

유한요소해석 기반 원전 기계구조물 충격-질량지표 개발

문성인[†]·강토*·한순우*

Development of FEA-based Metal Sphere Signal Map for Nuclear Power Plant Structure

Seongin Moon[†], To Kang* and Soonwoo Han*

(Received 26 April 2018, Revised 7 June 2018, Accepted 18 June 2018)

ABSTRACT

For safe operation of nuclear power plants, a loose-part monitoring system (LPMS) is used to detect and locate loose-parts within the reactor coolant system, and to estimate their mass and damage potential. There are several methods to estimate mass, such as the center frequency method based on the Hertz's impact theory, a frequency ratio method and so on, but it is known that these methods cannot provide accurate information on impact response for identifying the impact source. Thanks to increasing computing power, finite element analysis (FEA) method recently become an available option to calculate reliably impact response behavior. In this paper, a finite element analysis model to simulate the propagation behavior of the bending wave, generated by a metal ball impact, is validated by performing a series of impact tests and the corresponding finite element analyses for flat plate and shell structures. Also, a FEA-based metal sphere signal map is developed, and then blind tests are performed to verify the map. This study provides an accurate simulation method for predicting the metal impact behavior and for building a metal sphere signal map, which can be used to estimate the mass of loose-parts on site in nuclear power plants.

Key Words : Loose Part (금속이물질), Bending Wave (굽힘파), Mass Estimation (질량추정), Metal Sphere Signal Map (충격질량지표)

1. 서 론

가압경수로형 원전에서 원자로 냉각재계통은 원자로, 증기발생기, 냉각재 펌프 등의 주요기기로 구성되어 있으며, 이러한 주요기기는 대부분 셸(shell) 구조로 제작된다. 이러한 주요기기의 내부 구조물들은 냉각재 유동에 의해 부식이나 이완 수축의 반복 등으로 인해 내부에 금속이물질(loose part)들이 발생하거나, 정비기간에 작업자의 부주의 등으로

인해 금속이물질이 발생할 수 있다.

이러한 금속이물질들이 원자로 냉각재계통 내의 유로를 따라 유동하면서 내부 구조물과 충돌하는 경우 구조물의 손상을 발생시키고, 2차 냉각수의 방사능 오염 등의 안전 문제를 유발할 수 있다. 따라서, 원전에서는 이러한 문제를 조기에 감시하고 구조건전성 진단을 수행하기 위해서 금속이물질 감시시스템(Loose Part Monitoring System: LPMS)을 운영하고 있다.⁽¹⁻⁴⁾

원자로 냉각재계통에서 금속이물질을 감지하는 목적은 금속이물질의 위치와 질량을 추정하는 것이다. 금속이물질의 충격위치를 추정하기 위한 방법으로는 삼각법, 원교차법, 한국원자력연구원에서 개발한 최소분산스캐닝법 등이 있으며, 이들 방법

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구원
E-mail : simoon21c@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-8485

* 한국원자력연구원

을 활용하여 충격위치를 비교적 정확하게 추정할 수 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

금속이물질의 질량을 추정하기 위해서는 중심주파수방법(center frequency method)과 주파수영역별 파워비를 이용한 방법(frequency ratio method)이 주로 사용되고 있으나, 이를 통해 신뢰성있는 결과를 얻기에는 다소 어려운 실정이다. Mayo^(2,8)는 금속이물질의 질량과 충돌속도 및 발생 가속도 신호의 크기와 중심주파수의 관계를 나타내는 충격-질량지표(metal sphere signal map)를 구축한 후, 현장에서 측정 가속도 신호를 분석하여 얻은 가속도 크기와 중심주파수로 부터 질량을 예측하기 위한 방법을 제안하였다. 충격-질량지표를 구축하기 위해서는 금속이물질의 충격하중에 의해 구조물내에 발생하는 굽힘파 전파현상을 정확하게 모사하는 것이 필수적이다. Mayo는 충격-질량지표를 구축하기 위해 2차원 멤브레인 구조물(membrane surface)에 대한 Lamb의 일반해를 적용하였으나, 이로부터 정확한 굽힘파의 전파거동을 모사하는 것이 불가능하기 때문에 실구조물에 대한 충격실험 결과와 비교하여 구축된 충격-질량지표를 조정(calibration)하는 과정이 필요하다. 또한, 충격시험을 수행하여 충격-질량지표를 구축⁽¹¹⁾한 후, 금속이물질 질량추정을 위해 그 충격-질량지표를 활용하는 방법이 있으나 경제적, 시간적 비효율성 때문에 실제 적용이 불가능하다. 한편, 최근에는 컴퓨터 계산능력이 급속하게 발전함에 따라 유한요소해석(FEA: Finite Element Analysis) 기법을 이용해 실구조물내에 발생하는 굽힘파 전파현상을 정확하게 모사하는 것이 가능해 졌다.

본 연구의 목적은 모의 금속이물질(강구: metal ball)과 원자로(reactor) 및 증기발생기(steam generator) 용기와 같은 셸구조물 사이의 충격거동을 모사할 수 있는 FEA 모델과 FEA 기반의 충격-질량지표를 개발하는 것이다. 강구충격에 의해 발생된 굽힘파(bending wave)의 전파거동을 FEA 기법으로 모사하였으며, 평판구조물 및 (한국표준형원전 증기발생기 1/2축소모형 수실부)에 대한 충격시험 결과와 비교하여 FEA 기법을 검증하였다. FEA 기법의 유용성을 검증하기 위해 충격신호의 가속도 진폭, 중심주파수, 군속도 및 가속도의 감쇠 비율과 같은 다양한 충격 매개변수를 분석하였다. 또한, FEA 기반의 충격-질량지표를 개발하였으며, 블라인드 테스트(blind test)

