

시간-주파수 기법을 이용한 배관 감육 감시 방법

Monitoring Pipe Thinning Using Time-frequency Analysis

손창호* · 최영철† · 박진호** · 윤두병** · 정의필***

Chang-Ho Sohn, Young-Chul Choi, Jin-Ho Park, Doo-Byung Yoon
and Ui-Pil Chong

(2006년 8월 16일 접수 ; 2006년 11월 20일 심사완료)

Key Words : Pipe Thinning(배관감육), Time-frequency Analysis(시간-주파수 분석), Group Velocity(군속도)

ABSTRACT

Pipe thinning is one of the major issues for the structural fracture of pipes of nuclear power plants. Therefore a method to inspect a large area of piping systems quickly and accurately is needed. In this paper, we proposed the method for monitoring pipe thinning. Our basic idea come from that a group velocity of impact wave is different as wall thickness. If the group velocity is measured, wall thickness can be estimated. To obtain the group velocity, time-frequency analysis is used. This is because an arrival time difference can be measured easily in time-frequency domain rather than time domain. To test the performance of this technique, experiments have been performed for a plate and U type pipe. Results show that the proposed technique is quite powerful in the monitoring pipe thinning.

기 호 설 명

- C_g : 군속도
- C_l : 종파속도
- C_{ph} : 위상속도
- E : 영 계수(Young's modulus)
- f : 주파수
- G : 횡탄성 계수
- h : 두께
- k : 파수
- ρ : 밀도
- $R(t, \tau)$: 시간 종속 자기 함수

- ν : 푸아송 비(Poisson's ratio)
- ω : 각주파수(= $2\pi f$)
- Δt : 두 센서 사이의 시간도달 차이
- $z(t)$: 해석신호

1. 서 론

원자력 발전소 및 화력발전소 등 이차냉각계통에는 수 많은 배관들로 이루어져 있다. 이러한 배관들 속으로 고온 고압의 유체들이 매우 빠른 속도로 유동하기 때문에 유체 가속 부식(FAG) 등에 의해 감육이 발생한다.

2004년 일본 미하마 원자력발전소에서는 발전소 배관의 감육에 의해 누수가 발생하여 여러 명의 목숨을 앗아간 사례가 보고된 바 있다. 이렇듯 배관의 감육에 의한 피해는 금전 및 시간뿐만 아니라, 인명 피해까지 일으킬 가능성이 있으므로 배관 감육을 감시, 진단하는 것은 매우 중요한 일이다.

† 책임저자; 정회원, 한국원자력연구소 기계공학연구부
E-mail : cyc@kaeri.re.kr
Tel : (042)868-4870, Fax : (042)868-8313

* 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부

** 정회원, 한국원자력연구소 기계공학연구부

*** 정회원, 울산대학교 컴퓨터정보통신공학부

배관의 건전성을 진단하기 위한 비파괴 평가방법이 활발하게 연구되어 왔으며, 특히 유도 초음파(guided wave)의 적용이 배관의 결함 검출에 널리 사용되어 왔다⁽¹⁾.

Fig. 1은 초음파를 이용하여 두께를 예측하는 방법이 많이 사용되고 있다. 이 방법은 감육 감시 대상인 배관에 수십개 측정점의 두께를 초음파 방식의 센서를 이용하여 일일이 검사한 후 이를 근거로 해당 배관의 감육을 진단하는 방법이다. 따라서 검사해야 할 배관의 측정점의 증가에 따라 많은 시간과 인력이 소요되고, 배관 외부에 단열재가 설치되어 있는 경우에는 이를 제거하고 설치하는 데에 따른 추가적인 비용이 필요하다는 단점이 있다. 또한, 검사해야 할 감육 감시 대상 배관의 수가 많은 경우 신속하게 배관의 감육을 판단할 수 없으며, 이러한 방법을 효과적으로 적용할 수 없다는 단점이 있다.

