

# 금속파편 충격 신호분석을 위한 굽힘파의 거리 감쇠

## Distance Attenuation of Bending Wave to Analyze the Loose Parts Impact Signal

이 정 한<sup>†</sup> · 박 진 호<sup>\*</sup>  
Jeong-Han Lee and Jin-Ho Park

(Received June 28, 2016 ; Revised July 26, 2016 ; Accepted July 26, 2016)

**Key Words** : Distance Attenuation(거리 감쇠), Bending Wave(굽힘파), Loose Parts(금속파편), Mass Estimation(질량 추정), Hankel Function(항켈 함수), Bessel Function(베셀 함수)

### ABSTRACT

Mass estimation analysis of loose-parts in pressure vessel is necessary for the structural integrity assessment of pressure boundary in nuclear power plants. Mass of loose-parts can be generally estimated from the peak values and the center frequency of impact signals. Magnitude of impact signals is, however, inevitably attenuated according to the traveling distance of the signals and depending on the frequencies. Attenuation rate must be therefore carefully compensated for the precise estimation of loose-part mass. This paper proposes a new compensation method for the attenuation rate based on Bessel function instead of Hankel function in conventional method which has a limitation of usage in near the impact location. It was verified that the suggested compensating equation based on the Bessel function can be applied to the attenuation rate calculation without any limitation.

### 기 호 설 명

$C_b$  : 굽힘파 속도  
 $C_g$  : 굽힘파 군속도  
 $C_{ph}$  : 위상속도  
 $D_0$  : 충격위치에서 진폭  
 $D_0(r)$  :  $r$ 위치에서의 진폭  
 $D_{3ft}$  : 3 ft 지점에서 진폭  
 $D_{meas}$  : 측정 점에서 진폭  
 $E$  : 탄성계수  
 $f$  : 중심 주파수  
 $\gamma$  : 오일러 상수

$\tilde{H}_{3ft}$  : 3 ft 지점에서 감쇠율  
 $\tilde{H}_{meas}$  : 측정 지점에서 감쇠율  
 $H_0(x)(=H_0^{(2)}(x))$  : 0차 제2종 항켈 함수  
 $h$  : 판 두께  
 $I_0(x)$  : 0차 제1종 변형 베셀 함수  
 $J_0(x)$  : 0차 제1종 베셀 함수  
 $K_0(x)$  : 0차 제2종 변형 베셀 함수  
 $k$  : 파수(wave number)  
 $r$  : 충격거리  
 $\rho$  : 밀도  
 $\nu$  : 푸아송 수  
 $Y_0(x)$  : 0차 제2종 베셀 함수

<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

## 1. 서 론

원전에서 원자로 계통의 압력 경계 구조물들은 평판 및 셸 형태의 구조물로 이루어져 있으며, 정기적인 유지 보수 활동을 실시하고 있다. 그러나 이러한 활동에도 불구하고 구조물 내부에 금속파편이 발생하는 경우가 있는데, 그 발생 원인은 핵연료 재장전이나 유지 보수 작업 진행 중에 발생하기도 하고, 원자로 운전 중 내부 구조물과 연계한 기기들의 이완 수축 또는 부식 등의 원인으로 발생하기도 한다.

금속파편이 발생하게 되면 구조물 내부의 냉각재 유동에 의해 핵연료나 노심 내부 구조물, 냉각재 펌프, 증기발생기 세관(U tube) 등에 손상을 유발하게 된다<sup>(1,2)</sup>. 이러한 금속이물질을 조기에 탐지하기 위해 원전에서는 금속파편 감시시스템을 운영 중이며, 금속파편에 의한 충격이 발생할 때 구조건전성 진단을 위해 충격질량 추정을 수행하고 있다<sup>(3)</sup>. 이러한 질량 추정은 중심 주파수와 가속도 진폭의 크기 정보를 이용하게 된다<sup>(4,5)</sup>. 모든 신호 분석은 굽힘파의 진동 가속도를 측정하여 분석하게 되는데, 굽힘파는 판 및 셸 구조물에서 주파수별 분산 특성을 갖게 된다. 따라서 중심주파수는 시간-주파수 기법 등을 통해서 분석하게 된다. 하지만 가속도 진폭의 크기는 충격 발생 지점으로부터 떨어진 거리에 반비례하여 그 크기가 감소하는 거리 감쇠가 발생하기 때문에, 충격위치에서 측정위치까지의 거리에 따른 가속도 진폭에 대한 보정 분석이 필요하다.

