

군속도 변화를 이용한 배관 두께 측정

Estimation of the Pipe Thickness using the Variation of the Group Velocity

한 승 희¹, 황 종 명², 이 장 명[†]

Han Seung-Hee¹, Hwang Jong-Myung², Lee Jang-Myung[†]

Abstract This paper proposes the technique of estimating the pipe thickness using the measured group velocity. To measure the group velocity from the accelerometer data in the frequency domain, Wigner-Ville distribution is utilized, which interprets the waveform of the shock wave. Using this measured group velocity, this paper proposes the technique to estimate the thickness of pipes with the impact on the pipe. The group velocity is estimated by the modeling correlation between the group velocity and the thickness of the pipe based on the propagation velocities. The correlation model between thickness and group velocity has been proved through the real experiments. The measured group velocity in the frequency-domain is the maximum at the center frequency of the bending waves in the modeling of the group velocity. In addition to these, a smoothing technique for analyzing lamb wave Wigner-Ville distribution has been introduced to improve the reliability of the data acquisition.

Keywords : Wigner-Ville Distribution, Accelerometer, Group Velocity, Pipe Thickness

1. 서 론

급수관 파열사고는 막대한 사상자와 경제적 손실이 발생하므로 배관 관리에 대하여 전 세계적인 연구 개발되고 있다. 배관의 얇아지는 현상은 광범위한 기기에서 발생하므로 빠르고 효과적으로 배관 두께를 감시할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 이러한 배관 관리 시스템은 현재 초음파 탐상기를 사용하고 있으며 이것은 작은 산업용 로봇이라 할 수 있다. 초음파 탐상으로 두께를 확인하는 방법은 검사에 많은 시간이 소요되어 충분한 감시가 어렵다는 제약을 지니고 있다. 일반적으로 초음파를 이용하여 배관의 두께를 측정하며^[1], 이 방법은 수십 개 측정 위치에서 초음파 센서를 사용하여 일일이 두께를 검사한 후 이를 근거로 해당 배관의 손상을 진단하는 방법이다. 따라서 검사해야 할 배관의 측정 점의 증가에 따라 많은 시간과 인력

이 소요되고, 배관 외부에 단열재가 설치되어 있는 경우에는 이를 제거하고 설치하는 데에 따른 추가적인 시간 및 비용이 소요된다는 단점이 있다. 또한, 검사해야 할 배관의 수가 많은 경우 신속하게 배관의 손상을 판단할 수 없으므로 이러한 방법을 효과적으로 적용할 수 없다는 단점이 있다.

배관의 구조 건전성 및 얇아진 상태를 넓은 영역에서 진단하기 위한 비 파괴 평가기법으로 최근 유도 초음파를 이용한 방법이 널리 연구되어 왔다^[2]. 유도 초음파의 장점 뿐만 아니라 초음파의 비 접촉식 송수신이라는 큰 기술적 장점을 갖는 레이저 유도 초음파 기법은 고온 구조물 및 곡면이나 접근이 곤란한 구조물 등에도 적용할 수 있는 장점이 있지만 장치의 교정에 많은 시간이 소요되며 비교적 고가이고, 초음파 수신을 위한 광학계가 다소 복잡하다는 특성이 있기 때문에 국내에서는 실험실 환경에서의 기초 연구가 진행되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 배관에 충격파를 발생시키고 진동센서를 이용하여 배관을 따라 전파하는 충격파의 군속도를 측정함으로써 배관의 두께를 측정하는 방법을 연구하였다. 그러나 기존의 연구에서는 구조물에 잡음의 영향이 존재하는 경우 및 군속도를 정확히 알 수 없는 상황에서 충격 발

Received: Jan. 12, 2010; Reviewed: Feb. 17, 2010; Accepted: Feb. 22, 2010

※ 본 연구는(부산대학교특수환경 NAVIGATION/LOCALIZATION 로봇 기술 연구센터를 통한) 지식경제부/한국산업기술진흥원 융복합형로봇 전문인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

¹ 부산대학교 전자전기공학과 석사

² 부산대학교 전자공학과 석박사통합과정

[†] 교신저자: 부산대학교 전자공학과 교수

생 위치를 탐지하는 부분으로 그 분석에 있어서 Wigner-Ville 분포를 사용하였다^[3]. 이와 달리 본 논문에서는 배관을 따라 전파하는 굽힘 파의 균속도가 매질의 두께에 따라 달라지는 물리적 현상을 이용한 방법으로 배관 두께를 추정하는 방법을 제안하고 그 분석에 있어서 Wigner-Ville 분포를 사용하여 그 유용성을 입증하였다.

2. 균 속도와 두께

매질에서의 진동파의 전파속도인 균 속도는 매질의 성질뿐만 아니라, 두께 및 형상에 따라 달라지는 특성을 갖는다. 예를 들어 평판의 두께가 커질수록 굽힘파의 균 속도는 점점 빨라지게 된다. 따라서 배관을 따라 전파되는 굽힘파의 균 속도를 이용하여 배관의 두께를 추정할 수 있다. 이 절에서는 가장 간단한 경우인 평판 및 Shell에서의 균 속도와 두께의 상관관계를 이론적으로 살펴보기로 한다.

