

## 폴리에틸렌 코팅 가스배관의 광범위탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결함 검출

### Guided Wave Mode Selection and Flaw Detection for Long Range Inspection of Polyethylene Coated Steel Gas Pipes

송성진\*, 박준수\*, 신현재\*\*

Sung-Jin Song\*, Joon-Soo Park\* and Hyeon Jae Shin\*\*

**초 록** 폴리에틸렌 코팅 가스배관의 결함탐상을 위해 광범위 비파괴탐상기법인 유도초음파를 적용하였다. 가스배관의 내경은 190.7mm, 두께는 5.3mm, 그리고 바깥 표면은  $1.9 \pm 0.5$ mm의 폴리에틸렌 층으로 코팅되어 있다. 폴리에틸렌 코팅 배관의 외면에 0.5MHz 탐촉자와 가변각 웨지를 사용하여, 비축대칭 유도초음파를 가진 시켰다. 주파수와 위상속도 조정을 통하여 가스배관의 결함 탐상을 위한 적절한 모드를 찾아내고, 모드의 특성을 단시간 푸리에 변환을 이용하여 분석하였다. 결함탐상 결과를 두께 손실 및 원통형 관통결함에 대한 인위결함에 대해 나타내었다. 그리고 가스배관에 인위적으로 삽입한 두께 손실과 원통형 관통결함에 대한 검출 성능을 평가하였다.

**주요용어:** 폴리에틸렌 코팅 가스배관, 유도초음파, 모드, 단시간 푸리에 변환

**Abstract:** Ultrasonic guided waves were explored to apply them to the long range inspection of polyethylene coated steel gas pipes. The steel pipes have such dimensions as 190.7mm inside diameter and 5.3mm thickness. The outside surface of the pipe is coated by a polyethylene layer of  $1.9 \pm 0.5$ mm thickness. Non-axisymmetric guided waves were excited on the outside surface of the polyethylene coated pipe by using a 0.5 MHz transducer with a variable angle shoe. Frequency and phase velocity tuning was used to find optimum guided wave modes for the inspection. The dispersive characteristics of the modes were analyzed in time-frequency representation obtained by short time Fourier transforms. Sample results were presented for artificial defects such as wall thinning and hole.

**Keywords:** polyethylene gas pipe, guided waves, mode, short time Fourier transform

#### 1. 서 론

유도초음파는 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서, 광범위 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 여러 분야에 적용될 수 있다. 특히 가스배관, 열교환기 세관, 그리고 박판으로 이루어진 여러 가지

구조물의 비파괴탐상에 있어서 체적파를 이용하는 기존의 비파괴기법에 비해 시간적, 경제적 효율이 뛰어나다.

실린더에서의 유도초음파에 관한 연구는 1950년대 후반과 1960년대에 이론적인 연구가 이루어졌고[1-4], 1990년대에 열 교환기 튜브나 파이프에서 비파괴검사에 적용하기 위해 이론적 연구와 실험적 연구가 진행되었다

[5-15]. 배관에서 유도초음파를 적용한 연구로는 영국의 Imperial College[16]에서 석유화학 플랜트의 배관을 검사하기 위한 유도초음파 기법을 연구중에 있는데, 장거리 배관을 신속히 탐상하고 유도초음파의 해석을 단순화하기 위해 저주파영역의 모드를 선택하고, 초음파 신호의 효율적 해석을 위한 전용프로그램을 자체적으로 개발하였다. 미국의 SWRI[17]에서는 배관에서 유도초음파를 발생시키기 위해 자왜 센서(magnetostrictive sensor)를 채택하고 있는데, 시스템 또한 자체적으로 개발하여 장거리 배관의 결함을 신속하게 탐상하고자 노력하고 있다.

그러나 유도초음파는 광범위 비파괴탐상에 효율적임에도 불구하고 폴리에틸렌 코팅 가스 배관에서 결함탐상에 적용하는데 어려움이 있다. 이는 코팅이 점탄성이기 때문에 열밀폐를 얻는 것이 대단히 어려우며, 또한, 유도초음파의 모드가 무한히 존재한다는 점과 대부분의 모드는 진동수와 파유도체의 두께에 따라 전파속도가 변화하는 특성, 즉 분산특성을 가지고 있기 때문이다. 이런 분산특성은 유도초음파를 적용함에 있어서 분산성이 있는 여러 개의 모드가 동시에 수신될 때 신호해석과 모드확인(mode identification)을 어렵게 한다. 수신신호 해석의 어려움을 극복하기 위해 실험적으로는 위상속도와 진동수의 범위를 제한함으로써 분산성이 적은 단일모드를 사용할 수 있는 방법이 제안된 바 있다[10]. 그리고 유도초음파를 진동수-시간 영역에서 분석하는 신호해석기법을 이용하여 수신신호를 해석하는 방법이 최근에 제안되고 있는데, 특히 신현재[18]는 단시간 퓨리에 변환(short time Fourier transform: STFT)을 유도초음파 모드 분석에 적용하는 기법을 제안한바 있다.

