탄성파의 시간-역전현상과 STFT를 이용한 구조물 손상진단

Structural Health Monitoring by using the Time-Reversal and STFT

고한석* 이우식**

Go, Hansuk Lee, Usik

ABSTRACT

The time reversal was investigated for direct root between PZT and PZT, but in case of a circular PZT, lamb wave moves not only along the direct root but also another roots. The center frequency of lamb wave is kept when the lamb waves are reflected from damage. This paper presents experimental and theoretical results for the new structural health monitoring method by above features of lamb wave, and we can increase accuracy of the new structural health monitoring method by using STFT(Short Time Fourier Transform).

1. 서 론

최근에 항공기, 고속철도, 자동차와 같은 운송수단 그리고 건축물과 같은 구조물 등의 수명, 안정성을 확보하는 것이 중요해짐에 따라, 건전성 모니터링이 필요해지고 있다. 기존의 많은 비파괴(N.D.T) 검사법이 손상이 없는 상태의 신호에서 손상이 있는 상태의 신호를 제거하여 손상에 관련된 신호만을 선택하였다. 그러나 이러한 방법은 손상진단을 하려는 물체의 주변환경(온도, 습도, 바람)등이 변화함으로써 생기는 요인을 제거할 수 없다는 단점이 있다. 예를 들어 비행기는 지상에서 운행될 때와 하늘에서 운행될 때의 온도 차가 상당히 크다. 그런 경우 실제 손상이 없음에도 불구하고, 손상이 있다는 식으로 나올 가능성이 다분하다. 이 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자, Lamb파의 시간-역전 현상을 이용하여, 기초신호(baseline signals)가 없는 상태에서 손상을 찾아내는 방법을 제시하고자 한다.

Fink[1]는 초음파 시간-역전 현상을 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 시간-역전현상을 이용하여, 손상이 없는 평판에서 손상지표(Damage Index)를 정의하고,

* 인하대학교 기계공학과 석사과정

** 교신저자, 정회원, 인하대학교 기계공학과 교수

E-mail : ulee@inha.ac.kr

손상이 있는 평판에서 실험을 하여, 손상지표(Damage Index)보다 큰 값이 나올 경우 손상이 있다고 평가하고 있다. Wang등[5]은 시간-역전현상을 전달함수 개념을 이용하여 표현하였고, 이를 시뮬레이션 하여 보여주었다. Wang등[5] 결과신호(result signals)에서 기초신호(baseline signals)를 빼는 방법으로 손상신호(damage signals)를 구하였다. 여기서 Wang등[5]은 손상신호(damage signals)가 탄성파에서부터 시작된 신호이므로 실제 시간 역전된 신호는 아니나 시간 역전된 신호와 다를 바 없다고 표현하고 있다. 이 말을 다시 해석하자면 탄성파는 일정한 중심 주파수를 가지는데 이는 어떠한 경로를 통하여 오더라도 변하지 않는 다는 것을 의미한다. 이 논문에서는 Wang등[5]의 전달 함수 개념을 이용하여 손 상이 있을 경우 Sohn등[4]의 시간-역전 실험을 하였을 경우 손상신호의 형태를 설명하며, 시뮬레이션을 한다. Wang등[5]의 전달함수 개념을 이용하여 (Pitch to Catch Experiment)의 결과만으로 시간역전현상 실험결과를 구현하고 이를 통하여 손상위치를 찾아낸다. 그리고 STFT(Short Time Fourier Transform)을 이용하여 Sohn[4]의 손상지표 비교 법과 다른 방법을 제시한다. 했다.

