

Comb Transducer를 이용한 파이프 내 유도초음파 모드의 거동에 관한 연구

A Study on the Behavior of Ultrasonic Guided Wave Mode in a Pipe Using Comb Transducer

박익근^{*†}, 김용권^{**}, 조윤호^{***}, 안연식^{****}, 조용상^{****}

Ik-Keun Park^{*†}, Yong-Kwon Kim^{**}, Younho Cho^{***}, Yeon-Shik Ahn^{****} and Yong-Sang Cho^{****}

초 록 발전설비의 보수검사에 적용하기 위한 예비 연구로 comb transducer를 이용한 파이프 내에서의 유도초음파 모드의 거동을 실험적으로 검증하였다. 유도초음파의 모드식별은 STFT와 WT에 의한 시간-주파수해석을 통하여 최적의 모드를 선정하였다. 시간-주파수해석과 이론적 해석 방법인 분산 곡선을 비교한 결과 잘 일치함을 알 수 있었으며, pitch-catch법과 선단부로부터 반사된 신호를 모드 분석한 결과 L(0,1) 모드가 다른 모드에 비해 모드변환에 의한 영향이 적었다. 따라서 L(0,1)을 최적의 모드로 선정하고, 결함위치를 추정한 결과 유용함을 알 수 있었다.

주요용어: 유도초음파, comb transducer, 군속도, 분산선도, 웨이블릿 변환, 모드 식별, 단시간 푸리에 변환

Abstract A preliminary study of the behavior of ultrasonic guided wave mode in a pipe using a comb transducer for maintenance inspection of power plant facilities has been verified experimentally. The mode identification has been carried out in a pipe using the time-frequency analysis methods such as the wavelet transform(WT) and the short time Fourier transform (STFT), compared with theoretically calculated group velocity dispersion curves for longitudinal and flexural modes. The results are in good agreement with analytical predictions and show the effectiveness of using the time-frequency analysis method to identify the individual modes. It was found out that the longitudinal mode(0,1) is less affected by mode conversion compared with the other modes. Therefore, L(0,1) is selected as an optimal mode for the evaluation of the surface defect in a pipe.

Keywords: ultrasonic guided wave, comb transducer, group velocity, dispersion curve, wavelet transform, mode identification, short time fourier transform

1. 서 론

비파괴평가(NDE)는 원전 압력 경계기기를 포함하는 각종 발전설비의 건전성(integrity)을 주기적으로

확보하기 위한 보수검사(maintenance inspection) 기술의 한가지이다. 발전설비는 건설완료 후 운전을 시작하면 그 후 주기적으로 수행하는 계획예방정비 기간(overhaul period)을 제외하고는 장기간에 걸쳐

(접수일: 2004. 1. 13, 심사완료일: 2004. 3. 10) *서울산업대학교 비파괴평가기술연구센터, **서울산업대학교 에너지·환경전문대학원, ***부산대학교 기계공학부, ****한전 전력연구원, † Corresponding author: Research Institute for Nondestructive Evaluation, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743 (E-mail: ikpark@snut.ac.kr)

계속적으로 운전될 뿐 아니라 발전설비 부품은 운전 중 고온, 고압, 부식, 기계적 응력 및 진동 등의 열악한 조건하에서 가동된다. 따라서 가동 중에 부품의 결함발생 혹은 조기 파손의 가능성이 매우 높다.

발전설비의 건진성을 주기적으로 확보하는데 경제성, 가반성(可搬性), 조작성(操作性) 등이 우수하고 현장 유용성이 검증되어 현재 많이 사용되고 있는 NDE 기법 중에는 육안시험(VT), 침투탐상시험(PT), 자분탐상시험(MT), 방사선투과시험(RT), 초음파두께 측정 등 비교적 정량성이 높은 시험결과가 얻어지는 기법과 초음파탐상시험(UT)[1], 와류탐상시험(ECT), 음향방출시험(AE) 등이 있다.

이 중에서 유도초음파(ultrasonic guided wave)법은 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서, 광범위 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 여러 분야에 적용될 수 있고, 기존의 종파나 횡파를 사용한 국부검사(point by point)법에 비해 탐촉자의 이동없이 고정된 지점으로부터 대형 설비 전체를 한번에 탐상할 수 있을 뿐만 아니라 절연체나 코팅재의 제거 없이 구조물이 설치된 그대로 검사를 수행할 수 있어 기존의 비파괴기법에 비해 시간적, 경제적 효율이 뛰어나다. 또한 보존재나 제한된 공간으로 인하여 검사자의 접근이 곤란하고 복잡하다든가, 다양한 피검사체의 형상을 따라 원거리 초음파탐상이 어려운 발전설비의 보수 검사에 적극 활용되고 있다[2-5].

반면 유도초음파는 상기와 같은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 발전설비의 보수 검사에 적용하는데 아직 해결되어야 할 어려움이 남아있다. 이는 유도초음파가 전파해가는 모드가 무한히 많이 존재함으로 인해 다양한 모드의 선택을 통한 측정 민감도를 향상시킬 수 있는 장점도 있지만, 여러 개의 모드가 동시에 수신될 때 신호해석과 모드확인(mode identification)이 어렵다는 것이다.

