

高應答性 超音波 모터에 관한 研究

尹錫珍

한국과학기술연구원 박막기술연구센터

1. 서 론

초음파 모터는 초음파 영역(20kHz이상)의 기계적 진동을 구동원으로 한 액츄에이터를 말한다. 액츄에이터라 함은 어떤 가동에너지를 기계적 변위 또는 응력으로 변환하는 것을 말하는데 현재 산업용 액츄에이터로는 전자식 모터와 유공압 액츄에이터가 주류를 이루고 있다. 이와 같은 액츄에이터는 중량에 대한 power비가 작고, 구성하고 있는 재료 등의 특성 제한으로 인해 비약적인 진보를 기대할 수 없기 때문에 새로운 원리와 방식이 도입된 액츄에이터의 개발로 빠른 응답 속도, 고성능, 그리고 경량화 등의 실현이 요청되고 있다. 전기식 압전 액츄에이터에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는 이유도 여기에 있다.

압전 액츄에이터의 연구는 일본 및 미국 등에서 산업용으로 연구가 활발히 이루어지고 있으며 특히 低速, 高토크라는 장점으로 인해 압전 액츄에이터는 로봇의 관절 구동, 정밀 위치 제어 등에 응용이 고려되고 있는 차세대용 액츄에이터이다.

일반적인 액츄에이터용 변위 소자는 발생 변위량이 커야 하고, 위치의 재현성이 좋아야 하며, 응답이 빨라야 한다. 또한, 온도 특성이 좋아야 하고 크기, 중량이 작아야 하며 사용에 따른 열화가 없어야 하는 등의 조건을 갖추어야 한다.

이와 같은 특성을 발생시키는 구동방식에는 공기압식, 유압식 그리고 전기식이 있다. 공기압식과 유압식의 경우 변위의 조절 및 토크는 어느 정도 조절할 수 있으나 응답속도가 느린 결점이 있다. 그러나 이와는 달리 전기식 압전 액츄에이터는 타 방식에 의한 변위 및 회전 발현 기구에 비해서 단위 면적 당 토크가 크고 회전속도의 조절이 가능하여 소형화에 적극 기여할 수 있다.

압전 및 전왜 진동자에서 나오는 강력한 초음파 진동에너지를 이용하여 동력을 발생시키는 압전, 전왜 액츄에이터는 왜형(strain)을 사용하는 방식에 따라 크게 2가지로 분류할 수 있다. 즉, 인가전계에 의해 유도되는 리지드(rigid) 왜형의 사용과 교류 전계에 의해 유도되는 공진 왜형의 사용으로 분류할 수 있다. 즉, 직류 전계에 의해 왜형이 단방향으로 유도되

는 리지드 왜형과 교류 전계에 의해 왜형이 교번으로 유도되는 공진 왜형으로, 초음파 모터는 교류 전계에 의해 유도되는 공진 왜형을 사용한다.

따라서 본 연구에서는 진행파형 초음파 모터를 대상으로 빠른 응답속도의 구현을 목적으로 초음파 모터를 설계 및 제작하였으며 또한 초음파 모터의 구동을 위한 발진회로의 설계 및 제작으로 초음파 모터의 특성을 측정하였다.

