

정자계형 wobble 모터와 정전계형 wobble 모터의 토크 특성 비교

論 文
49B-2-5

Torque Characteristic Comparison of Magnetostatic Wobble Motor with Electrostatic Wobble Motor

禹成奉* · 李殷雄** · 吳永雄* · 尹瑞珍* · 崔宰榮*

(Sung-Bong Woo · Eun-Woong Lee · Young-Woong Oh · Seo-Jin Yun · Jae-Young Choi)

Abstract - This paper describes the driving principles geometrically and analyzes the generating torque with the structure of magnetostatic wobble motor and electrostatic wobble motor. Then we compare the torque characteristics of magnetostatic wobble motor with those of electrostatic wobble motor using F.E.M. Through the results, we investigate how the changes of design parameters affect torque characteristics.

Key Words : wobble, MEMS, 정자계형, 정전형, 유한요소법

1. 서 론

MEMS(Micro Electro Mechanical System)기술을 이용해 전자조립용, 의학용, 미소공간을 움직이는 구조체 및 군사용으로 활용 가능한 응용분야를 가지고 있는 정전형 wobble 모터에 대해서는 등각사상을 이용한 근사적인 해석과 유한요소법으로 발생하는 토크 특성을 앞선 연구[1]에서 확인하였지만, 정자계형 wobble 모터의 토크 특성에 대한 정확한 해석은 아직 이루어지지 않았다. 그러니까 정자계형 wobble모터는 고정자와 회전자사이의 공극 간격이나 형상등의 기하학적인 구성이 토크 특성에 미치는 영향 등이 해석되지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 정전형 wobble 모터와 정자계형 wobble 모터의 활성 영역에서 발생하는 토크의 특성을 해석하여 비교하고, 실제 이를 토대로 정자계형 wobble 모터의 토크 특성을 구하고자 한다.

2. 구동원리

정자계형 wobble 모터는 전류가 흐르는 코일이 감겨진 세그먼트(segment)로 구성되어 있고, 정전형 wobble 모터는 DC 전압을 직접 인가할 수 있는 실리콘(Si)과 같은 반도체 재료의 세그먼트로 구성되어 있다는 점에서 구조적인 차이를 보이지만, 정자계 에너지의 변화와 정전계 에너지의 변화

로 회전력을 얻는 두 모터의 기본적인 구동원리는 동일하다 [2].

그림 1은 wobble 모터의 간단한 구조 및 구동원리를 나타내고 있다. 정자계형의 경우는 그림 1(a)과 같이 세그먼트 A에 감겨진 코일에 전류를 흘려 전자계력을 발생시키고, 정전형의 경우에는 세그먼트 A에 전압을 인가하여 여기시켜, 발생하는 정전력으로 회전시키고, 다음 순간에 그림 1(b)와 같이 정자계형은 세그먼트 B의 코일에 전류를 흘리고, 정전형은 세그먼트 B에 전압을 인가하여 회전자에 고정자의 내경을 따라 구름운동 하여 고정자와 접촉하게 되는 반면 회전자 중심은 구름 둘레에 상응하는 각도의 반대방향으로 회전하게 된다. 동일한 방법으로 정자계형, 정전형 두 형태 모두 다 세그먼트 C, D, A의 코일에 순차적으로 전류를 흘리거나, 전압을 인가하면 회전자는 고정자의 중심으로 1회전하는 동안 회전자의 중심에 대해서도 매우 작은 각도로 회전하게 된다[3].

이처럼, 회전자가 고정자의 중심에 대해 회전하는 각도와 회전자의 중심에 대해 회전하는 각도사이에는 차이가 생기게 되는데, 이 차이로 인해 식 (1)과 같은 일종의 감쇄 기어비 n 이 성립하게 된다.

$$n = \frac{R}{R-r} = \frac{\theta}{\phi} \quad (1)$$

여기서,

θ : 고정자-회전자 접점과 여기 전극의 중심이 이루는 각

ϕ : 회전자가 회전한 각

R: 고정자 반경

r: 회전자 반경

* 準會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正會員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 18日

最終日字 : 2000年 1月 15日

(b) Electrostatic wobble motor[5]

