

원통형 진동자 내부의 이중관 중심에서의 음압해석

An analysis of acoustic pressure in the center of double pipe inside of a cylindrical vibrator

김정순,¹ 김무준^{2†}

(Jungsoon Kim¹ and Moojoon Kim^{2†})

¹동명대학교 전기공학과, ²부경대학교 물리학과

(Received January 4, 2017; revised January 18, 2017; accepted May 30, 2017)

초 록: 유체로 채워진 원통형 압전진동자 내부에서 중심축으로 집속되는 음파에 대해 진동자 내부에 삽입된 동심원의 고체튜브가 음장분포에 미치는 영향을 해석하였다. 원통형 압전진동자의 내부로부터 방사된 음파는 유체매질을 지나 고체튜브의 벽면에서 반사 및 투과를 하여 중심축에 집속된다. 이때 고체튜브의 음향임피던스 및 두께 등에 의해 중심에 집속되는 음장 분포가 변한다. 이를 이론적으로 해석하기 위하여 각 매질에 대한 전달행렬을 도출하였고 이를 적용하여 중심축에서의 음압수준을 이론적으로 해석하였다. 여러 가지 두께를 갖는 아크릴 튜브에 대해서 중심축 상에서 측정된 음압수준의 변화는 이론해석의 결과와 잘 일치하였으며 중심에 형성되는 음압은 고체튜브의 두께에 따라 매우 민감하게 변화함을 확인하였다.

핵심용어: 원통형 진동자, 압전 진동자, 이중원통, 음장 해석

ABSTRACT: The effect of the concentric solid tube inserted inside the vibrator on the sound field distribution was analyzed for the sound waves focused on the center axis in the fluid - filled cylindrical piezoelectric transducer. The sound waves radiated from the inside of the cylindrical piezoelectric vibrator are transmitted through the fluid medium and are reflected or transmitted on the wall surface of the solid tube, and are focused on the central axis. At this time, the sound field distribution centered on the acoustic tube varies depending on the acoustic impedance and the thickness of the solid tube. In order to theoretically analyze this, the transfer matrix for each medium is derived, and the sound pressure level at the center axis is theoretically analyzed. For the acrylic tube with various thicknesses, the changing trend in the sound pressure level measured on the central axis agrees well with the result of the theoretical analysis, and it confirmed that the sound pressure formed at the center changes very sensitively with the thickness of the solid tube.

Keywords: Cylindrical vibrator, Piezoelectric vibrator, Double pipe, Acoustic field analysis

PACS numbers: 43.35.Bf, 43.35.Yb

1. 서 론

원통형 압전진동자의 내부에 집속되는 고강도 음장은 미세구조 결정성장 및 나노입자의 분산 등에 응용되고 있으며 비접촉식으로 강한 초음파 에너지를 전달할 수 있어 많은 분야에서의 활용이 기대되고 있다.^[1-4] 그러나 이러한 응용 디바이스를 개발하

기 위해서는 원통형 압전진동자의 중심에 형성되는 음장 분포에 대한 이론적 해석이 요구된다. 유체매질을 포함한 원통내부의 음파전달에 관한 연구로는 B. Sinha *et al.*^[5]이 수행한 축대칭 파동 전파에 관한 이론이 보고되어 있으며 L. Lafleur *et al.*^[6]에 의해 유체로 채워진 탄성 튜브내의 음파전파 모드에 의한 이론적 고찰 등 다수의 연구가 보고되어 있다.^[7-10]

본 연구에서는 원통형 압전 진동자의 중심에 형성되는 높은 음향강도를 이용하여 현탁액에 포함된 나

†Corresponding author: Moojoon Kim (kimmj@pknu.ac.kr)
Department of Physice, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea
(Tel: 82-51-629-5572, Fax: 82-51-629-5549)

노입자들의 분산에 활용함을 전제로 중심에 형성되는 음압을 예측할 수 있는 수단을 도출하고자 한다.

