

# 평판 및 셸에서의 파동 전파 군속도 비교

## Comparison of the Wave Propagation Group Velocity in Plate and Shell

이 정 한<sup>†</sup> · 박 진 호<sup>\*</sup>

Jeong-Han Lee and Jin-Ho Park

(Received June 28, 2016 ; Revised July 14, 2016 ; Accepted July 14, 2016)

**Key Words :** Group Velocity(군속도), Plate and Shell(평판 셸), Impact Source Localization(충격위치추정), Time-frequency Analysis(시간-주파수 분석), Wigner-Ville Distribution(위그너 빌 분포)

### ABSTRACT

Precision of theoretical group velocity of waves in shell structures was discussed for the purpose of source localization of loose parts impact in pressure vessels of nuclear power plants. Estimating exact location of loose parts impact inside a reactor or a steam generator is very important in safety management of a NPP. Evaluation of correct propagation velocity of impact signals in pressure vessels, most of which are shell structures, is essential in impact source localization. Theoretical group velocities of impact signals in a plate and a shell were calculated by wave equations and compared to the velocities measured experimentally in a plate specimen and a scale model of a nuclear reactor. The wave equation applicable to source localization algorithm in shell structures was chosen by the study.

### 기 호 설 명

- $C_{ph}$  : 위상속도
- $C'_l$  : 의사종파속도
- $C_g$  : 군속도
- $E$  : 탄성계수
- $f$  : 주파수
- $G$  : 전단계수
- $\Gamma$  : 전단 인자(shear parameter)
- $h$  : 판 두께
- $k$  : 파수
- $\omega$  : 위상각속도
- $R(t, \tau)$  : 시간중속 자기 상관함수

- $R_1, R_2$  : 곡률 반경
- $r$  : 파동 전파 거리
- $\rho$  : 밀도
- $t$  : 시간
- $u$  : 변위
- $\nu$  : 푸아송 수

### 1. 서 론

원전에서 원자로 계통의 압력 경계 구조물들은 대부분 평판 또는 셸 형태의 구조물로 되어 있다. 이러한 구조물 내부에서 부식이나 이완 수축의 반복으로 발생된 금속파편이 가동 중 구조건전성에 영향을 주는 고장을 유발하는 경우가 있다<sup>(1,2)</sup>. 그래서 원전에서는 금속 파편의 발생을 감시하는 시스템

<sup>†</sup> Corresponding Author; Member, ACT Co., Ltd.  
E-mail : jhlee@actbest.com  
<sup>\*</sup> Member, Korea Atomic Energy Research Institute

<sup>‡</sup> Recommended by Editor Jae Hung Han  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

(LPMS, loose parts monitoring system)을 운영하는 중이며, 이러한 감시 시스템을 통해 금속파면에 의한 충격이 감지되면 신호분석을 통해 금속파면의 충격 위치와 질량을 추정하고 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 충격 위치와 질량 추정 분석은 국내외적으로 많은 기법들이 개발되었으며 진단에 적용되고 있다<sup>(4-7)</sup>. 이 중에서 충격 위치 분석은 센서 간의 도달 시간차를 측정하고 삼각법과 원교차법을 적용하여 분석하게 되는데, 이때 구조물의 군속도 정보는 매우 중요한 정보로 활용되고 있다. 이러한 군속도는 평판 또는 셸 구조물에서 분산 특성<sup>(8)</sup>을 갖게 되어 주파수에 따라 달라지는데, 이때 평판의 경우 군속도를 이론적으로도 쉽게 구할 수 있어서<sup>(9,10)</sup>, 기존의 충격 위치 추정 방법에서는 실험값이나 평판으로 가정한 군속도식 값을 사용하고 있다. 그러나 원전의 압력 경계 구조물은 주로 곡률을 갖는 셸 형태이기 때문에 평판의 경우와는 다른 군속도로 파동이 전파된다. 따라서 셸 형태의 구조물에서 군속도를 사용하기 위해서는 반드시 곡률에 의한 영향을 고려하여야만 한다.

이 논문에서는 곡률을 고려한 이론식을 유도하고 평판 및 구형 셸 구조물을 대상으로 실험을 통해서 검증한 후, 기존의 평판으로 가정한 이론식과 비교 검토하고자 한다.

