

이차원 푸리에 필터링을 이용한 수중음향 펄스 튜브에서의 평면파 반사계수 결정

Determination of Plane-wave Reflection Coefficient in Underwater Acoustic Pulse Tube Using Two-dimensional Fourier Filtering

김완구, 강희석, 윤석왕[†]

(Wan-Gu Kim, Hwi Suk Kang, and Suk Wang Yoon[†])

성균관대학교 물리학과 음향학연구실

(Received October 8, 2015; revised November 9, 2015; accepted November 16, 2015)

초 록: 물로 채워진 음향 펄스 튜브 내에는 가진 조건들에 따라 복잡한 형태의 음향 신호들이 형성될 수 있다. 이는 펄스 튜브를 이용해 저주파수 대역에서 평면파 반사계수를 측정하는 것을 어렵게 한다. 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics를 이용하여 튜브 벽이 가진되는 경우 펄스 튜브 내에 평면파 뿐 아니라 비평면파 모우드의 복잡한 음장이 발생됨을 보였다. 모우드 분리 방법인 이차원 푸리에 필터링으로 입사 또는 반사하는 평면파 모우드만을 각각 분리할 수 있었다. 이에 시간 게이팅을 적용하므로 음향 시편의 평면파 반사계수를 보다 정확하게 결정할 수 있게 하였다.
핵심어: 펄스 튜브, 모우드 분리, 이차원 푸리에 필터링, 평면파 반사계수

ABSTRACT: Complex acoustic signals can be formed in a water-filled acoustic pulse tube under some exciting conditions. It makes difficult to measure plane-wave reflection coefficient with the pulse tube for low frequency bands. In this study, using COMSOL Multiphysics we show that the tube wall excitation generates complex acoustic field of nonplanar mode as well as planar one. From such field incident or reflected planar mode can be decomposed respectively with a modal decomposition method, two-dimensional Fourier filtering. It makes possible to more accurately determine the plane-wave reflection coefficient of acoustic specimen with time gating.

Keywords: Pulse tube, Mode decomposition, Two-dimensional Fourier filtering, Plane-wave reflection coefficient

PACS numbers: 43.30.Xm, 43.20.Mv, 43.20.Ye, 43.58.Bh

1. 서 론

수중음향 펄스 튜브는 수중음향 소재의 저주파수 음향 특성을 검사하는 데에 사용되는 장치로서 평면파가 시편으로 입사되는 이상적인 실험 조건을 구현할 수 있다.^[1,2] 송신기의 진동이 튜브 벽으로 전달될 경우, 펄스 튜브 내에는 평면파 모우드 음향 신호 외에도 비평면파 모우드 음향 신호가 함께 발생한다. 이는 펄스 튜브 제작 및 활용에 어려움이 되어 왔다.

물로 채워진 튜브에는 첫 번째 차단주파수 이하에

서 ET0와 ET1 두 모우드가 발생할 수 있다. Wilson *et al.*^[3]의 결과에 의하면 스테인리스강 튜브의 벽두께와 튜브의 내측 반경이 같은 경우, ET0 모우드는 거의 평면파에 가깝게 된다. 그러나 ET1 모우드는 비평면파 모우드로 존재하게 되며, 두 모우드가 혼재되어 있으면 해석하기 어려운 복잡한 신호로 나타난다. 튜브 내에 평면파 모우드만 발생되도록 하기 위해서는 송신기가 튜브 벽으로부터 역학적으로 완전히 분리되어야 한다.^[4] 그러나 수중 가압 환경에서의 측정이 필요할 경우, 송신기를 지지하는 하우징을 튜브 벽에 단단히 장착할 필요가 있기 때문에 이러한 요건을 만족시키기가 쉽지 않다.

본 연구에서는 펄스 튜브 내 음향 신호에 모우드

[†]Corresponding author: Suk Wang Yoon (swyoon@skku.ac.kr)
Department of Physics, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon 16419, Republic of Korea
(Tel: 82-31-290-7043, Fax: 82-31-290-7055)

“이 논문은 2015년 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임.”

