

# 단일 센서와 공간집속 신호처리 기술을 이용한 복합재 판에서의 충격위치 결정

## Impact Localization of a Composite Plate Using a Single Transducer and Spatial Focusing Signal Processing Techniques

조 성 종\* · 정 현 조†  
Sungjong Cho and Hyunjo Jeong

(Received October 17, 2012 ; Revised October 17, 2012 ; Accepted December 28, 2012)

**Key Words** : Time-reversal(시간 역전), Lamb Wave(Lamb 파), Impact Localization(충격 위치탐지), Localization Imaging(위치 가시화), Inverse Filtering(인버스 필터링)

### ABSTRACT

A structural health monitoring(SHM) technique for locating impact position in a composite plate is presented in this paper. The technique employs a single sensor and spatial focusing properties of time reversal(TR) and inverse filtering(IF). We first examine the focusing effect of back-propagated signal at the impact position and its surroundings through simulation. Impact experiments are then carried out and the localization images are found using the TR and IF signal processing, respectively. Both techniques provide accurate impact location results. Compared to existing techniques for locating impact or acoustic emission source, the proposed methods have the benefits of using a single sensor and not requiring knowledge of material properties and geometry of structures. Furthermore, it does not depend on a particular mode of dispersive Lamb waves that is frequently used in the SHM of plate-like structures.

### 기 호 설 명

$E_{TR}(\omega)$  : 시간 역전에 의해 재전파한 음장

$E_{IF}(\omega)$  : 인버스 필터링에 의해 재전파한 음장

$e(t), E(\omega)$  : 입력(충격) 신호와 푸리에 변환  
 $f(t), F(\omega)$  : 출력(수신) 신호와 푸리에 변환  
 $h(t), H(\omega)$  : 임펄스 응답함수와 푸리에 변환  
(충격원 → 수신센서 방향 전파)  
 $H^*(\omega)$  :  $H(\omega)$ 의 공액복소수  
 $H^T(\omega)$  : 역방향 전파 임펄스 응답함수  
(수신센서 → 충격원 방향)

### 1. 서 론

판 또는 셸 형상의 부재는 토목 또는 항공용 구조물의 부재로 빈번히 사용되고 있다. 최근에는 항공용 구조물 또는 압력용기의 경량화를 위해 높은 비강성과 비강도의 특성을 갖는 복합재가 많이 사용되고 있다. 이러한 구조물은 충격 또는 균열/바리

† Corresponding Author ; Member, Division of Mechanical and Automotive Engineering, Wonkwang University,  
E-mail : hjeong@wku.ac.kr  
Tel : +82-63-850-6690, Fax : +82-63-850-6691  
\* Graduate School, Wonkwang University

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Autumn Conference  
‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

등의 결함과 손상에 의해 파손될 수 있으며, 이러한 파손은 대형 사고를 유발할 수 있다.

구조물의 안정적 사용에 있어 충격 손상이나 결함 검출은 기본적으로 중요한 문제이다. 이에 구조물 건전성 감시기술은 충격에 의해 발생하는 충격력의 크기와 위치 탐지 및 균열이나 박리 등의 결함/손상에 의해 발생하는 음향방출원의 위치 탐지 등에 주로 적용 되어왔다. 기존의 충격원 또는 음향방출원의 위치 탐지의 경우 다수의 센서를 이용하여 파동의 도달 시간차이가 이용되었다<sup>(1)</sup>. 그러나 섬유강화 복합재 구조물의 경우 섬유의 배열 방향에 따른 이방성(anisotropy)에 의해 파의 전파 속도가 달라지며, 판에서의 다중 모드와 분산성, 다중 산란, 경계면에서의 반사와 모드 변환 등의 발생으로 인하여 도달 시간차 해석을 위한 특수한 신호처리를 필요로 하며<sup>(2-4)</sup>, 일반적으로 음향방출원(충격원)의 위치 결정은 아직 해결하기 어려운 문제로 남아 있다. 재래식 충격위치 탐지법의 단점을 극복하기 위하여 최근에 등장하고 있는 신호처리 기술의 일종인 시간역전 또는 인버스 필터링의 공간 집중성을 이용할 수 있다. 시간역전 원리의 공간집속성은 Draeger와 Fink에 의해 연구되었으며, Ing 등에 의해 최초로 충격원의 위치탐지에 관한 연구가 수행된 바 있다<sup>(5,6)</sup>.

