

공명 산란 이론을 이용한 단일층 원통형 껍질 내부 물질의 음향 식별

Acoustic Identification of Inner Materials in a Single-layer Cylindrical Shell with Resonance Scattering Theory

조영태, 김완구, 윤석왕[†]

(Young-Tae Jo, Wan-Gu Kim, and Suk Wang Yoon[†])

성균관대학교 물리학과 음향학연구실

(Received January 10, 2015; revised April 29, 2015; accepted June 16, 2015)

초 록: 음향 공명 이론을 이용하여 단일층 원통형 껍질 속 내부 물질의 음향 식별을 연구하였다. 원통형 껍질의 이론적인 공명 피크 주파수들은 내부 물질의 밀도 변화에 의해서는 거의 영향을 받지 않으나, 음속 변화에 의해서는 두드러지게 변화를 보인다. 이와 같은 음향 의존성을 원통형 껍질 속 내부 물질을 식별하는 데 활용할 수 있다. 단일층 원통형 껍질에 대한 음향 공명 스펙트로그램을 정규화 주파수 및 내부 물질 음속의 함수로서 이론적으로 작성한다. 이 스펙트로그램에 측정된 후방 산란 음압장의 음향 공명 피크들을 중첩함으로써 내부 물질을 음향학적으로 식별할 수 있다. 이를 실험적으로 확인하기 위하여 물, 기름 또는 에틸렌글리콜을 넣은 원통형 껍질의 후방 산란 음압장을 수조 안에서 측정하였다. 단일 송수신 방식으로 중심주파수 1.05 MHz인 음파 변환기로 측정된 후방 산란 음압장의 음향 공명 피크로 내부 물질을 식별할 수 있었다.

핵심용어: 공명 산란 이론, 원통형 껍질, 음향 식별, 음향 공명 스펙트로그램

ABSTRACT: Acoustic identification of inner materials in a single-layer cylindrical shell is investigated with acoustic resonance theory. The theoretical resonance peak frequencies for a cylindrical shell are little affected by the density variation, but remarkably changed by the sound speed variation of inner materials. Such acoustic dependency can be utilized to identify inner materials in a cylindrical shell. Acoustic resonance spectrogram for a single-layer cylindrical shell is theoretically plotted as functions of normalized frequency and sound speed of inner materials. The inner materials can be acoustically identified by overlapping acoustic resonance peaks from measured backscattering sound field on the spectrogram. To experimentally confirm this method, backscattering sound field of cylindrical shell filled with water, oil or ethylene glycol was measured in water tank. The inner materials could be identified by acoustic resonance peaks of the backscattering sound field monostatically measured with a transduce of 1.05 MHz center frequency.

Keywords: Resonance scattering theory, Cylindrical shell, Acoustic identification, Acoustic resonance spectrogram

PACS numbers: 43.30.Gv, 43.40.Ey, 43.40.Sk

1. 서 론

표적에서 산란된 음압장에서는 표적의 기하학적 구조와 외형적 크기 그리고 내부의 고유한 물리적 특성에 따라 특정 주파수에서 전체적으로 강하게 산

란되는 경향을 보인다. 이를 음향 공명 현상이라고 한다. 음향 공명 현상은 물체 내부의 정보를 내포하므로 비파괴적인 방법으로 물체 내부를 탐사할 수 있는 응용 가능성을 가지고 있어 많은 연구자들의 관심의 대상이었다.^[1-4] 이 같은 공명 현상은 어뢰 및 파이프 등 원통 기하학적 구조를 갖는 대상에 응용 가능성이 높아 원통 형태의 물체에서 산란되어 나오

[†]Corresponding author: Suk Wang Yoon (swyoon@skku.ac.kr)
Department of Physics, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-Ro, Jangan-Gu, Suwon 440-746, Republic of Korea
(Tel: 82-31-290-7043, Fax: 82-31-290-7055)

는 음향 공명 스펙트럼의 이론적인 모델 및 측정에 대해서 많은 연구가 이루어졌다.^[1-5] 최근까지도 원통 표적의 기하학적 모양 및 물성에 따라 다양한 양상으로 나타나는 음향 공명을 표적의 음향 탐지 및 식별에 활용하려는 노력으로 활발히 연구되고 있다.^[6,7] 그러나 표적의 위치 탐색 정도에 그치거나, 음향 공명의 물리적 의미를 설명하는 논문들이 주를 이루었다.