2.1 평판에서 굽힘파의 전파속도

그림 1은 평판 모델을 보여주며 h 는 두께, ρ 는 밀도, E 는 영계수, u 는 굽힘파의 변위 방향을 나타낸다. 판파의 전파속도는 평판의 재질, 두께 및 주파수와 관련되며 Rayleigh-Lamb 방정식^[4]에 의하여 해석적으로 구할 수 있다. 굽힘파의 위상속도, C_{ph} 는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$C_{ph} = \frac{C_t}{\xi} \quad (1)$$

여기서

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

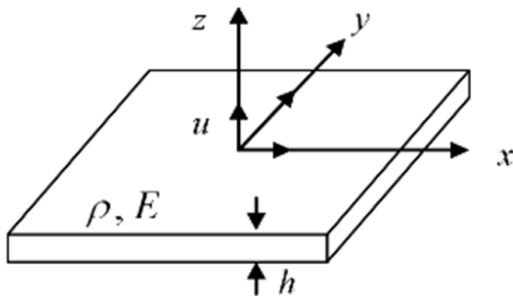


그림 1. 평판 모델

ν 는 Poisson 비, G 는 전단계수를 나타낸다. Ross[5]의 근사해를 이용한 균속도는

$$C_g = \frac{3.6 \cdot hf \cdot C_l'^2}{C_{ph} \cdot (C_l' + 9hf)} \quad (2)$$

와 같이 구할 수 있다.

굽힘파의 파장이 평판의 두께보다 매우 큰 경우(얇은 평판의 경우) 또는 저주파 영역의 경우, 위상속도, C_{ph} ,와 균속도, C_g ,는 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다^[5].

$$C_{ph} \cong \sqrt{\omega} \left(\frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

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

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

2.2 Shell에서 굽힘파의 전파속도

그림 2에서 u 방향이 굽힘파의 변위 방향이며 R_1 및 R_2 는 각각 전파방향의 곡률반경이며, 반구 Shell의 경우 $R_1 = R_2$ 이며, 실린더 형 Shell의 경우에는 $R_2 \rightarrow \infty$, 그리고 평판의 경우에는 $R_1, R_2 \rightarrow \infty$ 가 된다.

균일한 재질이면서 임의의 곡률을 갖는 Shell 구조물에서 회전 관성 및 전단 변형에 의한 영향을 모두 고려할 경우 굽힘파의 특성방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.^[6,7]

$$\ddot{u} + \frac{C_l^2 h^2}{12} \cdot \nabla^4 u + \frac{K}{\rho h} \left(\frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{2\nu}{R_1 R_2} \right) \cdot u - \frac{(\Gamma+1)h^2}{12} \cdot \nabla^2 \ddot{u} + \frac{\Gamma h^2}{12 C_l^2} \cdot \ddot{u} = 0 \quad (5)$$

여기서, u 는 굽힘파의 변위성분, $C_l = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}$, h 는 Shell의 두께, $K = \frac{Eh}{(1-\nu^2)}$, ρ 는 밀도, R_1 및 R_2 는 Shell 표 면에서 각 좌표방향의 곡률 반경, ν 는 Poisson 수, Γ 는 전단인자, ∇^2 은 Laplacian 연산자이며 $\dot{\cdot}$ 는 시간에 대한 미분을 나타낸다.

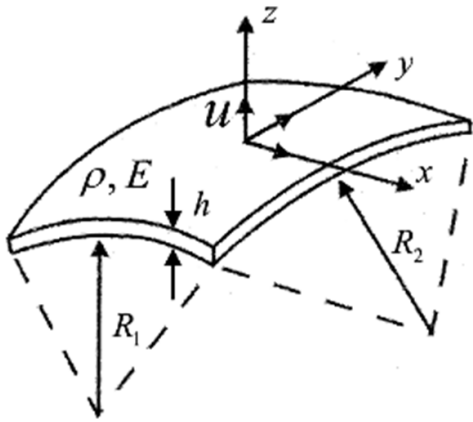


그림 2. 3차원 Shell 요소의 변위 및 곡률 성분

위상 속도는

$$C_{\rho h} = \frac{\omega}{k} = \left(\frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot C'_l \quad (6)$$

단, $f(\omega) \equiv \left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \cdot \sqrt{(\Gamma-1)^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 4 \left(1 - \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{R_c}{\rho h} \right)} - (1+\Gamma) \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2$,
 $g(\omega) \equiv 2(1-\Gamma) \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 - \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{R_c}{\rho h}$, 그리고 $\Omega^2 \equiv \frac{12C_l^2}{h^2}$ 이다.

군속도는

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = \left[\frac{1}{C'_l} \left(\frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{-\frac{1}{2}} - \frac{\omega}{C'_l} \cdot \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left(\frac{f(\omega)}{g(\omega)} \right)^{-\frac{3}{2}} \right. \\ \left. \cdot \left\{ \frac{df(\omega)}{d\omega} \cdot g(\omega) - f(\omega) \cdot \frac{dg(\omega)}{d\omega} \right\} \right] \quad (7)$$

로 표현된다.

