

초음파 모터의 원리 및 개발 현황

°한상보** , 윤신일*

Operating Principle and the States of the Art of Ultrasonic Motor

Sangbo Han , Yun Shinil

ABSTRACT

Ultrasonic motors have an advantage over conventional electro-magnetic motors because of its excellent characteristics, such as high torque, low speed output, compact size, excellent controllability and, above of all, quite operation. The principle of operation of ultrasonic motors is to generate gross mechanical motion through the amplification and repetition of micro-deformations of active materials. A brief description of working principle and methods of analysis of dynamic behaviors of ultrasonic motors are given for the extended research and development activities anticipated in the mechanical engineering community.

1. 서론

1980년대 초부터 일본을 중심으로 개발되기 시작한 초음파 모터는 기존의 전자기 모터에 비하여 중량 대 출력비의 우수성, 저속에서의 고풍력 능력, 탁월한 제어 성능, 작동 원리 상의 무소음 특성, 전자 유도파의 영향이 강한 지역에서의 사용에 용이, 초저온에서도 작동 가능성 등의 장점 때문에 기존의 모터를 대체할 수 있는 새로운 모터로 각광 받고 있다. 특히, 초소형 모터의 출현에 대한 요구와 저출력, 저속, 미소 동작이 가능한 모터에 대한 수요가 증가함에 따라, 향후 초음파 모터의 응용 분야는 급속한 속도로 늘어날 것으로 전망되고 있다. 초음파 모터의 설계와 제작에 관한 기술 발전의 추이는 1980년대 초 일본의 Sashida⁽¹⁾가 최초의 상용 초음파 모터를 개발한 후, 주로 일본에는 기술 특허 출원을 중심으로 다양한 구조를 가진 모터의 제작 기술 개발이 이루어 졌고, 미국에서는 그 보다 좀 늦게 관심을 가지기 시작하여 초음파

모터의 효율성 제고와 성능 개선에 역점을 둔 설계모형의 분석을 중심으로 한 연구가 이루어져 왔다.

초음파 모터에 대한 최초의 아이디어는 IBM 연구소의 Barth⁽²⁾, 소련의 Gromakovskii⁽³⁾ 등에 의해 제안되었지만, 지금과 같은 실용적인 모터로의 형태를 갖추게 된 것은 Sashida⁽⁴⁾에 의한 Wedge type 초음파 모터와 traveling-wave type 초음파 모터라는 데에 대한 이견은 없는 것 같다. 2000년 4월 현재, 168개의 특허가 미국 특허청에 출원되어 특허를 받고 있다는 점에서 알 수 있듯이, 초음파 모터의 작동원리와 구동 방법은 몹시 다양하다고 할 수 있다. 그러나 기본적으로는 모터의 구동자에 해당하는 부분의 변형을 여하히 손쉽게 타원형 궤적을 만드느냐에 따라 기본적인 구조가 달라진다고 할 수 있다. 현재의 초음파 모터는 카메라의 자동 초점 조절 장치, 시계의 구동기, 프린터와 같은 컴퓨터의 주변 기기 등에 한정되어 적용되고 있지만 제작 기술의 발달에 따른 가격 경쟁력을 갖춘다면 머지않아 기존의 전자기 모터의 역할을 대신할 수 있을 것으로 생각된다. 초음파 모터는 그 작동 원리와 제작 방법에 따라 다음 표 1과 같이 크게 분류하여 생각할 수 있다.