그 원리는 다음과 같다. 우선 관심 영역을 일정한 크기의 격자로 나누고 각 격자점에 충격을 가하여 고정된 위치에 부착된 단일 리시버로 긴 시간동안 신호를 수신, 저장한다. 이는 격자점과 리시버 사이의 임펄스 응답을 구하는 것과 같다. 다음으로 임의의 격자점을 실제 충격위치로 가정하고 충격을 가하여 수신한 신호를 시간역전한 후에 앞에서 저장한 각 격자점의 신호와 곱하여 그 결과를 서로 비교하면 실제 충격위치에서 공간집속에 의해 신호의 진폭이 최대가 되므로 충격위치의 추정이 가능하다. 이외에도 시간역전 원리의 원신호 복원성과 이를 이용한 충격원이나 진동원의 위치 탐지에 대한 논문이 다수 발표되고 있다<sup>(7-15)</sup>. 최근에 Ciampa와 Meo는 인버스 필터링 기법을 이용하여 음향방출원의 위치 표정에 관한 실험 결과를 발표한 바 있다<sup>(16)</sup>.

이 논문에서는 시간 역전과 인버스 필터링을 이용하여 복합재 평판에서 충격 위치를 결정하기 위한 연구를 수행하고 그 결과를 제시하였다. 이론적 시

물레이션과 실험을 통하여 충격원과 그 주변에서 신호의 집중효과를 관찰한다. 이러한 결과를 기초로 충격위치 결정을 위한 실험을 수행하고 그 결과를 가시화 한다.

## 2. 이론적 접근

### 2.1 판 이론

복합재 판에서 충격 가진에 의한 파동 전파와 수신, 시간역전과 인버스 필터링에 의한 신호의 집중 효과를 관찰하기 위하여 먼저 해석적인 방법으로 시물레이션을 수행한다. 델타 함수 가진에 의한 굽힘파 모드의 변위는 정규 모드의 확장에 의해 구할 수 있다<sup>(17)</sup>. Fig. 1과 같이  $x, y$ 방향의 크기가 각각  $a, b$ 이고 두께가  $h$ 인 직교이방성 복합재 판을 고려하자. 충격원의 크기  $P$ , 충격원의 위치가  $x=x_0, y=y_0$ 인 경우 수신 위치( $x, y$ )에서 굽힘파의 수직변위는 다음 식으로 주어진다.

$$w(x, y, t) = \frac{4P}{\rho h a b} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \alpha_n x \sin \beta_m y \sin \alpha_n x_0 \sin \beta_m y_0 (1 - \cos \omega_{nm} t)}{\omega_{nm}^2} \tag{1}$$

위 식에서 주파수는 다음 식으로 정의되며

$$\omega_{nm} = \sqrt{\frac{D_{11}\alpha_n^4 + D_{22}\beta_m^4 + 2(D_{12} + 2D_{66})\alpha_n^2\beta_m^2}{\rho h}} \tag{2}$$

여기서  $D_{ij}$ 는 적층판의 굽힘강성,  $\alpha_n = \frac{n\pi}{a}$ ,  $\beta_m = \frac{m\pi}{b}$ 이다.

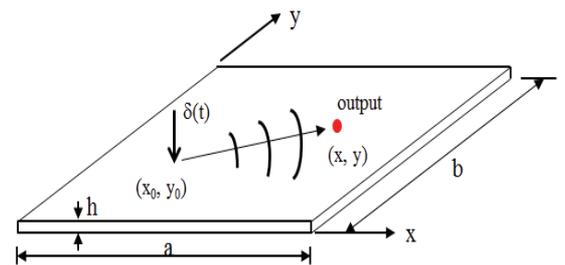
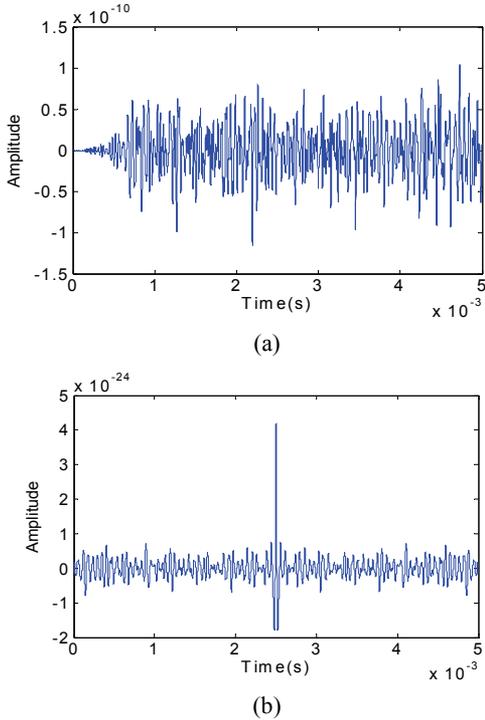