식 (7)의 의미를 살펴보기 위해 간단한 경우인 저주파 영역에서의 박판 Shell ($kh < 1$)로 가정하면,

$$C_{ph} = \frac{\omega}{k} \\ = \left[\frac{\left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \cdot \sqrt{(\Gamma-1)^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 4 \left(1 - \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{R_c}{\rho h} \right)} - (1+\Gamma) \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2}{2(1-\Gamma) \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 - \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{R_c}{\rho h}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

식 (13)는 평판 및 Shell 모두의 경우에 적용이 가능하므로

로, 여기서 평판의 경우를 생각해 보기로 한다. 평판의 경우에는 곡률이 없으므로 ($R_c \rightarrow 0$) 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ph} = \left[\frac{\left(\frac{\omega}{\Omega} \right) \cdot \sqrt{(\Gamma-1)^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 + 4 - (1+\Gamma) \cdot \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2}}{2(1-\Gamma) \left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} C'_l \quad (9)$$

따라서, 식 (9)는 회전관성 및 전단변형을 모두 고려한 상황에서 평판 구조물에 대한 굽힘파의 위상속도를 나타낸다. 곡률이 존재하는 경우에도 주파수가 높아지면 ($\frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{R_c}{\rho h}$)항을 무시할 수 있으므로 역시 평판으로 간주할 수 있음을 알 수 있다. 또한 고주파 영역 ($\left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \gg 1$)에서는 C_{ph} 가 C'_l 에 근접함을 알 수 있으며 이는 판파에서 제 0차 굽힘파의 경향과 동일하다.^[3] 여기서, $\Omega^2 \equiv \frac{12C_l^2}{h^2}$ 이다.

다시 식 (9)에서 저주파 영역($\left(\frac{\omega}{\Omega} \right)^2 \ll 1$)의 경우를 살펴보면

$$C_{ph} \approx \sqrt{\left(\frac{\omega}{\Omega} \right)} \cdot C'_l = \sqrt{\frac{\omega h C'_l}{\sqrt{12}}} = \sqrt{\omega} \cdot \left(\frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

로 나타나며, 이는 평판에서의 위상속도 (식 (3)참조)와 잘 일치함을 볼 수 있다. 이 경우 평판의 군속도는 식 (10)로부터

$$(C_g)_{plate} \equiv \frac{d\omega}{dk} = 2 \cdot \sqrt{\omega} \cdot \left(\frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (11)$$

로 표현된다.

군속도는 저주파로 갈수록 곡률에 의한 영향을 많이 받게 됨을 알 수 있다. 따라서 Shell 형 구조물에서는 반드시 곡률에 의한 영향이 포함된 군속도를 사용해야 함을 알 수 있다.

따라서 배관의 두께는 (7) 혹은 (11)식에 의하여 측정된 군속도로부터 환산하여 추정할 수 있음을 알 수 있다.

3. 굽힘파의 도달시간

충격에 의하여 파동이 발생하여 전파할 경우 Shell 및 평판에서의 굽힘파의 신호는 주파수 별로 에너지의 전파 속도가 다르므로, 시간 및 이동 거리에 따라 전체 파형이

변화한다. 따라서 파의 전파 특성을 정확하게 관찰하기 위해서는 시간에 따른 도달 주파수 성분을 분석할 수 있는 비 정상상태 신호 분석 방법이 필요하다. 이러한 방법으로는 STFT(Short Time Fourier Transform) [8], 연속 웨이브렛 변환(Continuous Wavelet Transform)[9,10], 및 위그너빌 분포(Wigner-Ville distribution)[11 ~ 13] 등과 같은 시간-주파수 해석 기법들이 있다.

STFT는 고정된 시간 창문함수를 사용함으로써 전 주파수 영역에서 시간 및 주파수 분해능이 고정되며, 연속 웨이브렛 변환은 주파수 변화에 따라서 창문함수의 크기를 조정함으로써 시간 및 주파수 분해능의 변화가 가능하지만, 전체 주파수 대역에 대하여 시간 및 주파수 분해능이 일정하지 않으므로 분산 특성을 갖는 굽힘파의 도달시간을 구하고자 할 경우, 고주파 및 저주파 영역에서 오차의 변화가 크다. 즉, 위의 두 방법들은 전체 시간-주파수 영역에서 시간 및 주파수 분해능을 동시에 향상시킬 수가 없다.

이러한 문제점들을 극복하고 시간 및 주파수 분해능을 독립적으로 향상시킬 수 있는 방법으로서 위그너빌 분포가 있다.

3.1 위그너 빌 분포

위그너빌 분포는 bi-linear TFR(Time Frequency Representation)의 한 종류로서 그 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 W(t, f) &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} z(t - \frac{\tau}{2}) z^*(t + \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} Z^*(\omega + \frac{\phi}{2}) Z(\omega - \frac{\phi}{2}) e^{-j\phi \omega} d\phi \quad (12)
 \end{aligned}$$

여기서 $R(t, \tau) = z(t - \frac{\tau}{2}) z^*(t + \frac{\tau}{2})$ 는 시간 종속 자기상관함수(time dependent autocorrelation function), $z(t)$ 는 신호의 해석함수, $z(\omega)$ 는 $z(t)$ 의 푸리에 변환이다. 즉, 위그너빌 분포는 시간종속 자기상관함수의 시간 지연에 대한 푸리에 변환으로 정의되며, 물리적으로는 각 시간 별 신호의 에너지에 대한 주파수 분포를 나타낸다.