그러나 이러한 문제를 극복하기 위한 노력으로 1990년대에 열 교환기 튜브나 파이프에 유도초음파를 적용한 이론적인 연구와 실험적인 연구가 진행되었고[6,7] 미국의 PennState[8,9]와 영국의 Imperial College[10]에서 comb transducer나 배열형 변환기를 이용한 장거리 배관을 신속히 탐상하고 유도초음파의 해석을 단순화하기 위해 저주파 영역의 모드를 선택하고, 초음파 신호의 효율적 해석을 위한 전용프로그램을 자체적으로 개발하였다. 미국의 SwRI[11]에서는 배관에서 유도초음파를 발생시키기

위해 자외 센서(magnetostrictive sensor)를 채택하고 있는데, 시스템 또한 자체적으로 개발하여 장거리 배관의 결함을 신속하게 탐상하고자 노력하고 있다.

유도 초음파의 모드분석을 위한 신호처리 방법으로는 고전적인 푸리에변환 방식이 가장 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나 시간영역과 주파수영역의 신호를 동시에 해석할 수 없기 때문에 유도초음파 신호가 가지는 시간영역과 주파수 영역의 정보를 시간과 주파수의 2차원 평면상에 동시에 표현할 수 있는 시간-주파수 해석법인 단시간 푸리에변환(short time Fourier transform; STFT)[12,13]과 웨이블릿 변환(wavelet transform; WT)[14,15], 2-D FFT[16,17] 등을 유도초음파 모드 분석에 적용하는 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

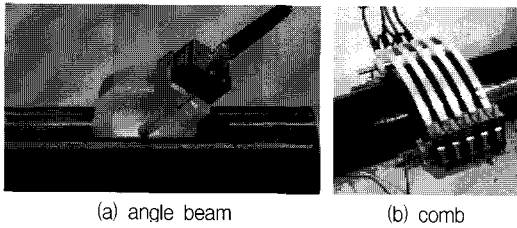
본 연구에서는 발전설비의 보수 검사에 적용하기 위한 예비 연구로 comb transducer를 이용한 파이프 내에서의 유도초음파 모드의 거동을 실험적으로 검증하고자 한다. 유도초음파의 분산선도에 나타난 각종 모드의 분산특성과 파형 구조로부터 유도초음파의 모드특성을 예측하고, 유도초음파의 모드식별은 STFT와 WT에 의한 시간-주파수해석을 통하여 최적의 모드를 선정하고, 이론적 해석 방법인 분산곡선과 비교·검토한 후 배관의 결함위치 추정치의 유용성 유무를 검증하고자 한다.

2. 유도초음파의 발생과 수신

일반적으로 비파괴검사 시 유도초음파의 발생은 Fig. 1(a) 및 Fig. 2(a)와 같이 피검사체 표면에 기존의 종파 또는 횡파형 초음파탐촉자와 웨지를 사용하여 특정의 입사각으로 초음파를 경사 입사시켜줌으로써 발생시킬 수 있으며, 이때 이론적인 계산된 위상속도로부터 얻어진 해당 입사각도는 스넬의 법칙을 통해 계산된다.

사각입사에 의한 유도초음파 송·수신법은 기존의 초음파 탐촉자를 활용할 수 있고, 웨지 형상에 따라 다양한 유도초음파 탐촉자 설계가 가능하며, 유도초음파의 모드선택과 전파방향을 효율적으로 결정할 수 있다는 기술적 장점을 가지고 있다. 이와 함께 사각입사방식은 초음파 탐촉자와 구조물 사이의 초음파 입사각을 조절하는 보조적 중간매질인 웨지 재료의 음속보다 위상속도가 낮은 모드를 발생시키는데 많은 어려움이 있을 뿐 아니라, 초음

파가 통과하는 웨지 재료 내에서 생길 수 있는 에너지 감쇠와 다중 반사에 의해 초음파 모드의 정량적 신호분석이 용이하지 않거나 탐상민감도가 저하되는 등의 문제점도 함께 가지고 있다.



