

고차-시간 주파수 기술을 이용한 평판에서의 충격 위치추적

Source Localization of Single Impact Based on Higher Order Time Frequency

문 유 성* · 이 상 권† · 양 흥 군*

Yoo-Sung Moon, Sang-Kwon Lee and Hong-Goon Yang

(2010년 10월 13일 접수 ; 2011년 1월 18일 심사완료)

Key Words : Source Localization(음원 위치 추적), Impact Load(충격 가진력), Numerical Waveform(수치 파형), Smoothed Wigner Fourth Moment Spectra(스무딩 4차 위그너 시간 주파수)

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the method of identifying the impact location on the plate. This basic research has the future purpose to achieve the human-interaction technology based on the signal processing, piezoelectric materials, and wave propagation. The present work concerning the location identification of a single impact on the plate simulated the waveform numerically generated by impact force and applied the SWFOM(sliced Wigner higher fourth order moment) to the waveform to get the arrival time differences due to impact force between three sensors attached to the plate. The simulated signal is useful to get the information for time interval for the only direct wave. This information is used the source localization by using experimental work. The measured signal is also used for source localization of a single impact based on the higher order time frequency as a novel work.

1. 서 론

평판은 항공기, 자동차, 공장플랜트 구조물 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 이러한 평판 구조물에 대한 주요한 관심점 가운데 하나는 충격하중에 기인하는 구조물의 손상, 피로파괴 등에 관한 것이다. 따라서 평판에서 충격하중의 위치 추정에 대한 연구는 중요하며 관련 연구는 다양한 방법으로 접근되고 있다⁽¹⁻⁷⁾. 이 연구들의 목적은 보(beam)에서의 충격위치 추정⁽¹⁾과 평판에서 위치추정⁽²⁻⁷⁾으로 나누어져 있다. 위치 추정에 사용되어 온 기술은 두 가지이다. 첫 번째 기술은 평판에서 충격하중을 의해서 발생하는 균

파가 평판에 부착된 여러 센서에 도착하는 시간을 측정하기 시간-주파수(time-frequency analysis)기술과 도착시간의 차이를 이용하여 위치를 추적하는 삼각법으로 이루어진다. 평판의 위치추적에 사용되는 시간 주파수 기술에는 STFT⁽³⁾ 기술, 웨이브렛 변환기술^(2,4), 이차원 웨이브렛 변환기술⁽⁵⁾ 위그너분포기술^(3,6), 고차 시간-주파수기술⁽⁷⁾이다. 이러한 기술들은 장단점이 존재하는데 특히 측정 시 발생하는 잡음은 평판에서의 위치 추적을 어렵게 하며 반사파의 영향도 배제하기가 어렵다. 이 연구에서는 수치해석적인 방법을 통하여 평판에서 충격하중에 의한 센서위치의 파형을 예측하고 이 예측결과에서 직접파 신호에 대한 길이를 예측하고 이 결과를 통하여 실험에서 반사파를 제거한 신호에 잡음에 강인한 고차 시간-주파수 기술에 적용하여 시간-주파수 해석을 시행함으로 위치추적을 정확히 하는 방법을 연구하였다.

† 교신저자; 정회원, 인하대학교
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7305, Fax : (032)860-1716
* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

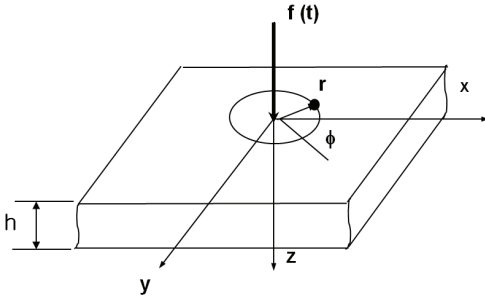


Fig. 1 Impact load and the coordinate of the plate used for this test

이 연구에 사용되는 평판은 Fig. 1과 같으며 평판의 중앙에 하중을 가하고 평판의 임의의 세 점에 부착된 센서에 군파가 도달하는 시간을 측정하고자 한다. 먼저 실험 시 발생하는 반사파의 효과를 제거하기 위해서 평판이론을 이용하여 평판의 크기가 무한하다고 가정하고 센서에 도달하는 파형을 수치 해석적으로 구하였다.

