

## 초음파 모터용 람다형 다방향 변환자

### Multi-directionally Movable Lambda Shape Transducer for Ultrasonic Motor

도영수<sup>1,a</sup>, 남효덕<sup>1</sup>, 김영덕<sup>2</sup>  
(Young-Soo Do<sup>1,a</sup>, Hyo-Duk Nam<sup>1</sup>, and Young-Duk Kim<sup>2</sup>)

#### Abstract

The transducer for multi-directionally movable ultrasonic motor having lambda shaped vibrators has been proposed and designed. The two branches cross at a right angle with each other at the tip. FEM analyses of lambda shaped transducer were carried out to find vibration modes for ultrasonic motor. The lambda shaped transducer has one symmetric mode and two anti-symmetric modes. The symmetric mode generates the normal direction motion of the tip. The lateral and vertical direction motion of the tip are excited by two anti-symmetric modes. The normal and lateral direction motions made an lateral elliptic trajectory. And the normal and vertical direction motions made an vertical elliptic trajectory normal to previous one. The transducer with 1 mm in thickness and 25 mm in length has been fabricated and evaluated. The resonance frequencies of the transducer was 32 kHz and 103 kHz. The tangential and vertical vibration displacement of the transducer having the lateral elliptic trajectory were 1.5  $\mu\text{m}$  and 1.1  $\mu\text{m}$ , respectively at the driving voltage of 100 Vpp and frequency of 32 kHz and 103 kHz. And the tangential and vertical vibration displacement of the transducer having the vertical elliptic trajectory were 0.4  $\mu\text{m}$  and 0.2  $\mu\text{m}$ , respectively at the same driving condition.

**Key Words** : Ultrasonic motor, Multi-directionally moving device, FEM, Piezoelectric actuator, Transducer

#### 1. 서 론

초음파모터는 자석이나 코일이 없는 새로운 종류의 모터로써, 압전세라믹에 의해 초음파 영역에서 진동하는 탄성체인 초음파변환자와 회전자 사이에 작용하는 마찰력을 구동력으로 동작하는 저속, 고 토크의 차세대 모터이다.

이러한 초음파 모터는 일반 전자기 모터에 비하여 중량 대 출력비의 우수성, 저속에서의 높은 토크, 짧은 응답속도, 별도의 기어박스 없이 넓은 범위에서의 속도조절 및 위치결정, 간단한 구조와 소음이 없는 특성과 전자파에 영향이 없는 등의 장

점이 있다. 이들은 로봇공학, 광학 및 정밀 위치제어 선반과 같은 자동화와 전자계의 영향 없이 동작하여야 하는 의료장비 및 반도체 장비 등 광범위한 분야에 응용할 수 있다. 또한 소형화하기에 적합한 특성과 응용에 맞게 형상을 변형하는 것이 용이하여 향후 그 응용 분야는 급속한 속도로 늘어날 것으로 전망 된다[1].

초음파모터의 기본적인 작동 원리는 인간의 가청영역을 벗어나는 초음파 주파수에 해당하는 반복적인 역학적 진동을 통하여 초음파 변환자에 발생되는 미소 변형을 일정한 방향의 역학적 운동으로 확대, 변환시켜 주는 것이다. 압전세라믹에 의하여 서로 다른 진동모드로 여기 된 초음파변환자는 두 모드의 중첩에 의한 진동으로 인하여 반복적인 타원궤적의 운동을 만들게 되며 이는 마찰을 통하여 회전 또는 직선 운동으로 변환 된다[2-6]. 본 논문에서는 람다형상의 빔에 PZT계의 압전세라믹을 부착하여 다방향성 운동이 가능한 초음파 변환자의 설계 및 제작에 관하여 다루었다. 유한

1. 영남대학교 전자공학과  
(경북 경산시 대동 214-1)

2. (재)포항산업과학연구원

a. Corresponding Author : anycolor@yumail.ac.kr

접수일자 : 2007. 10. 15

1차 심사 : 2008. 1. 8

심사완료 : 2008. 1. 12

요소법을 이용하여 람다형 초음파변환자의 두께에 따른 주파수 특성과 변위에 대하여 모델링 하였다. 이를 근거로 다방향성 운동이 가능한 선형 모터를 제작하고 특성을 평가하였다.

