Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 24(10) : 780~787, 2014
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2014.24.10.780

한국소음진동공학회논문집 제 24 권 제 10 호, pp. 780~787, 2014
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

링형 압전 변환기의 면내 진동 특성

In-plane Vibration Characteristics of Piezoelectric Ring Transducers

박 춘 광*·김 진 오†

Chunguang Piao and Jin Oh Kim

(Received August 4, 2014 ; Revised September 30, 2014 ; Accepted October 6, 2014)

Key Words : Piezoelectric Transducer(압전 변환기), In-plane Vibration(면내 진동), Impedance Curve(임피던스 곡선), Resonance(공진), Mode Shape(모드형상)

ABSTRACT

This paper experimentally deals with the vibration characteristics of flat ring transducers used for ultrasonic sensors and actuators. Radial vibration mode, which is the fundamental mode of a thin piezoelectric transducer, was measured by a laser in-plane vibrometer. An impedance analyzer was used to measure natural frequencies. The results measured by experiments verified theoretical predictions. The vibration characteristics of ring transducers were identified according to the outer diameter size. The shape of the fundamental mode is almost uniform but slightly decreases from the inner to the outer circumferential surfaces. The natural frequency of the fundamental mode decreases as the outer diameter increases. It appears that the ring type transducer is suitable to excite uniformly distributed vibration on a flat surface.

1. 서 론

초음파 센서 또는 액추에이터에서 역학적 진동과 전기적 신호 간의 상호 변환에 압전 변환기(transducer)가 많이 사용된다[1]. 변환기의 압전소자는 대개 원판형이다. 압전소자를 적층할 필요가 있을 때, 중심을 관통하는 볼트로 체결하므로 중앙이 비어 있는 링형 압전 원판을 사용한다[2]. 압전 변환기를 설계하기 위해서는 압전소자의 진동 특성을 파악해야 하고, 이를 위해 이론적 예측과 실험적 검증이 필요하다.

압전 변환기의 진동 특성은 형상과 치수뿐만 아니라 물성치와 경계조건에 따라서도 다르다. 이론적인 접근은 많은 문헌에 나타난다[3]. 원판의 지름과 두께의 비율에 따른 진동 모드가 유한요소법으로 계산된 사례가 있고[4], 균일하지 않은 물성치에 따른 압전 원판의 진동 특성이 제시되었으며[5], 연성된 전기-역학 시스템에 일반화된 형태의 Hamilton 원리를 적용하여 이론적으로 구한 임피던스 곡선과 실험 결과를 비교한 연구도 있다[6]. 압전 원판의 진동 특성을 세 가지 실험 방법으로 구하여, 진동 분포 경향을 제시한 사례도 있다[7]. 속이 빈 원판, 즉 링형 압전 변환기도 여러 문헌에서 이론적으로 다루어졌다[8~10].

이 논문은 원판 링형 압전 변환기의 반경방향 면내 진동 특성을 주로 다룬다. 원판 링형 압전 변환기를 모델링하고, 반경방향 및 두께방향에서의 운동방정식과 경계조건을 설정하며, 고유진동수와 모드

† Corresponding Author ; Member, Soongsil University
E-mail : jokim@ssu.ac.kr
Tel : +82-2-820-0662, Fax : +82-2-820-0668
* Member, Soongsil University

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

형상을 구하여 진동 특성을 이론적으로 예측한다. 실험에 의해 링형 압전 원판의 반경방향 진동모드를 확인한다. 반경방향 면내 진동을 측정하기 위해서는 특별한 장비가 필요하다. 레이저 면내 진동 측정기(in-plane vibrometer)를 사용하여 압전 원판의 면내 방사 진동 모드 형상을 측정한다. 압전 변환기는 물성치 뿐만 아니라 형상 치수에 따라서도 진동 특성이 달라지므로, 초음파 변환기 설계 시 두께와 지름에 따른 진동 특성을 파악해야 한다. 면내 방사 진동을 주로 다루는 이 논문은 압전 소자의 지름에 따른 경향을 밝힌다.