분리 방법을 적용하여 비평면파 모우드가 함께 발생하는 상황에서 평면파 반사계수를 결정하고자 한다. 이는 현실적으로 어려운 펄스 튜브 설계 요건을 완화시킬 수 있게 한다.

II. 수중음향 펄스 튜브 내 음장의 COMSOL 시뮬레이션

펄스 튜브 내에 형성되는 음장을 유한요소법 도구인 COMSOL Multiphysics를 이용하여 Fig. 1과 같이 시뮬레이션하였다. 펄스 튜브의 대칭성을 고려하여 2차원 축대칭으로 모델링하였고, 지배식은 음향-고체 상호작용, 과도해석 계산 모듈을 사용하였다. 이 모듈은 유체 영역에서의 음압과 고체 영역에서의 구조적인 변형을 상호 연결해주며, 시간의존 음향 모델링을 할 수 있게 한다. 튜브 벽의 재질은 SUS304L, 튜브 내부 유체는 담수로 설정하였다. 튜브 벽의 두께는 튜브의 내측 반경과 같도록 하였다. 송신기면은 외부 소스를 경계조건으로써 표현할 수 있게 하는 수직 가속도 경계조건 노드를 설정하여 구현하였으며 테두리가 고정된 형태로 진동한다고 가정하였다. 송신 신호는 중심주파수가 5 kHz인 가우시안 변조 신호를 사용하였다.

펄스 튜브 내에 비평면파 모우드가 평면파 모우드

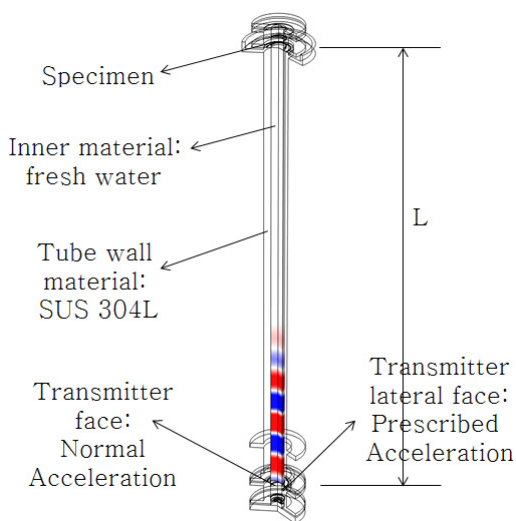


Fig. 1. Finite element modeling for underwater acoustic pulse tube with COMSOL Multiphysics.

와 함께 발생하는 튜브 벽이 가진되는 경우는 튜브 벽 쪽으로 진동이 잘 전달되도록 송신기와 하우징, 튜브 벽 사이에 틈이 없게 설정한 상태에서 송신기 측면에 지정 가속도 경계조건 노드를 설정하여 진동이 발생되도록 모델링하였다. 이 노드는 경계면 상에 특정 방향으로 임의의 가속도를 지정할 수 있게 한다. 비교를 위해 튜브 벽이 가진되지 않는 이상적인 경우는 오링 및 틈을 두어 튜브 벽 쪽으로 진동이 잘 전달되지 않도록 설정하고, 송신기 측면에도 진동 경계조건을 설정해주지 않았다.

신호의 공간적 길이가 길수록 파수 영역 신호의 길이는 짧아지기 때문에 충분히 긴 구간의 신호를 얻어야 파수-주파수 영역에서 서로 다른 모우드 간에 분리된 신호를 얻을 수 있다. 송신기에서 시편면까지의 길이 L 은 중심주파수가 5 kHz인 경우 이차원 푸리에 변환을 수행해 보았을 때 파수-주파수 영역에서 분리된 신호를 얻을 수 있었던 2848 mm로 정하였다.

III. 이차원 푸리에 필터링을 이용한 평면파 모우드 분리

펄스 튜브 내의 여러 모우드로 구성된 복잡한 음압 신호로부터 입사 또는 반사하는 평면파 모우드만을 각각 분리하기 위하여 이차원 푸리에 필터링[two-dimensional (2D) Fourier filtering]^[5,6]을 이용하였다.

