

전자기 음향 연성 원리를 이용한 비자성 금속 배관의 비접촉 비틀림 진동시험

Noncontact torsional vibration test of nonferromagnetic metallic pipes using the coupled electro-magnetic-acoustic principle

김홍진* · 박찬일** · 김윤영†

Hongjin KIM, Chan Il PARK, and Yoon Young KIM

1. 서 론

원기동 형태의 구조물은 다양한 산업 영역에서 구동축, 구조용 보, 그리고 파이프 등으로써 널리 사용되고 있다. 이러한 원기동 형태 구조물의 진동모드 중에서 비틀림 진동 특성과 관련된 정보는, 특히 회전축의 안정성 및 구조 건전성 진단기술(Structural Health Monitoring)에 유용하다.

일반적으로 비틀림 진동은 비틀림 해머를 이용한 접촉 방식으로 인가하고, 비틀림 레이저 변위계(Torsional Laser Vibrometer)를 이용⁽¹⁾하여 비접촉 방식으로 측정한다. 하지만 비틀림 해머를 이용할 경우, 순수한 비틀림 진동을 가하는 것이 어렵기 때문에 비틀림 모드 특성의 정확한 추출이 어려운 것이 사실이다. 한편 최근에 Cho 등⁽²⁾이 개발한 자기변형을 이용한 트랜스듀서를 이용하면 비틀림 진동의 인가 및 측정이 비접촉 방식으로 가능하다. 이 방식은 트랜스듀서가 구조물에 직접 접촉하지는 않지만, 구조물에 강자성체 패치와 영구자석을 부착해야 하는 단점이 있다.

따라서 우리는 본 연구에서, 전자기 음향 연성 현상을 이용하여 대상체인 축 또는 배관에 어떤 것도 부착하지 않은 상태에서 비접촉으로 비틀림 진동을 발생시키고 측정하는 비접촉식 비틀림 진동 모달 테스트 기법을 제안하고자 한다. 제안한 방식이 낮은 주파수부터 상당히 높은 주파수 영역에서 유용하다는 점을 일련의 실험을 통하여 밝혔으며, 얻은 비틀림 진동 모달 테스트 결과를 이론적으로 구한 결과와 비교하였다.⁽³⁾

2. 원 리

전자기 음향 연성 현상(coupled electromagnetic acoustic principle)을 이용하여 비접촉으로 파동을 가진 및 측정하는 많은 연구들이 이루어져 왔다.⁽⁴⁻⁶⁾ 특히 Johnson 등⁽⁶⁾은 전자기 음향 트랜스듀서를 이용하여 200 kHz 이상의 고주파 영역에서 원형단면을 가진 금속 봉재의 비틀림 공진 주파수를 측정할 바 있다. 하지만 축 또는 배관 구조물에서 전자기 음향 트랜스듀서를 이용해 기본 주파수를 포함한 낮은 주파수의 비틀림 진동을 가진 및 측정하고, 그 고유 모드를 추출한 사례는 아직 보고된 바 없다.

이에 본 연구에서는 저주파 영역에서도 적용이 가능한 새로운 형상의 전자기 음향 트랜스듀서를 제안하였다. 제안한 트랜스듀서는 Fig. 1 과 같이 8 자형 코일 한 쌍과 두 개의 영구 자석으로 구성된다. 이 트랜스듀서를 Fig. 1 에서와 같이 금속 배관의 상하로 설치하고 코일에 교류 전류를 인가하면, 코일 주변에 동자기장이 생성된다. 금속 배관 내부에는 이 자기장의 변화와 반대되는 방향으로 자기장을 형성하기 위한 와전류(eddy current)가 배관의 축 방향으로 발생하고 이 와전류와 영구 자석에 의한 정자기장 모두에 수직한 방향, 즉 배관의 둘레 방향으로 로렌츠 힘(Lorentz force)이 발생하게 된다. 이 때 배관에 상하로 설치한 트랜스듀서에 인가하는 교류전류의 방향을 조정하여, 발생하는 로렌츠 힘의 방향이 반대가 되도록 하면 금속 배관에 순수한 비틀림 진동이 일어나게 된다.

측정부에서는 이와는 반대로, 금속 배관의 비틀림 진동에 의한 동적 변형과 영구 자석의 정자기장에 의해 배관 내부에 전류가 발생하게 된다. 이 전류에 의한 동자기장으로 인해 코일에 유도된 전압을 측정하여 비틀림 진동의 측정이 가능하게 된다.

