

압전 비틀림 파동 변환기 제작 및 평가

Fabrication and Evaluation of Piezoelectric Torsional Transducers

권오수*, 김진오**

Oh Soo Kwon* and Jin Oh Kim**

초 록 봉에서 전파하는 비틀림파를 발생시키는 압전 비틀림 파동 변환기를 제작하였다. 비틀림 파동을 발생시키는 원리는 원주방향으로 분극된 압전 원판에 인가된 두께 방향 전압에 의해 나타나는 원주방향 전단운동이다. 압전 비틀림 원판을 제작한 후, 공진 주파수를 낮추기 위하여 랑주방(Langevin)형 비틀림 변환기를 제작하였다. 제작된 변환기들의 공진 주파수를 측정 한 결과, 해석에 의해 예상된 특성과 잘 일치하였다.

주요용어: 압전, 비틀림 변환기, 공진 주파수

Abstract: Piezoelectric torsional transducers have been fabricated to generate torsional waves in a rod. The principle of generating torsional wave is based on the use of the circumferential shear motion derived by axial voltage exerted on the piezoelectric disk poled in the circumferential direction. The natural frequency of the piezoelectric torsional disk has been reduced by fabricating Langevin-type torsional transducers. The natural frequencies of the fabricated transducers have been measured and have shown good agreement with the characteristics predicted by analysis.

Keywords: piezoelectricity, torsional transducer, natural frequency

1. 서 론

봉을 대상으로 유도파(guided wave)에 의해 비파괴검사를 하는 방법에는 종파, 굽힘파, 비틀림파 등이 사용될 수 있다[1]. 도파관(waveguide)에서 전파하는 탄성파에는 대개 분산(dispersion)현상이 있기 때문에, 펄스 신호를 사용한 검사를 할 경우에 신호 모양이 흐트러지고 그룹 전파속도(group velocity)를 고려해야 하는 등 애로가 있다. 단면이 원형인 막대를 따라 전파하는 유도파 중에서 기본모드의 비틀림파 만은 분산되지 않는다. 따라서 비틀림파를 사용하는 장점이 있다. 이런 비틀림파가 전파하는 도파관을 유체에 담그는 센서로 삼아 유체의 점도

를 측정하는 데에 사용된 사례가 있다[2,3].

비틀림파를 사용하기 위해서는 비틀림 파동 변환기(transducer)가 필요한데, 상용화 되어 있는 것이 없다. 그래서 본 논문에서는 압전소자를 이용하여 비틀림 파동 변환기를 제작한 내용을 보고한다. 압전 변환기는 전기신호를 받아 진동을 발생시키는 역압전 현상과 감지된 진동을 전기신호로 바꿔주는 정압전 현상을 모두 활용한다[4,5]. 볼트 체결 랑주방형 변환기(bolt-clamped Langevin-type transducer)는 압전 원판의 양쪽에 탄성블록을 결합하여, 원하는 주파수의 진동을 효율적으로 발생시키는 변환기이다[6]. 이는 여러분야에서 센서와 액추에이터로 사용되고 있는데, 대부분 두께방향의 종 진동을 이용한다. 한편 자왜

(magnetostriction)현상을 이용한 변환기를 제작하여 비틀림파를 발생시킨 사례는 있다[2].

반면에 본 논문은 압전소자를 사용하여 비틀림 진동을 발생시키는 변환기를 대상으로 한다. 압전 비틀림 변환기는 종 진동 변환기에 비해 훨씬 복잡할 수 밖에 없다. 제작에 관한 아이디어가 이미 제시된 것도 있고[7,8], 실제로 제작된 사례도 보고되어 있다[9]. 그러나 이들은 압전소자를 여러조각으로 만들어 결합하거나[8], 전극을 분할하여 조합해야 하는 등[7] 실용적이지 못하다. 본 논문에서 제시하는 제작 방법은 압전소자를 하나의 원판으로 유지하고 전극을 분할할 필요도 없어 실용적이다. 본 연구에서 비틀림 변환기를 제작한 목적은 초음파 점도계 개발[10]에 활용하려는 것이다. 본 논문에서는 우선 압전 현상을 비틀림 변환기 제작에 적용하는 원리를 다룬다. 그 다음에 압전 비틀림 원판과 랑주방(Langevin)형 비틀림 변환기를 제작하는 과정을 설명한다. 그리고 제작된 변환기의 공진특성을 평가한다.

