

단일센서와 시간역전법을 이용한 판에서의 충격위치 결정에 관한 연구

Determination of Impact Source Location Using a Single Transducer and Time Reversal Technique

정현조*[†], 조성종*

Hyunjo Jeong*[†], Sungjong Cho*

초 록 본 논문에서는 단일 센서와 시간역전 원리를 이용하여 간단한 판에서 충격 위치를 결정할 수 있는 탐상법을 다루었다. 수치적인 시뮬레이션과 실험을 통하여 시간역전에 의한 충격위치와 그 주변에서 신호의 집속효과를 관찰하고, 충격위치 결정에 영향을 미칠 수 있는 인자들(가진력의 크기, 신호의 기록시간)에 대해 살펴보았다. 이러한 결과를 기초로 두 가지 다른 충격위치에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 가시화하였으며, 실제 충격위치를 정확하게 결정할 수 있음을 확인하였다. 여기서 제안한 방법의 특징은 단일센서를 사용하는 것과 시험체의 형상과 물성을 몰라도 된다는 점이다. 또한 판에서와 같이 분산성의 다중모드 파동이 발생하는 경우에도 특정 모드나 주파수에 의존할 필요가 없다. 따라서 기존의 충격위치 결정법에 비해 많은 장점을 지니고 있다.

주요용어: 시간역전, Lamb 파, 충격원 위치탐지, 음향방출, 시간집속, 공간집속, 위치 가시화

Abstract A structural health monitoring technique for locating impact position in a plate structure is presented in this paper. The method employs a single sensor and spatial focusing of time reversal (TR) acoustics. We first examine the TR focusing effect at the impact position and its surroundings through simulation and experiment. The imaging results of impact points show that the impact source location can be accurately estimated in any position of the plate. Compared to existing techniques for locating impact or acoustic emission source, the proposed method has the benefits of using a single sensor and not requiring material properties and geometry of structures. Furthermore, it does not depend on a particular mode of dispersive Lamb waves that is frequently used in other ultrasonic testings of plate-like structures.

Keywords: Time Reversal, Lamb Wave, Impact Source Location, Acoustic Emission, Temporal Focusing, Spatial Focusing, Localization Imaging

1. 서 론

판형상의 부재는 토목 또는 항공용 구조물의 부재로서 빈번히 사용되며, 이러한 구조물에서 건전성 감시기술은 충격에 의해 발생하는 충격력

의 크기와 위치 탐지, 균열이나 박리 등의 결함/손상에 의해 발생하는 음향방출원의 위치 탐지 등에 주로 적용되어 왔다. 충격원 또는 음향방출원의 위치 탐지의 경우 음원으로부터 매질을 전파하여 표면에 부착된 다수의 센서에 직접 수신

[접수일: 2012. 1. 6, 수정일: 2012. 2. 6, 게재확정일: 2011. 2. 10] *원광대학교 기계자동차공학부, [†]Corresponding Author: Division of Mechanical and Automotive Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea (E-mail: hjjeong@wku.ac.kr)

되는 파동의 도달시간 차이를 이용하였다[1]. 이 과정에서 판에서 전파하는 다중 모드와 분산성을 갖는 Lamb 파의 특정 모드 식별과 군속도를 계산하기 위한 신호처리 기술이 적용되었다[2-4]. 그러나 형상과 물성이 복잡한 일반적인 구조물의 경우 다중 산란, 경계에서의 반사와 모드변환 등의 발생으로 인하여 센서 수신신호의 군속도 도달 시간차 해석이 복잡해지고 결과적으로 음원위치 탐지에 오차를 초래할 수 있다.

시간역전 원리의 파동집속 효과를 이용하면 위에서 언급한 재래식 충격위치 탐지 기법의 단점을 극복하고 정확한 위치 결정이 가능하다. 시간역전에 의한 분산성 Lamb 파의 원신호 복원성에 대한 연구는 소스와 리시버 사이에서 직접 전파한 파를 이용하여 연구되었다[5]. 판에서 Lamb 파의 다중 모드와 경계면에서의 반사파를 포함한 파동의 시간역전 과정은 Sohn 등에 의해 규명되었다[6]. 원신호 복원성질은 다수의 센서를 이용하여 판에서 결합 또는 손상의 유무 또는 위치 추정에 적용되었는데[7,8], 이는 시간역전 원리의 시간 집속성을 이용한 것이라 할 수 있다. 시간역전의 또 다른 중요한 성질은 공간집속성이다.