* 경남대학교 대학원 기계설계학과

** 경남대학교 기계자동차공학부

Table 1. Classification of Ultrasonic motors

Class	Type
구동자의 구조	rod type
	beam type
	ring type
	disc type
	cylinder type
	plate type
	portal frame type
진동모드	in-plane
	out of plane
파형의 종류	standing wave
	Traveling wave
구동 형태	linear motor
	rotary motor
구동 조건	static
	resonant

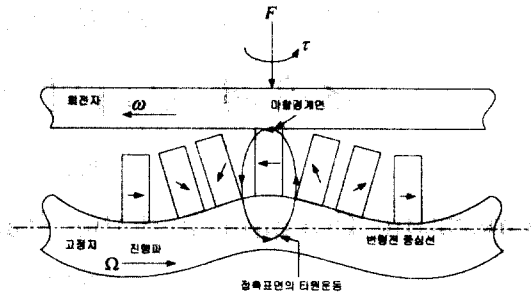


Fig. 1 Elliptic motion of the surface of the stator generated by traveling wave

무한 길이의 보 또는 경계가 없는 원환의 판 위의 한 점 P에서 일정한 크기의 굽힘 파동을 발생시키면 그 파원은 파동의 발생점을 기준으로 양의 방향과 음의 방향으로 무한정 진행되어 나가는 다음과 같은 식의 진행파를 발생시킨다.

$$A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \quad (1)$$

φ 만큼의 위상각을 가진 동일한 크기의 굽힘 파동을 점 P에서 a 만큼 떨어진 점 Q에 발생시키면 이 파원은

$$A \sin\{\omega t - k(x+a) + \varphi\} + A \sin\{\omega t + k(x+a) + \varphi\} \quad (2)$$

로 기술되는 진행파를 일으키게 된다.

식 (2)의 항 중에서

$$-ka + \varphi = \varphi_1, \quad ka + \varphi = \varphi_2$$

라고 놓으면 Q점에서 발생된 진행파는

$$A \sin(\omega t - kx + \varphi_1) + A \sin(\omega t + kx + \varphi_2) \quad (3)$$

가 되는데, 점 P와 Q에서 발생된 진행파가 한쪽 방향으로만 진행되기 위해서는

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= m\pi & (m: \text{even}) \\ \varphi_2 &= n\pi & (n: \text{odd}) \end{aligned} \quad (4)$$

2. 초음파 모터의 작동 원리

초음파 모터의 구동 방법과 운동 형태, 그리고 구동자의 형상에 관계없이, 모든 초음파 모터에 적용되는 기본적인 작동원리는 초음파 범위의 고주파수에 해당하는 반복적인 운동을 통하여 구동자에 발생하는 미소 변형을 일정한 방향의 기계적인 운동으로 확대·전환시켜 준다는 것이다. 발진 장치에 의해 구동되는 구동자와 동력을 전달시키는 회전자와의 접촉점에서는 반복적인 궤적운동이 구현되어야 하며, 접촉점의 궤적운동과 구동자와 회전자 사이의 마찰력을 이용하여 접촉면에 접하는 방향의 구동력이 발생되도록 하고, 또한 불연속적인 미소동작을 정제시키고 확대시켜 연속적인 일정 방향 운동이 가능하도록 하는 기구학적 구조가 실현되어야 한다. 구동자를 초음파 진동수로 진동시킬 수 있는 발진장치로는 일반적으로 압전재료가 사용되기 때문에 흔히 초음파 모터를 압전 모터라고 부르기도 한다.

Fig. 1은 구동자에 발생하는 진행파의 운동에 의해 발생하는 회전 모터의 작동 원리를 설명한 그림이다. 구동자의 표면이 타원의 궤적을 이루기 위해서는 표면에 대하여 수직방향으로 운동하며 진행하는 진행파를 발생시켜야 하는데 진행파를 발생시키는 원리는 다음과 같다.

의 조건을 만족하여야 한다. 따라서

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -ka + \varphi = m\pi \\ \varphi_2 &= +ka + \varphi = n\pi \\ 2ka &= (n-m)\pi \end{aligned} \quad (5)$$

의 관계를 만족시키는 두 개의 진행파를 합치면

$$\begin{aligned} &A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \\ &+ A \sin(\omega t - kx + m\pi) \\ &+ A \sin(\omega t + kx + n\pi) \\ &= 2A \sin(\omega t - kx) \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 한 쪽 방향으로만 진행하는 진행파가 만들어지게 된다.

