

로봇 손 구동용 초음파 모터의 설계

박기준*, 백수현*, 김승호**, 정현규**, 정일록***, 장훈순****
 *동국대학교 **한국원자력연구소 ***국립환경연구원 ****중소기업청

Design of the Ultrasonic Motor for Driving Robot Hand

K.J.Park* S.H.Baek* S.H.Kim** H.K.Jung** I.R.Chung***, H.S.Chang****
 *Dongguk University **K.A.E.R.I ***N.I.E.R ****S.M.B.A

Abstract - The purpose of this paper is to establish a method of design of the Ultrasonic Motor for Driving Robot Hand.

This method is based on two models for the ultrasonic motor(a two dimensional elastic contact model, electric equivalent circuit). And analyzed the basic model which installed in the module to match the suitable standard. As varied external diameter,internal diameter and thickness, the proper ultrasonic motor is implemented to find a targeted resonant-frequency and torque near to designed values.

1. 서 론

초음파 모터는 매우 뛰어난 여러가지 특성을 가지고 있다. 일반적으로 제어성과 응답성이 양호하고 자기 노이즈가 발생하지 않고, 저속 대 토크가 얻어진다. 이러한 특성 때문에 초음파 모터는 다양한 분야에서 응용되고 있으며 그 응용범위는 점차 확대되고 있다[1].

초음파 모터를 형태에 따라 분류해 보면 그림 1과 같이 여러형태로 나뉘어 질 수 있다. 분류에 따라 그 용도와 특성이 구분되어 사용되고 있다. 또한 압전 세라믹의 특성에 따라서 초음파 모터의 특성 및 용도도 역시 구분되어 진다. 보통 초음파 모터의 압전 세라믹으로는 전기기계적 결합계수(k31)와 기계적 품질계수(Qm)가 크고 tanδ가 작은 세라믹이 요구된다. 그러나 전기기계적 결합계수와 기계적 품질계수는 반비례 관계이므로 동시에 두 압전소자의 값을 크게 하는 것은 이론적으로 불가능하지만 최근에는 이를 동시에 증가시키는 연구가 진행 중이다[4].

본 논문에서는 여러형태의 초음파 모터 중, 중공구조를 이용할 수 있는 링형 구조를 로봇 손 구동용 초음파 모터에 응용하였으며, 로봇 손의 규격에 적합하며 30~40(kHz)의 공진주파수에서 운전할 수 있는 초음파 모터의 설계를 위해 내경, 외경, 두께의 변화에 따른 해석을 하였다.

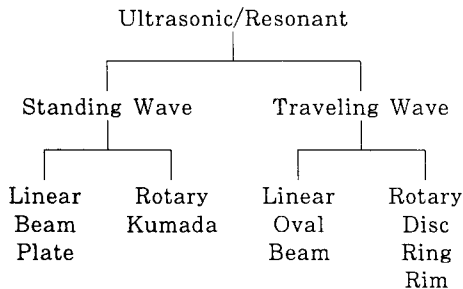
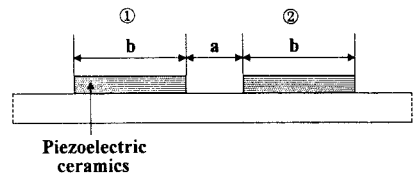


그림 1. 초음파 모터의 분류

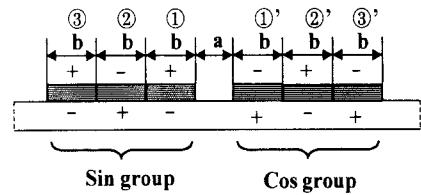
2. 본 론

2.1 압전 세라믹의 여진 방법

고정자 내에 진행파를 발생시키기 위한 여진방법은 그림 2를 통해 알 수 있다.



