

회전자 슬립이 wobble 모터의 기어비에 미치는 영향

윤서진* · 이은웅* · 우성봉*
 충남대학교*

Effect of rotor slip on the gear ratio of wobble motor

Seo-Jin Yun · Eun-Woong Lee · Sung-Bong Woo
 Dept. Electrical Eng. Chungnam Nat'l. Univ.

Abstract - This paper presents the gear ratio of wobble motor, accounting for finite friction in contact point. The gear ratio of a wobble motor is affected by rotor slip, which is a function of motive torque, excitation angle, and friction torque. The gear ratio of a wobble motor can be expressed as a constant term plus a term that accounts for rotor slip. The ideal gear ratio is constant term and is equal to the rotor radius divided by the distance between the center of the rotor and the center of the stator. The rotor-slip term is shown to be directly proportional to the contact point friction torque and inversely proportional to the square of the excitation voltage.

인 기어비 n_0 은 식 (1)과 같다.

$$n = n_0 = \frac{r}{\delta} \quad (1)$$

wobble 모터의 회전자가 미끄러짐 없이 회전할 조건은 회전자-고정자 전극 사이의 접촉점에서 회전자 외경면이 고정자 내경면을 따라 구르는 구름운동으로만 회전해야 한다. 하지만 실제 기어비는 구름운동과 미끄럼 운동이 조합된 형태로 나타나기 때문에, 회전자에서 미끄럼 운동을 최소화하기 위해서는 반드시 접촉점에서 마찰력이 필요하다. 접촉점에서 마찰력이 없는 상태라면 완전한 미끄럼 운동만이 존재하게 된다. 기어비는 유한한 값을 가지기 때문에 이런 경우에는 회전자의 회전이 생기지 않고, 단지 고정자 내경면을 따라 미끄러져 돌 뿐이다.

실제로는 구름운동과 미끄럼운동이 조합된 형태로 운동이 이루어지기 때문에 식(1)과 같은 이상적인 기어비 n_0 보다 큰 기어비 n 이 나타나게 된다. 이는 모터의 동기 토크, 여기각 θ_0 , 그리고 마찰 토크와 같은 모터의 여러 동작 특성이 회전자 슬립에 영향을 주고, 결국 기어비 변화로 나타나기 때문이다. 그리고 기계적 마모가 발생하면 δ 가 증가하고, 이 또한 기어비에 영향을 미치게 된다.

1. 서 론

wobble 모터는 구조가 간단하고, 고정자-회전자간 편심구조에 의해, 별도의 변속 장치 없이 감쇄 기어비가 발생하여, 단위체적에 비해 큰 토크를 발생시키므로 초소형 모터 분야 응용에 적합하다[1][2][3][4].

그러나, 편심구조로 인해 기계적인 접촉을 하게 되어, 회전자 외경 및 고정자 내경의 마모가 발생, 실제 고정자, 회전자 반경 변화가 생기고, 또한 회전자-고정자 전극 접촉점에서 회전자 슬립이 발생하여 wobble 모터의 특성 실험결과 계산에 의한 이상적인 기어비와 실제 기어비 사이에 큰 차이가 발견되었다[5][6][7].

본 연구에서는 회전자 슬립에 의한 기어비 변화를 설명할 수 있는 해석 모델을 제시한다.

2. 본 론

2.1 wobble 모터

그림 1은 wobble 모터의 개략적인 평면도이다. 본 해석 모델은 6개의 고정자 전극을 갖는다. 회전자는 접지되었고, 접촉점은 전기적으로 절연된 상태이며, 회전자 축은 부상으로 지지되었다. 고정자는 기계적인 접촉을 갖는 전극을 기준으로 하여 반시계 방향으로 각 전극에 000000, 000010, 000100...와 같은 형태의 여기 시퀀스를 갖는다.

wobble 모터의 기어비 n 은 회전자 회전 주파수에 대한 여기 주파수로 정의된다[5][6].