## 2. 동작원리 및 구조

일반적으로 초음파 모터는 고정자와 회전자로 구성된다. 탄성물질과 압전체로 구성된 고정자는 다양한 형태의 복합적인 구조물이다. 고정자는 적어도 2개 이상의 역학적인 진동이 단일 주파수나 직교하는 복합된 주파수에 의해 여기 되어 고정자 표면에 대하여 압력을 가하고 있는 회전자와의 상호마찰에 의해 회전운동이나 직선운동으로 나타난다. 그림 1은 람다형상 초음파변환자의 동작 원리를 나타낸 것이다.

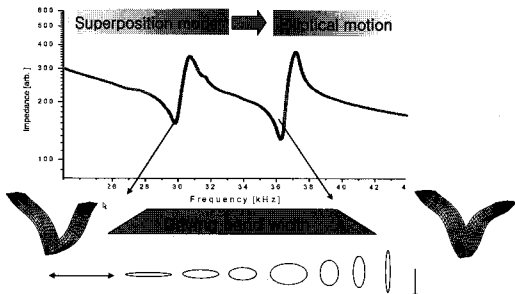


그림 1. 초음파변환자의 구동 원리.  
Fig. 1. Driving principle of ultrasonic transducer.

람다형상 탄성체는 압전체에 의해서 팽창과 수축을 반복하게 되며, 대칭모드와 반대칭 모드의 진동이 증첩되어 탄성체의 모서리에 타원형 궤적으로 확대되어 나타난다. 입력되는 전압의 크기와 인가 주파수 및 위상의 차이에 따라, 타원 운동 궤적의 크기와 방향이 여러 형태로 나타나게 되며, 선형 가이드에 장착된 스테이지는 반복되는 타원운동에 기인한 마찰력을 구동력으로 하여 원하는 위치로 이동하게 된다. 그림 2는 람다형상 초음파변환자이다. 초음파 모터가 최대 토크와 최대 속도를 갖기 위해서는 초음파변환자의 크기 및 재질을 최적화 하여야 한다. 탄성체는 쉽게 구할 수 있고, 가공이 용이한 황동 재질을 사용하였다. 탄성체의 폭은 3 mm, 길이는 길이방향 진동모드와 폭방향 진동모드가 겹치지 않도록 시뮬레이션을 통하여 25 mm로 결정하였다. 길이방향 진동모드와 폭방향 진동모드가 이론적으로 재료의 두께에 대한 의존성이 크므로 탄성체의

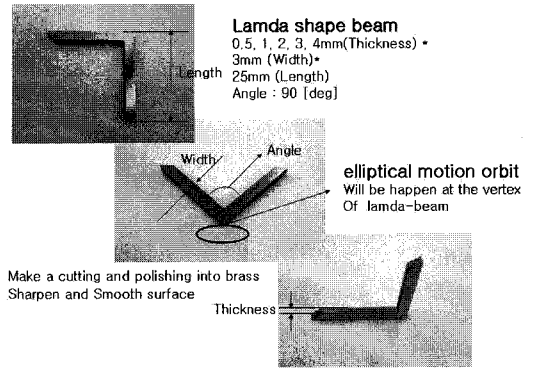


그림 2. 람다형상 초음파 변환자.  
Fig. 2. Lambda shape stator for ultrasonic motor.

두께를 0.5, 1, 2, 3, 4 mm 로 변화시켜 두께에 따른 진동모드의 변화를 관찰할 수 있도록 하였다.

상기 방법으로 설계된 탄성체는 0.5 mm 두께의 압전세라믹을 람다형상의 아랫면과 윗면에 분극방향이 서로 180°가 되도록 접착된 구조를 가진다. 이러한 고정자용 변환자에 부착된 4개의 압전세라믹 각각에 전압을 인가하는 방법을 변화시킴으로써 다방향의 타원 운동을 얻을 수 있다. 그림 3의 (a)에 나타낸 것과 같이 인가전압  $V_1$ ,  $V_2$ 의 위상차가 90°가 되도록 동작 전압을 인가하면 위상차에 의해 압전세라믹이 신장과 수축에 위상차가 발생하게 된다. 이 위상차는 람다형의 양 팔에 반대칭 변위를 만들어서 전체적으로 그림의 화살표 방향 움직임이 발생한다. 마찬가지로 그림 3(b)와 같이 전압을 인가한 경우는 상, 하면 압전세라믹의 신장과 수축에 위상차가 발생하여, 그림의 화살표와 같은 움직임을 만들어 내게 된다. 또한 상하 면과 양팔에 대칭적인 변위가 생기면 그림 3(a), (b)의 화살표 방향에 대하여 바닥 면으로부터 수직인 방향으로 운동이 발생하게 된다.