이러한 이유로 거리 감쇠에 따른 영향을 고려할 수 있도록 Mayo 등은 Cremer와 Heckl의 항켈 함수(Hankel function)를 이용한 굽힘파 거리 감쇠 식을 적용하여 분석자의 판단에 따라 분석할 수 있도록 하였다.

하지만, 최근 진단시스템의 발전으로 진단 분석이 자동화되고 있으며, 실시간 처리를 요하는 단계에 이르고 있다. 이러한 추세에 따라 금속 파편 감시 시스템의 진단 기술도 발전하여 구조물의 건전성 분석에 대한 보다 빠른 의사 결정을 위해서 충격 신호 분석 시 자동화 및 실시간 처리가 요구되고 있다. 그러므로 이물질 충격으로 인한 질량 추정 분석을 위해 거리 감쇠 특성을 적용한 진단 프로그램을 개발이 필요하나, 기존의 진단자의 판단에 의한 거리

감쇠 식을 적용할 경우 명확하지 않은 조건문으로 전산 코드 구현에 기술적인 문제가 발생한다.

따라서 조건문을 전산 코드로 구현할 수 있도록 명확히 하거나 하나의 식으로 표현할 필요가 있다. 또한 충격 이물질이 가벼운 것보다 무거운 경우 건전성에 미치는 영향이 큰 데, 이물질의 질량이 증가할수록 충격으로 인한 중심 주파수가 낮아지므로 저주파수에 대한 분석 신뢰도가 높아야 되며, 진단의 신뢰도 향상을 위해 다량의 센서를 사용하여 신호를 검출함에 따라 충격 발생 위치가 센서와 근접한 위치에서 검출되는 경우도 발생하므로 근접 장에서 보다 정확한 분석이 필요하다.

따라서 충격 발생 위치가 측정 센서로부터 가깝고, 저주파수 대역의 감쇠 오차를 줄일 수 있고, 진단 프로그램 개발을 위한 전산 코드 처리가 용이하도록 이 논문에서는 기존에 사용하고 있는 굽힘파의 거리 감쇠 보정식과 방법을 검토하고, 금속파편 감시 진단 시스템의 질량 추정 알고리즘에 적용이 가능하도록 개선된 보정 식을 제시하고자 한다.

## 2. 굽힘파 거리 감쇠

### 2.1 질량 추정과 거리 감쇠

원전에서 설치 운영 중인 금속파편 감시 시스템에서 금속 이물질에 의한 충격 신호가 발생할 경우 충격 신호의 진위 분석과 충격 위치 추정, 그리고 충격 질량을 추정하게 된다<sup>(6)</sup>. 질량 추정은 Hertz 이론을 바탕으로 하는데, 구조물에 금속파편이 충격할 때 측정된 진동 신호는 충격 질량과 접촉 형상, 충격 속도에 영향을 받는다<sup>(5)</sup>. 여기에서 가속도 센서로 측정된 충격 신호분석 인자로 파동 전파에 의한 중심 주파수와 가속도 진폭을 사용하고 있다. 따라서 Fig. 1과 같이 실험을 통해 사전에 구조물에 대한 질량과 속도에 따른 질량 지표를 작성하고, 충격 신호가 발생할 경우 신호분석을 통해 중심 주파수와 진폭 값을 측정하여 기 작성된 질량 지표에 매핑 후 보간법을 통해 질량을 추정하게 된다<sup>(5,7)</sup>. 이때 Fig. 1과 같은 질량 지표 작성은 구조물에 부착된 가속도 센서로부터 3ft 떨어진 위치에서 강구를 이용한 충격을 실시하고, 구조물의 응답 신호를 측정하여 분석하기 때문에 실제 금속파편의 충격 신호를 분석할 경우 가속도 진폭의 크기를 3ft 지점에서의