Draeger와 Fink[9]는 한쌍의 송, 수신 센서를 이용하여 chaotic cavity 형태로 제작된 waveguide에서 많은 반사파가 포함되게 긴 시간 동안 수신하고 이를 시간역전시켜 원래 송신위치에서 공간집속 효과를 규명하였다. 고체에서 체적파의 시간역전 공간집속성에 대한 연구는 Sutin 등에 의해 이루어졌다[10]. 최근에는 사각형 판에서 Lamb 파의 공간집속 성능에 대한 연구가 이루어졌다[11]. 시간역전 원리를 이용한 충격원의 위치탐지에 관한 연구는 Ing 등에 의해 최초로 수행되었으며[12], 그 원리는 다음과 같다. 먼저 관심영역을 격자로 나누고 각 격자점에 일정한 크기의 충격을 가하여 고정된 위치에 부착된 단일 리시버로 긴 시간동안 신호를 수신, 저장한다. 이는 격자점과 리시버 사이의 임펄스 응답을 구하는 것과 같다. 다음으로 임의의 격자점을 실제충격위치로 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. 보다 최근에는 단순한 형태의 구조물에 대한 충격원의 위

치 탐지에 대한 논문이 다수 발표되었다[13-15].

본 논문에서는 단일 리시버 센서와 시간역전 원리를 이용하여 일반적인 구조물의 건전성 감시 기술로 발전시키기 위한 초기 연구 단계로서 간단한 판에서 충격 위치를 결정하기 위한 연구를 수행하고 그 결과를 제시한다. 수치적인 시뮬레이션과 실험을 통하여 시간역전에 의한 충격위치와 그 주변에서 신호의 집속효과를 관찰하고, 충격위치 결정에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대해 살펴본다. 이러한 결과를 기초로 충격위치 결정을 위한 실험을 수행하고 그 결과를 가시화한다.

2. 시간 역전 집속 효과 시뮬레이션

시간 역전에 의한 판에서의 파동 집속 효과를 모사하기 위해 미국 Cyberlogic 사의 WAVE 2000 프로그램을 사용하였다. WAVE 2000은 2차원 탄성파 전파 해석 프로그램이다. Fig. 1과 같이 시뮬레이션 영역을 모델링하였다. 2차원 판의 길이와 두께는 각각 1000 mm와 3 mm이며, 재질은 알루미늄이다. T와 R은 각각 송신(충격)위치와 수신위치를 의미한다. 시뮬레이션은 먼저 Fig. 1(a)와 같이 T에서 송신하여 R에 도달된 파를 수신하며, 수신된 신호를 시간 역전시킨 후에 Fig. 1(b)와 같이 최초 수신 위치(T=R)에서 재송신하여 최초 송신 위치(R'=T)에서 수신한다. 그리고 시간역전/재송신시에 R' 위치 주변에 일정한 간격으로 다수의 리시버를 설치하여 수신신호를 관찰함으로써 신호의 집속효과를 확인하고 이를 기초로 충격위치의 결정에 활용한다.

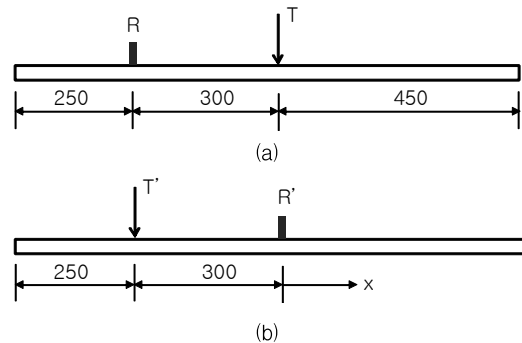


Fig. 1 Schematic configuration of 2D simulation for initial wave propagation, reception, time reversal and backpropagation in a plate(unit: mm)
(a) Initial propagation, (b) Time reversal and backpropagation

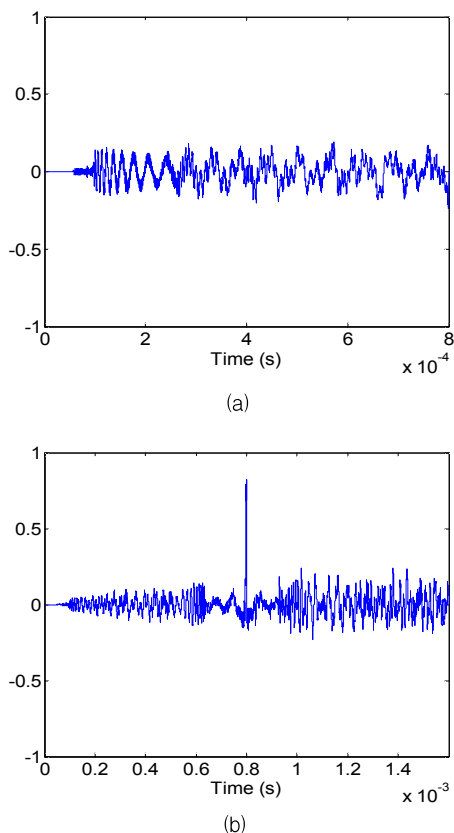


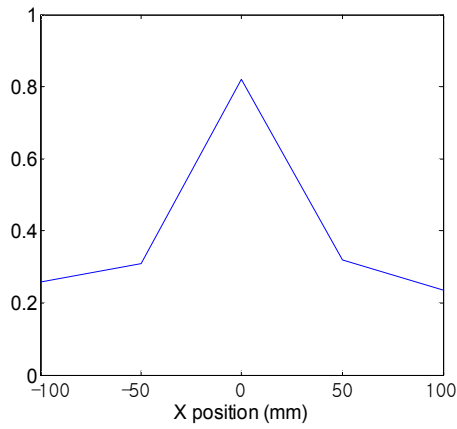
Fig. 2 Simulation results of time reversal focusing (a) Received signal after initial impact, (b) Received signal at the initial impact position after time reversal and backpropagation of signal (a)