공간-시간 영역 신호 $a(x,t)$ 의 필터링된 공간-시간 영역 신호 $b(x,t)$ 로의 이차원 푸리에 필터링은 다음 세 단계로 구성된다.

단계 1. 이차원 푸리에 변환: 공간-시간 영역 신호 $a(x,t)$ 를 이차원 푸리에 변환을 통하여 파수-주파수 영역 신호 $A(k,f)$ 로 변환.

단계 2. 파수-주파수 영역 이차원 필터링: $A(k,f)$ 에 이차원 필터 마스크 $H(k,f)$ 를 곱해서 파수-주파수 성분에 따라 차등적으로 증가되거나 감소되는 과정을 거쳐 필터링된 신호 $B(k,f)$ 를 구함.

단계 3. 이차원 역 푸리에 변환: $B(k,f)$ 를 다시 이차원 역 푸리에 변환하여 필터링된 공간-시간 영역 신호 $b(x,t)$ 를 구함.

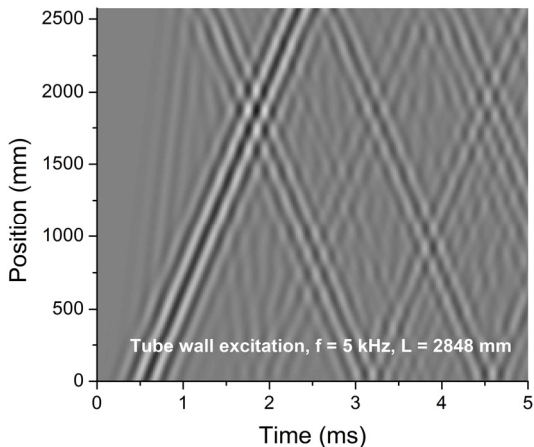
튜브 벽이 가진되는 경우에 대한 COMSOL 시뮬레

이선 결과에 이러한 이차원 푸리에 필터링의 단계들을 적용하였다. 튜브 축 상에 등간격으로 떨어진 256 개 지점에서 $20\ \mu\text{s}$ 의 샘플링 간격으로 40 ms 시간 동안의 음압을 측정함으로써 공간-시간 영역에서의 음압 신호를 얻었다. 측정 지점의 개수는 더 줄이는 것이 가능하다. 촘촘하게 측정할수록 높은 파수 영역까지 측정이 가능하지만 64개의 지점에서만 측정 하더라도 측정하고자 하는 신호의 최고 파수 약 7 m^{-1} 보다 높은 12.4 m^{-1} 파수까지 측정이 가능하다.

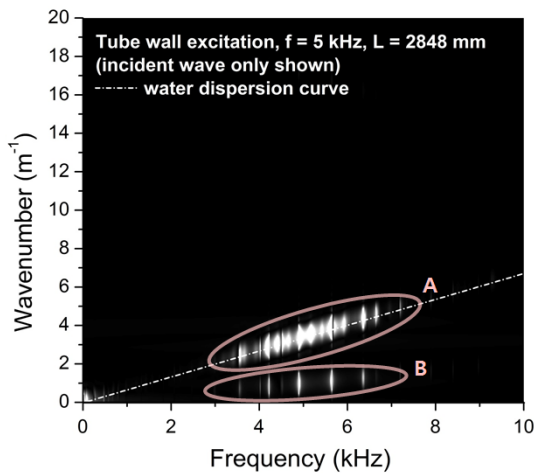
Fig. 2(a)는 튜브 벽이 가진되는 경우 튜브 축 상의 시간영역 신호들을 모두 이어 붙여서 공간-시간 영역에서 그레이 스케일 맵으로 나타낸 것이다. 밝은 부분은 양의 음압, 어두운 부분은 음의 음압을 나타

낸다. Fig. 2(b)는 공간-시간 영역 신호에 대해 이차원 푸리에 변환을 수행해 얻은 파수-주파수 영역 신호 중에서 입사파 영역만의 진폭을 보여주고 있다. 각각 A, B로 표시된 두 성분파가 위상속도 차에 의해 다른 영역 상에 나타나 구분이 가능하다. 점선은 물에서의 분산곡선이다. 측대칭 모우드의 위상속도가 튜브 내 유체 매질의 음속과 같은 것은 유체의 단면에 걸쳐서 종적 변위 진폭이 일정하고 횡적 변위 진폭은 0임을 의미한다.^[7] 이는 점선 주변에 나타나는 모우드가 평면파 모우드임을 의미한다.