를 수행하여 그 유용성을 검증하였다. 본 연구에서 개발된 FEA 기법은 원자력발전소의 원자로 및 SG 용기와 구조물에 대해 금속이물질에 의한 충격응답을 평가하는 데 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 평판구조물에서의 충격파 전파거동

2.1 굽힘파 (bending wave)

균일한 두께를 갖는 구조물(plate structure)의 표면에 임펄스 충격(impulse impact)을 가하면 탄성체 내에서 전파하는 유도초음파(guided wave)가 발생된다. 이러한 유도초음파는 상하 대칭형태로 전파하는 S파(symmetric wave)와 비대칭 형태로 전파하는 A파(anti-symmetric wave)의 2개의 그룹(wave group)로 이루어지며, 판의 두께와 주파수에 따라 파동의 속도 결정되는 분산특성을 보인다. S0는 S파의 1차 모드로 의사종파(quasi-longitudinal wave)라하며, A0는 A파의 1차 모드로 굽힘파(flexural wave or bending wave)라고 한다.

굽힘파는 금속이물질에 의한 충격파의 발생과 검출(detection)에 가장 중요한 형태의 파동이다. 의사종파와 굽힘파는 모두 저주파 영역에서 발생하는 모드로 가속도 센서를 사용하여 측정이 가능하지만 의사종파는 굽힘파에 비해 진폭이 작아 이상적인 조건이 아닌 잡음을 포함한 환경에서는 측정하기 어렵다. 한편, 굽힘파의 이동속도를 군속도(group velocity)라 하며, 이를 이용해 원전에서는 금속이물질의 충격으로 발생하는 신호를 측정하고 굽힘파의 도달 시간차를 이용하여 충격위치를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석기법의 타당성을 검증하기 위해 굽힘파 군속도를 이용하였다.

2.2 평판구조물에서의 군속도

유도초음파의 전파속도는 탄성체의 재질, 두께 및 주파수에 따라 결정되며, 다음과 같은 Rayleigh-Lamb 방정식에 의해 수치해석적으로 구할 수 있다.

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

$$\zeta \equiv \frac{C_t}{C_{ph}}, \quad \xi \equiv \frac{C_t}{C_l}, \quad C_l \equiv \sqrt{\frac{E}{\rho} \times \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}},$$

$$C_t \equiv \frac{\sqrt{g}}{\rho} \quad (2)$$

여기서 h 는 판두께, E 는 영계수, ρ 는 밀도, ν 는 프아송비, $C_{ph}(\equiv \omega/k)$ 는 위상속도, G 는 전단계수, k 는 파수(wave number), ω 는 각주파수, f 는 주파수이다.

충격으로 인해 발생한 두 개 이상의 굽힘파 성분은 동시에 전파하는 경우에는 굽힘파들의 조합으로 인해 엔빌로프(envelope) 분포가 나타난다. 이러한 엔빌로프가 이동하는 속도를 군속도라 하며, 이는 파동 에너지의 전파속도를 의미한다. 군속도(C_g)는 위상속도로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.^(11,12)

$$C_g = C_{ph}^2 \left[C_{ph} - (\omega) \frac{dC_{ph}}{d(\omega)} \right] \quad (3)$$

2.3 셸구조물에서의 군속도

Fig. 1 (b)에 나타난 셸구조물에 대하여 회전관성과 전단변형의 영향을 고려한 굽힘파의 지배방정식은 다음과 같다.^(13, 14)

$$\ddot{u} + \frac{C_l'^2 h^2}{12} \cdot \nabla^4 u + \frac{k}{\rho h} \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{2\nu}{R_1 R_2} \right) \cdot u - \frac{(\Gamma+1)h^2}{12} \cdot \nabla^2 \ddot{u} + \frac{\Gamma h^2}{12 C_l'^2} \cdot u \equiv 0 \quad (4)$$

여기서 u 는 굽힘파의 변위, C_l' 은 의사종파의 속도, R_1 과 R_2 는 각 좌표시스템상의 곡률반경, $K = Eh/(1-\nu^2)$, Γ 는 전단 파라미터, ∇^2 은 라플라스 연산자(Laplacian operator)이다.

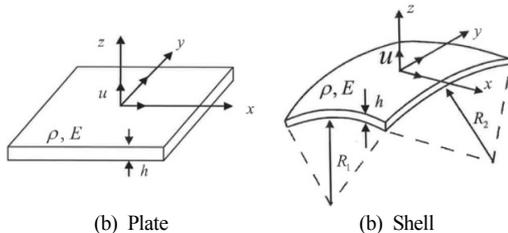


Fig. 1 Schematic representations of plate and shell

파동을 1차원으로 가정한다면 변위는 $\hat{u} \cdot e^{i(\omega t - kr)}$ 로 표현될 수 있으며 위상속도와 군속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽¹³⁾

$$C_{ph} = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{1/2} \cdot C_l' \quad (5)$$

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = \left[\frac{1}{C_l'} \left(\frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{-1/2} - \frac{\omega}{C_l'} \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \right] \cdot (6)$$

$$\left(\frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{-3/2} \cdot \left\{ \frac{df(\omega)}{d\omega} \cdot g(\omega) - f(\omega) \cdot \frac{dg(\omega)}{d\omega} \right\}^{-1}$$

여기서

k : 파수(wavenumber)

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

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

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

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

$$\cdot \left\{ 2(\Gamma-1)^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega^2} \right) + \frac{8}{\omega^2} \cdot \frac{R_c}{\rho h} \right\} - 2(\Gamma+1) \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega^2} \right) \cdot \left\{ \right\}$$

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

$$R_c \equiv K \left\{ \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{2\nu}{R_1 R_2} \right\}$$

$$\Omega^2 \equiv \frac{12 C_l'^2}{h^2}$$

식 (6)은 회전관성 및 전단변형을 고려한 셸구조물에 대한 굽힘파의 그룹속도를 나타낸다.

