

구조물 손상진단을 위한 Lamb 파의 시간-역전현상에 대한 실험

Experiment on the Time-Reversal of Lamb Waves for the Application to Structural Damage Detection

고한석*

Go, Hansuk

이창호**

Lee, Changho

이우식***

Lee, Usik

ABSTRACT

In this paper, the possibility of time reversal phenomenon was investigated in damage detection of structure. In conventional lamb wave techniques, damage is identified by comparing the measured data (baseline signals) and the current data. But this method can lead to high false signal in the intact condition of structures due to environmental conditions of the structures. So in this studying, we investigate the possibility of damage detection in the aluminum plate using the time reversal phenomenon of lamb waves.

1. 서 론

최근에 항공기, 자동차와 같은 운송수단 그리고 건축물과 같은 구조물 등의 수명, 안정성을 확보하는 것이 중요해짐에 따라, 건전성 모니터링이 필요해지고 있다. 구조물이 손상을 입기 전의 Lamb파의 신호와 손상을 입은 후 신호를 측정하여, 두 신호의 차이를 이용하여 손상의 평가하는 식의 방법은 많이 나와있다. 하지만, 이러한 방법은 구조물의 주변환경이 달라짐에 따라 잘못된 손상평가가 나올 확률이 높아진다. 이를 해결하는 방법으로, 기본 신호(baseline signals)를 사용하지 않고 Lamb파의 시간-역전현상을 이용한 실시간 건전성 모니터링이 필요하다.

Fink[1]는 초음파에 대한 시간-역전현상을 소개하였다. 여기서 소개된 개념은 시간-역전 원(time-reversal cavity) 그리고 시간-역전 거울(time-reversal mirror)이 있다. Ing 과 Fink[2]는 Lamb파의 시간-역전현상을 소개하며, Lamb파의 분산효과(dispersion effect)와 다중모드(multimode)를 제시하고 있고, Lamb파의 모드변형(mode conversion)현상으로 인해 시간-역전현상이 깨질 수 있음을 제시하고 있다. Ing 과 Fink[3]는 시간-역전 거울을 이용하여 평판에서 손상을 찾아내는 실험하였고, 시간-역전현상이 분산효과를 보상해준다고 말하고 있다. Sohn등[4]은 기본 신호(baseline signals)를 이용한 방법을 사용하여, 미세균열을 찾아내는 실험을 하였고, 여러 개의 PZT를 이용 미세균열의 위치를 찾아내었다. 이 연구에선 퍼티(putty)를 미세균열로 가정하였다. Park등[5]은 Fink[2]이 말한 Lamb파의 시간-역전현상을 더 발전시켜 원본 신호와 시간-역전되어 복구된 신호를 비교하는 방법을 사용하여, 복합재료 평판에서 Lamb파의 시간-역전현상이 일어나는지를 확인하고 있다. Park등[6]은 알루미늄 평판에 퍼티(putty)를 붙여 미세균열이라 가정하여 [5]에서 사용한 시간-역전현상을 이용하여, 미세균열을 판정하고 있고, 추가적으로 알루미늄 평판의 온도에 따라 측정신호의 도착시간의 차이가 있음을 보여줌으로써 환경변화에 대한 문제점을 제기하고 있다... 본 논문에서는 위 Park등[5,6]은 사용한 시간-역전현상을 이용하여 알루미늄 평판에 퍼티(Putty)를 부착했을 때와 구멍을 뚫었을 때를 나누어 실험을 했다.

* 인하대학교 기계공학과 석사과정

** 인하대학교 기계공학과 석사과정

*** 교신저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과 교수

E-mail : ulee@inha.ac.kr

TEL : (032)860-7318 FAX : (032)866-1434

2. Dispersion curves의 이론치와 실험치

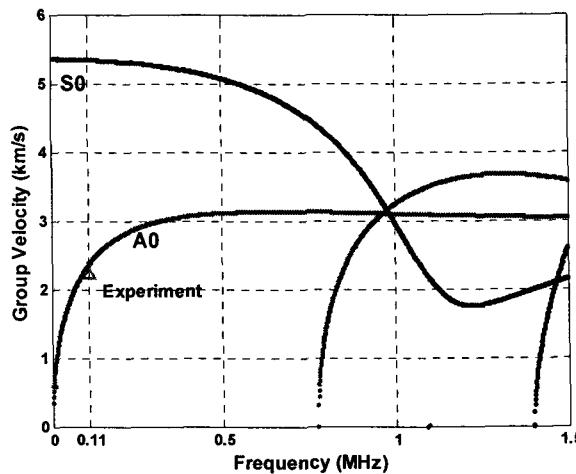


그림 1. 두께 2mm 알루미늄 판의 Dispersion curves

이론적으로 Dispersion curves를 구하기 위한 Rayleigh-Lamb파 식은 알루미늄 판의 두께가 2h라면 다음과 같다.