Fig. 3(a)는 입사하는 평면파 모우드에 해당하는 영역의 신호만을 남겨두고 그 외부 영역의 크기 값을 모두 0으로 만들어 준 결과이다. Fig. 3(b)는 파수-주

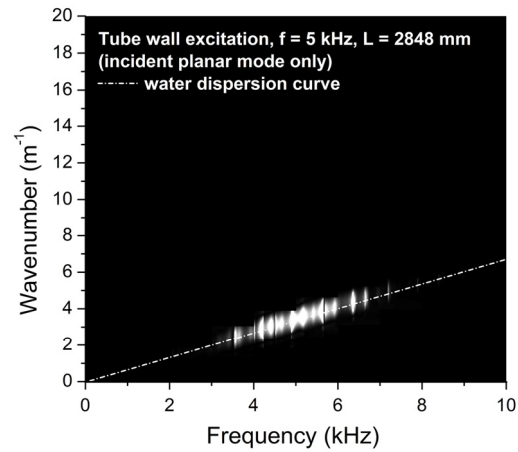


(a) Space-time domain signal.

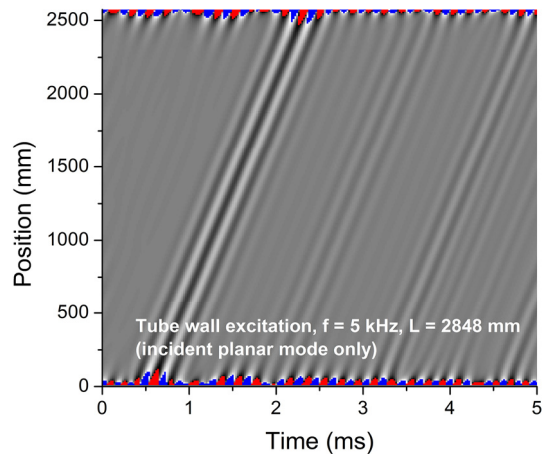


(b) Wavenumber-frequency domain signal.

Fig. 2. Grey scale maps of signals in Step 1 and Step 2 of 2D Fourier filtering when the tube wall is excited.



(a) Wavenumber-frequency domain signal.



(b) Space-time domain signal.

Fig. 3. Grey scale maps of signals in Step 2 and Step 3 of 2D Fourier filtering only for incident planar mode when the tube wall is excited.

파수 영역에서 필터링된 신호를 이차원 역 푸리에 변환하여 입사하는 평면파 모우드만의 공간-시간 영역 신호를 얻은 결과이다.

반사하는 평면파 모우드만의 공간-시간 영역 신호는 이차원 푸리에 변환 결과인 파수-주파수 영역 신호 중 반사파 영역의 신호에 대해서 동일한 과정을 수행해 얻을 수 있었다.

IV. 튜브 벽의 가진 유무에 따른 모우드 구성

튜브 벽이 가진되지 않는 경우에 대한 COMSOL 시뮬레이션을 수행하여 얻은 신호에 대해서도 III절에서와 동일하게 이차원 푸리에 필터링 단계들을 진행하였다. Fig. 4는 튜브 벽이 가진되지 않는 경우의 파수-주파수 영역 신호 중에서 입사파 영역만의 진폭을 보여주고 있다.