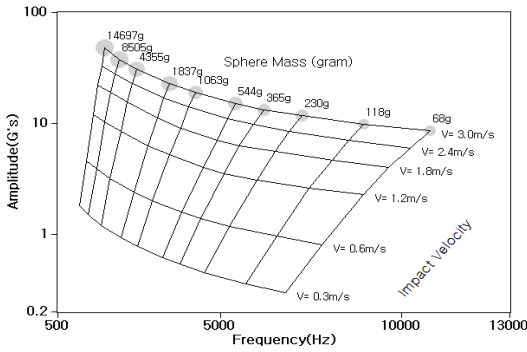


Fig. 1 Metal sphere signal map at three feet from sensor in PWRs

크기로 환산할 필요가 있다. 따라서 식 (1)과 같이 측정된 신호의 진폭 값을 3 ft 지점의 신호로 보정한 후 사용하게 된다.

이때 신호 보정을 위해서는 구조물에 대한 굽힘 파의 거리 감쇠율이 필요하게 되는데, 이 논문에서는 진단 시스템에 직접 적용할 수 있도록 수학적 방법을 통한 거리 감쇠 적용 방법을 검토하였다.

$$D_{3ft} = D_{meas} \times \frac{\tilde{H}_{3ft}}{H_{meas}} \tag{1}$$

여기서,

- $D_{3ft}$  : 3 ft 지점에서 진폭
- $D_{meas}$  : 측정 점에서 진폭
- $\tilde{H}_{3ft}$  : 3 ft 지점에서 감쇠율
- $H_{meas}$  : 측정 지점에서 감쇠율

### 2.2 기존 거리 감쇠 식

굽힘파의 거리 감쇠는 원전 압력 구조물과 같이 판 및 셸 구조물에 충격이 가해져 파동이 전파될 때 충격 지점으로부터 거리가 멀어지면 파의 진폭이 댐핑과 에너지 소실 등으로 거리에 따라 감소하기 때문에 굽힘파의 감쇠(attenuation)는 거리와 파수의 함수로 이루어질 수 있다.

Cremer와 Heckl<sup>(8)</sup>은 굽힘파의 거리와 파수에 따른 감쇠 함수를 항켈 함수(Hankel function)를 이용하여 식 (2)와 같이 정의하였으며, Mayo<sup>(7)</sup>는 이 식을 이용하여 이물질 등의 충격으로 인한 충격 질량 추정에 필요한 신호 크기 감소를 거리에 따른 감쇠율 식으로 적용하였다.

$$D_a(r)/D_0 = H_0(kr) - H_0(-jkr) \tag{2}$$

여기서,

- $r$  : 충격위치로부터 거리
- $D_a(r)$  : 충격위치로부터 거리  $r$  위치에서 진폭
- $D_0$  : 충격 위치에서 진폭
- $k$  : 파수(wave number)
- $H_0$  : 0차 제2종 항켈 함수(Hankel function of second kinds of order 0)

이다.

Cremer와 Heckl은 0차 2종 항켈 함수를 함수 인자  $x$ 의 크기 조건에 따라 식 (3)과 (4)로 근사화하였다.

$$H_0(x) \approx \left(\frac{2j}{\pi}\right) \ln(x), \quad |x| \ll 1 \tag{3}$$

$$H_0(x) \approx \left(\frac{2}{\pi x}\right)^{0.5} e^{-j\left(x - \frac{\pi}{4}\right)}, \quad |x| \gg 1 \tag{4}$$

$$k = \frac{2\pi f}{C_b}, \quad C_b : \text{굽힘파 속도} \tag{5}$$

감쇠율 식을 구하기 위해 먼저  $x = kr$ 일 때  $|x| \ll 1$  조건의 식 (3)을 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} H_0(kr) - H_0(-jkr) &= \left(\frac{2j}{\pi}\right) \ln(kr) - \left(\frac{2j}{\pi}\right) \ln(-jkr), \tag{6} \\ &|kr| \ll 1 \end{aligned}$$

