

# 전치 신호처리를 통한 평판에서의 다중 충격의 위치 추적에 관한 연구

## Source Location of Multiple Impacts on the Plate Based on Pre-signal Processing

문 유 성\*·박 홍 석\*·이 상 권†·신 기 홍\*\*·이 영 섭\*\*\*

Yoo Sung Moon, Hong Sug Park, Sang-Kwon Lee, Kihong Shin and Yung Sup Lee

(2010년 10월 13일 접수 ; 2011년 1월 20일 심사완료)

**Key Words** : Pre-signal Processing(전치 신호처리), Multiple Impacts(다중 충격), Source Localization(위치 추적), Plate(평판), Higher Order Time Frequency(고차 시간-주파수)

### ABSTRACT

This paper presents the novel work for source localization of serial multiple impacts in a plate structure. It is difficult to identify the source of serial multiple impacts with the current source localization technology(SLT) because of the overlapping of dispersive wave induced by multiple impacts and the reflection from the edge of the plate. In this paper, the new method is suggested for source localization. The method is developed based on the SLT with pre-signal processing such as some limitation for the selection of three sensors, the frequency range for TFA and impact time interval. Results from numerical simulation and experiment in isotropic plate structure are presented, which show the capability of the proposed method.

### 1. 서 론

평판구조물로 이루어진 항공기, 자동차, 기타 공장의 플랜트 건물에서 피로파괴에 의해서 발생하는 손상은 매우 위험하며 많은 경제적 손실을 초래한다. 따라서 이러한 피로 파괴의 초기에 발생한 미세한 크랙(crack)을 초기에 발견하는 방법으로 크랙의 위치 추적 방법으로 평판에서의 충격 위치 추적기술들이 개발되어 왔다. 평판에서 단일 하중에 대한 위치 추적 기술은 오랜 기간 다양한 방법으로 성공

적으로 연구되어 왔다<sup>(1-8)</sup>.

평판에서의 단일 하중 위치 추적에 사용된 방법은 평판위에 3~4개의 센서를 설치하고 충격하중에 의해서 발행되는 탄성파가 각 센서에 도달하는 시간의 차이를 삼각법에 대입하여 충격 위치를 추정하는 기술이다. 이 방법이 평판에서 일반적인 충격 위치 추적 기술이다. 이 방법은 단일 하중에 대해서 이론적으로, 실험적으로 잘 검증되었고 우수한 결과를 보여준다<sup>(7)</sup>. 그러나 평판에 다중 하중이 연속적으로 가해지는 경우 이 방법을 사용하여 센서들 간의 도착시간을 구하는데 충격신호들에 의한 파형의 중첩(overlapping) 으로 인한 간섭영향이다. 이 연구에서 이러한 이 문제점을 해결하는 새로운 방법을 제시하였고 이 방법을 적용하여 연속되는 다중 하중의 위치를 추적하는 기술과정에 대한 연구를 하였다.

† 교신저자; 정회원, 인하대학교

E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

Tel : (032)860-7305, Fax : (032)860-1716

\* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

\*\* 정회원, 안동대학교

\*\*\* 정회원, 인천대학교

## 2. 단일 하중 위치 추적기술

단일 충격하중이 평판을 가진 할 때 충격하중의 위치를 추적하는 방법은 (1) 평판 위에 3~4개의 센서를 이용하여 충격하중에 기인하는 표면파(surface wave)를 측정한다. 이 표면파는 분산 특성(dispersive characteristic) 기지고 있다. (2) 표면파들이 각 센서에 도착하는 시간을 측정한다. 이 시간은 센서의 위치에 따라서 다르다. 도착 시간의 차이(arrival time difference) 측정한다. 표면파는 분산 특성을 가짐으로 주파수에 따라서 센서에 도달하는 시간도 다르다. 따라서 도착시간을 측정하기 위해서 시간-주파수(time-frequency) 기법을 사용한다. 사용 되는 시간-주파수 기술에는 웨이브렛(wavelet transform) 기술과 위그너(Wigner distribution) 기술이 주로 사용된다. (3) 탄성동역학 이론을 이용하여 분산파의 군속도(group velocity)를 이론적으로 계산한다. 이때 사용되는 표면파의 주요모드는  $A_0$  모드이며 이 모드가 표면파의 파형을 지배한다. (4) 삼각법을 이용하여 충격 위치를 추적한다. 삼각법을 사용하기 위해서는 각 센서간에 시간지연을 균속도로 곱하여 각 센서에서의 도착시간에 따른 거리의 차이를 구하여 삼각법에 대입한다. 단일 하중에 대한 위치 추적 기술은 성공적으로 적용되고 있다<sup>(7)</sup>.