2. 초음파 모터의 설계 및 제작

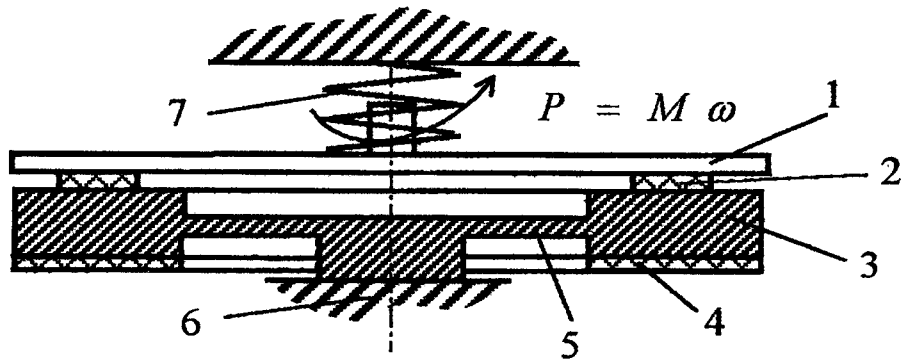
초음파 구동이란 입력 연결부(entering link : actuator)의 구동 질량점에서 병진-반사(translational-reflexive)를 출력 연결부(output link : rotor)에서 간접 구동으로 변환하는 기구를 의미한다. 탄성 기계 진동으로의 구동은 압전 변환기에 의해서 발생하는 병진-반사를 말하며 압전 요소는 기계적 진동을 발생시켜 왜형이 생기게하는 근원이 되지만 회전 구동을 얻는 직접적인 사용에는 부적절하다. 이를 위해 굴곡 진동의 액츄에이터를 금속-세라믹의 바이모프(bimorph)로 사용할 수 있는데 이것은 4개 요소의 복합링 진동계로 실현시킬 수 있다. 그와 같은 링에서 몇 가지 형태의 탄성 진동이 가능하다. 방사 진동은 링의 축선에 주기적으로 변하는 반경을 갖는 원을 의미하며 모든 단면적 부분은 회전없이 방사방향으로 움직인다. 또한 링 액츄에이터에서는 각기둥 축의 수직진동과 비슷한 진동을 발생시킬 수 있으며 링의 축선이 변형되지 않았을 때 모든 단면은 같은 각도로 회전한다.

구동자는 그림 1과 같이 링 진동계(3)와 압전 세라믹(4), 회전자(1), 마찰재(2)로 구성되어 있다. 진동계(oscillatory System)는 음향 절연체 역할을 하는 다이어프램(diaphragm)(5)으로 지지되어 있다. 마찰재(2)와 진동계의 윗면은 스프링으로 지지되어 있다.

진동계의 단면은 직사각형의 형태를 가지며 만일 진동계가 빔(beam)으로 간주하면 진동계의 길이는 링(1)의 평균 길이와 같다. 굴곡 진동계의 n번째 공진 주파수는

$$f = \frac{Xbn^2}{2\pi l^2}$$

단, X는 굴곡면에 수직인 축에 관한 단면적의 반경, b는 음속, n은 진동의 형태, l은 축의 길이이다.[15]



P : power, M : Torque, ω : angular velocity

Fig. 1 The Block diagram of ultrasonic drive

- 1 - rotor, 2 - frictional material(lining material), 3 - ring part of OS
- 4 - piezoelement, 5 - thin diaphragm, 6 - foundation, 7 - spring

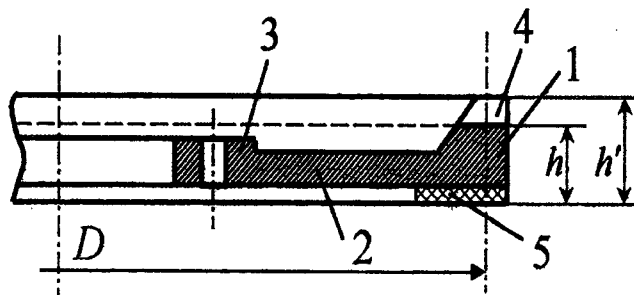


Fig. 2. Stator part of ultrasonic drive

- 1:continuous ring part, 2:holding diaphragm, 3:boss for strengthening with a body drive, 4:protuberance, 5:piezoceramics element

그림 2는 링형태의 진동과형 초음파 모터 한 부분을 보여주는 것으로 음향 절연체로 작동하는 얇은 다이어프램(2)은 boss(3)와 합체되어 있는 링부분 액츄에이터(1)이다. 진동계에서 face leg의 한 면 위에는 굴곡 진동 진행과를 발생시키기 위해 링 압전체가 부착되어 있고 다른 한 면에는 용기(4)를 만들기 위해 홈을 냈다. 용기는 이동자를 진동계에 일정하게 고정시키고 마찰에서 나오는 찌꺼기를 제거하면서 마찰을 증진시키기 위해서 필요한 것이지 굴곡 이동의 배율기 또는 굴곡 변위를 증가시키지는 않는다. 홈을 30-70으로 하여 실험을 행하였고 굴곡 진동의 배열에 영향을 주지는 않는다. 진동계 위의 용기는 집중된 질량으로 작용을 하여 공진 주파수를 낮춘다.