Fig. 2는 Fig. 1의 시뮬레이션 결과이다. 입력 신호는 주파수 500 kHz의 반 사이클의 사인파이다. (a)는 800 μ s 동안 수신한 신호이며, (b)는 시간역전 후 1600 μ s 동안 재송신하여 수신한 신호이다. 이 결과 최초 수신 시간인 800 μ s에서 시간역전에 의한 분산성 판파의 집중이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 2(a)를 구성하는 판파 성분은 T에서 R로 직접 전파된 미약한 크기의 s0 파와 이에 비해 상대적으로 아주 큰 진폭의 a0 파, 그리고 판의 좌, 우 경계에서 발생한 이 파들의 반사파이다. Fig. 2(b)에 보인 집중 현상의 발생 이유와 전체 파형의 구조는 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 2(a)의 파들이 시간역전에 의해 재송신 될 때 최초의 전파 경로를 따르는 파는 원신호로 복원되고 서로 더해져서 집중되는 주모드(main mode)를 형성하고, 다른 경로를 따라 전파

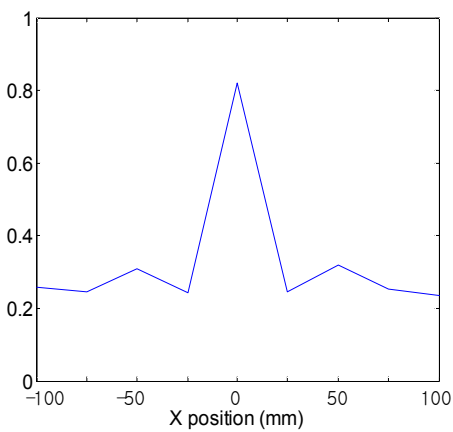
하는 파들은 전파시간이 다르므로 이 주모드를 중심으로 좌, 우에 측면밴드(side bands)를 형성하는 대칭 구조를 갖게 된다. Fig. 2(b)는 이상적인 대칭구조는 아니나 다양한 모드의 파를 더 긴 시간동안 수신한 후에 시간역전하면 이상적인 대칭구조에 더 가까워 질 것이다.

충격위치와 그 주변에서 시간역전에 의한 집중 효과를 관찰하기 위하여 원래의 충격점을 x 좌표의 원점으로 하고 리시버를 다음의 세 가지 간격으로 설치하였다: (a) x=0, \pm 50, \pm 100 mm, ..., (b) x=0, \pm 25, \pm 50 mm, ..., (c) x=0, \pm 10, \pm 20 mm, ... 집중효과의 비교를 위하여 각 리시버 위치에서 수신한 신호의 최대 진폭값을 사용하였다. Fig. 3은 앞에서 설명한 세 가지 경우에 대하여 집중효과를 비교한 결과이다. Fig. 3을 보면 리시버 사이의 간격에 관계없이 원래 충격위치에서 (x=0) 집중 신호의 최대값이 나타남을 확인할 수 있다. 또 격자점의 크기가 작을수록 시간역전에 의해 집중된 파동의 초점 크기(spot size)를 더 정확하게 관찰할 수 있는데, Fig. 3(c)를 참고하면 집중 빔의 -3 dB 밴드 폭은 약 15 mm 이다. 이 값은 이론적인 회절한계인 $\lambda/2=2.5$ mm (f=500 kHz에서 A_0 모드의 위상속도=2517 m/s 사용하여 계산)와 큰 차이를 보이나, 실제 판을 사용하여 더 많은 반사파가 포함되도록 긴 시간동안 수신한 신호를 사용하면 한계값에 근접하게 될 것이다.