식 (5)로부터 두파원의 공간 상 거리 a 와 시간 상의 위상차이 φ 는 다음과 같은 관계를 만족하여야 한다는 것을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} a &= \frac{(n-m)}{2h} \pi = \frac{\lambda}{4}(n-m) \\ \varphi &= \frac{\pi}{2}(n+m), \quad n \neq m \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, 한쪽 방향으로 진행하는 진행파의 발생 조건은 굽힘 진동을 일으키는 두 파원이 진행파의 파장의 $\lambda/4$ 의 홀수배 만큼 떨어져야 하며 동시에 두 파원의 가진 진동수가 시간 상으로 $\pi/2$ 의 홀수배 만큼의 위상차를 가져야 한다는 것을 말해 주고 있다.

즉, 공간과 시간에 걸쳐 각각 $1/4$ 파의 위상차를 가지는 굽힘파를 동시에 발생시킬 경우 특정 방향으로 진행되어 가는 진행파를 발생시킬 수 있다.

Fig. 2는 직선운동 모터와 회전 모터에 대하여 진행파를 발생시킬 수 있도록 극성이 서로 엇갈린 압전재료가 배치된 예를 보여주고 있다.

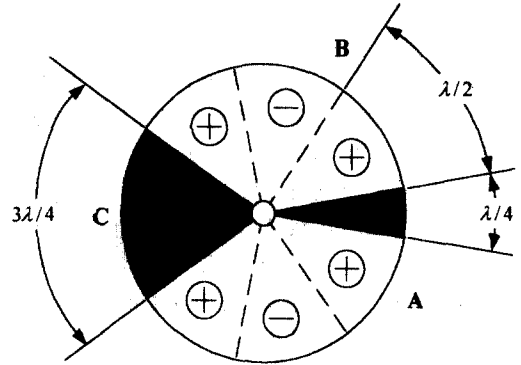
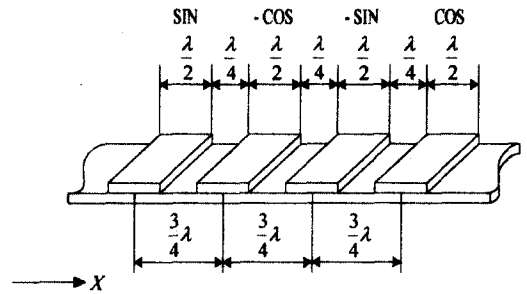


Fig. 2 Arrangement of piezo materials to generate traveling wave

3. 동역학적 모델 해석

여러 가지 장점이 있음에도 불구하고 아직까지의 기술수준으로는 초음파 모터는 기존의 전자기 모터에 비하여 효율이 상대적으로 떨어진다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고 보다 효율이 높은 모터의 설계를 위해서는 압전재료의 전기·기계적 특성 분석은 물론 구동자와 회전자의 운동에 대한 동역학적 해석과, 발전회로에 대한 해석이 수반되어야 한다. 초음파 모터의 개발 속도에 비하여 이에 대한 이론적 해석에 대한 연구는 비교적 한정되어 있는데 본 논문에서는 초음파 회전 모터를 예로 하여 동역학적 해석 방법의 기본적인 틀을 소개하고자 한다.

압전재료와 구동기의 기관 결합 조건, 궤적운동의 효과를 극대화시키기 위한 치형 돌출 구조의 고려 등 복잡한 형상을 가진 모터의 동역학적 해석에는 FEM이 보편적으로 사용될 수밖에 없다.

최근 FEM을 이용한 초음파 모터의 거동 해석에 대한 연구 결과들이 발표되고 있지만^(5,6,7,8,9) FEM 해석의 단점은 설계 변경에 따른 특성 해석을 위해서는 매번 새로운 모형에 대한 독자적인 해석 작업이 필요하다는 단점이 있다.