회전자와 접촉점 사이에 미끄러짐이 없을 경우 이상적

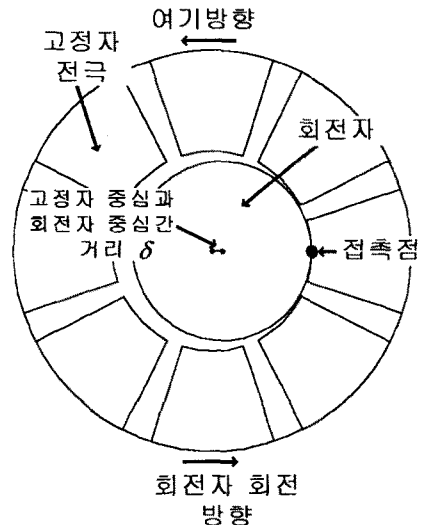


그림 1 wobble 모터의 개략적인 평면도
 Fig.1 Schematic plan of wobble motor

2.2 기어비 모델링

그림 2는 회전자 슬립이 기어비에 미치는 영향을 설명하기 위한 해석모델이다. 회전자-고정자 전극 접촉점에서 힘이 작용한다 하면, 결과적으로 힘은 고정자 전극을 여기하여 발생하는 전계에 의한 힘 F_a , 법선력 F_n , 접선방향의 힘 F_t 으로 해석할 수 있으며, 여기서 θ 는 여기 전극 중심과 접촉점을 포함한 회전자 반경과의 사이 각이다. 여기 전압 변화에 따라 2가지 힘 성분 역시에 비례하여 변화하게 된다. 또한 접촉점에서는 고정자-회전자 접촉에 의해 마찰력 F_f 가 존재하며, 회전자 축을 지지하는 부싱에서도 마찰력 F_{bu} 가 존재한다.

회전자는 고정자 전극 여기 주파수에 동기회전을 하므로, 일정한 각 θ 로 회전자가 고정자 내경면을 따라 구르고, 회전자 축이 고정자 중심에 대해 회전하는 wobble 운동을 하게 된다[5].

마찰력으로 인해 실제 회전자는 고정자 전극 여기 후에 동작할 것이지만, 각 θ 가 초기값 θ_0 에서 동작하기 시작해서 0° 에서 동작을 끝내는 것으로 근사한다.

그림 2에서 여기 시퀀스가 000000에서 000010으로 변화할 때 $\theta = \theta_0 = 60^\circ$ 로 일치하게 된다.

보통 고정자 전극 여기가 각 θ 에서 이루어 진다면 법선 방향의 힘 F_n , 접선방향의 힘 F_t , 접촉점에서 마찰력 F_f 는 각각 식 (2), (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_n = F_a \cos \theta \quad (2)$$

$$F_t = F_a \sin \theta \quad (3)$$

$$F_f = \mu_f F_n \quad (4)$$

여기서, μ_f : 접촉점의 미끄럼 마찰 계수

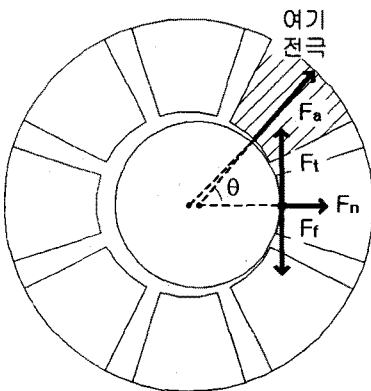


그림 2 회전자-고정자 전극에서 힘의 작용
Fig. 2 Forces acting at rotor-stator pole contact point

만약 회전자-고정자 전극에서 마찰력이 인가한 전기력의 접선방향 힘과 균형을 이루고 이 순간 회전자 미끄러짐이 존재하지 않는다면 식(5)가 성립한다.