최근에는 레이저를 이용하여 피검사체에 유도 초음파를 원격으로 발생시켜 유도 초음파의 장점뿐만 아니라 초음파의 비접촉식 송수신이라는 큰 기술적 장점을 갖추고 있기 때문에 많은 관심이 집중되고 있다. 레이저 유도 초음파 기법은 고온 구조물 및 곡면이나 접근이 곤란한 구조물 등에도 적용할 수 있는 장점이 있지만 장치가 비교적 고가이고, 초음파 수신을 위한 광학계가 다소 복잡하다는 특성이

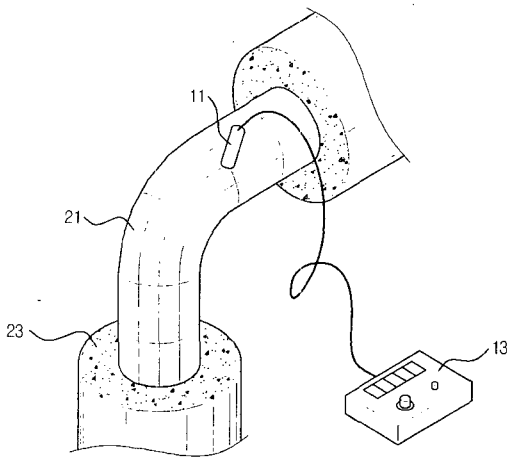


Fig. 1 Conventional method for monitoring pipe thinning using ultra sonic wave. Where 11 is ultra sonic sensor, 21 is a pipe, 13 is data acquisition system, and 23 is a material of heat insulation

있기 때문에 국내에서는 실험실 환경에서의 기초연구가 진행되고 있는 실정이다⁽²⁾.

이 논문에서는 이러한 기존의 방법 문제점을 보완할 수 있는 배관 감육 감시 방법에 대해 제안한다. 배관 외부에 간단하게 설치된 2개의 진동센서를 이용하여 충격파의 에너지 전파 속도를 계산함으로써 보다 빨리 정확하게 배관의 두께를 예측할 수 있는 방법에 대해 살펴 보기로 한다.

2. 기본이론

배관을 전파하는 굽힘파는 두께에 따라서 다른 군속도를 가지고 전파하게 된다. 따라서 군속도를 알고 있다면 역으로 두께를 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 이와 같이 군속도와 두께가 어떠한 상관관계를 가지고 있는지를 살펴보기 위해 평판인 경우에 대해 이론적으로 살펴본다. 그리고 군속도를 측정하는 방법에 대해 제안하고, 이를 이용하여 두께를 예측하는 방법에 대해 알아본다.

2.1 평판에서의 군속도

Fig. 2에서 보는 바와 같이 탄성영역에서 균일 재료의 균일 두께를 갖는 평판에서 전파하는 표면파를 판파(lamb wave)라고 하며, 판파는 서로 다른 특성을 갖는 2개의 파 그룹(wave group)으로 나눌 수 있다⁽²⁾. 즉, 하나는 대칭모드인 S파 이며, 다른 하나는 비대칭 모드인 A파 이다. 여기서 제 0차 S파 모드를 S0파라고 하며 이는 의사 종파(quasi-longitudinal wave)라 부르기도 한다. 또한 제 0차 A파 모드를 A0파 라고 하며 이는 일반적으로 굽힘파(flexural wave)로 알려져 있다. 이러한 의사종파 및 굽힘파의 경우에는 S파 및 A파 중에서도 가장 저주파 영역에 속하므로 일반적인 진동 가속도계를

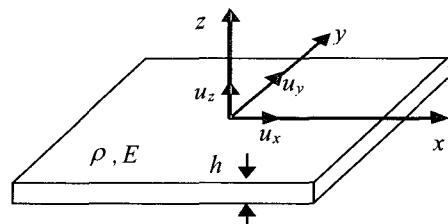


Fig. 2 Plate model. Where h is a thickness, ρ is a density, and E is Young's modulus

사용하여 대부분 측정이 가능하다.

판파의 전파속도는 강체의 재질, 두께 및 주파수와 관련되며 Rayleigh-Lamb방정식⁽²⁾에 의하여 해석적으로 구할 수 있다. 이때 굽힘파(A0파)의 전파속도는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

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

여기서,

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

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

이다. 식 (1)은 완전해로서 직접적으로 풀기는 어려우나 수치해석을 통하여 주파수별 파동전파 속도를 구할 수 있다. Ross(1987)는 위의 해석적 결과와 근사하면서도 매우 간편한 수식을 소개하였다⁽⁵⁾. 즉,

$$C_{ph} = C'_L \cdot \sqrt{\frac{1.8 \cdot h \cdot f}{C'_L + 4.5 \cdot h \cdot f}} \quad (2)$$

여기서

$$C'_L = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (3)$$

이다.