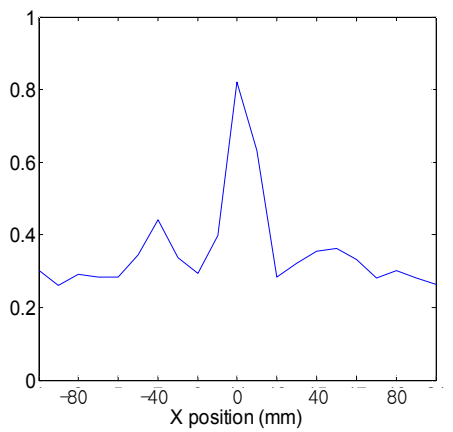
시간역전, 재전파에 의한 파동의 집중현상을 충격위치 결정에 활용하기 위하여 이번에는 충격점을 제외하고 리시버를 다음과 같이 설치하여 수신파의 최대 진폭값을 관찰하였다: (a) x= \pm 25, \pm 50 mm, ..., (b) x= \pm 12.5, \pm 25 mm, ... , (c) x= \pm 5, \pm 10 mm, ... 위 세 가지 경우에 대한 결과가 Fig. 4에 나와 있다. Fig. 4(a), (b)를 보면 x=0가 충격 위치이나 다른 위치에서의 진폭값이 오히려 더 크게 나오고 각 수신위치에서의 최대 진폭값 차이가 미미하여 충격위치를 결정할 수 없다. 이에 비하여 Fig. 4(c)에서는 x=0 근처에서 최대 진폭값이 나타나며, 주변의 다른 위치와 큰 차이를 보이므로 격자크기 이내의 작은 오차로 충격위치를 결정할 수 있다. 이상의 결과를 통하여 시간역전, 재송신에 의한 파동의 집중현상을 이용하여 작은 오차로 비교적 정확하게 충격위치를 결정하기 위해서는 리시버의 간격을 어느 정도 이하로 조밀하게 설치하는 것이 중요함을 알 수 있다.



(a)

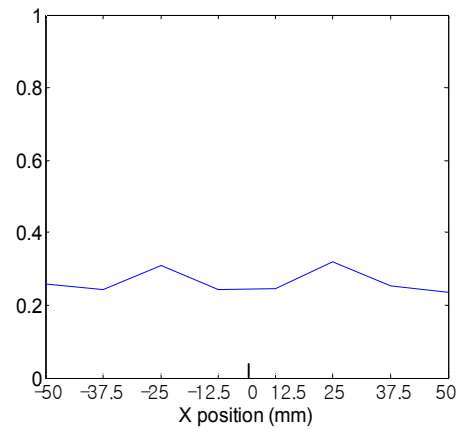


(b)

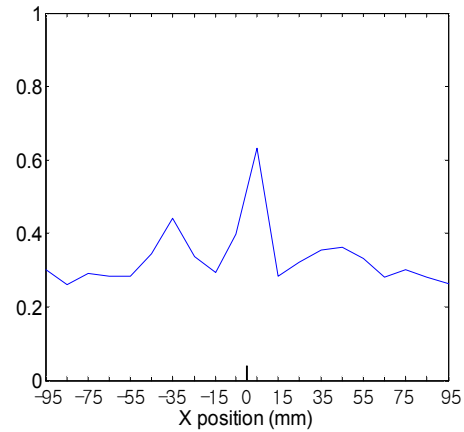


(c)

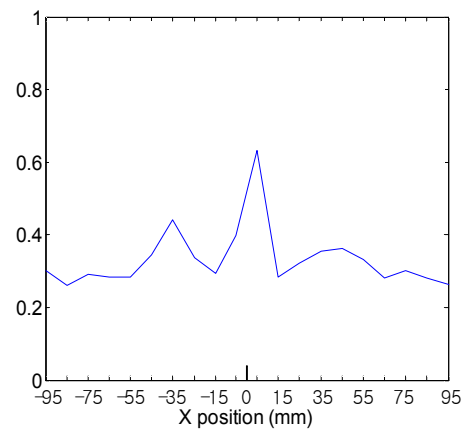
Fig. 3 Spatial focusing behavior of time reversed and backpropagated wave at different receiver positions including the initial impact location (a) $x=0, \pm 50, \pm 100$ mm, ..., (b) $x=0, \pm 25, \pm 50$ mm, ..., (c) $x=0, \pm 10, \pm 20$ mm, ...



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Spatial focusing behavior of time reversed and backpropagated wave at different receiver positions excluding the initial impact location (a) $x=\pm 25, \pm 50$ mm, ..., (b) $x=\pm 12.5, \pm 25$ mm, ..., (c) $x=\pm 5, \pm 15$ mm, ...

3. 실험

3.1. 장치의 구성

판에서 파동의 전파, 시간역전, 재전파에 의한 집중 현상의 관찰과 이를 이용한 충격위치 결정을 위한 실험의 개략도가 Fig. 5에 나와있다. 판의 재질은 알루미늄이고 크기는 1000 mm × 1000 mm × 3 mm 이다. 판의 윗면에 임팩트 햄머를 사용하여 충격을 가하고 전파된 신호는 가속도계로 수신한다. 수신된 신호는 예비증폭기로 40 dB 증폭시킨 후 개인용 컴퓨터에서 신호분석을 수행한다. 파동의 집중 효과와 충격 위치 결정을 위한 실험 절차는 아래와 같으며, 실험 내용 및 결과는 다음 절에 나와 있다.