본 논문에서는 표적의 음향 탐지 및 식별 알고리즘을 제시하고자 한다. 단일층으로 구성된 원통형 껍질 표적의 음향 공명을 실험적으로 측정하여, 그 표적의 내부 물질을 음향학적으로 식별하는 데 활용한다.

II. 단일층 원통형 껍질의 후방 산란 음압장 이론 모델

단일층 원통형 껍질에 평면음파가 입사될 때 발생하는 후방 산란 음압장에 대한 이론 모델을 간략히 살펴보고자 한다. Fig. 1과 같이 외부 반경이 a 이고 내부 반경이 b 인 원통형 껍질의 중심축이 좌표계의 z 축과 일치하도록 놓여 있다. 원통형 껍질 근처의 근거리 음장에서 일어나는 근거리 간섭을 배제하기 위하여, 표적으로부터 충분히 떨어진 원거리 영역에서 입사된 평면파의 후방 산란 음압장을 고려한다. 이때, 시간에 대한 의존성을 나타내기 위하여 $e^{-i\omega t}$ 를 사용한다. z 축으로부터의 거리 r 만큼 떨어진 지점에서

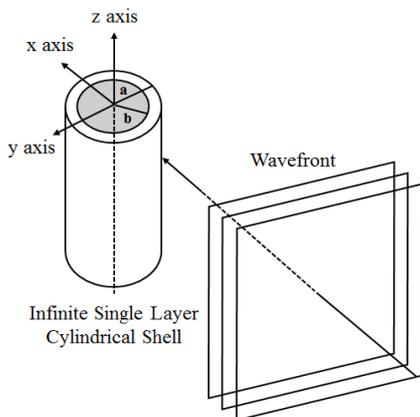


Fig. 1. Incidence of a plane wave to an infinite single-layer cylindrical shell.

에서의 원통형 껍질의 후방 산란 음압 진폭을 입사 음압 진폭 및 $\sqrt{a/2r}$ 로 나누어 줌으로서 구한 산란 형태함수(scattering form function) f_{∞} 는 Eq.(1)과 같다.^[7]

$$f_{\infty}(ka) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{2}{\sqrt{\pi i k a}} \epsilon_n R_n (-1)^n, \quad (1)$$

여기서 ϵ_n 은 $n=0$ 일 때 1, $n=1$ 이상일 때 2인 값이며, $i = \sqrt{-1}$, R_n 은 경계 조건에 의해 결정되는 산란 계수, k 는 주변 매질의 파수, ka 는 원통형 껍질의 외부 반경 a 에 대해 주변 매질에서 계산된 정규화 주파수이다.

Fig. 1과 같이 평면 음파가 입사된 단일층 원통형 껍질 밖($r=a$)과 안($r=b$)의 두 경계면에서, 각각 반경 방향 변위의 연속성, 반경 방향 응력과 유체 매질에서의 압력 사이의 연속성, 접선 방향 전단 응력 없음의 경계 조건들이 존재한다. 이 경계조건들을 적용하면 산란 계수 R_n 및 후방 산란 음압장을 구할 수 있다. 산란 계수 R_n 은 행렬식으로 주어지며, 행렬식의 성분들은 Reference [1]에 자세히 실려 있다.