2. 전달함수를 이용한 시간역전 이론

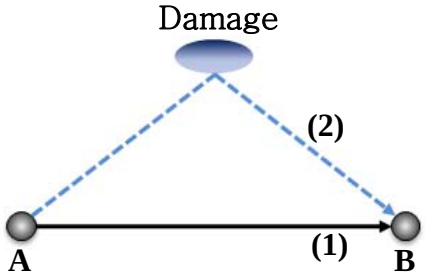

그림 1. 시간 역전현상 모델

위 그림은 PZT(A)에 탄성파를 입력신호로 사용한 후 PZT(B)에서의 Output signals가 생기는 과정을 표현한 그림이다. (1)은 PZT(A)에서 발생한 wave가 PZT(B)까지 직선의 경로로 들어간 경우를 표현한 것이고 (2)는 PZT(A)에서 발생한 wave가 PZT(B)까지 Damage에서 반사되어 온 경로로 들어온 것 경우를 의미한다. PZT(A)에서 PZT(B)로 시간역전 실험을 실행할 경우 크게 4가지 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다. 첫째로 경로(1)에서 경로(1)로 되돌아온 경우, 둘째로 경로(2)에서 경로(2)로 되돌아온 경우 셋째로 경로(1)에서 경로(2)로 되돌아온 경우 그리고 넷째로 경로(2)에서 경로(1)로 되돌아온 경우이다.

경로(1)과 경로(2)를 통과한 신호를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$V_B^N(\omega) = G_{AB}^N(\omega) V_I(\omega) \tag{2.1}$$

$$V_B^D(\omega) = G_{AB}^D(\omega) V_I(\omega) \tag{2.2}$$

$$G_{AB}^N(\omega) = A + Bi \tag{2.3}$$

$$G_{AB}^{D}(\omega) = C + Di \tag{2.4}$$

여기서 $V_I(\omega)$는 입력되는 신호를 의미한다.

위의 과정을 역으로 하여 위 신호들을 초기값으로 넣으면 아래와 같이 정리 할 수 있다.

$$V_A^{NN}(\omega) = (A^2 + B^2)V_1(\omega) \tag{2.5}$$

$$V_A^{DD}(\omega) = (C^2 + D^2)V_1(\omega) \tag{2.6}$$

$$V_A^{ND}(\omega) = [AC + BD + (BC - AD)i]V_1(\omega) \tag{2.7}$$

$$V_A^{ND}(\omega) = [AC + BD - (BC - AD)i]V_1(\omega) \tag{2.8}$$

여기서 식(2.5)와 식(2.6)은 실수만 있으므로 퓨리에 시프팅 이론에 의해 시프팅이 생기지 않고 식(2.7)와 (2.8)는 특정 값만큼 시프팅이 생기게 된다.

3. 전달함수를 이용한 시간역전 시뮬레이션

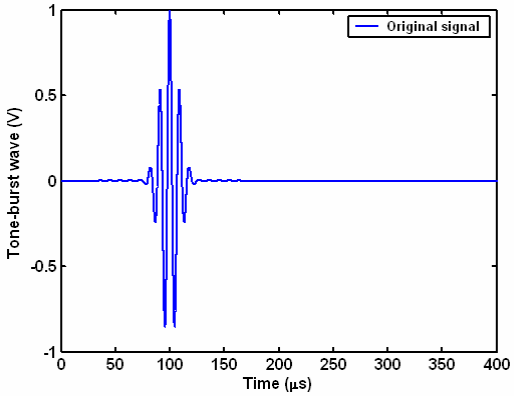

그림 2. 초기입력신호$V_1(t)$

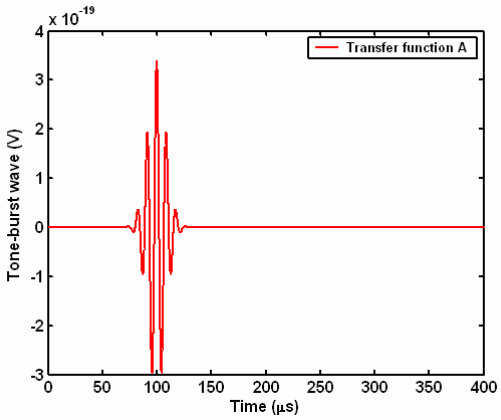

그림 3. 식(2.12)의 시뮬레이션결과

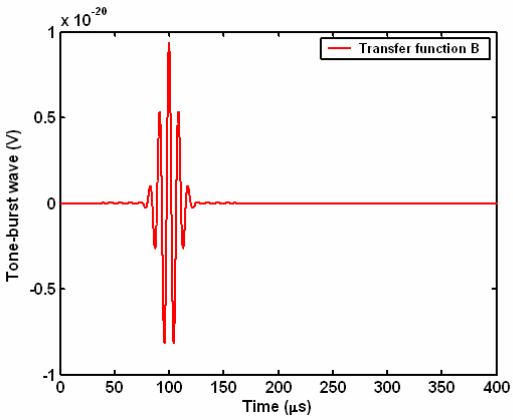

그림 4. 식(2.13)의 시뮬레이션결과.

