

원환판에서의 진행파 구현 실험

윤신일* · 조지현* · 한상보**

Generating a Traveling Wave on an Annular Ring

Shinil Yun, Ji-Hyun Cho, sangbo Han

Key Words: Ultrasonic motor (초음파 모터), Traveling wave (진행파), Standing wave (정재파).

ABSTRACT

Rotary ultrasonic motors are based on the traveling wave generated by piezo materials attached on the stator. Large scale model of an annular ring was built to understand the fundamental mechanism involved in the rotary ultrasonic motors. Traveling wave on the structure can be generated by superposing two standing waves. Precise matching of the amplitudes and phase shift between two standing waves in time and space is the key to the success of generating a traveling wave.

기호설명

- ω : 진동수
- λ : 파장
- k : 파동수
- ϕ : 위상각

1. 서론

다양한 기능성 소재들 중에서도 특히 압전소자의 경우 기계분야에의 응용 범위가 날로 확대되어가고 있으며 압전소자의 특성을 이용한 많은 기계 장치들이 개발되고 있다.

이들 압전소자를 이용하는 많은 장치들 중 초음파 모터는 압전 세라믹에 의해서 고정자 표면에 초음파 진동을 발생시키고 고정자와 회전자간의 마찰력을 매개로 하여 구동력을 발생시키는 모터이다.

초음파 모터는 코일이나 자석이 필요 없는 단순 구조이며 소형, 경량으로 빠른 응답성을 가지고 있고 감속기를 필요로 하지 않는 저속회전과 큰 크기의 토크 발생이 가능하며 또한 백래쉬가 적다는 등의 특징이 있다

PZT계 압전진동자에서 발생하는 초음파 에너지를 모터의 구동방식으로 채택하려는 시도는 1973년 미국의 N.V. Barth⁽¹⁾에 이어 1977년 소련의 V.V. Lavrinenco와 1983년 일본의 Sashida⁽²⁾ 등의 연구가 있었으나 압전소자의 출력의 한계와 기계적 열화, 낮은 변환효율, 구동부분의 마모 및 온도 상승등에 의한 압전 특성의 열화로 인한 문제점 등 초음파 모터는 아직도 많은 연구가 필요한 분야이다

유한한 직선 보에서는 반대편 고정단에서 파가 반사되며 정재파가 발생되는데, 원환판 구조물에서는 유한길이에서 무한장으로 전파되는 파동과 동일한 효과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 초음파 모터의 제작의 사전준비 작업으로 원환판에서 진행파를 발생시키기 위한 실험을 수행하여 진행파 발생에 대한 실질적인 방법론을 파악하고 이로부터 얻은 제작상의 문제

* 경남대학교 대학원 기계설계학과

** 경남대학교 기계자동화공학부

점을 실제 모터 제작에 반영하려 한다.

2. 초음파 모터의 원리

2.1 진행파의 발생원리

진행파의 발생원리는 탄성체인 원환판에 부착된 압전소자에 교류전압을 인가시키면 부착지점을 중심으로 양방향으로 진행되어 나가는 굽힘 진동이 발생하게 되는데, 일정한 거리를 두고 부착된 또 다른 압전소자에 의해 발생하는 굽힘 진동이 중첩될 경우에 한쪽 방향으로만 진행되는 진행파가 발생하게 된다.

Fig. 1에서 원환판에 부착된 PZT 1과 PZT 2에 의해 각각 발생하는 진행파는 다음 식(1)과 식(2)로 표현된다.

$$\begin{aligned} u_1(x, t) &= A \sin(\omega t - kx) + A \sin(\omega t + kx) \\ &= 2A \sin(\omega t) \cos(kx) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} u_2(x, t) &= B \sin\{\omega t - k(x+a) + \phi\} \\ &\quad + B \sin\{\omega t + k(x+a) + \phi\} \\ &= 2B \sin(\omega t + \phi) \cos\{k(x+a)\} \end{aligned} \quad (2)$$