2.3 거리감쇠 (distance attenuation)

평판구조물에서 충격하중에 의해 가진된 굽힘파는 충격하중 입력지점으로부터 전파되며, 전파거리가 증가함에 따라 진폭이 감소된다. 충격하중 입력지점으로부터의 거리에 따른 굽힘파의 진폭 감소는 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽²⁾

$$\frac{Da(r)}{D_0} = H_0(kr) - H_0(-jkr) \quad (7)$$

여기서 $D_a(r)$ 는 충돌 지점으로부터 거리(r)에서의 변위진폭, D_o 는 충격하중 입력지점에서의 가속 진폭, H_o 는 제2종 헨켈함수(Hankel function)이다.

3. 충격파 전파실험

금속이물질을 이상화한 강구 충격 후, 평판구조물 및 셸구조물(한국표준형원전 증기발생기 1/2축 소모형 수실부)에 대한 기계적거동을 분석하기 위해 충격파 전파실험(impact wave propagation test)을 수행하였다.

평판구조물에 대한 응답특성을 평가하기 위해 두께에 비해 넓이가 큰 정사각형 평판을 사용하였다. Fig. 2와 같이 한 변의 길이가 2 m, 두께가 10 mm인 정사각형 평판을 시편으로 사용하였다. 재질은 STS304(304 stainless steel)이며 기계적물성은 Table 1에 나타내었다. 질량 131.6 g, 속도 0.581 m/s의 강구로 평판시편의 중앙부분에 충격하중을 입력한 후, Fig. 2와 같이 충격위치로부터 0.4, 0.6 m 거리에 가속도계를 부착하여 200 kHz의 샘플링 속도(sampling rate)로 가속도 신호를 저장하였다. 가속도 측정위치는 평판구조물 경계에서 발생된 반사파의 영향을 최소화할 수 있도록 선정하였다.

셸구조물에 대한 응답특성을 평가하기 위해 Fig. 3(a)에 나타낸 셸구조물사용되었으며 그 재질은 STS304이다. Table 2에 나타낸 강구 질량과 충돌속도로 충격하중을 입력하였으며, Fig. 3(b)에 도시한 바와 같이 셸구조물과 수직인 방향으로 충격하중을 입력하였다. 충격위치로부터 0.3 m 거리에 가속도계를 부착하여 200 kHz의 샘플링 속도(sampling rate)로 가속도 신호를 저장하였다.

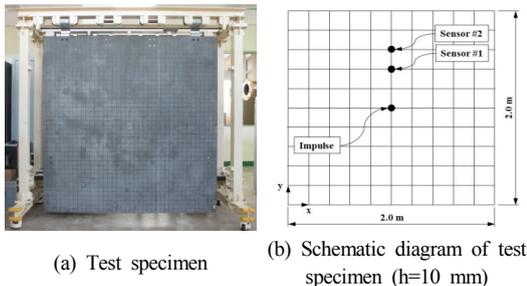


Fig. 2 Experimental set-up of plate for impact wave propagation test

Table 1 Mechanical properties of test specimen

Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (kg/m ³)
205	0.3	7,850

Table 2 Test data distribution

Mass (g)	Velocity (m/s)	Acceleration (G)	
		Mean	Standard Deviation
45.8	2.16	242.97	9.78
105.5	0.97	127.19	5.63
200.7	2.16	450.98	4.45

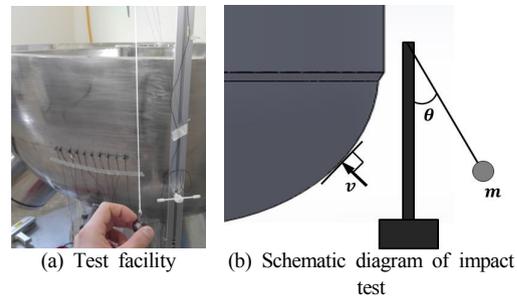


Fig. 3 Experimental set-up of shell for impact wave propagation test

4. 충격파 전파해석

4.1 유한요소해석

본 연구에서는 탄성유한요소해석 기법을 이용하여 평판 및 셸구조물의 충격파 전파거동을 예측하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다. 충격파 전파거동을 예측하기 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS의 implicit 코드를 사용했다. Fig. 4는 해석모델의 개략도(schematic diagram)와 유한요소망(finite element mesh)을 나타낸 것이다. 평판구조물의 경우 모델링 과정을 단순화하고 해석시간을 단축하기 위해 실제 실험과 달리 원형평판을 사용하여 FEA를 수행하였으며, 모델링 단순화 과정의 타당성을 입증하기 위해 흡음층(ALID: Absorbing Layer using Increasing Damping)^(15, 16)을 이용한 해석모델을 구성하여 해석결과에 미치는 영향을 검토하였다. 축대칭 3절점 또는 4절점 요소(axisymmetric 3 or 4 node linear element: CAX3 or CAX4R)를 사용하여 유한요소망을 구성하였다.

강구충격 현상을 모사하기 위해 강구와 평판표면에 접촉조건을 정의하였으며, 강구에 초기속도를 부여하였다. 에너지소산을 모델링하기 위해 Rayleigh 댐핑을 적용하였으며, 1 ~ 20 kHz 범위에서 0.001의 댐핑비(damping ratio)를 적용하였다. 해석데이터는 초당 1,000,000번 저장하였다.