## 3. 다중 충격하중에 기인한 증첩

단일 충격 하중이 연속적으로 평판위에 가해지는 다중 충격하중의 경우, 2절에서 제시한 위치 추적 기술을 적용하면, 연속되는 충격하중에 기인하는 표면파가 연속적으로 발생되고, 센서에서 측정된 표면파는 각 충격하중에 기인하는 표면파가 중첩이, 각 충격하중의 위치추적을 매우 어렵게 한다. 이 연구에서는 이러한 문제를 해결하여 Fig. 1 다중 하중의 위치를 추적하고자 한다.

Fig. 1에서 하중은 “ $\neg$ ”형태를 따라서 10 mm 간격으로 충격하중이 연속으로 가해지는 경우, 2절에서 제시한 방법을 개선하여 충격하중들의 위치를 추적한다. 센서들은  $S_1, S_2, S_3, S_4$ 에 설치되었다. 평판의 크기는 1500 mm × 1500 mm × 6 mm이다. 사용된 평판의 재질은 일반강판이다. 평판에 충격하중

이 Fig. 1과 같이 시간  $\Delta$ 의 간격으로 순차적으로 가해지면 각 센서에서 측정된 신호는 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 각각의 표면파가 순차적으로 센서에서 측정된다. 첫 하중에 의해서 발생하는 표면파는 다음 하중에 기인하는 표면파에 의해서 영향을 받는다. 순차적으로 입력되는 하중에 각 센서에서는 계속적으로 표면파가 중첩되어 각 표면파의 도달시간의 측정을 어렵게 한다.

표면파의 중첩의 원인은 표면파가 분산파임으로 저주파 파형이 센서에 늦게 도달하기 때문이다. 따라서 저주파 영역의 파형을 필터링(filtering)하여 고주파 영역의 파형만을 이용하여 도착시간을 구할 수 있다. Fig. 3에서는 중첩을 제거하는 방법을 도식화

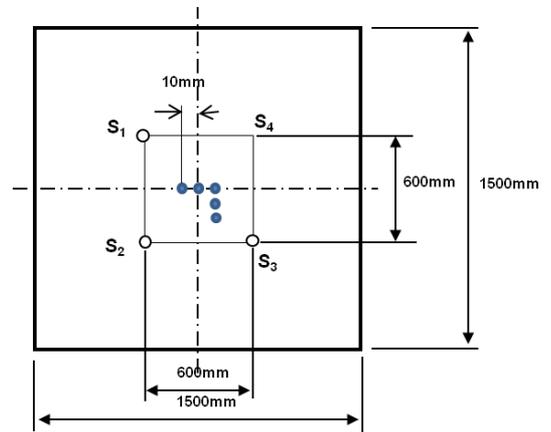


Fig. 1 Multiple impact load and geometric dimension of the steel plated used for test