Murphy *et al.*^[2]은 원통형 껍질의 산란 형태함수가 공명 성분과 비공명 성분으로 나뉜다는 것을 이론적으로 밝혔다. 이와 같이 산란 음압장에서 수학적으로 공명 성분을 구별해 내는 이론을 공명 산란 이론(Resonance Scattering Theory, RST)이라고 한다. RST로 분리한 비공명 성분을 가리켜 배경 성분이라고 한다.^[2] RST에 따라, 이론적인 산란 음압장으로부터 구한 산란 형태함수에서 배경 성분을 제거해 주면 표적의 이론적인 공명 성분만을 얻어낼 수 있다.^[7]

기존 연구에 따르면 산란 형태함수의 비공명 항인 배경 성분은 표적의 물리적 성질에 따라 변화하며, 원통형 껍질의 경우 강제 배경 성분, 중간체 배경 성분, 연체 배경 성분으로 분류된다. 본 연구에서는 주변 매질과 원통의 임피던스 차이 및 원통의 외경 대 내경의 비율, $b/a < 0.9$ 를 고려하여 강제 배경 성분을 사용한다.^[3] 강제 배경 성분을 후방 산란 형태함수에서 제거하여 구한 공명 성분은 Eq.(2)와 같다.^[7]

$$f_{\infty}^{(res)}(ka) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi i k a}} \epsilon_n \frac{R_n - R_n^{(rigid)}}{1 + 2R_n^{(rigid)}} \right) (-1)^n, \quad (2)$$

여기서 $R_n^{(rigid)}(ka) = -\frac{J_n'(ka)}{H_n^{(1)'}(ka)}$, J_n 은 제 1종 베셀 함수(Bessel function of the first kind), $H_n^{(1)}$ 은 제 1종 Hankel 함수(Hankel function of the first kind)이다. 실험의 측정 주파수 범위인 $ka=12\sim 26$ 사이에서 Eq.(2)가 충분히 수렴하도록 31개 항($n=0, 1, 2, \dots, 30$)을 더하여 $f_\infty^{(res)}(ka)$ 를 계산하였다. 그 이후의 항까지 더할 경우에는 실험의 측정 주파수 범위 내에서 $f_\infty^{(res)}(ka)$ 에 의미 있는 변화가 보이지 않았다.

III. 단일층 원통형 껍질 속 내부 물질의 음향 식별 알고리즘

Fig. 2의 (a)와 (b)는 표적을 이루는 원통형 껍질의 물성 및 크기는 고정시키고 균일한 유체로 가정하

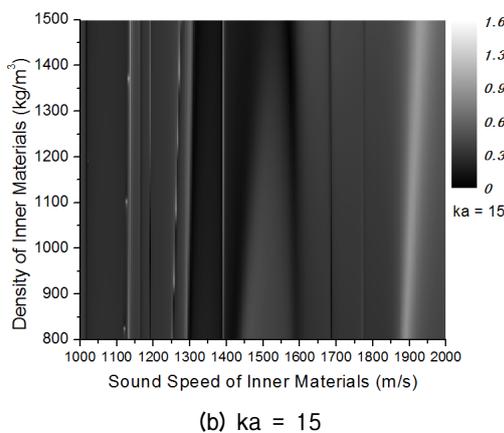
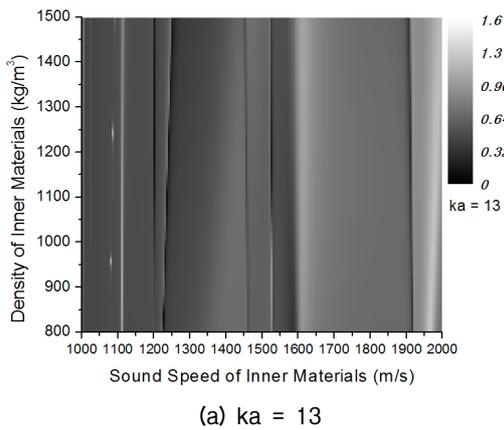


Fig. 2. Theoretical 2-dimensional acoustic resonance amplitude for cylindrical shell as functions of sound speed and density of inner materials.