4.2 흡음층 효과

본 연구에서는 해석모델 단순화의 영향을 평가하기 위해 ALID를 삽입하여 유한요소해석을 수행하였다. ALID는 유한요소해석을 위한 가상의 흡음층으로서 경계면에서 발생하는 반사파를 제거하기 위해 사용되었으며 거리에 따라 질량비례댐핑(mass proportional damping) 값이 점진적으로 증가하는 특성을 갖도록 모델링하였다. 질량비례 댐핑 계수는 다음 식으로 표현된다.

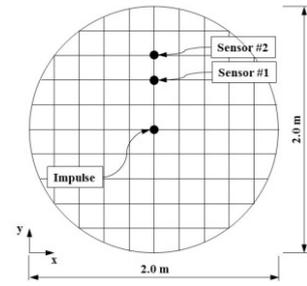
$$C_M(x) = C_{Mmax} \cdot X(x)^p \quad (8)$$

여기서 C_{Mmax} 는 양의 실수이며, $X(x)$ 는 경계면에서 0의 값, ALID 끝단에서 1의 값을 갖는다. 질량비례 댐핑계수와 멱급수의 지수 p 는 시행착오(trial and error)법에 의해 결정된다. Fig. 5는 충격응답에 대한 ALID의 영향을 나타낸 것으로서, ALID를 적용함으로써 충격하중 입력 후 약 0.0007초 이후에 발생하는 반사파의 거동을 제거할 수 있었다. 따라서, 정사각형 평판을 원형 평판으로 단순화하여 유한요소해석을 수행할 경우에도 약 0.0007초 이전까지 반사파의 영향이 없는 영역에서는 모델단순화의 영향이 미미함을 확인하였다.

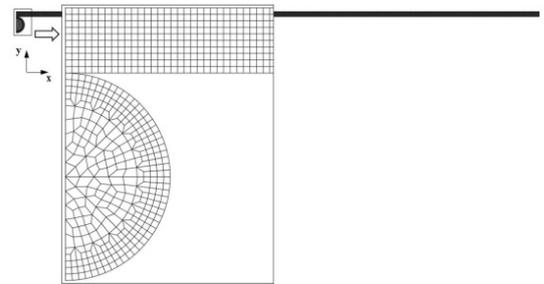
4.3 평판구조물의 충격거동

Fig. 6은 유한요소해석결과와 실험결과를 비교한 것으로서 차단주파수(cut-off frequency)가 20 kHz인 로우패스필터(low pass filter)로 필터링한 가속도를 나타낸 것이다. 계산된 가속도 신호와 측정된 가속도 신호의 경향이 잘 일치하였으며, 충격지점충격부터 0.4 m 지점에서의 최대 가속도 크기(acceleration amplitude)는 26% 이내에서 잘 일치하였다.

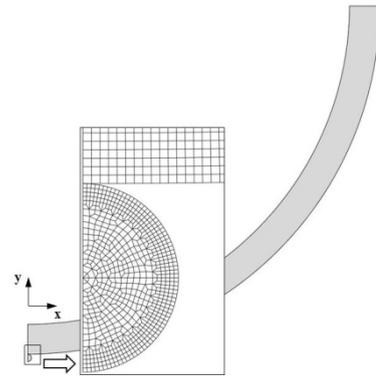
평판구조물에서 균속도는 두 센서 사이의 거리와 두 센서에서 측정된 충격신호의 시간차의 비로 표현할 수 있다. 그러나 굽힘파는 주파수에 따라 속도가 달라지는 분산특성을 갖기 때문에 두 신호



(a) Schematic diagram of analysis object for plate (h=10 mm)



(b) Finite element mesh for plate



(c) Finite element mesh for shell
(outer radius, $R_o=1039$ mm, $h=89$ mm)

Fig. 4 Finite element analysis model

사이의 도달 시간차(arrival time difference)는 주파수에 따라 변한다. 따라서 도달 시간차 분석을 위해 비정상상태 신호분석기법 중 하나인 위그너-빌 분포(Wigner-ville distribution) 기법을 사용하였다.

Fig. 7은 강구충격 실험으로부터 측정된 가속도 신호의 시간-주파수 분석결과, Fig. 8은 계산된 가속도 신호의 시간-주파수 분석결과를 나타낸다. 위그너-빌 분포상의 실선은 굽힘파 가속도의 주파수별 최대크기 곡선(peak magnitude line)을 나타낸 것이다. 이로부터 모든 주파수 성분들이 동일한 시간에

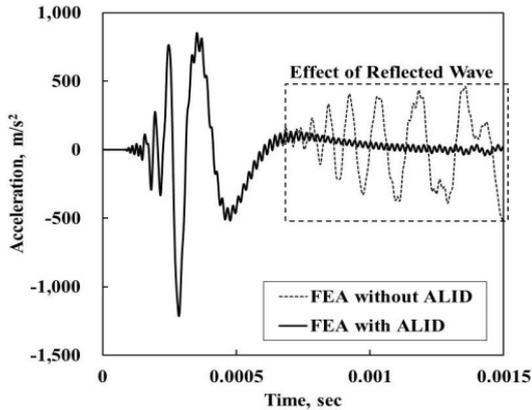
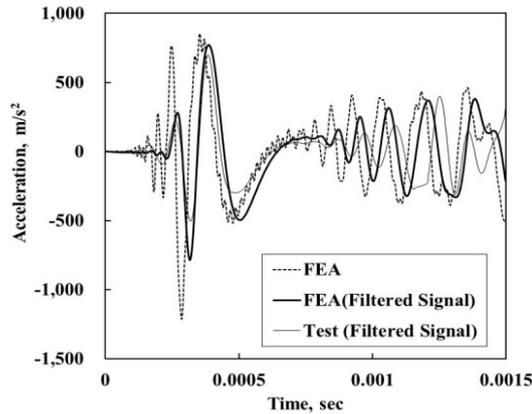
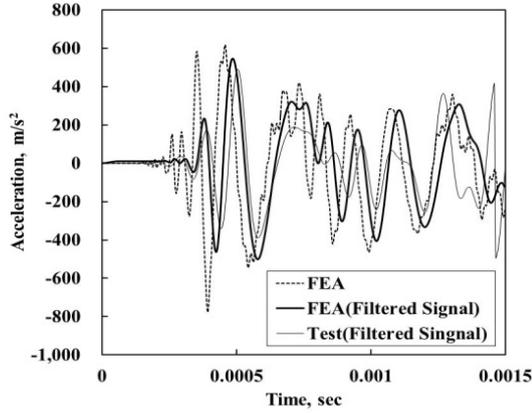