2. 평판이론과 수치해석

Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 균일 조건하의 x, y 방향으로 무한길이의 등방성 평판에서, 주파수상에서의 응력변위벡터 $\{\hat{S}\}$ 는 동탄성학을 이용하여 식 (1)과 같이 표현된다⁽⁸⁾.

$$\{\hat{S}(k_x, k_y, z, \omega)\} = \{\hat{u}_i \hat{\sigma}_{iz}\}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서, $\hat{u}_i \hat{\sigma}_{i,j}$ 는 변위성분과 응력성분을 말하며, k_x 과 k_y 는 1과 2방향의 파수이다. 그리고 ω 는 주파수이다. 위의 응력변위벡터는 적절한 경계조건이 주어지면 이 경계조건을 식 (1)에 적용하여 응력과 변위에 대한 해를 구할 수 있다. 무한평판에 적용된 하중에 따른 응력에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\hat{\sigma}_{i3}(x, y, 0, \omega) = -\hat{F}_i(x, y, \omega) \quad (2a)$$

$$\hat{\sigma}_{i3}(x, y, H, \omega) = 0 \quad (2b)$$

여기서, \hat{F}_i 공간상에 분포된 충격하중의 푸리에변환이다. 일반적으로 표면 변위는 파수의 적분형태로 표현된다.

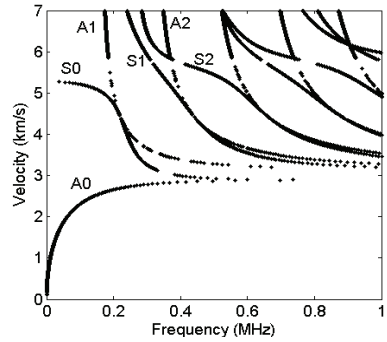


Fig. 2 Phase velocity for lamb mode of plate

$$I = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(k_x, k_y, \omega)}{g(k_x, k_y, \omega)} e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y \quad (3)$$

여기서, 함수 f 와 g 는 참고문헌^(7,8)에서 언급된 것과 같이 선형방정식을 계산함으로써 얻어진다. 위의 적분은 많은 주파수에 대해서 평가되며 역 푸리에 변환을 통하여 시간에 따라 변하는 변위와 응력 요소를 결정할 수 있다. 등식 (3)으로부터 변위는 파수 k_x 과 k_y 에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 파수는 분산(dispersive)현상에 의하여 주파수에 영향을 받는다. 그러므로 분산 현상에 의한 파의 위상속도(phase velocity)는 주파수에 영향을 받는다. Fig. 2는 평판에서의 분산 판파(dispersive lamb wave)에 의한 전파의 위상속도를 보여준다. 일반적으로 z 방향의 하중은 A_0 모드가 다른 모드보다 판파의 크기를 지배한다⁽⁹⁾. 이 연구에서는 A_0 모드의 전파를 사용하여 충격지점을 찾고자 한다. 일반적으로 평판에서의 분산판파는 군속도를 가지고 파의 에너지를 전파한다. 평판에서 파의 에너지를 전달하는 군속도는 위상속도를 각속도(ω)에 대하여 미분함으로 구할 수 있으며 관련 수식은 식 (4)와 같다⁽¹⁰⁾.

