

원환형 초음파 모터



1. 서론

초음파모터(ultrasonic motor)는 압전 진동자에서 발생하는 초음파 영역의 기계적 진동을 구동원으로 하여, 고정자와 회전자 사이의 마찰력을 매개로 하여 얻어지는 추력을 이용한 새로운 형태의 모터이다.^{1)~3)} 따라서 기존의 電磁式 모터와는 원리, 구조, 구동 방식이 완전히 다르며, 특징 또한 다르다. 전자식 모터에 비해, 초음파 모터가 갖는 특징으로는

- ① 저속에서 높은 토크 발생
- ② 단위중량당 발생하는 기계적 출력이 높음(2~4배)
- ③ 기동 및 정지시 속응성
- ④ 저속으로 감속장치가 불필요하다는 점
- ⑤ 전원제거후 자기유지기능이 있기 때문에 전원제거 즉시 그 위치에 정지함
- ⑥ 자계와 무관하기 때문에 전자유도장애가 없음
- ⑦ 구조가 간단하며, 용이하게 리니어 모터(linear motor)가 구성된다는 점
- ⑧ 中空 구조가 가능한 점 등이 있으므로,^{4)~6)} 전자식 모터를 사용할 수 없는 분야에 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

초음파 모터의 역사를 살펴보면, 1973년 H. V. Barth에 의해 처음으로 제안되었는데,⁷⁾ 회전자에 붙어 있는 혼(horn)을 압전체에 의해 진동시켜 마찰력을 매개로 하여 회전자를 구동시킨다. 그 후, 이와 비슷한 원리의 모터들이 V. V. Lavrinenco를 비롯하여 몇가지 제안되었지만,⁸⁾ 모터의 연속 운전시 미끄러짐에 의한 마찰 손실로 회전자나 진동자의 온도가 상승하게 되어 마모나 진동 진폭 변화 등이 야기되는 문제점이 지적되었다.

그러나 1980년 T. Sashida가 제안한 진동편형 초음파모터는⁹⁾ 전기적 입력 90[W], 기계적 출력 50[W], 토크 2.5[kgf·cm]이며 최대 효율이 60[%] 정도로서 처음으로 실용화에 가까운 정도로 동작하였다. 그러나 이 모터도 진동편과 회전자 접촉면의 마찰에 의한 심한 마모 때문에 수명이 짧은 것이 문제점으로 지적되었다. 이 문제점을 해결하기 위해, 1982년에 탄성 표면파를 이용한 진행파형 초음파 모터를 제안하였다.¹⁰⁾ 이 모터는 면접촉에 의해 마찰구동되므로 효율은 40[%] 정도로서 진동편형에 비해 낮은 것이 단점이었지만, 내마모성이 크게 개선되었고, 양방향으로의 이동이 용이하다는 장



체 흥인
주성전문대 공학I학부
전기전자소자 조교수



임기조
충북대학교 전기공학과 교수
1998년 본 학회 편수이사

점을 갖고 있다. 현재의 원환형 초음파 모터는 이 진행파형 초음파 모터의 원리를 기본으로 하고 있다.

본 고에서는 원환형 초음파 모터에 대해 구조, 구동원리, 응용분야 및 개발 동향 등에 대해 기술하여 관련 연구자나 기술자에게 참고자료가 되고자 한다.

2. 원환형 초음파 모터의 구조

원환형 초음파 모터의 구조는 그림 1에서 보는 바와 같이, 크게 고정자와 회전자로 구성되어 있다.

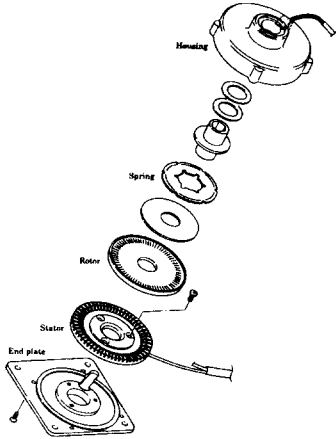


그림 1. 원환형 초음파모터의 구조

고정자는 진동원의 역할을 하는 부분으로서 원환형 금속(탄성체)에 원환형 압전 세라믹이 부착되어 있다. 압전 세라믹에 요구되는 전기적 특성은 기계적 품질계수, 전기기계결합계수 및 압전상수 d_{31} 이 크고, 손실계수 $\tan \delta$ 가 작을수록 좋다. 또한 금속(탄성체) 표면 위에 홈이 파져 있는 것은 압전세라믹에서 발생하는 진동 진폭의 변위가 매우 작으므로 이를 확대하기 위해서이다.