이 두 진행파를 중첩시키면

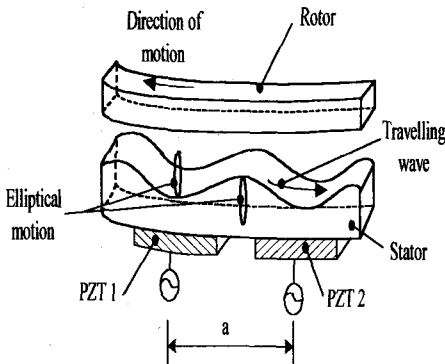


Fig. 1 Principle of operation of a rotary flexural traveling wave motor

$$\begin{aligned} u_3(x, t) &= u_1(x, t) + u_2(x, t) \\ &= 2A \sin(\omega t) \cos(kx) \\ &\quad + 2B \sin(\omega t + \phi) \cos\{k(x+a)\} \end{aligned} \quad (3)$$

을 얻게 되는데, 여기서, ω 와 k 는 각각 진동수와 파동수를 나타내며, a 는 두 PZT사이의 거리를 나타낸다. 또한 ϕ 는 두 인가 교류전압의 위상차를 나타낸다.

두 PZT는 원환판에 접촉되어 있기 때문에 각각의 PZT는 인장과 압축에 의해 굽힘진동을 유발하게 되는데 이렇게 제자리에서 상하 진동하는 파를 정재파라 하며 이 정재파를 합성하여 진행파를 만들어 내기 위해서는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned} A &= B \\ \text{and} \\ -ka + \phi &= m\pi \quad (m=0, \pm 2, \pm 4, \dots) \\ ka + \phi &= n\pi \quad (n=\pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

이렇게 하면 하나의 PZT에 의해 발생하는 진동 진폭의 2배에 해당되는 다음과 같은 진행파를 만들 수 있다.

$$u_3(x, t) = 2A \sin(\omega t - kx) \quad (5)$$

식(5)는 두 정재파의 합성으로 만들어 낼 수 있는 한 방향으로 진행되는 진행파이다.

또한, 두 PZT 사이의 거리 a 와 식(4)의 ϕ 는 다음 식을 만족해야 한다. 여기서, $k = 2\pi/\lambda$ 의 관계가 있으므로,

$$\begin{aligned} a &= \frac{\lambda}{4} (n - m), \quad n \neq m \\ \phi &= \frac{\pi}{2} (n + m) \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)에서 알 수 있듯이 한 방향으로 진행되는 진행파를 발생시키기 위해서는 진행파의 파장의 1/4 간격으로 PZT를 붙여야 하며, 각각의 PZT에

공급되는 교류 전압의 시간적 위상은 $\pi/2$ 가 되어야 한다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 원환판의 제작

원환판에 대한 진행파 발생여부에 대한 실험을 수행하기 위하여 본 연구에서 적용한 원환판의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Dimensions of the annular ring (unit : mm)

inner diameter	outer diameter	thickness
450	570	3

PZT의 효과를 극대화 시켜서 굽힘 진동을 유발시키기 위해 원환판의 재질은 연성의 복합재료를 사용하였다.

3.2 PZT 부착

진행파를 이용한 초음파 모터의 제작에 있어서는 서로 다른 두 정재파(standing wave)의 발생이 선행되어야 하는데 이 정재파를 생성하기 위해 PZT를 원환판에 부착하여야 한다.

PZT의 부착에 있어서 그 효과를 극대화하기 위해서는 원환판과 완전 결합이 이루어져야 하는데, 만약 PZT와 원환판 사이의 결합에 있어서

완전 결합이 이루어지지 않을 경우에는 그 취성으로 말미암아 PZT가 깨어질 우려가 있고, 정확한 신호를 전달하지 못해 굽힘 진동을 제대로 발생시키지 못한다. Fig. 2는 본 실험에서 사용된 원환판의 개략도를 보여주고 있다. 두 정재파 신호의 발생을 위하여 두 개의 PZT를 6차 모드 파형의 $\lambda/4$ 간격으로 부착하였으며, 입력신호의 인가를 위하여 copper tape을 삽입하였고, 보다 높은 전도성을 부여하기 위해 silver paste를 사용하였다.

PZT를 원환판에 접착시키기 위한 접착제는 실리콘 계열의 상용 접착제 제품인 ARALDITE를 사용하여 접착하였다. 본 연구에 적용한 PZT의 기본적인 물성치는 Table 2와 같으며, 크기는 $54.6 \times 54.6 \times 0.191$ mm 이다.