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c_p}{1 - \frac{\omega}{c_p} \frac{dc_p}{d\omega}} \quad (4)$$

여기서, c_p 는 위상속도이며 ω 는 각속도이다

3. 평판의 충격실험

충격실험은 크기 1200 mm × 1200 mm × 10 mm의

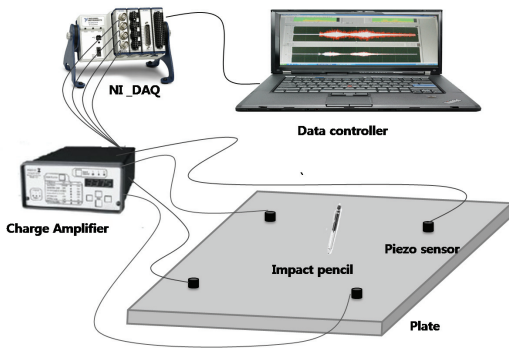


Fig. 3 Set-up of experimental equipment for test

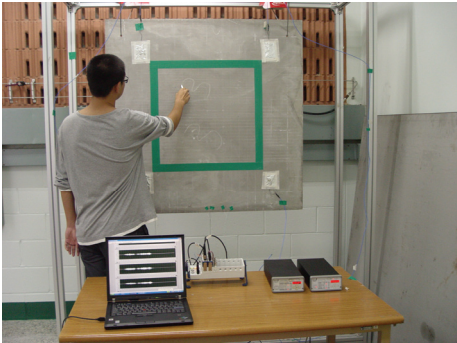


Fig. 4 Photography of impact test

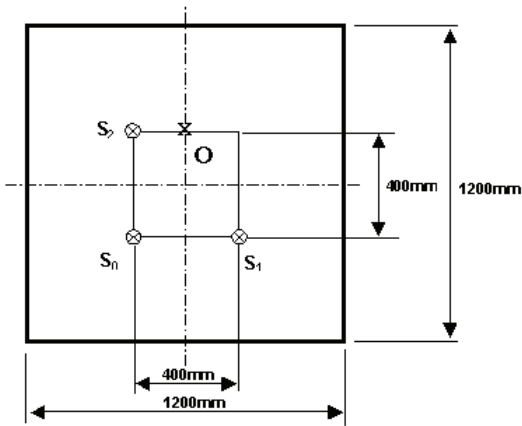
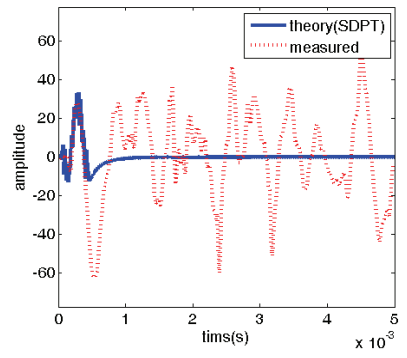


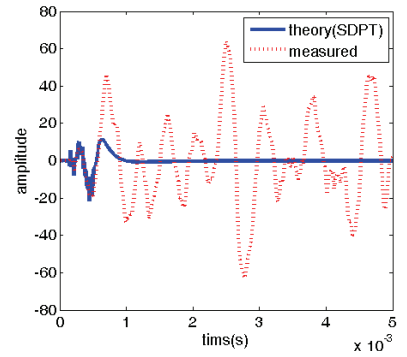
Fig. 5 Locations of impact load, O, and the sensors (S_0, S_1, S_2) on an aluminum plate. $OS_0 = 447$ mm, $OS_1 = 447$ mm, $OS_2 = 200$ mm

평판에서 시행되었다. 실험장치의 도식은 아래의 Fig. 3과 같다.

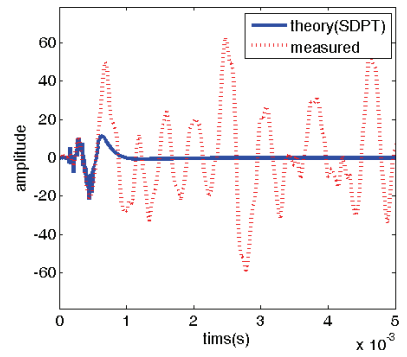
충격하중은 충격실험전용 펜을 사용하여 가진 하



(a)



(b)



(c)

Fig. 6 Comparison between waveform at position of the sensor: dash line is the measured waveform and solid line is the simulated waveform

였다. 평판은 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 강인한 구조물에 매달아 설치하였고, 4개의 피에조 가속도 센서는 Fig. 3과 같이 평판위에 부착했다. 이 평판의 위상속도는 이론적으로 구해지며 Fig. 2와 같이 판파에 대한 모드에 따라 위상 속도는 다르며 주파수의 함수로 나타난다.