2. 진동 특성 해석

해석 대상인 원판 링형 압전 변환기는 Fig. 1과 같이 두께가 l이고 안쪽 반지름과 바깥 반지름이 각각 r_i와 r_o이다. 양쪽 면에 분포된 전극에 작용하는 전압 $V_0 e^{j\omega t}$에 의해 구동된다. 축대칭 상황에서 원통좌표계 (r,θ,z)와 시간 t를 사용하여 두께방향의 면외 진동과 반경방향의 면내 진동을 해석한다.[11,12]

2.1 두께방향 진동 특성

원판 링형 압전 변환기에서 두께방향 진동변위 $w(r,z,t)$와 전기 퍼텐셜 $\phi(r,z,t)$로 표현된 두께방향 진동의 지배방정식은 다음과 같다[13].

$$\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \tag{1a}$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}=\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}^S}\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \tag{1b}$$

여기서 $c\,(=\sqrt{\widehat{c_{33}}/\rho})$는 파동 전파속도이고 $\widehat{c_{33}}$ $\left(=c_{33}+e_{33}^2/\varepsilon_{33}^S\right)$는 이방성 압전체의 수정된 탄성계수이며, ρ는 밀도이다. 또한 c_{33}, e_{33}, ε_{33}^S은 각각 전기장이 일정한 상태에서의 강성, 압전 응력상수, 변형률이 일정한 상태에서의 유전율이다.

변수 분리한 운동 변위는 다음과 같다.

$$w(r,z,t)=W(z)R(r)e^{j\omega t} \tag{2a}$$

$$\phi(r,z,t)=\Phi(z)R(r)e^{j\omega t} \tag{2b}$$

여기서 $R(r)$은 반경좌표에 따른 분포를 나타내는데,

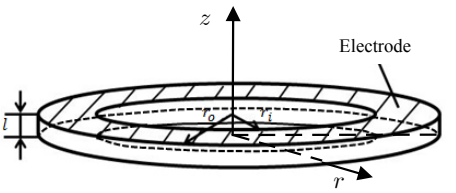


Fig. 1 Schematic diagram of a piezoelectric ring transducer

식 (1)은 균일 분포를 전제로 하여 단순화된 이론식이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial^2 W}{\partial z^2}+k^2 W=0 \tag{3a}$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}=\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}^S}\frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \tag{3b}$$

여기서 $k\,(=\sqrt{\omega/c})$는 파동수이다.

변환기의 양면이 자유로운 경우 두께방향 경계조건을 다음과 같이 설정한다.

$z=0$에서 $\quad \sigma_z(z)=0$ (4a)

$$\Phi(z)=0 \tag{4b}$$

$z=l$에서 $\quad \sigma_z(z)=0$ (4c)

$$\Phi(z)=V_0 \tag{4d}$$

경계조건 (4)를 적용하여 식 (3)의 해를 구하면 다음과 같다[12].

$$W(z)=\frac{e_{33}V_0[\cos kz-\cos k(l-z)]}{\widehat{c_{33}}kl\sin kl-2\dfrac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^S}(1-\cos kl)} \tag{5a}$$

$$\phi(z)=\frac{V_0\widehat{c_{33}}k\sin kl}{\widehat{c_{33}}kl\sin kl-2\dfrac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^S}(1-\cos kl)}+\frac{\dfrac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^S}[\cos kz(1-\cos kl)+\sin kl\sin kz]}{\widehat{c_{33}}kl\sin kl-2\dfrac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^S}(1-\cos kl)} \tag{5b}$$

식 (5)의 분모가 0인 경우가 고유진동 특성방정식이다. 링이 얇은 판일 때 두께방향 모드는 고차에서

나타난다.