Fig. 5 Effect of absorbing layer on acceleration signal



(a) At sensor #1



(b) At sensor #2

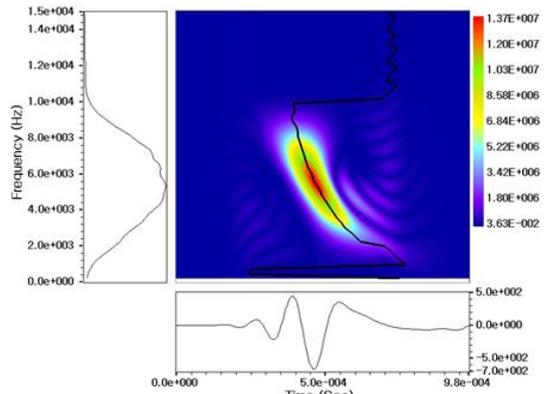
Fig. 6 Acceleration response signals of impact wave at sensors in plate

발생하나 측정거리에 따라서 주파수별 도달시간이 달라지는 분산특성을 확인할 수 있다. 충격지점으로부터 0.6 m 떨어진 지점에서 측정된 중심주파수와

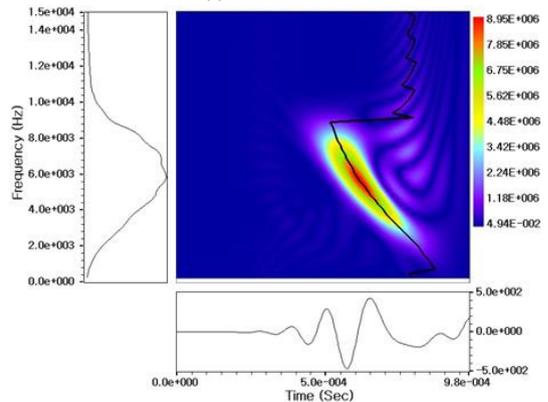
계산된 중심주파수는 6,060 Hz와 5,435 Hz로서 유한요소 해석결과는 약 10 % 내에서 시험결과와 잘 일치하였다.

위그너-빌 분포상에서 가속도 최대크기 곡선은 굽힘파의 군속도로 이동하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 따라서, 평판구조물에서 굽힘파의 군속도는 두 센서간의 거리와 굽힘파의 도달시간차의 비로써 계산할 수 있다. Fig. 9는 군속도를 나타낸 것으로서 유한요소해석기법을 이용하여 예측한 결과는 실험결과 및 수치해석결과와 잘 일치함을 확인하였다.

본 장에서는 평판구조물의 충격과 전파거동을 모사하기 위해 유한요소해석을 수행하였으며, 실험을 통해 측정된 가속도 신호 형태, 가속도 크기, 중심주파수 크기, 군속도 등을 비교하여 해석결과의 타당성을 검증하였다.