	R_s (unity)	R_r (unity)	Δ	Γ	t (unity)	공극 유전율 ϵ_1	절연체 유전율 ϵ_2
기본모델	1	0.83	36°	9°	0.07	ϵ_0	$5\epsilon_0$
t		0.87			0.03		
[절연층 두께]		0.85			0.05		
변형 모델		0.81			0.09		
		0.79			0.11		
각호비 변형 모델	0.83	0.83	30°	15°	0.07		
			33°	12°			
			39°	6°			
			42°	3°			

본 연구에서는 먼저, 두 모터의 해석을 위해 각각의 기본 모델을 선정하여 활성 영역에 대한 유한 요소 해석을 수행하고, 활성 영역의 유효자속 중심의 위치를 변화시킨 각변위 θ 의 변화에 의해 발생하는 토오크 특성에 대한 해석을 한다. 그리고 각변위의 변화에 따른 두 모델의 토오크 특성을 비교하여 본다. 두 모터에 대한 설계 파라미터들은 표 1과 같다.

4. 유한 요소 해석

4.1 정자계형 지배 방정식

맥스웰(Maxwell) 방정식으로부터 해석을 위한 지배 방정식은 식 (2), (3), (4)과 같다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{3}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \tag{4}$$

맥스웰 방정식인 식 (4)과 식 (5)에서 다음 식 (6)과 같이 벡터 포텐셜을 정의한다.

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \tag{5}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{6}$$

식 (2)에 식 (5), (6)를 대입하면 다음 식 (7)과 같은 지배 방정식이 얻어진다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{A}) = \mathbf{J} \tag{7}$$

4.2 정전형 지배 방정식[1][6]

라플라스(Laplace) 방정식으로부터 해석을 위한 영역별 경계의 지배 방정식은 식 (8), (9), (10)과 같고, 그림 3에 도시하였다. 지배 방정식 (8)을 유한요소법에 의해 정식화한 전체 요소 계수 행렬은 식 (12)와 같다. 유한요소법에 의한 표준화 정전용량은 식(13)이고, 가상 변위 원리에 의한 토오크는 식 (14)와 같다.

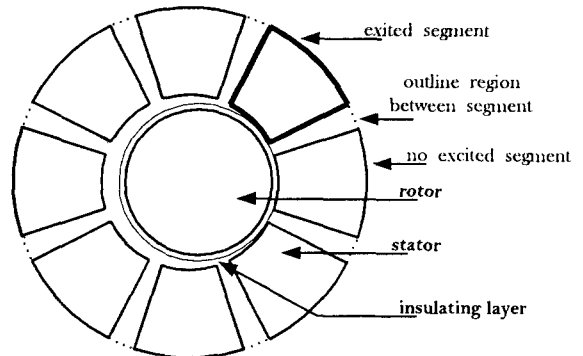


그림 3 유한 요소 해석을 위한 경계조건
Fig. 3 Boundary condition for the F.E.M analysis

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (\text{airgap region}) \tag{8}$$

$$v = 0 \quad (\text{no excited segment}) \tag{9}$$

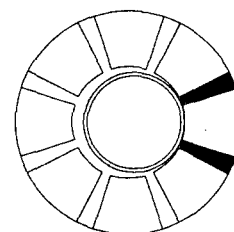
$$v = V \quad (\text{excited segment}) \tag{10}$$

$$\frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (\text{outline region between segments}) \tag{11}$$