위그너빌 분포의 정의에서 이용되는 신호의 시간 구간은 무한대 시간이다. 그러나 실제로는 무한대 크기의 창문함수를 사용할 수 없으며, 관심있는 시간영역의 크기에 해당하는 창문함수를 적용한다. 이때 신호에 창문함수를 적용한 위그너빌 분포를 유사(Pseudo) 위그너빌 분포라 부른다. 즉 유사 위그너빌 분포는 다음과 같이 표현된다.

$$W_{pw}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t + \frac{\tau}{2}) z^*(t - \frac{\tau}{2}) h(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (13)$$

여기서 $h(\tau)$ 는 유한길이의 창문함수이다. 이 경우 창문의 이동을 매 순간마다 적용할 수 있으므로 시간 분해능을 샘플구간과 동일하게 할 수 있다. 그러나 주파수 분해능은 STFT와 마찬가지로 창문이 크기에 따라서 영향을 받게 된다. 이 방법의 경우 창문의 크기만 증가하면 시간-주파수 분해능이 동시에 증가함으로 비정상 상태의 신호를 보다 정확히 표현할 수 있다. 그러나 이 방법은 신호에 대한 직접적인 변환이 아니고 신호 자체의 곱의 형태로 나타나는 자기상관 함수의 변환을 이용함으로써 만약 신호가 2개 이상의 서로 다른 신호항으로 이루어져 있을 경우 필연적으로 혼신 성분이 나타나게 된다. 혼신 성분은 원래 신호에 의한 성분을 구별 짓는데 있어 혼선을 가져온다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 혼신 성분이 영향을 감소시키기 위한 많은 방법들이 개발되었다. 이 중에서 Cohen에 의하여 제안된 Kernel을 이용한 Smoothing 방법이 가장 많이 사용되고 있다.^[13]

위그너빌 분포는 시간종속 자기상관함수 $R(t, \tau)$ 를 시간지연(τ)에 대하여 푸리에 변환한 것이다. 여기서 $R(t, \tau)$ 를 절대시간(t)에 대한 푸리에 변환을 생각해 볼 수가 있는데 이를 Ambiguity 함수라 부르며 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 A(\xi, \tau) &\equiv \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j2\pi \xi t} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} s(t - \frac{\tau}{2}) s^*(t + \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi \xi t} dt \quad (14)
 \end{aligned}$$

이 Ambiguity 함수를 사용하여 위그너빌 분포함수를 정의하면 스무딩 위그너빌 분포라고 부를 수 있으며 식 13과 식 14에 의해서 다음과 같이 표시된다.

$$W_{SM}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(\xi, \tau) \cdot A(\xi, \tau) e^{j(2\pi \xi t - 2\pi f \tau)} d\xi d\tau \quad (15)$$

여기서 $\phi(\xi, \tau)$ 를 창문함수 또는 Kernel이라고 부르며, 지수형 Kernel은 다음과 같이 표현된다.^[13]

$$\phi(\xi, \tau) = e^{-\xi^2 \tau^2 / \sigma} \quad (16)$$

여기서 σ 는 척도 계수(scale factor)로서 1보다 작을수록 Smoothing 효과가 증가하며, 1보다 큰 값을 가질수록 Smoothing 효과는 감소한다. 따라서, 위그너빌 분포를 사용하면 비 정상상태 신호 성분들을 시간 및 주파수 영역에

서 모두 우수한 분해능으로 분석할 수가 있으며, 혼신 성분이 존재하는 경우에는 Smoothing을 통하여 이를 억제할 수 있다는 점을 파악할 수가 있다. 따라서 위그나빌 분포 기법을 적용하여 Shell 및 평판 구조물에서 충격에 의해 발생한 굽힘과의 도달시간을 측정한다.

4. 측정 시뮬레이션

4.1 FEM(Finite Element Method)을 이용한 충격 전파 시뮬레이션 해석

앞에서 배관의 균속도를 측정함으로써 배관의 두께를 측정하는 방법에 대한 이론적인 배경에 대해 살펴보았으며, 여기서는 배관에 충격이 발생하였을 경우 굽힘파가 배관에서 어떻게 전파되고, 어떤 동특성을 갖는지를 알아보기 위하여 유한요소 모델링 및 전산해석을 수행하였다.

4.1.1 3차원 모델링

유한요소 모델링 및 전산해석에는 원자력발전소 이차계통에 많이 사용되는 L형 배관을 모델링 하였으며, 배관 두께 추정을 위해 외경은 같으며, 단지 내경만 다른 4종류의 배관에 대해 해석을 수행하였다. 압력배관용 탄소강관으로 KS규격상의 STPG 370 배관에 대하여, 두께가 각각 3.6 mm, 5.2 mm, 7.0 mm, 9.5 mm인 경우에 대한 유한요소모델을 작성하였다. 이 때 배관의 외경은 모두 76.3 mm이며 유한요소모델의 크기는 충격신호의 샘플링 주파수인 200 kHz를 고려하여 2 mm로 정도로 작성하였다. 또한, 곡관의 중심 반경, Rc, 는 250 mm이며 배관의 총 길이는 수평 방향으로 1000 mm이고 수직방향으로, 500 mm이다.

전산해석을 이용하여 충격파가 전파하는 0.0005초 동안 모든 절점에 대하여 방향 별 가속도 값을 그림 3의 2개의 센서 위치에서 계산하였다. 배관의 센서 1의 위치는 배관 곡관의 가운데 지점으로부터 직선거리로 25 mm 오른쪽

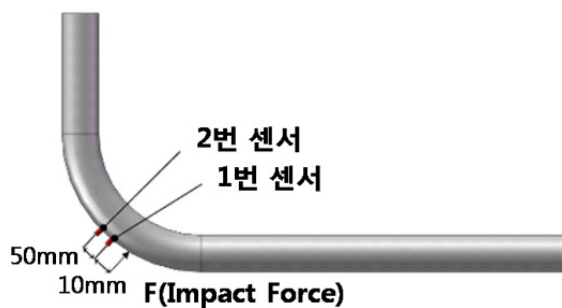


그림 3. 3차원 유한요소모델링에 사용된 배관 및 가속도 센서 설치 위치

지점에 있으며, 센서 2의 위치는 센서 1로부터 직선거리로 50 mm인 왼쪽 지점에 있는 것으로 모델링 하였으며, 충격 위치는 센서 1로부터 오른쪽 방향으로 10 mm 위치에 있는 것으로 모델링 하였다.