이와 같은 구조를 바탕으로 최대 torque 1.5kg·cm의 출력을 위해 압전체의 크기를 내경 30mm, 외경 40mm 두께 0.5mm로 6~7번째 굴곡진동을 이용하도록 설계하였다. 첫 번째 구조는 6번째의 진동을 이용하는 것으로 2×5=10의 반과장 부분 30° 와 1/4과장(15°), 1/4과장(45°)로 나누어져 있으며 구동 주파수는 34kHz로 설계되었으며 다른 하나는 7번째 굴곡진동을 이용하는 것으로 2×6=12부분 25° 42' 과 1/4 및 3/4과장 부분을 각각 12° 51', 38° 34' 로 나누어져 있으며 그때의 주파수는 43kHz로 구동되도록 하였다.

최종적인 압전초음파 모터의 구조와 크기는 그림 3과 같다.

고정자의 동작부(링)로부터 열 방출을 위하여 링부분의 안쪽에 위치해 있는 다이어프램과 같은 교차 연결된 금속이 필요로 된다. 돌출부내에 중앙입구와 3개의 나사산은 지지대 (14)

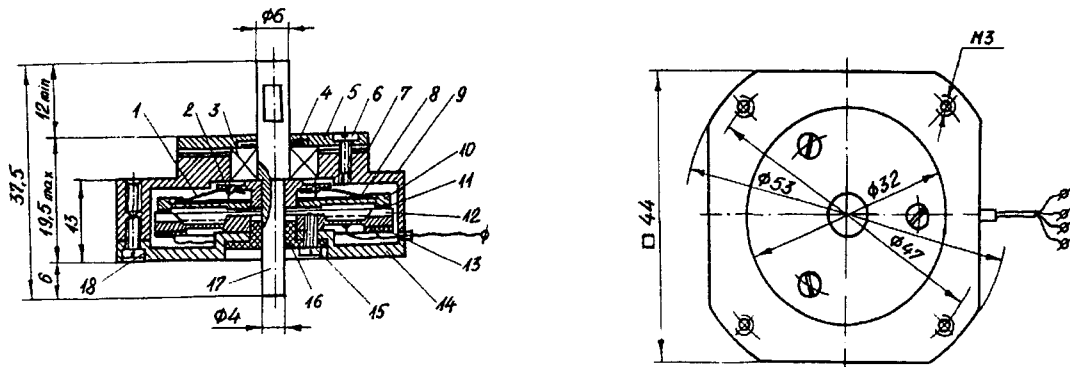


Fig. 3 A general view of final ultrasonic motor

1. press, 2. flange, 3. ball-bearing, 4. spacer, 5. cover, 6. screw,
- 7,8. gasket, 9. body, 10. disk, 11. ring, 12. stator, 13. concentrator,
14. foundation, 15,18. screw, 16. hub, 17. shaft

에 지지해주기 위해 필요하다. 이러한 3개의 소자로 이루어진 고정자 (링형 동작부, membrane cross connection, 돌출부)는 하나의 축에 의해 회전되는 소자의 역할을 한다. 기초부(14)는 고정자에서 발생하는 열 제거를 목적으로 하는 구조로 되어야 하며, 가는 다이어프램이 링의 부분과 전체의 연결을 줄이기 때문에 진동력의 손실이 감소된다. 이동자에서 고정자로의 압력의 조절은 가스켓(gasket)(7)의 도움으로 가능하고 가스켓은 다른 두께를 만드는데 편리하고, 세부 공정의 부정확성을 보정하고 조절을 가능하게 해준다. 가스켓 (7)을 조절하는 설치 부분은 커버(5)와 몸체(9) 사이에 선택되어진다. 스크류(screw)(6)과 (18)의 조절은 정지하는 것에 대비하여 단단히 조여졌다.

복잡한 구조에도 불구하고 축-회전자의 결합은 매우 기술적으로 이루어져 있으며 또한 수리가 가능하다. 예를 들어 플렌지 (2)에 6개 구형 용기는 얇은 철제 링에 위치한 2mm 지름의 일반적인 볼로 만들어졌다. 언급한 두께의 철제 링은 용기의 깊이를 쉽게 제어한다. 디스크(10)은 기계 연장을 회전시킴으로 얻어지며 마찰 링(11)이 부착되어 있다.

축-회전자-고정자 동축 배열은 스크류(18)에 의해 서로 연결된 몸체(9)와 기초부(14)에서 모든 함수적 요소의 배열로서 이루어진다.