그림 3과 그림 4는 전달함수에 실수만이 존재 할 경우 초기신호에 비교하여 시간 시프팅현상이 일어

나지 않는 것을 확인 할 수 있다. 반면 그림 5와 그림 6은 초기신호에 비교하여 시간 시프팅현상이 일어나는 것을 알 수 있고, 이 시간 시프팅현상은 손상까지의 거리정보를 가지고 있다.

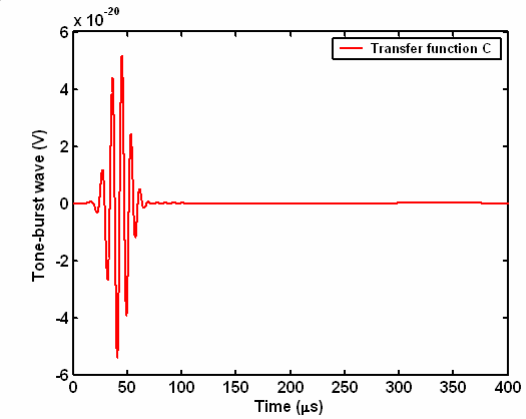

그림 5. 식(2.14)의 시뮬레이션결과

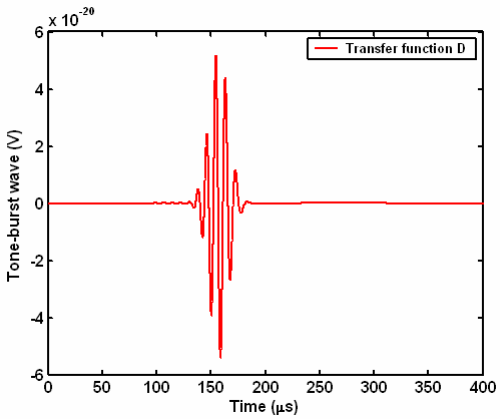

그림 6. 식(2.16)의 시뮬레이션결과

4. 실험 방법 및 준비

4.1 실험 개념도

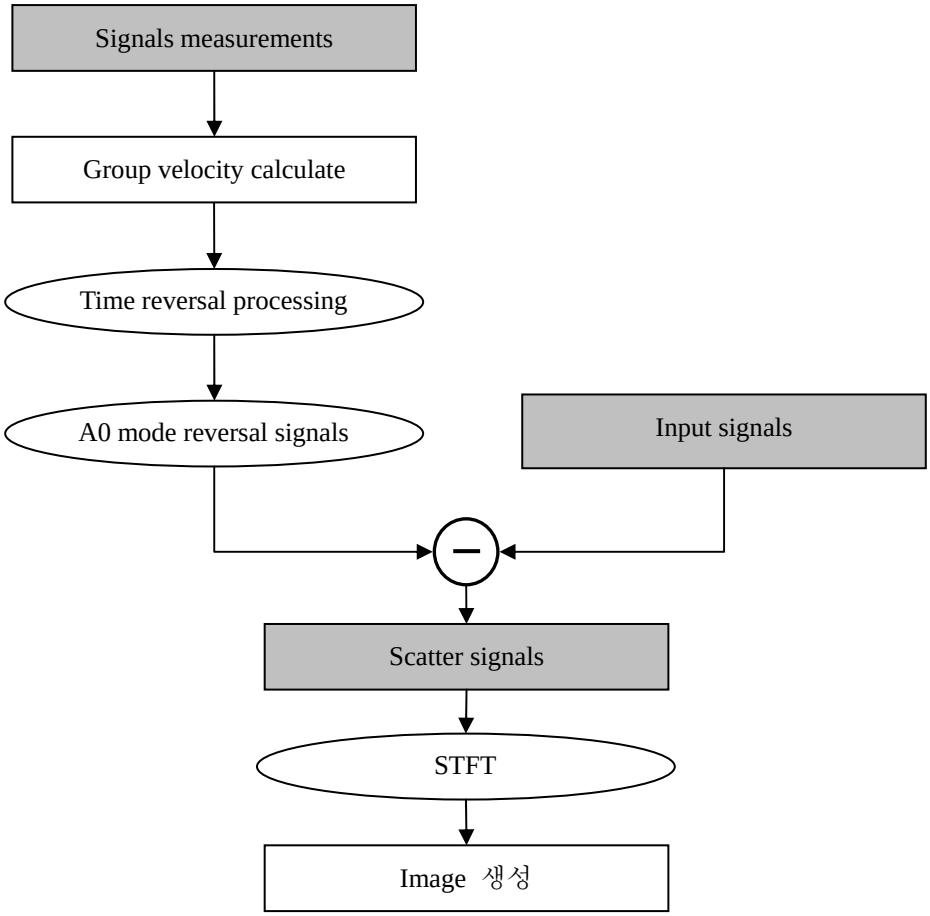

그림 7. 시간 역전 현상을 이용한 실험 개념도

위 그림7의 실험 개념도는 전달함수를 이용한 시뮬레이션 과정을 실제실험에 적용한 순서도이다. S0

모드 제거부분은 탄성파로 실험을 할 경우 다중모드라 하여 S0모드의 신호와 A0모드의 신호가 잡히게 된다. 이 두 가지 모드를 모두 포함하여 시간-역전현상을 구현할 수 없기 때문에 S0모드 제거 부분이 꼭 필요하게 된다. 그리고 STFT부분은 신호의 강도가 시간영역에서는 음수의 값이 있기 때문에 이를 에너지로 넘김으로써 모두 양수로 표현하여 이미지구현을 좀 더 정확하게 할 수 있다.

4.2 실험 조건

도표1. PZT와 Mass의 위치

	X coordinate (mm)	Y coordinate (mm)
PZT A	270	370
PZT B	430	370
PZT C	430	530
PZT D	270	530
Mass	350	450