Fig. 1 Flexural wave generated by a point force at  $(x_0, y_0)$  on a composite plate( $a=1.2$  m,  $b=1.2$  m,  $h=0.00254$  m)

**Table 1** Properties of unidirectional fiber reinforced composite laminate

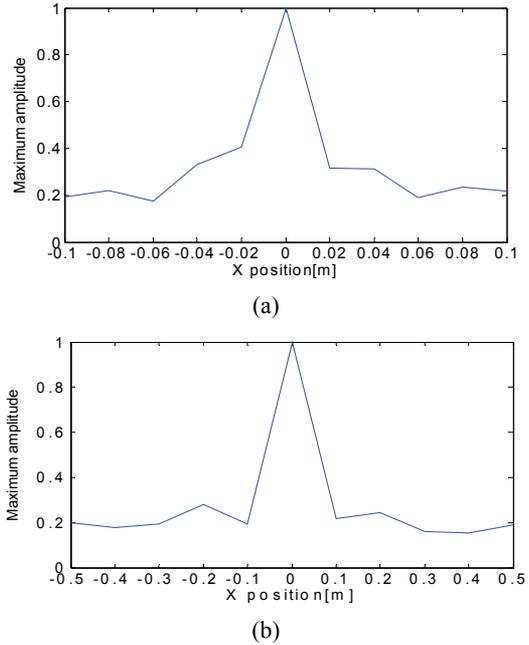
$D_{11}[\text{Pa} \cdot \text{m}^3]$	$D_{22}[\text{Pa} \cdot \text{m}^3]$	$D_{12}[\text{Pa} \cdot \text{m}^3]$	$D_{66}[\text{Pa} \cdot \text{m}^3]$
198.7	13.23	3.98	8.15
$\rho[\text{kg}/\text{m}^3]$		$h[\text{mm}]$	
1550		2.54	



**Fig. 2** Temporal focusing behavior of time reversal process: (a) Received signal due to a point source impact, and (b) Focused signal at the original impact location after time reversal and back-propagation of signal (a)

**2.2 시뮬레이션**

2.1절의 판 이론식을 이용하여 Table 1의 물성을 가진 복합재 판에 대해 굽힘파의 전파, 수신, 이의 시간역전과 인버스 필터링 신호처리에 의한 원래 충격위치와 그 주변에서의 신호의 공간집속성을 살펴보고자 한다. 그리고 해석적인 시뮬레이션 결과를 기초로 실험을 통하여 충격위치 결정에 활용한다. Fig. 2는 시뮬레이션을 통해 얻은 수신 신호와 시간 역전에 대한 결과이다. 여기서 충격원의 위치와 수신위치는 각각  $(x_0=0.6, y_0=0.6)$  m,  $(x=0.1, y=0.1)$  m이다. (a)는



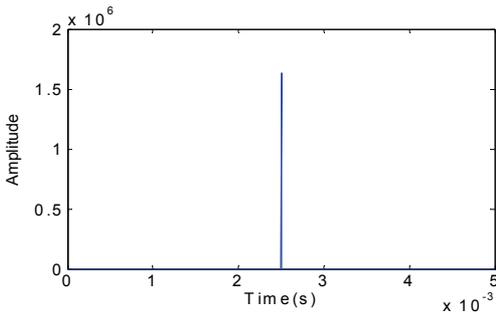
**Fig. 3** Spatial focusing behavior of time reversed and back-propagated wave at different receiving positions along the x-axis: (a)  $x=0, \pm 0.02$  m,  $\pm 0.04$  m, ..., and (b)  $x=0, \pm 0.1$  m,  $\pm 0.2$  m, ...