2. 원 리

압전 효과와 그 응용에 대해서는 많은 문헌에서 보고되고 있는데, 대부분 종 진동에 대해서 설명한다[4,5,11]. Fig. 1(a)는 압전 현상을 이용하여 종 진동을 발생하는 변환기의 원리를 보여준다.

반면에 비틀림 파동 변환기는 전단(shear) 운동을 이용하는 것으로서, 비틀림 진동을 발생하는 변환기의 원리는 Fig. 1(b)에 개략적으로 나타내었다. 비틀림 진동을 발생시킬 목적으로 분극 처리된 압전 세라믹은 그림에서 보

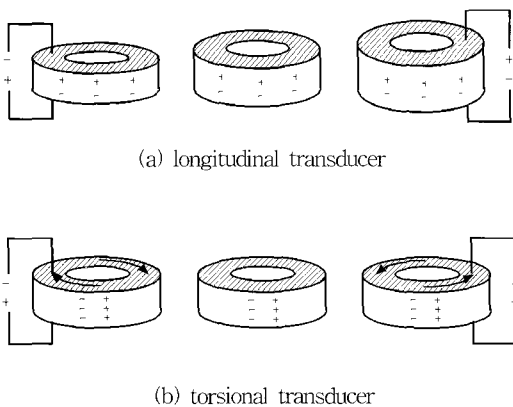


Fig. 1 Illustration of inverse piezoelectric effect in a longitudinal and torsional transducer

인 바와 같이 결정들이 원주방향으로 배열된다. 분극방향에 수직하게 전압을 인가하면 압전 세라믹 내부에 전단 응력이 발생하고, 가해진 전압의 극성에 따라서 시계방향 또는 시계 반대 방향으로의 변형이 반복된다.

압전 현상을 이용하여 비틀림 진동을 발생시키기 위해서는 압전 변환기 전 제작이 분극 되는게 좋으나 이는 현실적으로 불가능하다. 효율적으로 비틀림 진동을 발생시키기 위한 여러 시도가 행해졌는데[7,8], 본 연구에서는 제작이 비교적 간편하면서 변환기 성능이 좋은 방법을 이용하였다. 실제로 제작되는 비틀림 변환기의 평면도를 개략적으로 나타내면 Fig. 2와 같다. 회색 부분은 분극되지 않은 영역으로서 분극 시 사용되는 은 전극이고, 화살표가 있는 부분이 분극된 영역이다. 이러한 원리로 비틀림 진동을 발생시키는 압전 변환기를 다음 절에 설명하는 방법으로 제작하였다.

압전 변환기의 작동은 공진 주파수에서 가장 효율적으로 이루어진다. 압전 변환기의 공진 주파수는 압전 원판의 두께에 밀접하게 관련되어 있다[12,13]. 즉 두께가 얇을수록 공진 주파수가 높다. 그런데 원하는 진동수가 그리 높지 않을 경우에는 원판 두께를 크게 해야 하지만, 두께를 크게 하면 압전 효과가 대폭 감소하므로 부작용이 커진다. 따라서 압전 원판의 두께를 얇은 상태로 유지하면서 공진 주파수를 원하는 값으로 낮추기 위하여 압전 원판에 탄성 블록을 결합시키는 랑주방(Langevin)형 압전 변환기[14]를 제작한다.

3. 제 작

앞 절에서 설명된 바와 같이, 비틀림 운동을 발생시키기 위한 변환기 원판에서는 분극방향이 원주방향으로 형성되고, 구동용 전압은 분극방향에 평행한 윗면과 아래

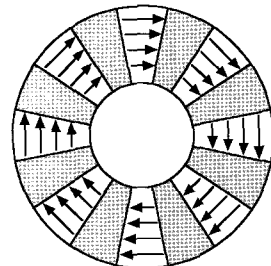


Fig. 2 Silver electrodes (gray areas) and poled ceramics (arrows)

면에 인가되어야 한다. 이와 같은 원리에 입각하여 Fig. 3에 도시한 과정을 통하여 압전 비틀림 원판을 제작하였다. 압전성을 갖는 소재 분말로 세라믹 원판을 만들고 Fig. 3(a)와 같이 표면에 여덟 구간으로 나누어 분극용은 전극을 칠한다. 전극이 정착되도록 오븐에서 구운 후, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)에 보인 바와 같이 여덟 구간에 차례로 전압을 인가하여 분극을 한다. 그 다음에 Fig. 3(d)와 같이 모든 전극을 제거하고, Fig. 3(e)와 같이 윗면과 아래 면에 구동용 전극을 칠하고 오븐에서 구워 압