초음파 회전 모터의 여러 설계인자들, 예를 들면 구동자의 크기와 재질, 접촉면의 타원 궤적을 확대시키기 위한 치형 구조의 형상, 회전자와의 접촉력 등의 변경에 따른 모터의 특성 변화 해석을 위해서는 Hagood^(10,11)와 Hirata⁽¹²⁾가 제시한 해석적 방법들을 따르는 것이 설계의 초기 단계에서는 매우 유용하다고 생각되는데, 해석 작업의 단순화를 위하여 평면 응력요소를 구동부의 기본구조로 사용한다든지 압전요소로 분포하는 전기장은 압전요소의 두께 방향으로만 존재한다고 가정하는 등 설계자의 의도에 따라 다양한 모형이 제시될 수 있다. 초음파 회전 모터의 동역학적 해석은 구동자를 구성하는 기판과 압전재료의 결합에 의한 전기적, 동역학적 연성작용에 대한 만족스러운 모형과 회전자의 운동 형태에 따른 출력과의 관계, 그리고 고정자와 회전자 사이의 마찰면에서 일어나는 접촉 운동 현상에 대한 해석 등이 모두 고려되어야 한다.

구동자의 운동 방정식은 기판, 그리고 기판과 결합된 압전재료에 대한 에너지 양을 고려하여 유도될 수 있다. 구동자의 운동에너지는

$$T = \frac{1}{2} \int_V \rho_s \dot{u}_0^T \dot{u}_0 dV_s + \frac{1}{2} \int_V \rho_p \dot{u}_0^T \dot{u}_0 dV_p \quad (8)$$

로 주어지며 위치에너지는

$$U = \frac{1}{2} \int_V S^T G dV_s + \frac{1}{2} \int_V S^T G dV_p \quad (9)$$

로 주어진다. 그리고 압전재료에 부가되는 전기적 에너지는

$$W_E = \frac{1}{2} \int_V E^T D dV_p \quad (10)$$

로 주어지는데, 이 에너지 양들을 구하는데 필요한 응력 벡터 G , 변형도 벡터 S , 전기장 벡터 E , 압전재료의 변위 벡터 D 등에 대한 정의에 따라 해석 대상 모형이 달라질 수 있다.

또한 압전재료의 전기·기계적 연성 효과는 다음 식을 활용할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} D \\ G \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon & e \\ -e & C \end{bmatrix} \begin{pmatrix} E \\ S \end{pmatrix} \quad (11)$$

아직까지 초음파 회전모터의 운동 해석에 있어서 가장 어려운 부분은 바로 구동자와 회전자 사이의 마찰을 고려한 상대적 운동이다. 초음파 모터의 구동력은 바로 고정자와 회전자 사이의 마찰에 의하여 발생되는데, 이 마찰력은 구동자와 회전자 사이의 간극, 수직방향의 압력, 진행과의 진행 속도, 타원궤적을 이루며 움직이는 구동자 표면의 접촉점의 운동, 두 재료 사이의 마찰계수 등 여러 가지 인자를 동시에 고려하여야 한다. 일반적으로 고주파로 진동하는 구동자와 회전자의 사이의 연성운동은 마찰력이 포함된 비선형 거동이 된다.

이와 같은 복잡한 현상에 대한 정확한 해석이 아직은 완전하게 이루어지고 있다고 보기 어려우며, 여러 연구자들에 의해 독특한 간략 계산 방법들이 제시되어 있는데, Fig. 3은 Hagood(10)에 제시된 접촉면의 마찰력 분포 해석에 대한 모형이다.

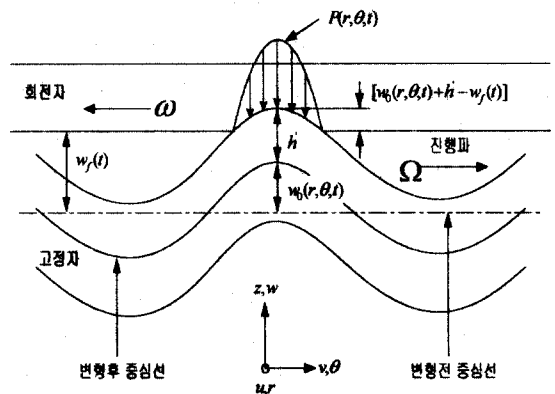


Fig. 3 Dynamic modelling of pressure distribution along the interface of stator and rotor

Fig. 3과 같이 모형화된 마찰력의 영향을 고려한 구동자의 운동방정식은 다음 형태로 주어지게 된다.