Fig. 5(a)와 (b)는 각각 튜브 벽이 가진되는 경우와 튜브 벽이 가진되지 않는 경우 튜브의 중간 위치에서의 시간영역 신호들을 나타낸다. 튜브 벽이 가진되는 경우는 평면파와 비평면파 모우드 신호 뿐 아니라 추가적인 평면파 모우드 신호가 중간 중간에 많이 섞여 있는 형태로 나타난다. 이는 튜브 벽이 가진되지 않는 경우 평면파 모우드의 순차적인 입사와 반사 신호 위주로만 나타나는 것과 대조적이다.

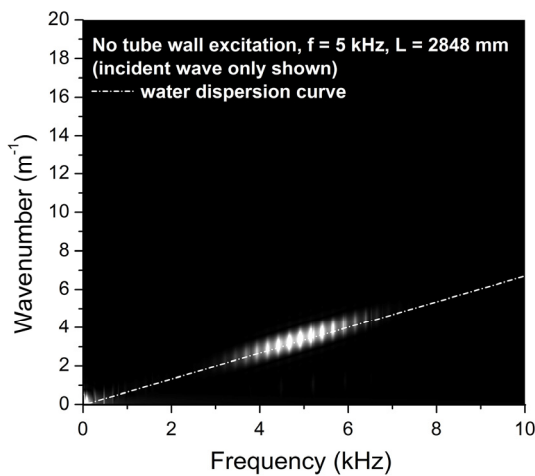
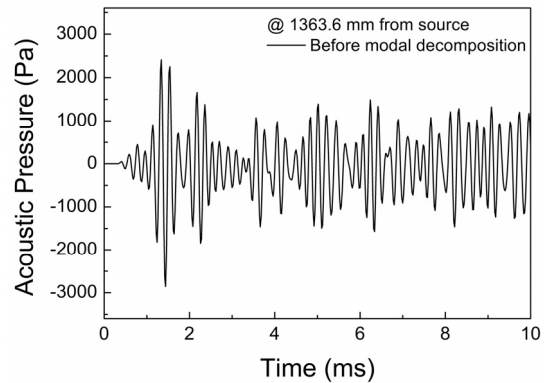
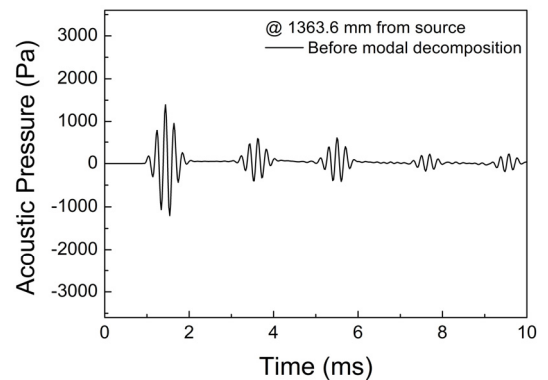


Fig. 4. Grey scale map of wavenumber-frequency domain signal for incident planar mode when the tube wall is not excited.

Fig. 6은 튜브 벽이 가진되는 경우에 이차원 푸리에 필터링을 통하여 모우드 분리하여 얻은 입사 또는 반사하는 평면파 모우드만의 시간영역 신호이다. 시간적으로 볼 때, Fig. 6(a)에서 실선 타원으로 표시된 신호가 처음으로 입사된 신호이고 그것이 시편에서 반사되어 나온 신호는 Fig. 6(b)에 점선 타원으로 표시된 신호이다. Fig. 6(b)에서 점선 타원으로 표시된 신호보다 앞서 나오는 신호는 속도가 빠른 비평면파 모우드가 반사될 때 일부가 평면파 모우드로 모우드 변환되어 발생된 것이다. 이는 공간-시간 영역에서 그레이 스케일 맵인 Fig. 2(a)로부터 알 수 있다. 이러한 신호는 처음으로 입사된 평면파 모우드 신호의 반사 신호와 중첩되어 나타날 수 있기 때문에 반사계수 결정에 있어서 오차요인이 될 수 있다. 중첩되는 정도는 튜브 내 위치에 따라 달라지므로, Fig. 2(a)를 통하여 신호들 간에 중첩되는 정도가 작