## 2. 파동 전파 군속도 이론식

### 2.1 판파(Lamb wave)

Fig. 1과 같은 균일한 재질과 두께를 갖는 판 및 셸 구조물이 임의의 표면에 임펄스 충격을 가하면 탄성 영역 내에서 전파하는 표면파인 판파(Lamb wave)가 발생하며, 이러한 판 파는 Fig. 2(a)와 같이 파의 상하 대칭 형태로 전파하는 S파와 Fig. 2(b)와 같은 비대칭 형태로 전파하는 A파로 서로 다른 2개의 파 그룹(wave group)으로 이루어진다<sup>(11)</sup>. 여기에서  $S^0$ 는 S파의 0차 모드로 의사 종파(quasi-longitudinal wave)라 하며,  $A_0$ 는 A파의 0차 모드로 굽힘파(flexural wave)라 한다.

$S_0$ 파와  $A_0$ 파는 가장 저주파 영역의 모드로 가속도 센서를 사용하면 측정이 가능하다. 하지만  $S_0$ 파의 경우  $A_0$ 파 대비 진폭이 작아 이상적인 조건의 실험이 아닌 잡음을 포함한 환경에서 측정할 경우 구분이 어렵다. 또한  $A_0$ 파는 주파수에 따라 구조물

을 이동 전파하는 특성이 있으며, 이러한 굽힘파의 이동 속도를 군속도라 한다. 이러한 특성을 이용하여 원전에서는 금속 파면 등의 이물질 충격으로 발생하는 신호를 측정하고 굽힘파의 도달 시간차를 이용하여 충격 위치를 추정하고 있다.

$A_0$  굽힘파를 이용한 위치 추정은 센서 간의 도달 시간차 측정값과 사전에 얻은 군속도 정보를 적용해

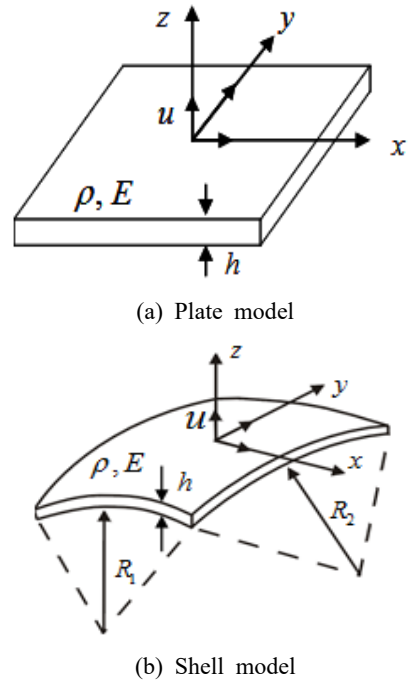


Fig. 1 Plate & shell structure model

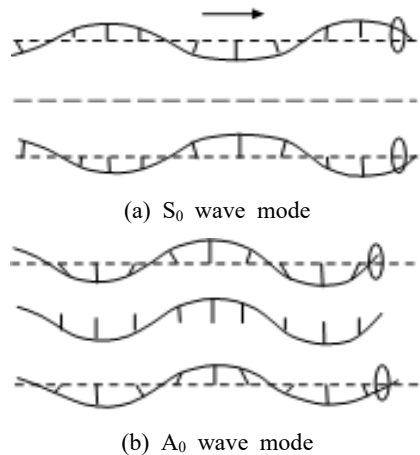


Fig. 2  $S_0$ ,  $A_0$  wave mode of lamb wave

야 한다. 이러한 군속도는 실험이나 이론적으로 얻을 수 있는데, 이 논문에서는 이론식에 의한 군속도 정보 적용을 위한 군속도 식을 검토해 보고자 한다. 다음은 기존 평판에서 이론식과 곡률을 적용해 유도한 셸 구조물에서 이론식이다.

**2.2 평판에서 군속도 이론식**

판과의 전파속도는 강체의 재질, 두께 및 주파수와 관련되며 Rayleigh-Lamb 방정식<sup>(11)</sup>에 의하여 해석적으로 구할 수 있다. 이때 굽힘파(A<sub>0</sub>)의 전파 속도는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{\tan(\sqrt{1-\zeta^2} \cdot kh)}{\tan(\sqrt{\xi^2-\zeta^2} \cdot kh)} = -\frac{(2\xi^2-1)^2}{4\xi^2(\sqrt{1-\zeta^2}\sqrt{\xi^2-\zeta^2})} \tag{1}$$

여기서,

$$\zeta \equiv \frac{C_t}{C_{ph}}, \quad \xi \equiv \frac{C_t}{C_l}$$

$$C_l \equiv \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad C_t \equiv \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$h$ 는 판 두께,  $E$ 는 영계수,  $\rho$ 는 밀도,  $\nu$ 는 프아송수,  $C_{ph}$ ( $\equiv \omega/k$ )는 위상속도,  $G$ 는 전단계수,  $k$ 는 파수,  $\omega$ ( $=2\pi f$ )는 각 주파수,  $f$ 는 주파수이다.