내부 물질의 밀도와 음속만을 변화시켰을 때, 특정 정규화 주파수에서 Eq.(2)로부터 구한 이론적 음향 공명 스펙트럼을 음속-밀도의 이차원 그래프에 무채색 스케일로 진폭을 표시하였다. 밀도 변화에 따라서는 공명 산란 음압 진폭 크기의 차이가 조금씩 있으나, 피크의 위치 변화는 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 내부 물질의 음속 변화에 따라서는 다양한 양상으로 변화를 보인다.

이와 같은 음향 공명의 특성을 이용하여 원통형 껍질 속에 들어 있는 균일한 내부 물질을 음향 식별하는 다음과 같은 알고리즘을 제안할 수 있다.

1. 원통형 껍질의 알려진 물성 및 기하학적 크기를 이용하여, 내부 물질의 음속이 변화함에 따른 음향 공명 스펙트럼을 RST를 이용해 정규화 주파수 영역에서 계산한다.
2. 계산한 음향 공명 스펙트럼들을 내부 물질의 음속 변화에 따라 Fig. 3과 같이 음향 공명 스펙트로그램(acoustic resonance spectrogram)으로 그린다. 음향 공명 스펙트로그램의 수평축은 내부 물질의 음속 c , 수직축은 정규화 주파수 ka , 계산된 음향 공명의 진폭은 색의 명암으로 표현한다.
3. 표적으로부터 실험적으로 측정된 음향 공명 스펙트럼의 주파수 영역 피크 위치를 결정하고 이를 음향 공명 스펙트로그램에 중첩시킨다.
4. 측정된 음향 공명 피크 위치들이 이론적인 음향 공명 모드들과 대응되는 음속을 음향 공명 스펙트로그램 위에서 찾는다. 이 음속 정보로부터 내부 물질을 식별한다.

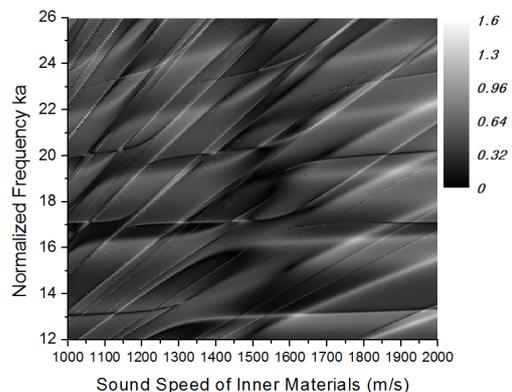


Fig. 3. Theoretical acoustic resonance spectrogram as a function of sound speed of inner materials.

IV. 단일층 원통형 껍질 표적의 음향 공명 측정

단일층 원통형 껍질의 내부 물질의 음향학적 식별을 위하여, 수조 환경의 원거리 영역에서 입사 평면파에 대한 후방 산란 음압을 실험 측정하였다. 원통형 껍질 표적으로서는 입사 음파의 파장에 비해 무한한 길이로 가정할 수 있는 충분히 긴 알루미늄 파이프를 사용하였다. 내부 물질로는 물, 기름, 에틸렌글리콜 세 가지 물질을 선정하였다. Table 1에 표적의 일반적 물성들을 측정한 결과를 기술하였다. 이들 물성들은 Eq.(2)의 계산에 사용되었다.