충격으로 인하여 두 개 이상의 굽힘파 성분이 동시에 전파하는 경우에는 굽힘파들의 조합으로 인하여 포락선(envelope) 분포가 나타나며 이러한 포락선이 이동하는 속도를 군속도(group velocity), 즉 파동 에너지의 전파속도를 나타낸다⁽³⁾. 이때 군속도의 정의는 다음과 같다.

$$C_g \equiv \frac{d\omega}{dk} = d\omega \left[d \left(\frac{\omega}{C_{ph}} \right) \right]^{-1} = C_{ph}^2 \cdot \left[C_{ph} - \omega \cdot \frac{dC_{ph}}{d(\omega)} \right]^{-1} \quad (4)$$

군속도에 대한 완전해는 식 (1)로부터 위상속도(C_{ph})를 수치적으로 구하여 식 (4)를 적용하여 구할 수 있다. 그리고 Ross(1987)의 근사해를 이용한

군속도는 식 (2) 및 식 (4)로부터

$$C_g = \frac{3.6 \cdot hf \cdot C'_L{}^2}{C_{ph} \cdot (C'_L + 9hf)} \quad (5)$$

로 얻어진다.

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⁽³⁾.

$$C_{ph} \approx \sqrt{\omega} \left(\frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

$$C_g \approx 2 \cdot \sqrt{\omega} \left(\frac{D}{\rho h} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

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

식 (6)과 식 (7)에서 볼 수 있듯이 평판에서의 군속도는 위상속도보다 2배 크며, 주파수의 제곱근에 비례함을 의미한다. 주파수가 높을수록 군속도가 크기 때문에 고주파 성분의 파동이 먼저 도달하고 나중에 저주파 성분이 도달하는 분산 특성을 볼 수 있다. 이러한 특성 때문에 시간영역에서 가속도 신호를 관찰할 때, 거리에 따라 파의 응답 형태가 서로 다르게 나타난다.

Fig. 3은 식 (7)을 이용하여 SUS304 평판의 두께에 따른 이론적인 군속도를 보여주고 있다. 결과

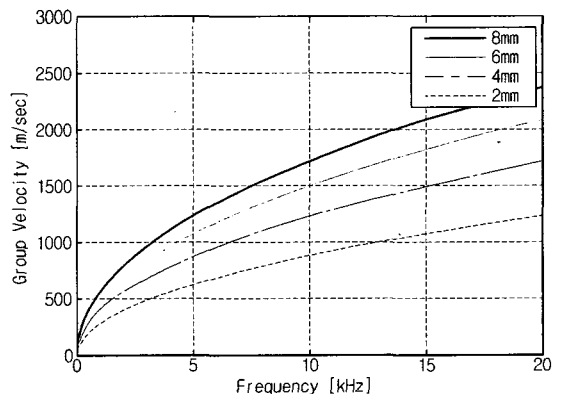


Fig. 3 Group velocities as plate thickness. Material is SUS 304

그래프에서 볼 수 있듯이 약 10 kHz에서 두께 8 mm일 경우 군속도는 약 1750 m/sec이고, 두께가 절반인 4 mm일 경우는 약 1250 m/sec이므로 약 40% 차이가 발생한다. 따라서 군속도를 이용한다면 배관의 두께를 잘 예측할 수 있음을 쉽게 짐작할 수 있다.

식 (5) 및 (7)에서 군속도는 두께의 함수로 표현된다. 따라서 식 (7)을 두께에 대해 정리하면,

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{C_g^2}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad (8)$$

와 같이 된다.

식 (8)에서 볼 수 있듯이 재질을 알고 있다면, 군속도를 측정하여 식 (8)을 이용하면 두께 h 를 구할 수 있음을 의미한다.

2.2 군속도 측정 방법

2.1 절에서 살펴 보았듯이 두께를 예측하기 위해서는 군속도를 정확하게 찾는 것이 필수적이다. 이러한 군속도를 측정하는 방법에 대해 Fig. 4에서 설명하고 있다. 임의의 지점에서 충격을 가하면 두 센서 사이에 시간지연을 가지고 충격파가 도달하게 된다. 이때 충격은 관심 주파수 영역 및 신호대 잡음비를 고려하여 결정해야 된다. 도달하는 시간지연 차이를 Δt 라 하고 센서간의 거리를 Δx 라고 한다면 군속도는

$$C_g = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (9)$$

와 같은 관계식에 의해 구할 수 있다.