초기 수신 신호이며, (b)는 시간 역전한 초기 수신 신호의 재전파에 의해 원래 충격위치에서 수신한 신호를 보여 준다. 이 결과 최초 수신 시간인 5 ms의 중간인 2.5 ms에서 시간 역전에 의한 분산성 판파의 시간 집중이 이루어짐을 알 수 있다.

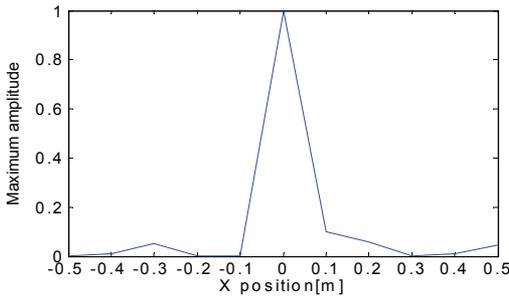
충격원과 그 주변에서 시간 역전에 의한 공간 집중효과를 관찰하기 위하여 원래의 충격원을  $x$  좌표의 원점으로 하고 그 주변의 신호를 관찰하였다. 집중효과의 비교를 위하여 신호의 최대 진폭값을 구한 다음, 원래 충격 위치에서의 최대값으로 정규화하였다.

Fig. 3은 Fig. 2(a)의 수신 신호를 사용하여 (a)  $x=0, \pm 0.02$  m,  $\pm 0.04$  m, ..., (b)  $x=0, \pm 0.1$  m,  $\pm 0.2$  m, ..., 위치에서 관찰한 결과를 보여 준다. 이 결과를 보면 간격에 관계없이 최초 충격원( $x=0$ )에서 시간 역전에 의한 집중 신호의 최대값이 발생함을 확인할 수 있다.

시간역전에서와 같이 Fig. 2(a)의 초기 수신신호를 사용하여 이번에는 인버스 필터링 신호처리 후 재전파한 신호의 시공간 집중효과를 관찰하였다.



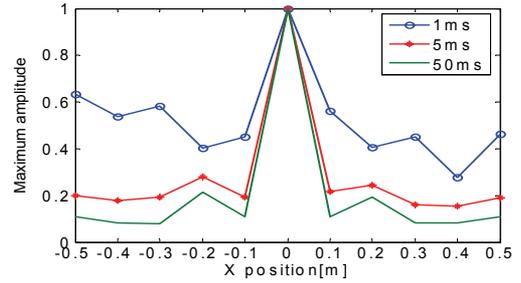
**Fig. 4** Temporal focusing behavior of inverse filtering process. Focused signal at the original impact location after time reversal and back-propagation of signal Fig. 2(a)



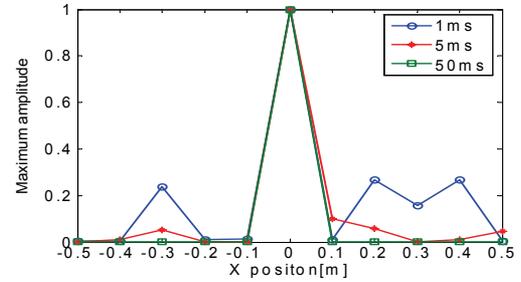
**Fig. 5** Spatial focusing behavior of time reversed and back-propagated wave along the  $x$ -axis at different receiving positions of  $x=0, \pm 0.1$  m,  $\pm 0.2$  m, ...

Fig. 4는 인버스 필터링에 의해 원래 충격위치에서 시간집속이 일어남을 보여 준다. Fig. 2(b)의 시간역전에서와 마찬가지로 최초 수신 시간인 5 ms의 중간인 2.5 ms에서 집속이 일어나, 다른 시간에서 신호 집속은 전혀 발생하지 않는다. 인버스 필터링의 과정을 거쳐 재전파한 파의 공간집속 거동은 Fig. 5에 나와 있다.

여기서 관찰 위치는  $x=0, \pm 0.1$  m,  $\pm 0.2$  m, ... 이다. Fig. 3(b)의 시간역전 집속에서와 같이 원래 충격원( $x=0$ )에서 집속 신호의 최대값이 나타나고 있으나, 다른 위치에서의 신호 집속은 시간역전법에 비해 상대적으로 미약하다. 이 결과는 인버스 필터링 방법에 의해 충격점과 그 주변점들 사이에 최대 진폭값의 대비가 더 크게 나타나므로 실제 적용시에 충격 위치 추정을 더 효과적으로 해 줄 것임을 시사해 준다.