식(1)은 완전 해로서 직접적으로 풀기는 어려우나 수치해석을 통하여 주파수별 파동 전파 속도를 구할 수 있다.

Ross(1987)<sup>(12)</sup>는 위의 해석적 결과와 근사하면서도 매우 간편한 수식을 소개하였다.

$$C_{ph} = C'_l \cdot \sqrt{\frac{1.8hf}{C_L + 4.5hf}} \tag{2}$$

여기서,  $C'_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$ 이다.

충격으로 인하여 2개 이상의 굽힘파 성분이 동시에 전파하는 경우는 굽힘파들의 조합으로 인하여 포락선(envelope) 분포가 나타나며 이러한 포락선이 이동하는 속도를 군속도(group velocity)라 하며, 파동 에너지의 전파속도를 나타낸다<sup>(8)</sup>. 이 때 군속도의 정의는 다음과 같다.

$$C_g \equiv \frac{d\omega}{dk} = d\omega \left[ d\left(\frac{\omega}{C_{ph}}\right) \right]^{-1}$$

$$= C_{ph}^2 \left[ C_{ph} - \omega \frac{dC_{ph}}{d\omega} \right]^{-1} \tag{3}$$

군속도에 대한 완전 해는 식(1)로부터 위상속도( $C_{ph}$ )를 수치적으로 구하여 식(3)을 적용하여 구할 수 있다. 그리고 Ross(1987)<sup>(12)</sup>의 근사 해를 이용한 군속도는 식(2)와 식(3)을 정리하면 식(4)와 같다.

$$C_g = \frac{3.6hfC_L^2}{C_{ph}(C_L^2 + 9hf)} \tag{4}$$

한편, 굽힘파의 파장이 평판의 두께보다 매우 큰 얇은 평판의 경우 또는 저주파 영역의 경우( $kh < 1$ )에서 위상속도와 군속도는 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다<sup>(8)</sup>.

$$C_{ph} \cong \sqrt{\omega} \left( \frac{D}{\rho h} \right)^{1/4} \tag{5}$$

$$C_g \cong 2\sqrt{\omega} \left( \frac{D}{\rho h} \right)^{1/4} \tag{6}$$

여기서,  $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 이다.

식(5)와 식(6)에서 볼 수 있듯이 평판에서의 군속도는 위상속도 보다 2배 크며, 주파수의 제곱근에 비례함을 의미한다. 주파수가 클수록 군속도가 크기 때문에 고주파 성분의 파동이 먼저 도달하고 나중에 저주파 성분이 도달하는 분산 특성을 볼 수 있다.

**2.3 셸에서 군속도 이론식**

셸에서 군속도 식을 구하기 위해 회전관성과 전단 변형을 고려한 지배방정식을 통해 군속도 식을 유도하였다.

Fig. 1(b)에서 보는 바와 같이, 균일한 재질이면서 임의의 곡률을 갖는 셸 구조물에서 회전 관성 및 전단 변형에 의한 영향을 모두 고려할 경우, 굽힘파의 지배방정식은 식(7)과 같이 표현할 수 있다<sup>(12,13)</sup>.

$$\ddot{u} + \frac{C_1^2 h^2}{12} \cdot \nabla^4 u + \frac{K}{\rho h} \left( \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{2\nu}{R_1 R_2} \right) u - \frac{(\Gamma+1)h^2}{12} \cdot \nabla^2 \ddot{u} + \frac{\Gamma h^2}{12 C_1^2} \ddot{u} = 0 \tag{7}$$

여기서,  $u$ 는 굽힘파의 변위성분,  $h$ 는 셸의 두께,  $C_1$ 의 사중파 속도,  $\rho$ 는 밀도,  $R_1$  및  $R_2$ 는 셸 표면에서 각 좌표방향의 곡률 반경,  $\nu$ 는 푸아송 수,  $K = \frac{Eh}{(1-\nu^2)}$ ,  $\Gamma$ 는 전단인자,  $\nabla^4 = \nabla^2 \nabla^2$ 에서  $\nabla^2$ 은 Laplacian operator이다.

