

토목구조물의 건전성감시를 위한 Lamb파의 적용성 연구

A Research on the Applicability of Lamb Wave to Structural Health Monitoring of Civil Structures

김용한* · 박현우** · 이해성*** · 손 훈**** · 손만길*****

Kim, Yong Han · Park, Hyun Woo · Lee, Hae Sung · Sohn, Hoon · Son, Man Gil

1. 서론

공용기간동안 구조물의 자기 수명까지 본연의 기능을 수행할 수 있도록, 지속적인 건전성 모니터링은 LCC(Life Cycle Cost)측면에서 매우 중요하다. 특히, 국부적인 손상을 추정하는 기법으로서, UT(초음파 탐상법), RT(방사선투과법), MT(자분탐상법)등이 실제 적용되고 있으나, UT의 경우 비용이 고가이며, 모두 실험실 내지는 현장에서 기술자에 의해 직접 작업을 하는 방법이므로, 지속적인 모니터링에 활용하기에는 어려운 실정이다.

최근 들어, 센서기술, MEMS기술, 그리고 IT기술 등이 비약적으로 발전하면서 이들 첨단기술을 활용한 구조물 건전성 평가기법이 기계, 항공우주, 토목 등 관련분야에 광범위하게 도입되고 있다. 항공우주분야의 경우, 미 국방부와 항공우주국(NASA)를 비롯한 여러 연구기관들에서 고가의 무인전투기와 우주왕복선에 사용되는 날개판과 접합부분의 손상을 탐지하기 위해 스마트 능동센서(Smart active sensor)를 사용한 구조물 건전성평가기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 왔다.

특히, 항공기의 날개의 주재료로 쓰이는 합성판(composite plate)의 경우 Lamb파를 이용하여 육안으로 식별이 어려운 미세 균열과 박리(delamination)와 같은 조기 손상을 감지할 수 있다. 합성판은 얇고 형상이 단순하여 Lamb파의 생성에 적절하나, 토목에서 사용되는 판 구조물의 경우 두께와 복잡한 형상으로 인해 발생한 Lamb파의 확산성 및 다중모드성 때문에 바로 적용하기가 어렵다. 이러한 특성을 감안하여, 이 논문에서는 Lamb파의 기본적 원리 및 특징을 분석하여, 효율적인 실험을 위한 기초적인 방법론을 소개하고자 한다.

2. Lamb파 해석 방법론

Lamb파는 한 방향이 유한한 판의 내부의 파 전달 문제인 유도파(Guided wave)의 일종으로, 식(1)과 같이 등방성 탄성문제인 Navier 식으로부터 유도된다 [Fung, 1965].

$$(\lambda + \mu)\nabla\nabla \cdot \mathbf{u} + \mu\nabla^2\mathbf{u} = \rho \frac{\partial^2\mathbf{u}}{\partial t^2} \tag{1}$$

*정회원.(주)유신 코퍼레이션 차장·공학석사·E-mail: yhkim88@yooshin.co.kr -발표자
 **정회원.서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원·공학박사· E-mail: hwpark91@snu.ac.kr
 ***정회원.카네기멜런 대학교 토목환경공학과 조교수·공학박사· E-mail: hsohn@andrew.cmu.edu
 ****정회원.서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수·공학박사· E-mail: chslee@plaza.snu.ac.kr
 *****정회원.(주)에스코테크놀로지 이사·토목구조기술사·E-mail: mgson@escotech.co.kr

여기서, 변위장 벡터 \mathbf{u} 는 팽창과 회전에 대한 성분으로 구성되는 Helmholtz 식으로 가정한다 [Fung, 1965].

$$\mathbf{u} = \nabla\phi + \nabla \times \mathbf{H}, \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \tag{2}$$

식 (2)의 $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ 는 탄성체가 회전에 의해 부피의 변화가 발생하지 않는 조건식이고, 식 (2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 아래와 같다.

$$\nabla^2\phi = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2}, \quad \nabla^2\mathbf{H} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2\mathbf{H}}{\partial t^2} \tag{3}$$