(a)



(b)

**Fig. 6** Spatial focusing behavior as a function of duration time of received signal. Observed along the  $x$ -axis at different receiving positions of  $x=0, \pm 0.1$  m,  $\pm 0.2$  m, ...: (a) Time reversal method, and (b) Inverse filtering technique

충격위치 결정에 영향을 미치는 다른 인자로서 임펄스 응답을 구하는 단계에서 신호의 수신 시간을 들 수 있다. 수신 시간에 따른 공간 집속효과를 관찰하기 위해 수신 시간을 1 ms, 5 ms, 50 ms로 달리 하여 집속 효과를 비교하였다. Fig. 6은 수신 시간에 따른 공간 집속효과를 비교한 결과이다. 시간 역전과 인버스 필터링 모두 수신 시간이 길수록 집속효과가 더 좋아짐을 알 수 있다(최대 진폭값의 대비와 공간 분해능의 두 가지 측면에서). 이와 같은 해석적 시뮬레이션 결과를 바탕으로 3절에서 실험을 수행하고 충격 위치 추정 결과를 가시화한다.

### 3. 실험적 접근

#### 3.1 장치의 구성

복합재 판에서의 파동 전파 및 집속현상의 관찰과 이를 이용한 충격위치 결정을 위한 실험 개략도가 Fig. 7에 나와 있다. 실험에 사용된 복합재 평판의

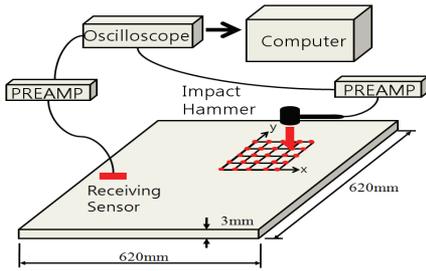


Fig. 7 Experimental setup for measurements of impact localization in a composite plate. Sensor location and grid point coordinates are shown

크기는 620 mm×620 mm×3 mm이다. 복합재 판의 윗면을 임팩트 햄머로 충격을 가하고 전파되는 신호를 중심주파수 500 kHz 접촉식 초음파 센서로 수신한다. 수신된 신호는 예비증폭기로 40 dB 증폭시킨 후 개인용 컴퓨터로 보내 신호분석을 수행한다. 실험 절차 및 방법은 3.2절에 자세히 나와 있다.

### 3.2 실험 절차 및 신호 처리 방법

실험 절차는 아래와 같으며, 신호 처리 방법과 함께 크게 3가지로 나눌 수 있다. 첫 번째로 격자점의 가진과 임의의 충격원에 의한 신호를 수신 및 저장하는 단계로서 다음과 같다. 여기서 사용된 임펄스 응답함수는 Fig. 8에 정의되어 있다.

① 복합재 평판에 측정 영역을 설정하고 일정한 크기의 격자로 나눈다.

② 각 격자점에 균일한 크기로 충격을 가하고 고정된 위치에서의 리시버를 통해 신호를 수신, 저장한다. 이는 격자점과 리시버 사이의 임펄스 응답을 구하는 것이다 $[f_m(t) = h_m(t) \otimes e_m(t)]$ .

③ ②에서 수신된 신호를 푸리에 변환하여 저장한다 $[F_m(\omega) = H_m(\omega)E_m(\omega)]$ .

④ 관심 영역 내 임의의 충격원에 대한 신호를 수신하고, 푸리에 변환하여 저장한다.

$$[F_{m_0}(\omega) = H_{m_0}(\omega)E_{m_0}(\omega)]$$

두 번째로 충격 위치 가시화를 위한 신호처리 과정으로서 시간 역전과 인버스 필터링으로 나뉜다. 먼저 시간 역전 신호처리 과정은 다음과 같다.