식(9)에서 볼 수 있듯이 센서간 도달시간 지연차이 Δt 를 정확히 측정해야만 오차 없이 군속도를 예측함을

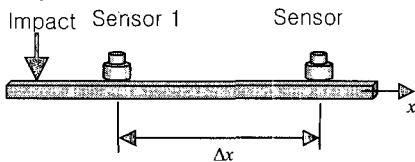


Fig. 4 The method for estimating group velocity which can be obtained by $C_g = \frac{\Delta t}{\Delta x}$, where Δt is arrival time difference between two sensors

알 수 있다. 하지만 평판 및 파이프는 식 (5)와 (7)에서 볼 수 있듯이 주파수 마다 파의 전파속도가 다른 분산 특성을 가지고 있기 때문에 시간 영역에서 시간지연 차이를 찾는 것은 매우 어렵게 된다. 더욱이 잡음이 존재하게 된다면 측정오차가 크게 뒀을 쉽게 알 수 있다.

이 논문에서는 정확하게 시간지연차이를 찾기 위해 다차원 해석 방법인 시간-주파수 기법을 적용하기로 한다.

2.3 위그너-빌 해석

시간-주파수 기법에는 크게 short time Fourier transform, 웨이블렛 그리고 위그너빌 해석⁽⁶⁻¹²⁾이 있다. 이 중에서 주파수 및 시간 분해능이 우수한 위그너 빌 해석을 통해 시간지연차이를 찾기로 한다. 위그너-빌 분포는 bilinear TFR(time frequency representation) 의 한 종류로서 그 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} W(t, f) &= \int_{-\infty}^{\infty} R(t, \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} z(t - \frac{\tau}{2}) z^*(t + \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \\ &= \int Z^*(\omega + \frac{\phi}{2}) Z(\omega - \frac{\phi}{2}) e^{-j\phi} d\phi \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $R(t, \tau) = z(t - \frac{\tau}{2}) z^*(t + \frac{\tau}{2})$ 는 시간중속 자기상관함수(time dependent autocorrelation function), $z(t)$ 는 신호의 해석함수, $Z(\omega)$ 는 $z(t)$ 의 푸리에 변환이다. 즉, 위그너-빌 분포는 시간중속 자기상관함수의 시간지연에 대한 푸리에 변환으로 정의되며, 물리적으로는 각 시간별 신호의 에너지에 대한 주파수 분포를 나타낸다.

따라서 이 연구에서는 시간-주파수 영역에서 두 센서의 시간지연차이를 계산하여 군속도를 측정함으로써 배관의 감육을 감시하고자 한다.

3. 실험

지금까지 군속도를 측정함으로써 배관의 두께를 예측할 수 있음을 이론적으로 살펴보았다. 여기서 군속도를 정확하게 예측하기 위해서 시간-주파수 기법을 적용하였다. 이 장에서는 이러한 이론적인 내용을 검증하기 위해 가장 간단한 경우인 평판실험

과 이 논문의 목적인 U자 배관 실험에 대해 살펴 보기로 한다.

3.1 평판 실험

Fig. 5는 두께가 2mm이고 재질이 SUS304인 600 mm×600 mm 평판을 가지고 수행한 실험 장치 구성도를 보여주고 있다. 이때 센서간의 거리는 100 mm이고, 두 센서사이의 일직선상에서 1번 가속도계 좌측 100 mm 지점에서 충격을 주었다.

이때 충격은 무게가 20 g인 일반 해머를 사용하였으며, 넓은 주파수 대역을 고려하여 센서는 B&K type 4374 가속도계를 사용하였다.