$$[V_i][C_i] = 0 \tag{12}$$

$$\frac{C}{\epsilon_0} = \int \frac{E^2}{V^2} ds \tag{13}$$

$$T(\theta) = \frac{1}{2} V^2 \frac{\Delta C(\theta)}{\Delta \theta} \tag{14}$$



(a) $\theta = 0^\circ$

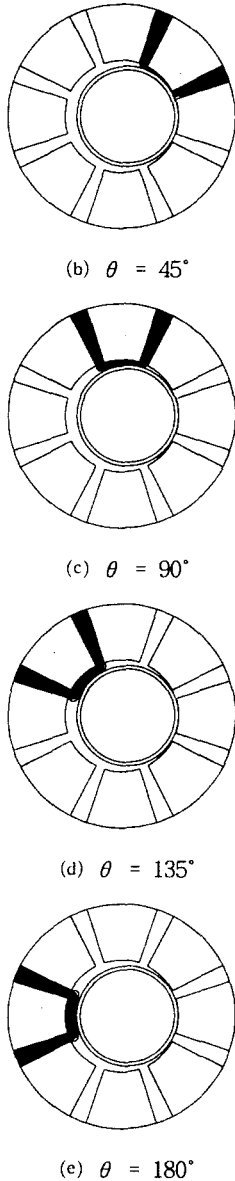
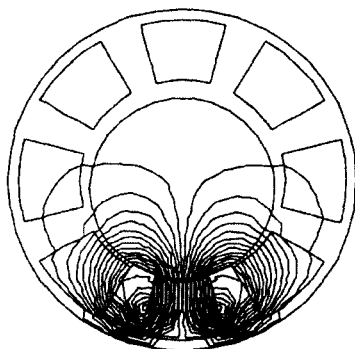
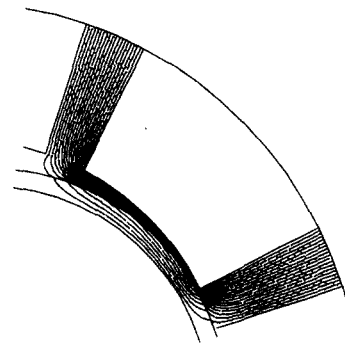


그림 4 정전형 wobble 모터의 θ 변화에 따른 등전위선 분포

Fig. 4 Depending on variation of θ , distribution of equipotential line of electrostatic wobble motor



(a) Magnetostatic wobble motor



(b) Electrostatic wobble motor

그림 5 정자계형 및 정전형 wobble 모터의 계의 분포

Fig. 5 Field distribution of magnetostatic and electrostatic wobble motor

(Magnetostatic : flux line)

(Electrostatic : equipotential line)

정전형 wobble 모터의 대표적인 θ 위치에 대한 등전위선 분포를 그림 4에 나타내었으며, 그림 5에서 각각의 모터에 대한 유한요소 해석시 회전자의 위치 변화에 대한 기준은 처음 여기 된 세그먼트의 각 중심인 회전자와 여기 된 세그먼트간의 접촉점으로 하며, 두 형태 모두다 각각의 세그먼트를 순차적으로 여기시킨다고 가정했을 때 어느 경우든 회전자와 세그먼트간의 공극분포는 동일하므로 강한 자계와 전계가 형성이 되는 활성 공극 길이가 최소인 그림 5(a), (b)의 영역과 같이 한 개의 세그먼트 여기만을 고려하여 해석시 회전자의 위치 선정을 하였다. 그리고 해석시 공극유지 조건은 회전자 하부에 핀 또는 베어링과 같은 기하학적인 구조를 이용하고, 특히 정전형과 같은 경우는 회전자의 표면에 유전체(상대유전율, $\epsilon_r=3$)를 코팅하는 것이다[2].

그림 5(a)는 정자계형 wobble 모터의 활성 영역에서의 회전자와 여기 된 세그먼트사이의 자력선(flux line)분포를 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 활성 공극 길이가 최소값인 활성 영역(즉, 고정자 공동(cavity)의 중심으로부터 편심된 회전자의 접촉점)에서는 자력선의 분포 밀도가 현저하게 증가하지만, 활성 공극 길이의 값이 증가할수록 자력선의 분포 밀도는 반비례적으로 감소한다는 것을 알 수 있다.

따라서, 순차적으로 다음 세그먼트의 여기를 가정했을 때, 그 세그먼트의 유효자속 중심점과 회전자사이의 강한 자계가 형성되어 결국, 회전자 중심에 대해 고토오크, 저속도의 운전이 가능한 회전자의 구름운동을 하게 된다.

그림 5(b)는 $\theta=45^\circ$ 일 때의 정전형 wobble 모터의 해석 모델의 등전위선 분포를 확대한 것이다. 회전자와 여기 된 세그먼트사이의 공극에 강한 전계가 형성되며, 고정자와 회전자의 중심이 일치한 일반적인 모터와는 달리 여기 된 세그먼트와 회전자사이에 매우 작은 공극을 이루면서도 포화영역이 발생하지 않으므로 여기 된 세그먼트 모서리 끝 부분에서 전계가 공극의 전계에 비해 무시할 수 없을 정도로 강하게 형성된다.