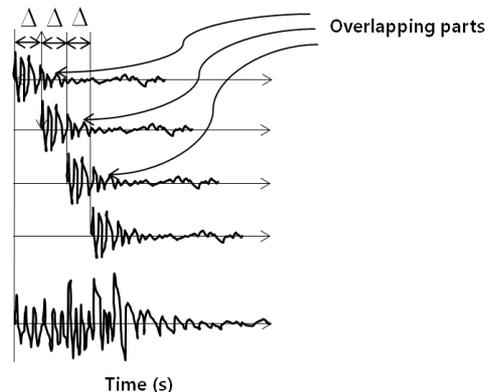


Fig. 2 Overlapping of the surface waves due to serial impacts

한 것이다. 먼저 Fig. 3(a)에서는 저주파 파형의 중첩현상을 나타낸다. Fig. 3(b)에서는 충격하중에 기인하여 충격파가 센서까지 이동하는 거리  $S$ 임을 보여준다. Fig. 3(c)는 센서에서 측정된 표면파의 도착 시간을 구하기 위해서 표면파에 적용된 시간-주파수 분석 결과이다. 이 결과는 표면파의 파형에너지 분포를 시간-주파수 영역에서 나타낸 것이다. Fig. 3(d)는 이론적으로 구한 표면파의  $A_0$  모드의 군속도를 나타낸다. 일반적으로 표면파는  $A_n$ 과  $S_n$ 의  $n$ 차의 무한 판파 모드가 존재하는데 평판에 수직으로 하중이 가해지는 경우, Fig. 4에서 보여주는 판파의 기본모드가 되는  $A_0$  모드,  $S_0$  모드 중에  $A_0$  모드가 표면파의 크기를 지배한다.

저주파영역에서 낮은 군속도에 기인하는 표면파의

중첩을 해결하기 위해서는 Fig. 3(c)에서 보여주는 바와 같이 대역통과 필터(bandpass filter)를 사용한다. 이때 필터의 주파수 구간을 결정하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 3(c)를 관찰하면 중첩을 피하기 위한 대역통과 필터의 저주파는  $f_L$  Hz이고 고주파는  $f_H$  Hz이다. 그리고 시간-주파수분석에 사용되는 파형구간  $t_L$ 은 다중충격하중에 대한 충격시간구간  $\Delta$ 보다 작아야 한다. 따라서 중첩의 문제를 해결하기 위해서는 다음의 조건이 필요하다.

$$\Delta \geq \frac{S}{v_g|_{f_L}} \approx t_L \quad (1)$$

여기서  $v_g$ 는  $f_L$ 에서의 군속도이다.

#### 4. 평판에서 위치 추적 응용

##### 4.1 실험장치 및 실험방법

평판에서 중첩을 제거하고 연속 다중 충격하중에 기인하는 위치를 추적하기 위해서 철강재료의 평판을

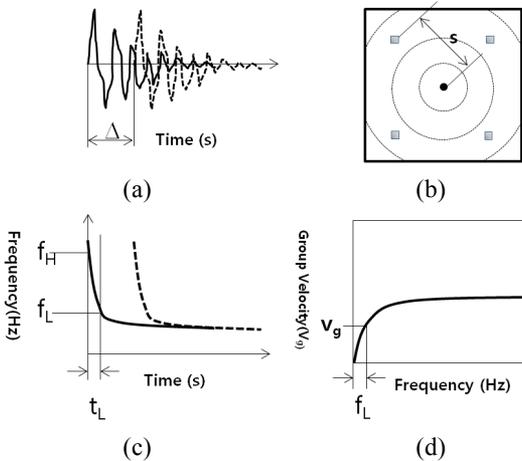


Fig. 3 Time-frequency analysis of the surface wave with overlapping of the surface waves due to serial impacts

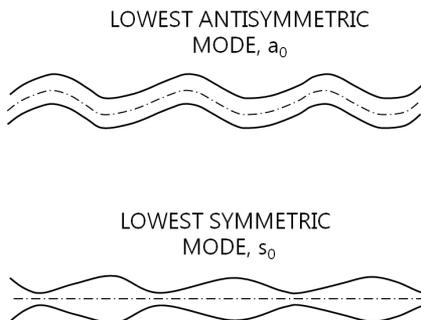
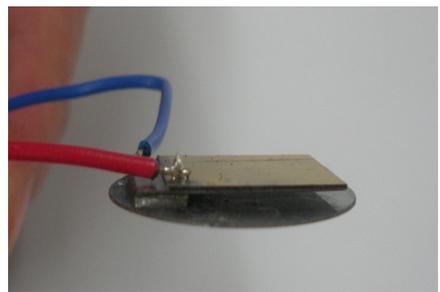