(a) At sensor #1



(b) At sensor #2

Fig. 7 Wigner-Ville distribution of measured acceleration response signals

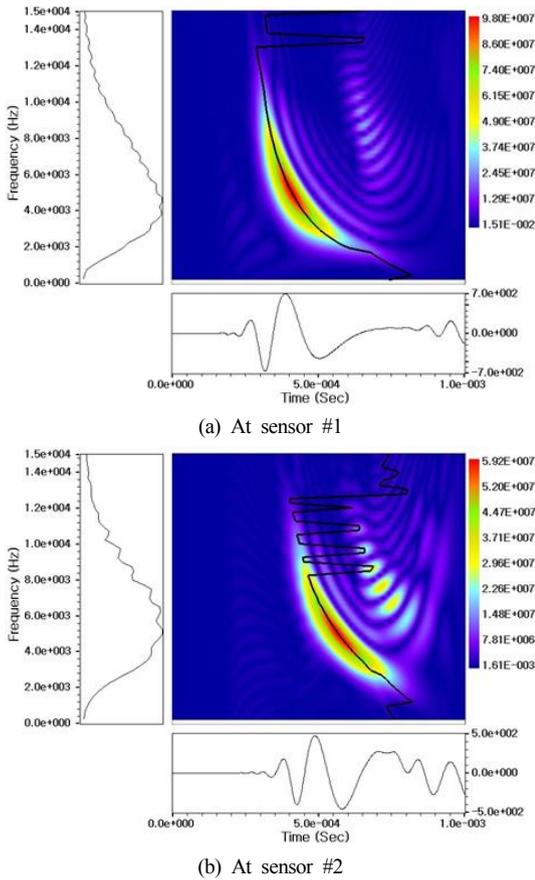


Fig. 8 Wigner-Ville distribution of calculated acceleration response signals

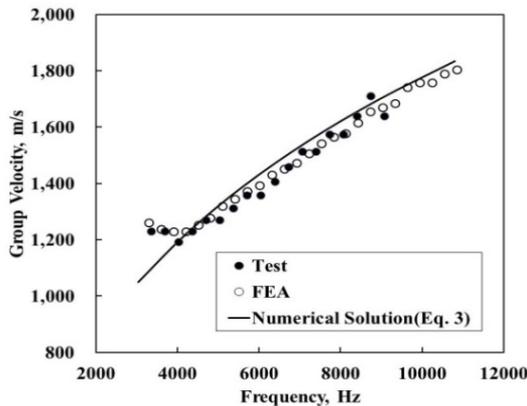


Fig. 9 Group velocity of bending waves in plate

4.4 셸구조물의 충격거동

셸구조물에 대한 충격시험은 각 조건별로 5회씩 수행되었으며, 충격하중 입력지점으로부터 0.3 m

떨어진 지점에서 측정된 가속도 진폭(peak-to-peak) 값을 Table 2에 나타내었다. Fig. 10과 Table 3은 FEA로 계산된 가속도 신호와 측정된 가속도신호를 나타낸 것으로서 FEA 계산결과는 시험결과와 평균 28 % 내에서 잘 일치하였다.

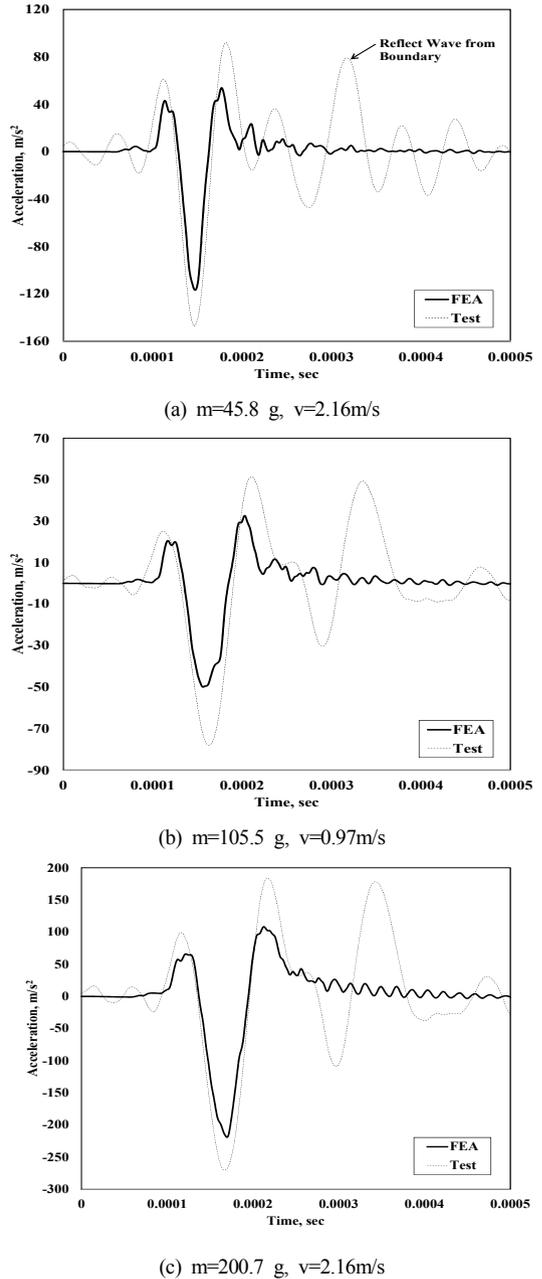


Fig. 10 Acceleration response signals at 0.3 m away from impact point in shell

Fig. 11은 충격하중 입력지점으로부터 0.3 m 떨어진 지점에서 측정된 가속도 신호에 대한 시간-주파수 분석결과의 예를 나타낸 것이다. 시험 및 FEA로 구한 중심주파수는 평균 8 % 차이를 보였으며 그 결과를 Table 3에 나타냈다. Fig. 12는 시험, FEA 및 Eq. (6)에 의해 구해진 군속도를 비교하여 도시한 것이다. 평균구조물과 셸구조물에서의 군속도는 약 8 kHz 이상의 영역에서 더 이상 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 파장이 짧을수록 파동의 전파거동에 미치는 구조물 곡률반경의 영향이

Table 3 Comparison between test and FEA result

Mass (g)	Velocity (m/s)	Normalized Acceleration by Test Result	Normalized Center Frequency by Test Result
45.8	2.16	0.76	1.14
105.5	0.97	0.65	1.10
200.7	2.16	0.77	1.00

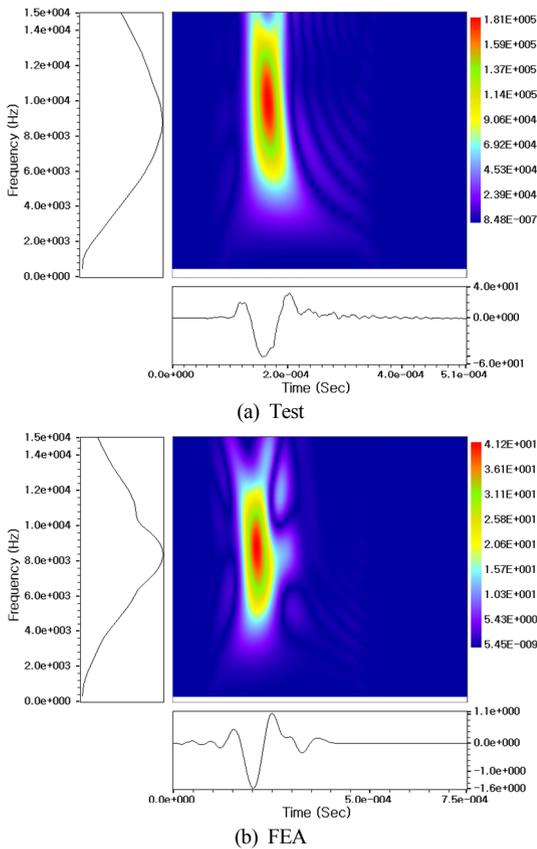


Fig. 11 Wigner-Ville distribution of acceleration response signals at 0.3 m away from impact point