나노입자를 분산할 때 시료의 온도 유지를 위하여 시료를 담은 시료용기가 별도로 사용된다. 결과적으로 진동면으로부터 방사된 음파는 유체매질과 시료용기인 고체매질을 차례로 통과하여 시료가 담긴 용기내의 중심에서 집속되게 된다. 본 연구에서는 원통형 압전진동자에 의한 집속음장의 활용을 위하여 압전 진동자-유체-고체-유체라는 경로를 통해 중심에 형성되는 음장 분포를 간단히 추론하기 위하여 전송선로 모델을 사용한 이론적 해석법을 제안하고 실험을 통해 그 유효성을 확인한다.

II. 다층 원통내부 음장 해석

본 연구에서 해석 대상으로 하는 매질의 구조를 Fig. 1에 나타내었다. 원통형 압전진동자의 내면에 삽입된 얇은 금속원통 내부에 유체가 채워져 있고, 그 중심에 다시 유체로 채워진 고체튜브가 압전진동자 및 금속원통과 동심원을 이루며 고정되어 있다. 이때 압전진동자는 반지름 방향의 진동만을 고려하며 금속원통의 두께는 압전진동자로부터 방사되는 초음파의 파장에 비해 충분히 얇다고 가정한다. 이 경우, Fig. 2에 나타난 것과 같이, 압전진동자로부터 발생하는 진동은 중심축대칭이며 원통형 압전진동자와 완벽히 접촉되어 금속원통의 영향을 무시하면 진동자의 벽면에서 방사된 초음파는 유체매질을 거쳐 내부 고체튜브를 지나 튜브내의 유체매질의 중심에 집속될 것이다. 축대칭으로 분포된 음압은 중심으로 전달해 가며 분포면적이 줄어들어 따라 중첩되어 그 진폭이 확대될 것이다. 그러나 매질에 전달되는 힘은 내부 감쇠를 무시하면 일정할 것이므로 Fig. 3과 같은 해석 모델을 설정할 수 있다. 즉 높이 h , 반지름 a 인 원통의 내부에 존재하는 임의의 동심원통의 면적 A_x 는 다음 Eq. (1)로 표현할 수 있다.

$$A_x = 2\pi(a-x)h, \tag{1}$$

여기서 x 는 원통 벽면으로부터 중심방향으로 떨어진 거리이다.

원통형 압전진동자의 내면으로부터 방사되는 초음파는 동위상으로 중심축으로부터 일정한 거리에 있어서는 모든 방향에 대해 위상은 동일하며 모든 방향에서 고체튜브의 벽면에 수직 입사한다고 가정할 수 있다.

또한, 고체튜브 벽면으로부터의 횡파는 고체튜브 중심의 유체매질에는 큰 영향을 미치지 않으므로 종파의 전달만을 고려한다. 이와 같은 가정을 바탕으로 각 매질에 대한 음파전달특성을 표현하는 분포정수 행렬을 구할 수 있다. 원통내에 전파되는 음파중 반지름 방향 x 에 대한 음압 및 입자속도는 다음 식으로 주어져 있다.^[10]

$$p(x) = \omega^2 \rho [C_1 J_0(kx) + C_2 Y_0(kx)]. \tag{2}$$

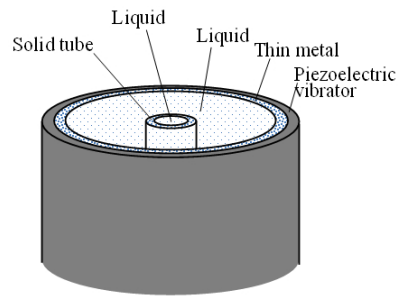


Fig. 1. Construction of the concentric cylindrical mediums.

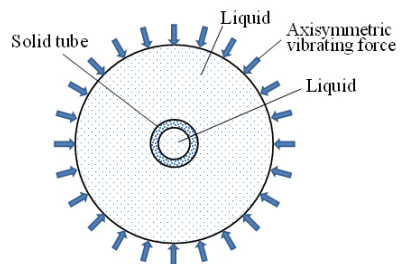


Fig. 2. Schematic view of the cylindrical layers.