Fig. 6은 가속도계 1과 2의 신호를 시간-주파수 분석한 결과를 보여주고 있다. 중앙 아래에 있는 그림은 가속도 신호를 나타내고, 그 신호를 이용하여 시간-주파수 분석한 결과가 중앙에 있는 그림이다. 그리고 좌측은 스펙트럼을 보여준다. Fig. 5(a)와 (b)의 가속도 신호에서 볼 수 있듯이 같은 원인에 의해 진동이 발생하더라도 거리에 따라 신호 형상이 다를 수 있다. 따라서 시간영역에서 시간 지연 차이를 찾는 것은 기준점을 정하기가 어렵기 때문에 많은 오차가 존재하게 됨을 쉽게 알 수 있다. 하지만 이 논문에서 제안한 시간 주파수 기법을 이용하면 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 두 센서간의 시간 지연 차이를 주파수 별로 쉽게 찾을 수 있다.

이와 같이 시간-주파수 분석 후 두 센서간의 시간 지연 차이를 이용하여 식 (9)에 대입하여 군속도를 예측한 결과를 Fig. 7에서 보여주고 있다.

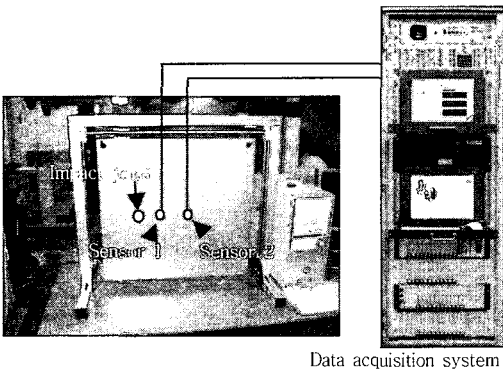
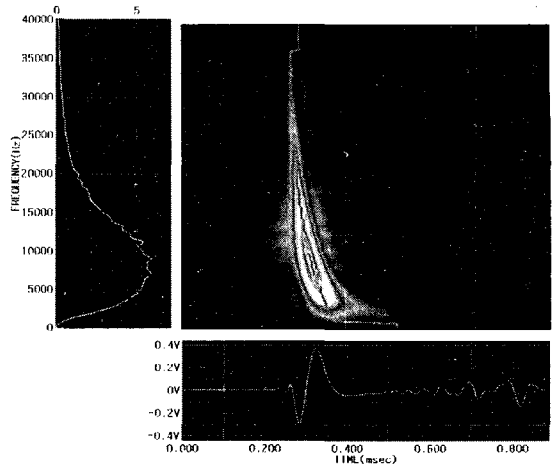
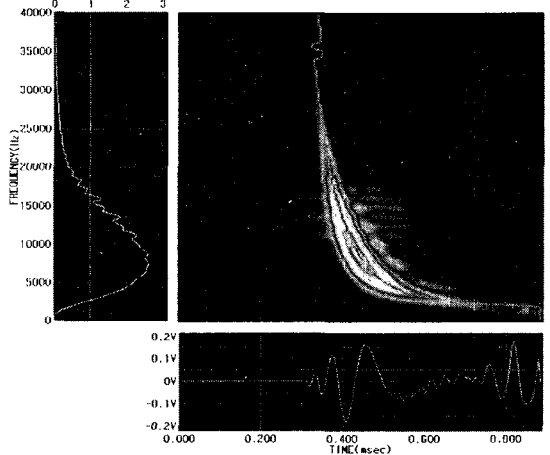


Fig. 5 Experimental setup for plate whose thickness is 2mm. Accelerometers are used for measuring impact response (B&K type 4374)



(a)



(b)

Fig. 6 Time-frequency analysis result for (a) sensor 1, and (b) Sensor 2

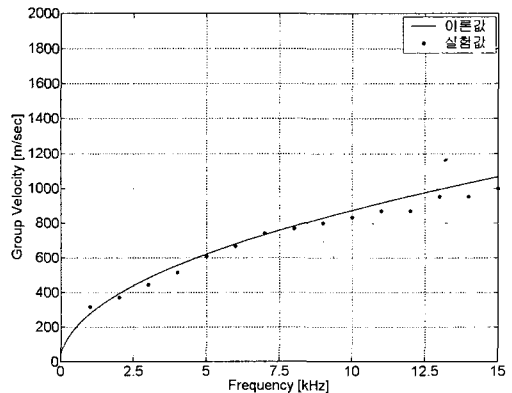


Fig. 7 Estimated group velocity. Where solid line is eq. (7) and dotted line means experimental result

Fig. 7에서 점선은 실험으로 구한 군속도를 의미하고, 실선은 식 (7)에서 이론적으로 유도한 결과를 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있듯이 군속도를 측정하면 두께를 정확하게 예측할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 6에서 특정 주파수와 그때의 군속도를 알고 있다면 식 (8)에 대입하여 바로 두께를 예측할 수도 있다.