회전자는 마찰재가 부착된 금

속으로 구성되어 있으며, 단순히 회전하는 역할을 하고 있다.

그 외, 고정자와 회전자에 압력을 가하기 위한 스프링과 너트의 구성부가 있으며, 고정자를 지지하는 지지부(ending plate)가 있다.

3. 원환형 초음파모터의 구동원리

3.1 굴곡 진행파의 여진

무한 길이의 금속의 일부분에 압전진동자를 이용하여 진동을 발생시키면, 그 곳으로부터 파동은 양방향으로 전파되어 진행하는 진행파가 되며, 이 때 금속 표면 위의 한 질점은 타원 운동을 한다. 즉, 진행파가 전파되는 금속 표면 위에 물체가 놓여지

초음파모터이다. 이 때 파동은 양방향으로 전파되지만 정재파로 된다. 그렇지만 압전 진동자의 전극 패턴의 구성과 2개 이상의 전원이 인가되면 한 쪽 방향으로 전파하는 진행파가 된다.

그림 2는 원환형 고정자의 핵심 부분인 압전 진동자의 분극 방향 및 전극 구성의 한 예이며, 진행파 여진을 위한 전압 인가 방법을 나타낸 것이다. 이 그림 (a)에서 보는 바와 같이, 전극군은 크게 A상과 B상의 2개로 나누어져 있으며, 각 상의 전극을 분할하여 각각 8개의 세그먼트가 되도록 하였고, 인접한 세그먼트의 분극 방향은 두께 방향으로 서로 반평행(\uparrow, \downarrow)하다. A상과 B상은 서로 공간적으로 $1/4$ 파장 및 반대

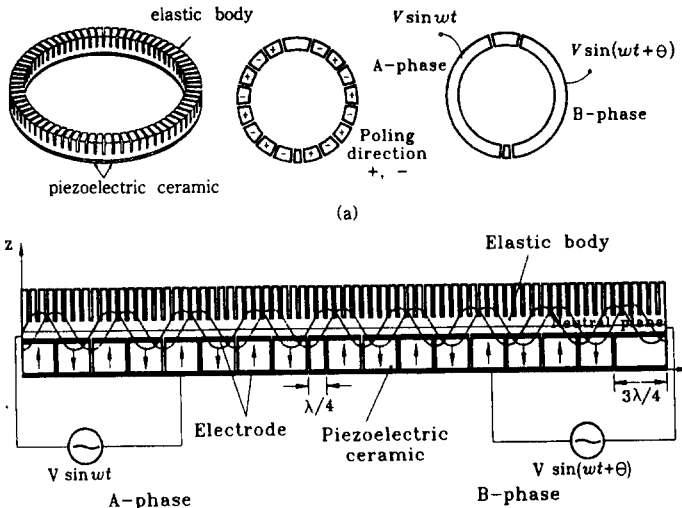


그림 2. 원환형 고정자에서의 진행파 여진 방법

면 타원 운동에 의한 접선력을 받아 물체가 이동한다.

그렇지만, 유한 길이의 금속 매체는 고정단에서 파가 반사하여 정재파가 발생하게 되므로, 무한 길이의 효과를 얻기 위한 방법으로서 금속을 원환형(ring type)으로 고안된 것이 원환형

편에는 $3/4$ 파장 만큼 간격을 두고 배치시킨 구조이다.

각 상에 서로 시간적 위상차 θ 를 가지며, 초음파 영역의 공진 주파수 w 및 정현적으로 변화하는 진폭 V 인 2상 전압을 인가하면, 그림 2 (b)와 같이 각 상별로 $n(=9)$ 차의 정재파가 발생되며,

고정자 중성축에서 각 상의 정재파는 원통 좌표계 (R, ϕ, z)를 이용하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{z1} = A_m \sin n\phi \sin \omega t \quad (1)$$

$$U_{z2} = A_m \cos n\phi \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

여기서, A_m 은 정재파의 진폭으로서, 각각의 (\uparrow, \downarrow) 세그먼트한 쌍에서 발생된 정재파 진폭이 합성된 것이므로 4배가 된다. 이 진폭 A_m 은 압전 진동자의 전계에 의해서 유기되는 변형 특성과 고정자의 공진 특성, 인가 전압 V 및 주파수 ω 에 의해 결정된다.