여기서, c_L, c_T 는 주어진 매질에서 종파 및 횡파의 속도이다. 평면내의 한 방향에 대해 plane strain으로 가정하면, x 및 z 방향만의 변위장에 대해 다음과 같이 변위 포텐셜을 가정한다 [Rose, 1999].

$$\phi = \Phi(z)e^{i(kx - \omega t)}, \quad \psi = \Psi(z)e^{i(kx - \omega t)} \tag{4}$$

식(4)는 z 방향으로는 변형, x 방향으로는 위상차를 가진 파전달을 의미한다. 식 (3)에서의 경계조건은 자유경계조건으로 가정하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{31}(\pm h) = 0, \sigma_{33}(\pm h) = 0 \tag{5}$$

변위-응력 관계식과 식 (3)-(5)를 이용하여 Lamb파의 특성방정식인 Rayleigh-Lamb 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \tag{6}$$

식(6)을 만족시키는 해로부터 그림 2와 같은 Lamb파의 분산(dispersion) 곡선을 얻을 수 있다. 이 분산곡선으로부터 고유모드파의 진행속도가 주파수가 증가함에 따라 달라지는 동시에 한 주파수에서 여러 개의 고유모드파가 발생함을 알 수 있다.

식 (6)에서 구해지는 분산 곡선은 판의 재질 및 두께에 따라 정해지는 고유한 특성으로써, 판의 손상이 발생한 경우 모드 형상 달라지게 되어, 이를 손상탐지에 적용될 수 있다. 또한, 고유모드가 고주파수대에 위치하고 있어 판의 작은 결함도 탐지가 가능하며, 주로 첫째 대칭, 역대칭 모드인 S_0, A_0 모드를 사용한다.

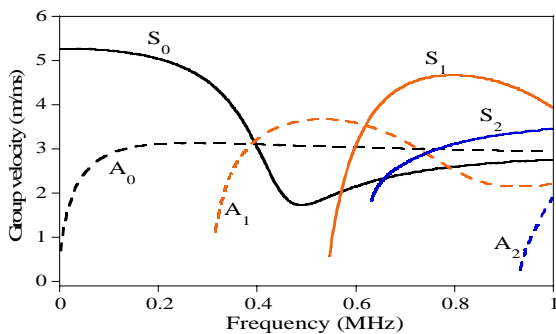


그림 1. 그림 4의 강거더 복부판에서 Lamb파의 분산곡선 (dispersion curve): S=대칭모드, A=역대칭 모드.

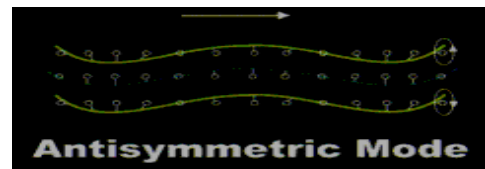
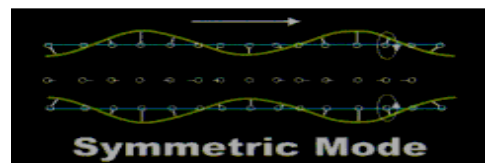


그림 2. Lamb파의 대칭 모드와 역대칭 모드

해석적인 방법에서는 판의 양면이 무한대이나 실제 판에서는 크기가 유한하므로 판의 경계면에서 파의 반사와 모드변환등에 의해 여러가지 파가 복잡하게 중첩되는 현상이 발생하고, 다층판(multi-layered plate)의

경우는 굴절로 인한 모드 변형이 발생하여 동일 주파수대에 상대적으로 많은 모드가 존재하므로 판의 두께, 재질에 대해 적절한 주파수대를 선별하여 가진을 해야 한다. 또한, 탐지하고자 원하는 결합수준의 주파수대도 동시에 고려해야 하므로 Lamb파를 이용한 손상탐지에는 기본적으로 가진 주파수의 선별이 매우 중요하다.