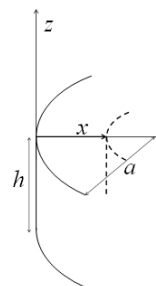


Fig. 3. Coordinate systems for theoretical analysis.

$$v(x) = C_1 J_1(kx) + C_2 Y_1(kx), \quad (3)$$

여기서 k 는 파수이며 $k = \omega/v_p$ 로 주어지고 위상속도 v_p 는 $v_p = \sqrt{\gamma/\rho}$ 이다. 이때 γ 는 고체매질에 대해서는 탄성계수이며 유체매질에 대해서는 Bulk modulus이다. 또 J_0 및 Y_0 는 각각 0차 제1종 및 제2종 베셀함수이며 J_1 및 Y_1 는 각각 1차 제1종 및 제2종 베셀함수이다. Figs. 1과 2에서 나타낸 구조의 원통내에서 반지름 방향으로 중심을 향해 진행하는 파동에 대해서 힘과 입자속도의 연속조건을 이용하기 위해 Eqs. (2)와 (3)을 수정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x) = \omega^2 \rho A_x [C_1 J_0(ka - kx) + C_2 Y_0(ka - kx)], \quad (4)$$

$$v(x) = C_1 J_1(ka - kx) + C_2 Y_1(ka - kx). \quad (5)$$

위의 힘과 입자속도의 일반해에, $x=0$ 및 $x=r$ 에서의 경계조건, $F(0) = F_0$, $F(r) = F_r$, $v(0) = v_0$, $v(r) = v_r$ 를 적용하면 다음과 같은 특성 행렬식을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_r \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ v_0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

여기서 행렬의 각 요소는 다음과 같다.

$$M_{11} = \frac{\rho A_r \omega^2}{Z_m} \begin{bmatrix} Y_1(ka) J_0(ka - kr) \\ -J_1(ka) Y_0(ka - kr) \end{bmatrix},$$

$$M_{12} = \frac{\rho^2 \omega^4 A_r A_0}{Z_m} \begin{bmatrix} J_0(ka) Y_0(ka - kr) \\ -Y_0(ka) J_0(ka - kr) \end{bmatrix},$$

$$M_{21} = \frac{1}{Z_m} \begin{bmatrix} Y_1(ka) J_1(ka - kr) \\ -J_1(ka) Y_1(ka - kr) \end{bmatrix},$$

$$M_{22} = \frac{\rho A_0 \omega^2}{Z_m} \begin{bmatrix} J_0(ka) Y_1(ka - kr) \\ -Y_0(ka) J_1(ka - kr) \end{bmatrix},$$

$$Z_m = \rho \omega^2 A_0 [J_0(ka) Y_1(ka) - J_1(ka) Y_0(ka)], \\ = \frac{-2\rho \omega^2 A_0}{\pi ka}$$

여기서 $A_0 = 2\pi ah$ 및 $A_r = 2\pi(a-r)h$ 은 각각 $x=0$ 및 $x=r$ 에서의 원통의 옆 면적을 나타낸다.

위의 특성행렬식을 이용하면 다층구조의 원통매

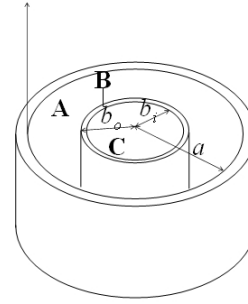


Fig. 4. Calculation model for coaxial multi-layered cylinder.

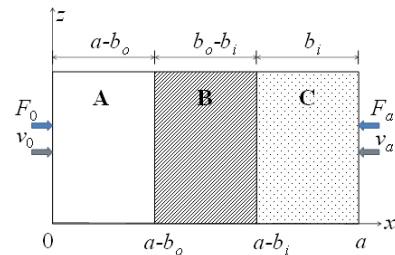


Fig. 5. Equivalent model for multi-layered media.

