치의 바깥쪽 변에 자속밀도가 높게 나타남을 볼 수 있다. 그림 7(b)는 회전자 상부에서의 자속밀도 분포를 보여주는데, 지지기둥에서 치의 방향으로 자속이 부채꼴 모양으로 분포하지만, 치에서와 동일하게 치의 바깥쪽 변에 중심 부분이 양 모서리 부분보다 낮은 자속밀도가 분포함을 볼 수 있다.

3.3.5 해석모델의 단면

그림 8은 이론적으로 가정했던 설계모델의 자속의 흐름이 타당함을 보여주고 있다. 이론에서 제시했던 바와 같이 자로는 치→고정자→지지기둥→회전자→치의 순으로 형성되어지고 있음을 보여주고 있다. 또한, 하부 지지기둥과 상부 지지기둥이 맞붙어 있는 하부 지지기둥의 윗 면쪽에 병목현상처럼 자속밀도가 분포함을 볼 수 있고, 치 부분에서 치의 상부에서는 바깥변 부분에 하부에서는 안쪽 모서리 부분에서 자속밀도가 높게 분포함을 볼 수 있다. 이것은 자로의 가장 짧은 방향으로 형성되어지는 성질을 갖기 때문인 것으로 판단된다.

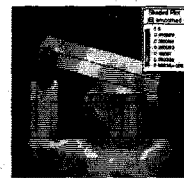


Fig. 8 Distribution of cross-sectional view of analysis model

3. 결 론

본 연구에서는 방사상 공극 구조의 정전형 wobble 모터보다 단위체적당 발생토크가 훨씬 크고 제작과정의 실현성과 경제성에서 유리하며, 특히, 의료장비에 적용하는데 있어서 많은 장점을 가지고 있다는 것을 선행연구에서 규명한 바 있는 축방향 공극 구조의 정자계형 wobble 모터에 대해 정립한 이론의 타당성을 확인하였다. 즉, 선행연구를 통해 얻은 기초자료를 고려하여 설계한 시작기 모델을 컴퓨터 해석 툴(Magnet 6.4)을 이용한 3차원 유한요소 해석을 통해, 모터에 대한 이론의 타당성을 규명하였다.

[참고 문헌]

- [1] K. Deng and M. Mehregany, "Outer-rotor polysilicon wobble motors," in Proc. IEEE MEMS, Oiso, Japan, Jan. 25-28, 1994, pp. 269-272
- [2] 이은용의 6명, 한국전력공사, "MEMS 기술을 이용한 Wobble Motor에 대한 연구(최종보고서)", 2000
- [3] 우성봉의 4명, "정자계형 wobble 모터와 정전계형 wobble 모터의 토크 특성비교", 대한전기학회 논문지 49권(B), No.2, pp.110-116, 2000, 2.
- [4] 우성봉, "정자계형 Wobble 모터의 시작기 모델설계", '00 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp.726-728, 2000, 7
- [5] L.Paratte, G.A.Racine, N.F.de Rooji and E.Bornand, "A Rigid Ring Electrostatic Harmonic Wobble Motor with Axial Field", '91 IEEE, pp.890-893, 1991.
- [6] P. Silver, "Three-Dimensional Magnetostatic Field Analysis of Electrical Machinery by FEM Method", IEEE Trans. Power Apparatus and System Vol. PAS-100, No.8 .pp.4007, Aug. 1981

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초 전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.