반사파가 없이 한 방향( $r$ )으로 전파하는 파동성분 ( $w$ )만을 고려하면, 변위는  $u = \hat{u} \cdot e^{j(\omega t - kr)}$ 라 가정할 수 있으므로 식 (7)에 대입하면 다음과 같다.

$$\left[ \omega^2 - \frac{C_1^2 h^2}{12} k^4 - \frac{R_c}{\rho h} + \frac{(\Gamma+1)h^2}{12} \omega^2 k^2 - \frac{\Gamma h^2}{12 C_1^2} \omega^4 \right] = 0 \tag{8}$$

다시,  $R_c \equiv K \left( \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{2\nu}{R_1 R_2} \right)$ ,  $\Omega^2 \equiv \frac{12 C_1^2}{h^2}$ 로 정의한 후 정리하면 굽힘파의 위상속도를 구할 수 있다.

$$C_{ph} = \frac{\omega}{k} = \left( \frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{1/2} C_1 \tag{9}$$

여기서,  $f(\omega)$ 와  $g(\omega)$ 는 다음과 같다.

$$f(\omega) \equiv \left( \frac{\omega}{\Omega} \right) \sqrt{(\Gamma-1)^2 \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 4 \left( 1 - \frac{1}{\omega^2} \frac{R_c}{\rho h} \right)} - (\Gamma+1) \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2$$

$$g(\omega) \equiv 2 \left( 1 - \Gamma \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2 - \frac{1}{\omega^2} \frac{R_c}{\rho h} \right)$$

다시 식 (9)를 미분하고,  $\frac{d\omega}{dk}$ 에 대해 정리하면, 식 (3)의 정의에 따라 군속도는 식 (10)과 같다.

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = \left[ \frac{1}{C_1} \left( \frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{\omega}{2 C_1} \left( \frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \frac{\frac{df(\omega)}{d\omega} g(\omega) - f(\omega) \frac{dg(\omega)}{d\omega}}{g(\omega)^2} \right]^{-1} \tag{10}$$

여기서,

$$\frac{df(\omega)}{d\omega} \equiv \frac{1}{\Omega} \sqrt{(\Gamma-1)^2 \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 4 \left( 1 - \frac{1}{\omega^2} \frac{R_c}{\rho h} \right)} + \frac{1}{2} \left( \frac{\omega}{\Omega} \right) \left\{ (\Gamma-1)^2 \left( \frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 4 \left( 1 - \frac{1}{\omega^2} \frac{R_c}{\rho h} \right) \right\}^{-\frac{1}{2}} \cdot \left\{ 2(\Gamma-1)^2 \left( \frac{\omega}{\Omega^2} \right) + \frac{8}{\omega^3} \frac{R_c}{\rho h} \right\} - 2(\Gamma+1) \frac{\omega}{\Omega^2}$$

$$\frac{dg(\omega)}{d\omega} \equiv 4 \left( \frac{1}{\omega^3} \frac{R_c}{\rho h} - \Gamma \left( \frac{\omega}{\Omega^2} \right) \right)$$

식 (10)은 회전 관성과 전단변형을 모두 고려한 셸 구조물에 대한 유도된 굽힘파의 군속도 식이다.

### 3. 파동 전파 군속도 실험

#### 3.1 실험 장치

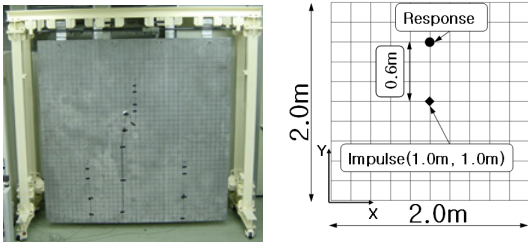
군속도 측정 실험은 Fig. 3과 같이 평판과 반구형 셸 구조물을 대상으로 군속도를 측정하기 위해 장치를 구성하였다. 평판 구조물은 굽힘파를 발생시키고 반사파의 영향을 줄이기 위하여 두께에 비해 가로 및 세로 길이가 긴 정사각형의 평판을 사용하였다.

Table 1과 같이 평판 구조물은 2 m × 2 m 크기와 10 mm 판 두께를 정사각형 구조물이며, 반구형 셸 구조물은 원자로 1/8 축소 크기의 구조물로 반구 반경이 0.283 m이고, 두께는 20 mm이다. 두 구조물의 재질은 SUS304이며, 영계수  $E = 205$  GPa, 밀도  $\rho = 7930$  kg/m<sup>3</sup>, 그리고 푸아송 수  $\nu = 0.29$ 이다.

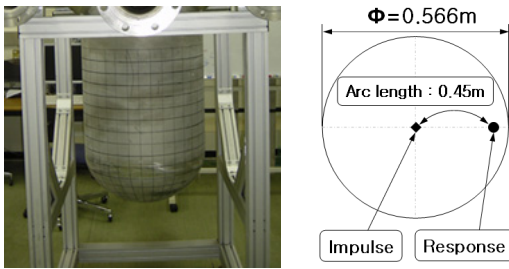
평판의 경우 가속도 센서를 부착하고 정 중앙을 타격 지점으로 하여 impact hammer로 가진 하였으며, 반구형 셸의 경우 반구 중심점을 타격 지점으로 하고, 중심점으로부터 표면 거리로 0.45 m 떨어진 위치에 가속도 센서를 부착하여 측정하였다. 측정 점은 모두 구조물의 반사파를 고려하여 선정하였다.