실험은 1500 × 500 × 920 mm의 수조에서 수행하였다. 수조의 벽면에는 수조 공간의 영향을 최대한 배제하기 위하여 흡음판을 설치하였다. 중심주파수가 1.05 MHz이고 대역폭(bandwidth)이 0.65 MHz인 음파 변환기(Panametrics V302)를 단일 송수신 방식으로 배치하고, 펄스 에코 방법으로 후방 산란 음압을 측정하였다. 음파 변환기와 표적 사이의 거리는 원거리 영역 조건을 만족시키는 200 mm로 설치하였다. 주파수 영역 상에서 음파 변환기의 중심 주파수를 중심으로 넓고 시간 영역 상에서 짧은 펄스를 발생시키기 위하여 펄스 리시버(Panametrics 5072PR)를 신호 발생기로 사용하였으며, 수신한 신호는 25 dB 증폭시켜 디지털 오실로스코프(LeCroy LT322)로 측정 및

저장하였다. 실험의 개략적인 배치도를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 5와 같이 오실로스코프에서 측정한 후방 산란 음압장은 시간 영역에서 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 시간적으로 앞서 수신되는 신호는 입사 신호와 매우 유사한 모양과 주파수 성분을 가진 경면 반향(specular echo) 부분이다. 경면 반향은 표적의 표면에서 순수하게 일어나는 반사 신호이므로 표적의 내부 특성을 거의 반영하지 않는 비공명 신호이다. 다음으로 입사 신호에 의하여 충격력을 받은 표적이 공명하면서 탄성 반향(elastic echo)이 긴 시간 동안 에너지를 소비하며 나온다. Ripoché *et al.*^[5]은 펄스 에코 방법으로 측정된 전체 반향의 시간 영역 신호에서 경면 반향만을 빼줌으로써, 표적의 음향 공명 신호만

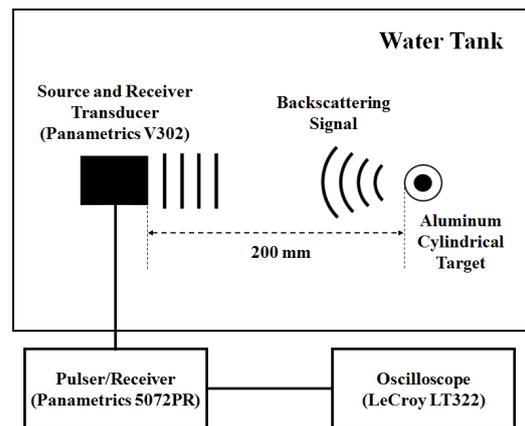


Fig. 4. Experimental setup to measure backscattering sound field from a cylindrical shell target.

Table 1. Physical parameters of targets.

Target	Outer diameter (mm)	Inner diameter (mm)	Inner materials	Sound speed (m/s)	Density (kg/m ³)
Target 1	8.05	4.40	Water	1445	999
Target 2	8.05	4.40	Oil	1471	820
Target 3	8.05	4.40	Ethylene glycol	1689	1132
Target	Shell materials	Longitudinal wave velocity (m/s)	Transverse wave velocity (m/s)	Density (kg/m ³)	
Target 1	Aluminum	6648	3108	2711	
Target 2					
Target 3					

Temperature : 10.5 °C

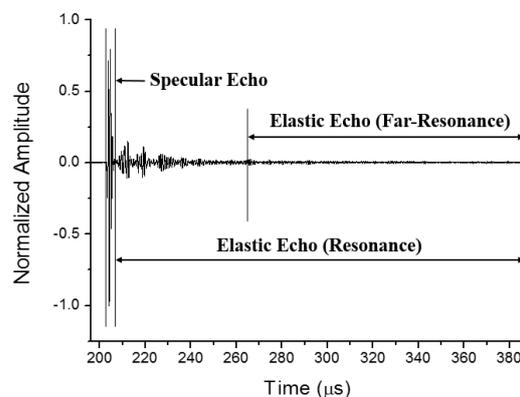


Fig. 5. Typical backscattering signal from a target. Specular echo, elastic echo (resonance) and elastic echo (far-resonance) are indicated. The signal amplitude is normalized by maximum amplitude.