(a) angle beam

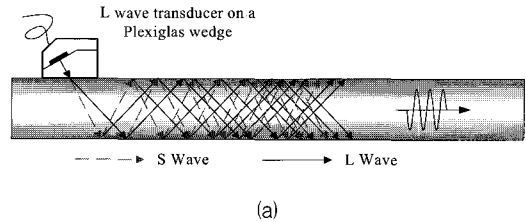
(b) comb

Fig. 1 Probes for guided wave mode excitation in a pipe

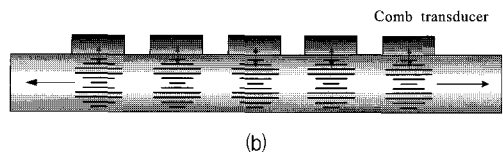
Fig. 2(a)의 기존 사각 입사형 유도초음파 신호의 문제점을 실험적으로 개선하기 위해 최근에는 Fig. 1(b) 및 Fig. 2(b)와 같이 다중 압전요소(multi piezo-electric element)를 이용한 빗살형(comb-type) 변환기의 설계 및 유도초음파 송·수신에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[11,12]. 이같이 배열형탐촉자에 의한 유도초음파 가진 방식은 전자기장 음향탐촉자(electro-magnetic acoustic transducer)나 자왜형(magnetostriction type) 유도초음파에도 사용되는 특정 모드의 파장에 송·수신 조건을 일치시키는 방법으로서 대구경 파이프와 같이 단일 압전재료로 대형화된 유도초음파 탐촉자를 제작하기 어려운 경우나 위상속도가 사각탐상의 웨지재료보다 낮은 모드를 송·수신하는 데에 사용된다. 특히 배열형탐촉자내 각 요소의 간격만을 조절하여 모드 선택을 할 수 있으므로 자동화된 유도초음파 탐상 시스템 개발에 용이한 방식이며, 사각 입사 방식과 달리 주파수를 변화시켜 새로운 모드를 사용하고자 하는 경우에도 일정한 파장이 유지되어 파장대비결함크기에 따른 민감도의 변화를 교정할 필요가 없는 기술적 장점을 갖고 있다.

배열형 탐촉자에 의한 입사방식은 전체요소를 동시에 가진하는 동일위상(in-phase) 가진방식과 요소간의 시간지연을 이용하는 위상차(out of phase) 가진방식으로 나누어 진다. 전자의 경우는 단순한 설계방식이 장점이나 모드변화를 위해 요소간격을 변화시켜야하며, 유도초음파 신호가 탐촉자의 양방향으로 동시에 전파되어 수신된 신호가 복잡해지는 단점을 지니고 있다. 이에 반해, 후자의 경우는 고정된 요소간격을 유지하며, 단지 원하는 모드의 위

상속도와 그 요소간격으로부터 계산된 시간지연을 배열형 탐촉자 내 각 요소의 가진에 적용하여 특정의 모드를 선택하는 방식으로 다중채널의 탐촉자 운용 및 신호수집 시스템개발을 위한 개발비용이 필요하게 된다.



(a)



(b)

Fig. 2 Techniques for generation of guided waves: (a) oblique incidence; (b) comb transducer

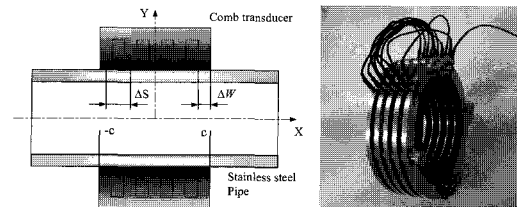


Fig. 3 Comb transducer design

Fig. 3에서 comb transducer에서 매개변수는 압전 요소의 폭 ΔW , comb의 크기(압전요소의 폭과 요소 사이 간격을 더한 값) ΔS , 요소의 수 N , 중심 주파수 f_0 , 주파수 대역폭 β , 시간지연 Δt 가 포함된다. 판의 두께는 d 이다. 유도초음파의 모드는 식 (1)에 의한 직선과 Fig. 4의 위상속도 분산곡선 사이의 교차점에서 매우 근접하게 발생된다. 특정한 유도초음파 모드의 경우 다음의 관계를 만족해야한다[11,12].

$$C_{ph} = f \cdot \lambda = KX \tag{1}$$

여기서

$$K = \Delta S / d \tag{2}$$

$$X = f \cdot d \tag{3}$$

분산선도에서 위상속도는 $f \cdot d$ 의 함수이므로

$$C_{ph} = F(X) \tag{4}$$

식 (1)은 Fig. 4에서와 같이 직선으로 나타난다. 식 (4)은 Fig. 4에서 나타낸 위상속도 분산곡선이다. 식 (1)과 (4)의 해는 분산선도와 직선의 교차점으로 구할 수 있다. Fig. 4는 외경이 114 mm이며 두께가 2 mm인 스테인레스강 배관으로부터 획득하였다.

comb transducer 설계를 위해 구한 간극(comb spacing) ΔS 는

$$\Delta S = \lambda = C_{ph} / f \tag{5}$$

이고 위상속도는 $C_{ph} = \Delta S \cdot f$ 로 나타낼 수 있다.