⑤ ④에서 푸리에 변환하여 저장된 임의의 충격원 신호를 복소공액화 하여 시간역전 시킨다.

$$[F_{m_0}^*(\omega) = H_{m_0}^*(\omega)E_{m_0}^*(\omega)]$$

⑥ ③에서 푸리에 변환된 각 격자점각의 임펄스

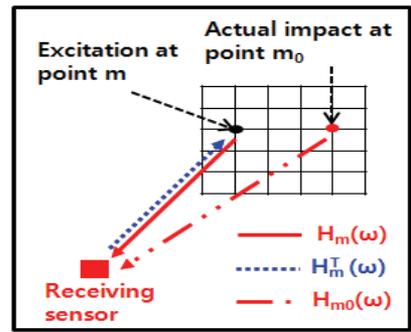


Fig. 8 Definition of impulse response functions:  $H_m(\omega)$  is between the  $m$ th excitation point and the sensor,  $H_m^T(\omega)$  is between the sensor and the  $m$ th excitation point, and  $H_{m_0}(\omega)$  is between the  $m_0$  actual impact point and the sensor

응답 신호에 ⑤에서 구한 시간 역전 시킨 신호를 곱한다 $[E_{TR}(\omega) = H_m^T(\omega)H_{m_0}^*(\omega)E_{m_0}(\omega)]$ .

인버스 필터링 과정은 다음과 같다.

⑤' ④에서 푸리에 변환하여 저장된 임의의 충격원 신호를 인버스 필터링시킨다.

$$[F_{m_0}(\omega) = \widetilde{H}_{m_0}(\omega)E_{m_0}(\omega), \widetilde{H}_{m_0}(\omega) = \frac{H_{m_0}^*(\omega)}{|H_{m_0}(\omega)|^2}]$$

⑥' ③에서 푸리에 변환된 각 격자점각의 임펄스 응답 신호에 ⑤'에서 구한 인버스 필터링시킨 신호를 곱한다 $[E_{IF}(\omega) = H_m^T(\omega)\widetilde{H}_{m_0}(\omega)E_{m_0}(\omega)]$ .

공간 상호성에 의해  $|H_{m_0}(\omega)|^2 = H_{m_0}^*(\omega)H_{m_0}^T(\omega)$ 로 나타낼 수 있으며<sup>(16)</sup>, 이는 시간 역전 과정의 결과를 충격원과 리시버 사이의 임펄스 응답 함수의 크기 ( $|H_{m_0}(\omega)|^2$ )로 나누어 주는 것과 같다.

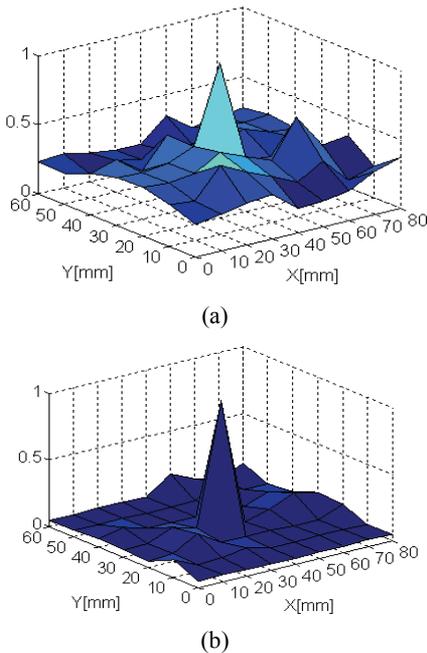
마지막 단계는 충격 위치 가시화 단계로서 각 격자점에서 계산한 주파수 영역 신호  $E_{TR}(\omega)$ ,  $E_{IF}(\omega)$ 를 역 푸리에 변환하여 시간영역 신호로 바꾼 다음, 최대 진폭값을 구하여 2차원 이미지화 한다. 여기서 최대 진폭값을 갖는 점이 바로 충격위치가 된다.

### 3.3 실험 결과

관심 영역 내의 임의의 충격원에 대한 시간 역전과 인버스 필터링에 대한 결과를 가시화하였다. 가시화 영역은 80 mm×60 mm이며, 이 영역을 10 mm 크기의 정사각형 격자로 나누었다(Fig. 7). 실험 수행 시 충격력의 크기는 30 mV, 신호의 수신시간은

**Table 2** Sensor and impact coordinates in case 1 and 2

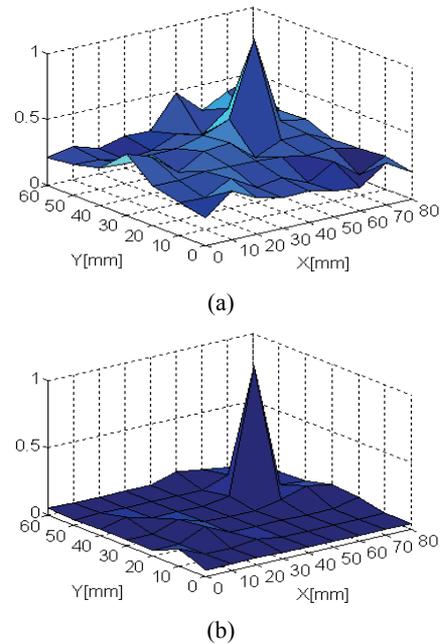
	X(mm)	Y(mm)
Receiving position	-200	0
Impact 1	40	30
Impact 2	60	40