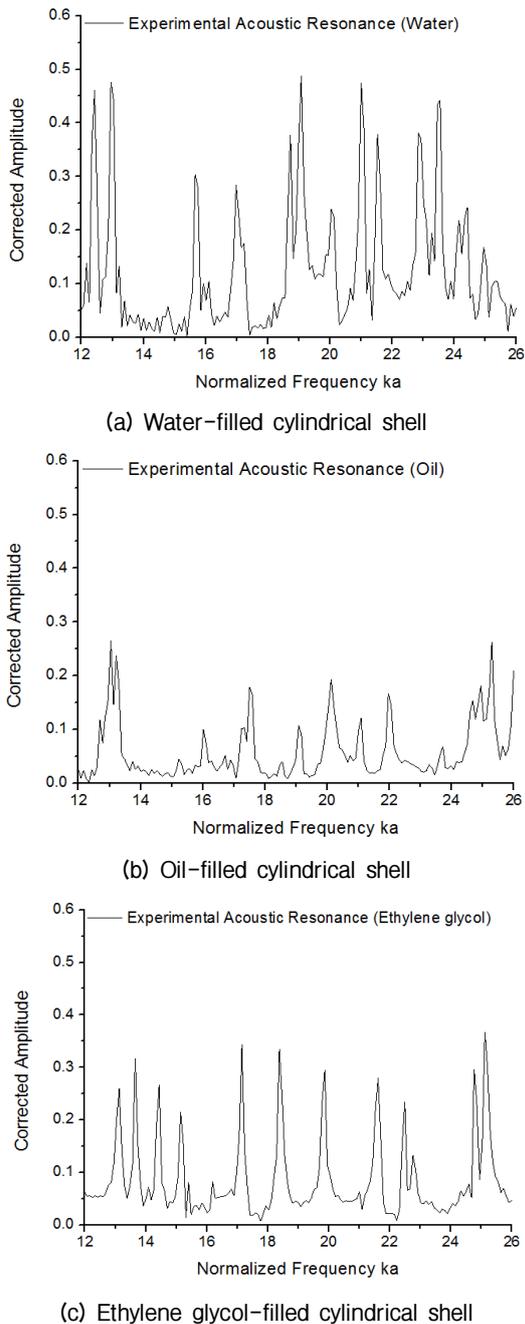


Fig. 6. Experimental acoustic resonance (far-resonance) spectra corrected by incident signal spectra.

을 분리하여 주파수 영역에서 관찰하는 방법을 제안하였다. 이를 MIIR(Method of Isolation and Identification of Resonances) 방법이라고 한다. MIIR 방법에서 이용되는 탄성 반향은 시간적으로 더 일찍 나와 여러 성분들이 섞여 있는 선행 응답과 감쇠가 덜하여 뒤쪽까지 꾸준히 나오는 성분들로부터 구성된 후행 응답으

로 나뉜다.^[6,8]

본 논문에서는 탄성 반향의 후행 응답만을 이용하여 MIIR 방법으로 후방 산란 음향의 음향 공명 스펙트럼을 얻어 내부 물질을 식별하는 데 활용하였다. 비교적 단순한 구성의 공명 특성이 나타나는, 경면 반향이 시작되는 시점으로부터 $65 \mu\text{s}$ 이후의 신호를 후행 응답으로 정하였다. 이 신호 구간을 Fig. 5에 “Elastic Echo (Far-Resonance)”로서 표시하였다. Fig. 6은 Table 1의 원통형 껍질 표적들에서 후방 산란된 음향 중 후행 응답만의 음향 공명 스펙트럼을 측정하여 입사 신호의 스펙트럼으로 나누어 음파변환기의 주파수 응답 특성을 제거해 낸 실험적 결과들이다.