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = \Theta V + F_N(z, w_f) + F_T(z, \dot{z}, w_f, \omega_{rotor}) \quad (12)$$

또한, 회전자의 운동방정식은 구동력에 대한 해석이 완성되면 접촉면에 대한 수직 방향의 운동과 회전방향에 대한 성분으로 나누어 생각할 수 있다.

$$M_r \ddot{w}_f + C_z \dot{w}_f = F_{int} - F_{applied}$$

$$F_{int} = \int_A \int_C r P(r, \theta, t) dr d\theta \quad (13)$$

$$I_r \ddot{\alpha} + C_a \dot{\alpha} = \tau_{int} - \tau_{applied}$$

$$\tau_{int} = \int_A \int_C \mu r^2 \text{Sign}(r, \theta, t) P(r, \theta, t) dr d\theta$$

식 (12)와 (13)에서 모터의 회전면에 대하여 수직과 수평 방향의 마찰력 성분이 구동자의 진동변위에 따라 변화하는 접촉면의 분포력에 따라 좌우됨을 알 수 있고, 이 힘 성분에 의해 구동자와 회전자 사이의 운동이 연성되는 것을 알 수 있다.

해석에 필요한 최종적인 회전형 모터의 운동방정식은 다음의 형태로 표현되는데, 운동방정식 상의 각 항들에 대한 구체적인 도출 과정은 참고문헌 [10]과 [12]에 자세히 주어져 있다.

$$\begin{pmatrix} \dot{X}_s \\ \dot{X}_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_s & O_{2n \times 4} \\ O_{4 \times 2n} & A_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ X_r \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} B_s & O_{2n \times 2} \\ O_{4 \times n} & B_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_s \\ f_r \end{pmatrix} \quad (14)$$

4. 초음파 모터 제작 기술의 향후 과제와 전망

초음파 모터의 구동력은 마찰력으로부터 얻어지기 때문에 이로 인하여 발생하는 문제점의 해결이 우선적으로 요구되고 있다. 즉, 마찰에 견디는 내마모성의 강건한 재료개발이 뒷받침되어야 할 것

이며 마찰면에서의 동력 손실을 최소화 할 수 있는 기구학적인 아이디어가 더 나와야 할 것이다.

무엇보다도 전기·기계적 변환 효율이 뛰어나고 반복적인 진동에 따른 피로 파괴에 강인한 압전재료의 개발이 초음파 모터의 성능 개선에 절대적이라고 할 수 있다. 또한, 구동자와 압전재료를 결합시키는 방법에 있어서 보편적으로 사용되는 접착제를 사용한 접착 방법 외의 결합 방안도 강구되어야 할 것이며 마찰열을 효과적으로 소산시키는 방법도 강구되어야 할 것이다. 현재는 압전재료의 효율 상수 Watt 대의 출력 밖에 내지 못하지만 용량을 키워 수 kW 대의 출력을 가진 초음파 모터를 개발 할 경우 초음파 모터의 시장성은 매우 크다고 볼 수 있다.

5. 참고문헌

- (1) T. Sashida, 1985, Motor device utilizing ultrasonic oscillation; 29 claims and 22 Drawings. U.S Patent, 4, 868, 446
- (2) Barth, H. V., 1973, Ultrasonic driven motor. IBM Technical Disclosure Bulletin, 16, 2263
- (3) Gromakovskii, V. A. et, al., 1978, "On the possibility of using a piezoelectric motor for direct actuation of the drive shaft of a video tape recorder." Tekhnika Kino I Televideniya, vol. 5, pp. 33-43
- (4) T. Sashida and T. Kenjo, 1993, "An Introduction to Ultrasonic Motors." Oxford, Clarendon Press, p.297
- (5) Bar-Cohen Y., X. Bao, and W. Grandia, 1998, "Rotary Ultrasonic Motors Actuated By Traveling Flexural Waves," Proceedings of the SPIE International Smart Material and Structure Conference, SPIE Paper No. 3329-82, San Diego, CA, 1-6 March
- (6) P. Hagedorn and J. Wallaschek, 1992, "Travelling wave ultrasonic motors, Part 1: Working principle and mathematical modelling of the stator," J. Sound and Vibration, vol. 155, no. 1, pp. 31-46