2.2 반경방향 진동 특성

원판 링형 압전 변환기에서 반경방향 진동변위 $u(r,z,t)$로 표현된 반경방향 진동의 지배방정식은 다음과 같다[13].

$$\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}-\frac{u}{r^2}\right)=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{6}$$

여기서 $c\left(=\sqrt{c_{11}^P/\rho}\right)$는 파동의 전파속도이고 $c_{11}^P\left(=c_{11}-c_{13}^2/c_{33}\right)$은 이방성 압전체의 수정된 탄성계수이며, ρ는 밀도이다. 또한 c_{11}, c_{13}, c_{33}는 탄성계수이다.

변수 분리한 운동 변위는 다음과 같다.

$$u(r,z,t)=U(r)Z(z)e^{j\omega t} \tag{7}$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$r^2\frac{d^2U(r)}{dr^2}+r\frac{dU(r)}{dr}+(k^2r^2-1)U(r)=0 \tag{8}$$

변환기의 원주면이 자유로운 경우 반경방향 경계조건을 다음과 같이 설정한다.

$$r=r_i\text{에서} \qquad \sigma_r(r_i)=0 \tag{9a}$$

$$r=r_o\text{에서} \qquad \sigma_r(r_o)=0 \tag{9b}$$

반경방향 수직 응력 σ_r은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_r=c_{11}^P\frac{\partial u}{\partial r}+c_{12}^P\frac{u}{r}+e_{31}^P\frac{d\phi}{dz} \tag{10}$$

경계조건 (9)를 적용하여 해를 구하면 다음과 같다[12].

$$\begin{aligned}U(r)&=e_{31}^P\left(\frac{V_0}{l}\right)\left\{\frac{[H(r_o)-H(r_i)]J_1(kr)}{G(r_i)H(r_o)-G(r_o)H(r_i)}\right.\\&\left.-\frac{[G(r_o)-G(r_i)]Y_1(kr)}{G(r_i)H(r_o)-G(r_o)H(r_i)}\right\}\\G(r)&=c_{11}^P\left[kY_0(kr)-\frac{Y_1(kr)}{r}\right]+c_{12}^P\frac{Y_1(kr)}{r}\\H(r)&=c_{11}^P\left[kJ_0(kr)-\frac{J_1(kr)}{r}\right]+c_{12}^P\frac{J_1(kr)}{r}\end{aligned} \tag{11}$$

여기서 J는 제1종, Y는 제2종 베셀함수이다. 또한 $c_{12}^P(=c_{12}-c_{13}^2/c_{33})$와 $e_{31}^P(=e_{31}-c_{13}e_{33}/c_{33})$는 각각 이방성 압전체의 수정된 탄성계수와 압전 응력상수이다.

운동방정식의 해를 구하는 과정에서 특성방정식이 다음과 같이 얻어진다.

$$F(k)=G(r_i)H(r_o)-G(r_o)H(r_i)=0 \tag{12}$$

특성방정식에서 구해지는 파동수 k와 진동수 $f(=\omega/2\pi)$는 다음 관계가 있다.

$$f=\frac{kc}{2\pi} \tag{13}$$

링이 얇은 판일 때 기본 모드는 반경방향 모드이다.

바깥 반지름이 15 mm이고 안쪽 반지름이 7.5 mm이며 두께가 5 mm이고 재질은 PZT4인 원판 링형 압전 변환기에 대하여, 식 (12)~(13)에 의하여 고유진동수를 구하면 f=48.4 kHz이다.

식 (11)을 이용하여 진동모드를 구하여 Fig. 2에 나타냈다. 횡축인 반경방향 위치 r은 $\tilde{r}[=(r-r_i)/(r_o-r_i)]$, 종축인 진동 변위 진폭 U는 $\tilde{U}(=U/U_{\max})$로 무차원화 하였다. 그림에서 알 수 있다 시피, 반경방향의 진동 변위 진폭은 거의 균일하되 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 점차 약간 작아진다.