정자계형 wobble 모터에 대한 유한 요소 해석 결과를 표준화하여 그림 6에 나타내었다.

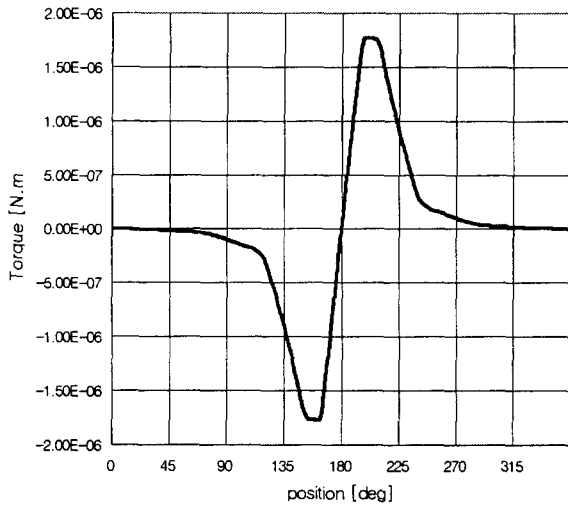


그림 6 유한요소법에 의한 정자계형 wobble 모터의 토오크 특성 해석 결과

Fig. 6 Torque analysis results of magnetostatic wobble motor by F.E.M

그림 7은 유한 요소 해석 결과를 표준화하여 그 결과를 앞선 연구[8]에서 해석방법 및 이론적 근거가 제시된 바 있는 등각사상 해석에 의한 결과와 동시에 나타낸 것이다. 여기서, 유한요소 해석과 등각사상에 의한 해석에 의해 얻은 토오크 특성 곡선은 거의 일치한다.

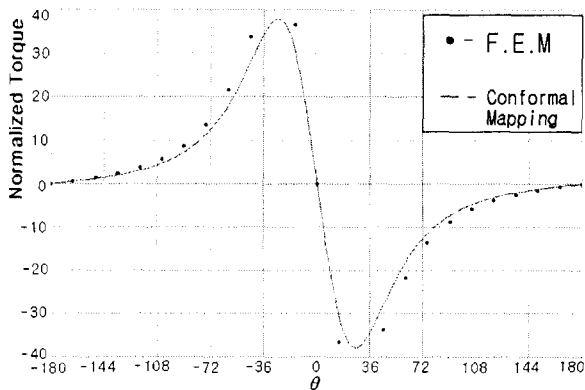


그림 7 등각사상 해석과 유한요소법을 이용한 토오크 해석 결과 비교

Fig. 7 Comparison of torque analysis results by conformal mapping and F.E.M

그림 6에서 알 수 있듯이 정자계형 wobble 모터도 역시 고정자의 공동에 대한 회전자의 편심 구조에 의해 공극이 작은 쪽에서 고 토오크가 발생됨을 확인할 수 있다.

하지만, 그림 6, 7에서 나타난 것과 같이 본 연구에서는

정자계형 wobble 모터의 활성 영역의 단위 체적당 최대 토오크 값은 1.72×10^{-6} [Nm]이었고, 정전형 wobble 모터의 활성 영역의 단위 체적당 최대 토오크 값을 정자계형의 토오크 단위로 환산한 결과, 3.675×10^{-10} [Nm]였다. 즉, 동일한 단위 체적당 최대 토오크 값을 볼 때, 정자계형이 약 4.85×10^3 배 정도의 큰 토오크를 발생한다는 사실을 알 수 있다.

두 모터는 정자계형과 정전형이라는 것과 정자계형은 일반적인 설계 파라미터 크기 적용이 가능하지만, 정전형은 설계 파라미터 크기 단위가 μm 이라는 차이점이 두 모터간에 존재하더라도, 각 설계 파라미터들의 일정한 비율을 적용해 해석한 결과, 두 경우 모두 다 활성 공극 길이가 최소인 영역에서 각각 강한 자계와 전계가 형성되어 회전자와 고정자 공동의 중심에 대해 고 토오크, 저 속도의 편심 운동이 가능하다.

3. 결론

본 연구에서는 정자계형 및 정전형 wobble 모터의 기본적인 구동원리를 제시하였으며, 정자계형 wobble 모터의 활성 영역에서 발생하는 토오크 특성 해석을 유한 요소 해석을 수행하여, 모터의 고정자나 회전자사이의 공극 간격 및 형상 등과 같은 기하학적인 구조에 따른 발생 토오크를 구하였다.