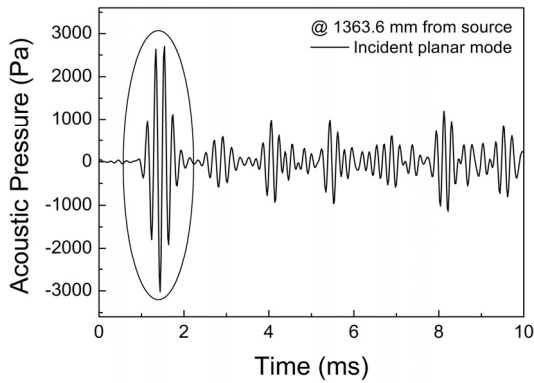


(a) Signal when the tube wall is excited.

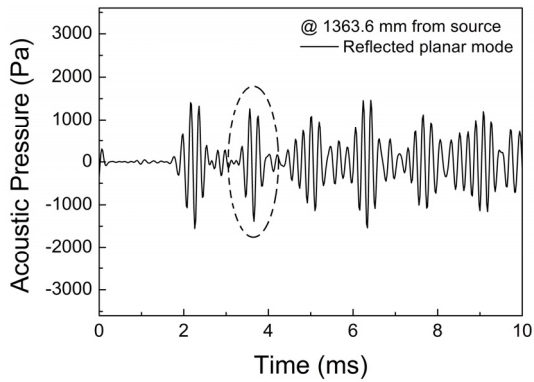


(b) Signal when the tube wall is not excited.

Fig. 5. Time domain signals before modal decomposition at 1363.6 mm from the source of the pulse tube.



(a) Incident planar mode.



(b) Reflected planar mode.

Fig. 6. Time domain signals of planar mode decomposed by 2D Fourier filtering at 1363.6 mm from the source of the pulse tube when the tube wall is excited.

은 위치를 선정하고 그 위치에서의 신호를 반사계수 분석에 사용함으로써 이러한 오차를 줄일 수 있다.

V. 분리된 평면파 모드 신호를 이용한 반사계수 결정

이차원 푸리에 필터링에 의해 분리된 입사 또는 반사하는 평면파 모드만의 신호는 비평면파 모드 신호가 배제되어 있으므로 정확하게 평면파 반사계수 결정에 필요한 신호만을 추출할 수 있다.

Fig. 6(a)와 (b)에서 실선 및 점선 타원으로 표시된, 처음으로 입사된 평면파 모드 신호와 그 반사 신호 두 신호만을 시간 게이팅을 통해 추출한 후 주파수 분석하여 주파수에 따른 반사계수를 결정하였다. 비교를 위하여, 튜브 벽이 가진되지 않는 경우에도

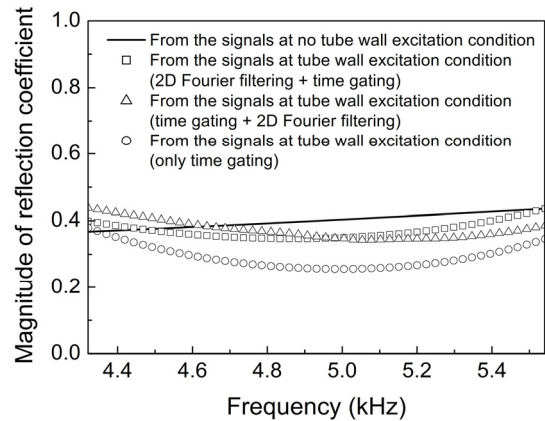


Fig. 7. Comparison of reflection coefficients obtained by three different methods. The solid line denotes the reflection coefficient from the signals at no tube wall excitation condition, used as reference solution.

Table 1. Comparison of root mean square errors over 3 dB bandwidth of reflection coefficients by three different methods.

Method	Root mean square error
2D Fourier filtering + time gating	0.04
Time gating + 2D Fourier filtering	0.05
Time gating without filtering	0.12

동일하게 시간 게이팅을 통해 첫 번째 입사파와 그 반사파를 추출하여 주파수에 따른 반사계수를 결정하였다.