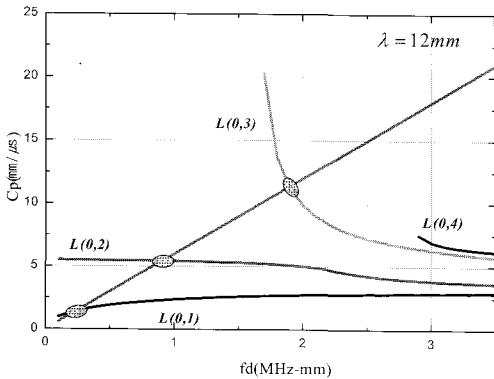


Fig. 4 The phase velocity dispersion curves showing guided wave modes generated by the comb transducer with the comb spacing of 12 mm in a pipe

3. 실험장치 및 방법

3.1. 실험장치

본 실험에서는 Fig. 5에서와 같이 유도초음파의 특정 모드를 선택하고 가진시키기 위해 신호를 지속시키고 주파수를 제어할 수 있는 톤 버스트 시스템(tone burst system)을 사용한 실험장치(Ritec사의 RAM-10000)와 이를 구동하기 위한 제어 컴퓨터, 그리고 탐촉자에 의해 수신된 신호를 분석하고 데이터 처리를 위해 2 GHz 디지털 스토리지 오실로스코프(Lecroy 9374M)을 사용하였다. 이 시스템은 고출력의 다양한 주파수를 가진시킬 수 있으며, 초

음파의 발생은 Fig. 3의 내경이 114 mm 크기에 원형으로 중심주파수가 1.5 MHz이고 5개의 환형 요소(ring-type elements)로 이루어져 있으며 요소 사이의 간격은 12 mm인 Krautkramer사의 comb transducer를 사용하였다. 여기서 ΔS 는 위상속도 분산곡선의 기울기에 해당하며, 요소의 간격을 조절함으로써 다양한 모드를 발생시킬 수 있고 $f \cdot d$ 에 해당하는 최적의 모드를 얻을 수 있다.

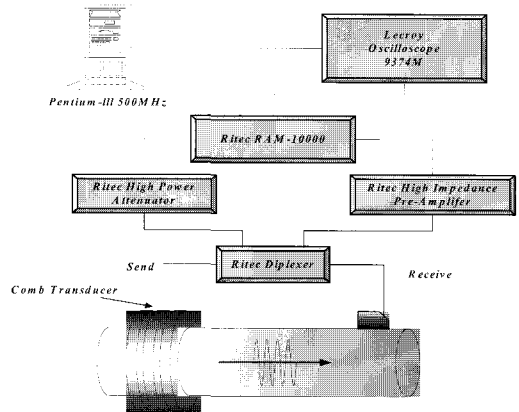


Fig. 5 Experimental setup of a tone burst system and a comb transducer for the generation of ultrasonic guided waves

3.2. 실험방법

Fig. 6은 본 연구에 사용된 스테인레스강 배관 시험편을 나타내고 있다. 이 배관의 바깥지름은 114 mm이며, 두께는 2 mm, 길이는 4 m이며, 종파속도와 횡파속도는 각각 6.02 km/s, 3.25 km/s이다. 배관표면에 횡방향 표면결함을 가공하였다.

유도초음파의 전파 거동을 파악하고 결함 탐상을 위해 스테인레스강 배관에 comb transducer를 설치하고 펄스에코 방식으로 pitch-catch 방법을 적용하였다. Table 1은 이론적인 계산으로 얻어진 위상속도로부터 각 모드에 대해 식 (6)의 스넬의 법칙을 이용하여 계산되어진 수신각을 나타낸다.

$$C_{ph} = \frac{C_{shoe}}{\sin \theta} \tag{6}$$

여기서 C_{ph} 는 위상속도이며 C_{shoe} 아크릴 웨지의 종파속도인 2.70 km/s이다.

유도초음파의 모드를 식별하는 방법으로는 획득한 RF 신호파형의 전파시간으로부터 군속도를 실험적으로 측정하고, 이론적으로 계산되어진 유도초음파의 군속도 분산곡선의 각 모드들의 군속도와 비교하여 모드를 식별하였다. Pitch-catch 법으로 comb transducer를 사용하여 유도초음파를 발생시키고, 가변각 웨지를 사용한 수직탐촉자로 신호를 획득하였다. 송수신 거리는 500 mm으로 놓고 $f \cdot d$ 값이 3 MHz-mm에 해당하는 모드들을 선택적으로 수신하기 위해서 Table 1의 각도로 신호들을 획득하였다. 여러 개의 유도초음파의 모드가 유도체에 따라 수신될 경우 시간-주파수해석의 방법으로 단시간 푸리에변환과 웨이블릿 변환으로 배관 내에 존재하는 유도초음파 모드의 거동을 해석하였다.

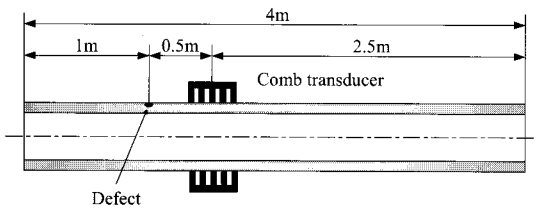


Fig. 6 Specimen

Table 1 Selected longitudinal modes

Mode	Phase velocity [km/s]	Angle [°]
L(0,1)	2.89	22.8
L(0,2)	3.47	25
L(0,3)	6.32	52
L(0,4)	6.96	67(69*)