Fig. 4 Two basic modes for Lamb wave in a plate structure



(a)



(b)

Fig. 5 Experimental set-up for multiple source location

강성이 강한 구조물에 Fig. 5(a)와 같이 매달았다. 측정용 센서는 Fig. 5(a)에서 보여주는 바와 같이 피에조 변위 센서를 평판의 4곳에 부착하였다.

이 실험에 충격위치를 확인하기 위해서 Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 강판 위에 좌표 표시를 해 두고 충격을 가하였다.

충격은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 표시된 마크를 따라서 평판위에 가해졌다. 평판위에 가해진 충격에 따라서 발생하는 표면파는 판파를 발생시키고 이러한 판파는 평판 위에 부착된 4개의 센서에서 감지되고 이 센서의 신호는 전위증폭기(charge amplifier)를 통하여 A/D 변환기를 통하여 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터로 입력된다. 입력된 데이터는 Matlab에서 전치 신호처리 과정(pre-signal processing)을 통하여 신호분석을 실시하고 각 센서에서의 표면파 도착 시간을 예측하기 위해서 시간-주파수 분석을 실시한다. Fig. 7은 이 연구에서 사용된 전위증폭기 및 A/D 변환기 등 실험 장치의 설치 과정을 보여준다.

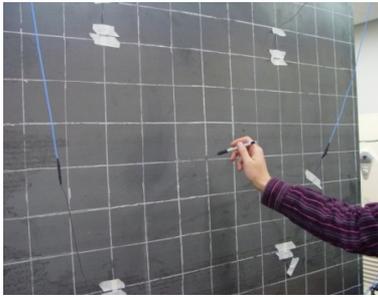


Fig. 6 Grid for marking the impact location in plate

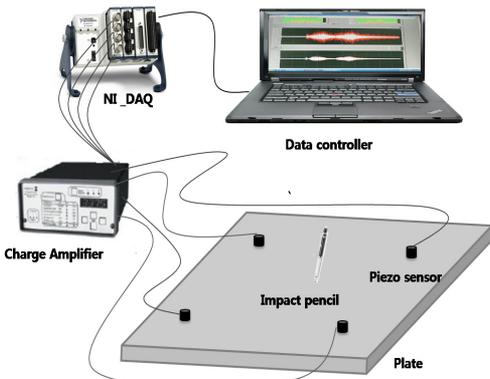


Fig. 7 Experimental equipment set-up in a plate

## 4.2 실험 결과의 분석 및 다중 충격위치 추적

### (1) 중첩제거용 대역 통과 필터의 설계

평판에 부착된 4개의 센서를 통하여 얻어진 판파에 대한 파형은 Fig. 8과 같다. 첫 번째 줄부터 Fig. 1 보여준 센서 S1S2S3S4에서 각각 측정된 시간에 대한 파형이다. 이 결과에 의하면 첫 번째 충격에 의해서 발생하는 파형을 제외하고 다음에 이어지는 충격에 의한 파형은 앞선 충격에 의해 발생한 파형에 중첩현상으로 센서에서 측정된 파형의 형상이 복잡하다.

이러한 복잡한 신호에서 중첩을 제거하기 위해서 먼저 각 신호에 대해서 스펙트로그램(spectrogram)을 구하였다. Fig. 9는 센서 S4에서 측정된 신호에 대한 스펙트로그램을 보여준다. 이 결과에 의하면 저주파의 중첩이 명확히 보여지고 이 저주파 파형의 크기로 인해서 고주파의 파형의 크기가 상대적으로 작게 보인다. 따라서 중첩을 피하기 위해서 식 (1)에서 제시한 조건에 따라서  $F_L$  10 kHz로 하고  $F_H$ 를 20 kHz로 하여 대역필터를 설계하고 대역필터를 통과한 신호에 대한 스펙트로그램은 Fig. 9(b)에서 보는 바와 같이 충격에 의한 파형이 뚜렷하고 충격시간 등이 잘 보인다.