측정 시스템은 Table 2와 같이 VXI 1433 DSP 시스템을 사용하였으며, 측정 조건은 sampling rate가 196 kHz로 하였으며, 가속도 센서의 공진 주파수는

30 kHz 대역이나 주파수 분해능을 높이기 위해 고 샘플링으로 측정하였으며, 동일 조건으로 반복 측정 후 평균화하였다.



(a) Setup of the plate



(b) Setup of the semi-spherical shell

Fig. 3 Experimental setup of the plate and semi-spherical shell structure

Table 1 Material property of the plate & semi-spherical shell structure

Description	Plate	Semi-sphere shell
Material	SUS304	SUS304
Young's modulus	205GPa	205GPa
Poisson's ratio	0.29	0.29
Density	7930 kg/m <sup>3</sup>	7930 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	10mm	20mm
Shear parameter	3.0	3.0

Table 2 Specification of measuring devices & S/W

Description	Model	Manufacturer
Accelerometer	Type 4373	B&K
Impact hammer	Type 8203	B&K
Device	VXI 1433	Agilent
Analysis S/W	Visual C# I-deas Tdas	Microsoft B&K

### 3.2 군속도 산출

평판 및 셸 구조물에서 군속도 측정은 2개의 센서에서 충격 신호를 측정하고 시간차를 구하여 센서 사이의 거리를 나누어 계산할 수 있다. 그러나 굽힘 파는 주파수에 따라 분산 특성을 갖기 때문에 두 신호 사이의 도달 시간차는 주파수에 따라 다르게 된다. 따라서 도달 시간차 분석은 비 정상상태 신호분석 기법인 시간-주파수 분석 방법을 사용하여 측정 분석하였다.

시간-주파수 분석 기법은 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transforms; STFT), 연속 웨이블릿 변환(continuous wavelet transform), 위그너-빌 분포(Wigner-Vile distribution) 등의 분석 기법이 있다. 이 중에서 도달 시간차를 측정하기 위해 시간 및 주파수 분해능을 독립적으로 향상시켜 시간 및 주파수 모두 분해능이 높은 것으로 알려진 위그너-빌 분포 기법을 사용하였다<sup>(7,14)</sup>.

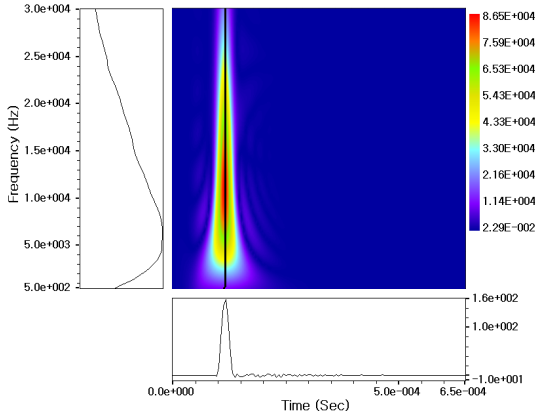
위그너-빌 분포 기법은 Bilinear TFR(time frequency representation)의 한 종류로서 그 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 W(t, f) &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} z\left(t - \frac{\tau}{2}\right) z^*\left(t + \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (11) \\
 &= \int Z^*\left(\omega + \frac{\varphi}{2}\right) Z\left(\omega - \frac{\varphi}{2}\right) e^{-j\mu \varphi} d\varphi
 \end{aligned}$$

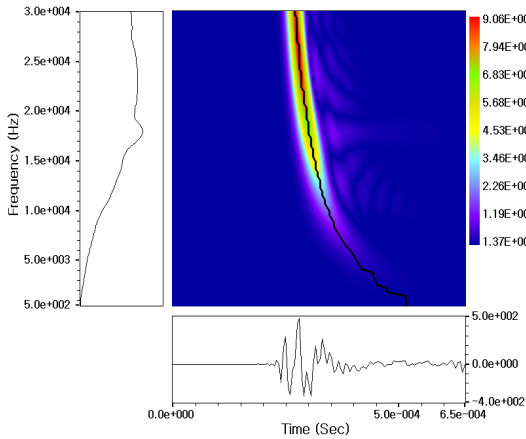
여기서,  $R(t, \tau)$ 는 시간 종속 자기상관함수(time dependent autocorrelation function),  $z(t)$ 는 측정 신호의 해석함수  $Z(\omega)$ 는  $z(t)$ 의 푸리에 변환(Fourier transform)이다. 즉, 위그너-빌 분포는 시간 종속 자기상관함수의 시간 지연에 대한 푸리에 변환으로 정의되며, 각 시간별 신호의 에너지에 대한 주파수 분포를 나타낸다. 따라서 2개의 센서로부터 측정된 신호를 위그너-빌 분포를 적용하고, 시간 지연 선도를 추출하여 센서 간 시간차를 판독한 후 군속도를 계산하였으며<sup>(15)</sup>, 총 15회 반복 측정하여 평균화하였다.