이 실험에서는 평판의 임의 점에서 가해지는 충격하중에 기인하는 충격 판파(lamb wave)를 측정하기 위하여 Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 x로 표시된 O점에 충격하중을 주고 S₀, S₁, S₂의 위치에 3개의 센서를 설치하여 평판에서 발생하는 판파를 측정하였다. 각 센서에서 측정된 가속도신호는 Fig. 6에서 보여주는 바와 같다. 점선은 이 실험을 통하여 측정된 파형이고 실선은 식 (3)을 이용하여 수치해석으로 구한 시뮬레이션 파형이다.

측정 파형을 보면 평판의 가장자리에서 반사된 반사파형(reflected waveform)과 충격 후 곧장 센서에 도달하는 직접파형(directed waveform)이 서로 혼합되어 복잡한 형상을 가진다. 이 경우 시간-주파수 분석을 통하여 충격파가 각 센서에 도달하는 시간을 구하는데 매우 어려움이 존재한다. 시뮬레이션한 결과는 무한평판으로 가정하였으므로 반사파가 존재하지 않고 직접파형만 존재하여 센서 위치에서 충격파가 지나간 후에는 파형이 존재하지 않는다. 따라서 실제 충격 후에 분산파형이 고주파부터 도착하여 저주파가 도착하고 사라지는데 Fig. 6(a), (b), (c)의 앞부분 신호에 의하면 소요된 시간은 0.5 msec 임을 알 수 있다. 따라서 측정신호를 이용하여 각 센서간의 시간 지연을 구하기 위해서는 0.5 msec의 데이터만 필요하다.

4. 삼각법과 충격위치 추적이론

등방성 평판의 표면에 임의의 충격지점을 찾아내기 위하여, 3개의 센서는 그 지점과 같은 표면 위에 위치해야 하며 3개의 교차하는 원이 그려지고, 이원의 중심에는 각 센서가 위치되어야 하며, 이 원의 반경은 센서가 측정한 충격으로부터 파형 에너지가 이동되는 시간에 의하여 결정된다. 3개의 해석 방정식 결과를 계산함으로써, 충격신호의 지점의 제한된 표현 식을 얻을 수 있다⁽¹¹⁾. 만약 센서의 위치가 S₀(0,0,0), S₁(x₁,y₁,0), S₂(x₂,y₂,0)라면 충격신호지점의 극 좌표 (r, θ)는 아래의 식으로 주어진다.

$$r = \frac{A_1}{2(x_1 \cos \theta + y_1 \sin \theta + \delta_1)} = \frac{A_2}{2(x_2 \cos \theta + y_2 \sin \theta + \delta_2)} \quad (5)$$

여기서 $A_1 = x_1^2 + y_1^2 - \delta_1^2$, $A_2 = x_2^2 + y_2^2 - \delta_2^2$, $\delta_1 = t_1 c_g$, $\delta_2 = t_2 c_g$ 이며 c_g 파의 군속도이다. 그리고 t_1 과 t_2 는 예상되는 센서 S₀-S₁와 S₀-S₂사이의 시간차이이다. 각 θ는 다음의 방정식으로 얻어진다.

$$\cos(\theta - \phi) = K \quad (6)$$

여기서

$$K = [(A_2 \delta_1 - A_1 \delta_2) / B] \quad (7)$$

$$B = [(A_1 x_2 - A_2 x_1)^2 + (A_1 y_2 - A_2 y_1)^2]^{1/2} \quad (8)$$

그리고

$$\tan \phi = [(A_1 y_2 - A_2 y_1) / (A_1 x_2 - A_2 x_1)] \quad (9)$$

신호에서 추출된 값은 파가 센서로 도착하는 시간에 따라 달라진다. 원의 반경을 구하기 위하여, 파의 도착시간이 뿐만 아니라 군속도 또한 요구된다. 예전의 방식으로 분산 파의 군속도를 측정하기는 매우 어렵다. 시간-주파수 해석은 충격실험의 평판에서 교차하며 진행되는 분산 판파(dispersive lamb wave)의 도달시간 지연 측정에 매우 효과적이다⁽³⁾.