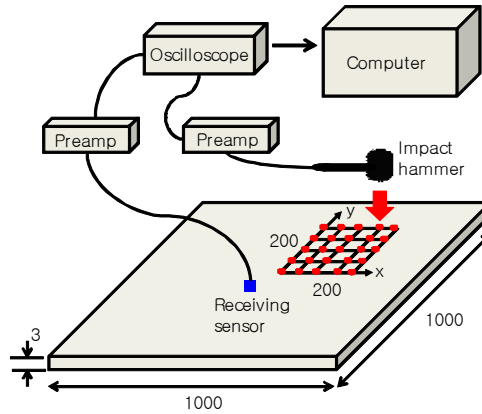


Fig. 5 Experimental setup for measurements of time reversal focusing effect and impact localization in a plate

- ① 알루미늄 판에 충격 위치를 가시화하기 위한 영역을 설정하고 일정한 크기의 격자로 나눈다.
- ② 임팩트 햄머를 사용하여 각 격자점에 균일한 크기로 충격을 가하고 고정된 위치의 가속도계에서 신호를 수신, 저장한다. 이는 격자점과 리시버 사이의 임펄스 응답을 구하는 과정이다.
- ③ ②에서 수신된 신호를 푸리에 변환하여 저장한다.
- ④ 영역내 임의의 점을 실제 충격위치로 설정하고, 이 점의 충격에 의해 수신된 신호를 푸리에 변환하고 복소공액화(complex conjugation) 하여 시간역전 시킨다.
- ⑤ ③에서 푸리에 변환된 각각의 신호에 ④에서 구한 시간 역전 시킨 신호를 곱한다.
- ⑥ ⑤의 각 점에서의 데이터를 푸리에 역변환하여 시간영역 신호로 바꾼 다음 그 최대 진폭 값을 비교하면 가장 큰 값의 점이 충격 위치가 된다.

3.2. 파동의 집중 효과

시간역전에 의한 파동의 집중 현상을 관찰하기 위한 실험 내용은 다음과 같다. 2차원 시뮬레이션과는 달리 실제 판에서는 면내의 모든 방향으로 전파가 가능하므로 여기서는 판의 중앙을 따라 수평 및 수직 방향의 전파를 통한 집중효과를 관찰한다.

Fig. 6(a)는 2D 시뮬레이션에서와 같은 위치에서 충격햄머로 판에 충격을 가하고 수평방향으로 전파한 파를 리시버 위치에서 가속도계로 수신한 것이며, 수신시간은 10 ms 이다. Fig. 6(b)는 3.1 절의 절차에 따라 Fig. 6(a)의 푸리에변환 신호와 그 역전신호를 곱한 결과를 다시 역푸리에 변환하여 구한 시간영역 신호이다. 이 방법은 리시버(가속도계) 위치에서 수신한 신호를 시간역전하여 재송신한 후 원래 충격위치에서 측정된 신호와 동일한 결과를 제공한다. 10 ms의 수신 신호를 사용했기 때문에 Fig. 6(b)에서 집중은 5 ms에서 발생한다.

충격위치와 그 주변에서 시간역전에 의한 집중효과의 변화를 관찰하기 위하여 먼저 $x=0, \pm 50, \pm 100$ mm, ...의 수평방향 격자점에 충격햄머를 가하고 가속도계로 신호를 수신한다. $x=0$ 인 점을 충격위치로 가정하고 이 점의 가진에 의한 수신신호의 시간역전 신호를 앞서 기록한 신호와 곱하여 각 격자점에서 최대진폭을 구한다. 계산은 모두 주파수영역에서 수행하고 마지막 단계에서 푸리에역변환을 이용하여 시간영역 신호로 바꾼다. $y=0, \pm 50, \pm 100$ mm, ...의 수직방향 격자점에 대해서도 같은 내용을 반복한다. Fig. 6(c)와 (d)는 수평 및 수직방향으로 각각 집중효과를 비교한 결과인데 원래 가정한 충격위치에서 ($x=0, y=0$) 집중 신호의 최대값이 나타나며, 따라서 실험을 통해서도 시간역전에 의한 공간집속의 효과를 확인할 수 있다.