식 (1)과 (2)를 합성하면 다음의 진행파가 됨을 알 수 있다.

$$U_z = U_{z1} + U_{z2} \\ = A_m \sqrt{1 - \cos \theta} \cos(2\omega t + \theta) \times \cos(n\phi - \psi) \\ \text{단, } \psi = \tan^{-1} \frac{\sin \omega t}{\sin(\omega t + \theta)} \quad (3)$$

이 식에서 위상차 θ 를 변화시킴으로써 진행파의 형태 및 정·역회전이 가능함을 알 수 있다. 고정자의 표면 속도는 $\theta = \pm \pi/2$ 인 경우 가장 크게 나타나고 있다.¹¹⁾ 이 위상차 $\theta = \pi/2$ 인 2상 전압측, 압전 진동자의 A상에 $\sin \omega t$ 를 B상에 $\cos \omega t$ 를 인가하면, 다음 식과 같은 9차의 굴곡 진행파가 그림 3과 같이 탄성체의 원주를 따라 반시계 방향으로 전파됨을 알 수 있다.

$$U_z = A_m \cos(\omega t - n\phi) \quad (4)$$

3.2 고정자의 타원운동과 표면속도

그림 3과 같은 굴곡 진행파가 고정자 표면에서 전파되면 그 표면상의 임의의 질점은 타원운동을 하게 되며, 굴곡 진행파의 전

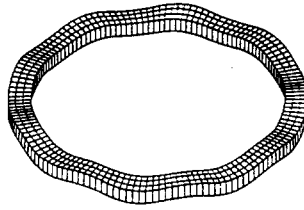


그림 3. 굴곡진동모드(B_{09} 모드)

파 속도를 다음과 같이 구할 수 있다.

그림 4에서 보는 바와 같이, 식 (4)의 진행파가 고정자 중성축에서 원주 방향으로 진행할 때, 탄성체 표면의 임의의 점을 P , 편향각이 없는 상태의 위치를 P_0 , 편향각을 α 라 하면, P_0 에서 P 로의 두께 방향의 변위 U_z 는

$$U_z = A_m \cos(\omega t - n\phi) - \frac{a}{2}(1 - \cos \alpha) \quad (5)$$

이 된다. 여기서, a 는 탄성체의

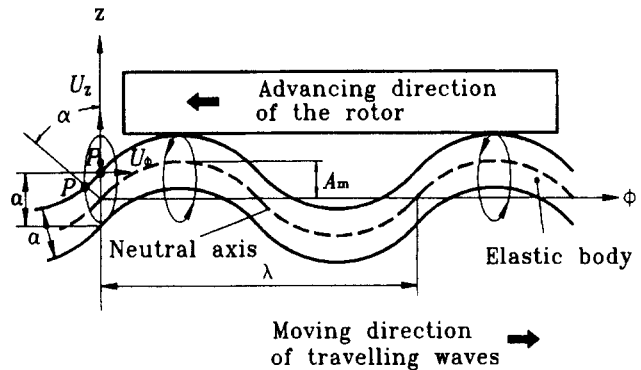


그림 4. 원환형 고정자에서의 굴곡 진행파

두께, n 은 진행파의 굴곡 진동차수(=9)로서 $2\pi r/\lambda$ (r : 고정자의 반경, λ : 굴곡 진동의 파장)과 같으며, A_m 은 두께 방향의 굴곡 진동의 크기, ω 는 각속도이다.

굴곡 진동의 진폭 A_m 은 굴곡 진동의 파장 λ 에 비해 미소하브

로 편향각 α 는 매우 작으며, 따라서 두께 방향의 변위 U_z 는 근사적으로

$$U_z \approx A_m \cos(\omega t - n\phi) \quad (6)$$

되며, P_0 에서 P 로의 원주 방향 변위 U_ϕ 는

$$U_\phi = -\frac{a}{2} \sin \alpha \approx -\frac{a}{2} \alpha \quad (7)$$

로 된다. 그리고 편향각 α 는

$$\alpha = \frac{dU_z}{d(r\phi)} = \frac{A_m n}{r} \sin(\omega t - n\phi) \quad (8)$$