5. 고차 시간-주파수 기술

고차 시간-주파수 기술은 n+1차의 고차 모멘트 스펙트럼을 취함으로써 구해지며 식 (10)과 같이 정의된다⁽¹²⁾.

$$W_{n+1}(t, f_1, \dots, f_n) = \int_{\xi} X^* \left(\sum_{i=1}^n f_i + \frac{1}{n+1} \xi \right) \cdot \prod_{i=1}^n X^{(n+1)} \left(f_i - \frac{1}{n+1} \xi \right) e^{-j2\pi \xi t} d\xi \quad (10)$$

여기서 n=1인 경우 Wigner distribution(WD)이고 n=3인 경우가 Wigner fourth order moment spectra(WFOMS)라 불린다. 이차 모멘트를 이용하는 WD는 웨이브렛변환 보다 시간-주파수 분해 능력이 우수하지만 신호가 단순하지 않으면 간섭항(cross term)이 나타나서 신호의 분별을 어렵게 하

는 결점이 있다. WFOMS는 4차 모멘트를 이용함으로써 잡음대비 신호의 크기를 향상 시키는 능력은 WD 보다 우수하지만 간섭항이 $2n+1$ 개로 증가한다. WD이 갖고 있는 간섭항의 문제를 해결하기 위해서 Pseudo Wigner distribution(PWD)이 소개되었고 이것은 신호만을 선택하는 창문(window)이 필요하며 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 W_{pw}(t, f) &= \int_{\xi} H\left(-\frac{\xi}{2}\right) H^*\left(\frac{\xi}{2}\right) X^*\left(f + \frac{1}{2}\xi\right) X\left(f - \frac{1}{2}\xi\right) e^{-j2\pi\xi t} d\xi \\
 &= \frac{1}{2} \int_{\xi} H(-\xi) H^*(\xi) X^*(f + \xi) X(f - \xi) e^{-j2\pi\xi(2t)} d\xi
 \end{aligned} \tag{11}$$

여기서 $H(x)$ 는 창문함수이다. PWD를 4차 모멘트까지 확장한 것이 smoothed Wigner fourth order moment spectra(SWFOMS)이며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 SWFOMS(t, f) \\
 = \frac{1}{2} \int_{\tau} \gamma(\tau) \cdot W_{2,sw}(f, t + \tau) \cdot W_{2,sw}(f, t - \tau) d\tau
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서 $g(t)$ 는 간섭항을 제거하는 창문함수이다.

6. 충격위치 추적

이 장에서는 SWFOMS의 시간-주파수함수를 이용하여 각 측정 점에서의 신호에 대한 시간지연을 구한다. 먼저 시뮬레이션으로 구한 신호를 이용하여 충격 위치를 추적하고 이 결과를 이용하여 실험으로 구하는 파형에 반사파를 제거한 직접파만을 사용하여 각 센서에 도달하는 시간 지연을 구하여 삼각법으로 충격 위치를 추적한다.

6.1 시뮬레이션파형 이용 충격위치 추적

시뮬레이션 신호를 이용한 충격 위치를 추적하기 위해서는 각 센서에 도달하는 파형의 시간지연을 이용하여 식 (5)의 삼각법에 대입하여 위치를 추적한다. 센서에 도달하는 시간 지연을 구하기 위해서는 이 연구에서는 고차 시간-주파수 기술인 SWFOMS를 사용한다. 시뮬레이션 파형은 Fig. 6의 실선으로 표현된 것이며 이 각각의 신호에 대한 SWFOMS는