V. 단일층 원통형 껍질의 내부 물질 식별

III장에서 제안한 알고리즘에 따라 내부 물질을 식별하였다. Fig. 7은 음향 공명 스펙트로그램에 측정된 후방 산란 음향 공명 피크를 중첩시킨 그림이다. 흰 가로선은 Fig. 6의 측정된 음향 공명 스펙트럼의 피크 위치를 나타낸 것이며, 흰 세로선은 피크가 가장 많이 대응되는 음속의 지점을 표시한 것이다. 측정된 음향 공명 스펙트럼의 피크 위치들이 이론적인 음향 공명 스펙트로그램과 대응되는 점을 모두 조사한 후 내부 물질의 예상되는 시도 음속에 따른 이들 점의 개수를 세어 가장 많이 대응되는 경우의 음속을 알아낼 수 있었다. 그 결과 내부 물질로 물을 넣은 표적의 결과는 1453 m/s 에서, 기름을 넣은 표적의 결과는 1487 m/s 에서, 에틸렌글리콜을 넣은 표적의 결과는 1688 m/s 에서 각각 이론적인 음향 공명 스펙트로그램과 가장 많이 대응하는 것을 확인하였다. 이들은 Table 1에 명시한 내부 물질의 음속과 매우 잘 일치하는 값이다.

VI. 결 론

단일층 원통형 껍질의 내부 물질에 따라 다양한 양상으로 나타나는 후방 산란 음향 공명 스펙트럼의 음속 의존성을 원통형 껍질의 내부 물질 식별에 활용하였다. 내부 물질 음속 변화에 따라 예측되는 이

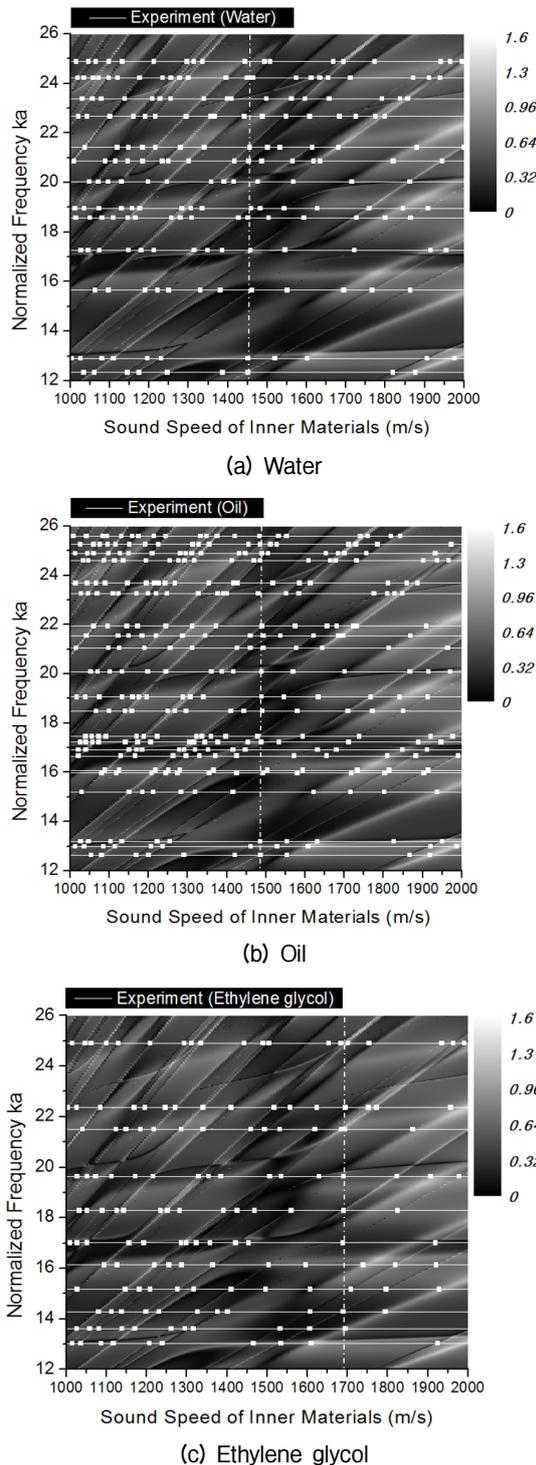


Fig. 7. Acoustic identification of the inner materials with measured acoustic resonance spectra and acoustic resonance spectrogram.