대역 필터를 통과한 결과를 보면 충격에 의한 표면파는 매우 짧게 발생하는 군파이고 중첩에 지대한 영향을 주는 저주파 영역의 분산파형은 제거되었음을 알 수가 있다. 고주파는 제한이 없지만 센서가 변위 센서일 경우 문제가 없지만 가속도 센서를 사용하는 경우 가속도의 고주파 공진은 피해야 한다. 그리고 현재 샘플링 주파수는 50 kHz를 사용하였으므로  $F_H$ 를 20 kHz로 선택하였다. S<sub>1</sub> S<sub>2</sub> S<sub>3</sub> S<sub>4</sub>에서

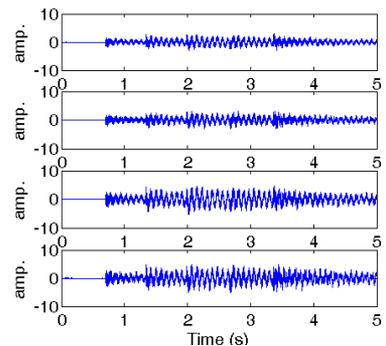
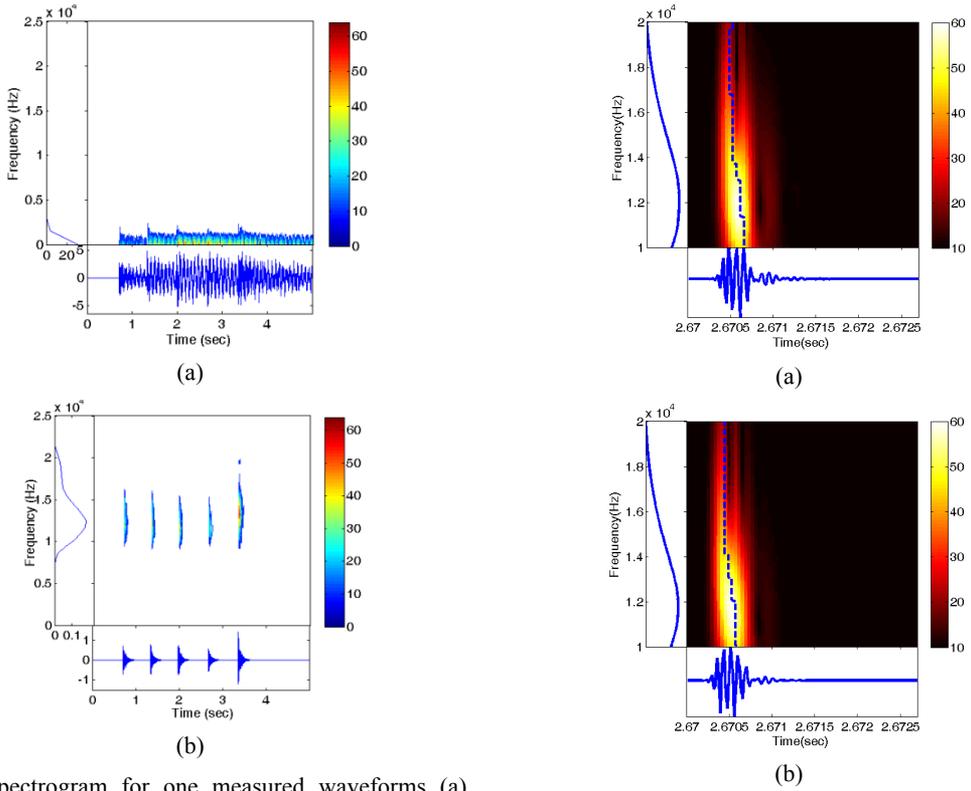