3.2 U자 배관 실험

이 연구의 목적인 두께가 4 mm인 U자 배관을 사용하여 수행한 실험 장치 구성도를 Fig. 8에서 보여주고 있다. 이때 사용된 U자 파이프의 재질은 일반

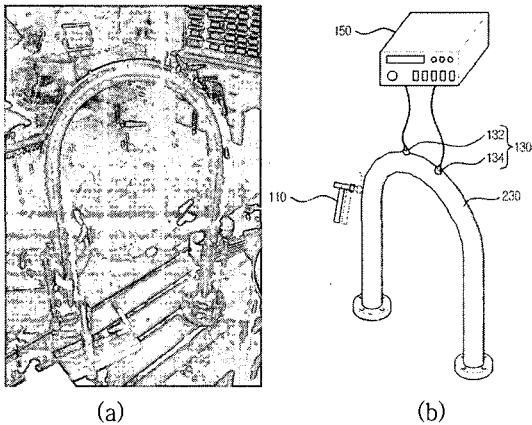


Fig. 8 Experimental setup for U pipe. 110 is impact hammer, 150 is data acquisition system, 132 and 134 are accelerometers and 230 is a pipe

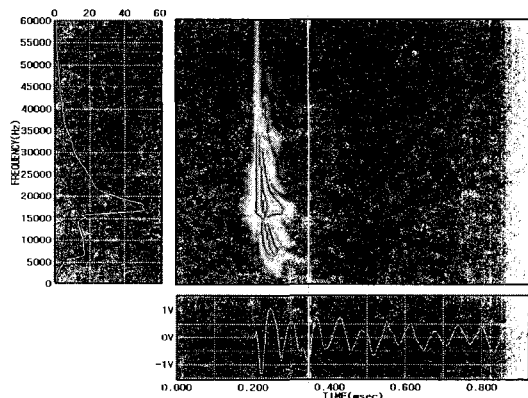


Fig. 9 Time-frequency analysis result for sensor 1 signal

강철이다. 평판 실험과 같이 20 g의 해머로 충격을 가하였고, 센서도 B&K type 4374를 사용하였다. 이때 두 센서간의 거리는 100 mm이고, 충격 위치는 두 센서 바깥쪽 100 mm 떨어진 곳이다. 그리고 감속에 의한 배관 두께 감소 영향을 살펴보기 위해 4 mm일 때 실험을 수행한 후 인위적으로 그라인딩하여 두께가 2 mm일 때 같은 실험을 수행하였다.

Fig. 9은 그라인딩하기 전 두께가 4 mm일 때 가속도계 1에서 받은 신호를 시간-주파수 분석을 한 결과를 보여주고 있다. 평판 실험결과인 Fig. 6에 비해 복잡한 형태로 충격과가 전파됨을 알 수 있다. 이것은 U자 배관일 경우 복잡한 모드들이 생성되어 복합적으로 나타나기 때문이다.

Fig. 10은 평판 실험일 때와 같은 방법으로 배관의 두께가 각각 2 mm일 때와 4 mm일 때 두 센서의 신호로부터 위그너빌 해석을 통해 군속도를 예측한 결과를 보여주고 있다. Fig. 8의 위그너빌 분포에서 볼 수 있듯이 신호대 잡음비가 좋은 구간이 17 kHz에서 38 kHz이지만, B&K 4374 가속도계의 공명 주파수가 80 kHz이므로 의미 있는 구간은 17 kHz에서 약 25 kHz 구간이다. 랜덤 오차를 줄이기 위해 이 영역에서 평균하여 관찰하여 보면, 두께 2 mm일 때 군속도는 약 1100 m/sec이고 두께가 4 mm 배관일 때는 군속도가 약 1600 m/sec로써 두께에 따라 군속도 차이가 남을 쉽게 알 수 있다. 따라서 배관의 두께를 감시하기 위해서 군속도를 이용한다면 쉽고 빠른 시간 내에 정확하게 분석할 수 있음을 의미한다.