론적 음향 공명 피크 위치의 변화를 보여주는 음향 공명 스펙트로그램 위에 측정된 음향 공명 피크들을

중첩하여 예측한 음향 공명 피크 위치가 가장 많이 대응되는 내부 물질 음속을 찾았다. 이를 통해 표적의 내부 물질을 음향 식별할 수 있었다. 보다 복잡한 모양을 가진 표적의 음향 공명에 대해서도 선형 연구가 진행된 바 있으므로, 다른 모양의 표적에서도 산란 형태함수를 이용하여 구한 음향 공명의 음속 의존성을 활용하면 본 연구에서 제안한 방법론을 적용해 내부 물질의 음향 식별이 가능할 것이다.

References

1. R. D. Doolittle and H. Überall, "Sound scattering by elastic cylindrical shells," *J. Acoust. Soc. Am.* **39**, 272-275 (1966).
2. J. D. Murphy, E. D. Breitenbach, and H. Überall, "Resonance scattering of acoustic waves from cylindrical shells," *J. Acoust. Soc. Am.* **64**, 677-683 (1978).
3. E. D. Breitenbach, H. Überall, and K. B. Yoo, "Resonant acoustic scattering from elastic cylindrical shells," *J. Acoust. Soc. Am.* **74**, 1267-1273 (1983).
4. H. J. Yim, G. S. Hong, and J. T. Kim, "Analysis of Modulus and Phase of Resonance Scattered Elastic Waves from Cylindrical Fluid Scatterers" (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kor.* **20**, 62-70 (2001).
5. J. Riposte and G. Maze, "A new acoustic spectroscopy: the resonance scattering spectroscopy by the Method of Isolation and Identification of Resonances (MIIR)," in *Acoustic Resonance Scattering*, edited by H. Überall (Gordon and Breach, Philadelphia, 1992), pp. 69-103.
6. A. Tesei, W. L. J. Fox, A. Maguer, and A. Løvik, "Target parameter estimation using resonance scattering analysis applied to air-filled, cylindrical shells in water," *J. Acoust. Soc. Am.* **108**, 2891-2900 (2000).
7. Y. Fan, F. Honavar, A. N. Sinclair, and M. R. Jafari, "Circumferential resonance modes of solid elastic cylinders excited by obliquely incident acoustic waves," *J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 102-113 (2003).
8. M. Billy and G. Quentin, "Scattering by cylindrical targets using very short ultrasonic pulses and fourier analysis," in *Acoustic Resonance Scattering*, edited by H. Überall (Gordon and Breach, Philadelphia, 1992), pp. 105-121.

저자 약력

▶ 조 영 태 (Young-Tae Jo)



2011년 2월: 성균관대학교 자연과학부
물리학전공 학사 졸업
2011년 3월 ~ 현재: 성균관대학교 물리학과
석박사 통합과정

▶ 김 완 구 (Wan-Gu Kim)



2007년 2월: 성균관대학교 자연과학부
물리학 전공 학사 졸업
2011년 8월: 성균관대학교 물리학과
석사 졸업
2011년 9월 ~ 현재: 성균관대학교 물리학과
박사과정

▶ 윤 석 왕 (Suk Wang Yoon)



1985년 ~ 현재: 성균관대학교 물리학과
교수
1996년 ~ 현재: Acoustical Society of America,
Fellow
2004년 ~ 2008년: University of Cincinnati,
Dept. of Biomedical Engineering, Adjunct
Professor
2007년: 한국음향학회 회장
2010년 ~ 현재: 한국음향학회 명예회장