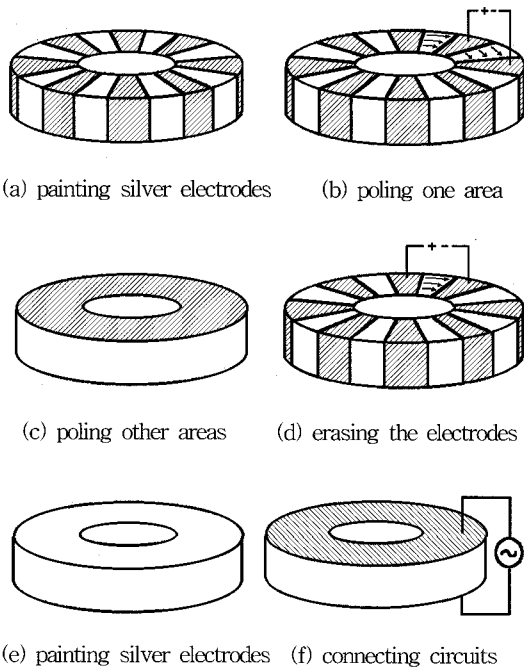


Fig. 3 Fabrication process of a piezoelectric torsional disk

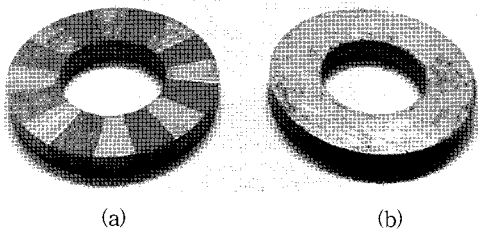


Fig. 4 Photographs of the piezoelectric torsional disks in the fabrication process;
(a) covered with sector electrodes before poling,
(b) covered with whole electrodes after poling

전 비틀림 원판을 완성한다. 그런 후에 Fig. 3(d)에 보인 바와 같이 구동 전압을 인가하면 비틀림 진동을 발생시키는 변환기로서 작동한다.

압전 원판 제작에 사용된 소자는 미국 EDO사의 PZT (EC-65)이다. 원판의 두께는 4 mm로 제작하였다. Fig. 4는 제작 과정의 일부 장면을 보여주는 사진이다. Fig. 4(a)는 분극을 위한 은 전극이 여덟 구간으로 나누어 칠해진 모습이다. Fig. 4(b)는 분극 후에 구간 별 은 전극을 제거하고 구동용 전극을 먼 전체에 칠한 모습이다. 본 연구에서는 분극용 은 전극을 여덟 구간으로 나누어 칠했는데, 구간 숫자는 제작자에 따라 여섯 또는 열 구간으로 선정해도 된다.

위와 같은 과정으로 제작된 압전 원판 두 개와 알루미늄 (2014-T6) 블록 두개를 Fig. 5에 개략적으로 보인 바와 같이 결합하여 랑주방(Langevin)형 변환기를 제작하였다. 그렇게 함으로써 공진 주파수를 원하는 값으로 낮춘다. 탄성 블록의 크기에 따라 랑주방형 변환기의 공진 주파수가 달라지므로, 해석을 통하여 탄성 블록의 크기를 선정한다[14]. 압전 원판과 탄성 블록은 스텐레스 강 볼트를 이용하여 내부에서 체결하였다.

Fig. 6은 실제 제작된 랑주방형 변환기를 보여주는 사진인데, Fig. 6(a)는 대칭구조로 제작한 변환기이고 Fig. 6(b)는 양쪽의 탄성블록의 크기를 다르게 하여 비대칭구조로 제작한 변환기이다. 대칭구조 변환기의 탄성 블록의 두께는 30 mm이고, 비대칭구조 변환기의 탄성 블록의 두

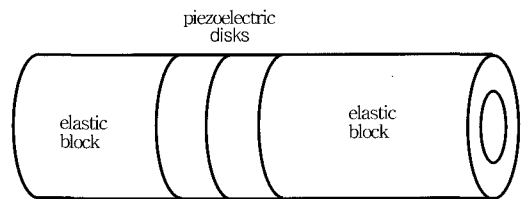
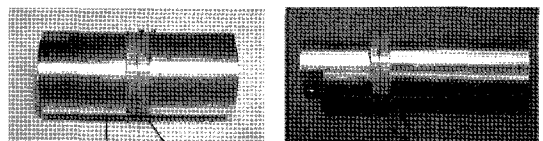


Fig. 5 Schematic diagram of a Langevin-type torsional transducer



(a) symmetric transducer (b) asymmetric transducer

Fig. 6 Photographs of Langevin-type torsional transducers

께는 각각 60 mm와 30 mm이다. 압전 원판과 탄성 블록 사이에는 구동 전압을 인가하기 위한 구리판 전극을 삽입하였다.