또한  $|x| \gg 1$  조건의 식 (4)를 식 (2)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_0(kr) - H_0(-jkr) &= \left(\frac{2}{\pi kr}\right)^{0.5} e^{-\left(kr - \frac{\pi}{4}\right)j} - \left(\frac{2}{\pi kr}j\right)^{0.5} e^{-\left(-kr + \frac{\pi}{4}\right)j} \\ &= \left\{ \left(\frac{2}{\pi kr}\right)^{0.5} \cos\left(-kr + \frac{\pi}{4}\right) \right\} \\ &+ \left[ \left(\frac{2}{\pi kr}\right)^{0.5} \left\{ \sin\left(-kr + \frac{\pi}{4}\right) - \sqrt{2} e^{-kr} \right\} \right] j, \tag{7} \\ &|kr| \gg 1 \end{aligned}$$

식 (6)과 (7)은 기존에 사용하는 감쇠율 계산식으로  $kr$ 의 크기 조건에 따라 식이 나누어 유도되었는데, 그 기준은  $|kr| \ll 1$  또는  $|kr| \gg 1$  이 된다. 여기에서 2개의 조건이 의미하는 것은 저주파수 또는 충격 점과 가까운 거리에 따라 구분한다는 것이다. Cremer와 Heckl<sup>(8)</sup>은  $kr \geq 4$ 에서 가장 근사한 결과를 얻는다고 제시하고 있다.

여기에서 식 (6)과 식 (7)을 금속과판 감시 시스템의 이물질에 의한 충격 질량 추정 진단 프로그램에 적용하기 위해서는  $|kr|$ 의 조건을 명확히 해야 하는데, 유도된 식의  $|kr|$  조건이 1을 기준으로 명확히 제한되지 않음을 알 수 있다. 또한 실제 원전 압력 구조물의 충격 질량 분석에서  $kr \leq 4$ 구간에서 충격 신호들이 발생하는 경우 정확한 감쇠 크기가 필요하나, Cremer와 Heckle이 제시한 바와 같이  $kr \geq 4$ 에서 근사한 결과를 얻을 수 있으므로 보다 보수적인 충격 질량 분석을 위해서는 이를 해결할 필요가 있다.

**2.3 개선된 거리 감쇠 식**

기존 Cremer와 Heckl이 제시한 식은 항켈 함수의 인자의 크기에 따라 식을 구분하였으며, 그 크기의 기준이 근사적으로 정의되어 기준이 모호하기 때문에 실제 진단 시스템에 적용할 경우 금속과판의 충격 위치가 가속도 센서 부근일 때 추정 질량의 오차가 커질 수 있으며, 진단 분석 프로그램에 적용할 경우 기준을 명확히 설정할 필요가 있다.

따라서 조건에 따라 유도된 2개의 식을 1개의 식으로 표현하고자 하며, 그 방법은 기존의 항켈 함수를 베셀 함수로 적용하는 방식으로 유도하였고, 식의 유도는 다음과 같다.

먼저, 0차 제2종 항켈 함수(Hankel functions of second kinds of order 0)의 정의는 다음과 같다<sup>(9)</sup>.

$$H_0^{(2)}(x) = J_0(x) - jY_0(x) \tag{9}$$

여기에서,  $J_0(x)$ 는 0차 제1종 베셀 함수(Bessel function of the first kind of order 0)이며, 정의는 다음과 같다<sup>(9)</sup>.

$$J_0(x) \equiv 1 - \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} - \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots \tag{10}$$

또한,  $Y_0(x)$ 는 0차 제2종 베셀 함수(Bessel function of the second kind of order 0)이며, 정의는 다음과 같다<sup>(9)</sup>.

$$Y_0(x) \equiv \frac{2}{\pi} \left\{ \ln\left(\frac{x}{2}\right) + \gamma \right\} J_0(x) + \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{x^2}{2^2} - \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} \left(1 + \frac{1}{2}\right) + \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) - \dots \right\} \tag{11}$$

여기에서,  $\gamma = 0.5772156$ , 오일러 상수(Euler's constant)이다.