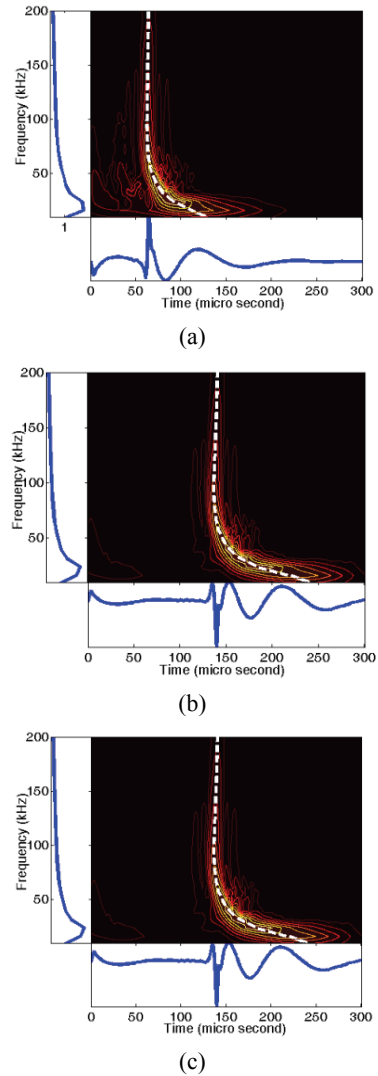


Fig. 7 SWFOMS for the waveforms simulated by the approximated SDPT⁽⁷⁾ (a) sensor S₂, (b) sensor S₀, (c) sensor S₁

Fig. 7과 같다. Fig. 7에는 3개의 신호가 있는데 아래 파형은 시뮬레이션 한 파형의 변위를 나타낸다. 무한 평판에 대한 수치해석 결과임으로 반사파가 존재하지 않음으로 0.3 msec 정도면 직접파형이 사라짐을 알 수가 있다. 중앙에 나타나는 점선은 직접파의 에너지 이동을 나타낸다. 좌측은 주파수이며 각 주파수별 에너지의 합이 된다. 각 주파수별 군속도가 다르므로 파형에 센서에 도달하는 시간이 다를 수 있다. 각 센서의 에너지 전달에 해당하는 중앙의 점선을 다시 시간-주파수 영역에서 동

시에 나타내면 Fig. 8(a)와 같다. 여기서 각 주파수별 시간 지연이 다를 수 있다. 이러한 주파수별 시간지연을 확인하기 위해서 충격위치에서 센서까지 거리를 각 시간별로 나누면 군속도를

알 수가 있다. 수치 실험적으로 군속도를 구한 것이 Fig. 8(b)의 실선으로 나타난다. 이론적인 군속도는 Fig. 2의 A_0 모드의 위상속도를 주파수로 미분하여 식 (4)를 이용하여 구하면 Fig. 8(b)의 사각형으로 표현된다. 이 결과에서 시뮬레이션 과정에 대해서 실험적으로 구한 군속도와 이론적으로 구한 군속도가

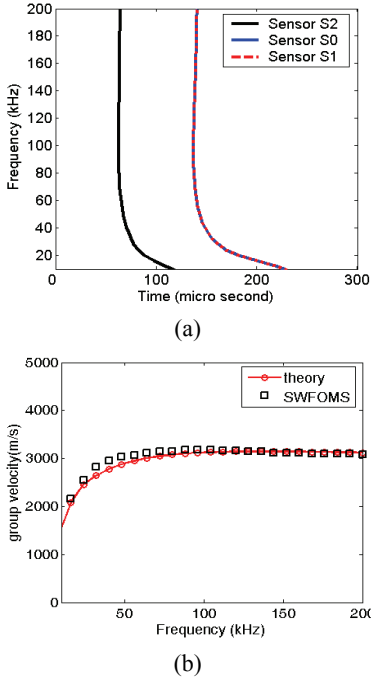


Fig. 8 (a) Arrival time difference obtained by the SWFOMS and (b) Group velocity obtained by using arrival time differences for the waveform simulated by SDPT

