1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 1999. 7.19-21

유한요소법을 이용한 정자계형 Wobble 모터와 정전형 Wobble 모터의 토오크 특성 비교

우성봉*, 이은웅*, 오영웅*, 윤서진*, 최재영*
충남대학교*

Torque Characteristics Comparision of Magnetostatic Wobble Motor with Electrostat using Finite Element Method

Sung-Bong Woo*, Eun-Woong Lee*, Young-Woong Oh*, Seo-Jin Yun*, Jae-Young Choi*
Chungnam National University*

Abstract - This paper analyzes the torque characteristics with the structure of magnetostatic wobble motor and then compares the torque characteristics of magnetostatic wobble motor with those of electrostatic wobble motor using F.E.M. Through the results, we investigates how design parameters' change affect torque characteristics.

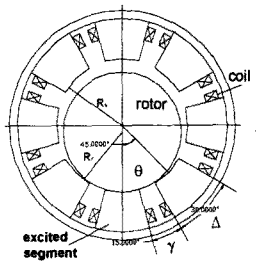
1. 서 론

정전형 Wobble 모터에 대해서는 등각사상을 이용한 근사적인 해석과 유한 요소법으로 발생하는 토오크 특성을 앞선 연구에서 확인하였지만[1], 정자계형 Wobble 모터의 토오크 특성에 대한 보다 정확한 해석은 아직 미미하다. 그러므로 정자계형 Wobble모터의 고정자나 회전자 사이의 공극 간격 및 형상 등과 같은 기하학적인 구조를 고려한 토오크 특성 해석이 요구된다.

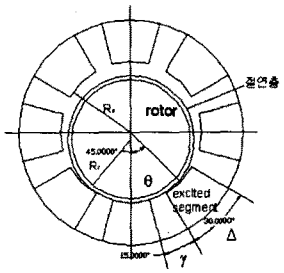
따라서, 본 연구에서는 유한 요소법을 이용하여 정전형 Wobble 모터와 정자계형 Wobble 모터의 활성 영역에서 발생하는 토오크의 특성을 해석하여 비교하고, 실제 정자계형 Wobble 모터의 토오크 특성을 구하고자 한다.

2. 해석을 위한 모델 선정

그림 1은 유한요소법 해석을 위해 간소화한 정자계형 Wobble Motor와 정전형 Wobble 모터의 기하학적 형상이다. 정자계형 Wobble 모터의 회전자는 투자율이 높은 철심으로 되어 있으며, 각각의 세그먼트로 구성되어 있는 고정자에 코일이 감겨져 있다. 반면에 최근 MEMS에서 이용되는 정전형 Wobble 모터는 실리콘과 같은 반도체 재료로 되어 있는 회전자상의 원주를 얇은 두께의 유전체가 둘러싸고 있고, 이 유전체의 두께에 따라 토오크의 값이 변하는 특징이 있다. 그리고 정자계형과 마찬가지로 각각 세그먼트로 되어 있는 구조는 같으나 코일에 전류를 흘려 고정자를 여기시키는 정자계형과는 달리 정전형은 DC 전압을 고정자에 인가한다. 실제 두 모터의 설계 파라미터들의 크기는 현저하게 차이가 나지만, 본 연구에서는 두 모델의 토오크 특성 해석 비교를 위해 일정한 비율로 각각의 설계 파라미터들을 고려하여, 고정자의 반경(R_s)을 단위길이 1인 기준으로 하여, 회전자 반경을 R_r를 나타내고, 정자계형 Wobble 모터의 경우에서는 활성 회전자의 축방향 길이를 1이라 하고, 활성 영역의 고정자 중심에 대한 세그먼트(segment)의 중심이 이루는 각을 "Δ", 세그먼트간 공극 너비의 각을 "γ", 그리고 고정자-회전자간의 접촉점과 여기된 세그먼트의 중심이 이루는 각이 "θ"으로 하여 설계 파라미터들을 적용한다. 정전형 Wobble 모터에서는 회전자를 접지시켰고, 활성 영역의 고정자측 세그먼트의 전압을 인가한다.



