

# 가상탐지자를 이용한 시간반전램파의 공간모임 모사

## Simulating the Spatial Focusing of Time Reversal Lamb Waves Using Virtual Sensors

박 현 우\*

Park, Hyun-Woo

---

### 요 약

최근 3년간 판 구조물의 손상진단에서 시간반전램파 (Time reversal Lamb waves)의 가능성이 주목 받고 있다. 시간반전음향학(Time reversal acoustics)에 의하면 시간반전램파의 공간모임을 적절히 활용하면 판에 순간적으로 가해지거나 발생한 충격하중의 위치를 높은 공간해상도와 신호대 잡음비로 추정할 수 있다고 알려져 있다. 이 연구에서는 시간반전램파의 공간모임을 직사각형 평판에서 가상탐지자 모델을 이용하여 모사한다. 특히, 평판에서의 파 반사에 의해 발생하는 가상탐지자 효과에 의해 단일 부착형 압전소자만을 사용하더라도 시간반전 램파의 공간 모임 구현이 가능함을 보인다. 또한 제안된 방법의 결과를 유한 요소 해석결과와 비교하고 제안된 방법의 타당성을 보인다.

**keywords** : 시간반전램파, 평판, 공간 모임, 유한요소법, 압전소자, 구조물 건전성 감시, 가상탐지자 모델, 활성가상탐지자, 공간모임성능

---

### 1. 서 론

최근 판에 부착이 용이하고 가진과 탐지를 동시에 수행할 수 있는 박막형 압전소자(Piezoelectric wafers 또는 PZT wafer)를 통한 구조물 건전성 감시 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 판형 구조물에서 발생하는 유도파(guided wave)의 일종인 램파를 이용한 건전성 감시 기법에 대한 연구가 주목 받고 있다 (Raghavan and Cesnik 2007). 램파는 균열과 같은 미세 손상에 민감하게 반응할 뿐만 아니라 비교적 먼 거리까지 전달되는 장점을 가지고 있다. 이러한 램파의 장점에도 불구하고 램파의 고유 특성인 분산성(속도 분산 및 다중 모드 분산) 때문에 파 전달은 매우 복잡한 양상을 띠게 된다. 따라서 실제 상황에서 램파 신호를 수신했을 때 손상에 의한 램파의 신호 변화를 램파의 분산성에 기인한 램파의 신호 변화와 구분하기 위해 복잡한 신호처리 과정을 거쳐야 한다.

램파의 분산성을 보상하기 위해 현대 시간반전 음향학 (modern time reversal acoustics)을 응용한 연구가 시도되었다 (Fink et al. 2000; Park et al. 2007). 시간반전음향학에 의하면 가진점에서 입력된 입력소스가 매질에서 전파되어 다른 지점에서 응답신호가 기록되었을 때, 그 응답신호를 기록된 시간순서의 역순으로 뒤집어서 다시 가진점으로 돌려보내게 되면 원래의 입력소스를 그대로 복원할 수 있다 (Fink et al. 2000; Park et al. 2007).

---

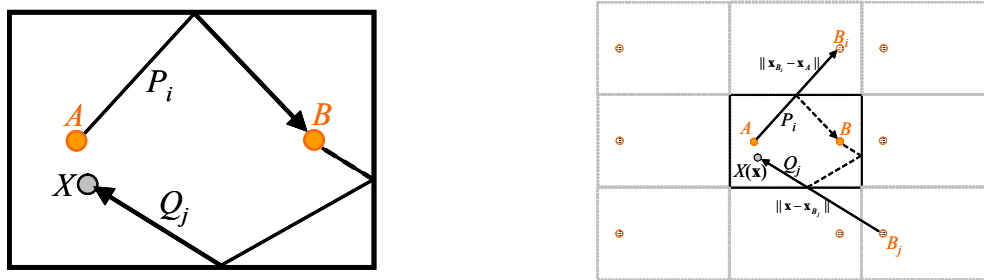
\* 정회원 • 동아대학교 토목공학과 조교수 hwpark@dau.ac.kr

이 연구에서는 판에 발생한 충격 위치를 추정하기 위해 시간반전과정에서 복원되는 램파의 공간 모임 (spatial focusing)에 초점을 맞춘다. 기존 시간반전 음향학의 연구에서는 램파의 공간 모임을 구현하기 위해 특수 제작된 Time reversal mirror (TRM)라는 고가 장비를 사용하거나 Chaotic Cavity라는 특수 제작 박판을 사용하였다 (Fink et al. 2000). 그러나 이들을 구조물 손상탐지에 활용하기에는 전자의 경우 비용문제가, 후자의 경우는 공학에서 사용하는 주요 부재의 형상과 차이가 크다.