* Theoretical calculation

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 분산곡선 시뮬레이션 결과

유도초음파의 모드는 종형(longitudinal), 비틀림형(torsional), 굽힘형(flexural) 모드로 구분될 수 있다. 여기서 각 모드들은 원주방향 차수에 의해서 구분되어지며 모든 모드가 배관방향으로 전파된다고 생각하면, 종형 모드와 비틀림형 모드는 축대칭 모드이고 굽힘형 모드는 비축대칭 모드이다. 종형 모드는 원주방향 차수가 $n=0$ 일 때 발생하게 되며,

주파수 방정식에 의해서 종형 모드의 해인 위상속도 분산 곡선을 얻을 수 있다. “Fig. 7은 $n=0$ 일때 종형 모드의 군속도 분산선도를 구한 결과이며, Fig. 8은 $n \neq 0$ 일때, 굽힘형 모드의 군속도 분산선도를 구한 결과이다.” 군속도 분산선도는 위상속도로부터 구할 수 있다.

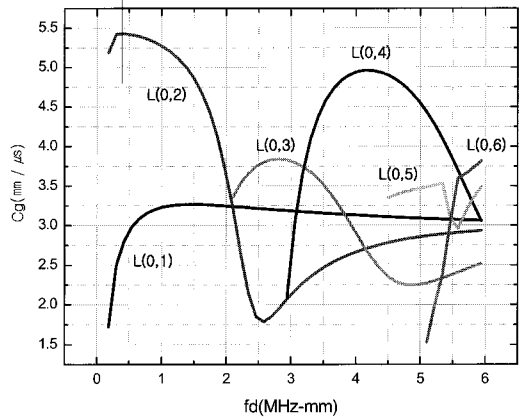


Fig. 7 Group velocity dispersion curves for longitudinal modes (up to 6) of the stainless steel pipe(inner diameter 110 mm, thickness 2 mm, $V_L = 6.02$ km/s and $V_T = 3.25$ km/s)

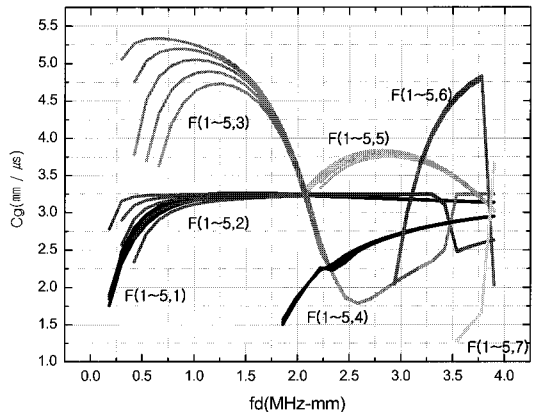


Fig. 8 Group velocity dispersion curves for flexural modes (up to 7) of the stainless steel pipe(inner diameter 110 mm, thickness 2 mm, $V_L = 6.02$ km/s and $V_T = 3.25$ km/s)

4.2. 유도초음파 모드 식별 및 결함 검출

Fig. 9(a)는 pitch-catch 법으로 comb transducer를 사용하여 $f \cdot d$ 값이 3 MHz-mm에 해당하는 모드들

을 선택적으로 수신하였다. 이때 송·수신 거리는 500 mm이며, 가변각 웨지를 사용한 수직탐촉자로 Table 1의 각도에 따라 유도초음파 신호를 획득한 결과이다. Fig. 9(b)~(e)는 가변각 수직탐촉자의 수신각이 67°일 때 경우이며, 유도초음파의 RF 신호파형을 단시간 푸리에 변환과 웨이블릿 변환을 적용하여 분석한 결과로 시간에 따른 주파수의 변화, 즉 분산양상을 잘 나타내고 있고 시간-주파수 해석에 의한 결과와 군속도 곡선을 쉽게 비교하기 위해서 중첩을 시켰다. 또한, 유도초음파의 모드를 보다 쉽

게 식별하기 위해서 $f \cdot d$ [MHz-mm]와 속도축으로 변환하였다. 여기서 x축은 배관 두께(2 mm)와 주파수를 곱하여 $f \cdot d$ 로 설정하였고 y축은 측정거리(500 mm)에 대한 시간축을 속도축으로 변환하였다.

Fig. 9(b), (c)는 시간-주파수해석 결과와 이론적인 중형 모드의 군속도 곡선을 중첩한 결과로서 주파수, 위상속도와 분산양상으로부터 L(0,1)모드를 확인할 수 있으며, Fig. 9(d), (e)는 굽힘형 모드의 군속도와 중첩한 결과로 F(M,4)모드를 확인할 수 있었고, 다른 모드에 비해 에너지가 작은 F(M,3)도 존