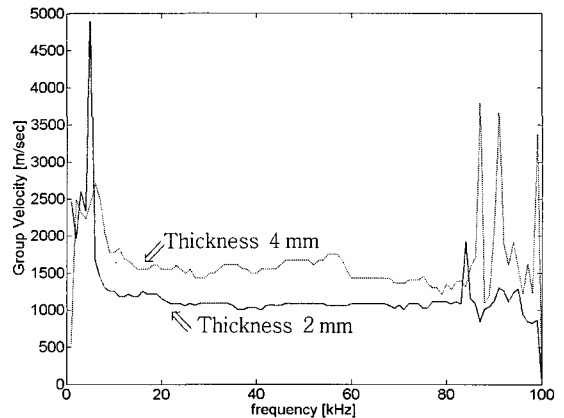


Fig. 10 Estimated group velocity when pipe thicknesses are 2 mm and 4 mm

4. 결 론

이 논문에서 배관을 전파하는 굽힘파의 전파속도를 측정하여 배관의 감육을 평가하는 방법에 대해 제안하였다. 감육현상에 의해 배관의 두께가 감소하면 배관의 굽힘강성이 감소하며, 이에 따라 굽힘파의 전파속도가 감소한다는 점에 착안하여, 배관 외부에 설치된 2개의 진동센서를 이용하여 굽힘파의 전파속도를 주기적으로 측정, 비교함으로써 배관의 감육 정도를 신속하게 진단 및 평가할 수 있다.

제안된 방법을 검증하기 위하여 인위적으로 감육된 배관을 사용하여 실험한 결과 배관의 감육 정도에 따라 군속도가 달라지므로, 이 방법을 이용한다면 배관의 감육을 감시할 수 있음을 알 수 있었다.

이 연구에서는 굽힘파를 발생시키기 위해 충격 해머를 사용하였지만, 신호대 잡음비를 고려하여 특정 주파수를 가진 파를 가진시키기 위해 가진기를 이용할 수도 있다. 예를 들어 배관 내부에 유동이 존재할 경우 유체진동에 의해 많은 잡음이 존재하게 되는데, 이 경우에는 충격 해머를 사용하는 것 보단 가진기를 이용하여 특정 주파수를 가진하는 것이 더 효과적인 것이다.

제안된 방법은 이론적으로 매우 얇은 배관에 대해서도 두께를 예측할 수 있지만, 두께가 얇아지면 배관이 터지기 때문에 현실적으로 임계배관 두께가 있다. 예를 들어 원자력 발전소 2차측에 있는 배관 두께는 감육이 50% 이상이 발생하는 배관을 교체하는 것으로 되어 있기 때문에 배관 실험 결과 충분히 제안된 방법으로 배관감육을 감시할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Dooly, R. B. and Chexal, V. K., 2000, "Flow-accelerated Corrosion of Pressure Vessels in Fossil Plants", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, pp. 85~90.
 (2) Keun J. Sun and Dorrn Kishoni, 1993,

"Feasibility of Using Lamb Waves for Corrosion Detection in Layered Aluminum Aircraft Structures", IEEE Ultrasonic Symposium.

(3) Cremer, L. and Heckl, M., 1998, Structure-borne Sound, Springer-verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo, p.101.

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

(5) Donald, R., 1987, "Mechanics of Underwater Noise", Peninsula Publishing Los Altos, California, p.159.

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

(7) Hlawatsch, F. 1995, "Time-frequency Analysis and Synthesis of Linear Signal Spaces", Kluwer Academic Publishers.

(8) Cohen, L., 1989, "Time-frequency Distributions - A Review", Proceedings of the IEEE. Vol. 77, No. 7, pp. 941~981.

(9) Combes, J. M., Grossman, A. and Tchamitchian, P., Eds. 1989, "Wavelets, Time-frequency Methods, and Phase Space", Berlin: Springer.

(10) Jeong, T.-G., 2006, "Study on the Nonstationary Behavior of Slider Air Bearing Using Reassigned Time-frequency Analysis", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 3, pp. 255~262.

(11) Park, Y.-K. and Kim, Y.-H., 1997, "A Method to Reduce the Cross-talk of Wigner-Ville Distribution; Rotating Window", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 319~329.

(12) Park, Y.-K. and Kim, Y.-H. 1997, "Wigner-Ville Distribution Applying the Rotating Window and Its Characteristics", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 7, No. 5, pp. 747~756.