

# 전자기 음향 연성 현상을 이용한 금속 배관의 비접촉 굽힘 진동 모달 테스트

## Noncontact Flexural Vibration Modal Testing of Metallic Cylinders Using the Coupled Electromagnetic Acoustic Principle

박찬일† · 이선호\* · 김윤영\*  
Chan Il Park, Sun Ho Lee and Yoon Young Kim

### 1. 서론

굽힘 진동(flexural vibration)은 축 또는 배관 구조물에 외력이 가해지거나 회전 시 불평형 질량 등이 존재할 경우 지배적으로 나타나는 진동 양상이다. 이러한 진동 특성을 효율적으로 파악하여 축 또는 배관 구조물의 구조 진단에 적용하는 것은 매우 중요한 일이다.

일반적으로 굽힘 진동은 충격 해머, 가진기, 가속도계, 스트레인 게이지 등을 이용한 접촉식 방식으로 양상 파악이 가능하다. 그러나 이러한 방식은 지중에 매설된 배관이나 단열재로 둘러 쌓인 배관 등 직접적인 접근이 어려운 경우에는 적용이 힘들며, 장치의 부착으로 인한 부가 질량 등의 영향으로 정확한 진동 특성 파악이 어렵다. 이러한 접촉식 방식의 한계를 극복하고자 최근에는 레이저 변위계, 와전류식 변위 센서, 전자기 음향 트랜스듀서, 자기 변형 트랜스듀서 등 굽힘 진동을 발생시키고 측정하기 위한 다양한 비접촉식 방식이 제안되었다.<sup>(1-3)</sup> 그러나 기존의 비접촉식 방식은 접촉식 방식에 비해 가진력이 충분하지 않아 상대적으로 무게가 가벼우며 크기가 작은 소형 구조물의 굽힘 진동 시험에 주로 적용되어 왔다.

본 연구에서는 축 또는 배관 구조물에서 비접촉으로 굽힘 진동을 발생시키고 측정하여 효율적으로 굽힘 진동 모달 테스트를 수행하는 방식을 제시하고자 한다. 제안된 방식은 전자기 음향 연성 현상을 이용하여 금속 배관에서 비접촉으로 굽힘 진동을 발생시키고 측정할 수 있으며, 출력을 개선하여 낮은 주파수 영역에서도 굽힘 진동 특성 추출이 가능하다. 일련의 실험을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증하

였으며 배관의 굽힘 진동 모달 테스트를 수행하여 굽힘 방향의 고유 진동수와 모드 형상을 실험적으로 측정하였다.

### 2. 비접촉식 굽힘 진동 트랜스듀서

전자기 음향 연성 현상(coupled electromagnetic acoustic principle)을 이용한 비접촉 초음파 발생 및 측정에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. 최근 Han 등<sup>(3)</sup>에 의해 배관의 굽힘 진동 측정 사례가 소개되었으나, 전자기 음향 트랜스듀서를 이용한 축 또는 배관 구조물에서의 굽힘 진동 가진에 관한 사례는 보고된 바 없다.

이에 본 연구에서는 저주파 영역에서도 적용이 가능한 새로운 형상의 전자기 음향 트랜스듀서를 제안하였다. 제안된 트랜스듀서는 Fig. 1 과 같이 멀티 루프(multi-loop)를 지닌 코일과 두 개의 영구 자석으로 구성된다. Fig. 1 에서와 같이 금속 배관 주변에 제안된 트랜스듀서를 설치하여 코일에 교류를 흘리게 되면 주변의 동자기장이 생성된다. 금속 배관 내부에서는 이 자기장의 변화에 반대되는 방향의 자기장을 만들기 위한 와전류(eddy current)가 배관의 둘레 방향으로 발생한다. 이때 발생한 와전류와 영구 자석에 의한 정자기장 모두에 수직한 방향으로 로렌츠 힘(Lorentz force)이 발생되어 금속 배관에 굽힘 진동을 일으키게 된다.

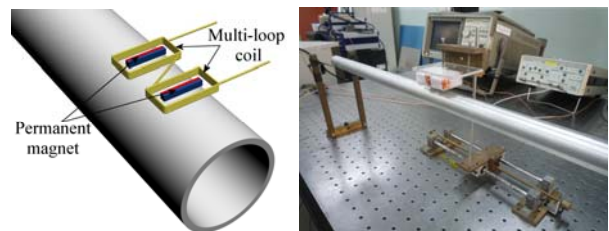


Fig. 1 Schematic diagram of the proposed transducer having a multi-loop coil and permanent magnets.

† 서울대학교 정밀기계설계공동연구소  
E-mail : 21cforce@idealab.snu.ac.kr  
Tel : (02) 880-7130, Fax : (02) 872-5431  
\* 서울대학교 기계항공공학부, 차세대자동차연구센터

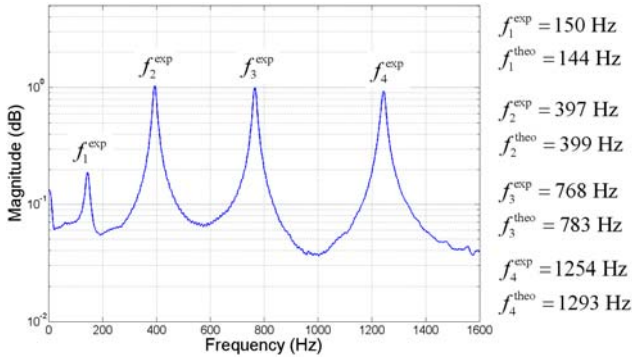


Fig. 2 Frequency response function of a flexural vibration measured by proposed transducers.