질 내부에서의 음장분포를 해석할 수 있다. 다층 동심원 원통매질에 대한 구체적인 예에 대한 이론해석을 위하여, Fig. 4와 같이, 반지름 a 인 고체 원통 내부에 외 반경 b_o , 내 반경 b_i 인 다른 고체원통이 위치한 경우를 생각하자. 이 때 각 매질 내부에 형성되는 음장을 해석하기 위하여 Fig. 4의 모델을 Fig. 5와 같은 다층구조 매질에 대한 등가모델을 생각할 수 있다. 최외각 원통의 내부 표면을 $r=0$ 으로 두면 중심에 위치한 원통의 내부($0 < r \leq b$)에서의 힘과 입자속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F(r) \\ v(r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_0 \\ v_0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

여기서 각 행렬의 원소 A_{ij} , B_{ij} , C_{ij} 는 다음과 같으며 이들은 각각 Fig. 5의 매질 A, B, C의 특성을 나타내는 행렬의 원소이다.

$$A_{11} = \frac{\rho_a A_{ra} \omega^2}{Z_{ma}} \begin{bmatrix} Y_1(k_a a) J_0(k_a a - k_a r) \\ -J_1(k_a a) Y_0(k_a a - k_a r) \end{bmatrix},$$

$$A_{12} = \frac{\rho_a^2 \omega^4 A_{ra} A_{0a}}{Z_{ma}} \begin{bmatrix} J_0(k_a a) Y_0(k_a a - k_a r) \\ -Y_0(k_a a) J_0(k_a a - k_a r) \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
A_{21} &= \frac{1}{Z_{ma}} \left[Y_1(k_a a) J_1(k_a a - k_a r) \right], \\
A_{22} &= \frac{\rho_a A_{0a} \omega^2}{Z_{ma}} \left[J_0(k_a a) Y_1(k_a a - k_a r) \right], \\
B_{11} &= \frac{\rho_b A_{rb} \omega^2}{Z_{mb}} \left[Y_1(k_b b) J_0(k_b b - k_b r) \right], \\
B_{12} &= \frac{\rho_b^2 \omega^4 A_{rb} A_{0b}}{Z_{mb}} \left[J_0(k_b b) Y_0(k_b b - k_b r) \right], \\
B_{21} &= \frac{1}{Z_{mb}} \left[Y_1(k_b b) J_1(k_b b - k_b r) \right], \\
B_{22} &= \frac{\rho_b A_{0b} \omega^2}{Z_{mb}} \left[J_0(k_b b) Y_1(k_b b - k_b r) \right], \\
C_{11} &= \frac{\rho_c A_{rc} \omega^2}{Z_{mc}} \left[Y_1(k_c c) J_0(k_c c - k_c r) \right], \\
C_{12} &= \frac{\rho_c^2 \omega^4 A_{rc} A_{0c}}{Z_{mc}} \left[J_0(k_c c) Y_0(k_c c - k_c r) \right], \\
C_{21} &= \frac{1}{Z_{mc}} \left[Y_1(k_c c) J_1(k_c c - k_c r) \right], \\
C_{22} &= \frac{\rho_c A_{0c} \omega^2}{Z_{mc}} \left[J_0(k_c c) Y_1(k_c c - k_c r) \right], \\
Z_{ma} &= \rho_a A_{0a} \omega^2 \left[J_0(k_a a) Y_1(k_a a) - J_1(k_a a) Y_0(k_a a) \right], \\
Z_{mb} &= \rho_b A_{0b} \omega^2 \left[J_0(k_b b) Y_1(k_b b) - J_1(k_b b) Y_0(k_b b) \right], \\
Z_{mc} &= \rho_c A_{0c} \omega^2 \left[J_0(k_c c) Y_1(k_c c) - J_1(k_c c) Y_0(k_c c) \right],
\end{aligned}$$

여기서 매질 **A**, **B**, **C**에서의 파수는 각각 $k_a = \frac{\omega}{v_{pa}}$, $k_b = \frac{\omega}{v_{pb}}$, $k_c = \frac{\omega}{v_{pc}}$ 이고, 각 매질의 경계 및 임의의 거리 r 에서의 원통 옆면적은 각각, $A_{0a} = 2\pi ah$, $A_{ra} = 2\pi(a-r)h$, $A_{0b} = 2\pi bh$, $A_{rb} = 2\pi(b-r)h$, $A_{0c} = 2\pi ch$, $A_{rc} = 2\pi(c-r)h$, 이다. 한편, 중심에 위치한 원통 내부에서의 음압은 다음과 같이 주어지는데,

$$p(r) = \frac{F(r)}{A_{0c}}, \quad (8)$$

아래 관계 Eq. (9)를 Eq. (7)에 적용함으로써 원통내부의 음압 및 입자속도의 분포를 구할 수 있다.