와 같이 되므로, 원주 방향 변위 U_ϕ 는 근사적으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$U_\phi = -\frac{A_m a n}{2r} \sin(\omega t - n\phi)$$

$$= -\frac{\pi A_m a}{\lambda} \sin(\omega t - n\phi) \quad (9)$$

따라서, 두께 방향 변위 U_z 와 원주 방향 변위 U_ϕ 는

$$\left\{ \frac{U_z}{A_m} \right\}^2 + \left\{ \frac{U_\phi}{\pi A_m (a/\lambda)} \right\}^2 = 1 \quad (10)$$

의 관계가 있으므로, 탄성체 표면의 임의점 P는 타원 궤적을 그리고 있음을 알 수 있다. 또한 원주 방향 변위 U_ϕ 의 속도 v_ϕ 는

$$v_\phi = \frac{dU_\phi}{dt} = -\frac{\pi \omega A_m a}{\lambda} \cos(\omega t - n\phi) \quad (11)$$

로 되며, 이 속도는 고정자의 원주 방향의 속도로서 표면 속도가 된다.

4. 원환형 초음파모터의 응용

원환형 초음파 모터는 중공 구조로 되어 있기 때문에 일반 카메라, 무비 카메라, CCTV용 카메라, 캠코더 등 다양한 형태의 카메라류에 광범위하게 사용될 수 있다. 이에 채용된 모터는 전자식 모터에 비해 초점 속도가 빠르다. 또한 감속 기어가 없기 때문에 정속 운전이 가능하여 사무실, 병원, 호텔, 극장, 도서관 등의 창문 블라인드 자동 조작용으로 사용되고 있다. 그림 5는 캐논사의 一眼 AF 카메라 EOS에 실용화된 원환형 초음파 모터이며, 그림 6은 일본 동경도의 신청사의 설치된 블라인드 구동용이다.

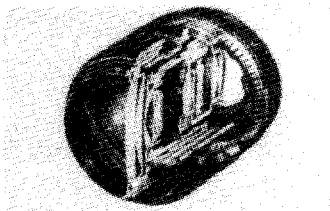


그림 5. 자동초점 렌즈용 초음파 모터

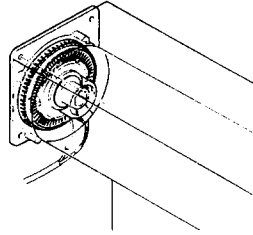


그림 6. 블라인드 구동용 초음파 모터

한편, 초음파 모터는 구조가 간단하므로 소형화 및 경량화가 가능하며, 소형에서도 토크가 비교적 높다. 현재 수 mm 정도 크기의 원환형 초음파 모터가 개발되었으며, 전자식 모터의 소형화 문제점은 자기회로의 포화나 권선의 미소화의 제약 등이다. 소형 원환형 초음파 모터(그림 7)는 산업용 로봇의 관절의 미세구동이나 전자시계(그림 8)에 응용되고 있다. 그 외 HA, OA, FA용으로 응용도 기대되고 있다.

최근에는 PZT 필름을 이용한 초소형 초음파 모터가 연구되고 있으며, 이는 의료용 장비의 응용에 널리 이용될 것으로 보인다.

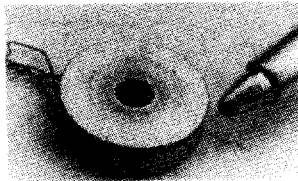


그림 7. 소형 원환형 모터 (8mm Ø)



그림 8. 전자시계에 장착된 소형 원환형 모터

5. 국외 개발 동향

초음파 모터의 개발은 주로 일본에서 진행되어 왔지만, 최근에는 미국의 군사관련 부분이나 유럽에서도 연구가 활발히 이루어지는 추세이다.

일본내에서의 초음파 모터에 대한 특허 출원은 1975년에 시작되어 1984년 이후 급속히 증가하였으며, 1989년 공개 특허로 특허 461건, 실용신안 136건으로 매우 많은 양이다.

한편, 카메라와 다른 특수 광학 시스템용 장비에 사용되는 초음파 모터와 관련된 미국 특허권을 가진 일본 회사의 현황을 표 1에 나타낸다.

그리고 초음파 모터의 고정자에 굴곡 진행과를 여진시키기 위해서는 전용 구동회로부가 필요하다. 이 때 수십 kHz의 구동 주파수를 가진 2상 전원이 필요하며, 더우기 유전손실, 기계적 손실 및 마찰손 등에 의한 온도상승으로 진동자의 공진주파수가 변화하게 되어 공진 주파수를 자동적으로 추적할 수 있어야 하며, 또한 회전속도의 조절도 가능하여야 한다. 이와 같이 초음파 모터의 진동자의 공진주파수는 온도, 습도, 회전자의 접속 상태, 부하 등에 의해 변화하는 것으로 최적 구동주파수도 그 변화에 따라 변화한다. 따라서 최근에는 구동회로부에 대한 개발 및 특허가 활발히 이루어지고 있다. 최적 구동주파수 추적을 위한 방식을 1989~1990년 공개 특허를 토대로 분류하여 표 2에 나타낸다.