$$F_n \sin \theta = F_a \mu_f \cos \theta + F_{bu} \quad (5)$$

여기서, F_{bu} :부싱의 마찰력

회전자-고정자 전극 접촉점에서 접선방향의 힘이 마찰력보다 커지면, 회전자는 완전한 구름운동을 하지 못하고, 접촉점에서 미끄러짐이 발생하게 된다. 이 때 식 (5)로부터 임계 wobble 각 θ_s 에 대한 조건을 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$\sin \theta_s > \mu_f \cos \theta_s + \frac{F_{bu}}{F_a} \quad (6)$$

μ_f 와 F_{bu} 의 전형적인 실험값은 0.3 그리고 F_a 의 10%정도이다[6][7][8]. 본 연구의 해석 모델은 $\theta_0 = 60^\circ$ 이기 때문에 식 (6)으로부터 다소의 미끄러짐이 항상 존재하고, 회전자 운동이 미끄럼 운동과 구름운동이 조합된 상태로 이루어 짐을 알 수 있다.

회전자 슬립이 없을 경우, 모터의 동기 토크 (motive torque) τ_a 는 식 (7)과 같다.

$$\tau_a = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\theta} V^2 n_0 \quad (7)$$

여기서, C: 회전자-고정자 전극간 정전용량
V: 고정자 전극 여기 전압

실제 기어비를 알수는 없지만, 접촉점에서 미끄러짐이 증가하면, 기어비는 좀 더 커질 것이고, 이에 따라 고정자 전극에서는 더 큰 동기 토크를 발생시켜야 하고, 미끄러짐 증가로 인해 미끄럼 접촉면에서 더 많은 에너지를 소모하게 된다. 미끄러짐 증분 증가량 $\delta\theta$ 에 대해 기어비는 식 (8)과 같이 증가하게 된다.

$$n = n_0 \frac{\theta_0}{\theta_0 - \delta\theta} \quad (8)$$

각 θ_0 로 wobble 운동이 지속되어도, 회전자 미끄러짐으로 인해 회전자의 회전량이 감소하는 것과는 반대로 공급되는 동기 토크는 증가하게 된다.

각 θ_0 로 wobble 운동 시 전기 에너지에서 기계 에너지로 변환되어 전달 되는 총 에너지 E는 식(9)와 같다.

$$E = \int_{-\theta_0}^0 \frac{\tau_a}{n} d\theta \quad (9)$$

정전계에서 발생한 토크 에너지는 2가지 형태로 사용된다. 첫째로 식 (10)과 같은 회전자 지지축의 부싱 접촉에 의한 마찰 에너지 E_{bu} 로 사용된다.

3. 결 론

본 연구에서는 wobble 모터가 동작 중에 회전자 미끄러짐이 기어비에 미치는 영향을 설명할 수 있는 해석 모델을 제시하였다. 정확한 토오크 크기를 계산하기는 어렵지만 전기 에너지와 기계 에너지의 균형을 고려하여 접근하였다. 동기 토오크, 여기각, 그리고 마찰 토오크가 실제 기어비에 매우 큰 영향을 미치게 됨을 알았다. wobble 모터의 안정적인 특성을 얻기 위해서는 여기각 즉 모터의 극수에 대해 적당한 마찰력을 고려하여 설계하여야 한다.

$$E_{bu} = \tau_{bu} \varphi = \tau_{bu} \frac{\theta_0}{n} \quad (10)$$

여기서, φ : 회전자 회전각
 τ_{bu} :부싱 마찰 토오크

둘째는, 회전자-고정자 전극사이의 접촉점에서 인가되는 토오크와 접촉점에서 미끄러짐각에 영향을 받는 미끄럼 마찰 에너지로 분산되게 된다. 접촉점이 줄곧 θ_0 로 이동할 때 접촉점 미끄러짐은 $\delta\theta$ 가 된다. 접촉점에서 토오크는 인가된 토오크와 같으므로, 미끄러짐이 없다면 완전한 구름 운동만이 존재함을 의미한다. 미끄러짐에 의한 접촉점에서 마찰 에너지 E_f 는 식 (11)과 같다.

$$E_f = \int_{-\theta_0}^0 \tau_a \mu_f \frac{\delta\theta}{\theta_0} d\theta \quad (11)$$