$$F_0 = A_0 \rho_a v_{pa} v_0. \quad (9)$$

III. 실험장치의 구성

원통형 압전 진동자 내부의 이중원통 및 음압측정용 수중 청음기의 위치를 Fig. 6에 나타내었다. 내경이 38.44 mm, 길이가 19.00 mm인 원통형 압전진동자를 알루미늄 원통(외경: 38.42 mm, 내경: 37.14 mm, 길이: 98.78 mm)에 끼워 넣어 압전진동자의 내측 전극이 알루미늄 원통의 겉면에 완벽히 접촉되도록 하여 알루미늄 원통이 전원의 접지로 사용될 수 있도록 하였다. 내경이 4.70 mm인 아크릴 원통을 알루미늄 원통의 내부 중심에 고정시키고 내부에 특정 현탁액을 채운다. 아크릴원통의 내부 중심에 수중 청음기를 고정시키기 위하여 테플론으로 덮개를 제작하여

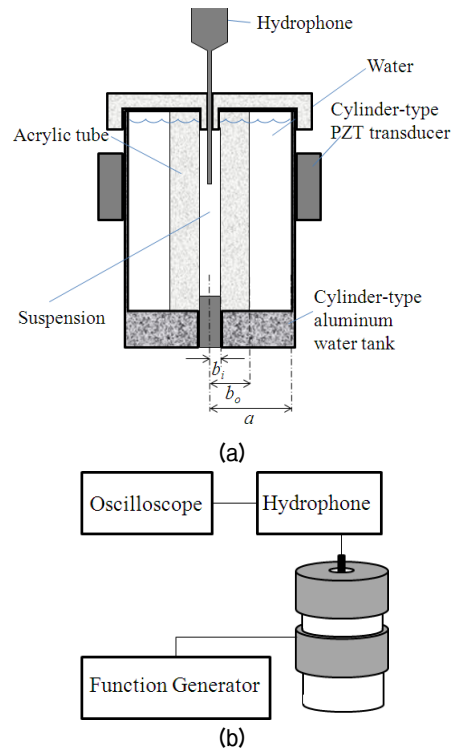


Fig. 6. Experimental set-up. (a) Construction of multi-layered cylinder, and (b) measurement system for acoustic pressure in the center of multi-layered cylinder.

수중청음기 및 아크릴 원통을 고정하였다. 알루미늄 원통과 아크릴 원통 사이에는 증류수를 채워 압전 진동자로부터 방사되는 음파가 현탁액으로 전달 되게 하였다. 이때, 원통 중심에 설치된 아크릴 원통의 외경을 바꾸어 가며 원통의 두께변화에 따른 중심에서의 음압변화를 직경 4mm인 수중청음기(Rason TC4038)로 수신하여 오실로스코프를 통해 관찰 하였다. 이때 함수 발생기에서 출력되는 반송주파수 450 kHz의 버스트 펄스 신호를 이용하여 원통형 압전 진동자를 구동시켜 원통의 중심에 강한 음압이 형성되도록 하였다. 원통형 압전진동자의 구동특성을 관찰하기 위하여 LCR 미터(LCR-8110G)로 원통형 압전진동자의 어드미턴스 특성을 측정하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 원통 내부에 부하매질을 채우지 않은 경우인 Fig. 7(a)의 결과를 보면 원통형 분산모듈의 공진 주파수가 약 475 kHz 부근에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이때 어드미턴스의 실수부인 컨덕턴스의 값은 약 78 mS을 나타내고 있다. 다음으로 원통 내부에 물을 채우고 원통형 분산모듈의 어드미턴스를 측정한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 이 결과를 보면 부하매질이 없는 경우인 Fig. 7(a)에 비하여

공진 주파수에서의 컨덕턴스 값은 많이 감소하여 약 40mS정도를 나타내고 있어 부하매질에 대한 전기-음향 변환효율은 큰 것으로 예상된다. 그러나 Fig. 7(b)의 480 kHz와 525 kHz부근에 나타나는 날카로운 스프리어스는 원통내부에서 반사된 음파에 의해 나타나는 공진 현상으로 생각된다.