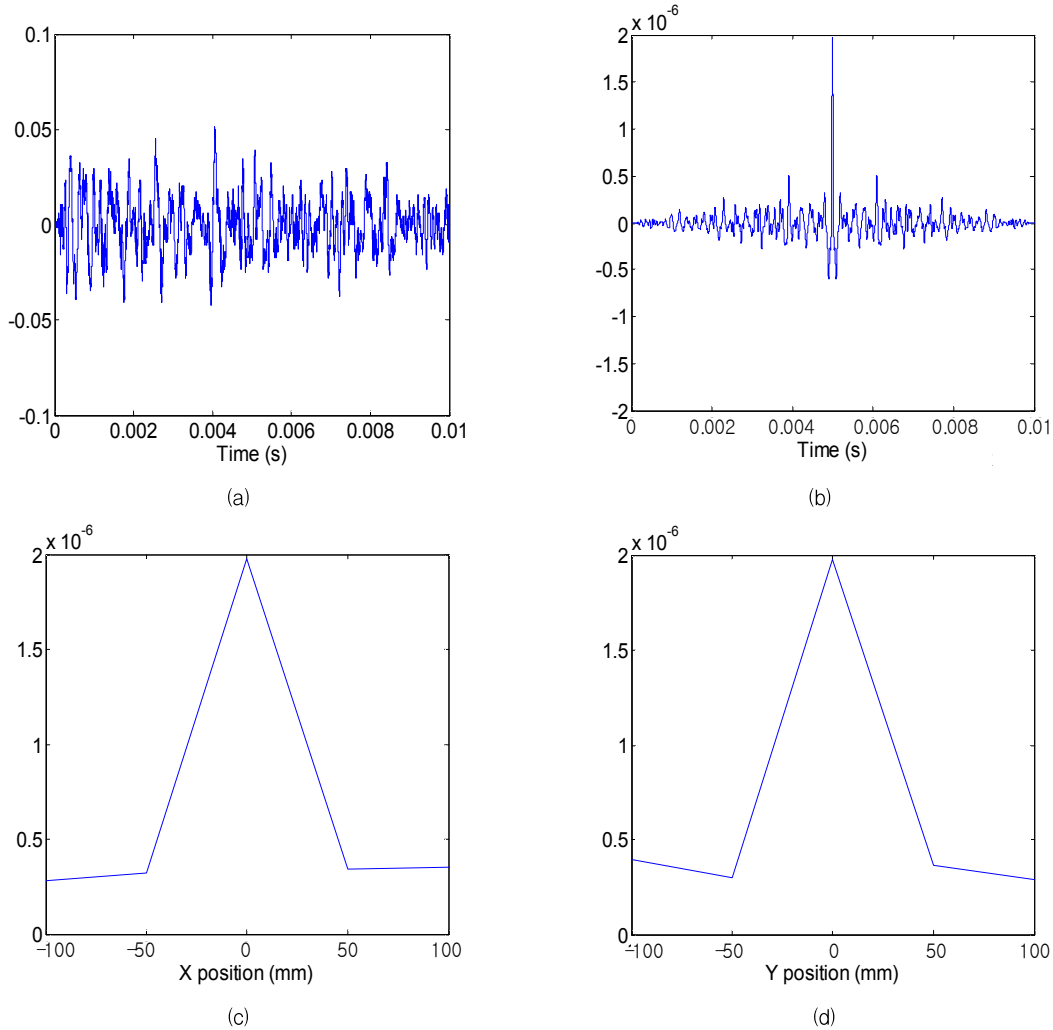
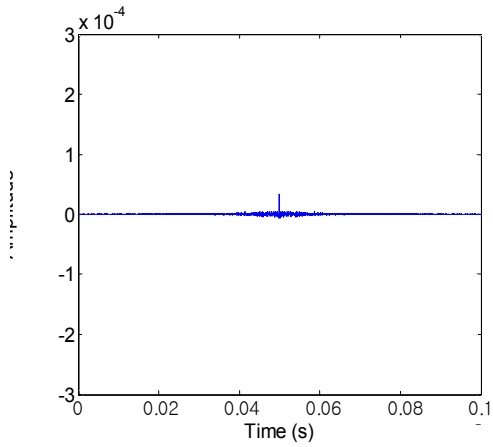


Fig. 6 Temporal and spatial focusing behavior of experimental time reversal in a plate: (a) Initially received experimental signal in the horizontal direction, (b) Temporal focusing of time reversed and backpropagated signal at the initial impact position, (c) Spatial focusing in the horizontal direction, (d) Spatial focusing in the vertical direction

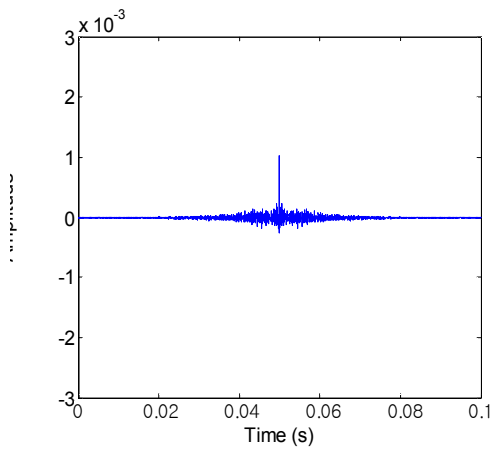
3.3. 충격의 세기와 수신 시간의 영향

충격위치 결정에 영향을 미치는 다른 인자로서 임펄스 응답을 구하는 단계에서 가진력의 크기와 리시버 위치에서 수신 신호의 기록시간을 들 수 있다. 먼저 가진력의 크기가 집중 효과에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 판의 좌표 원점에 40, 160, 540 mV의 크기로 가진하고 100 ms 동안 신호를 기록한다. 다음으로 실제 충격 신호의 크기가 160 mV라고 가정하고 이 신호의 시간역전 신호를 앞서 기록한 세 가지 크기의 신호와 각각 컨벌루션한 다음, 역푸리에변환을 통하여 시간영