5. 실험 결과 및 평가

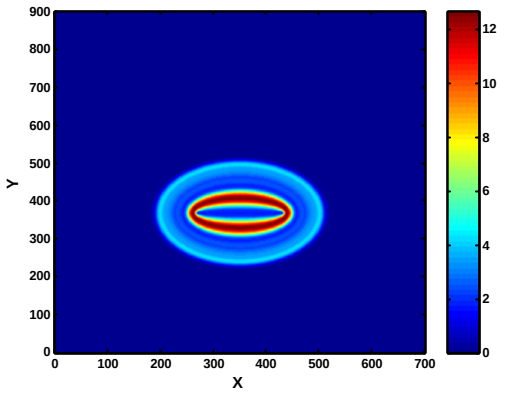

그림 8. PZT(A)↔PZT(B) 실험이미지

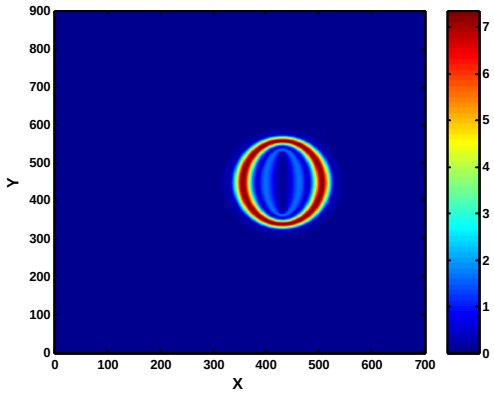

그림 9. PZT(B)↔PZT(C) 실험이미지

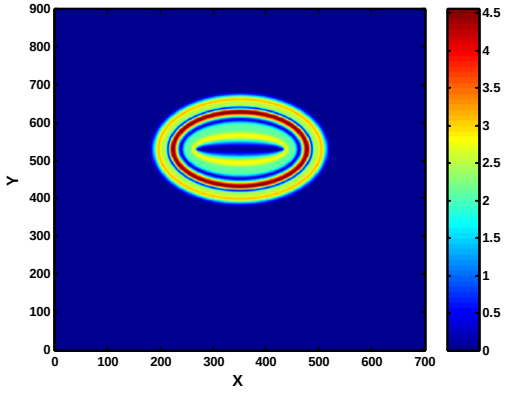

그림 10. PZT(D)↔PZT(C) 실험이미지

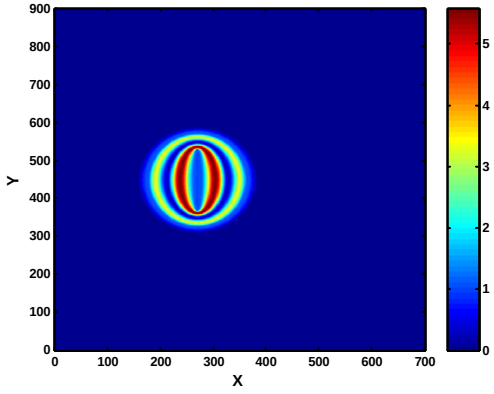

그림 11. PZT(D)↔PZT(A) 실험이미지

위 그림들은 PZT간에 그림7의 방법으로 실험을 하여 나온 결과를 이미지화 시킨 그림이다. 2개의 PZT 간의 거리정보가 있어 타원형으로 손상위치의 정보가 표현되는 것을 알 수 있다. 4개의 PZT와 손상의 위치는 서로 같기 때문에 대칭되는 PZT (A)-PZT(B)와. PZT (C)-PZT(D)의 이미지가 대칭을 이루어야 하나