4. 평 가

앞 절에서 설명한 방법으로 제작한 비틀림 진동 변환기의 공진 특성을 평가하였다. 압전 고유진동수를 측정하는 방법으로 Impedance Gain/Phase Analyzer (HP 4194A)를 사용하였다. 이는 압전체의 임피던스를 주파수 별로 측정하는 방법으로서, 공진시에 임피던스가 최소인 점을 이용하는 것이다.

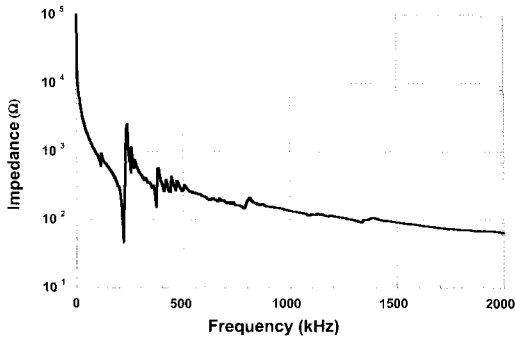


Fig. 7 Impedance curve of a piezoelectric torsional disk (thickness 4 mm), measured as a function of the frequency

Table 1 Piezoelectric natural frequencies of a piezoelectric torsional disk

mode	natural frequency(kHz)		difference(%)
	calculated	measured	
1	221	225	-1.8
2	854	805	6.1
3	1445	1380	4.7
4	2030	1940	4.6

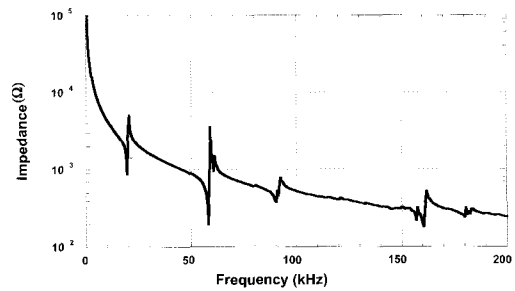
Table 2 Piezoelectric natural frequencies of a symmetric Langevin-type torsional transducer

mode	natural frequency(kHz)		difference(%)
	calculated	measured	
1	22.4	19.8	13
2	65.7	58.2	13
3	107	90.7	18
4	148	161	-8

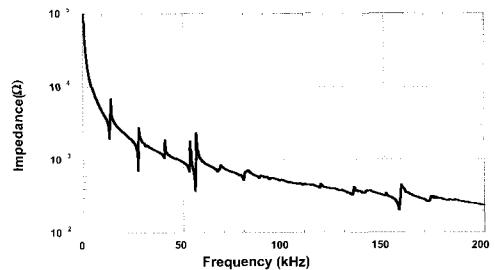
우선 압전 원판에 대해 임피던스를 주파수의 함수로 측정된 결과가 Fig. 7에 보여져 있다. 이 그래프에서 임피던스가 극소값을 갖는 위치의 주파수들을 작은 값부터 읽어 Table 1에 기재하였다. Table 1에는 앞선 연구[13]에서 해석을 통해 계산하여 예측한 공진 주파수도 기재되어 있는데, 측정된 값들이 계산 값과 잘 일치하고 있다. 단, Fig. 7의 측정결과 중 370 kHz 부근의 공진은 해석결과와 연관시키지 못하였는데, 이에 대해서는 차후에 좀더 면밀한 조사가 필요하겠다.