3. Lamb파를 이용한 구조물 건전성 감시의 실험연구

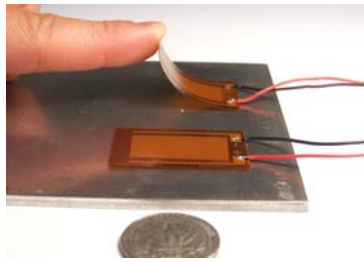
이 연구에서는 구조물의 건전성 감시를 위해 lead zirconate titanate (일명 PZT) 또는 macro fiber composite (일명 MFC)과 같은 스마트 소재를 사용한 능동가진기와 센서를 이용하여 고주파의 Lamb파를 동시에 가진시키고 계측한다 (그림 3) [Dosch et al, 1992]. 기존의 구조물 감시체계에서는 변형도계, 가속도계, 그리고 변위계를 이용하여 상시진동으로 구조물에 발생하는 응답을 수동적으로 측정한다. 반면에, PZT와 MFC등을 이용한 능동형 센서는 전하를 가하면 변형이 발생하고 변형이 발생하면 전하가 발생하는 압전소재의 특성을 활용하여 가진과 계측을 동시에 수행할 수 있다 [Sun et al, 1995]. 특히, MFC 센서의 경우 휨에 대한 유연도가 높기 때문에 구조물의 곡면에도 부착이 가능할 뿐 아니라 필요에 따라 탈부착도 가능하다.

수동형 센서와 비교했을 때, 능동형 센서를 이용한 구조물 건전성 감시의 장점은 크게 세가지를 들 수 있다. 첫째, 능동형 센서 하나를 가진기와 계측기 모두로 활용할 수 있다. 둘째, 능동형 센서를 통해 임의의 가진력을 구조물에 적용시킬 수 있기 때문에 신호처리가 용이할 뿐만 아니라 구조물의 특정 손상에 민감한 입력과를 생성시킬 수 있다. 셋째, kHz부터 MHz 단위의 고주파수 영역에서 가진이 가능하므로 구조물의 고주파 영역에서 민감한 응답을 보이는 미세 균열과 같은 손상을 조기에 탐지할 수 있다.

그림 3에서는 교량에 널리 쓰이는 강거더의 Lamb파를 이용한 건전성 평가를 위한 장비들을 보여주고 있다. 실험장비로는 크게 임의 신호 생성기 (Arbitrary signal generator, 일명 AWG), 고속 신호 디지털라이저(High-speed digitizer, 일명 DIG), 그리고 저잡음 프리앰플리파이어(low-noise preamplifier)들이 있다.



(a) PZT 센서 (Seacor Piezo Ceramics)



(b) Macro fiber composite 센서 (Smart Material Corp.)

그림 3. 스마트 능동 센서

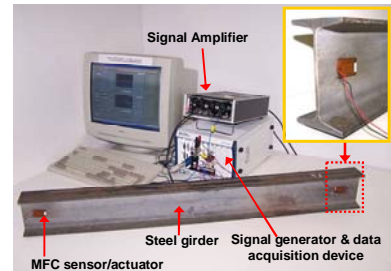


그림 4. Lamb파를 이용한 강거더의 손상탐지를 위한 능동감지 실험 장비

토목구조물의 경우 항공구조물에 사용되는 두께가 얇은 mm 단위의 부재와 달리 cm단위의 두꺼운 부재들이 사용된다. 따라서, Lamb파의 확산과 다중모드 성질을 충분히 고려하여 가진 주파수대를 결정하는 것이 매우 중요하다. 이 실험에서는 그림 3과 같이 MFC 센서를 강거더의 복부판에 부착한다. 복부판 가진을 위한 입력신호로는 복부판의 Lamb파 분산곡선(그림 1)에서 1차 대칭모드(S_0)와 1차 역대칭모드(A_0)만이 생성되는 동시에 Lamb파의 분산이 비교적 작게 발행하는 주파수대역에서 협대역 tone-burst 신호를 사용한다 (그림 6).