이와는 반대로, 금속 배관의 굽힘 진동에 의한 동적 변형과 영구 자석에 의한 정자기장에 의해 동자기장이 형성되며 이를 통해 야기된 전압을 코일이 측정하여 굽힘 진동의 측정이 가능하게 된다.

### 3. 굽힘 진동 모드의 모달 파라미터 추출

제안된 트랜스듀서의 성능을 검증하기 위해 금속 배관에서 비접촉 굽힘 진동 시험을 수행하였다. 본 실험에서는 외경 25 mm, 두께 2 mm, 길이 1000 mm의 알루미늄 배관이 사용되었다. 배관의 양단은 탄성줄로 지지하여 양단 자유단 상태를 구현하였다. 굽힘 진동을 발생시키고 측정하기 위해 배관의 끝단에서 각각 250 mm, 600 mm 떨어진 지점에 가진용, 측정용 트랜스듀서를 설치하였다.

굽힘 진동을 발생시키기 위해 파워 앰프에서 증폭된 120  $\mu$ s 폭의 사각파를 가진용 트랜스듀서에 입력하였다. 이 때 입력된 신호와 측정용 트랜스듀서에서 측정된 신호를 이용하여 주파수 응답 함수를 계산하였으며 그 결과는 Fig. 2와 같다. Fig. 2의 결과에서와 같이 실험을 통해 구한 고유 진동수가 이론적인 고유 진동수와 매우 유사하므로, 본 연구에서 제안한 방법이 굽힘 방향의 고유 진동수를 구하기에 적합함을 알 수 있다.

다음으로 고유 모드를 추출하기 위해 배관의 길이 방향으로 50 mm 간격으로 가진점을 설정하고 한 지점에 진동 측정부를 설치하여 신호를 측정하였다. Fig. 3에는 제안한 방식을 이용하여 실험적으로 얻은 굽힘 방향 모드 형상을 이론적인 고유 모드 형상과 정규화하여 비교하여 놓았다. 그림에서 왼은 실험적인 모드 형상을, 실선은 이론적인 모드 형상을 나타낸다. 이를 보면 제안된 트랜스듀서를 이용하여 얻어진 실험 모드 형상이 이론 모드 형상과 잘 일치함을 알 수 있다.

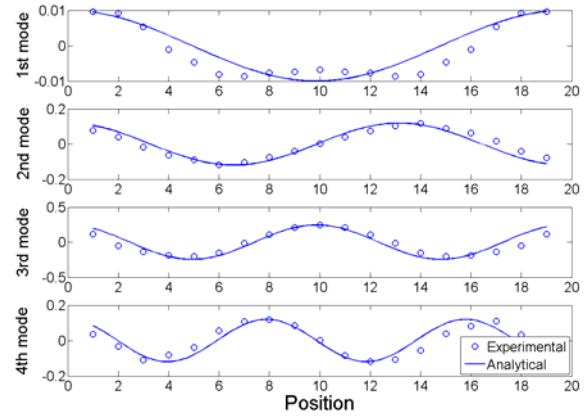


Fig. 3 Mode shapes measured by the suggested method (hollow circles) and theoretical mode shapes (solid lines).

## 4. 결론

본 논문에서는 금속 배관의 효율적인 굽힘 진동 시험을 위한 새로운 비접촉식 트랜스듀서를 소개하였다. 제안된 트랜스듀서는 멀티루프 코일과 영구 자석으로 구성되며 전자기 음향 연성 현상을 이용하여 금속 구조물에서 비접촉으로 굽힘 진동을 발생시키고 측정할 수 있었다. 또한, 제안된 가진 방법은 비교적 큰 출력을 낼 수 있기 때문에 배관 구조물도 효율적으로 가진할 수 있었다. 일련의 실험을 통해 제안된 방식의 성능을 검증하였으며 배관 구조물의 비접촉 굽힘 진동 모달 테스트를 통해 타당성을 검증하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업 (과제번호: 2009-0083278)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Castellini, P., Revel, G. M. and Scalise, L., 2004, "Measurement of Vibrational Modal Parameters using Laser Pulse Excitation Techniques", *Measurement*, Vol. 35, pp. 163~179.
- (2) Sodano, H. A., 2006, "Non-contact Eddy Current Excitation Method for Vibration Testing", *Exp. Mech.*, Vol. 46, pp. 627~635.
- (3) Han, S. W., Kim, Y. Y., 2006, "Magnetic Sensor for the Noncontact Measurement of Flexural Vibrations of a Nonferromagnetic Metallic Hollow Cylinder", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, p. 085105.