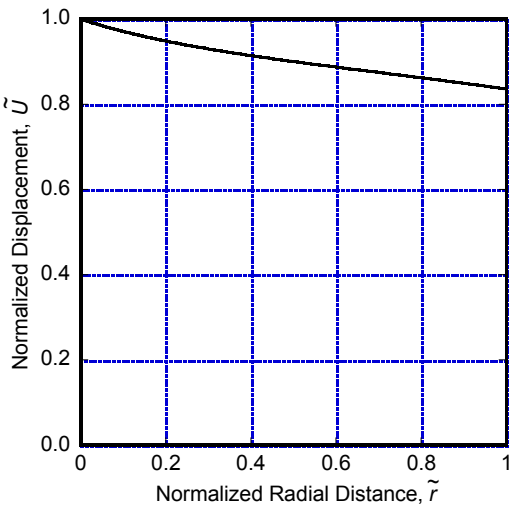


Fig. 2 Vibration displacement distribution

3. 면내 진동 실험

이론적으로 예측한 기본모드를 검증하기 위하여 면내 진동 모드 형상을 측정하는 실험을 행한다.

3.1 면내 진동 측정 방법

면내 방사 진동 측정에 Polytec사의 레이저 면내 진동 측정기를 사용하였다[14,15]. 이 장치는 센서 헤드(LSV-065- 306F)와 컨트롤러(OFV-3320) 등 두 개의 핵심 요소로 구성되어 있다. 레이저 진동 측정기는 레이저 도플러 원리에 의해 작동한다.

Fig. 3에 보인 바와 같이 센서 헤드의 다이오드에서 레이저 빔이 발생한다. 이는 두개의 작은 빔으로 나누어지고, 두 레이저 빔은 측정이 이뤄질 표면 상에 경사각 ϕ로 입사하고 겹쳐져, 밝고 어두운 줄무늬가 평행하게 구성된 간섭 패턴을 형성한다. 측정 대상 표면 상의 지점에서 반사된 레이저 빔은 탐지기에 의해 감지된다. 간섭무늬의 줄무늬 간격 $\triangle s$ 는 다음 식과 같이 레이저의 파장 λ와 레이저 빔의 입사각 ϕ에 의해 결정되는 시스템 상수이다.

$$\triangle s = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin\phi} \tag{14}$$

표면 입자가 Fig. 3에서와 같이 간섭무늬를 가로지르는 방향으로 v_p의 속도로 이동할 때, 빛의 산란에 의해 도플러 진동수가 f_D인 신호를 발생한다. 입자 운동속도 v_p는 다음 식과 같이 도플러 진동수와 줄무늬 간격 $\triangle s$에 관련된다.

$$v_p = f_D \cdot \triangle s \tag{15}$$

컨트롤러에서 도플러 진동수 f_D가 측정되고 줄무늬 간격 $\triangle s$와 곱해진 신호가 출력된다. 출력된 신호는 오실로스코프 등의 장치로 관찰되어 입자의 진동속도가 얻어진다.

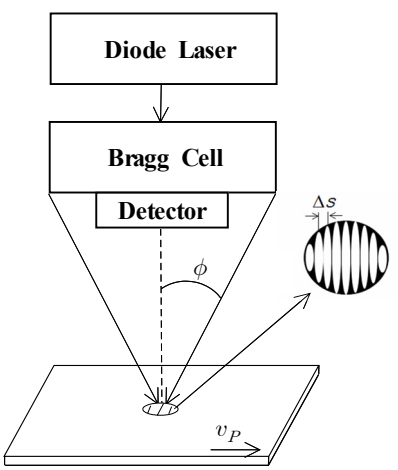


Fig. 3 Schematic diagram of the laser Doppler method

3.2 면내 진동 측정 결과

이 논문의 계산과 측정에는 Table 1에 나타낸 3가지 링형 압전 원판을 대상으로 하였다. 재질은 PZT4이고 상하 양면의 전극에 의해 두께방향으로 교류 전기장이 형성된다. 링형 원판을 스폰지 위에 얹어놓아 원주면이 자유로운 조건을 보장하였다. Fig. 4는 시편 C의 실물 사진이다. 각 시편 종류별로 4개씩에 대하여 실험하여 진동수와 진폭의 평균과 표준편차를 구하였다.