$K_0(x)$ 는 0차 제2종 수정 베셀 함수(modified Bessel function of the second kind of order 0)이며, 정의는 다음과 같다<sup>(9)</sup>.

$$K_0(x) \equiv - \left\{ \ln\left(\frac{x}{2}\right) + \gamma \right\} I_0(x) + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} \left(1 + \frac{1}{2}\right) + \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}\right) + \dots \tag{12}$$

또한,  $I_0(x)$ 는 0차 제1종 수정 베셀 함수(modified Bessel function of the first kind of order 0)이며, 정의는 다음과 같다<sup>(9)</sup>.

$$I_0(x) \equiv 1 + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} + \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots \tag{13}$$

식 (10)에서 베셀 함수의 인자가 복소수 일 경우 다음과 같다.

$$J_0(-jx) = 1 + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} + \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} + \dots = I_0(x) \tag{14}$$

또한, 식 (11)의 0차 제2종 수정 베셀 함수(modified Bessel function of the second kind of order 0)의 인자가 복소수 일 경우 식 (15)와 같이 유도될 수

있다.

$$\begin{aligned}
 Y_0(-jx) &\equiv \frac{2}{\pi} \left\{ \ln \left( -\frac{x}{2} j \right) + \gamma \right\} J_0(-jx) \\
 &+ \frac{2}{\pi} \left\{ -\frac{x^2}{2^2} - \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} \left( 1 + \frac{1}{2} \right) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} \left( 1 + \frac{1}{2} \right) - \dots \right\} \\
 &= \frac{2}{\pi} \left\{ \ln \left( \frac{x}{2} \right) - \frac{x}{2} j + \gamma \right\} I_0(x) \quad (15) \\
 &- \frac{2}{\pi} \left\{ \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^4}{2^2 \cdot 4^2} \left( 1 + \frac{1}{2} \right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{x^6}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) + \dots \right\} \\
 &= -jI_0(x) - \frac{2}{\pi} K_0(x)
 \end{aligned}$$

식 (10)부터 식 (15)의 결과를 식 (9)에 적용하고 감쇠율 식의 형태로 정리하면 다음과 같은 식 (16)이 된다. 즉, 항켈 함수 형태를 실수부와 허수부로 구분된 베셀 함수 형태로 변환할 수 있어, 조건 없이 한 개의 식으로 표현할 수 있다.

또한, 베셀 함수의 경우 컴퓨터 프로그램으로 쉽게 구현 및 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 H_0(x) - H_0(-jx) &= \{ J_0(x) - jY_0(x) \} \\
 &\quad - \{ J_0(-jx) - jY_0(-jx) \} \\
 &= J_0(x) - jY_0(x) \\
 &\quad - \left[ I_0(x) - j \left\{ -jI_0(x) - \frac{2}{\pi} K_0(x) \right\} \right] \quad (16) \\
 &= J_0(x) - jY_0(x) - \frac{2}{\pi} jK_0(x) \\
 &= J_0(x) - j \left\{ Y_0(x) + \frac{2}{\pi} K_0(x) \right\}
 \end{aligned}$$

굽힘파의 감쇠율 식을 구하기 위해 식 (16)에서  $x$  인자 대신  $kr$  적용하면 식 (17)과 같은 굽힘파의 감쇠율 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{D_0(r)}{D_0} &= H_0(kr) - H_0(-jkr) \\
 &= J_0(kr) - j \left\{ Y_0(kr) + \frac{2}{\pi} K_0(kr) \right\} \quad (17)
 \end{aligned}$$

### 3. 거리 감쇠율 비교

#### 3.1 시뮬레이션 조건

굽힘파의 거리 감쇠율 식 검토를 위해서 Table 1과 같은 조건을 사용하여 기존에 Cremer와 Heckl이 제시한 항켈 함수의 근사적 표현을 적용한 거리 감쇠율 식 (6), 식 (7)과 이 논문에서 제시한 항켈 함수를 베셀 함수 형태로 유도한 식 (17)에 적용하여 비교하였다. 시뮬레이션을 위한 재료와 물성 정보는 한국 표준형 가압경수형 원자로 정보를 적용하였다.