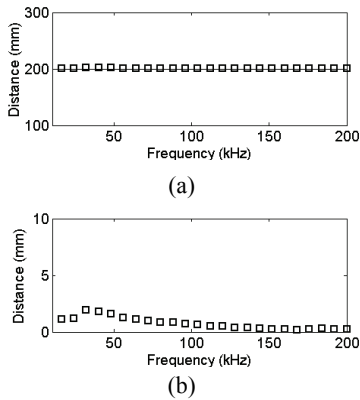


Fig. 9 Estimation of source location and distance error using the group velocity for the waveform simulated by SDPT (a) distance from true source (b) error in distance estimate

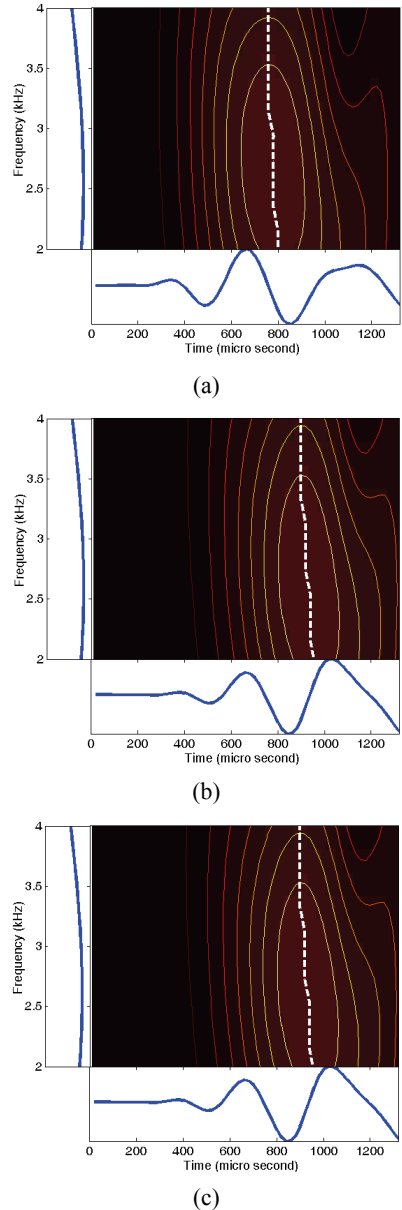
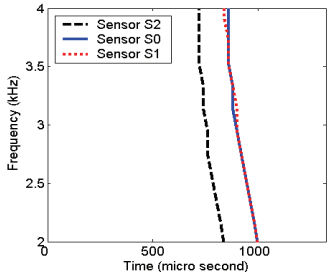
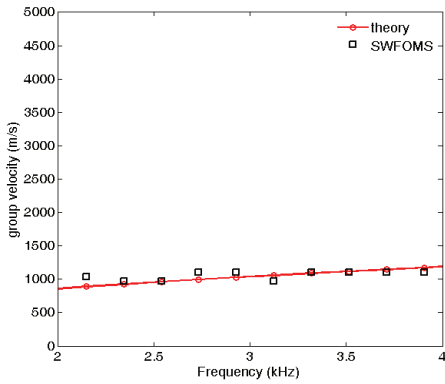


Fig. 10 SWFOMS for the filtered waveforms measured by three sensors (a) sensor S_2 (b) sensor S_0 (c) sensor S_1

거의 일치함을 알 수가 있고, 시간-주파수 방법으로 시간지연을 정확하게 구할 수 있음을 알 수 있다.

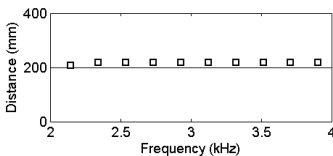


(a)

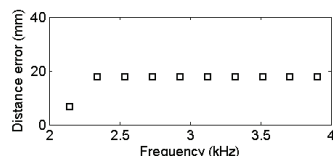


(b)

Fig. 11 (a) Arrival time difference obtained by the TFA and (b) group velocity obtained by using arrival time differences for the waveform measured by sensors



(a)



(b)

Fig. 12 Estimation of source location and distance error using the group velocity for the waveform measured by sensors (a) distance from true source (b) error in distance estimate

시뮬레이션 파형을 이용한 충격 위치의 추정치는 Fig. 8에서 구한 각 센서간의 시간 지연을 삼각법에 대입하여 구할 수가 있다. Fig. 9(a)는 원점으로 부터 충격점까지의 거리인 200 mm을 정확히 나타내며 사용된 주파수별 약간의 오차가 존재하지 만 Fig. 9(b)와 같이 그 오차 값이 크지 않음을 알 수가 있다.