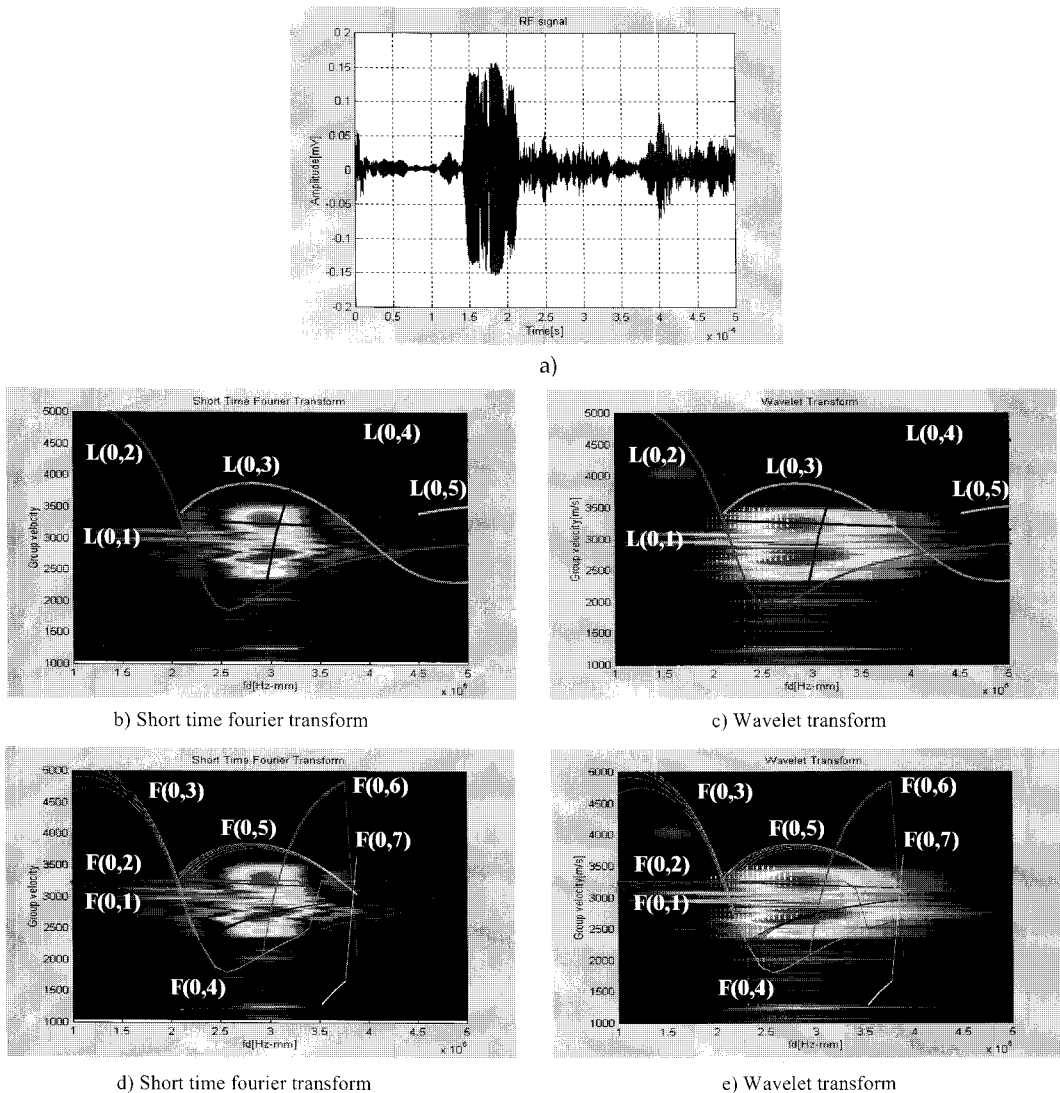


Fig. 9 Guided wave mode identification of a) the signal obtained from pitch-catch method by comparison between time-frequency analysis(b) & d) STFT, c) & e) WT) and group velocity dispersion curve (b) & c) longitudinal mode and d) & e) flexural mode)

재함을 확인할 수 있다. 이상의 결과와 같이 시간-주파수해석은 배관 내로 전파하는 유도초음파의 모드 식별에 유용함을 알 수 있다.

Fig. 10은 배관 선단부로부터 반사된 유도초음파의 모드의 전파 거동을 파악하기 위해 시간-주파수 해석을 적용한 결과를 나타내고 있다. 이것으로부터 주파수, 군속도와 분산양상으로부터 L(0,1)모드를 확인할 수 있으며, Fig. 9에서 L(0,1), F(M,3), F(M,4)가 존재함을 알 수 있으며 선단부에 반사된 신호를 분석한 결과인 Fig. 10은 L(0,1)모드를 제외

한 다른 모드는 Fig. 9와 비교하여 선단부를 통해 이루어진 모드변화 영향으로 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로부터 선단부에서의 모드 변환에 대해서는 L(0,1)모드가 다른 모드들에 비해 모드 변환에 대한 영향을 적게 받음을 알 수 있다.