분산곡선으로부터 결정된 주파수 대역으로부터 여러 주파수대의 입력가진을 구조물에 입사시키고 추정하고자 하는 손상에 가장 민감한 손상특성을 추출하게 된다. 일반적으로 손상주위에서 판의 국부적 기하학적 경계조건이 급격히 바뀌기 때문에, 진행중인 Lamb파는 모드변환, 반사, 그리고 감쇠등을 일으킬 수 있다 (그

림 7). 따라서, 이 논문에서는 2장의 Lamb파 이론에 근거한 수치해석 결과와 그림 3의 실험결과를 동시에 수행함으로써 실제 토목구조물에서 Lamb파를 이용한 손상탐지 가능성을 이론과 실험을 통해 검증하고자 한다.

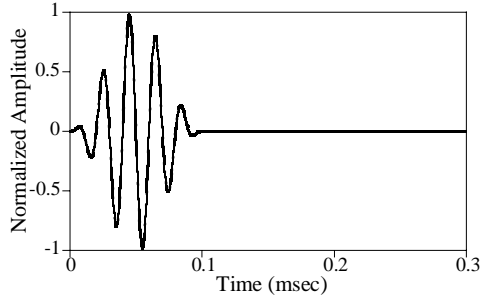


그림 6. 입력신호(110kHz sine tone burst signal)

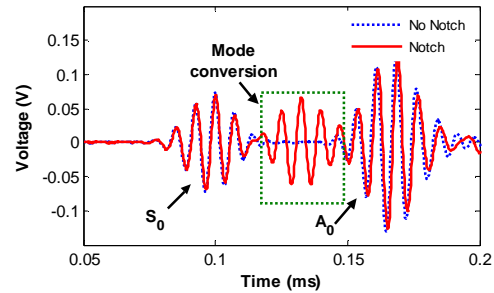


그림 7. 손상에 의한 모드변환의 예 (130kHz Morlet wavelet tone burst input signal)

4. 맺음말

본 연구에서는 상시 건전성 감시를 위한 새로운 방법론으로써, 항공분야에 쓰이는 고주파 Lamb파의 특성을 분석하고 토목구조물에 대해 적용성을 연구하였다. Lamb파의 기본적 원리를 해석적 측면에서 연구하였고, 실험을 위한 센서, 장비등을 설명하면서 Lamb파를 이용한 손상탐지 전반에 대해 소개하였다.

Lamb파의 가역대가 고주파이므로 큰 국부응력을 받는 판의 미세결함을 탐지가 가능하고, 대칭 및 역대칭의 모드가 타모드에 대해 확인하여 손상탐지 기법을 적용하기가 용이하므로 토목구조물에 적용시킬 장점이 충분하다고 판단된다. 다만, Lamb파의 기본특성인 다중모드와 분산성으로 인해, 실제 실험시 Lamb 상태를 구현하기 위한 가진력과 주파수대의 선별이 매우 중요함을 알 수 있었다.

토목구조물은 주로 유한한 판의 조합으로 이루어져 있으므로 유한한 길이로 인한 반사, 복합판에 의한 굴절, 판의 교차에 대한 모드변형등의 문제는 추가적인 연구가 필요하다. 또한, 문제에 따라 모드변형에 의해 Lamb 상태의 구현이 불가능할 수도 있으며, 이에 대해 Rayleigh파, Love파등 여타 탄성체에서 발생하는 파를 연구하여 토목구조물의 특성을 충분히 반영한 손상탐지 연구가 필요하다.

감사의글

이 연구는 2005년 ㈜에스코 테크놀러지의 연구지원으로 이루어진 것으로 본 연구에 대한 적극적인 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

1. I. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press: New York, 1967.
2. Y.C. Fung, Foundation of Solid Mechanics, Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, NJ, 1965.
3. J.J. Dosch, D.J. Inman, and E. Garcia, "A Self-Sensing Piezoelectric Actuator for Collocated Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structure*, 3, 166-185, 1992.
4. F.P. Sun, Z. Chaudhry, C. Liang, and C.A. Rogers, "Truss Structure Integrity Identification Using PZT Sensor-Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 6, 134-139, 1995.
5. Joseph L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, Cambridge University Press 1999.
6. Emmanuel Moulin, Jamal Assaad and Christophe Delebarre, "Piezoelectric transducer embedded in a composite plate: Application to Lamb wave generation," *American Institute of Physics*, 2049-2055, 1997.