

가상 탐지자 배열 모델을 이용한 직사각형 판에서 A_0 램파 모드 시간반전과정 모사

Simulating a Time Reversal Process for A_0 Lamb Wave Mode on a Rectangular Plate Using a Virtual Sensor Array Model

박현우[†]

Park, Hyun Woo

1. 서론

램파는 윗면과 아랫면을 자유경계면으로 갖는 평면변형상태의 판에 발생하는 유도파(guided wave)의 일종이다⁽¹⁾. 구조물의 고유모드 또는 고유진동수와 같은 저주파수 대역 동적 특성보다 고주파 대역 응답에 속하는 램파는 미세균열과 같은 국부손상에 대해 민감하게 반응하는 것으로 알려져 있다⁽¹⁾. 최근, 판에 부착이 용이한 PZT 로 유도된 램파를 이용한 판 구조물의 손상탐지에 대한 이론 및 실험 연구들이 매우 활발히 진행되고 있다⁽²⁾.

주파수 성분과 무관하게 항상 일정한 속도로 전달되는 체적파와 달리 램파는 각 주파수 성분들이 서로 다른 속도로 진행함에 따라 초기의 입력파형이 파의 진행에 따라 달라지는 분산특성을 가지고 있다. 이러한 램파의 분산성 때문에 램파가 손상발생지점을 경유하여 파형이 변화했다고 하더라도 실제 파의 변화가 손상에 의한 것인지 분산성에 의한 것인지 판단하기 어렵다⁽¹⁾.

이러한 손상진단에서 램파의 분산효과를 효과적으로 분리하기 위해 다양한 연구들이 수행되어 왔다⁽³⁾. 그 중 현대 시간반전음향학 (time reversal acoustics; TRA)에 기반을 둔 램파의 시간반전과정에 대한 연구가 주목할 만하다⁽⁴⁾. 시간반전과정을 실제 판구조물에 적용할 경우 램파의 분산효과와 판 경계에서의 반사효과를 적절히 고려해야 한다⁽⁴⁾. 특히, 시간반전과정에서 파반사는 파의 탐지범위를 확장시켜 실제 사용된 센서의 개수보다 많은 수의 센서를 사용한 것과 같은 가상 수신자(virtual receptor) 효과를 유발한다⁽⁵⁾. 가상 수신자 효과를 이용한다면 소수의 가진/탐지자를 통해 손상탐지 범위를 판 내부 전체로 확장할 수 있기 때문에 비용 측면에서 구조물 손상탐지를 위해 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

이 연구에서는 직사각형 형상을 갖는 판에서 기본 역대칭 램파 모드(fundamental anti-symmetric Lamb wave mode; 이하 A_0 모드)에 대해 시간반전과정이 적용될 때 복원되는 램파 신호의 수치 모사를 위한 기법을 제안한다. 직사각형 판에서 발생하는 파 반사가 시간반전과정에 미

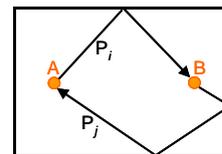
치는 영향을 모사하기 위해 가상 탐지자 배열 모델을 제안한다. 원입력 신호에 대한 시간반전과정의 정식화를 주파수 영역에서 수행하고 역 푸리에 변환을 이용하여 시간반전과정을 통해 입력된 신호를 시간영역에서 복원한다. 제안된 방법을 2 차원 판의 수치예제모형을 이용하여 유한요소해석으로부터 계산된 결과와 비교하고 타당성을 검증한다.

2. 가상 탐지자 배열 모델을 이용한 시간반전과정 모사

Fig. 1 은 가상 탐지자 배열 모델을 이용하여 파 반사가 있는 시간반전과정 모사를 개념적으로 도식화 하였다. 시간반전과정은 PZT A 에서 가진하여 PZT B 에서 수신하는 순방향 전달과 수신된 램파 신호를 시간영역에서 반전시킨 후 PZT B 에 재입사 시켜서 PZT A 로 돌려보내는 역방향 전달로 진행된다⁽⁴⁾.

파 반사가 존재하는 경우 시간반전과정에서 순방향 및 역방향 전달 과정에서 무한히 많은 전달경로가 존재한다. Fig. 1(a)에서 그 조합들 중 간단한 경우의 시간반전과정을 예로 도식하였다. 여기서, 순방향 전달은 P_i 로 역방향 전달은 P_j 으로 나타냈다.

Fig. 1(b)에서는 가상 탐지자 배열을 이용하여 Fig. 1(a)와 등가관계를 이루도록 시간반전과정을 모사하였다. 순방향 전달은 PZT A 에서 순방향 전달에 대응하는 가상탐지자 PZT B_i로 직접 전달 되는 경로로 표시할 수 있다. 역방향 전달은 PZT B_i에서 수신된 램파 신호를 시간반전시킨 후 역방향 전달에 대응하는 가상탐지자 PZT B_j에 재입사 시킨 후 PZT A 로 직접 돌려 보내는 경로로 표시할 수 있다.

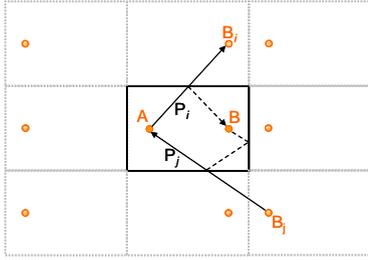


(a) Typical time reversal process considering wave reflections in a rectangular plate

[†] 정회원, 동아대학교 토목공학과 조교수

E-mail : hwpark@dau.ac.kr

Tel : (051)200-7630, Fax : (051)201-1419



(b) An equivalent time reversal process using the virtual sensor array model.