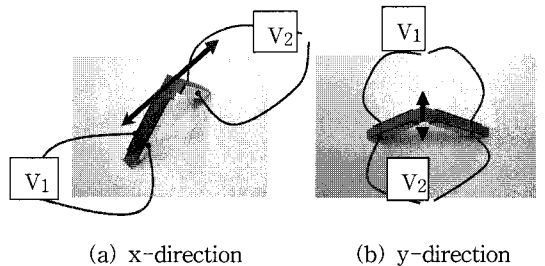


그림 3. 모터 동작을 위한 전압 인가 방법.  
Fig. 3. Driving method of ultrasonic transducer.

각각의 진동모드와 결합하게 되면 서로 수직인 방향의 두 타원 운동을 만들어 내고, 램다 모양이 정점 끝단에 회전자 구조를 두게 되면 최소 두 방향의 운동을 얻어낼 수 있다.

이러한 구조의 고정자용 변환자는 전극인가 방법과 모터 동작을 위한 적절한 진동모드를 설계하기에 아주 용이한 구조를 가지고 있고, 작은 크기로 설계가 가능하므로 적절한 구조 변환으로 응용 분야에 맞는 맞춤형 설계, 제작이 가능한 이점을 가지고 있다.

### 3. 진동 모드 해석

고정자용 변환자의 구조가 램다형으로 구조인자에 따른 여러 진동모드가 복잡하게 나타나므로 유한요소해석용 상용 프로그램(ANSYS)으로 진동모드 해석을 수행했다. 해석수행을 위한 경계 조건은 실제 동작 시와 동일한 조건인 램다 구조 양끝 끝이 고정되도록 하였다.

유한요소해석을 통하여 다방향성 초음파 모터의 동작에 유용한 3가지 진동모드를 확인하고, 그림 4에 나타내었다.

그림 4의 (a)에는 대칭모드를 나타내었다. 첫 번째 종방향(longitudinal) 진동모드로서 램다 모양 양 팔에 해당하는 각각의 진동자가 같은 동일 진동변위 위상을 갖는다. 두 진동자가 정점에서 연결되어 있어 서로의 진동 간섭으로 양 진동자에 굽힘 진동이 관찰되었고, 진동모드의 형상을 보면 두 번째 굽힘 모드임을 알 수 있다. 향후 이 모드의 이름을  $S_{12}$ 로 부르기로 한다.

두 개의 반 대칭 모드를 그림 4의 (b), (c)에 나타내었다. 이들 진동모드도 첫 번째 종진동 모드를 갖고 있으며, 그림 4(b)의 경우는 두 진동자의 진동변위의 위상이 정반대로 되어 있음을 알 수 있고, 두 번째 굽힘 모드로 동작하고 있다. 이 모드를 향후  $A_{12}$ 로 부르기로 한다. 한편 그림 4(c)의 경우는 상, 하 방향의 진동변위가 반대 위상을 갖고 있으며, 두 모드의 진동변위가 정점 부위에서 증폭되어 상, 하 방향의 운동을 만들어 낼 수 확인 할 수 있다. 이때 상, 하 방향의 굽힘 모드가 첫 번째 모드이므로 향후  $A_{11}$  이라 부르기로 한다.

$S_{12}$  모드와  $A_{12}$  모드의 공진주파수는 각 진동자의 길이에 따라 변하게 되며, 유한요소 해석결과 25 mm에서 31 kHz와 103 kHz 근방의 공진주파수를 가짐을 확인할 수 있었다.