허브(hub)(16)은 대체로 과도하게 구동시 부하가 슬라이딩하는 것을 방지하는 역할을 하며 외부로부터 볼 베어링(3)의 지지때문에 플라스틱 스페이서(spacer)(4)가 요구된다.

초음파 모터의 크기는 44×44이며 높이는 19.5mm 무게는 85g이다. 그러나 모터의 질량 감소에 대한 제한이 있다. 즉, 모터의 가는 몸체, 커버의 압출 등으로 그러나 모터의 구동이 발생하는 열이 효과적으로 지정되고 분산되어야하는데 너무 질량이 감소되는 것은 바람직하지 못하다. 게다가 열을 받은 얇은 알루미늄에서, 예를 들면 볼 베어링의 구멍처럼 정밀도를 필요로 하는 곳에는 좋지않다.

초음파 모터의 구동에 있어서 잡음을 없애기 위해서 고무 가스켓(8)을 사용하였으며 이는 디스크-회전자의 진동을 제거하고 또한 진동의 확산 및 스프링(1)에서의 발생의 근원을 제거한다.

3. 제작된 초음파 모터의 특성

초음파 모터를 구동시키기 위해서는 먼저 회전자와 고정자사이의 최적압력을 구해야 한다. 너무 과도한 압축력은 장치의 효율에 매우 악영향을 미친다. 일정한 전기적 조건하에서

최적의 압력은 마찰접촉이 되는 한도 내에서 가장 적은 압력을 말한다. 따라서, 초음파 모터의 압전체를 갖는 구동기에서 전력과 전압을 극대화시키는 압력을 찾는 것이 가능하였다.

따라서 초음파 모터의 성능은 압전체의 channel capacity에 의해 제한된다고 보여진다. 회전자의 최적압력(최소값)은 장치의 가능한 구동기의 가장 좋은 성능이다. 위의 결과로부터 구동기의 속도제어는 인가전압이 아니라 다른 인자, 즉 액츄에이터의 공진주파수 조절에 의해 가능함을 실험적으로 결론지었다. 실험에서 액츄에이터의 회전자에 대한 최적압력은 8.5 N이었다.

그림 4는 하나의 초음파 모터에 두 전력에서 모터의 기계적 성능을 비교하였다. 실선은 $P_{e1}=2,8W$, 점선은 $P_{e2}=2,4W$ 이다. 이것은 변압기의 조절에 의해 제어되었다. 그림 5는 3개 값 ($M=0$, $M=0,04Nm$, $M=0,06Nm$)의 부하가 인가된 장치의 액츄에이터에 공진주파수의 변화에 따른 회전자의 주파수를 보여준다.