이 연구에서는 공학 분야에서 널리 사용되는 regular cavity형태의 직사각형 판을 대상으로 파 반사에 의해 발생하는 가상탐지자 (virtual sensor) 효과에 의해 소수의 부착형 압전소자만을 사용하더라도 시간반전 램파의 공간 모임 구현이 가능함을 보인다. 특히, 평판에서의 파 반사에 의해 발생하는 가상탐지자 효과에 의해 단일 부착형 압전소자 만을 사용하더라도 시간반전 램파의 공간 모임 구현이 가능함을 가상탐지자 모델을 통해 보인다. 제안된 방법의 결과를 유한요소해석 결과와 비교하고 타당성을 검증한다.

## 2. 가상탐지자 모델을 이용한 시간반전과정 모사

그림 1은 시간반전과정에서 순방향 전달과 역방향 전달 과정에서 파 반사 효과를 가상탐지자 모델을 통해 도식적으로 나타냈다. 가상탐지자 모델에 의하면 파 반사가 존재하는 경우 순방향과 역방향 전달 과정에서 무수히 많은 파 전달 경로의 조합이 존재한다 (박현우 2010). 그림 1(a)는 여러 전달 경로 조합들 중 간단한 경우를 예로 나타냈다. 입력 가진 지점 A에서 실제 응답 탐지점 B까지의 순방향 전달 경로는  $P_i$ 로 표시하였고, B로부터 A부근의 임의의 지점 X까지의 역방향 전달 경로를  $Q_j$ 로 표시하였다. 그림 1(b)에서는 가상 탐지자 배열을 이용하여 그림 1(a)와 등가관계를 이루도록 시간반전과정을 모사하였다. 순방향 전달은 A에서 순방향 전달에 대응하는 가상탐지자  $B_i$ 로 직접전달 되는 경로인  $P_i$ 로 표시할 수 있다. 역방향 전달은  $B_i$ 에서 수신된 램파 신호를 시간반전시킨 후 역방향 전달에 대응하는 가상탐지자  $B_j$ 에 재입사 시킨 후 X로 돌려 보내는 경로  $Q_j$ 로 표시할 수 있다.



(a) 시간반전과정에서 파 반사에 의한 순방향 ( $P_i$ ) 및 역 (b) (a)의 파 반사 경로  $P_i$  와  $Q_j$  에 대응되는 등가 방향 ( $Q_j$ )전달 경로 예시 의 가상탐지자  $B_i$  와  $B_j$ .

그림 1. 직사각형 판의 시간반전과정에서 파 반사에 대응되는 가상탐지자

시간반전과정에서 X에 복원되는 입력 소스는 역방향 전달에서 발생하게 되는 파 반사 경로를 고려할 때 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{y}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{j=0}^{n_B} g(q_j, \omega) y^*(\mathbf{x}_B, \omega) \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{x}$ ,  $\tilde{y}$ ,  $g$ ,  $y$ ,  $q_j$  그리고  $n_B$ 는 각각 X의 좌표벡터, X에서 복원되는 가진 소스, 파전달에 대한 응답함수, 순방향 파전달을 통해 B점에 발생한 응답신호, 역방향 경로  $Q_j$ 에 대응하는 파 전달 거리 그리고 파 반사에

의한 역방향 전달의 총 경로 수를 나타낸다. 위첨자 \*는 켈레 복소수를 나타내는 연산자로서 시간영역에서 응답신호  $y$ 에 대한 시간반전은 주파수영역에서  $y^*$ 로 표시된다. 역방향 전달경로 개수  $n_B$ 는  $X$ 에서 복원되는 가진 소스의 측정 시간에 의해 결정되는 정수값으로서 파의 군속도와 측정시간으로부터 결정된다.