(a) 굴곡진행파의 여진의 기본 모델



(b) 굴곡진행파 여진(2상구동)

그림 2. 굴곡진행파의 여진

그림2-(a)는 기본적인 여진방법이다. ①의 압전세라믹에 의한 굴곡진행파는 식(1)과 같이 표현된다.

$$A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \tag{1}$$

②의 압전세라믹에 의한 굴곡진행파는 식(2)와 같다.

$$B \sin[\omega t - k(x + a') + \phi] + B \sin[\omega t + k(x + a') + \phi] \tag{2}$$

식(1), (2)에서 진행파만의 관계식을 유도하면 식(3)과 같다.

$$2A \sin(\omega t - kx) \tag{3}$$

여기서, $k = \omega / v$: 파수, λ : 파장, v : 음속,

ϕ : ①에 대한 ②의 위상차

그림2-(b)는 2개의 압전세라믹 그룹에 90° 위상차의 교류전압을 구동력으로 여진하는 방법이며, 압전세라믹의 길이(b)는 $\lambda/2$, 그룹간의 간격(a)는 $\lambda/4$ 이다. 이 여진방법을 본 논문의 모델에 적용하면 한쪽 전극판에는 $\sin(9\theta)$ 모드가, 다른쪽 전극판에는 $\cos(9\theta)$ 모드가 주어진다. 따라서 이를 진행파의 관계식으로 표현하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned} \cos(9\theta) \cos(\omega t) + \sin(9\theta) \sin(\omega t) &= \cos(9\theta - \omega t) \\ &= \cos 9(\theta - \Omega t) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, $\Omega = \frac{\omega}{9}$

또한 구동신호 한 쪽의 극성을 바꾸면 진행파의 방향이 바뀌며 이에 의해 회전자의 방향도 바뀌게 된다.

2.2 설계과정

초음파 모터의 설계를 위해서는 회전자와 진동자 사이의 진동자와 마찰구동에 관한 모델이 필요하다. 본 논문에서는 전기적 등가회로와 2차원 탄성체 접촉모델을 사용하여 모터의 모델을 해석하고자 한다.

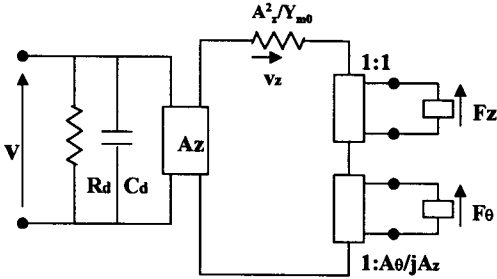


그림 3. 진동자의 전기적 등가회로

그림 3은 진동자의 전기적 등가회로를 보여준다. 이 등가회로는 모터의 전기적, 기계적 부분의 상호작용에 대한 계산을 하는데 사용하게 된다.

진행파 발생을 위한 두 개의 진동모드는 진동자의 전기적 단자에서 인가되는 전압의 위상을 제외하고는 같다. 이 회로에서는 등가질량과 강성은 제외되었다. 왜냐하면 진동자의 공진주파수에 주된 관심을 두었기 때문이다.

굴곡 진동모드에서 발생하는 진행파에 대한 법선, 접선 방향의 진동속도는 다음과 같다.

$$v_z = v_{zmax} e^{j\omega t} \quad (5)$$

$$v_\theta = v_{\theta max} e^{j(\omega t + \pi/2)} \quad (6)$$

기계적 부분의 변압기 단자들은 진동자 표면의 법선, 접선 운동에 대한 기계적 단자이다. 기계적 가지의 회로 방향식은 식(7)과 같다.

$$r_m V_z - A_z V + F_z + j F_\theta A_z / A_\theta = 0 \quad (7)$$

식(7)에서 부하특성을 구하기 위해서는 기계적 단자에서 법선, 접선방향에서의 외부 힘 F_z 와 F_θ 를 구해야 한다.

$$|F_z| = \frac{n \omega_d}{2} \int_a^b p(x) \cos(2\pi x/\lambda) dx \quad (8)$$

$$|F_\theta| = \frac{n \omega_d}{2} \int_a^b p(x) \text{sgn}[\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}] \times \cos(2\pi x/\lambda) dx \\ + \frac{\mu \omega_d}{v_{\theta max}} \int_a^b p(x) \text{sgn}[\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}] \\ \times (\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}) dx \quad (9)$$

그림 4는 회전자와 진동자의 2차원 탄성체 접촉모델이다. 이 모델은 회전자와 진동자 사이의 마찰력을 계산하는데 사용된다. 이들 사이의 마찰은 쿨롱마찰로서 가정된다.