IV. 결 과

예를 들어 아래와 같이 이중 원통 내부의 음장분포를 Eq. (7)을 이용하여 계산하였다. 계산에 있어서 Fig. 4의 냉각물질(매질 A), 내부 튜브(매질 B), 분산시료(매질 C)는 각각 물, 아크릴, 물로 설정하였고 Table 1에 나타낸 것과 같은 물질상수를 사용하였다.

아크릴 원통의 두께를 변화시켜가며 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 결과를 보면 아크릴 튜브 중심에서의 음압 변화는 아크릴 튜브의 두께에 따라 중심음압이 매우 민감하게 변하는 것을 알 수 있다. 특히, Fig. 8의 결과에서 $r = 1.0\text{mm}$ 인 경우에 대한 아크릴 원통 중심에서의 음압변화를 Fig. 9에 나타내었다. 이 결과를 보면 Fig. 8의 결과에서 예측할 수 있듯

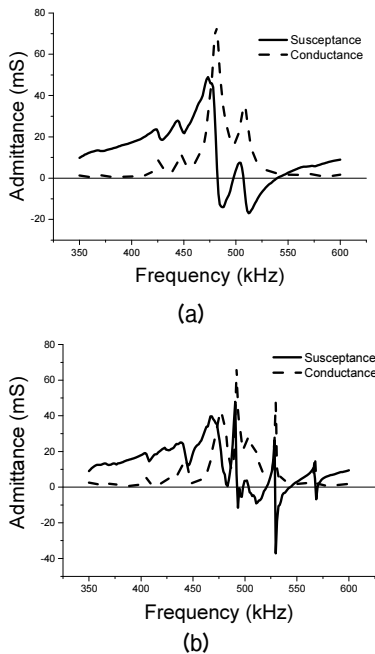


Fig. 7. Admittance characteristics of cylindrical piezo-electric vibrator. (a) Without acoustic load, and (b) with acoustic load of water.

Table 1. Constants used in calculation.

Material	Value
Inner radius of PZT (mm)	19.25
Driving frequency (kHz)	450.0
Outer radius of acrylic cylinder (mm)	≥ 3.0
Inner radius of acrylic cylinder (mm)	2.35
Sound speed of water (m/s) at 3°C	1414
Density of water (kg/m^3)	997
Sound speed of acrylic cylinder (m/s)	2513
Density of acrylic cylinder (kg/m^3)	2300

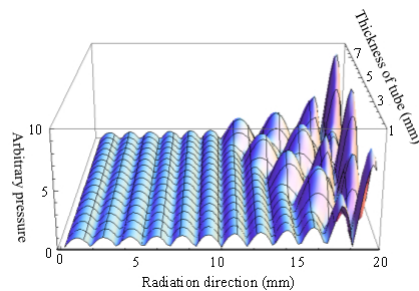


Fig. 8. Acoustic field distribution in aluminum cylinder depending on thickness of acrylic cylinder.

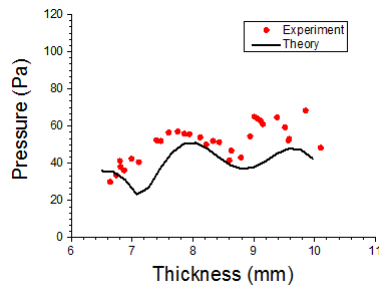


Fig. 9. Acoustic pressure in the center of acrylic cylinder as a function of thickness.

이 아크릴 튜브의 두께변화에 따라 중심에서의 음압이 예민하게 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 9에서 실선이 나타내는 이론 계산결과, 실험값과의 비교를 위하여 감쇠계수를 적절히 조절하여 얻어진 결과로 값의 크기는 큰 의미가 없다. 다만 측정된 실험값의 변화경향이 이론계산의 변화경향을 잘 보여주고 있음은 확인할 수 있다.