$A_{11}$  모드의 공진주파수를 두 모드의 근처로 이동시키기 위하여 진동자의 두께에 따른 공진주파수의

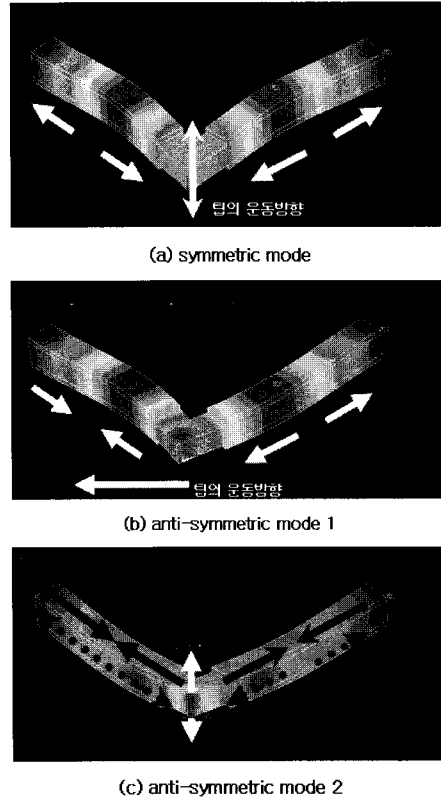


그림 4. 고정자용 변환자의 진동 모드.  
Fig. 4. Vibration modes of stator transducer.

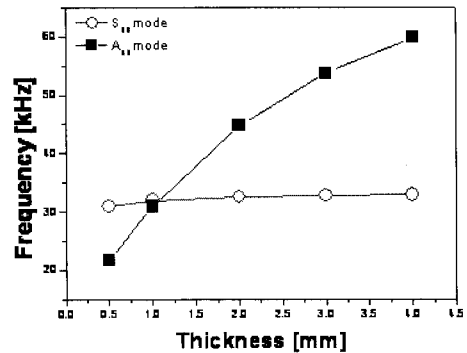


그림 5.  $S_{11}$ ,  $A_{11}$  모드의 두께에 따른 공진주파수 변화.

Fig. 5. Resonance frequencies of the vibration mode against thickness of the stator.

변화를 그림 5에 유한요소해석을 거쳐 나타내었다. 그림 5에 나타낸 바와 같이  $A_{11}$ 과  $S_{11}$  모드의 공진주파수가 31 kHz 근방에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

길이 25 mm 두께 1 mm의 람다 모양 고정자용 변환자의 각 진동모드 공진주파수는  $S_{11}$  모드가 31.9 kHz,  $A_{12}$  모드가 31.8 kHz, 그리고  $A_{11}$  모드가 30.9 kHz로 나타났다.

#### 4. 실험

##### 4.1 고정자용 변환자 제조

고정자용 변환자에 20 kHz 이상의 초음파 진동을 여기하기 위하여 에너지 밀도가 높은 압전소자가 이용된다. 본 연구에서는 초음파를 발생시키기 위한 압전세라믹 재료로는 고 전력에서 온도상승으로 인한 손실을 최소화 하면서 압전 특성이 우수하고, 저온에서의 소결이 비교적 용이한 소재인 PMS-PZT계의 압전세라믹을 사용하였다[9]. 제조된 압전세라믹의 특성 값을 표 1에 나타내었다.

표 1. 압전세라믹의 특성 값.

Table 1. Specification of piezoelectric element.

Property	Value	Unit
Mechanical quality factor, $Q_m$	1600	
Electromechanical coefficient, $K_p$	59	%
Piezoelectric constant, $d_{33}$	2.90	$10^{-10}$ m/V
Density, $\rho$	7760	kg/m <sup>2</sup>

황동 재질의 탄성체를 두께별로 가공하고 압전세라믹을 그림 2의 구조와 동일하게 전도성 에폭시로 부착하여 최종 시 제작 하였다. 그림 3에는 시 제작 고정자용 변환자를 나타내었다. 각각의 전극은 전압을 인가하기 위하여 솔더 페이스트를 사용하여 전선이 인출 되었으며, 인출된 각각의 전선은 전자 스위치에 연결하여 구동 방향에 따라 쉽게 연결할 수 있도록 했다.