(a) Magnetostatic Wobble Motor



(b) Electrostatic Wobble Motor

Fig 1. Schematic for Analysis

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 θ의 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.

Table 1. Design Parameters for Analysis

(a) Magnetostatic Wobble Motor[2]

R_s [unity]	1
R_r [unity]	0.9
l [unity]	0.86
Δ	30°
γ	15°

(b) Electrostatic Wobble Motor[3]

	R_s [unity]	R_r [unity]	Δ	Υ	t [unity]	공극 유전율 ε_1	절연체 유전율 ε_2
기본 모델	1	0.83	36°	9°	0.07	ε_0	$5\varepsilon_0$
t [절연층 두께] 변형 모델		0.87			0.03		
		0.85			0.05		
		0.81			0.09		
		0.79			0.11		
각호비 변형 모델		0.83	30°	15°	0.07		
			33°	12°			
			39°	6°			
			42°	3°			

3. 유한 요소 해석

1) 정자계형 지배 방정식

맥스웰 방정식으로부터 해석을 위한 지배 방정식은 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$\nabla \times H = J \tag{1}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{2}$$

$$B = \mu H \tag{3}$$

맥스웰 방정식인 식 (3)과 식 (4)에서 다음 식 (5)와 이 벡터 포텐셜을 정의한다.

$$\nabla \cdot (\nabla \times A) \equiv 0 \tag{4}$$

$$B = \nabla \times A \tag{5}$$

식 (1)에 식 (4), (5)를 대입하면 다음 식 (6)과 같은 배 방정식이 얻어진다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times A) = J \tag{6}$$

2) 정전형 지배 방정식

참고문헌 [1], [3]에 이미 발표한 바와 같이 정전형 배 방정식은 식 (7), (8), (9), (10)과 같다.

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = 0 \quad (\textit{airgap region}) \tag{7}$$

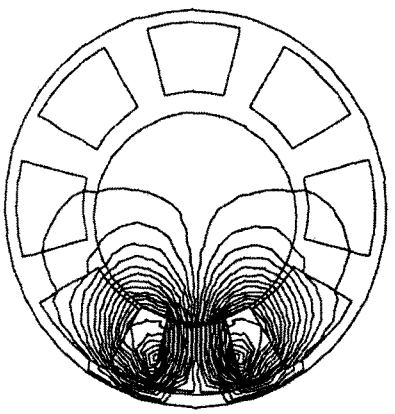
$$v = 0 \quad (\textit{no excited segment}) \tag{8}$$

$$v = V \quad (\textit{excited segment}) \tag{9}$$

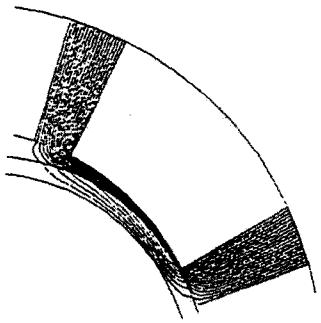
$$\frac{\partial v}{\partial n} = 0 \ (\textit{outline region between segments}) \tag{10}$$

그림 2(a)는 정자계형 Wobble 모터의 활성 영역에서 의회전자와 여기된 세그먼트사이의 자력선(flux line) 분포를 나타낸 것이다. 그림 2에서 활성 공극 길이가 최소값인 활성 영역(즉, 고정자 공동의 중심으로부터 편심된 회전자의 접촉점)에서는 자력선의 분포 밀도가 현저하게 높아지지만, 활성 공극길이의 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 2(b)는 정전형 Wobble 모터의 θ=45° 일 때의 정전형 Wobble 모터의 해석 모델의 등전위선 분포를 확대한 것이다. 회전자와 여기된 세그먼트 사이의 공극에 강한 전계가 형성되며, 고정자와 회전자의 중심이 일치한 일반적인 모터와는 달리 여기된 세그먼트와 회전자사이에 매우 작은 공극을 이루면서도 포화영역이 발생하지 않으므로 여기된 세그먼트 모서리 끝 부분에서 전계가 공극의 전계에 비해 무시할 수 없을 정도로 강하게 형성된다.