4.1.2 유한요소모델

배관의 유한요소모델은 Shell 요소를 사용하여 모델링하였다. 즉, 배관은 ANSYS LS-DYNA에서 사용되는 Explicit code의 요소인 Element type shell 163을 사용했다. 본 유한요소모델에 사용된 모든 요소는 brick형 요소를 사용했다.

이 두 요소의 접촉관계는 ANSYS LS-DYNA 접촉기법인 ASTS (Automatic Surface To Surface contact)을 사용하였다.

(1) 물성치

유한요소모델링에 사용된 압력배관용 탄소강관의 구조적 물성은 표 1과 같이 상온상태의 물성값을 적용하였다.

표 1. 배관 유한 요소 모델링에 적용된 물성치

명 칭	Young's Modulus(Pa)	Poisson's Ratio(No Units)	Density (Kg/m ³)	비고
배 관 (65A)	210E+9	0.30	7800	탄소강

(2) 경계조건

매우 짧은 시간 동안에 진행되는 충격전파 거동을 해석하기 위해서 배관의 양 끝 단은 연속체로 가정하였으며, 각 방향의 모든 자유도를 구속하였다.

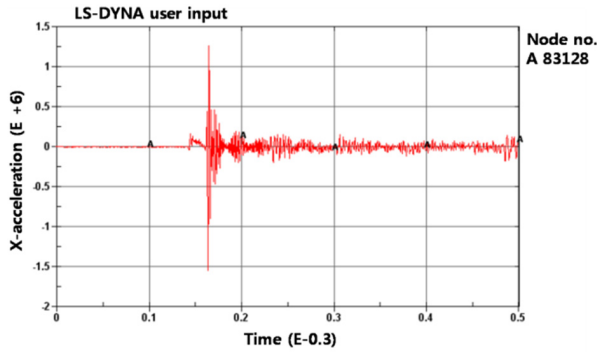
(3)해석 방법

전산해석 시 배관에 충격을 발생시키기 위하여 강구를 모델링하고, 이러한 강구가 배관에 충돌하는 것으로 전산해석을 수행하였다. 이 경우 강구의 질량은 50g으로 하였으며, 강구의 충돌속도는 12m/s로 모델링 하였다.

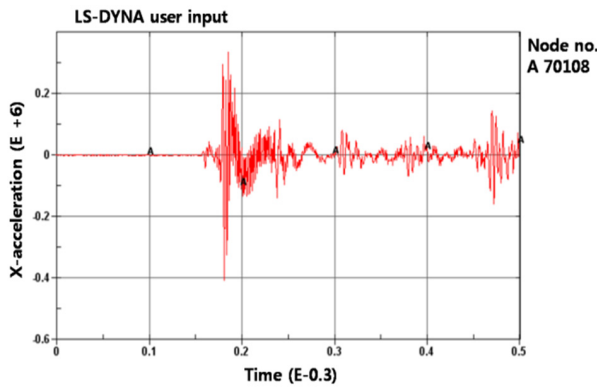
전산해석 시 배관 충격의 전파 거동을 해석하기 위하여 배관의 원주방향의 요소 수를 120개로 모델링 하였으며, 유한요소모델의 요소 크기는 약 2 mm로 모델링을 하였다. 따라서 전산 수치해석을 위한 유한요소모델의 전체 요소 수가 89,100개이고 절점 수는 90,184개이다.

4.1.3 해석 결과

충격이 발생하면 굽힘파가 구면형태로 전파되고 또한 시간이 지난 후 원주방향으로 되돌아와 매우 복잡한 형상이 됨을 관찰할 수 있었다. 그림 4은 전산해석을 통해 구한 센서 1과 2 지점에서의 가속도 신호를 보여주고 있다.



(a) 센서 1에서의 축 방향 가속도



(b) 센서 2에서의 축 방향 가속도

그림 4. 강구 충돌 시 배관의 진동 신호

전산해석을 수행하여 2개 센서 위치에서의 가속도 신호를 계산하고, 이를 이용하여 두께에 따른 균속도를 추정한다. 결과 그림 5의 결과에서 볼 수 있는 것처럼 두께가 9.5mm와 3.6mm 일 때 각각 균속도는 2,000m/s, 1,200m/s 값을 얻었으며, 두께가 얇아질수록 균속도가 작아짐을 전산해석

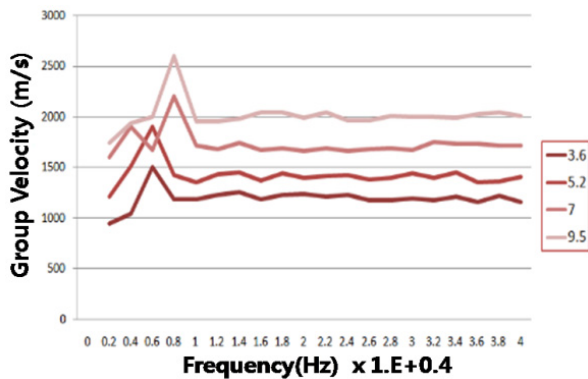


그림 5. 균속도 시뮬레이션 결과

을 통해 확인할 수 있었다.