† 교신저자; 서울대학교 기계항공공학부

차세대 자동차 연구센터

E-mail: yykim@snu.ac.kr

Tel: (02) 880-7154, Fax: (02) 872-5431

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 한국원자력안전기술원

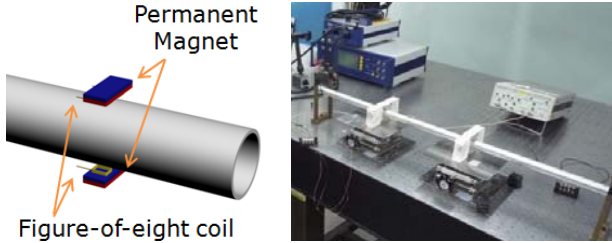


Figure 1. Schematic of the proposed transducer having a pair of figure-of-eight coil and two permanent magnets.

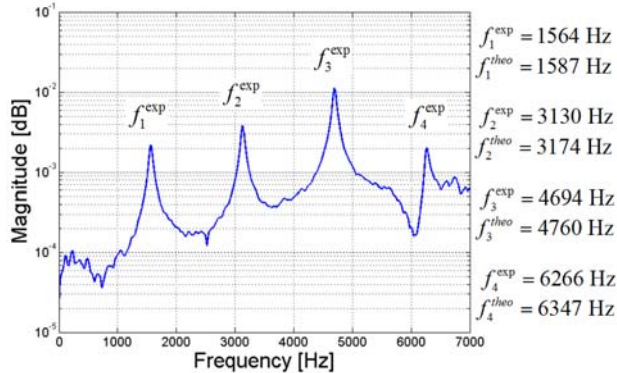


Figure 2. Frequency response function of torsional vibration actuated and measured by proposed transducers.

3. 실험

제안한 트랜스듀서의 성능을 검증하기 위해 비자성 금속 배관에서 비접촉 비틀림 진동 시험을 수행하였다. 본 실험에서는 외경 25 mm, 두께 2 mm, 길이 1000 mm의 알루미늄 배관을 사용하였다. 배관의 양단은 탄성줄로 지지하여 양단 자유단 상태를 구현하였으며, 비틀림 진동을 발생시키고 측정하기 위해 배관의 한쪽 끝단에서 각각 300 mm, 600 mm 떨어진 지점에 가진용, 측정용 트랜스듀서를 설치하였다.

비틀림 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. Figure 2의 결과로부터, 제안한 트랜스듀서를 이용하여 구한 고유진동수와 이론적인 고유진동수가 매우 유사함을 확인할 수 있다.

다음으로 고유 모드를 추출하기 위해 배관의 한 지점에 가진점을 설정하고 길이 방향으로 50 mm 간격으로 측정점을 변경해 가면서 진동 신호를 측정하였다. 제안한 방식을 이용하여 실험적으로 구한 비틀림 진동 모드 형상을 정규화하여 이론적인 고유 모드 형상과 비교해 보았다 (지면상 그림 생략). 본 실험을 통해 구한 모드 형상이 이론으로 구한 모드 형상과 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 비접촉식 트랜스듀서를 이용하여 비자성 금속 배관의 효율적인 비틀림 진동 시험을 수행하는 새로운 기법을 소개하였다. 이 기법의 핵심은 전자기 음향 원리를 이용한 트랜스듀서 제작 기술이다. 본 연구에서는 8자형 코일 한 쌍과 특정 방향으로 인가되는 자기장을 갖는 두 개의 영구자석 배열로 구성되는 트랜스듀서를 개발하였다. 일련의 실험을 통해 제안한 방식의 타당성을 검증하고 성능을 평가하였다.

후기

본 연구는 과학기술부 창의적 연구 진흥 사업 (과제번호: 2010-0019241)과 WCU(과제번호: R31-2009-000-10083-0)의 지원을 받은 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Liu, T. Y., Berwick, M., and Jackson, D. A., 1992, "Novel fiber-optic torsional vibrometer", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 63, pp. 2164-2169
- [2] Cho, S. H., Han, S. W., Park, C. I., and Kim, Y. Y., 2007, "High frequency torsional modal testing of a long cylinder by magnetostriction", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, 071918.
- [3] Blevins, Robert D., 1979, "Formulas for natural frequency and mode shape", Krieger publishing company.
- [4] Kawashima, K., 1976, "Experiments with two types of electromagnetic ultrasonic transducers", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 60, pp. 365-373.
- [5] Johnson, W., Norton S., Bendec, F., and Pless R., 1992, "Ultrasonic spectroscopy of metallic spheres using electromagnetic-acoustic transduction", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, pp. 2637-2642.
- [6] Johnson, W., Auld, B. A., and Alers, G. A., 1994, "Sepctroscopy of resonant torsional modes in cylinder rods suing electromagnetic-acoustic transduction", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 95, pp. 1413-1418.