(a) Magnetostatic Wobble Moto



(b) Electrostatic Wobble Mot

Fig 2.Field Distribution of Mo
(Magnetostatic : Flux Line
(Electrostatic : Equipotential

유한 요소 해석 결과를 표준화하여 그 결과를 정자계형 Wobble 모터에 대한 것은 그림 3에 나타내었다.

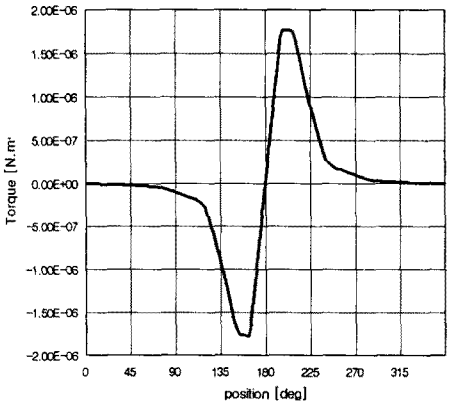


Fig 3. Torque Analysis Results of Magnetosta Wobble Motor by F.E.M

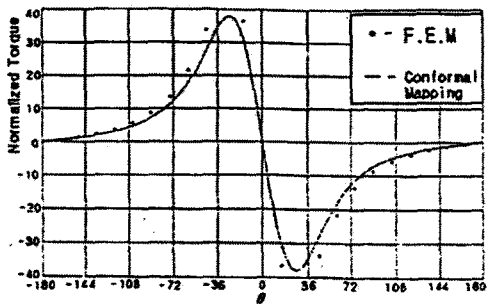


Fig 4. Comparision of Torque Analysis Res by Conformal Mapping and F.E.M

그림 4는 유한 요소 해석 결과를 표준화하여 그 결과를 등각사상 해석에 의한 결과와 동시에 나타낸 것이다.(4 여기서, 유한요소 해석과 등각사상에 의한 해석에 의해 얻은 토오크 특성 곡선은 거의 일치한다.

그림 3에서 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 3,4에서 나타난 것과 같이 본 연구에서 논정자계형 Wobble 모터의 활성 영역의 단위 체적당 최대 토오크 값은 1.782×10^{-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 모터사이엔 존재하더라도 각 설계 파라미터들의 일정한 비율을 적용해 해석한 결과 두 경우 모두 다 활성 공극 길이가 최소인 영역에서 각각 강한 자계와 전계가 형성되어 회전자의 고정자 공동의 중심에 대해 고토오크, 저속도의 편심운동을 가능하게 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 정자계형 Wobble 모터의 활성 영역에서 발생하는 토오크의 특성 해석을 유한 요소 해석을 수행하여, 모터의 고정자나 회전자사이의 공극 간격 및 형상 등과 같은 기하학적인 구조에 발생하는 토오크를 구하였다. 또한 정자계형 Wobble 모터에 대한 유한 요소 해석 결과를 토대로 정전형 Wobble 모터의 해석 결과와 비교한 결과 정자계형 Wobble 모터가 단위 체적당 발생 최대 토오크값이 정전형보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다. 두 모터에 적용하는 설계 파라미터의 크기 및 정자계형과 정전형이라는 차이점으로 인해 토오크의 크기는 현저한 차이를 보이지만 활성 공극 길이가 최소인 점에서 강한 자계와 전계가 형성됨을 확인 할 수 있었고 실제 정자계형 Wobble 모터의 토오크 특성을 구하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 윤서진, "유한요소법을 이용한 하모닉 모터의 토오크 특성 해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 77-79, 1998. 11.

[2] A. Viviani, "Experimental and Theoretical Study of Hypocycloidal Motors with Two-Harmonics Field Windings", IEEE Power Engineering Society, pp. 15-20, May 1, 1979

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

[4] 윤서진 외 4명, "등각 사상을 이용한 하모닉 모터의 토오크의 정식화", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp. 67-69, 1998. 7.

[5] R.A. Ashen, B.Sc and H.R. Bolten "Aspects of the hypocycloidal reluctance motor". IEE PROC., Vol. 128, Pt. B. No. 6, Nov. 1981