3.3 작동 회로

정확한 진행파를 발생시키기 위해서는 인가신호의 발생이 매우 중요하다. 즉, 서로 일정한 간격으로 접착된 PZT에 위상차가 $\pi/2$ 인 신호를 동시에 인가하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서의 입력신호는 주파수를 조절할 수 있는 신호발생기를 이용하였으며, 위상차를 가진 신호 발생을 위해 위상지연회로를 구성하였다. 또한 PZT에 인가되는 전압을 조절하기 위해 증폭기를 이용하여 신호를 증폭하였다.

3.4 원환판의 모드 해석

먼저 원환판의 진동 특성을 파악하기 위해 Modal Test를 수행하였고 입력신호는 0 ~ 500 Hz의 신호인 sine sweep 신호를 사용하였다.

진행파 구현을 위한 실험으로 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 신호, 즉 sine 신호와 cosine 신호를 각각의

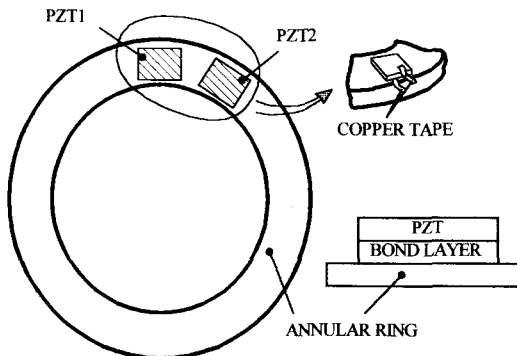


Fig. 2 Layout of the test annular ring and Distribution of Beam, Bond layer, PZT

Table 2 Material properties for PZT

Strain Coefficient	- 1.8e-10 m/V
Elastic Modules	5.0e10 N/m ²
Tensile Strength, Static	6.3e7 N/m ²

PZT에 인가하게 되면 PZT의 인장과 압축으로 인하여 두 개의 정재파가 생성되며 이 두 개의 정재파가 중첩되어 진행파를 생성하게 된다.

대표적인 주파수 응답함수가 Fig. 4에 나타나 있다.

본 연구에서는 Fig. 4의 주파수 응답함수에 나타난 여러 모드들 중 B_{06} 모드 즉, 반경방향 절선 (nodal circle)의 수가 0이며, 원주방향 절선 (nodal diameter)의 수가 6인 모드를 가진 모드로 결정하였다.

Table 3은 FEM 해석결과와 모드 실험에 의해 파악된 고유진동수를 비교한 것이다.

3.5 실험 방법 및 장치

진행파 발생 실험을 위해 먼저 서로 위상차가 $\pi/2$ 인 신호를 각각의 PZT에 인가한다.

각각의 입력 신호에 의한 응답과 두 입력 신호를 동시에 적용시켰을 때의 응답신호를 고찰하여 진행파 구현 여부를 파악하였다.

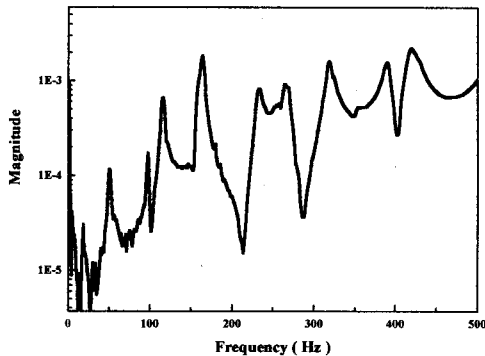


Fig. 4 FRF of the annular ring

Table 3 Comparison of FEM and experimental natural frequencies of the annular (nodal line = 0), unit : Hz

	1	2	3	4	5	6
F	18.85	52.68	98.78	118.53	168.54	236.46
E	18.75	51.30	97.50	115.50	163.50	233.75

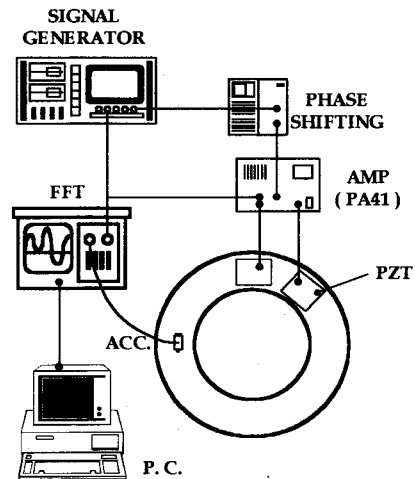


Fig. 5 Experimental setup

Fig. 5는 실험장치도를 보여 주고 있으며 Fig. 6은 실험장치의 사진이다

원환판의 진폭은 압전재료의 압전상수, 압전재료와 탄성판의 두께와 같은 설계변수와 구동주파수에 의해서 결정된다. 진행파를 이용한 초음파 모터의 제어 입력은 전압, 주파수, 위상차이다.