링형 압전 원판에 전압을 인가하기 위해 신호발생기(Agilent 33220A)를 이용하였다. 레이저 면내 진동 측정기의 출력 신호는 오실로스코프(Tektronix TDS3032)로 관찰하였다. 신호발생기에서 주파수를

Table 1 Three types of circular transducers

Specimen	Diameter(mm)		Thickness (mm)
	Inner	Outer	
A	15	30	5
B	15	35	5
C	15	38	5

Table 2 Fundamental frequency of piezoelectric hollow-disks

Specimen	Frequency(kHz)		Error(%)
	Calculation	Measurement	
A	48.4	47.9±0.06	1.0
B	43.0	43.3±0.16	0.7
C	42.1	41.4±0.27	1.7

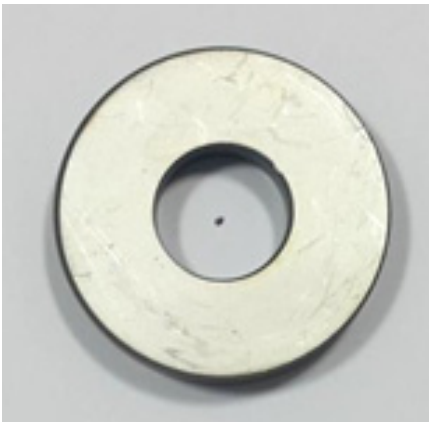


Fig. 4 Piezoelectric ring specimen

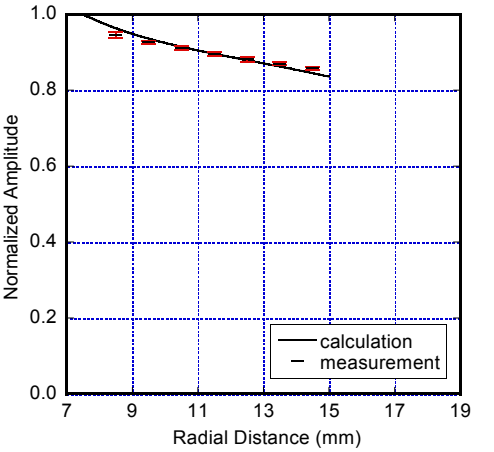
변화시켜 가며 링형 압전 원판의 최대 출력이 되는 진동수인 고유진동수를 찾아내었다. 이론적 해석으로부터 얻어진 1차 고유진동수를 Table 2에서 측정 결과와 비교하였다. 1차 고유진동수에 대한 이론적 해석 결과와 측정 결과가 거의 일치한다.

고유진동수와 동일한 주파수의 전기 신호를 인가하며 레이저 측정기로 면내 진동을 측정하였다. 식 (15)에 해당하는 진동 속도 진폭을 신호분석기(B&K 2035)에서 측정한 후 진동 변위 진폭으로 환산하였다. 측정 위치는 안쪽 반지름에서 바깥 반지름까지 1 mm 간격으로 설정하였다. 각 위치에서 측정된 면내 진동 변위 진폭을 정규화하여 Fig. 5에 나타냈다. 이론적 해석으로부터 얻어진 진동 모드를 Fig. 5에 실선으로 나타내어 측정 결과와 비교하였다. 1차 모드의 진동 변위 진폭은 거의 균일하되 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 점차 약간 작아진다. 속이 찬 원판에서는 기본모드의 형상이 중심으로부터 멀어질수록 진폭이 증가하다가 끝부분에서 감소한다[14]. 속이 빈 링형 원판에서는 모드형상이 다르다.