거리 감쇠율을 구하기 위해서는 굽힘파의 군속도 정보가 필요하다. 원자로는 곡률이 존재하는 형상이지만, 이 논문에서는 기존 식과 제시한 식의 거리 감쇠 비교가 목적이므로 곡률을 무시한 평판으로 가정하여 계산하였다.

Ross(1987)<sup>(10)</sup>는 평판에서 근사적으로 매우 간편한 수식을 소개하였다.

$$C_{ph} = C'_L \cdot \sqrt{\frac{1.8hf}{C'_L + 4.5hf}} \quad (18)$$

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

충격 가진으로 인해 2개 이상의 굽힘파 성분이 동시에 전파하는 경우 굽힘파들의 조합으로 인하여 포락선(envelope) 분포가 나타나는데, 이러한 포락선이 이동하는 속도를 군속도(group velocity)라 한다.

**Table 1** Specification and material property of the reactor vessel for the PWRs

Items	Reactor vessel
Materials	Carbon steel(SA508)
Young's modulus	210 GPa
Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	0.29
Thickness	0.16 m

즉, 군속도는 파동 에너지의 전파속도를 나타낸다. 군속도의 정의는 다음과 같다.

$$C_g \equiv \frac{d\omega}{dk} = d\omega \left[ d \left( \frac{\omega}{C_{ph}} \right) \right]^{-1} \tag{19}$$

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

여기서, 식 (18)과 식 (19)를 정리하면 식 (20)과 같은 근사식으로 구성된 군속도 식이 된다.

$$C_g = \frac{3.6hfC_L'^2}{C_{ph}(C_L'^2 + 9hf)} \tag{20}$$

따라서 식 (5)의 파수  $k$ 를 구하기 위해서 굽힘파 군속도  $C_b$ 는 식 (20)의  $C_g$ 값을 사용하였다.

### 3.2 비교 결과

거리 감쇠율 식의 결과를 비교하기 위해 Table 1의 조건으로 기존 식 (6), (7)과 이 논문에서 제시한 식 (17)을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 감쇠율은 최댓값이 1이므로 식 (6)은  $|kr| \ll 1$  조건에서 감쇠율이 1이다. 따라서 기존 식 (6)의 반영은 식 (7)의 결과에서  $|kr| \leq 1$  인 경우 감쇠율 값을 1로 처리한 후 식 (7)과 식 (17)의 결과를 비교하였다.

Fig. 2는 중심 주파수  $f=2000$  Hz일 때 결과이다. 기존 식 (7)과 개선된 식 (17)의 결과에서 두 개 식 모두 충격 거리가 0.8 m 이상( $kr \geq 4$ )인 조건에서는 유사한 결과를 보이고 있으나, 0.8 m 이하( $kr \leq 4$ )인 조건에서는 차이를 나타내고 있다. 두 개의 식이 동일한 항켈 함수를 이용한 결과이기 때문에 같은 결과를 보여야 하나, 기존 식의 유도 과정 중 항켈 함수의 근사화로 인해 발생한 오차로 보인다. 또한, 거리 감쇠율은 충격 지점에서 감쇠가 없으므로 초기 진폭의 크기 값에 수렴해야 하나, 기존 식 (7)의 경우는 충격 지점에 가까워질수록 수렴하지 않으며, 충격 거리가 0.2 m ( $|kr| \leq 1$ ) 이하에서는 식 (6)이 적용되어 불연속적인 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 Cremer와 Heckl는 식 (7)을 사용할 경우  $kr \geq 4$  조건에서 사용할 것을 제안했다<sup>(8)</sup>.

반면, 이 논문에서 제시한 식 (17)의 경우는 충격 지점과의 거리에 상관없이 계산이 이루어짐을 알 수 있으며, 충격 지점에 가까워질수록 잘 수렴하는 것

을 알 수 있다. 또한 식 (17)을 적용할 경우  $kr$ 의 조건과 관계없이 적용이 가능하므로 금속파편 감시 시스템의 질량 추정 알고리즘을 적용한 진단 프로그램 개발도 보다 유용할 것이다.