- (7) J. Wallashek, P. Hagedorn, and W. Konrad, 1993, "Travelling wave ultrasonic motors, part II: a numerical method for the flexural vibrations of the stator." *Journal of Sound and Vibration*, vol. 168, pp. 115-122
- (8) T. Maeno, T. Tsukimoto, and A. Miyake, 1992, "Finite-Element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont.*, vol. 39, no. 6, pp. 668-674
- (9) Kagawa K., T. Tsuchiya and T. Kataoka, 1996, "Finite Element Simulation of Dynamic Response of Piezoelectric Actuators," *J. of Sound and Vibrations*, Vol. 89(4), pp. 519-538
- (10) Nesbitt W. Hagood and Andrew J. McFarland, 1995, "Modeling of a Piezoelectric Rotary Ultrasonic Motor," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 42, no. 2, pp. 210-224
- (11) N. Hagood, W. Chung, and A. von Flotow, 1990, "Modeling of piezoelectric actuator dynamics for active structural control." *J. Intell. Mat., Syst., and Struct.*, vol. 1, July, pp. 327-354
- (12) H. Hirata and S. Ueha, 1993, "Characteristics estimation of a traveling wave type ultrasonic motor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont.*, vol. 40, no. 4, pp. 402-406
- (13) K. Nakamura, M. Kurosawa, and S. Ueha, 1993, "Design of a hybrid transducer type ultrasonic motor," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont.*, vol. 40, no. 4, pp. 395-401
- (14) A. Kumada, 1987, Ultrasonic motor using bending, longitudinal and torsional vibrations: 10 claims and 14 drawing sheets, U.S Patent, 4, 642, 509
- (15) A. Kumada, 1989, Piezoelectric revolving resonator and ultrasonic motor; 10 claims and 17 Drawing Sheets, U.S Patent, 4, 868, 446
- (16) P. Hagedorn and J. Wallash, 1992, "Travelling wave ultrasonic motors, part I: Working principle and mathematical modeling of the stator." *Journal of Sound and Vibration*, vol. 155, pp. 31-46
- (17) G. Ramaish and K. Vijayakumar, 1973, "Natural frequencies of polar orthotropic annular plaes," *J. Sound and Vibration*, vol. 26, pp. 517-531
- (18) Kumada, A., 1985, "A piezoelectric motor." *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 24, Supplement 24-2, pp. 739-741
- (19) T. M. Chen, 1995, "The hubrid Laplace transform/finite element method applied to the quasi-static and dynamic analysis of viscoelastic Timoshenko beams." *International Journal of Heat Methods in Engineering* vol. 38, pp. 509-522
- (20) K. Uchino, K. Kato, and M. Tohda. 1998, "Ultrasonic linear motors using a multilayered piezoelectric actuator," *Ferroelect.*, vol. 87, pp. 331-334
- (21) A. Kumada, 1985, "A piezoelectric ultrasonic motor," *Japanese J. Appl. Physics*, vol. 24 (Supplement 24-2), pp. 739-741
- (22) M. Kuribayashi, S. Ueha, and E. Moru, 1985, "Excitation conditions of flexural traveling waves for a reversible ultrasonic linear motor," *J. Acoust.Soc. Japan*, vol. 77, no. 4, Apr
- (23) T. Maeno, T. Tsukimoto, and A. Miyake, 1992, "Finite-element analysis of the rotor/stator contact in a ring-type ultrasonic motor," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., and Freq. Cont.*, and *Freq. Cont.*, vol. 39, no. 6, pp. 668-674