5. 실험 장치 및 결과

본 연구에서 시험하고자 하는 것은 배관에 가진 장치를 이용하여 충격파를 발생시키고 이 충격파 신호를 가속도 센서로 취득한 후 배관두께에 따라 충격파의 균속도가 다른 속도로 전파하는 특성을 이용하여 배관 두께를 측정하는 방법이다. 이를 위해 외경은 같고, 두께만 다른 4개의 배관에 대해 연구된 방법을 사용하여 배관두께 측정실험을 수행하였다.

5.1 실험장치 구성

그림 6은 배관 두께 실험 장치 구성을 보여주고 있다. 가속도 센서는 ICP형 센서로서 배관에 설치가 용이하며, 높은 주파수 대역을 가진 PCB Shear 형 (353B16)을 사용하였다.

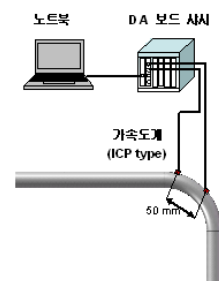
배관 외경(75mm)은 같고 단지 두께만 다른 4개의 L자형 배관을 사용하였다. 배관의 두께는 각각 3.5 mm, 5.2 mm, 7.0 mm, 그리고 9.5 mm이다.

가속도 센서는 50mm 간격을 두고 두 개를 곡관부에 부착하였으며, 배관에 충격파를 발생시키기 위하여 각 센서에서 10mm 떨어진 위치를 임팩트 해머로 충격파를 발생하였다.

두께 상태를 실시간 온라인으로 모니터링 가능하도록 구성하기 위해 NI사의 PXI 1042 슬롯에 장착된 데이터취득 보드를 이용하여 진동신호 데이터를 취득한다. 1보드 4채널로 최대 204.8kS/s 샘플링이 가능한 구조로 구성하였으며, 데이터 취득보드, 데이터 취득보드용 외장 케이스, 분석용 Laptop 컴퓨터, PXI 방식의 데이터 취득보드를 분석용 Laptop 컴퓨터와 연결하는 통신용 카드버스 등으로 간편하게 구성했다.



(a) 실험장치 사진
(a) Experimental picture



(a) 실험장치 구성도
(b) Experimental block diagram

그림 6. 배관 두께 측정 실험장치 구성

5.2 두께 추정기법

앞서 설명하였듯이 시간-주파수 기법으로 시간 및 주파수 영역에서의 분해능이 우수한 위그너-빌 분포를 사용하였다.

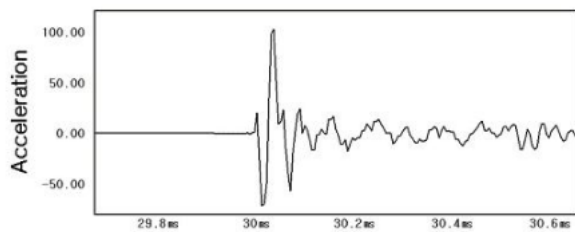
배판과 같은 고체매질에서 발생하는 충격파(굽힘파) 신호는 주파수성분에 따라 전파속도가 달라지는 분산특성을 갖는다. 즉 주파수가 높은 성분이 상대적으로 빠른 속도로 전파되고 주파수가 낮은 성분은 상대적으로 느린 속도로 전파하게 된다. 위그너-빌 분포를 이용한 분석결과에서 주파수 축을 기준으로 최대선도를 구하면 두 채널간 최대선도 차이는 해당 주파수에서의 두 센서간의 굽힘파 도달 시간차가 된다. 주파수별 군속도는 두 센서간 거리에 주파수별 도달 시간차를 나누어주면 구할 수 있으며, 다음 식과 같이 표현된다.

$$C_g(f) = \frac{\Delta r}{\Delta t(f)} \quad (17)$$

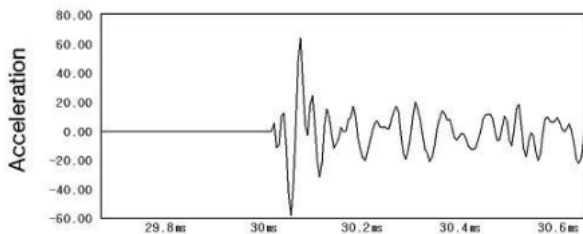
이 때 $C_g(f)$ 는 군 속도를, $\Delta t(f)$ 는 주파수별 센서 간 도달 시간차, Δr 은 센서간 거리를 나타낸다.

5.3 실험 결과

그림 8에서 두 센서로부터 계측된 진동신호를 시간-주파수 영역에서 살펴보면 시간지연을 가지는 두 개의 분산곡선을 관찰할 수 있다. 이 두 개의 분산곡선을 이용하여 주파수별 시간 지연 차이를 계산하면 주파수별 군 속도를

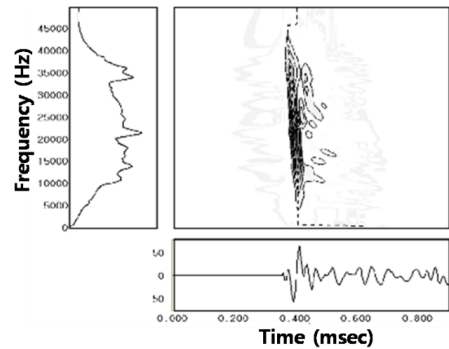


센서 1의 신호

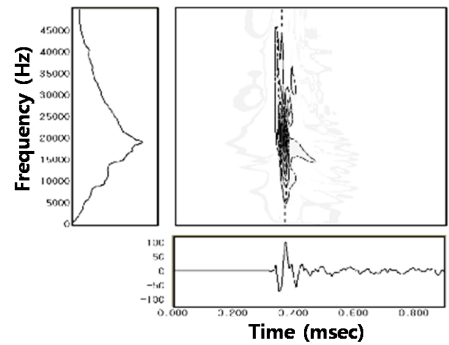


센서 2의 신호

그림 7. 각 센서에서의 계측된 가속도 신호



(a) 센서 1 신호



(b) 센서 2 신호

그림 8. 위그너-빌(Wigner-Ville) 분석 결과

계산할 수 있다.