Fig. 8 Time history for the measured waveform through four sensors attached on the plate



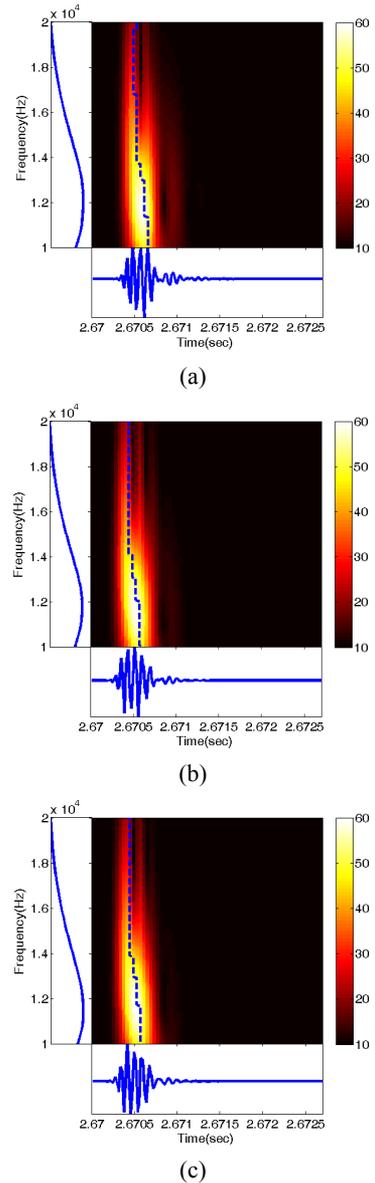
**Fig. 9** Spectrogram for one measured waveforms (a) raw signal (b) band pass filtered signal

측정된 모든 신호에 대해서 동일하게 대역통과 필터를 적용하였다.

(2) 시간-주파수 해석을 통한 도착시간 측정

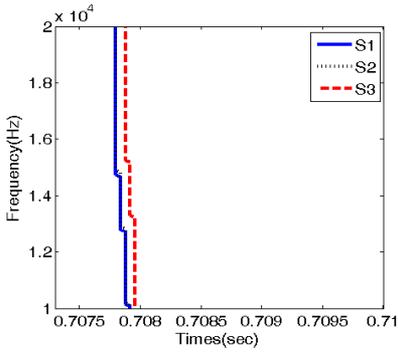
대역필터를 통과한 신호를 이용하여 센서에 파형이 도착하는 도착 시간을 구하기 위해서 시간-주파수 분석을 시도하였다. 삼각법을 이용한 위치를 측정하기 위해서는 3개의 센서에서 측정된 신호만 필요함으로  $S_1 S_2 S_3$  신호에 대해서 시간-주파수 분석을 시도하였다.

Fig. 10은 시간-주파수적용 기술의 결과로서 4번째 충격하중에 의해서 발생되는 판파에 대역필터를 통과한 신호에 대해서 고차 시간-주파수(higher order time frequency) 분석의 한 분류인 Wigner fourth order moment spectra(WFOMS)<sup>(8)</sup>를 적용한 결과이다. 이 결과에서 아래쪽 그래프는 시간영역에서의 파형이고 이것을 시간-주파수 분석을 하면 중앙에 이미지 형태로 나타난다. 이미지 형태의 중앙에 있는 점선이 파형의 에너지 전파를 나타내는 파형의

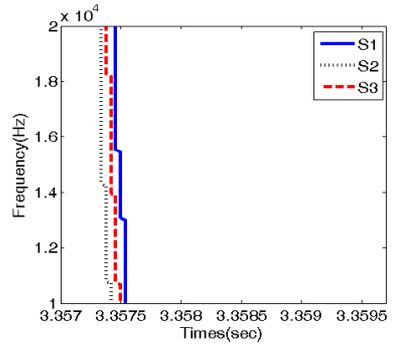


**Fig. 10** SWFOMS for three linear predicted waveforms induced by the fourth impact (a) sensor  $S_1$  (b) sensor  $S_2$  (b) sensor  $S_3$