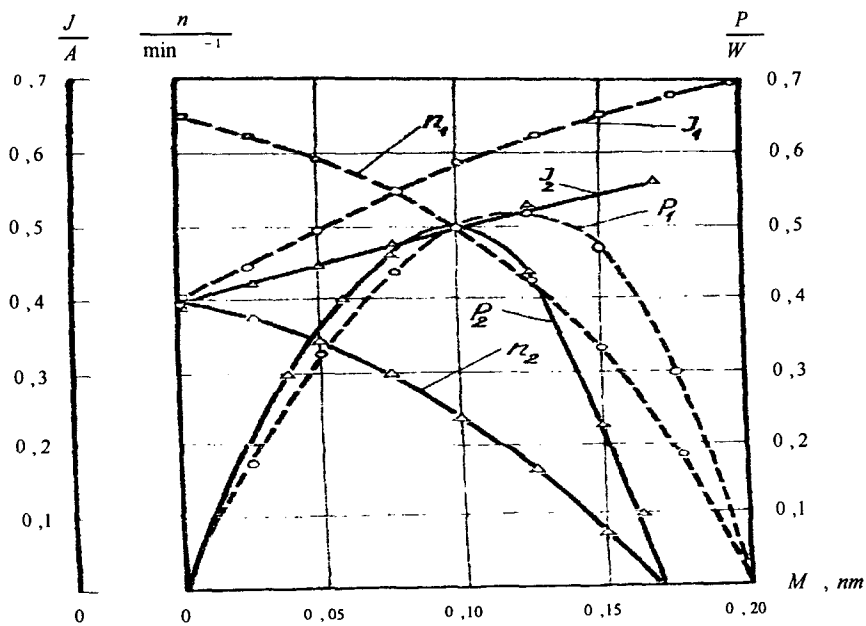


Fig. 4 Mechanical performance of the ultrasonic motor

J : consumed current, n : frequency of rotation, P : output power

M : moment of the shaft

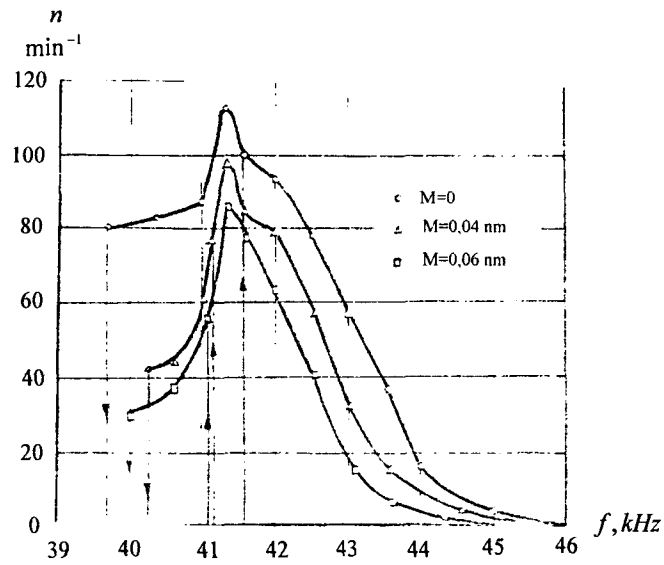


Fig. 5 Association rotation of the motor according to the frequency

마지막으로 제작된 초음파 모터의 응답속도를 구하기 위해 Single impulse를 갖는 발전기로 초음파 모터의 작동가능성을 step 조건으로 조사하였다. 초음파모터의 구동시 " τ "의 펄스 지속에서 초음파 모터 축의 회전각 " ϕ "가 조사되었다. 축의 이러한 측정을 목적으로 작은 거울 조각이 장치에 고정되었고 회전각은 ganiometer (type G-5)를 이용하여 측정하였다. 그림 6에 측정결과를 나타내었다.

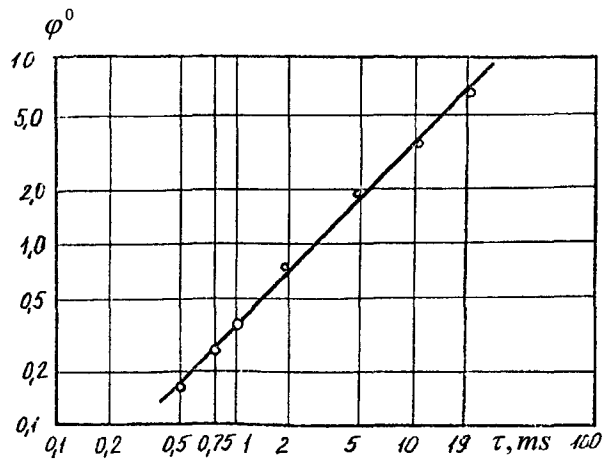


Fig. 6 Turn angle of the ultrasonic motor shaft duration launching impulse

4. 결 론

- 1) 진행파형 초음파 모터를 설계 및 제작하였으며 그 크기는 t19.5Xw44(mm)이며 무게는 85g 이었다.
- 2) 12와 14-반파장 형태가 설계되었으며 공진주파수는 각각 34와 41kHz이었으며 실제 구동주파수는 36과 43kHz로 되었다.
- 3) 회전자와 고정자 사이의 최적압력은 8.5N이었으며 최대 회전은 130rpm, 그리고 최대 토오크는 2.0kg · cm였다.
- 4) 제작된 초음파 모터의 응답속도는 0.5ms이하로 초음파모터의 기동-정지특성이 우수하였다.
- 5) 초음파 모터를 구동하기위한 발진회로는 전압 및 주파수 조절형태의 2가지를 설계 및 제작하였으나 속도제어는 주파수조절 회로가 효과적이었다.