각 θ_0 에서부터 동기 토오크를 θ 에 대해 적분하면, τ_a 에 의해 공급된 에너지 E 를 구할 수 있다. E_f 도 이와 같은 방식으로 계산하며, E_{bu} 는 부싱 마찰력 토오크 즉 상수로 가정하여 계산한다. 전기적으로 공급된 에너지와 마찰에 의해 분산된 에너지를 같다고 하면, 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{-\theta_a}^0 \frac{\tau_a}{n} d\theta = \int_{-\theta_0}^0 \tau_{bu} d\theta + \int_{-\theta_0}^0 \tau_f d\theta \quad (12)$$

부싱 마찰을 상수로 가정하였으므로, 식(12)의 부싱에 관한 적분항은 $\tau_{bu}(\theta_0/n)$ 이 되어 식(12)는 τ_a 와 τ_f 에 대한 식으로 표현되며, 식(13)과 같다.

$$\left[\frac{1}{n - \frac{\delta\theta}{\theta_0}} \right] \int_{-\theta_0}^0 \tau_a d\theta = \tau_{bu} \frac{\theta_0}{n} \quad (13)$$

τ_a 는 V^2 에 따라 결정되므로, 식 (13)의 좌변에서 V^2 을 끌어내고, 나머지 적분항을 상수 k_0 라 하면 식 (14)와 같이 쓸 수 있다.

$$k_0 n \left[\frac{1}{n - \frac{\delta\theta}{\theta_0}} \right] = \frac{\tau_{bu}}{V^2} \quad (14)$$

마지막으로, 식 (14)를 슬립 증분을 고려한 기어비에 대해 표현하면 식 (15)와 같고, 기어비 n 이 이상 기어비 n_0 보다 확실히 크다는 것을 알 수 있다.

$$n = n_0 + \frac{k\tau_{bu}}{V^2} \quad (15)$$

여기서, $k = k_0 n_0$

(참 고 문 헌)

- [1] 윤서진, 이은용, 이동주, "동각사상에 의한 하모닉 모터의 토오크 특성 해석", 대한전기학회 논문지, 48권 3호, pp. 104-109, 1999.
- [2] 윤서진, 이은용 외 3명, "동각사상을 이용한 하모닉 모터의 토크 정식화" 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp.67-69, 1998.
- [3] 윤서진, 이은용, 이동주, "유한 요소법을 이용한 하모닉 모터의 토오크 특성 해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집 A, pp.77-79, 1998.
- [4] 이동주, 이은용, 윤서진, " Harmonic Motor의 회전자 편심과 유전체종류에 의한 토오크 특성", 대한전기학회 전기기기 연구회 추계학술발표, pp.38-41, 1997
- [5] W. S. N. Trimmer et al, "Harmonic Electrostatic Motors", Sensors & Actuators, Vol. 20 pp.49-56, 1989.
- [6] S. C. Jacobsen et. al, "The wobble motor: An operational Harmonic Electrostatic Motor", Proc. IEEE MEMS Workshop, Salt Lake City, Utah, pp. 17-24, 1989.
- [7] S. C. Jacobsen et.. "A Design overview of an Eccentric-motion Electrostatic Microactuator(the wobble motor)", Sensors and Actuator, Vol. 20, pp.1-16, 1989.
- [6] V. R. Dhuler, M. Mehregancy, S. M. Phillips, and J. H. Lang, "A Comparative Study of Bearing Designs and Operational Environments for Hamonic Side-Drive Micromotors", In Proc. of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, pp. 171-176, 1992.
- [7] V. R. Dhuler and M. Mehregancy and S. M. Phillips, "Micromotor Operation in a Liquid Environment", In Fifth IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop pp. 10-13, 1992
- [8] M. Mehregancy, et al., "Operation of microfabricated Harmonic and Ordinary Side-Drive Motors", Proc. 3rd. IEEE MEMS Workshop, pp. 1-8, Napa Valley, Feb, 1990.