6.2 측정파형 이용 충격위치 추적

측정 신호를 이용한 충격 위치를 추적하기 위해서는 시뮬레이션 방법과 동일하게 각 센서에 도달하는 파형의 시간지연을 이용하여 식 (5)의 삼각법에 대입하여 위치를 추적한다. 측정 신호는 가속도 신호이고 가속도 센서의 측정 범위가 6 kHz임으로 2~4 kHz의 대역 필터를 측정신호에 적용하여 시간-주파수 분석을 시행하였다.

Fig. 10은 3개의 센서에서 측정된 신호로부터 반사파의 영향을 제거하고 1.2 msec 정도의 값을 이용하여 고차 시간-주파수 기술인 SWFOMS을 적용한 결과이다. 충격과의 센서도달시간에 대한 각각의 센서에 대한 시간지연을 구하기 위해서 Fig. 10의 시간-주파수 분석결과에서 중앙의 점선을 다시 표시하면 Fig. 11(a)와 같다. 각 센서의 시간 지연은 주파수에 따라가 다를 수 있다. 각 주파수에 대응하는 군속도를 실험적으로 이론적으로 계산하면 Fig. 11(b)와 같이 구할 수 가 있고 실험값이나 이론 값이 상호 비슷함을 알 수가 있다.

측정신호에 대한 군속도 와 시간지연을 이용하여 위치를 측정한 결과는 Fig. 12와 같다. 시뮬레이션 신호 보다는 오차가 많다.

7. 결 론

이 연구에서는 평판의 충격 위치 추적에 관한 연구를 시행하였다. 먼저 수치해석적으로 평판에 가해진 충격에 대한 파형을 시뮬레이션 하였고 실험적으로 평판 위에 설치된 센서에서 파형을 측정하였다. 두 결과에 대해서 파형을 비교한 결과 매우 잘 일치 하였다. 시뮬레이션 파형의 예측의 장점은 평판을 무한 평판으로 가정하였으므로 평판의 가장자리에서 반사파가 없음으로 센스에서 측정 가능한 직접 분산파형의 미치는 시간을 이해 할 수가 있고 이것은 약 0.5 msec였다. 이 결과는 실험적으로 위

치 추적하는데 사용되는 직접과의 영향에 대한 시간을 예측하는데 매우 유용하게 사용되었다. 시간 지연과 삼각법을 이용하여 충격 위치를 추정하기 위해서 두 파형에 대한 고차-시간주파수 기술을 적용하여 평판에 부착된 3개의 센서에 도달하는 시간지연을 측정하였다. 시뮬레이션 신호는 고주파 영역(200 kHz)까지의 영향을 이해하기 위해서 변위 신호를 이용하였고, 실험적 신호는 측정에 사용된 가속도의 주파수 범위 관계로 2~4 kHz의 필터된 신호를 이용하였다. 두 신호를 이용한 위치 추적에서 고주파 변위를 이요한 방법이 실험적보다 오차가 적지만 두 방법 모두 5% 이내의 오차로 위치 추적을 성공적으로 할 수가 있었다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 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, 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, pp. 783~795.

(3) Hong, J. C, Sun, K. H. and Kim, Y. Y., 2005 Dispersion-based Short-time Fourier Transform Applied to Dispersive Wave Analysis, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 117, pp. 2949~2960.

(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*, 47, pp. 612~619.

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

(6) 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.

(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, pp. 1249~1263.

(8) Lih, S. S. and Mal, A. K., 1995, On the Accuracy of Approximate Plate Theories for Wave Field Calculations in Composite Laminates, *Wave Motion*, Vol. 21, pp. 17~24.

(9) Hellier, C. J., 2003, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill Company, New York.

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

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

(12) 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, pp. 245~266.