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = - \left[\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \right]^{\pm 1} \quad (1)$$

여기서 +1의 대칭모드를 의미하고 -1은 비대칭모드를 의미한다. p 와 q 는 다음과 같이 정의 된다.

$$p^2 = \left(\frac{\omega}{c_L} \right)^2 - k^2, q^2 = \left(\frac{\omega}{c_T} \right)^2 - k^2 \quad (2)$$

위 식을 이용하여, 수치 해석하면 그림 1 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 수치해석 결과는 실험할 때 신호의 모드 구분을 위해 사용된다.

3. 실험 방법 및 준비

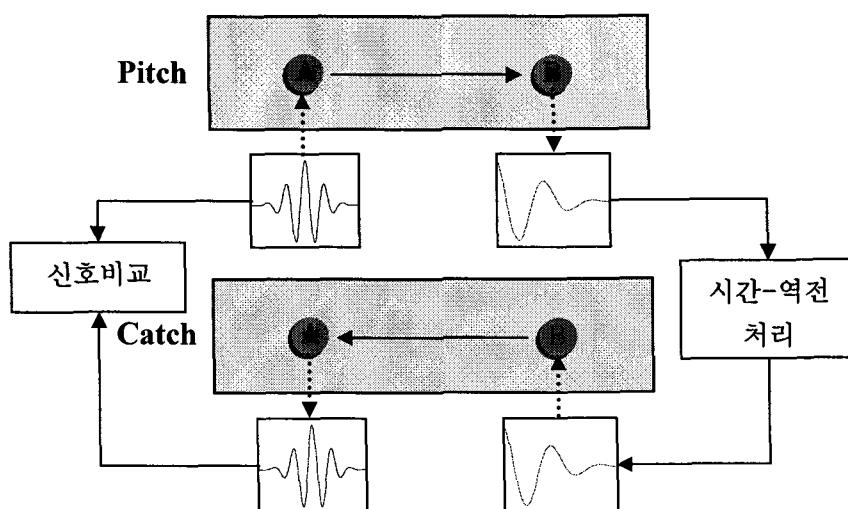


그림 2. 시간-역전현상을 이용한 실험방법 개념도

그림1에서의 Pitch단계는 PZT A에 입력 신호를 가진 하고, PZT B에서 응답신호를 검출하고, Catch단계는 PZT B에서 입력 신호로 시간-역전 처리된 신호를 사용하여 PZT A에서 응답신호를 받는다. 본 연구에서는 그림1의 개념을 이용하여 실험을 하였고, 시편은 알루미늄 판(900mm × 900mm × 2mm)를 사용하였고, 센서로는 압전소자인 PZT를 사용하였다. 첫 번째 실험으로 알루미늄 판에 어떠한 손상도 없는

상태, 두 번째로 퍼티(Putty)를 접착한 상태, 세 번째로 구멍을 뚫은 상태로 하였다.