실제로 대칭을 이루지 못했다. 위 4가지 이미지를 합성하면 아래와 같이 손상의 위치를 파악할 수 있다. 손상의 위치는 (351,420)으로 실제 손상위치보다 약간 벗어난 곳에 위치하게 되었다.

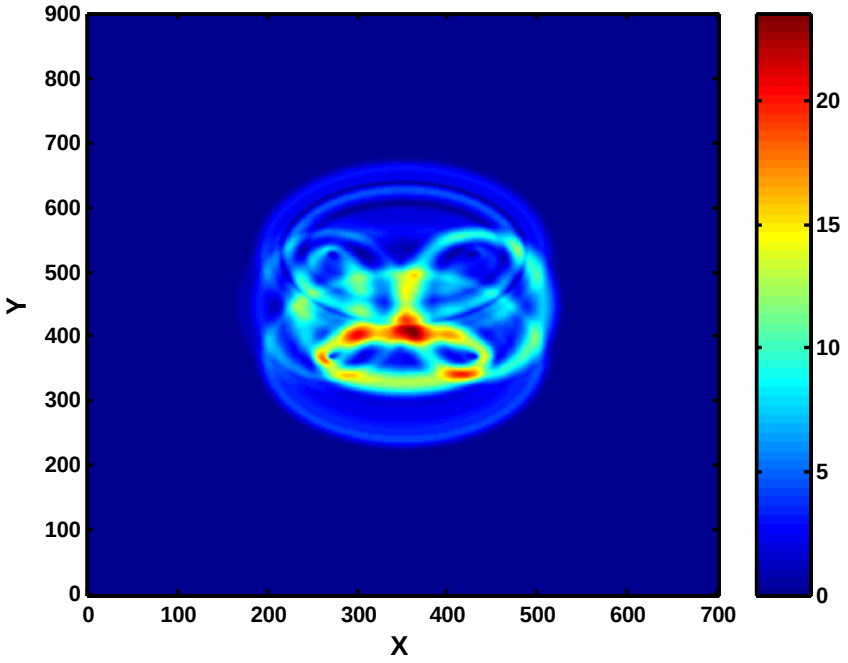

그림 12. 손상위치 이미지

7. 결론

본 연구에서는 시간-역전현상을 이용한 새로운 손상 탐지법을 제시하였으며, 이를 시뮬레이션으로 검증하여 실현가능성을 조사하였고, 실제 시험을 통하여 정확도를 규명하였다. 새로운 시간-역전현상을 이용한 손상 탐지법은 기존 방법에 비하여 적은 PZT를 사용하여, 알루미늄판사의 손상의 위치를 규명할 수 있었다. 이를 기반으로 복합평판에서의 손상의 위치를 규명하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

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