##### 4.2 고정자용 변환자 특성평가

컴퓨터모사를 통해 구한 주파수 특성 결과와 실제 제작된 초음파변환자의 특성을 비교하기 위하여 주파수 응답 분석기(FRA 5096)로 주파수에 따른 임피던스 변화를 측정하였다. 제작된 고정자용 변환자의 주파수에 따른 변위와 타원 궤적을 측정하기 위해서 도플러방식의 레이저 변위 측정기(SUNWAVE OPTICS)가 그림 6에서 나타낸 것과 같이 설치되었다. 신호발생기(WF1946)에서 발생된 공진주파수와 동일한 주파수를 갖고 위상차가 90°

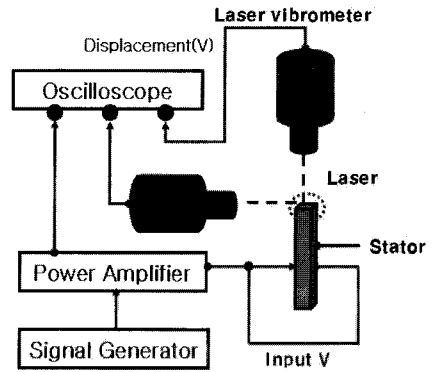


그림 6. 레이저 변위 특성 측정 장치도.

Fig. 6. Experimental setup for vibration displacement.

인 두 신호를 두 대의 신호증폭기(HSA 4052)로 증폭하여 고정자용 변환자의 전극에 입력하였다. 입력된 전압에 비례하는 각 진동모드의 진동변위를 두 대의 레이저 변위계로 측정하였으며 오실로스코프를 이용하여 각 측정 결과를 채널별로 저장하였다. 타원 궤도의 운동을 확인하기 위하여 전압 100 V<sub>PP</sub>로 인가한 후 람다 모양의 정점에 발생하는 진동변위를 직교하는 두 방향에 대하여 측정하고, 미세하게 주파수를 변화시키면서 타원 궤적의 변화를 관찰 하였다.

#### 5. 결과 및 검토

유한요소 해석결과의 유용성을 확인하기 위하여 길이가 25 mm 이고, 두께를 0.5, 1, 2, 3, 4 mm인 각각의 고정자용 변환자의 공진주파수를 측정된 결과 0.5, 1 mm 두께의 시편에서 32 kHz 근방의 공진을 확인할 수 있었다. 두께가 두꺼워짐에 따라 공진주파수가 그림 5의 해석결과와 같이 고주파수대로 이동함을 관찰하였다. 그러나 0.5 mm 고정자용 변환자의 경우 두께가 너무 얇아 실제 구동 시 마찰력에 의해 휘어지는 등 손상이 되어 적절하지 못함을 확인할 수 있었다. 향후 모든 결과는 두께 1 mm의 고정자용 변환자에 대한 것이다.

두께가 1 mm이고, 길이가 25 mm이며, 끼임각이 90도인 람다형 고정자용 변환자의 주파수에 따른 임피던스를 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 유한요소해석결과와 거의 일치하는 약 32 kHz 근방에 여러 진동모드가 겹쳐져 있음을 확인할 수 있다.

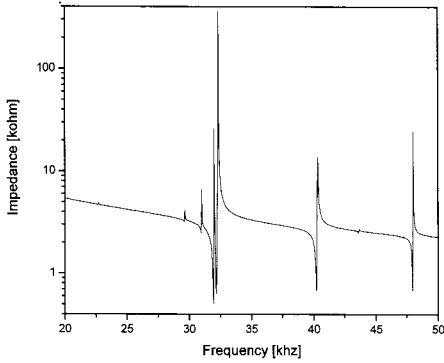


그림 7. 고정자용 변환자의 주파수 따른 임피던스 특성곡선.

Fig. 7. Impedance characteristic curve of the stator transducer against driving frequency.

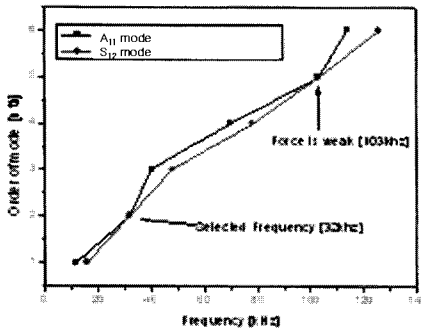


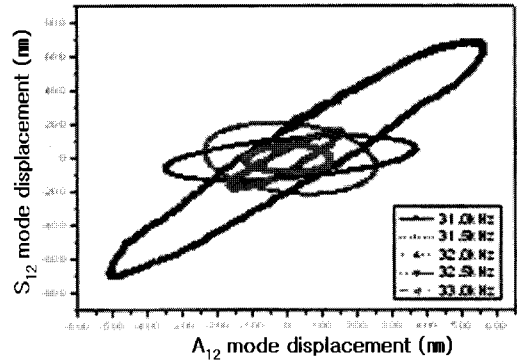
그림 8.  $S_{12}$ 와  $A_{12}$  모드의 공진주파수 변화.