따라서, 유도 초음파의 진행방향에 수직하는 결합 검출에 L(0,1)을 최적의 모드로 선정하였다. Fig. 11(a)은 결합이 존재하지 않는 시험편으로부터 획득한 신호이고 Fig. 11(b)는 표면 결합이 있는 시험편으로부터 획득한 신호파형이다. Fig. 11(b)로부터 실

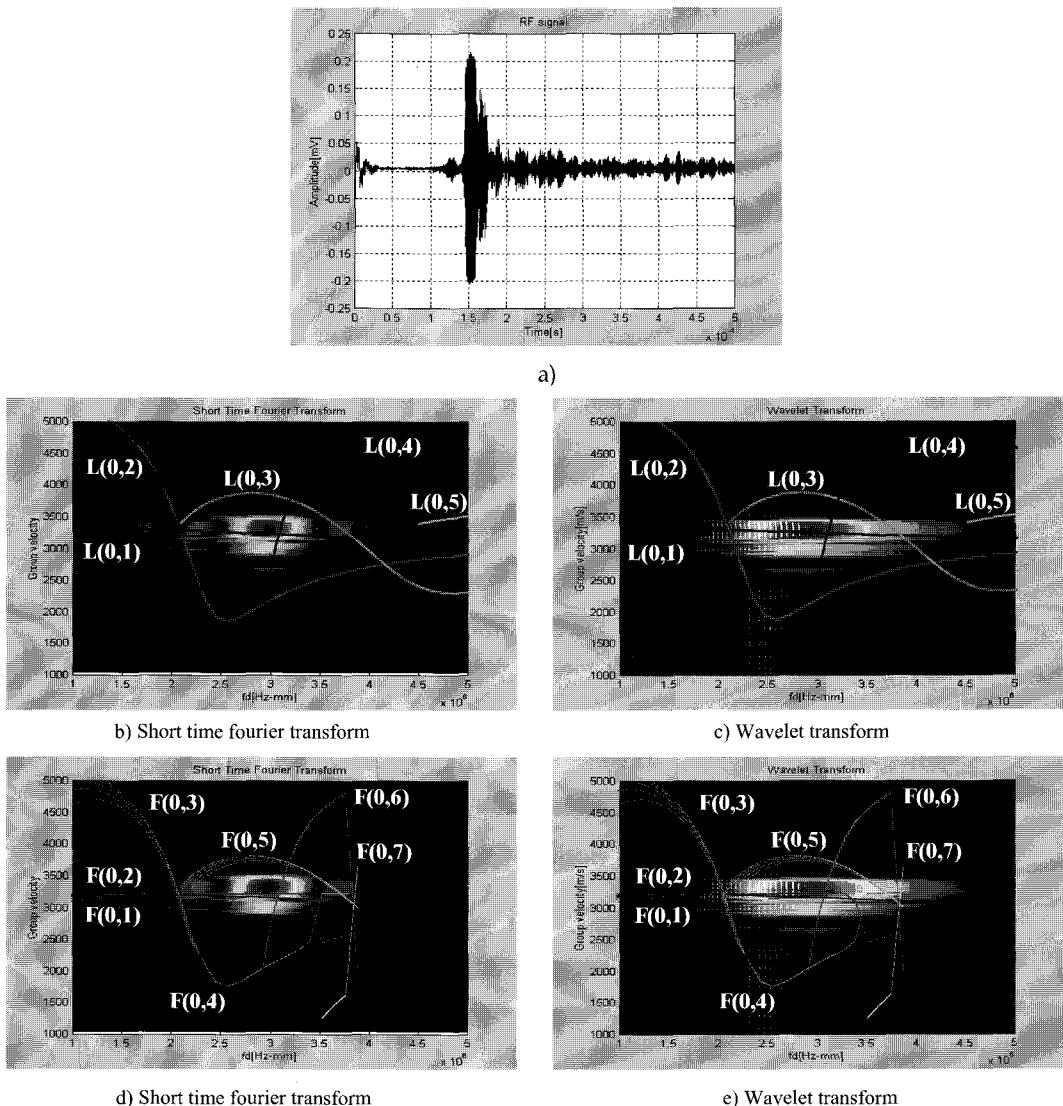
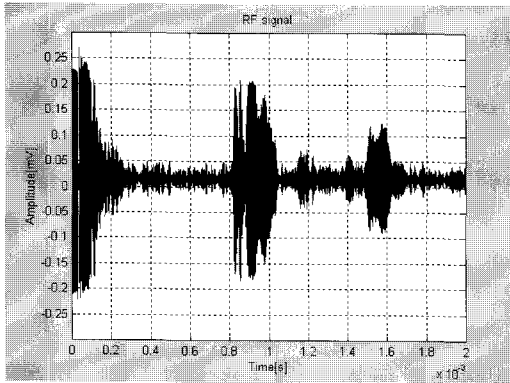
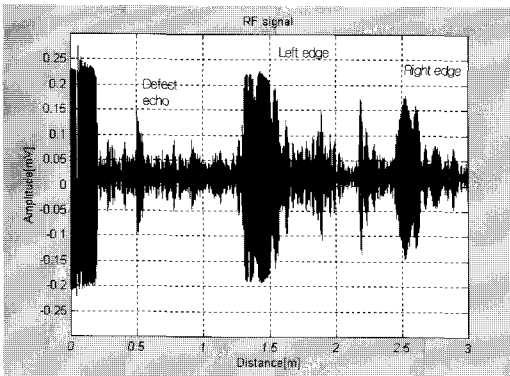