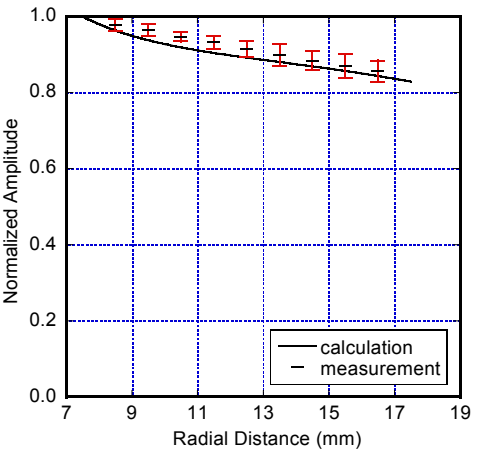
4. 외경의 영향

원판 링형 압전 변환기의 형상 치수에 따른 진동 특성 경향을 파악하기 위해서 외경의 영향을 조사하였다[16]. 진동 모드형상은 Fig. 5의 결과에서 보듯이, 외경에 무관하다.

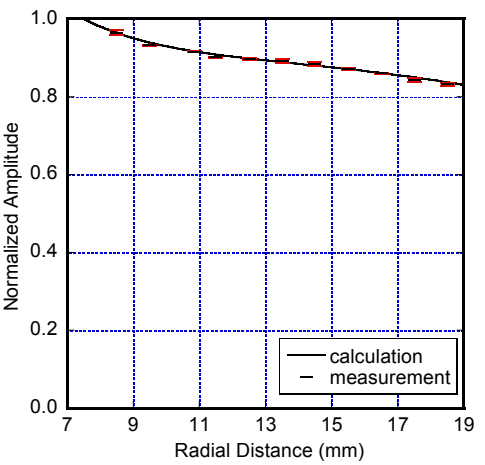
고유진동수 측정에 면내 진동 측정기와 아울러 임피던스 분석기(impedance gain/phase analyzer)를 사용하였다. 임피던스 분석기를 사용하여 구한 임피



(a) Specimen A

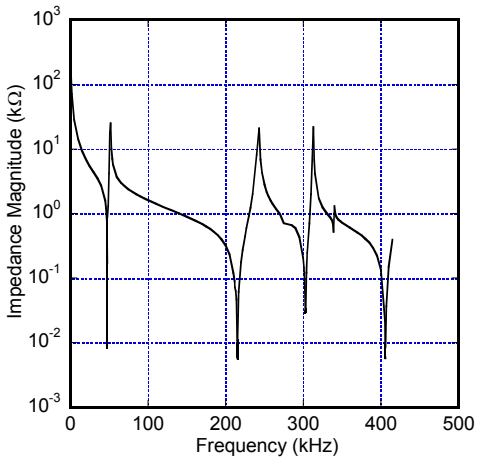


(b) Specimen B

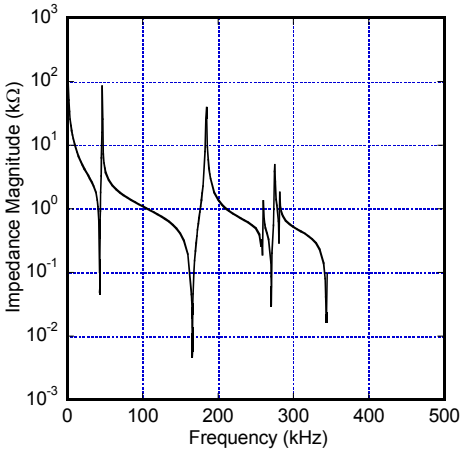


(c) Specimen C

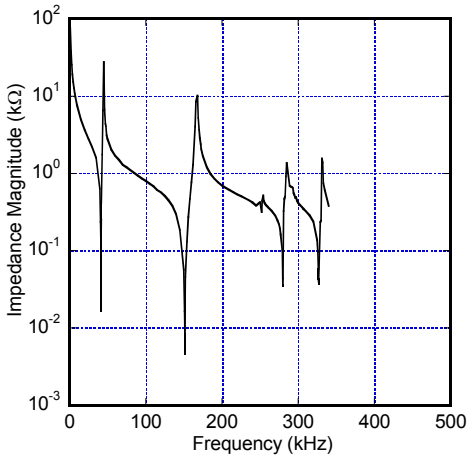
Fig. 5 Vibration displacement distribution of the fundamental mode