Fig. 4는 평판 구조물의 군속도 측정 결과이며 Fig. 4(a)는 impact hammer에 의한 충격 신호의 시간-주파수 분석 결과이고, Fig. 4(b)는 가속도 센서의 충격 응답에 대한 시간-주파수 분석 결과이다.

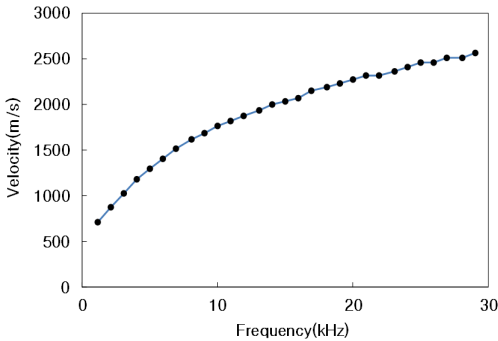
Fig. 4(c)는 시간-주파수 분석 결과를 이용하여 주파수별 도달 시간차를 충격 거리로 나누어 구한 군속도 결과이다.



(a) Impulse signal of the impact hammer



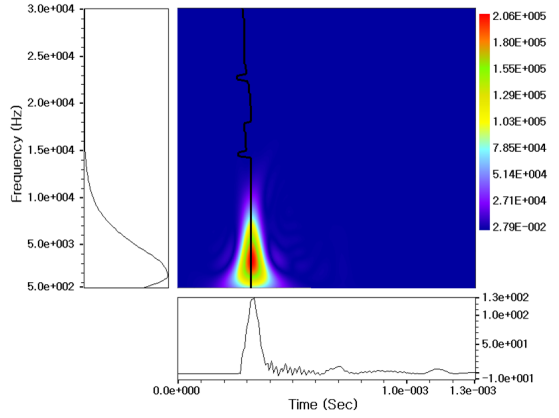
(b) Response signal of the accelerometer



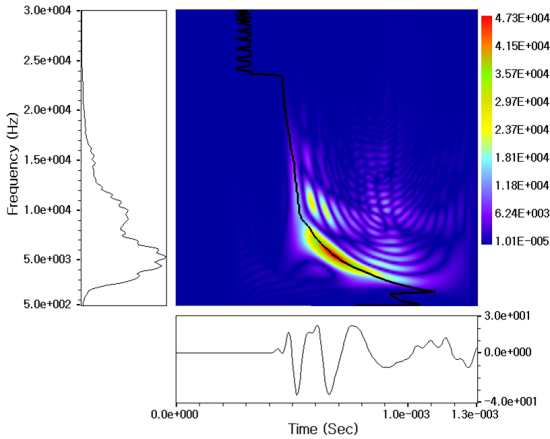
(c) Group velocity in the plate

**Fig. 4** Wigner-Vile distribution & group velocity in the plate

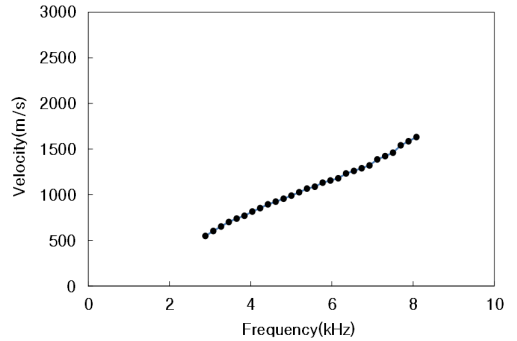
Fig. 5는 반구형 셸 구조물의 군속도 측정 결과이다. Fig. 5(a)와 (b)는 각각 impact hammer 충격 신호와 가속도 센서 응답 신호에 대한 시간-주파수 분석