이동이고 균속도로 파형이 이동한다. 좌측의 그래프는 파형이 가지고 있는 주파수 성분이다.  $S_1 S_2 S_3$  신호에서 측정된 신호에 대한 도착시간을 측정하기 위해서 이미지형태의 중앙에 있는 점선을 시간-주파수 영역에서 다시 나타내면 Fig. 11(d)와 같은 결과를 얻는다. 동일한 방법으로 첫 번째 충격부터 마지막 다섯 번째 충격까지의 도착시간의 차이는 Fig. 11(a)

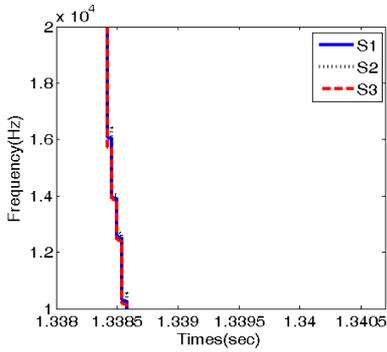


(a)

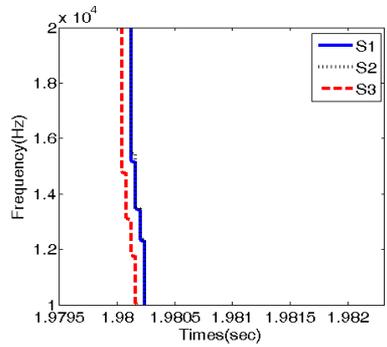


(e)

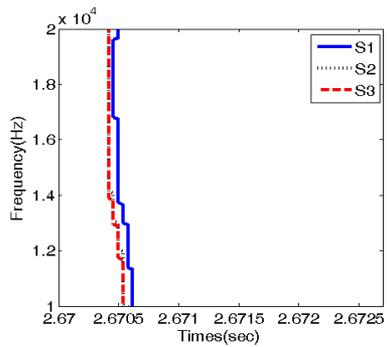
**Fig. 11** Arrival time difference obtained by TFA for waveforms induced by five impacts (a) 1st impact (b) 2nd impact (c) 3rd impact (d) 4th impact (e) 5th impact



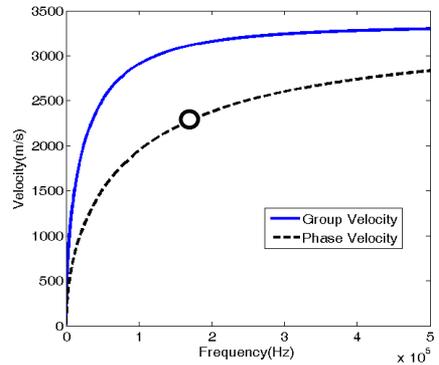
(b)



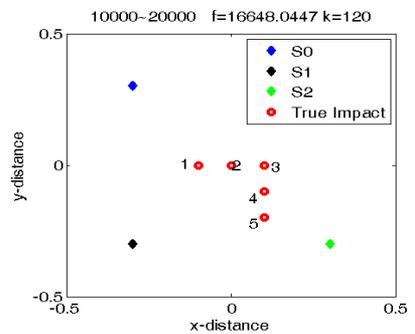
(c)



(d)



**Fig. 12** Theoretical group velocity for basic lamb wave  $A_0$  mode



**Fig. 13** Source localization for five impacts and comparison between true points and estimated points

부터 Fig. 11(e)까지 시간-주파수 분석 결과를 통하여 구할 수 있다. 마지막으로 각 충격 위치를 추적

하기 위해서 실험에 사용된 평판에 대해서  $A_0$  모드에 대한 군속도를 이론적으로 구하였다<sup>(9)</sup>. 그 결과는 Fig. 12에서 보여준다.

