

원호형 변환기에 의해 관 벽에 발생된 탄성파의 유한요소 해석

Finite-Element Analysis for Elastic Waves Generated on a Pipe by an Open-Shell Transducer

김대승* · 김진오†

Dae Seung Kim and Jin Oh Kim

1. 서 론

관의 외벽에 부착되어 사용되는 초음파 유속 센서는 유체의 유동 손실을 야기시키지 않고, 운영과정에서 유지보수가 간단한 특징을 가지고 있다⁽¹⁾.

지름이 작은 관에서 유속을 측정하기 위해, Fig.1에 보인 방식을 고려한다. 기본모드에서 돔(dome) 형태로 진동하는 송신부의 변환기에 의해 관 벽이 가진되고, 이 때 관 벽에서 여러가지 모드의 탄성파가 발생된다. 탄성파가 유동의 영향을 받으며 관 벽을 따라 전파되는 도중에 수신부의 변환기에서 감지되어, 유동의 속도 정보가 제공된다.

본 논문은 빈 관과 유체가 채워진 관에서 관 둘레에 부착된 원호형 압전 변환기에 의해 관 벽에 발생된 탄성파에 대해서 유한요소법을 이용하여 과도 응답 해석을 한다. 유한요소 해석으로부터 얻은 파동전파 해로부터 2차원 고속 푸리에 변환을 이용하여 주파수-파동수 스펙트럼을 얻는다. 이 방법은 평판에서 전파하는 탄성파 해석에 적용된 바 있다⁽²⁾. 주파수-파동수 스펙트럼을 관 벽에서 전파하는 탄성파 해석에 대한 이론⁽³⁾으로 계산한 주파수-파동수 관계의 분산곡선과 비교하여 해석 결과를 검증하였다.

2. 탄성파 해석 모델

Fig. 1에 보인 바와 같이, 관 둘레에 부착된 두 쌍의 원호형 변환기 중에서 한 쌍은 관 벽에 탄성파를 발생시키는 액추에이터로 사용되고, 다른 한 쌍은 탄성파를 감지하는 센서로 사용된다. 이 변환기의 안쪽 곡률 반지름과 바깥쪽 곡률 반지름은 각각 8.0 mm와 10.2 mm이고, 폭은 14.0 mm이며 원주각은 $170 \pm 0.5^\circ$ 이다. 변환기에 사용된 재질은 EDO사의 EC64 세라믹이다. 관의 안쪽 반지름과 바깥쪽 반지름은 각각 7.0 mm와 8.0 mm이고, 사용된 재질

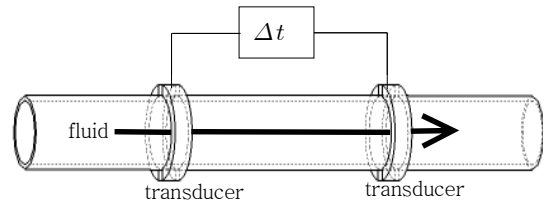


Fig.1 Ultrasonic flowmeter composed of open-shell transducers

은 Aluminum 1100-H14이다.

Fig. 1에 보인 해석 대상에 대해서 액추에이터로부터 발생한 탄성파가 관 벽에서 전파하는 양상을 관찰하기 위해서 액추에이터와 관을 모델링을 하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

경계 조건은 $z = 0$ 인 지점에서 축방향 변위 w 를 구속하고, 압전 변환기와 관이 접촉하는 면에서 미끄럼 경계 조건을 주었다. 그리고 이 접촉면에서의 전압을 0으로 설정하고, 원호 바깥 면에 사인 함수 형태의 펄스 전압신호를 입력하였다. 전압신호를 입력할 때, 전압신호의 중심주파수는 변환기에서 발생하는 진동 변위를 크게 하기 위해 변환기의 기본모드 공진주파수와 같도록 설정한다. 이를 위해 변환기만 모델링하고, 조화가진 응답 해석을 통해 임피던스 곡선을 구한다. 첫 번째 임피던스 극소점에서 기본모드 공진주파수를 얻는다.

3. 해석 결과

Fig. 2에 보인 해석 모델에서 음향 요소인 Acoustic 30을 제거해 빈 관에 대해서 파동 전파 해석을 수행하였다. 반경방향 좌표 r 이 8 mm 이고 원주방향 좌표 θ 가 90° 인 지점에서 축방향 좌표를 따라 1 mm 간격으로 반경방향

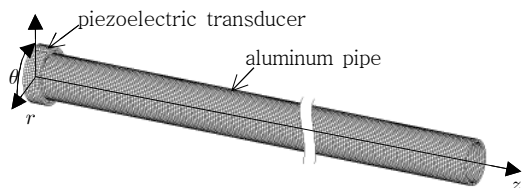
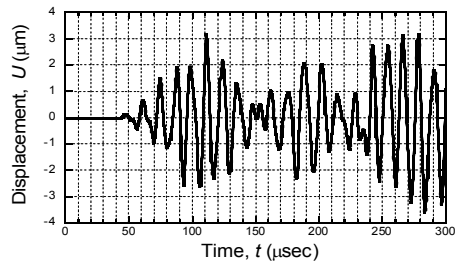