작아지기 때문이며, 주어진 형상조건하에서는 중심주파수가 8kHz 이상일 경우에는 곡률반경의 영향이 사라지기 때문이다. FEA로 예측한 군속도는 6 %의 차이 내에서 시험결과와 잘 일치하였다

Fig. 13는 45.8 g의 강구가 0.97 m/s의 속도로 셸구조물에 충돌할 경우, 충돌하중 입력지점으로부터 거리증가에 따른 굽힘파의 가속도 진폭의 감쇠현상을 나타낸 것으로서 FEA로 계산한 굽힘파의 감쇠거동은 Eq. (8)의 감쇠거동과 잘 일치함을 확인할 수 있다.⁽⁸⁾

본 절에서는 셸구조물을 전파하는 굽힘파의 전파거동을 군속도, 주파수, 진폭 및 거리감쇠 거동 측면에서 검토하였으며 이를 통해 FEA 기법의 타당성을 입증하였다. 따라서 FEA 기법은 원자력발전소의 금속이물질의 질량추정을 위해 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

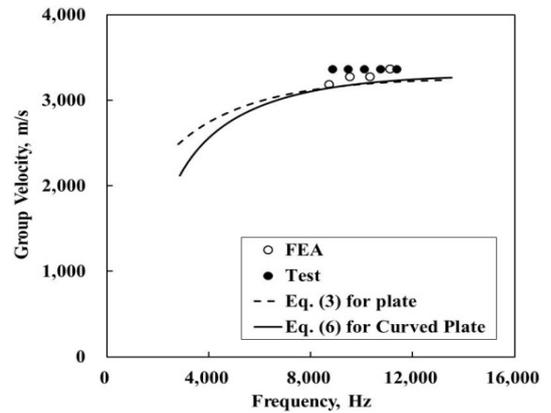


Fig. 12 Group velocity of bending waves in shell

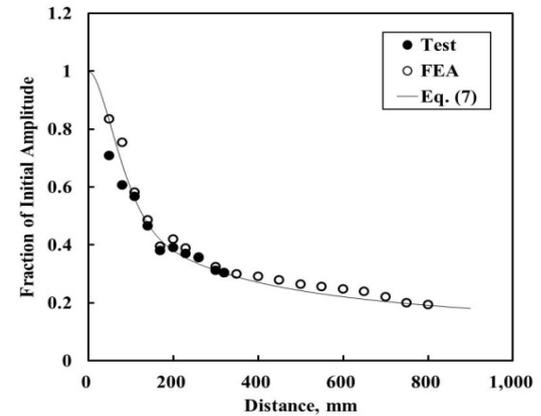


Fig. 13 Fraction of initial amplitude for half-scale steam generator primary head

5. 충격-질량지표 (metal sphere signal map)

임의의 충격하중에 대한 충격응답 진폭 및 주파수는 충돌하는 물체의 질량, 속도 및 접촉반경(contact radius) 등의 함수로 표현된다. 일반적으로 측정된 두가지 충격 매개변수로부터 세가지 매개변수를 고유하게 결정할 수 있는 방법은 존재하지 않는다. Mayo는 멤브레인(membrane)에 대한 Lamb의 일반해와 Hertz 충격이론에 기반하여 강구의 질량과 속도의 함수로서 충격 매개변수(충격응답 진폭 및 주파수)를 예측하기 위한 수단으로 충격-질량지표(metal sphere signal map)를 제안하였다.

Fig. 14는 강구의 질량 및 충돌 속도를 충격응답인 중심 주파수와 가속도의 함수로 나타낸 충격-질량지표의 한 예를 보여준다. Raman은 굽힘파의 중심주파수와 충돌시간 간에 다음과 같은 관계가 있음을 보였다.⁽²⁾

$$f_a = 1.6 / (2t_h) \tag{9}$$

여기서 f_a 는 중심주파수, t_h 는 Hertz 충격 이론으로부터 계산되는 충돌시간이다. 또다른 중요한 충격 매개변수인 굽힘파의 가속도 크기(A_{plate})는 다음과 같이 가정하였다.

$$A_{plate} = F_{max} / M_{eff} \tag{10}$$

여기서 F_{max} 는 Hertz 충격이론으로부터 계산된 충격력, M_{eff} 는 충돌로 인한 접촉시간 동안 굽힘파 전파로 인해 반응하는 평판의 체적에 해당하는 질량이다. 그러나 이러한 가정은 실제 충격거동과 상이하여 실험 데이터를 이용하여 보정하지 않을 경우 강구의 질량 및 충돌속도에 대한 정확한 정보를 예측할 수 없다.