전압은 원환판에 가해지는 가진력의 진폭을 변화시켜 원환판 산의 궤적의 크기를 변화시키며, 주파수는 원환판 산이 그리는 궤적의 속도를, 위상차는 회전 방향을 변화시킨다.

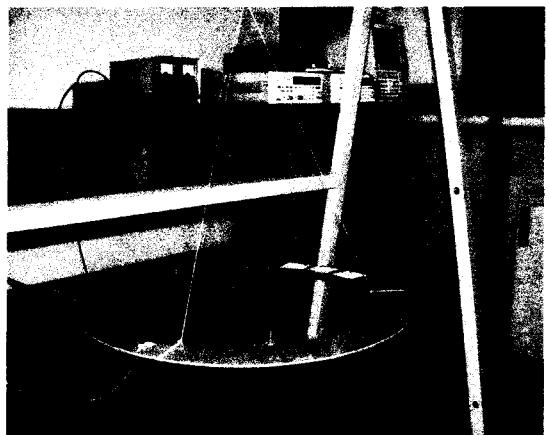


Fig. 6 Experimental equipment and the annular ring

4. 실험결과 및 고찰

진행파 구현 실험을 위해 먼저 PZT 1에는 구동주파수를 6차 모드 공진 주파수와 일치시켜 신호를 인가하였으며, PZT 2에는 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 신호를 입력하였다. Fig. 7은 원환판 위의 특정 위치에서 각각의 PZT가 독립적으로 작용될 때 발생하는 진동 변위의 계측 결과이다.

한쪽 방향으로 진행하는 진행파를 생성하기 위해서는 각각의 PZT에 대한 가진 신호의 전압 크기가 같아야 한다.

이것은 PZT와 원환판 사이의 결합이 완전하게 이루어졌다는 조건이 선행되어야 한다. 각각의 PZT가 원환판과 완전 결합을 이루지 못할 경우 양방향으로 진행되어 나가는 파가 서로 상쇄되지 못하고 서로 다른 크기의 진폭을 갖게되며 따라서 한쪽 방향으로 진행되는 파의 생성이 이루어지지 않는다. 본 실험에서는 완전 결합 여부를 판단하기 위해 두 신호를 비교하여 보았는데, 그 결과 완전결합이 이루어지지 않았음이 판명되었으므로 본 연구에서는 각각의 PZT의 구동으로 인한 응답신호를 측정하여 같은 크기의 응답을 제공하는 전압을 가진 신호의 전압으로 선택하여 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 각각의 PZT에 의해 형성된 B_{06} 모드의 절선을 보여주고 있다.

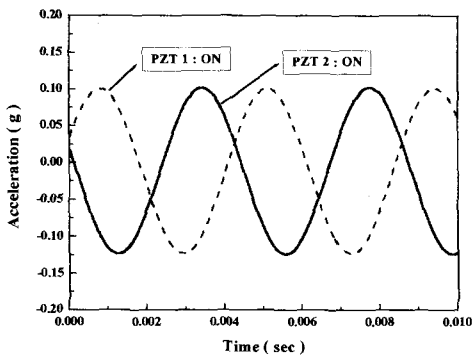
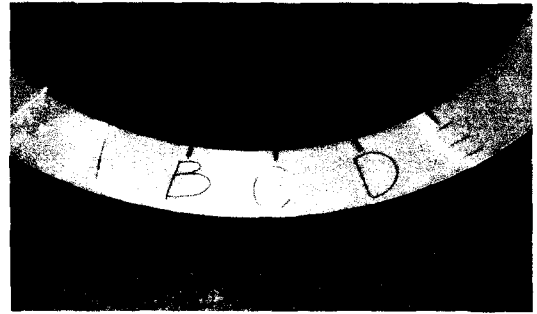


Fig. 7 Response signals of the annular ring with each PZT shut off



(A)



(B)

Fig. 8 Photograph of nodal lines of B_{06} mode
(A) PZT 1 only, (B) PZT 2 only

다음으로는 각각의 PZT 1 과 PZT 2 에 신호를 동시에 인가했을 경우 특정 위치에서의 변위 응답신호를 통하여 진행파 형성 여부를 확인하였다.