Fig. 1. Schematic of time reversal process of reflected waves using the virtual sensor array model.

시간반전과정에서 모든 파 반사 경로를 고려할 때 PZT A 에 복원되는 입력신호는 PZT A 와 가상 탐지자 배열간의 시간반전과정에서 복원된 입력신호들의 중첩이 된다. 단일 램파 모드만을 고려하면 이러한 일련의 과정을 PZT A 와 가상 탐지자 배열간의 시간반전연산자를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁴⁾.

$$V_R(\omega) = \sum_{j=0}^{n_B} \sum_{i=0}^{n_F} \Gamma_{ij}(\omega) K(\omega) K^*(\omega) V_A^*(\omega) \quad (5)$$

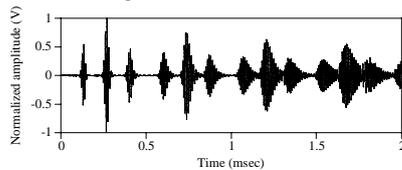
여기서 i 와 j 는 각각 Fig. 1 에서 P_i 와 P_j 에 대응되는 경로를 나타내고, ω , Γ , K 그리고 V_A 는 각각 각진동수, 시간반전연산자, 압전소자의 전기역학적 성질에 의해 결정되는 상수, 그리고 시간영역에서의 원 입력신호를 주파수 영역으로 푸리에 변환한 변수이다. 또한, n_F 와 n_B 는 각각 시간반전과정에서 순방향 전달과 역방향 전달에서 수집되는 총 반사파 경로의 갯수를 나타낸다. 위첨자 *는 변수의 켈레복소수를 의미한다.

3. 수치예제

시간반전과정 모사기법을 검증하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 PZT 소자가 부착된 평면변형 상태의 알루미늄 판에서 시간반전과정을 유한요소법으로 수치 모사한 결과와 비교하였다. 시간반전과정의 순방향 전달에서 A_0 모드만을 발생시키기 위해 PZT A 와 D 에 100kHz 톤버스트 입력신호를 동시에 가하였다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)의 PZT B 와 C 에서 수신된 응답신호를 유한요소 해석으로 구한 것이다. 최대 응답신호를 1 로 정규화 하였고 2ms 까지의 응답신호를 시간반전과정에 적용하였다.



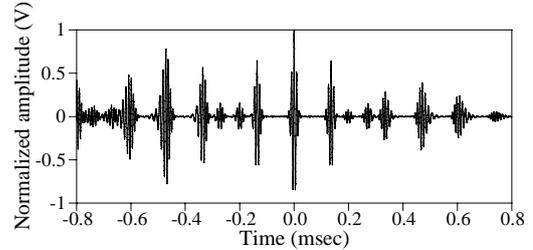
(a) 2-D aluminum plate model with a pair of collocated piezoelectric wafers



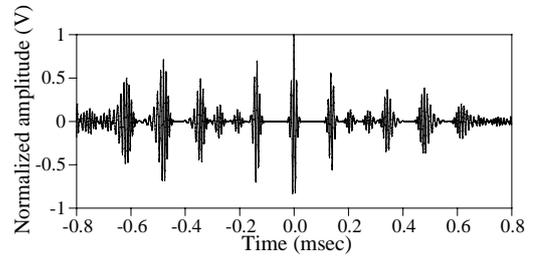
(b) Response Lamb wave signals at PZTs B and C

Fig. 2. Numerical simulation model and response Lamb wave signals computed by 2-D FE analysis.

Fig. 3 은 제안된 방법과 유한요소 해석을 통해 PZT A 와 D 에서 복원된 입력신호를 비교하였다. Fig. 3(a)와 (b) 를 비교했을 때 유한요소 해석 결과와 제안된 방법에 의해 모사된 결과가 잘 일치하고 있다. $t=0$ 에서 복원된 주 모드 형상은 속도분산효과가 시간반전과정을 통해 완전히 보상되어 원래 입력신호의 형상과 같다. 주 모드를 기준으로 양쪽으로 발생한 측대파들과 발생위치를 제안된 방법이 잘 모사하고 있다.



(b) FE analysis



(c) Proposed method

Fig. 8. Comparison of reconstructed signals through the time reversal process between 2-D FE analysis and the proposed method.

참고 문헌

- (1) Rose, J.L., 1999, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press.
- (2) Lim, K.L., Kim, E.J., Kang, J.S., Park, H.W., 2008, "Spectral Element Formulation for Analysis of Lamb Wave Propagation on a Plate Induced by Surface Bonded PZT Transducers," Transactions of Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 1157-1169.
- (3) Paget, C. A., Grondel, S., Levin, K., and Delebarre, C., 2003, "Damage Assessment in Composites by Lamb Waves and Wavelet Coefficients", Smart Materials and Structures, Vol.12, No. 3, pp. 393-402.
- (4) Park, H.W., Kim, S.B. and Sohn, H., 2009, "Understanding the Time Reversal Process of Lamb Wave Propagations", Wave Motion, Vol. 46, No. 7, pp. 451-467.
- (5) Ing, R.K. and Fink, M., 1998, "Time-Reversed Lamb Waves", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vo. 45, No. 4, pp.1032-1043.