따라서 본 장에서는 FEA 기법을 이용하여 셸구조물에 대한 충격-질량지표를 구축하였으며 이를 Fig. 14에 나타내었다. 다양한 질량(68, 118, 230, 544 g)과 충돌속도(0.3, 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 m/s) 하에서 강구 충격해석을 수행하였다. 충격하중 입력력지점으로부터 0.5 m 떨어진 위치에서의 가속도 신호를 분석하여 가속도 진폭과 중심주파수를 얻었으며 이를 이용하여 충격-질량지표를 구축하였다. 구축된 충격-질량지표의 유용성을 검증하기 위해 블라인드 테스트(blind test)를 수행하였다. 충돌

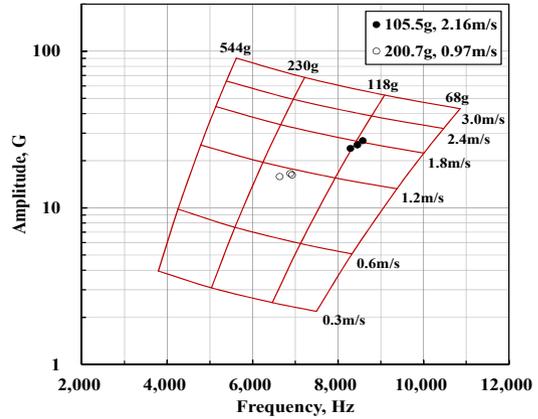


Fig. 14 FEA-based metal sphere signal map

Table 4 Mass estimation results by FEA-based metal sphere signal map

Mass (g)	Velocity (m/s)	Estimated Mass (g)	Difference (%)
105.5	2.16	108	2
		112	6
		2	15
200.7	0.97	180	-10
		164	-18
		168	-16

속도와 질량이 각각 (0.97 m/s, 200.7 g), (2.16 m/s, 105.5 g)인 강구를 이용하여 충격하중을 입력하였다. 충격 위치로부터 0.3 m 떨어진 지점에서 측정된 가속도 신호는 Eq. (7)을 이용하여 충격위치로부터 0.5 m 떨어진 위치에서의 가속도 신호로 변환하여 분석하였다. 분석된 데이터인 중심주파수, 가속도 크기는 질량을 추정하기 위해 구축된 충격-질량지표(Fig. 14)에 도시하여 내삽법에 의해 강구의 질량을 추정하였다. 실제 질량과 최대 15% 내에서 잘 예측되었으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 이러한 오차는 실험과 FEA 계산으로 구한 가속도 크기와 중심주파수의 오차에서 비롯된 것으로 판단된다. 이는 향후 실험방법과 FEA 기법을 개선하고 분석의 정확도를 향상시킴으로써 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 논문에서는 강구 충격에 의해 발생된 굽힘파의 전파거동을 유한요소해석(FEA) 기법으로 모사

하였으며, 평판구조물 및 셸구조물(한국표준형원전 증기발생기 1/2 축소모형 수실부)에 대한 충격시험 결과와 비교하여 FEA 기법을 검증하였다. 또한 FEA 기반의 충격-질량지표(metal sphere signal map)를 개발하였으며, 블라인드 테스트(blind test)를 수행하여 구축된 충격-질량지표의 유용성을 검증하였다. 본 논문에서 검토된 FEA 기법을 활용하여 제한된 도면 및 재료물성 데이터만으로 실제 원자력발전소 구조물에 적용가능한 충격-질량지표를 구축할 수 있으며, 금속이물질의 형상, 질량, 속도 등 다양한 충격 매개변수에 대한 영향을 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보 통신부)의 출연금으로 지원을 받아 수행된 주요연구사업임.

참고문헌

- (1) Rhodes, W.D., et al, 2012, *Export Control Guide: Loose Parts Monitoring Systems for Nuclear Power Plants*, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2012/601.
- (2) Mayo, C.W., et al, 1988, *Loose-Parts Monitoring System Improvements*, Electric Power Research Institute, EPRI NP-5743.
- (3) Park, J.H., 2006, *An Impact Source Localization using Wigner-Ville Distribution on Nuclear Power Plant Pressure Boundary Structures*, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Ph. D. Thesis.
- (4) Shin, S.H., 2011, "Mass Estimation of Impacting Objects against a Structure Using an Artificial Neural Network without Consideration of Background Noise," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 43, No. 4, pp. 343-354.
- (5) Kim, J.S., et al., 2002, "Development of automatic algorithm for localizing loose parts with a steam generator," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 219, pp. 269-276.
- (6) Olma, B.J., 1985, "Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of LWR's," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 15, pp. 583-594.
- (7) Ziola, S.M., 1991, "Source location in thin plates using cross-correlation," *Progress in Nuclear Energy*, Naval Postgraduate School, Ph. D. Thesis.
- (8) Mayo, C.W., 1999, "Loose-Part Mass and Energy Estimation," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 34, No. 3, pp. 263-282.
- (9) Tsunoda, T., et al., 1985, "Studies on the Loose Part Evaluation Technique," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 15, pp. 569-579
- (10) Lee, S.I., et al., 2016, "Steel Ball Impact-mass Index Construction for the Reactor Scale Models," *Annual Spring Conference of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, p. 108.
- (11) Rose, J.L., 1999, *Ultrasonic Waves in Solid Media*, Cambridge University Press.
- (12) Cremer, L., et al., 1973, *Structure-Borne Sound*, Springer
- (13) Lee, J.H., et al., 2016, "Comparison of the Wave Propagation Group Velocity in Plate and Shell," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 26, No. 4, pp. 483-491
- (14) Ross, D., 1987, *Mechanics of Underwater Noise*, Peninsula Publishing.
- (15) Drozd, M.B., 2008, *Efficient Finite Element Modeling of Ultrasound Waves in Elastic Media*, Imperial College of Science Technology and Medicine, Ph. D. Thesis.
- (16) Juluri, N., 2008, *Inspection of Complex Structures Using Guide Waves*, Imperial College of Science Technology and Medicine, Ph. D. Thesis.
- (17) Park, J.H., et al., 2006, "An Impact Source Localization on an Elastic Plate in Noisy Environment," *Measurement and Science and Technology*, Vol. 17, pp. 2757-2766.
- (18) Park, J.H., et al., 2006, "An Impact Source Localization on a Spherical Shell by Using Smoothed Wigner-Ville Distributions," *Key Engineering Materials*, Vols. 321-323, pp. 1274-1279.