식 (1)에서  $Q_j$ 에 대응되는 파 전달 거리  $q_j$ 는 다음과 같다 [그림 1(b)].

$$q_j = \begin{cases} \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_B\| & (j=0) \\ \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{B_j}\| & (j \geq 1) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{x}_{B_j}$ 는 가상탐지점  $B_j$ 의 좌표벡터이고  $j=0$ 은 파 반사 없이  $B_j$ 에서  $X$ 로 전달되는 경로이다.

식 (1)는 최종적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{y}(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{j=0}^{n_B} \sum_{i=0}^{n_F} g(q_j, \omega) g^*(p_i, \omega) I_A^*(\omega) = \Gamma(\mathbf{x}, \omega) I_A^*(\omega) \quad (3)$$

여기서  $n_F$ ,  $I_A$  그리고  $\Gamma$ 는 파 반사에 의한 순방향 총 전달 경로수, 가진점  $A$ 에서의 입력소스, 그리고 시간반전연산자를 나타낸다.

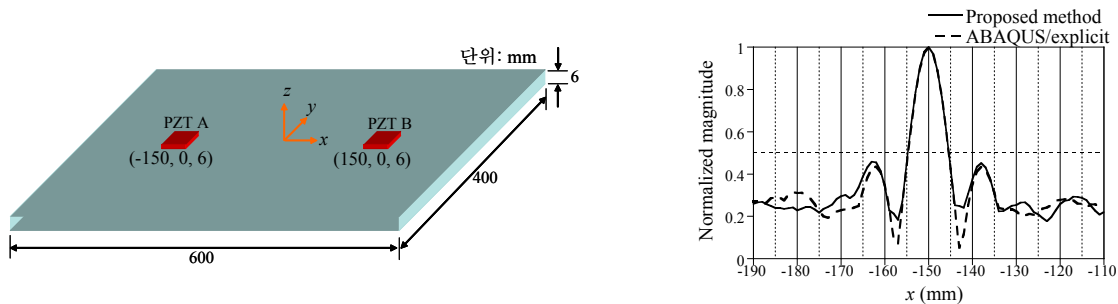
### 3. 수치 예제를 통한 검증

2장에서 기술된 시간반전과정 모사기법을 이용하여 시간반전램파의 공간모임을 수치예제를 통해 구현하였다. 그림 2(a)와 같이 대상 구조물은 가로, 세로, 두께가 각각 600mm, 400mm, 6mm인 알루미늄 재료의 평판이다. 다중 모드의 간섭 없이 순수하게  $A_0$ 램파 모드만이 시간반전과정에 참여할 수 있도록 가진점과 측정점에 대응하는 판의 윗면과 아랫면에  $d_{31}$  타입의 동일한 압전소자 (PZT A, B, C, D)를 부착하였다. 먼저 순방향 파 전달에서 협대역 톤버스트 전압 신호를 가진점의 윗면과 아랫면에 부착된 PZT A와 D를 가하게 되면  $S_0$ 램파 모드는 상쇄되고  $A_0$ 모드만 평판에 발생할 수 있게 전기적으로 분극 (polarization) 되는 방향을 설정하였다. 마찬가지로 역방향 파 전달에서도  $A_0$ 모드만 평판에 발생하도록 측정점의 윗면과 아랫면에 부착된 PZT B와 C의 분극 방향을 설정하였다 (박현우 2010). 전달된  $A_0$ 모드에 의해 PZT B와 C에서 수신된 응답 신호를 시간반전 시킨 후 다시 PZT B와 C에 동시에 입사시키면 원래 입력 소스 부근에서 시간반전 램파의 공간 모임을 구현할 수 있다. 시간반전과정에서  $A_0$ 모드만이 참여할 수 있도록 PZT A와 D에 동시에 100kHz 톤버스트 입력신호를 사용하였다. 식(3)에서 기술된 시간반전램파의 모사가 유효할 수 있도록 시간반전과정에 사용되는 PZT들은 가진 주파수 대역에서  $A_0$ 모드의 최소 파장 길이(12 mm)와 비교하여 1/6이 되도록 가로와 세로의 길이가 2mm인 정사각형 형태로 설정하였고 두께 또한 무시할 만큼 작게 (1/10 이하) 0.507mm로 설정하였다.