4. 실험 결과

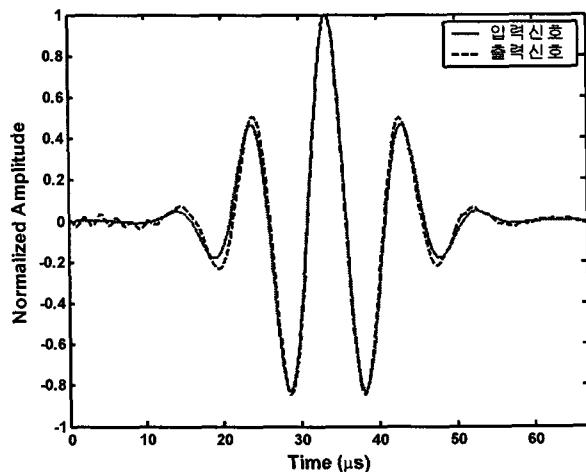


그림 3. 손상이 없는 알루미늄 평판에서의 입력신호와 출력신호 비교

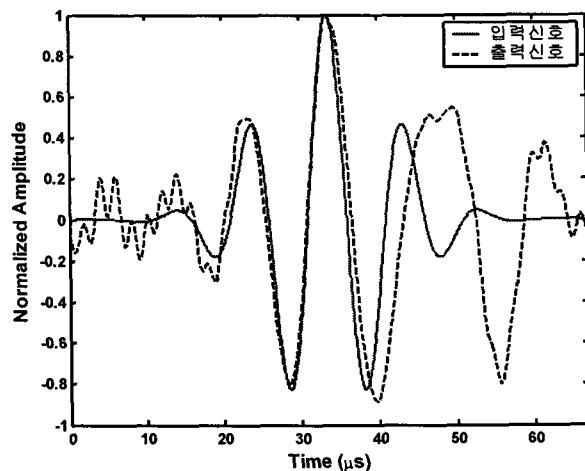


그림 4. 퍼티(Putty)가 접착된 알루미늄 평판에서의 입력신호와 출력신호 비교

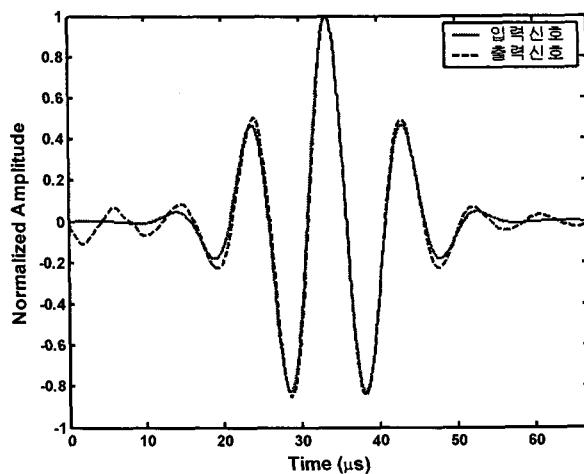


그림 5. 3mm의 구멍이 있는 알루미늄 평판에서의 입력신호와 출력신호 비교

그림 3,4,5를 보면 손상이 없는 경우와 3mm의 구멍이 있는 경우에는 거의 차이가 없고, 퍼티(Putty)를 사용한 경우에만 눈에 보이는 차이를 보인다. 이 차이를 수치적으로 나타내기 위해 식(3)을 이용하여 손

$$DI = 1 - \sqrt{\left(\int_0^1 I(t)V(t)dt \right)^2 / \left(\int_0^1 I(t)^2 dt \int_0^1 V(t)^2 dt \right)} \quad (3)$$

상 정도를 구하면, 도표 1 과 같은 결과가 나온다.

도표 1. 손상정도(DI)

	손상 없음	퍼티(Putty) 접착	3mm 구멍
손상정도(DI)	0.0064	0.3223	0.0069

* DI값이 1에 가까울수록 손상이 있다는 것을 의미함

5. 결 론

본 연구에선 기본 신호(Baseline signals)를 사용하지 않고 시간-역전 현상을 이용한 실시간 전전성 모니터링을 실험해 보았다. 그 결과 손상이 없는 경우 손상 정도가 작게 나와 문제가 없었고 미세균열이라 가정한 퍼티(Putty)를 접착한 경우에도 손상정도(DI)가 0.3223란 값이 나와 손상을 찾는다. 하지만, 퍼티(Putty)는 위에서 말했듯이 미세균열이라 가정했을 뿐 실제 미세균열이 아니기 때문에 손상을 찾는다고 말하기 어렵다. 그리고 3mm 구멍의 경우에 손상이 없을 때와 거의 차이가 나지 않았다. 이는 본 연구에서 제시한 손상 탐지법이 유효하지 않다는 것을 의미한다. 그러므로 이후 연구에서는 시간-역전 현상을 이용한 다른 방식의 손상 탐지법 개발이 필요 된다.

참고 문헌

1. Mathias Fink (1992) "Time Reversal of Ultrasonic Fields-Part I Basic Principles," IEEE Transactions On Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 39, No.5, 555-566.
2. Ros K. Ing., and Mathias Fink (1998) "Time-Reversed Lamb Waves," IEEE Transactions On Ultrasonic, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 45, No3, 1032-1043.
3. Ros K. Ing. and Mathias Fink (1996) "Time Recompression of Dispersive Lamb Waves Using a Time Reversal Mirror – Application to Flaw Detection in Thin Plates," IEEE Ultrasonic Symposium, 659-663.
4. H. Sohn, G. Park, J.R. Wait, N.P. Limback, and C.R. Farrar (2004) "Wavelet-based Active Sensing for Delamination Detection in Composite Structure," Smart Materials and Structures, Vol. 13, 153-160.
5. H.W. Park, H. Sohn, K.H. Law, and C.R. Farrar (2007) "Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite plate," Journal of Sound and Vibration, Vol. 302, 50-66.
6. H. Sohn, H.W. Park, K.H. Law, and C.R. Farrar (2007) "Combination of a Time Reversal Process and a Consecutive Outlier Analysis for Baseline-free Damage Diagnosis," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 18, April