(a) Specimen A



(b) Specimen B



(c) Specimen C

Fig. 6 Impedance curves obtained by the experiments

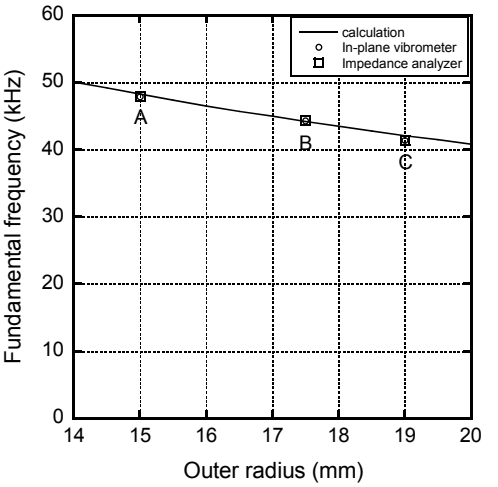


Fig. 7 Comparison of the fundamental frequencies obtained by calculation, measurements

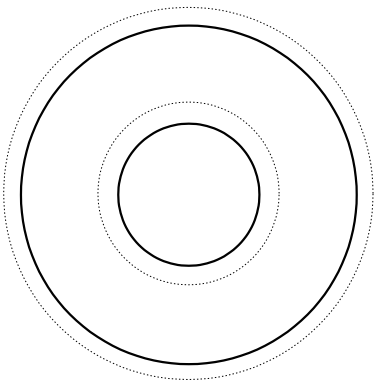


Fig. 8 Fundamental mode shape of a circular ring-type transducer

던스 곡선을 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 임피던스 크기가 극소값인 지점이 고유진동수이다. 이 두 가지 방법으로 측정된 1차 고유진동수를 Fig. 7에 네모와 원으로 나타냈다. 외경에 따른 1차 고유진동수를 계산하여 Fig. 7에 실선으로 나타냈다. 세 가지 방법으로 구한 고유진동수들이 잘 일치한다.

Fig. 7에서 알 수 있다시피 외경이 커짐에 따라 1차 고유진동수는 작아진다. 그 이유는 모드형상에서 이해 될 수 있다. Fig. 8에 보인 바와 같이 1차 모드형상에서 안쪽 및 바깥쪽 원주면은 같은 방향으로 진동한다. 따라서 외경이 커짐에 따라 1차 진동모드의 발생이 쉬워지면서 1차 고유진동수가 점차 작아진다.

Table 3 Natural frequencies of the radial modes calculated for specimens A, B, and C

Mode	Natural frequency(kHz)		
	A	B	C
1	48.4	43.0	42.1
2	238	178	159
3	464	345	305

Table 4 Natural frequencies experimentally obtained by the impedance-curve measurement

Mode	Natural frequency(kHz)		
	A	B	C
1	47.9 ± 0.1	43.3 ± 0.2	41.4 ± 0.3
2	212.8 ± 2.1	166.6 ± 0.5	151.4 ± 0.7
3	302.1 ± 0.7	270.9 ± 0.2	281.1 ± 1.8

세 시편에 대해 1~3차 고유진동수를 계산하여 Table 3에 나타내고, 임피던스 분석기로 측정하여 Table 4에 나타내어 비교하였다. 원형 압전 변환기의 2차 및 3차 고유진동수도 외경이 커짐에 따라 작아진다.

5. 결 론

이 논문은 레이저 면내 진동 측정기로 측정한 링형 압전 변환기의 면내 방사 진동을 다루었다. 얇은 원판에서 중심부가 비어 있고 두께방향으로 분극되어 있는 링형 압전체에서, 원주면이 자유로운 경우에 고유진동수와 진동모드를 측정하고 이론적 해석 결과로 뒷받침하였다. 링형 압전 원판의 기본모드의 진동변위 진폭은 속이 찬 원판의 경우와 달리 면내에서 거의 균일하다. 다만 안쪽에서 바깥쪽으로 점차 약간 작아진다. 이 경향은 외경 크기에 무관하다.