Fig. 8. Resonance frequencies of  $S_{11}$  and  $A_{12}$ .

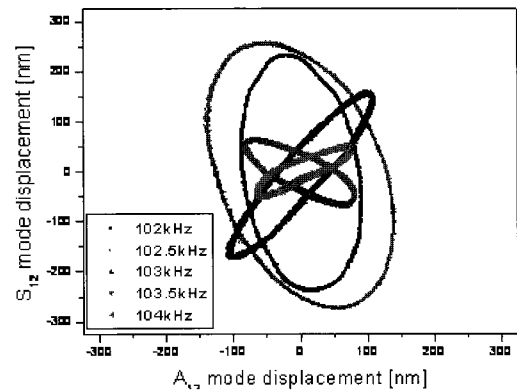
$S_{12}$  모드와  $A_{12}$  모드 각각에 대하여 공진주파수를 측정하여 그림 8에 나타내었다. 32 kHz 부근과 103 kHz 부근에서 두 모드의 공진주파수가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

두 모드가 중첩되는 주파수에 대하여 타원 궤적을 그림 6의 장치로 측정하여 그림 9의 (a)와 (b)에 나타내었다.

구동주파수를 31 kHz ~ 33 kHz 까지 0.5 kHz 구간으로 변화시키고, 구동전압 100 V<sub>pp</sub>를 인가한 상태에서 수평방향의 변위 폭이 1.1 μm, 수직방향의 변위 폭이 1.5 μm로 나타났다. 수직 방향의 변위 폭이 크면 수직항력이 증가하여 마찰력이 증가하므로 토크가 큰 모터를 제조할 수 있고, 수평방향의 변위 폭이 크면 빠른 속도의 모터를 제조할 수 있다.



(a)



(b)

그림 9.  $S_{12}$ ,  $A_{12}$  모드에 의한 타원 궤적.

(a) 32 kHz 부근, (b) 103 kHz 부근 구동

Fig. 9. Elliptic trajectories generated by coupling of  $S_{12}$  and  $A_{12}$ . (a) driving frequency of near 32 kHz, (b) near 103 kHz.

또한 그림 8에서 보는바와 같이 103 kHz 부근의 주파수 대역에서도 모드가 일치하는 결과를 보였기에 앞서 조사한 주파수 대역과 비교하기 위해서 구동주파수를 102 kHz~104 kHz 까지 0.5 kHz 구간으로 변화시키고, 구동전압 100 V<sub>pp</sub>를 인가한 상태에서 측정된 결과 수평방향의 변위 폭이 0.5 μm, 수직방향의 변위 폭이 0.3 μm로 나타나 32 kHz에서 구동했을 때보다 적은 값을 가졌다.

$S_{12}$  모드와  $A_{11}$  모드의 중첩에 의한 타원 궤도를 측정하기 위하여 구동주파수를 31 kHz~33 kHz 까지 0.5 kHz 구간으로 변화시키고, 구동전압 100 V<sub>pp</sub>를 인가하였다. 측정된 타원궤도를 그림 10에 나타내었고, 수평방향의 변위 폭은 0.4 μm, 수직방향의 변위 폭이 0.2 μm로 나타나 앞의 두 모드의 중첩에 비하여 적은 값을 나타내었다.

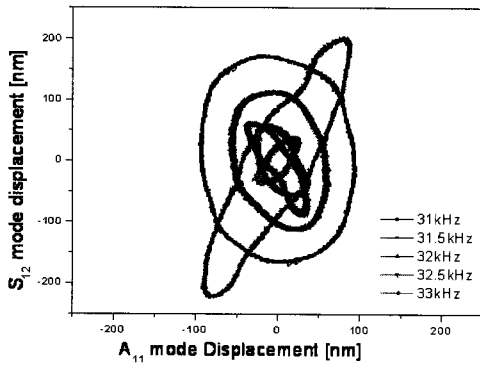


그림 10.  $S_{12}$ ,  $A_{12}$  모드에 의한 타원 궤적.  
 Fig. 10. Elliptical trajectories generated by coupling of  $S_{12}$  and  $A_{11}$ .