설계에 있어서 우선 요구되는 성능의 사양을 설정하고 설계에 필요한 파라미터들을 선정한다. 즉, 진동자에 대한 최대 토크, 무부하 회전속도 그리고 구동위치의 변경을 설정하고 진동자와 회전자의 재료를 선정한다.

다음으로 식(10)을 만족하는 진동자 표면에 대한 접선 방향의 최대진동 속도 $\nu_{\theta max}$ 를 결정한다.

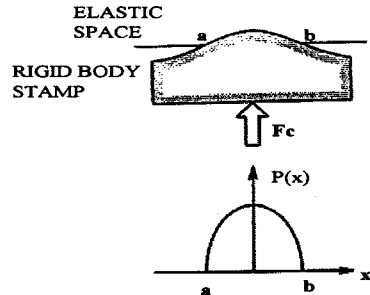


그림 4. 회전자와 진동자의 2차원 탄성체 접촉모델

$$\int_a^b p(x) \text{sgn}[\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}] dx = 0 \quad (10)$$

미리 설정된 최대 토크 T_{max} 로부터 preload F_c 를 식(11)에서 계산한다.

$$F_c = T_{max} / \mu R \quad (11)$$

여기서, μ : 회전자와 진동자 사이의 마찰계수

식(11)은 $2b/\lambda$ 가 1/2보다 작을 때 계산에 응용할 수 있지만 $2b/\lambda$ 가 1/2보다 클 때는 식(12), (13)의 과정을 수행하여야 한다.

$$T_{max} = R \mu \omega_d n \int_a^b p(x) \text{sgn}[\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda)] dx \quad (12)$$

$$F_c = n \omega_d \int_a^b p(x) dx \quad (13)$$

여기서,

ω_d : 반경방향에서 회전자와 진동자 사이의 접촉속

마찰손실은 회전자의 속도 v_m 와 진동속도 v_θ 사이의 차와 구동력의 곱으로 표현된다. 마찰손실은 식(14)와 같다.

$$P_{slip} = \mu \int_a^b p(x) \text{sgn}[v_\theta(x) - v_m] (v_\theta(x) - v_m) dx \\ = \mu n \omega_d \int_a^b p(x) \text{sgn}[\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}] \\ \times (\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}) dx \quad (14)$$

더욱이 출력 P_{out} 은 식(15)와 같다.

$$P_{out} = \frac{2\pi R N_R F_d}{60} \quad (15)$$

여기서, F_d 는 회전자의 구동력이며 식(16)과 같다.

$$F_d = n \omega_d \int_a^b p(x) \text{sgn}[\nu_{\theta max} \cos(2\pi x/\lambda) - \frac{2\pi R N_R}{60}] dx \quad (16)$$

등가회로와 식(10)~(16)으로부터 전기-기계 변환 효율 η 는 식(17)로 표현된다.

$$\eta = \frac{P_{out} + P_{slip}}{\frac{|V|^2}{R_d} + r_m |v_z|^2 + P_{out} + P_{slip}} \quad (17)$$

여기서 V , v_z , P_{out} , P_{slip} 은 각각 인가전압, 법선방향 진동속도, 모터의 출력, 슬립에 의한 손실이다.

2.3 해석결과

본 논문에서는 시각센서를 부착하여 로봇 손과 함께 눈을 효과적으로 장착하여 적용할 수 있는 모터설계를 목적으로 하여, 초음파 모터 중에서도 회전자 중심축에 중공형 구조를 갖는 링형의 초음파 모터를 선정하였다. 또한 관절과 부합되는 모듈내에 장착할 적합한 규격에 맞추기 위하여 기본 모델에서 외경, 내경, 두께를 변화시켜 그에 따른 공진주파수를 계산하였다.