참 고 문 헌

1. Kumada, A. (1985). Japanese Journal of Applied Physics, 24, Suppl.24-2, 739-41.
2. Kurosawa, M. And Ueha,S. (1987). IEICE Technical Report US87-31, pp.27-32. Institute of Electronics, Information and Communication Engineers of Japan. (1991).IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,38. 89-92.
3. US Patent, Shoji Mishiro, Kanagawa. Japan. 4, 697, 117, Sep. 29, 1987.
4. Nakamuka,K., Kurosawa,M., and Ueha,S.(1990). In Proceedings,1990 Spring Meeting, Acoustical Society of Japan, Vol.II,pp.863-4.
5. US Patent, Shoji Mishiro, Kanagawa. Japan. 4, 703, 214, Oct. 27, 1987.
6. P.E. Vasiljev, L.L.Karmanov. Account and research of the compound piezoelectric batch converter of fluctuations for piezoelectric motor. The electrical engineer. M. 1981, 8. 54-56.
7. Kanno,N.(1988). Journal of the Horological Institute of Japan,124,63-79.
8. Ise, K.(1987). Journal of the Acoustical Society of Japan,43,184-8.

9. Sashida,T.(1983).Mechanical Automation of Japan,15,(2),31-5.
10. Hiroshi Hirata, Sadayuki Ueha. Characteristics estimation of a traveling wave type ultrasonic motor. IEEF Transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control. Vol. 40. No.4.pp. 402-406. July. 1995.
11. Hiroshi Hirata, Sadayuki Ueha. Design of a traveling wave type ultrasonic motor. IEEF Transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control. Vol. 42. No.2,pp. 225-231 March 1995.
12. Joachim P. Schmidt, Peter Hagedorn, Miao Bingqi. A note on the contact problem in an ultrasonic travelling motor. Int. J. Non-Linear Mechanics,Vol. 31. No.6,pp 915-924. 1996.
13. P.Hagedorn, J. Wallaschek. Travelling wave ultrasonic motors, Part I: Working principle and Mathematical modelling of the stator. Journal of Sound and Vibration. (1992) 155(1), pp.31-46.
14. Cao Xisheng, Wallaschek Jorg. Modelling and analysis of dynamic contract problems in travelling wave ultrasonic motors. ZAMM. Z. Angew. Math. 76 (1996) S5, pp.93-94
15. L.G.Merculov, A.V.Charitonov .Theory and account of compound concentrators. An acoustic magazine T. 5, V. 2, 1959, with 183-189.
16. P.E.Vasiljev, L.L.Karmanov. Account and research of the compound piezoelectric batch converter of fluctuations for piezoelectric motor. The electrical engineer. M.1981, 8. 54-56.
17. W.G. Cady. Composite piezoelectric resonator.-Amer .J. Acoust . Soc. Amer. ,1955,22, 2, 302-309.
18. I.I.Teumin. Ultrasonic oscillatory systems. - M. Machgiz., 1959 , 352 p.
19. P.E.Vasiljev., V.F.Kazanctev. Disk concentrators of radial fluctuations. - Akustichescij m.,M.,1976, T. XXII, v.,6,p.825-828.
20. P.E.Vasiljev,V.F.Kazanctev.I.A.Savickas. The compound piezoelectric converter of radial fluctuations. - Acoustic m. 1980, . XXVI, V. 4. p. 517-521.
21. S.Timoshenko . Vibration problems in engineering. 1955.

22. Lord Relej. The theory of a Sound. Volume 1. 1955.
23. Porish.Y.I. A measurement of vibration. M. Mashgiz. 1956, page 398.
24. Gears and systems for study of vibration, noise and impact. A manual.
under Klyeva.V.V. M. A mechanical Engineering. 1978.
25. Vasiljev.P.E.,Esiulionis.EI. Application laser interferometre for a research of ultrasonic oscillatory systems. The acoustic log-book. V.26.V. 5., 1980, page 663-666.
26. Jap. Pat. N. 147977 1986.
27. Jap. Pat. N. 147978 1987.
28. Kazantcev V.F. A dependence of voltages in a material at ultrasonic handling from amplitude oscillation and force press. Acoustic journal. V.9. Issue 1. Page 120-122.
29. P.Vasiljev, S-J Yoon, H-J Kim, H-J Jung. Composite piezoelectric a converter for ultrasonic motors. In Proceedings of International Symposium on Automotive Technology & Automation. (31th ISATA) Dusseldorf, Germany, 1998, 213-221.