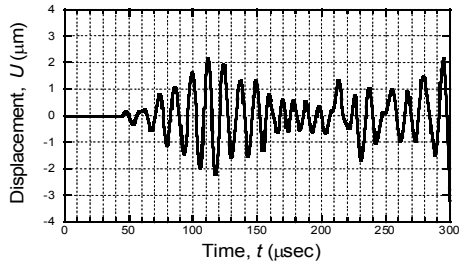
Fig. 2 Finite-element analysis model

† 교신저자; 숭실대학교 공과대학 기계공학과
E-mail : jokim@ssu.ac.kr
Tel : (02) 820-0662, Fax : (02) 820-0668

* 숭실대학교 대학원 기계공학과



(a) empty pipe



(b) water-filled pipe

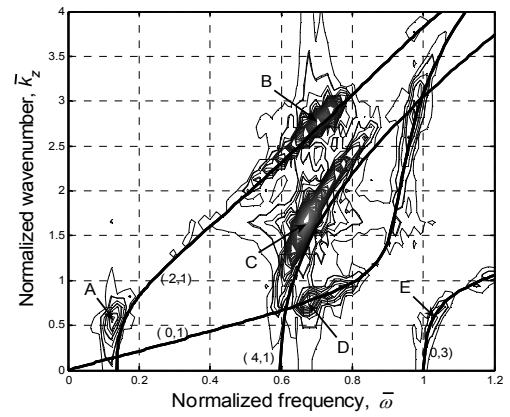
Fig. 3 Waveform of a displacement signal

변위 신호 파형을 얻어 축방향 좌표가 234 mm인 지점에서 추출된 반경방향 신호를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 마찬가지로, 물이 채워진 관에 대해서도 파동 전파 해석을 수행해서, 축방향 좌표가 234 mm인 지점에서 추출된 반경방향 변위 신호를 Fig. 3(b)에 나타내었다.

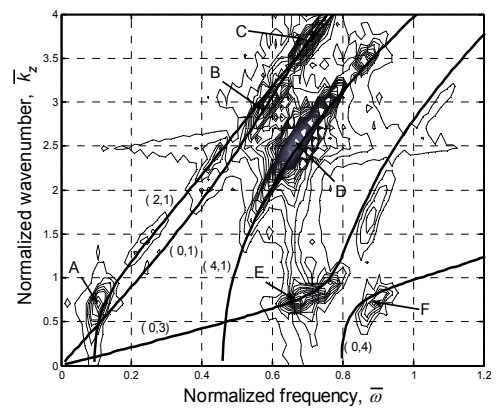
Fig. 3의 변위신호 파형에서는 전파하는 파동의 진동모드를 알 수가 없다. 관 벽에서 전파하는 파동의 진동모드를 구별하기 위해서, 주파수-과동수 스펙트럼 분석을 이용한다. 이를 위해, 빈 관과 유체가 채워진 관에 대해서, 축방향으로 1 mm 간격으로 400개의 지점을 택하고, 0부터 300 μsec 까지 0.1 μsec 의 시간 간격으로 3000개의 시점을 택하여, 각 지점과 시점에서 획득된 반경방향 변위 데이터로부터 400×3000 행렬을 구성하였다. MATLAB 6.5의 2차원 고속 푸리에 변환 함수인 fft2를 이용하여 주파수-과동수 스펙트럼을 얻었고, 빈 관과 물이 채워진 관에 대한 결과를 각각 Fig. 4의 (a)와 (b)에 등고선으로 나타내었다. 그리고 Fig. 4 (a)와 (b)에 나타낸 굵은 실선은 이전에 보고된 이론을 이용해서 관 벽에서 전파하는 탄성파에 대한 주파수에 따른 과동수를 계산한 결과이다.

4. 결 론

원호형 압전 변환기에 의해 관 벽에 발생된 탄성파에 대해서 유한요소법을 이용해 파도 응답 해석을 하였다. 해석 결과로부터 반경방향 변위 데이터를 추출하고, 이를 2차원 고속 푸리에 변환을 해서 주파수-과동수 스펙트럼을 얻었



(a) empty pipe



(b) water-filled pipe

Fig. 4 Comparison of two-dimensional FFT spectrum with a theoretically calculated result

(Theory : ———, FEM : ———)

다. 그 결과를 이전에 보고된 이론으로 계산한 결과와 비교하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- (1) L. C. Lynnworth, Ultrasonic Measurements for Process Control : Theory, Techniques, Applications, Academic Press, Boston, 1989, Chapter 4.
- (2) F. Moser, L. J. Jacobs, J. Qu, "Modeling elastic wave propagation in waveguide with finite element method", NDT&E International, Vol. 32, No. 4, pp. 225-234, 1999.
- (3) C. R. Fuller, F. J. Fahy, "Characteristics of wave propagation and energy distribution in cylindrical elastic shells filled with fluid", Journal of Sound and Vibration, Vol. 81, pp. 501-518, 1982.