외경에 따른 면내진동 특성을 파악하였다. 기본모드의 진동 모드형상은 외경 크기에 상관없이 같은 경향을 보인다. 외경이 클수록 기본 모드의 고유진동수는 작다. 이는 임피던스 곡선 측정과 이론적 예측에서도 일관성 있게 나타났다.

후 기

이 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 “ICT융합 고급인력과정 지원사업”의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2014-H0401-14-1005).

References

(1) Busch-Vishniac, I. J., 1999, Electromechanical Sensors and Actuators, Springer, New York, Chapter 5.

(2) Kim, J. O. and Kim, D. J., 2014, Piezoelectric Stack Transducer, Korea Patent 10-1387064.

(3) Kim, J. O., Oh, S. H. and Piao, C., 2013, Radial-mode Vibration Characteristics of Disc-type Piezoelectric Transducers, Proceedings of the 15th Asia Pacific Vibration Conference, pp. 1058~1061.

(4) Kunkel, H. A., Locke, S. and Pikeroen, B., 1900, Finite-element Analysis of Vibrational Modes in Piezoelectirc Ceramic Disks, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 37, pp. 316~328.

(5) Lee, P. C. Y., Yu, J.-D., Li, X. and Shih, W.-H., 1999, Piezoelectric Ceramic Disks with Thickness-graded Material Properties, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 46, pp. 205~215.

(6) Ho, S.-T., 2007, Modeling of a Disk-type Piezoelectric Transformer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 54, pp. 2110~2119.

(7) Lin, Y.-C. and Ma, C.-C., 2004, Experimental Measurement and Numerical Analysis on Resonant Characteristics of Piezoelectric Disks with Partial Electrode Designs, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, pp. 937~947.

(8) Iula, A., Lamberti, N. and Pappalardo, M., 1996, A Mode for the Theoretical Characterization of Thin Piezoceramic Rings, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectircs, and Frequency Control, Vol. 43, pp. 370~375.

(9) Li, H. L., Hu, J. H. and Chan, H. L. W., 2004, Finite Element Analysis on Piezoelectric Ring

Transformer, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 51, pp. 1247~1254.

(10) Ho, S.-T., 2007, Modeling and Analysis on Ring-type Piezoelectric Transformers, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 54, pp. 2367~2384.

(11) Piao, C. and Kim, J. O., 2013, Coupled Vibration Characteristics of Piezoelectric Hollow-disk Transducers, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 722~723.

(12) Piao, C., Kim, D. J. and Kim, J. O., 2014, Radial-mode Vibration Characteristics of Piezoelectric Hollow-disc Transducers, Proceedings of the 21th International Congress on Sound and Vibration.

(13) Achencach, J. D., 1975, Wave Propagation in Elastic Solids, North Holland, Chapter 2.

(14) Kim, D, J. and Kim, J. O., 2013, Measurement of Radial In-plane Vibration of Piezoelectric Disks, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 275~276.

(15) Piao, C. and Kim, J. O., 2014, Measurement of Radial In-plane Vibration of Piezoelectric Hollow-disks, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 183~184.

(16) Piao, C., Kim, D. J. and Kim, J. O., 2014, Vibration Characteristics of Piezoelectric Circular Transducers for Various Outer Radii, Proceedings of the KSNVE Spring Conference, pp. 690~691.

Chunguang Piao received the M.S. degrees in mechanical engineering from Soongsil University in 2013. During his stay at Soongsil as a graduate student, he has been working on ultrasonic wave propagation and vibration characteristics of piezoelectric transducers.

Jin Oh Kim received the B.S. and M.S. degrees in mechanical engineering from Seoul National University in 1981 and 1983, respectively, and the Ph.D. degree from University of Pennsylvania in 1989. Since 1997, he has been with the Faculty of Soongsil University, where he is currently a Professor of mechanical engineering. His research interests are in the areas of ultrasonic sensors and actuators using mechanical vibrations and human-body dynamics for rehabilitation robots.