(a) Impulse signal of the impact hammer



(b) Response signal of the accelerometer



(c) Group velocity in the semi-spherical shell

**Fig. 5** Wigner-Vile distribution & group velocity in the semi-spherical shell

## 4. 군속도 고찰

### 4.1 평판 구조물의 군속도 비교

평판 구조물의 군속도에 대해 이론식에 의한 결과와 실험을 통한 결과를 비교하였다. Fig. 6은 이론식에 의해 계산된 군속도 결과와 실험을 통해 얻은 군속도 결과이다. 식 (6)의 결과를 제외한 나머지 식 (1), (4), (10)의 군속도 결과가 실험에 의한 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 식 (6)의 결과는 고주파수 영역으로 갈수록 시험 결과와 많은 차이를 보이고 있어 충격 위치 추정에 사용할 경우 고주파수로 갈수록 많은 오차가 발생할 것으로 보인다. 식 (4)와 (10)의 군속도 결과는 가진 된 모든 주파수에 대역에서 실험 결과와 근사한 결과를 나타내고 있다. 특히, 식 (1)은 직접 해로 가장 근사한 결과를 보이고 있으나, 수렴성에 의존한 계산이기 때문에, 원전에서 금속 파편 감시 시스템(LPMS, loose parts

monitoring system)의 위치 추정 알고리즘에 적용하기에는 적합하지 않다. 따라서 평판 구조물의 경우 군속도 계산을 위해서는 계산이 간단하고 결과가 보다 정확한 식 (4)와 식 (10)을 사용하는 것이 유용함을 알 수 있다.

### 4.2 셸 구조물의 군속도 비교

셸 구조물의 군속도에 대해 평판 구조물의 방식과 마찬가지로 이론식에 의한 결과와 실험을 통한 결과를 비교하였다. Fig. 7은 이론식에 의해 계산된 군속도 결과와 실험을 통해 얻은 군속도를 비교한 결과이다. 평판 구조물에서 얻은 비교적 유용한 식 (4)와 (10)을 추가 검토하기 위해서 이 두 개의 식을 위주로 비교하였다.

셸 구조물의 경우 평판 구조물과 동일 조건의 실험을 수행하였으나, 가진 주파수 대역이 낮아 Fig. 7과 같은 주파수 대역의 속도만을 비교하였다. 이러한 특성은 곡률에 대한 영향으로 향후 추가 연구가 필요할 것으로 보인다. 셸 구조물의 군속도 비교결과 식 (10)의 결과가 실험값과 가장 유사함을 알 수 있으며, 식 (6)과 식 (4)는 실험값과 차이가 많음을 알 수 있다. 특히 식 (4)는 원전에서 금속 파편 충격 위치 추정에 많이 사용되고 있는 군속도 계산식이다. 하지만, 곡률 있는 셸 구조물에서는 군속도 계산 값이 유용하지 못함을 알 수 있다. 이러한 차이는 전단인자와 곡률을 고려하지 않고 단순화하여 전개했기 때문으로 보인다. 따라서 평판 구조물이나 곡률이 있는 셸 구조물의 군속도 계산을 위해서는 식 (10)을 사용하는 것이 보다 정확한 군속도 계산 결과를 얻을 수 있고, 위치 추정 진단 알고리즘에 사용하기 유용한 계산식임을 알 수 있다.

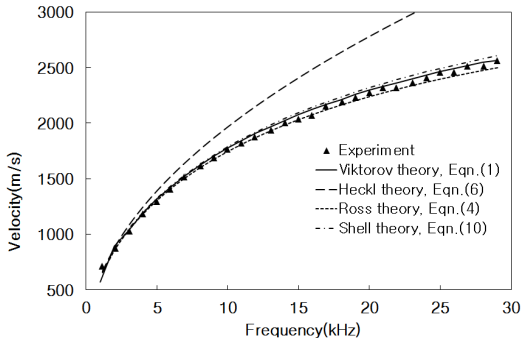


Fig. 6 Comparison of experimental & theoretical group velocity in the plate

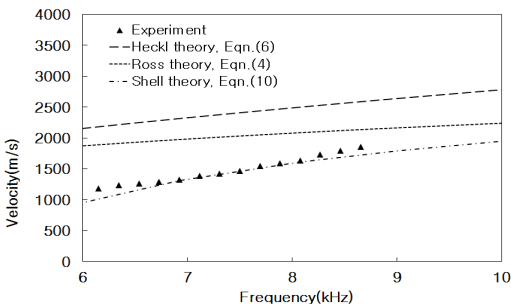


Fig. 7 Comparison of experimental & theoretical group velocity in the semi-spherical shell

## 5. 결론

전단 변형과 회전관성을 고려한 군속도 식 (10)을 유도하였으며, 평판 및 셸 구조물의 군속도 이론식을 검증하기 위해서 실험을 실시하고 이론식의 결과와 비교 검토하였다. 또한 실시간 위치 추정 진단 알고리즘에 적용하기 유용한 군속도 이론식을 비교 검토하였다.