삼각법<sup>(10,11)</sup>을 이용하여 위치를 추적하기 위해서 16664 Hz 주파수에서의 군속도를 Fig. 12에서 구하고 각 충격파에 기인하는 센서의 도착시간은 Fig. 11을 이용하여 구한다.

이 방법을 이용한 충격 위치는 Fig. 13에서 보여주는 바와 같다. 위치 추적 결과는 모든 센서가 동일 거리에 있는 2번의 경우를 제외 하고는 다소 오차가 존재한다. 이것은 시간주파수 기술에서 보여주는 시간-주파수 분해능(resolution)의 부족에 의한 오차와 이론적인 군속도의 계산오차도 존재한다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 단일 하중의 위치 추적 기술을 이용하여 다중 충격 하중의 위치 추적을 시도하였다. 다중 충격 위치 추적에는 저주파 파형의 중첩으로 인하여 문제점이 발생하였다. 이 연구에서는 중첩의 문제를 해결하기 위해서 전치 신호처리의 기술로서 대역밴드 필터를 설계하여 중첩의 문제를 해결하였다. 대역밴드 필터의 설계 시 중요한 저주파 및 고주파의 범위에 대해서 기준을 제시하였다. 이 기술에서는 군속도와 삼각법을 이용하여 위치를 추적하는 과정에 필요한 잡음을 전치 신호처리 기술로 제거 함으로 평판의 5점 충격점의 위치 추적에 성공적으로 적용하였다.

## 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2009-0084728), (No. 2010-0014260).

## 참 고 문 헌

- (1) Kishimoto, K., Inoue, H., Hamada, M. and Shibuya, T., 1995, Time Frequency Analysis of Dispersive Waves by Means of Wavelet Transform, *J. Appl. Mech.*, Vol. 62, Issue 4, pp. 841~846.
- (2) Gaul, L. and Hurlbauss, S., 1997, Identification

of the Impact Location a Plate Using Wavelets, *Mech. Sys. Signal Process*, Vol. 12, Issue 6, pp. 783~795.

- (3) Prosser, H., Seale, M. D. and Smith, T. B., 1999, Time-frequency Analysis of the Dispersion of Lamb Modes, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 105, Issue 5, pp. 2669~2676.

- (4) Jeong, H. and Jang, Y. S., 2000, Fracture Source Localization in Thin Plates Using the Wavelet Transform of Dispersive Waves, *IEEE Tran. Ultra. Ferroelectr. Freq. Control*, Vol. 47, pp. 612~619.

- (5) Loutridis, S., Douka, E., Hadjileontiadis, L. J., and Torchidis, A., 2005, A Two Dimensional Wavelet Transform for Detection of Cracks in Plates, *Engineering Structure*, Vol. 27, Issue 9, pp. 1327~1338.

- (6) Park, J. H. and Kim, Y. H., 2006, Impact Source Localization on an Elastic Plate in a Noisy Environment, *Measurement Science Technology*, Vol. 17, No. 10, pp. 2757~2766.

- (7) Lee, S. K., Banerjee, S. and Mal, A., 2007, Identification of Impact Force on a Thick Plate Based on the Elastodynamic and Higher-order Time-frequency Analysis, *Proc. IMechE Part C, J. Mechanical Engineering Science*, Vol. 221, No. 11, pp. 1249~1263.

- (8) Fonollosa, J. R. and Nikias, C. L., 1993, Wigner-higher-order Moment Spectra Definition, Properties, Computation and Application to Transient Signal Analysis, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 41, No. 1, pp. 245~266.

- (9) Graff, K. F., 1953, *Wave Motion in Elastic Solids*, Dover Publications Inc., New York.

- (10) Tobis, A., 1976, Acoustic Emission Source Location in Two Dimensions by an Array of Three Sensors, *Non-destructive Testing*, Vol. 9, Issue 1, pp. 9~12.

- (11) Choi, K. S., Choi, Y. C., Park, J. H. and Kim, W. W., 2008, Source Localization Technique for Metallic Impact Source by Using Phase Delay between Different Type Sensors, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 1143~1149.