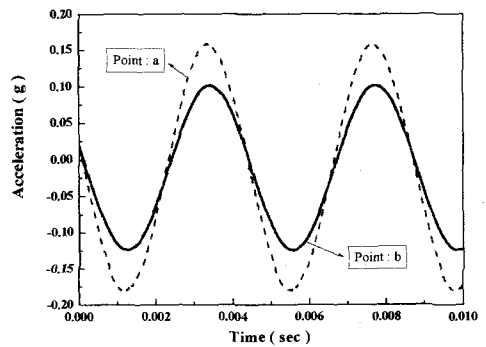


Fig. 9 Progressive waves measured at different positions on the annular ring
(point a and b)

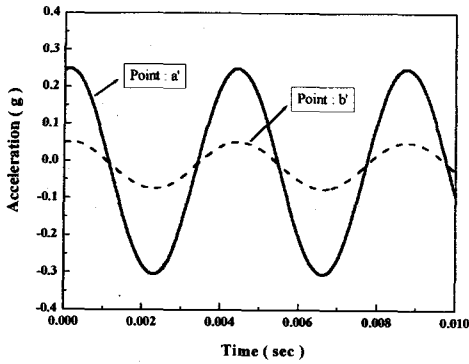


Fig. 10 Progressive waves measured at different positions on the annular ring (point a' and b')

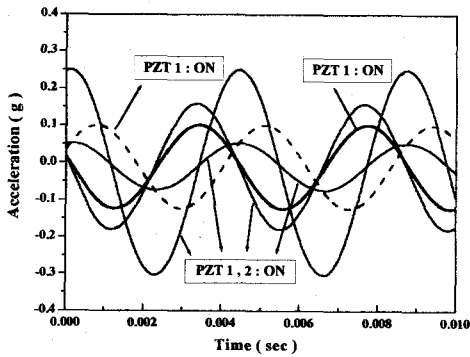


Fig. 11 Progressive waves measured at different positions on the annular ring

Point a 와 b는 각각의 PZT에 독립적으로 신호를 인가했을 경우의 반절선에 해당하는 위치를 말하며, Point a'와 b'는 Point a와 b에서 $\lambda/8$ 떨어진 위치에서의 응답신호를 나타내고 있다.

위의 그림의 결과에서 알 수 있듯이 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 신호를 $\lambda/4$ 만큼의 거리로 부착된 PZT에 동시에 인가하게 되면 진행파가 생성된다는 이론적 결과를 실험적으로 구현할 수 있었다.

5. 결 론

진행파를 이용한 초음파 모터의 제작의 선행 단계로 원환판에 대한 진행파 구현 실험을 수행해

보았다. 위의 실험 결과를 통하여 모터 제작 시 발생할 수 있는 몇 가지 문제점을 파악할 수 있었다.

먼저, 각각의 PZT에 $\pi/2$ 의 위상차를 가진 신호를 동시에 인가하게 되면 진행파가 발생하는 것을 절선의 이동이나 미세 분말의 이동을 통하여 확인 할 수 있었으나 진행파의 크기 및 진행속도를 증가시키기 위해서는 입력 신호의 주파수가 실험에서 사용된 신호보다는 고주파여야 한다는 것을 알 수 있었다.

실제적인 모터의 제작을 위해서는 PZT와 원환판 사이의 접촉 문제에 대한 고려가 있어야 하는데, 만약 완전 결합이 이루어지지 않으면 한 방향으로 진행되는 진행파를 생성할 수가 없다.

향후 고성능의 초음파 모터의 제작을 위해서는 압전재료(PZT)가 최대로 허용하는 전압을 공급할 수 있는 회로와 원환판 역할을 하는 원환판과 압전재료 사이의 완전결합을 이룰 수 있는 결합방법에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

참고문헌

- (1) Barth, H. V., 1973, Ultrasonic driven motor. IBM Technical Disclosure Bulletin, 16, 2263
- (2) T. Sashida, 1985, Motor device utilizing ultrasonic oscillation; 29 claims and 22 Drawings. U.S Patent, 4, 868, 446
- (3) S. Ueha, Y. Tomikawa, M. Kurosawa, N. Nakamura, 1993, "Ultrasonic Motors Theory and Applications." Oxford, Clarendon Press, p.10
- (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