V. 결 론

원통형 압전 진동자의 내부로부터 방사된 음파가 유체매질을 통하여 중심에 위치한 고체 튜브의 내부에 형성하는 음장을 해석하기 위하여 중심으로 부터의 거리에 따라 변하는 원통면을 거리의 함수로 정의하여 파동함수를 도출하였다. 경계조건을 적용한 파동함수의 해로부터 음압 및 입자속도에 대한 분포 정수 행렬을 도출하여 서로 다른 매질로 구성된 다층 원통내부에 형성되는 음압 및 입자속도의 분포를 표현할 수 있는 행렬식 모델을 제안하였다. 제안된 계산모델을 알루미늄과 아크릴로 구성된 이중 동심원 구조의 원통내부에 형성되는 음장 계산에 적용한 결과 측정결과와 좋은 일치를 보였다. 측정에 있어서는 원통형 압전진동자 내부에 고정된 직경 38.4mm인 알루미늄 원통내부에 음향매질로 증류수를 채우고 원통의 중심에 아크릴 튜브를 고정하여 아크릴 튜브의 두께에 따른 중심에서의 음압을 측정하였다. 그 결과 아크릴 튜브의 두께가 약 0.9~2.75 mm로 변화에 따라 중심에서의 음압은 약 30 Pa에서 70 Pa의 범위에서 변하는 것이 확인 되었고 변화 경향은 음파의 간섭에 의한 음장의 분포에 따라 증가와 감소가

반복되는 경향을 보이고 있었다. 이 변화 경향은 본 연구에서 제안된 이론 모델을 적용하여 계산한 음압의 변화 경향과 좋은 일치를 보여 제안된 계산모델의 유효성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 연구성과실용화진흥원 신산업창조프로젝트 사업의 지원을 받아 수행하였음(2016K000257, 극 초분산을 위한 집속초음파 모듈의 개발 및 최적화).

References

1. D. Gužas, "Sound insulation of multi-layer cylindrical structures," *ULTRAGARSAS (ULTRASOUND)*, **62**, 39-41 (2007).
2. T. Yang, R. Cao, X. Luo, and H. Ma, "Acoustic super-scatterer and its multilayer realization," *Appl. Phys. A*, **99**, 843-847 (2010).
3. G. Kaduchak, D. Sinha, and D. Lizon, "Novel cylindrical, air coupled levitation/concentration device," *Rev. Sci. Instrum.* **73**, 1332-1336 (2002).
4. S. Kogan, G. Kaduchak, and N. Shiha, "Acoustic concentration of particles in piezoelectric tubes: Theoretical modeling of the effect of cavity shape and symmetry breaking," *J. Acoust. Soc. Am.* **116**, 1967-1974 (2004).
5. B. Sinha, T. Plona, S. Kostek, and S. Chang, "Axisymmetric wave propagation in fluid-loaded cylindrical shells. I: Theory," *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 1132-1143 (1992).
6. L. D. Lafleur and F. D. Shields, "Low-frequency propagation modes in a liquid-filled elastic tube waveguide," *J. Acoust. Soc. Am.* **97**, 1435-1445 (1995).
7. J. Sinai and R. Waag, "Ultrasonic scattering by two concentric cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 1728-1735 (1988).
8. B. K. Sinha, T. J. Plona, S. Kostek, and S. K. Chang, "Axisymmetric wave propagation in fluid-loaded cylindrical shells. I: Theory," *J. Acoust. Soc. Am.* **92**, 1132-1143 (1992).
9. J. Sinai and R. Waag, "Ultrasonic scattering by two concentric cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.* **83**, 1728-1735 (1988).
10. K. F. Graff, *Wave Motion in Elastic Solids* (Dover, New York, 1975), pp. 471.

저자 약력

▶ 김 정 순 (Jungsoon Kim)



1996년 2월: 부경대학교 물리학과 이학사
1999년 2월: 부경대학교 음향진동공학협동
과정 공학석사
2002년 3월: Tokyo University of A&T,
Bio-Applications and Systems of Eng.
공학박사
2006년 3월 ~ 현재: 동명대학교 전기공학과
조교수

▶ 김 무 준 (Moojoon Kim)



1985년 2월: 부경대학교 물리학과 이학사
1990년 2월: 부경대학교 물리학과 이학석사
1994년 3월: 일본, 토호쿠대학 공학박사
1995년 3월 ~ 현재: 부경대학교 교수