표.1 설계 파라미터

파라미터	치 수
무부하 회전속도 N_{RO}	40[rpm]
최대 토크 T_{max}	1[Nm]
구동위치 반경 R	93.5[mm]
탄성체	
영률 E_b	21.5E10[N/m ²]
포아손 비 σ_b	0.33
밀도 ρ_b	7900[kg/m ³]
압전세라믹	
영률 E_b	15.3E10[N/m ²]
포아손 비 σ_b	0.313
압전 변형률 정수 d_{31}	-1.08[C/N]
밀도 ρ_b	7600[kg/m ³]
두께	
압전세라믹	1[mm]
탄성체	6[mm]

그림 5는 외경을 100~115[mm], 그림 6은 내경을 72~87[mm], 그림 7은 압전세라믹의 두께를 0.5~4[mm] 그리고 그림 8은 탄성체 두께를 2~10[mm]로 변화시킨 결과의 그림이다.

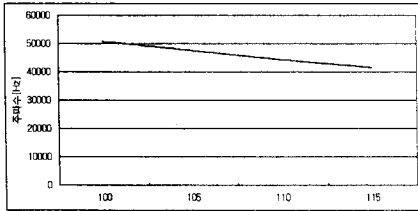


그림 5. 외경 변화에 따른 공진주파수

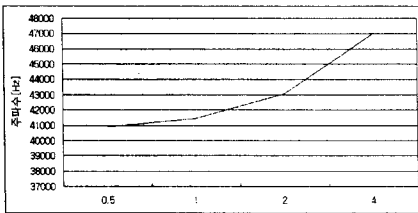


그림 6. 탄성체 두께 변화에 따른 공진주파수

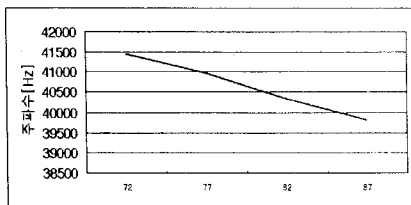


그림 7. 내경변화에 따른 공진주파수

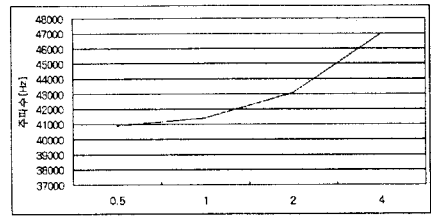


그림 8. 압전세라믹 두께 변화에 따른 공진주파수

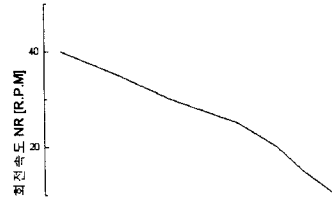


그림 9. 토크와 회전속도

3. 결 론

본 논문에서는 로봇 손 구동용 초음파 모터의 설계를 위해 중공구조의 링형 초음파 모터를 선정하였다. 또한 모듈내에 장착할 적합한 규격에 맞게 하기위해 기본모델을 해석하고 외경, 내경, 두께를 변화시켜가면서 목표된 공진주파수 및 토크에 가까운 사양을 찾아가는 방법으로 설계를 진행하였다.

고정진동자의 최적설계를 위해 공진주파수, 변위량, 모듈내 장착 가능한 규격 등을 모두 고려한 결과 외경은 110~115[mm], 내경은 82~87[mm], 압전세라믹의 두께는 1[mm]이하, 탄성체 두께는 4~6[mm]의 규격으로 결정하였다.

본 연구는 과학기술부의 원자력 사업의 일환으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] Toshiiku Sashida and Takashi Kenjo, "An Introduction to Ultrasonic Motor", Oxford Science Publications, pp. 117-124, 1993.
- [2] Oleg Yu. Zharii, "Modeling of a Mode Conversion Ultrasonic Motor in the Regime of Slip", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., 40권 4호, pp. 411-417, 1993.
- [3] Hiroshi Hirata and Sadayuki Ueha, "Design of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont., 42권 2호, pp. 225-231, 1995.
- [4] Nesbitt W. Hagood IV and Andrew J. McFarland, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont, pp. 210-224, 1995.
- [5] William T. Thomson, "Theory of Vibration with Applications", Prentice-Hall Inc, pp. 233-255, 1996.