Table 3 Piezoelectric natural frequencies of an asymmetric Langevin-type torsional transducer

mode	natural frequency(kHz)		difference(%)
	calculated	measured	
1	15.4	13.7	12
2	30.3	27.7	9
3	44.1	40.9	8
4	61.8	56.0	10



(a) symmetric transducer



(b) asymmetric transducer

Fig. 8 Impedance curves of Langevin-type torsional transducers, measured as a function of the frequency

량주방향 변환기에 대해 임피던스를 측정된 결과는 Fig. 8에 보여져 있다. 여기서 (a)는 대칭구조 변환기에 대한 결과로서, 이 그래프의 극소값 위치로 측정된 공진 주파수를 Table 2에 기재하였다. 그리고 (b)는 비대칭구조 변환기에 대한 결과로서, 이 그래프의 극소값 위치로 측정된 공진 주파수를 Table 3에 기재하였다. Table 2와 Table 3에는 앞선 연구[14]에서 해석을 통해 계산하여 예측한 공진 주파수도 기재되어 있다. 계산 값은 측정 값과 10%정도 오차를 보이고 있다. 이러한 차이는 실물 변환기에서 해석 모델에 반영되지 않은 사항들, 가령 압전 원판과 탄성 블록을 체결하는 데에 사용된 볼트, 조이기 위해 탄성 블록 바깥 곡면 일부를 평탄하게 깎은 형상 등으로 인한 오차로 보인다. 이와 같은 모델의 차이로 인한 오차를 감안하면, 10~15 % 오차범위에서 잘 일치하는 비교 결과이다.

본 연구에서는 전기적인 방식의 실험에 의하여 압전 고유진동수를 측정하였다. 그러나 비틀림 진동 모드를 측정할 실험장치를 갖추지 못해서 역학적 운동을 측정하지는 못하였다.

5. 결 론

압전소자를 이용하여 원주방향으로 분극된 압전 비틀림 원판을 제작하였다. 공진 주파수를 낮추기 위하여 압전 원판에 탄성 블록을 결합시킨 량주방(Langevin)형 비틀림 변환기를 제작하였다. 제작된 변환기들의 특성을 평가하기 위해서, 주파수별 임피던스를 측정하여 공진 주파수를 파악하였다. 비틀림 원판과 량주방향 비틀림 변환기에 대하여 측정된 공진 주파수를 해석에 의해 예측된 공진 주파수와 비교한 결과 서로 잘 일치하였다.

후 기

본 논문은 ISTEK(주) (구, (주)신창)이 주관한 산업기반기술개발사업의 위탁기술개발 과제를 수행하며 얻은 연구 결과임.

참고문헌

- [1] J. D. Achenbach, *Wave Propagation in Elastic Solids*, Ch. 6, North-Holland, Amsterdam (1975)
- [2] J. O. Kim, Y. Wang, H. H. Bau, "The effect of an adjacent viscous fluid on the transmission of torsional stress waves in a submerged waveguide", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 89, No. 3, pp. 1414-1422 (1991)
- [3] 김진오, "초음파 접도계용 고체 매질의 탄성파와 인접 점성유체 간의 상호작용", *한국음향학회지*, 제18권, 제5호, pp. 28-34 (1999)
- [4] T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford University Press, Oxford (1996)
- [5] K. Uchino, *Piezoelectric Actuators and Ultrasonic Motors*, Kluwer Academic Publishers, Boston (1997)
- [6] T. Sashida, T. Kenjo, *An Introduction to Ultrasonic Motors*, Oxford University Press, Oxford (1993)
- [7] S. Mishiro, "Torsional Vibration Apparatus," United States Patent 4,652,786 (1987)
- [8] S. Mishiro, "Torsion Vibrator," United States Patent 4,787,265 (1988)
- [9] 根本佐久良雄, 森榮司, "ホルト締め電気ひずみねじり振動子," *日本音響學會誌*, 28卷 3号, pp. 117~126 (1972)
- [10] 전한용, 김진오, "원형 봉의 비틀림 진동과 인접 점성유체의 상호작용", *대한기계학회논문집(A)*, 심사중 (2001)
- [11] 岡崎清, *セラミック誘電体工学*, 第3版, 第8章, 學獻社 (1983)
- [12] D. K. Miu, *Mechatronics : Electromechanics and Contromechanics*, Ch. 6, Springer-Verlag, New York (1993)
- [13] 권오수, 김진오, "압전 비틀림 변환기의 진동특성 해석", *한국소음진동학회지*, 제10권 제6호, pp. 955-962 (2000)
- [14] 권오수, 김진오, "량주방향 압전 비틀림 변환기의 진동특성", *대한기계학회논문집(A)*, 제25권, 제8호, pp. 1197-1205 (2001)