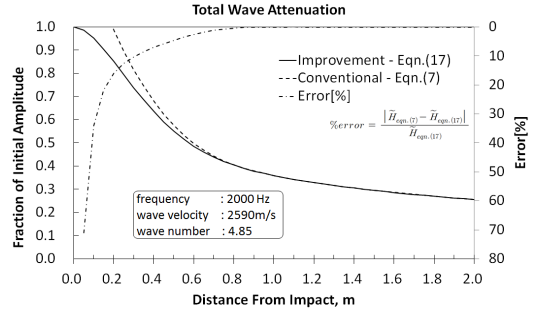


Fig. 2 Total wave attenuation comparisons between conventional Eq. (7) and improvement Eq. (17) for frequency of 2000 Hz

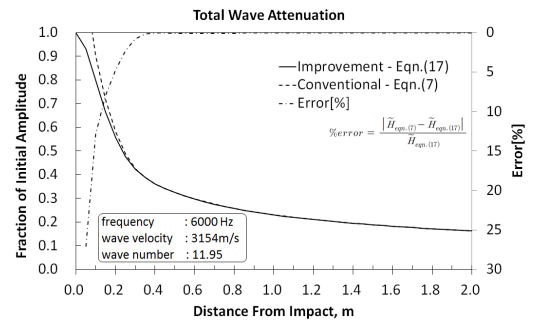


Fig. 3 Total wave attenuation comparisons between conventional Eq. (7) and improvement Eq. (17) for frequency of 6000 Hz

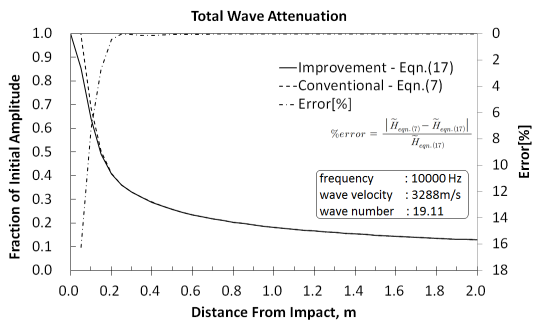


Fig. 4 Total wave attenuation comparisons between conventional Eq. (7) and improvement Eq. (17) for frequency of 10 000 Hz

또한 Fig. 3과 Fig. 4의 결과와 같이 중심 주파수 ( $f$ : frequency) 또는 파수( $k$ : wave number)가 증가할수록 식 (7)과 식 (17)의 충격 거리에 따른 거리 감쇠율이 유사해지는 것을 알 수 있는데, 이것은  $kr$  값이 증가하기 때문임을 알 수 있다.

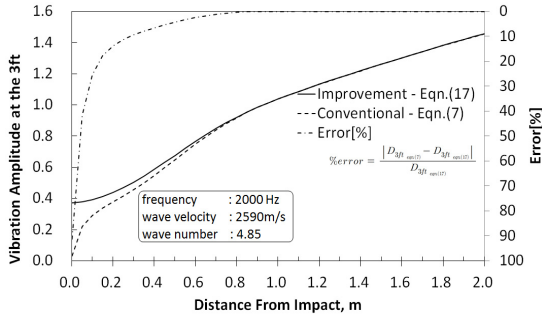


Fig. 5 Vibration amplitude at the 3ft comparisons between conventional Eq. (7) and improvement Eq. (17) for frequency of 2000 Hz

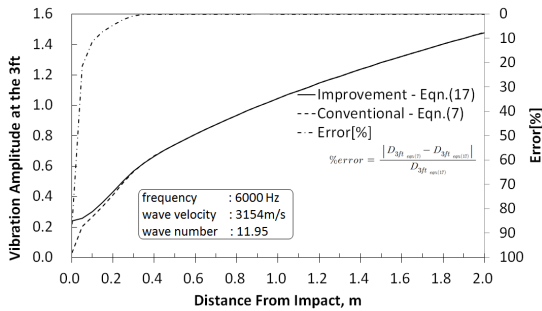


Fig. 6 Vibration amplitude at the 3ft comparisons between conventional Eq. (7) and improvement Eq. (17) for frequency of 6000 Hz