표 2. 일본 회사에 특허권이 있는 미국 특허

회 사	특허건수		
	'90~'93	'94~'96	합계
NEC	8	4	12
마쓰시다	5	6	11
Seiko-Epson	4	7	11
히다찌	5	2	7
캐논	5	10	15
니콘	8	6	14
올림프스	2	3	5

표 3. 최적 구동주파수 추적 방식

방 식	공개특허출원수
동전류 검출 방식	14
모니터 신호 방식	6
인덕턴스 조정 방식	1
전압 조정 방식	3

6. 결 론

원환형 초음파 모터의 연구 역사는 약 20년 이 안되며, 전자식 모터의 100년 역사에 비해 매우 일천하고, 동작 특성에 대한 이론적 이해도 충분하지 않은 상태이다. 또한 압전진동자의 피로 파괴에 의한 수명의 저하, 마찰력을 이용하므로 마찰손이 크게 되어 효율이 ~50%, 가격이 비싸다는 점 등 해결해야 할 과제가 많다. 그러나 중공 구조, 저속에서 고토크, 소형화 가능, 감속기어가 불필요, 자기유지기능(breakless)

이 좋으며, 자계와 무관, 정속 운전 등의 장점이 있어 응용 분야에 따라 전자식 모터를 채용하는 경우보다 훨씬 유리한 시스템 구현이 가능하다.

초음파 모터의 수요는 '90년 10만개 정도에서 '97년에는 약 150만개 정도로 급증하였으며, 2000년경에는 약 400만개로서 금액으로는 1억 5천불 정도로 추산된다.

국내의 경우 초음파모터에 대한 연구는 KIST나 충북대 등의 기관에서 보고된 바 있고, 기업체에서도 시스템 도입을 검토하고 있는 단계이지만 아직 활용은 되어 있지 않은 실정이다. 앞으로의 수요 전망을 볼 때, 국내에서도 이 분야에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. S. Isobe, M. Takemoto, and I. Takano, "A Study of Ultrasonic Motor(II)," 日本工學院大學研究報告書, pp.113-122, 1992.
2. A. Tokushima, N. Harao, K. Takahasi, N. Sugano, and R. Inaba, "Ultrasonic Motor," Nat'l Tech. Report, Vol.33, No.5, pp.542-550, 1987.
3. R. Inaba and A. Tokushima, "Piezoelectric Ceramic Ultrasonic Motor," Nat'l Tech. Report, pp.1-9, 1987.
4. M. Kuribayashi, S. Ueha, and E. Mori, "Excitation Condition of Flexural Traveling waves for a Reversible Ultrasonic Linear Motor," Am. J. of Acoust. Soc., Vol.77, No.4, pp.1431-1435, 1985.
5. 熊田 明生, "超音波モ-タと Mechatronics-feedback," 應用機械工學, pp.92-98, 1986.
6. A. Ukita, M. Kuribayashi, and S. Ueha, "Ultrasonic Motor Which Is Easily Held at the Axial Node of Vibration", Acoust. Soc. of Japan, No.1-2-16, pp.699-700, 1986.
7. H. V. Barth, "Ultrasonic Driven Motor," IBM Techical Disclosure Bulletin, Vol.16, No.7, p.2263, 1973.
8. V. V. Lavrinenco, V. S. Vishnevski, and I. A. Kartashev, Bulletin of Keiv Polytechnical Institute Series, Radio-Electron., 1976, 13, 57.
9. T.Sashida, "Trial Construction and Operation of an Ultrasonic Vibration Driven Motor," 應用物理, Vol.51, No.6, pp.713-720, 1982.
10. 指田, "超音波振動を利用するモ-タ装置", 日本特許公報 58-148682, 1983.
11. M.Aoyagi, T.Oda, Y.Kamiya, and S.Okabe, "A Study on Fast and Fine Position Contr. of an Ultrasonic Motor," JSPE, Vol.59, No.2, pp121-126, 1993.

< 김진수 위원 >