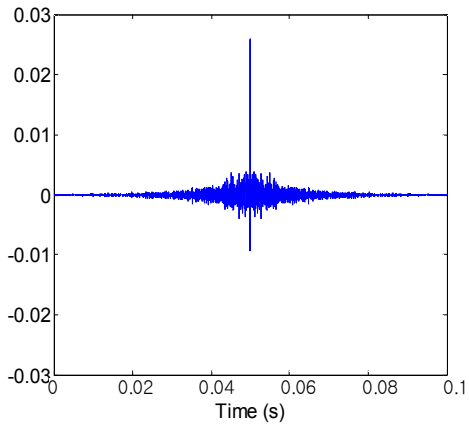
역신호로 바꾼다. Fig. 7은 이 세 가지 결과를 보여주며, 예상한 바와 같이 임펄스 응답 측정시의 가진력이 클수록 집중신호가 커짐을 알 수 있다. 다음으로 판의 좌표 원점에서 160 mV로 가진하고 리시버 위치에서 10 ms와 100 ms 시간동안 신호를 수신한 다음, 각각의 시간역전신호를 그 자신의 신호에 컨벌루션하고 역푸리에변환을 통하여 시간영역신호로 바꾸어 수신시간의 영향을 관찰하였다. 이 결과는 Fig. 8에 나와 있으며, 예상한 바와 같이 이 경우에도 수신 시간이 길수록 집중효과가 더 우수함을 확인할 수 있다.



(a) 40 mV

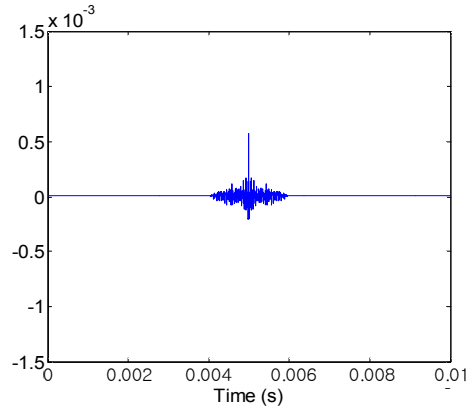


(b) 160 mV

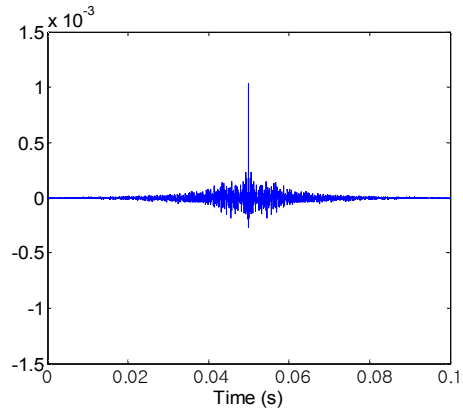


(c) 540 mV

Fig. 7 Effect of excitation force magnitude during impulse response measurements on time reversal focusing



(a) 10 ms



(b) 100 ms

Fig. 8 Effect of signal record length on time reversal focusing

3.4. 충격 위치의 2차원 이미징

이상의 결과를 바탕으로 판에서 충격위치를 결정하기 위한 실험을 수행하고 그 결과를 가시화하였다. 가시화 영역은 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 이며, 이 영역을 25 mm 크기의 정사각형 격자로 나누었다. 실험절차는 3.1절에 설명되어 있다. 앞서 관찰한 실험결과를 기초로 가진력의 크기는 160 mV , 신호의 수신시간은 100 ms 를 사용하였다. 충격위치와 리시버(가속도 센서)의 좌표가 Table 1에 나와 있으며, 충격위치는 두 가지 경우를 고려하였다.

Fig. 9(a), (b)에 충격위치 1과 2에 대한 가시화 결과가 나와 있다. 이 결과를 보면 충격위치에서 신호의 진폭 최대값이 다른 위치보다 훨씬 커 실제 충격 위치를 확실하게 구별할 수 있다. 따라