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 시간반전램파의 공간모임을 유한요소해석을 이용하여 구현하였다. 유한요소해석은 KISTI 슈퍼컴퓨팅센터의 IBM p595의 ABAQUS 6.7-4/explicit를 이용하여 수행하였고 사용된 요소의 총 수는 1,440,000개이다.

그림 2에서 시간반전과정을 통해 역방향으로 전달된 시간반전램파의 공간모임 성능을 보이기 위해 원래의 가진점(PZT A와 D)을 중심으로 directivity pattern을 도시하였다. 여기서 directivity pattern이란 시간반전정의 역방향 전달과정에서 계산되는 판의 개별 지점의 최대 변위 응답 스펙트럼이다. 만약 판의 전체 영역에 대해 directivity pattern을 시각화하면 시간반전램파에 의한 공간모임을 쉽게 파악할 수 있다.

x- 및 y-좌표계에 대한 정의는 그림 1(a)와 같고 ABAQUS/explicit에서 계산된 유한요소 해석 결과는 판의 면외 방향인 z방향의 변위에 대한 directivity pattern을 나타낸다. 비교의 편의를 위해 directivity pattern의 최대값을 1로 하여 제안된 방법과 유한요소 해석결과를 각각 기준화 하였다. 그 결과 그림 2(a)와 같이 제안된 방법에 의해 계산된 x-방향과 y-방향의 directivity pattern이 유한요소 해석 결과를 매우 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 한쌍의 탐지자(PZT B&D)를 이용하더라도 파 반사에 의한 가상탐지자 효과를 통해 시간반전램파의 공간모임이 구현되는 것을 정량적으로 확인하였다. 또한, 연산시간 비용측면에서 그림 2(a)의 해석결과의 경우 제안된 방법은 93초 정도가 소요된 반면 유한요소 해석의 경우 15시간 44분이 소요되었다<sup>1)</sup>. 제안된 방법이 적은 연산비용으로 해석결과를 매우 정확하게 예측하고 있다.



(a) 시간반전램파의 공간모임 구현을 위한 알루미늄 평판의 기하학적 형상과 PZT 배치. 괄호안의 숫자는 PZT 소스 부근에서 시간반전램파의 공간모임 성능이 부착된 위치의 좌표 벡터를 나타냄 (평판 윗면의 중앙점이 원점). (b) 제안된 방법과 유한요소해석 결과 비교: 입력 판의 기하학적 형상과 PZT 배치. 괄호안의 숫자는 PZT 소스 부근에서 시간반전램파의 공간모임 성능이 부착된 위치의 좌표 벡터를 나타냄 (평판 윗면의 중앙점이 원점).

그림 2. 제안된 방법과 유한요소해석과의 비교 검증

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2010-0004625).

## 참고문헌

- Raghavan, A. and Cesnik, C.E.S. (2007) Review of guided-wave structural health monitoring, *The Shock and Vibration Digest* 39(91), pp.91-114.
- Park, H.W., Sohn, H., Law, K.H., and Farrar, C.R. (2007) Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate, *Journal of Sound and Vibration* 302(1-2), pp.50-66.
- Fink, M., Cassereau, D., Derode, A., Prada, C., Roux, P., Tanter, M., Thomas, J.L., Wu, F. (2000) Time-reversed acoustics, *Rep. Prog. Phys.* 63 pp.1933-1995.
- 박현우 (2010) 가상 탐지자 배열 모델을 이용한 직사각형 판에서 A0 램파 모드 시간반전과정 모사, **한국소음진동공학회논문집** 20권(5호) pp.460-469.

1) 제안된 방법은 MATLAB 2010a (Windows XP 64bit with Intel Core 2 Quad 6600)를 통해 구현되었고 ABAQUS/explicit 해석은 KISTI 슈퍼컴퓨팅 센터 hp 590의 16cpus를 사용하여 수행되었음.