또한 정자계형 wobble 모터에 대한 유한 요소 해석 결과를 토대로 정전형 wobble 모터의 해석 결과와 비교한 결과 정자계형이 정전형보다 단위 체적당 발생 최대 토오크가 훨씬 큼을 확인하였다. 또한, 정전형의 발생 토오크는 작지만, 정밀한 저속 기어비 운동이 가능한 구동 토오크를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

정자계형과 정전형이라는 차이점으로 인해 두 모터에 적용하는 설계 파라미터의 크기 및 토오크의 크기는 현저한 차이를 보이지만 활성 공극 길이가 최소인 점에서 강한 자계와 전계가 형성됨을 확인할 수 있었고, 실제 정자계형 wobble 모터의 토오크 특성을 구하였다.

참 고 문 헌

- [1] 윤서진의 2인, "유한요소법을 이용한 하모닉 모터의 토오크 특성 해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 77-79, 1998. 11.
- [2] 우성봉의 4인, "정자계형 wobble motor의 회전자 편심에 의한 힘의 분포와 토오크 계산", 대한전기학회 전기기기연구회 논문집, pp. 122-125, 1999. 5.
- [3] M. Mehregany, et al.: "Operation of Microfabricated Harmonic and Ordinary Side-Drive Motors", Proc. 3rd. IEEE MEMS Workshop, pp. 1-8, Napa Valley, Feb, 1990.
- [4] A. Viviani, "Experimental and Theoretical Study of Hypocycloidal Motors with Two-Harmonics Field Windings", IEEE Power Engineering Society, pp.15-20, May 1979.

[5] S. C. Jacobsen et al, "A Design Overview of an Eccentric-motion Electrostatic Microactuator(the Wobble Motor)", Sensor and Actuator, 20, pp. 1-16, 1989

[6] S. Wiak, P. Di Barba, A. Savini, "3-D Computer Aided Analysis of the 'Berkeley' Electrostatic Micromotor", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 31, No. 3, pp.2108-2111, May 1995.

[7] 윤서진의 2명, "Harmonic Motor의 회전자 편심과 유전체종류에 의한 토오크 특성", 대한전기학회 전기기기 연구회 '97 추계학술대회 논문집, pp.33-36, 1997. 10. 25

[8] 윤서진의 2명, "등각 사상을 이용한 하모닉 모터의 토오크 특성해석", 대한전기학회 논문지 48권, No.3, pp. 104-109, 1999. 3.

저 자 소 개



우 성 봉 (禹 成 奉)
 1973년 3월 23일 생. 1999년 동아대 전기 공학과 졸업. 1999년~현재 충남대 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 042-823-6426, Fax : 042-823-7970
 E-mail : woo61@daum.net



오 영 웅 (吳 永 雄)
 1976년 4월 30일 생. 1998년 충남대 전기 공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 042-823-6426



이 은 웅 (李 殷 雄)
 1944년 8월 14일 생. 1971년 한양대 전기 공학과 졸업. 1974년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1982~1983년, 1985~1986년 캐나다 McGill 대학 방문교수, 1984~1985년 대한전기학회 대전 지부장, 1987년~현재 대한전기학회 평의원, 1989~현재 대한전기학회 편집위원('89~'90), 학술이사('91~'92), 편집이사('93~'94), 편집위원장('95), 감사('96), 부회장('97~현재), 1995년 대한전기학회 전기기기 연구회 간사장, 1995~1997년 충남대 공대 학장, 산업대학원장('96~'97), 현재 충남대 전기공학과 교수, 대한전기학회 부회장
 Tel : 042-821-5652, Fax : 042-823-7970
 E-mail : ewlee@hanbat.cnu.ac.kr



윤 서 진 (尹 瑞 珍)
 1974년 11월 1일 생. 1997년 충남대 전기 공학과 졸업. 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정, 1997년 9월~현재 울산공업고등학교 정보통신과 교사
 Tel : 052-260-5619



최 재 영 (崔 宰 榮)
 1973년 6월 11일 생. 1999년 충남대 전기 공학과 졸업. 1999년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 042-823-6426
 E-mail : mmissing@daum.net