모든 타원궤도에 대하여 주파수를 미세하게 변화시켜 수평방향과 수직방향의 변위를 조절할 수 있음을 확인할 수 있었다. 응용분야에 따라 적절한 주파수를 선택하면 토크와 속도를 조절할 수 있음을 알 수 있다.

### 6. 결론

황동 재질의 탄성체를 람다형상으로 가공하고 PMS-PZT계 세라믹을 빔의 양면에 부착하여 동일 주파수대역에서 위상 변화만으로 다 방향으로 동작할 수 있는 초음파 모터용 고정자를 제작하였다. 유한요소 해석을 통하여 1개의 대칭모드( $S_{12}$ )와 2개의 반대칭 모드( $A_{11}$ ,  $A_{12}$ )를 확인할 수 있었다.  $S_{11}$ 과  $A_{12}$  모드가 중첩하여 람다 형상의 정점의 방향과 같은 평면의 수직방향으로 운동을 만들어낸다. 이 운동방향은 32 kHz와 103 kHz의 주파수에서 타원 궤도를 형성함을 알 수 있었고, 100 Vpp의 전압에 대하여 그 수직변위는 각각 1.5  $\mu\text{m}$ , 0.5  $\mu\text{m}$ , 수평변위는 각각 1.1  $\mu\text{m}$ , 0.3  $\mu\text{m}$ 이었다. 한편  $S_{11}$ 과  $A_{11}$  모드는 서로 중첩하여 람다 형상의 정점의 방향과 수직한 평면의 수직방향으로 운동을 만들어낸다. 이 중첩모드는 32 kHz에서 타원궤도를 형성하였고, 인가전압 100 Vpp에 대하여 수직변위는 0.4  $\mu\text{m}$ , 수평변위는 0.2  $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

구동 전압의 위상을 변화시킴으로써 다 방향 운

동을 얻을 수 있음을 알 수 있었으며, 공진주파수 근처에서 미세한 주파수 변화로 토크와 속도를 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

이러한 다방향성 람다 모양의 고정자용 변환자는 소형화가 가능하고, 응용분야에 적합하도록 조정이 용이하므로, 향후 로봇공학, 광학, 정밀위치 제어 선반과 같은 자동화 분야 응용에 적합하리라 생각된다.

### 참고 문헌

- [1] 한상보, 윤신일, “초음파 모터의 원리 및 개발 현황”, 한국소음진동공학회 10주년 기념 소음진동학술대회는문집, p. 1327, 1999.
- [2] 김영덕, 김동수, 김광일, “초음파 모터 현황”, RIST 연구논문, 21권, 2호, 2007.
- [3] K. Uchino “Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motor”, Kluwer Academic Publishers, Third Printing, 2000.
- [4] T. Sashida and T. Kenjo, “An Introduction to Ultrasonic Motors” Oxford, Clarendon Press, 1993.
- [5] S. Ueha and Y. Tomikawa “Ultrasonic Motors Theory and Applications”, Oxford, Clarendon Press, 1993.
- [6] S. He, W. Chen, X. Tao, and Z. Chen, “Standing wave bi-directional linearly moving ultrasonic motor”, Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on Vol. 45, Iss. 5, p. 1133, 1998.
- [7] 이종섭, 정수현, 임기조, 임태빈, 강성택, 채홍인, “L1-B4 진동모드를 이용한 평판형 선형 초음파 모터의 설계 및 시 제작”, 전기전자재료 학회논문지, 11권, 10호, p. 861, 1998.
- [8] 박태근, 김명호, “압전세라믹 리니어 모터의 동작원리와 응용”, 전기전자재료학회지, 14권, 4호, p. 8, 2001.
- [9] S. Takahashi, Y. Sasaki, S. Hirose, and K. Uchino, “Stability of  $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3$  piezoelectric ceramics under vibration-level change”, J. J. A. P., Vol. 34, Iss. 9B, p. 5328, 1995.