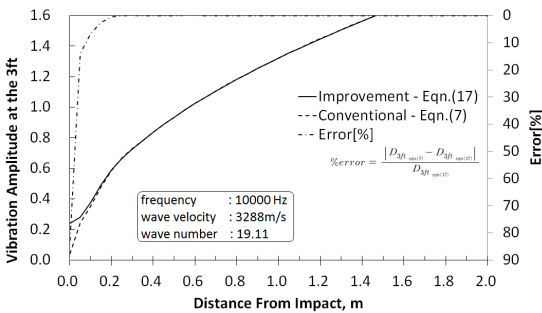


Fig. 7 Vibration amplitude at the 3ft comparisons between conventional Eq. (7) and improvement Eq. (17) for frequency of 10 000 Hz

Fig. 5에서 Fig. 7의 결과는 측정 가속도를 동일한 크기로 가정하고 기존 식 (7)과 개선 식 (17)의 결과를 식 (1)에 적용하여 3ft(=0.9144 m) 지점에서의 가속도 크기로 환산한 계산 결과이다. 원전 구조물에서 이물질의 충격으로 인한 건전성 진단은 보수적인 접근이 필요하다. Fig. 5의 결과에서 나타나듯이 센서로부터 충격 위치가 가까울수록 개선한 식 (17)의 가속도 크기가 기존 식 (7)을 적용한 가속도 크기보다 큰 것을 알 수 있는데 이것은 개선식을 사용할 경우 보다 큰 질량으로 추정될 수 있으므로 보다 보수적인 진단이 가능함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

이 논문에서는 금속과편의 충격 질량 추정에 사용되는 가속도 크기의 거리 감쇠를 적용하기 위한 기존의 근사화된 항켈 함수식을 베셀 함수를 적용한 식으로 도출하였으며, 기존 식 (6), (7)과 개선한 식 (17)을 적용하여 결과를 비교 검토하였다. 기존 식의 경우  $kr$ 의 값에 따른 조건식으로 구분되었으나, 이 논문에서 제시한 개선식을 사용할 경우  $kr$  조건과 상관없이 적용이 가능함을 알 수 있다. 또한 원전 구조물에서 금속과편의 충격에 의한 중심 주파수는 Fig. 1의 예와 같이 2kHz에서 10kHz 대역에 존재함을 알 수 있는데 이것은 금속 과편의 질량이 클수록 가속도 신호의 중심 주파수가 낮아지면서 구조물의 손상 가능성은 높일 수 있음을 의미하기 때문에 일반적으로 충격에 의한 가속도 신호의 중심 주파수가 낮은 대역에서 보다 정확한 분석이 필요하다.

또한, 구조물의 손상 측면에서 보면 보다 보수적인 진단이 필요한데 이 논문에서 개선한 식을 적용할 경우 기존 식을 적용하는 것보다 보수적인 진단 분석이 가능하기 때문에 보다 유용할 것이다. 금속과편 감시용 질량 추정 알고리즘에 식 (17)을 적용할 경우 보다 보수적이고 정확한 질량 추정이 가능할 것이며, 진단 시스템 구현에 보다 유용할 것이다.

#### 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) Olma, B. J., 1985, Source Location and Mass Estimation in Loose Parts Monitoring of LWRs, Progress in Nuclear Energy, Vol. 15, pp. 583~594.
- (4) Choi, Y.-C., Park, J.-H., Yoon, D.-B. and Park, K.-B., 2006, Loose-part Mass Estimation Using Time-frequency Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 872~878.
- (5) Mayo, C. W., 1999, Loose-part Mass and Energy Estimation, Progress in Nuclear Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 261~282.
- (6) ASME Standard OMs-S/G-1990, 1990, Loose Part Monitoring in Light Water Reactor Power Plants, Standards and Guides for Operation and Maintenance of Nuclear Power Plants, Part 12.
- (7) Mayo, C. W. et al, 1988, Loose-parts Monitoring System Improvements, EPRI Report, NP-5743.
- (8) Cremer, L. and Heckl, M., 1998, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, pp. 286~295.
- (9) Spiegel, M. R., Lipschutz, S. and Liu, J., 2009, Mathematical Handbook of Formulas and Tables, 3rd

ed., McGraw-Hill Publishing Company, pp. 153~156.

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



**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.