Fig. 10 Guided wave mode identification of a) the reflected signal at edge by comparison between time-frequency analysis(b) & d) STFT, c) & e) WT) and group velocity dispersion curve (b) & c) longitudinal mode and d) & e) flexural mode)

제결함과 L(0,1) 모드에 의해 계산된 결과가 잘 일치함을 알 수 있었으며, L(0,1) 모드가 배관표면에 존재하는 결함에 대하여 유용함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

Fig. 11 The RF signal waveforms obtained from without a defect and with a surface defect in a pipe

5. 결 론

발전설비의 보수검사에 적용하기 위한 예비 연구로 comb transducer를 이용한 파이프 내에서의 유도초음파 모드의 거동을 실험적으로 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 유도초음파의 모드식별은 STFT와 WT에 의한 시간-주파수해석법과 이론적 해석 방법인 분산 곡선을 비교·분석한 결과 잘 일치함을 알 수 있었다.
- 2) Pitch-catch법과 선단부로부터 반사된 신호를 모드 분석한 결과 L(0,1)이 다른 모드에 비해 모드 변환에 의한 영향이 적음을 알 수 있었다. 따라

서 L(0,1)을 최적의 모드로 선정하고, 배관에 존재하는 결함의 위치 추정에 L(0,1) 모드를 적용한 결과 L(0,1) 모드가 유용함을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] I. K. Park, U. S. Park and H. M. Kim, "Statistical Reliability Assessment of Ultrasonic Performance Demonstration - A Round Robin test Results - (part III)," KSNT/SC0031, pp. 214-219, (2003)
- [2] S. J. Song, J. S. Park and H. J. Shin, "Guided Wave Mode Selection and Flaw Detection for Long Range Inspection of Polyethylene Coated Steel Gas Pipes," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 21, No. 4, pp. 406-414, (2001)
- [3] D. N. Alleyne and P. Cawley, "Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework," Materials Evaluation, Vol. 52, No. 7, pp. 504-508, (1997)
- [4] Tatsuyuki Nagai, Masami Hyodo and Kenichi Takamura, "Long Range Ultrasonic Technique for Inspection of Buried Pipelines," Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection, Vol. 51, No. 10, pp. 622-627, (2002)
- [5] Peter J. Mudge and Alan M. Lank, "A Long Range Method of Detection of Corrosion under Insulation in process Pipework," Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection, Vol. 46, No. 4, pp. 314-319, (1997)
- [6] H. J. Shin, Joseph L. Rose and S. J. Song, "Inspection of Heat Exchanger Tubing Detects with Ultrasonic Guided Waves," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 1, pp. 1-9, (2000)
- [7] Joseph L. Rose and Dale Jiao, "Ultrasonic Guided wave NDE for Piping," Materials Evaluation, Vol. 51, No. 5, pp. 1310-1313, (1996)
- [8] S. P. Pelts, D. Jiao, and J. L. Rose, "A Comb Transducer for Guided Wave Generation and Mode Selection," IEEE Ultrasonics Symposium, pp. 857-860, (1996)

- [9] S. Pelts, J. L. Rose and Y. Cho, "A Comb Transducer for Guided Wave Mode Control," *Review of Progress in Quantitative NDE*, Vol. 18, pp. 1029-1036, (1998)
- [10] D. N. Alleyne and P. Cawley, "Optimization of Lamb wave inspection Techniques," *NDT & E International*, Vol. 25, pp. 11-22, (1992)
- [11] Hegeon Kwun, Sang-Young Kim and Glenn M. Light, "Long-Range Guided Wave Inspection of Structures Using the Magnetostrictive Sensor," *Journal of the Korean Society for Non-Destructive testing*, Vol. 21, No. 4, pp. 383-390, (2001)
- [12] H. J. Shin and S. J. Song, "Time-localized frequency analysis of ultrasonic guided waves for nondestructive," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol. 19, pp. 709-716, (1999)
- [13] W. H. Prosser, Michael D. Seale and Barry T. Smith, "Time frequency domain analysis of the dispersion of Lamb modes," *Journal of the Acoustical Society of America* 105 (5), pp. 2699-2676, (1999)
- [14] A. Abbate, J. Frankel and P. Das, "Wavelet transform signal processing for dispersion analysis of ultrasonic signals," *Proceeding of IEEE Ultrasonics Symposium*, (1995)
- [15] Zongqi Sun, Yiwei mao, Wenhua Jiang and De Zhang, "Investigation of Interaction of Lamb Waves and Circumferential Notch in pipe by means of Wavelet Transform," *2000 IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 827-830, (2000)
- [16] D. N. Alleyne and P. Cawley, "A two-dimensional Fourier Transform method for the measurement of propagating multimode signals," *Journal of the Acoustical society of America*, 89(3), pp. 1159-1168, (1991)
- [17] Takahiro Hayashi and Koichiro Kawashima, "Mode Extraction from Multi-modes of Lamb Waves," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O. Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol. 21, pp. 219-224, (2002)