**Fig. 9** Impact localization results for impact case 1 (X=40 mm, Y=30 mm): (a) TR focusing technique, and (c) IF focusing technique

10 ms를 사용하였다. 충격원과 리시버의 좌표는 Table 2에 나와 있으며, 충격원의 위치는 두 가지 경우를 고려하였다.

Fig. 9(a), (b)는 충격위치 1에 대한 결과를, Fig. 10(a), (b)는 충격위치 2에 대한 결과를 각각 보여 준다. 시간 역전과 인버스 필터링에 대한 결과를 보면 2절의 시뮬레이션에서 관찰한 바와 마찬가지로 두 개의 다른 충격 위치 모두 실제 충격 위치에서 집중 신호의 최대 진폭이 발생한다.

충격위치와 그 주변에서 구한 집중 신호의 최대 값의 차이를 비교해 보면 인버스 필터링의 경우가 전반적으로 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서 충격점과 그 주변점들 사이에 최대 진폭값의 대비가 더 확연해 지므로 충격 위치 추정에 더 효과적인 방법이 될 수 있다. 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

**Fig. 10** Impact localization results for impact case 2 (X=60 mm, Y=40 mm): (a) TR focusing technique, and (c) IF focusing technique

시간역전의 경우 주로 수신 센서의 중심주파수 근처의 성분들이 높은 에너지로 재전파와 집중과정에 사용되는 것에 비해, 인버스 필터링의 경우 충격원과 수신 센서 사이의 임펄스 응답함수의 크기로 나누어지므로 중심주파수에서 멀리 떨어진 낮은 주파수와 높은 주파수 성분들이 비교적 큰 에너지로 재전파와 집중 과정에 포함되기 때문이다.

여기서는 수신 시간으로 10 ms를 사용하였으나, 이론 해석 결과에서 관찰한 바와 같이 수신 시간을 더 길게 할수록 충격점과 그 주변 위치 간의 공간 집중 효과가 좋아질 것으로 예상된다.

충격위치의 공간분해능은 격자의 크기에 의존하므로 격자의 크기를 조밀하게 할수록 분해능은 더 좋아질 것으로 예상되나, 데이터 수집 및 계산에 있어 요구되는 시간이 더 길어질 것이다.

### 3. 결 론

이 논문에서는 단일 센서와 공간집속 신호처리를 이용한 복합재 평판에서 충격원의 위치 탐지에 대한 내용을 다루었다. 먼저 이론적 접근을 통해 시간 역

전과 인버스 필터링을 이용한 충격원의 위치 탐지에 대한 적용 가능성을 보이고, 실험을 통해 실제 충격 위치 결정에 대한 결과를 가시화함으로써 제안된 방법의 타당성을 입증하였다. 두 방법 모두 충격위치를 정확하게 제공하였으나, 인버스 필터링 방법이 충격점과 그 주변점들 사이에 최대 진폭값의 차이를 더 크게 해줌으로 충격 위치 추정에 더 효과적임을 확인하였다.

여기서 제안한 충격위치 결정법은 기존의 방법에 비해 많은 장점을 갖는다. 단일 센서를 사용할 수 있으며, 재료 물성에 대한 정보를 필요로 하지 않는다는 점이다. 또한 판 구조물에서 나타나는 분산성의 다중모드 파동이 발생하는 경우에도 특정 모드나 주파수에 의존할 필요가 없다. 제안된 방법이 신뢰성 높은 구조물 건전성 감시 기술로 발전하기 위해서는 충격 발생 위치가 임펄스 응답 측정의 격자점과 일치하지 않는 경우, 실제 충격에 의한 수신 신호의 모양이 임펄스 응답 신호와 다른 경우 등에 대해 추가적인 연구를 수행할 필요가 있다.

## 후 기

이 논문은 한국연구재단의 일반연구자 지원 사업에 의해 수행됨 (2012-0002466).