Fig. 7에 분석한 반사계수들을 비교하였다. 실선은 튜브 벽이 가진되지 않는 경우로부터 얻은 기준 값의 반사계수이다. 사각형 심벌은 튜브 벽이 가진 되는 경우 이차원 푸리에 필터링 적용 이후 시간 게이팅을 적용해 얻은 반사계수, 삼각형 심벌은 튜브 벽이 가진되는 경우 시간 게이팅을 먼저 적용한 후에 이차원 푸리에 필터링을 적용하여 결정한 반사계수를 나타낸다. 원형 심벌은 튜브 벽이 가진되는 경우 이차원 푸리에 필터링 과정 없이 시간 게이팅만을 적용해 구한 반사계수를 나타낸다. Table 1에서는 튜브 벽이 가진되지 않는 경우로부터 얻은 반사계수 기준 값에 대한, 튜브 벽이 가진되는 경우 반사계수들의 오차를 서로 비교하였다. 이차원 푸리에 필터링과 시간 게이팅을 모두 적용하여 구한 두 경우의 반사계수는 시간 게이팅만을 적용해 구한 경우에

비하여 중심주파수 5 kHz 주변 3 dB 대역폭 주파수들에 걸쳐 구한 평균 제곱근 오차(root mean square error)가 반 이하로 작음을 보여준다.

VI. 결론

COMSOL 시뮬레이션으로부터 얻은 펄스 튜브 내 음압 신호를 모우드 분석한 결과, 튜브 벽이 가진되는 경우에는 비평면파 모우드가 보다 강하게 나타났다. 이렇게 비평면파 모우드가 함께 발생하는 상황에서도 이차원 푸리에 필터링을 통해 입사하는 평면파 모우드 또는 반사하는 평면파 모우드만을 각각 분리할 수 있었다. 분리한 평면파 모우드 신호에 시간 게이팅을 적용하여 처음으로 입사된 신호와 그 반사 신호만을 추출할 수 있었고, 비교적 정확하게 평면파 반사계수를 결정할 수 있었다. 이를 통해 수 증음향 펄스 튜브 활용 시 비평면파 모우드가 발생하는 문제를 어느 정도 해결할 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었다.

References

1. T. R. Howarth, V. K. Varadan, X. Bao, and V. V. Varadan, "Piezocomposite coating for active underwater sound reduction," *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 823-831 (1992).
2. B. Philip, J. K. Abraham, V. K. Varadan, V. Natarajan, and V. G. Jayakumari, "Passive underwater acoustic damping materials with Rho-C rubber-carbon fiber and molecular sieves," *Smart Mater. Struct.* **13**, N99-N104 (2004).
3. P. S. Wilson, R. A. Roy, and W. M. Carey, "An improved water-filled impedance tube," *J. Acoust. Soc. Am.* **113**, 3245-3252 (2003).
4. J. C. Wilbur, An impedance tube for the in-situ classification of bubbly liquids, (Master Thesis, Boston University, 2004).
5. L. Martinez, N. Wilkie-Chancellor, B. Sarens, and C. Glorieux, "2D Finite Impulse Response filters for surface wave identification," *IEEE International Ultrasonics*

Symposium Proceedings, 1598-1601 (2009).

6. D. Alleyne and P. Cawley, "The Interaction of Lamb Waves with Defects," *IEEE Trans. UFFC* **39**, 381-397 (1992).
7. 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).

저자 약력

▶ 김 완 구 (Wan-Gu Kim)



2007년 2월: 성균관대학교 자연과학부
물리학 전공 학사

2011년 8월: 성균관대학교 물리학과 석사
2011년 9월~현재: 성균관대학교 물리학과
박사과정

▶ 강 휘 석 (Hwi Suk Kang)



2014년 2월: 성균관대학교 물리학과 학사
2014년 3월~현재: 성균관대학교 물리학과
석박사 통합과정

▶ 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

2015년~현재: International Congress on
Ultrasonics, President