그림 7은 두께 3.6mm 인 배판의 군 속도를 측정하기 위해 배판을 임팩트 헤머로 가진했을 경우, 두개의 센서에서 계측된 가속도 신호를 보여주고 있다. 이 신호를 그림 8과 같이 시간-주파수 분석을 한 후 주파수별 군 속도를 구해보면 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 몇 개의 평면파가 합성파를 이루어 이동할 때 합성파 전체가 이동하는 속도인 군속도가 매질의 물성치 뿐만 아니라, 두께 및 형상에 따라 달라지는 특성을 이용하여 배판의 두께를 추정하는 방법을 제안하였다.

군속도의 평판의 두께가 커질수록 점점 빨라지는 특성

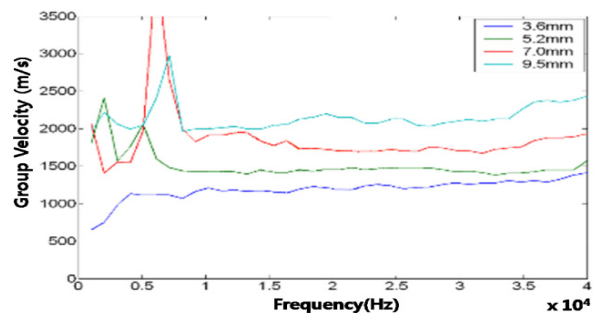


그림 9. 군속도 실험결과

을 역으로 균 속도를 알고 있다면 배관의 두께를 추정할 수 있다. 따라서 배관에 충격파를 발생시킨 다음 가속도 진동센서를 이용하여 배관을 따라 전파하는 충격파의 균 속도를 측정함으로써 배관의 두께를 추정하는 방법을 연구하였다. 그림 5 와 그림 9에서 가속도 진동 센서에서 얻은 신호를 시간 주파수 분석 방법 중 평활 위그너-빌 분포 기법을 사용하여 배관을 전파하는 균속도 결과를 얻었다. 그 결과 두께가 작아짐에 따라 균속도가 작아지고 배관의 두께가 커짐에 따라 커짐을 확인 할 수 있으며, 표 2를 보면 컴퓨터 시뮬레이션과 실험의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

본 실험을 통해 가진 진동의 균속도 변화에 따른 배관 두께 추정방법의 유용성을 입증하였으며, 이 시험 결과 데이터를 바탕으로 균속도에 따른 배관 두께 감육 정도를 추정하여 배관 감육 사고를 미연에 방지할 수 있는 방법을 제안하였다.

6. 검토 및 분석

본 논문에서는 배관에 두 개의 가속도 센서를 일정거리를 띄우고 부착시킨 후, 임팩트 해머(impact hammer)를 사용하여 충격파를 발생시키는 방법을 사용한다. 따라서 진동 측정결과에 영향을 미치는 여러 인자들이 있으며, 가장 대표적인 것으로 충격파를 주는 임팩트 해머의 종류, 접촉 시간, 충격지점과의 거리, 그리고 센서간의 거리 등이 있다. 본 연구에서는 다음과 같이 각각의 인자들이 측정결과에 어떤 영향을 미치는지에 대해 알아보았다.

6.1 해머 무게 영향

임팩트 해머의 종류에 가장 많은 영향을 미치는 것이 해머의 무게이다. 충격이 발생할 경우 물체의 질량에 대한 영향을 잘 설명하는 것이 Hertz의 충격이론^[14]이다.

충격 시 접촉 지속 시간은 $T_d = 2.94 \cdot D_{max} / V_0$ 이고, 이때 강관의 최대변형 변위가 $D_{max} = k_h \cdot (m V_0^2)^{0.4} \cdot R^{-0.2}$ 이기 때문에 질량이 커질수록 접촉시간이 길어짐을 알 수 있다. 따라서 접촉시간이 길기 때문에 주파수 영역에서 살펴본다면, 중심주파수가 작아짐을 쉽게 알 수 있다.

이러한 임팩트 해머의 질량에 대한 영향을 관찰하기 위해 3개의 임팩트 해머를 사용하여 실험을 수행하였다. 무게가 2.5g, 4.6g, 그리고 8.1g 인 임팩트 해머를 사용하여 실험한 결과, Hertz의 충격이론에서 설명한 것과 같이 임팩트 해머의 무게가 커질수록 접촉시간이 길어지고, 중심주파수가 낮아짐을 관찰할 수 있었다. 또한 이 실험을 통하여 임팩트 해머의 무게는 충격파의 중심주파수만 변화시키고 균속도 계산에 필요한 분산커브에는 영향을 미치지

않는다는 것을 확인할 수 있었다.