## 참 고 문 헌

(1) Tobias, A., 1976, Acoustic Emission Source Location in Two Dimensions by an Array of Three Sensors, *Non-destructive Testing*, Vol. 9, No. 1, pp. 9~12.

(2) Jeong, H. and Jang, Y.-S., 2000, Fracture Source Location in Thin Plates Using the Wavelet Transform of Dispersive Waves, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 612~619.

(3) Jeong, H., Kwon, I.-B. and Choi, M.-Y., 2000, Time Frequency Analysis of Dispersive Waves in Structural Members under Impact Loads, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 20, No. 6, pp. 481~489.

(4) Gaul, L. and Hurlbauss, S., 1997, Identification of the Impact Location on a Plate Using Wavelets, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 12, No.

6, pp. 783~795.

(5) Draeger, C. and Fink, M., 1997, One-channel Time Reversal of Elastic Waves in a Chaotic 2D-silicon Cavity, *Physical Review Letters*, Vol. 79, No. 3, pp. 407~410.

(6) Ing, R. K., Quieffin, N., Catheline, S. and Fink, M., 2005, In Solid Localization of Finger Impacts Using Acoustic Time-reversal Process, *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 20, p204104.

(7) Sutin, A. M., TenCate, J. A. and Johnson, P. A., 2004, Single-channel Time Reversal in Elastic Solids, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 116, No. 5, pp. 2779~2784.

(8) Park, H. W., Sohn, H., Law, K. H. and Farrar, C., 2007, Time Reversal Active Sensing for Health Monitoring of a Composite Plate, *J. Sound Vib.*, Vol. 302, No. 1-2, pp. 50~56.

(9) Jeong, H., 2008, Reconstruction of Dispersive Lamb Waves in Thin Plates Using a Time Reversal Method, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 28, No. 1, pp. 59~63.

(10) Park, H. W. Kim, S. B. and Sohn, H. 2009, Understanding a Time Reversal Process in Lamb Wave Propagation, *Wave Motion*, Vol. 46, No. 7, pp. 451~467.

(11) Park, H. W., 2010, Simulating a Time Reversal Process for A0 Lamb Wave Mode on a Rectangular Plate Using a Virtual Sensor Array Model, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 460~469.

(12) Jeong, H., Cho, S. and Wei, W., 2011, A Baseline-free Defect Imaging Technique in Plates Using Time Reversal of Lamb Waves, *Chinese Physics Letters* Vol. 28, No. 6, 064301.

(13) Bai, M. R. and Tsai, Y. K., 2011, Impact Localization Combined with Haptic Feed Back for Touch Panel Applications Based on the Time-reversal Approach, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 129, No. 3, pp. 1297~1305.

(14) Ciampa, F. and Meo, M., 2012, Impact Detection in Anisotropic Materials Using a Time Reversal Approach, *Structural Health Monitoring*, Vol. 11, No. 1, pp. 43~49.

(15) Vigoureux, D. and Guyader, J.-L., 2012, A Simplified Time Reversal Method Used to Localized Vibrations Sources in a Complex Structure, *Applied*

Acoustics, Vol. 73, No. 5, pp. 491~496.

(16) Ciampa, F. and Meo, M., 2011, Acoustic Emission Localization in Complex Dissipative Anisotropic Structures Using a One-channel Reciprocal Time Reversal Method, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 130, No. 1, pp. 168~175.

(17) Prosser, W., 1991, The Propagation Characteristics of the Plate Modes of Acoustic Emission Wave in Thin Aluminum Plates and Thin Graphite /Epoxy Composite Plates and Tubes, *NASA Technical Memorandum*, 104187.



**Hyunjo Jeong** received the BS and MS degree in mechanical engineering from Hanyang University, Seoul, Korea and from Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, USA in 1980 and 1986, respectively.

He then received his PhD degree in 1990 from Iowa State University in engineering

mechanics. Dr. Jeong is currently a professor at the Division of Mechanical and Automotive Engineering, Wonkwang University, Iksan, Korea. His current research interests include time reversal signal processing, nonlinear characterization of damaged materials, and ultrasonic nondestructive evaluation.



**Sungjong Cho** received his BS degree in 2012 from Wonkwang University in mechanical engineering. He is a MS candidate and a research assistant at Wonkwang University. His research interests include signal processing and

elastic wave propagation in thin-walled structures with applications in acoustic emission and non-destructive inspection.