먼저 식 (1)은 직접 해를 구하는 식으로 판 및 셸 구조물의 군속도 값을 보다 정확히 구할 수 있으나,



수렴에 의존한 계산 방식으로 실시간 충격 위치 추정 알고리즘의 적용에는 적합하지 않다.

식(6)은 가장 간단한 식으로 판 및 셸 구조물 모두 부정확한 결과를 얻을 수 있으며, 간단한 계산에 적용하는 것이 타당하다.

식(4)는 충격 위치 추정에 가장 많이 쓰는 식으로 판 구조물에서는 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있으나, 곡률을 포함한 셸 구조물에서는 정확하지 않은 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

식(10)은 이 논문에서 유도한 식으로 회전관성과 전단 변형의 영향을 모두 고려한 것으로 판 및 셸 구조물 모두에서 비교적 정확한 군속도 결과를 보임을 알 수 있었고, 수렴에 의존하지 않는 수식이므로 실시간 충격 위치 추정을 위한 진단 알고리즘 적용에 가장 적합한 식임을 알 수 있었다. 또한 셸 구조물의 경우 곡률에 대한 영향을 분석하기 위해 향후 다양한 곡률의 구조물에 대한 추가 연구를 진행하고자 한다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(원자력연구개발사업, 2012M2A8A4013245).

References

(1) Lubin, B. T., 1988, Analysis of Internals Vibration Monitoring and Loose Part Monitoring Systems Data Related to the St. Lucie 1 Thermal Shield Failure, Reactor Noise-SWORN VI, Progress in Nuclear Energy, Vol. 21, pp. 117~126.

(2) Vandenberg, J. et al, 2003, Steam Generator Modifications and Repairs at Wolsung, Cernavoda and Qinshan, 6th CNS International Conference on CANDU Maintenance, Session 5C.

(3) Mayo, C. W. et al., 1988, Loose-part Monitoring System Improvements, EPRI NP-5743 Project 2642-1 Final Report.

(4) Rhee, I. K., 1994, Development of Loose Parts Signal Location Estimation Technique in High Pressurized Structure, Research Report, KAERI/CM-102/94.

(5) Park, J. H., Choi, Y. C. and Lee, J. H., 2005,

Source Localization of an Impact on a Plate using Time-frequency Analysis, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 107~111.

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

(7) Park, J. H. and Kim, Y. H., 2006, An Impact Source Localization on a Spherical Shell by using Smoothed Wigner-Ville Distributions, Key Engineering Materials, Vol. 321~323, pp. 1274~1279.

(8) Cremer, L. and Heckl, M., 1998, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, pp. 101.

(9) Graff, K. F., 1991, Wave Motion in Elastic Solids, Dover Publications, Inc., pp. 239~244, pp. 431~463.

(10) Doyle, J. F., 1997, Wave Propagation in Structures, 2nd ed., pp. 198~206.

(11) Viktorov, I. A., 1967, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum Press, pp. 67~102.

(12) Ross, D., 1987, Mechanics of Underwater Noise, Peninsula Publishing Los Altos, California, p. 159.

(13) Soedel, W., 1993, Vibrations of Shells and Plates, 2nd Ed., pp. 125~135.

(14) Cohen, L., 1995, Time-frequency Distributions, Prentice Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

(15) Sohn, C.-H., Choi, Y.-C., Park, J.-H., Yoon, D.-B. and Chong, U.-P., 2006, Measuring Young's Modulus of Materials by Using Accelerometer, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1158~1164.



**Jeong-Han Lee** received the B.S. and M.S. degree in Mechanical Engineering from Wonkwang University in 1995 and 1998. 2001~2006, KAERI, Researcher, 2006~2012, Kumho Tire Co., Senior Researcher. Mr. Lee is currently a Senior Researcher at ACT Co. Ltd. Daejeon, Korea. His principal interests include machine vibration analysis and diagnosis of machinery, developments of the monitoring systems in nuclear power plants.





**Jin-Ho Park** received the B.S. and M.S. degree in Mechanical Engineering from Pusan National University in 1983 and 1985, the Ph.D. degree from KAIST in 2006. He is the Director & principal researcher at Korea Atomic Energy Research Institute. He has done research on vibration & acoustic analysis, R&D on structural

safety analysis of mechanical components in nuclear power plants, advanced signal processing for mechanical system's condition monitoring & diagnosis, development of vibration reduction techniques for the plant piping systems, development of NSSS integrity monitoring & diagnosis technologies such as reactor internals vibration monitoring, loose part monitoring, acoustic leak monitoring, and reactor coolant pump vibration monitoring.