6.2 거리에 따른 영향

배관은 평판이 아닌 실린더 형상을 하고 있기 때문에 충격지점에서 멀어질수록 충격파의 전파가 복잡하게 일어난다. 따라서 충격지점으로부터 측정점의 위치가 중요한 인자로 작용한다. 측정 점의 거리에 따른 영향을 알아보기 위해 4개의 가속도 센서를 50mm 간격으로 부착하고 1번 센서로부터 10mm 떨어진 곳을 임팩트 해머로 충격을 가하였다.

거리에 따른 충격 신호의 시간주파수 분석한 결과, 거리에 따라 시간지연을 가지고 있지만, 중심주파수는 변하지 않는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만, 거리가 멀어질수록 분산 커브가 복잡해지는 것을 볼 수 있었으며, 이는 배관이 실린더 형상이기 때문에 센서 거리가 멀어질수록 원주방향으로 진행되는 파의 영향을 받아 계속된 신호가 복잡해지기 때문이다. 따라서 충격파가 원주방향으로 되돌아 와 겹치는 지역 이내에 센서를 부착해야 된다. 충격파가 겹치는 곳이 충격지점에서 $\pi \cdot D$ 이므로 가속도 센서는 최소 $\pi \cdot D$ 이내에 설치되어야 한다. 따라서 이 두께 추정은 근거리에서 적용하는 데 유용하다.

7. 결론

본 논문에서는 배관에 충격파를 발생시킨 다음 가속도 센서를 이용하여 배관을 따라 전파하는 충격파의 균속도를 측정함으로써 배관의 두께를 측정하는 방법을 연구하였다. 그 결과 배관을 전파하는 굽힘파의 균속도가 매질의 두께와 함수 관계로 주어짐을 이론적으로 표현하였으며, 이를 근사화하여 두께가 작아짐에 따라 균속도가 작아지고 배관의 두께가 커짐에 따라 균속도가 커짐을 실험을 통해 확인하였고 이를 통해 배관의 두께를 감지, 이후 일어날 수 있는 파열 사고에 대한 검사 장치를 구현할 수 있었다. 본 실험을 통해서 충격파를 일정 거리 떨어진 두 개의 가속도 센서로 측정하여 균 속도를 측정할 수 있음을 보여주었으며 이를 이용하여 배관의 두께를 신뢰성 있고 안전하게 측정할 수 있음을 보였다.

후후 연구 분야로 배관에 깨짐이 발생했을 시 두께 측정에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 연구 중입니다.

참고 문헌

[1] Sun Li-ying, Yang Xiao-dong and Li Yi-bo "Research

on Transducer and Frequency of Ultrasonic Guided Waves in Urban Pipe Inspection,” ICIEA 2009, pp.2708-2711

- [2] 안연식, 김두송 “유도초음파를 이용한 장거리 배관 진단기술 개발에 관한 연구,” 전력기술개발 종합발표회, pp.62-66, Aug 2007.
- [3] 박진호 “원전의 압력경계 구조물에서 위그너-빌 분포를 이용한 충격 발생위치 추정,” 한국과학기술원 박사학위논문, 2006
- [4] I. A. Viktorov, Rayleigh and Lamb Waves, Plenum press, pp.67-102, 1967.
- [5] L. Cremer and M. Heckl, Structure-Borne Sound, Springer-Verlag, pp.101, 1998.
- [6] W. Soedel, Vibrations of shells and plates, 2nd ed., pp.67-102, 1967.
- [7] D. Gabor, “Theory of communication,” Journal of the Institute of Electrical Engineers, Vol.93, No.3, pp.429-457, 1946.
- [8] Yekutieli Avargel and Israel Cohen, “System Identification in the Short-Time Fourier Transform Domain With Crossband Filtering,” IEEE transactions on Audio, Speech, and Language processing, Vol.15, No.4, pp.1305-1319, May 2007.
- [9] O. Rioul and M. Vetterli, “Wavelet transforms in signal processing,” IEEE Signal Processing Mag., 1991.
- [10] Shie Qian, Introduction to time-frequency and wavelet transforms, Prentice Hall PTR, 2002.
- [11] E. Wigner, “On the quantum correction for thermodynamic equilibrium,” Physical Review, Vol.40, pp. 749-759, 1982.
- [12] F. Hlawatsch and G. F. Boudreaux-bartels, “Linear and quadratic time frequency signal representations,” IEEE magazine, pp.21-67, April 1992.
- [13] Edmundo Pereira de Souza Neto, Marc-Antoine Custaud, Jean Frutoso, Laurence Somody, PhD, Claude Gharib, Jacques-Olivier Fortrat, “Smoothed pseudo Wigner-Ville distribution as an alternative to Fourier transform in rats,” Autonomic Neuroscience, Vol.87, Issue 2, pp. 258-267, March 2001.
- [14] C.M. Harris, Shock and Vibration Handbook, 3rd edition, 1988.



한 승 희

2003 부경대학교 전자공학과 (공학사)
 2009 부산대학교 전자전기공학과(공학석사)
 현재 삼창기업(주) 제어기술연구소 재직 중

관심분야: 지능로봇제어, 마이크로프로세서 응용제어



황 종 명

2006 동아대학교 전자공학과 (공학사)
 2008~현재 부산대학교 전자공학과 석박사통합과정
 관심분야: 지능로봇제어, 로봇틱스, 비선형제어



이 장 명

1980 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1982 동 대학원(공학석사)
 1990 USC (공학박사)
 1992~현재 부산대학교 전자공학과 교수

관심분야: 지능로봇제어, 마이크로 프로세서 응용 시스템 설계