Table 1 Sensor and impact coordinates in case 1 and 2

	X (mm)	Y(mm)
Sensor position	-100	-100
Impact 1	50	150
Impact 2	200	100

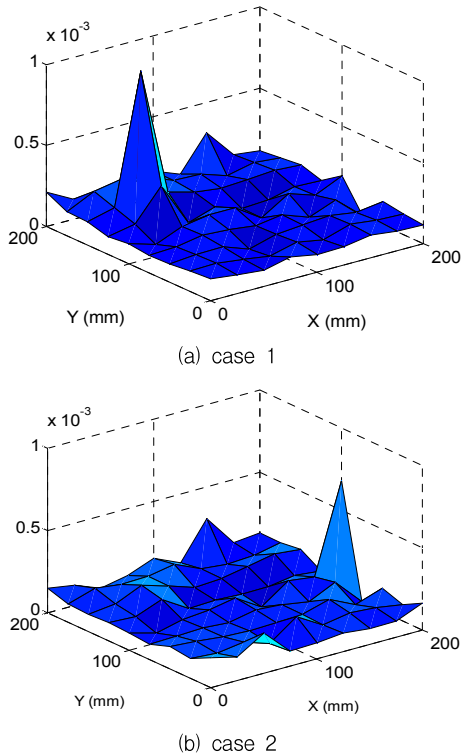


Fig. 9 Imaging results of impact source location

서 여기서 제안한 시간역전에 의한 충격위치 결정법의 타당성을 확인할 수 있다. 충격위치의 탐지 분해능은 격자의 크기에 의존하므로 격자의 크기를 더 조밀하게 할수록 위치 분해능은 더 좋아질 것으로 보이나, 많은 데이터의 수집과 계산 시간이 요구될 것이다. 그리고 얼마나 작은 가진력의 충격위치까지 탐지할 수 있을지에 대해서는 충격위치에서 더 효율적으로 신호를 집중하기 위한 시간역전 신호처리 기술의 연구가 추가로 필요할 것으로 보인다.

4. 결론

단일 센서와 시간역전 원리를 이용하여 간단한 판에서 충격 위치를 결정할 수 있는 탐상법을 다

루었다. 수치적인 시뮬레이션과 실험을 통하여 시간역전에 의한 충격위치와 그 주변에서 신호의 집중효과를 관찰하고, 충격위치 결정에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대해 살펴보았다. 이러한 결과를 기초로 두 가지 다른 충격위치에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 가시화하였으며, 실제 충격위치를 정확하게 결정할 수 있음을 확인하였다.

여기서 제안한 방법의 특징은 단일센서를 사용하는 것과 시험체의 구조(형상)와 물성을 몰라도 된다는 점이다. 또한 판에서와 같이 분산성의 다중모드 파가 발생하는 경우에도 특정 모드나 주파수에 의존할 필요가 없다는 것이다. 따라서 기존의 충격위치 결정법에 비해 많은 장점을 지니고 있다. 그러나 이방성을 포함하여 형상이 복잡한 구조물에서 충격이나 음향방출원의 위치결정을 위한 신뢰성 높은 구조건전성감시 기술로 발전하기 위해서는 충격위치에서 더 효율적으로 신호를 집중하기 위한 시간역전 신호처리 기술에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 논문은 한국연구재단의 일반연구지원사업에 의해 수행됨 (2011-0004944).

참고문헌

- [1] A. Tobias, "Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors," *Non-Destructive Testing*, Vol. 9, No. 1, pp. 9-2 (1976)
- [2] H. Jeong and Y.-S. Jang, "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. 612-6194 (2000)
- [3] 정현조, 권일범, 최만용, "시간-주파수 신호처리를 이용한 구조용 부재에서의 충격하중에 의한 분산파동의 해석," *비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 6, pp. 481-489 (2000)
- [4] L. Gaul and S. Hurlebaus, "Identification of the impact location on a plate using wavelets," *Mechanical Systems and Signal*

- Processing*, Vol. 12, pp. 783-795 (1997)
- [5] H. Jeong, "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 (2008)
- [6] H. W. Park, S. B. Kim, H. Sohn, "Understanding a time reversal process in Lamb wave propagation," *Wave Motion*, Vol. 46, pp. 451-467 (2009)
- [7] H. W. Park, H. Sohn, K. H. Law and C. Farrar, "Time reversal active sensing for health monitoring of a composite plate," *J. Sound Vib.*, Vol. 302, pp. 50-56 (2007)
- [8] H. Jeong, S. Cho and W. Wei, "A Baseline-Free defect imaging technique in plates using time reversal of Lamb waves", *Chinese Physics Letters*, Vol. 28, No. 6, 064301 (2011)
- [9] C. Draeger and M. Fink, "One-channel time reversal of elastic waves in a chaotic 2D-silicon cavity," *Physical Review Letters*, Vol. 79, No. 3, pp. 407-410 (1997)
- [10] A. M. Sutin, J. A. TenCate and P. A. Johnson, "Single-channel time reversal in elastic solids," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 116, No. 5, pp. 2779-2784 (2004)
- [11] 박현우, "판의 충격위치 추정을 위한 시간반전 램파의 공간모임성능 규명", *한국소음진동공학회논문집*, Vol. 20, No. 5, pp. 460-469 (2010)
- [12] R. K. Ing, N. Quieffin, S. Cathelinea and M. Fink, "In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, 204104 (2005)
- [13] F. Ciampa and M. Meo, "Impact detection in anisotropic materials using a time reversal approach," *Structural Health Monitoring*, Vol. 11, pp. 43-49 (2012)
- [14] M. R. Bai and Y. K. Tsai, "Impact localization combined with haptic feedback for touch panel applications based on the time-reversal approach," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 129, pp. 1297-1305 (2011)
- [15] D. Vigoureux, J.-L. Guyader, "A simplified time reversal method used to localize vibrations sources in a complex structure," *Applied Acoustics*, Vol. 73, 491-496 (2012)