본 연구에서는 유도초음파를 이용한 도시가스의 분배에 사용되는 폴리에틸렌 코팅가스 배관의 탐상을 위한 모드를 선정하고, 선정된 모드로 배관의 결함을 탐상하는 연구를 수행하였다. 그리고 수신된 신호의 모드를 STFT를 이용한 시간-주파수 분석법을 통해 탐상 가능성을 입증하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 시험편 및 실험 장치 구성

본 연구에 사용된 시험편은 도시가스 분배용으로 사용되는 폴리에틸렌 코팅 가스배관이다. Fig. 1은 실제로 지하에 매설되어 각 가정의 유압가스 설비에 널리 사용되

고 있는 폴리에틸렌 코팅 가스배관을 보여주고 있다. 이 강관의 내경은 190.7mm이며, 두께는 5.3mm이다. 코팅 두께는  $1.9 \pm 0.5\text{mm}$ 이다.

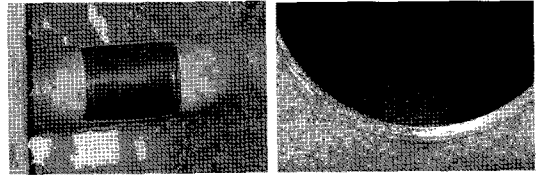


Fig. 1 Polyethylene coated steel pipes for gas distribution to end users

Fig. 2에 보인 사진은 Fig. 1에 보인 실제 가스배관과 동일한 가스배관을 유도초음파 탐상 기법 연구 수행을 목적으로 실험실내에 설치한 테스트베드인데, 결함탐상의 수행을 위해 용접부 및 인위 결함들을 인공적으로 삽입하였다. 인위적으로 가공한 결함들은 원주길이 방향으로 20%의 두께손실 및 1.7mm의 직경을 갖고 있는 원통형 관통결함 등이 있다.

### Wall thinning (circumference) Thorough wall hole



Wall thinning (taper) Flat bottom hole

Fig. 2 Polyethylene coated steel gas pipes for the investigation of long range inspection with guided waves

Fig. 3은 코팅배관에서의 유도초음파 전파거동 해석을 위한 기초자료 수집을 위해 채택한 코팅을 제거한 배관을 나타내고 있는데, 길이가 2.4m로 중심부에 용접부가 있다. 본 연구에서 처음에는 코팅이 제거된 배관에서 탐촉자를 설치하여 유도초음파 실험을 수행하였으며, 그 후에 주파수와 위상속도, 입사각 등을 조절하여 코팅배관에 대한 실험을 수행하였다.

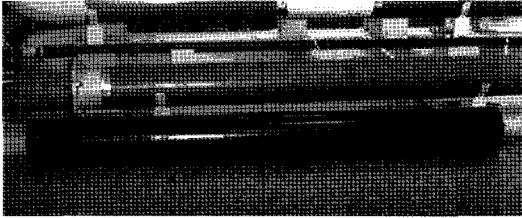


Fig. 3 Steel gas pipes without coating for the investigation of long range inspection with guided waves

유도초음파의 특정 모드를 선택하여 가진시키기 위해서는 신호를 지속시키고 주파수를 제어할 수 있는 tone burst system이 주로 사용된다. 먼 거리를 전파하는 유도초음파를 발생시키기 위해서는 범용 초음파 pulser/receiver보다 높은 출력이 요구되기 때문에 본 실험에서 고효율 초음파를 발생하기 위한 장치로 Ritex사의 RAM-10000을 사용하였다. Fig. 4 (a)는 본 실험에 사용된 실험장치를 나타내고 있으며 RAM-10000 장비와 이를 구동하기 위한 제어 컴퓨터, 그리고 탐촉자에 의해 수신된 신호를 분석하기 위한 oscilloscope로 구성되어있다. 또한 유도초음파를 발생하기 위해서는 입사각을 조절해야하기 때문에 Fig. 4의 (b)에 보인 바와 같이 배관에 접촉이 용이하도록 접촉부위를 배관 외경의 곡률과 같은 크기로 가공한 가변각 웨지(wedge)를 제작하였다.

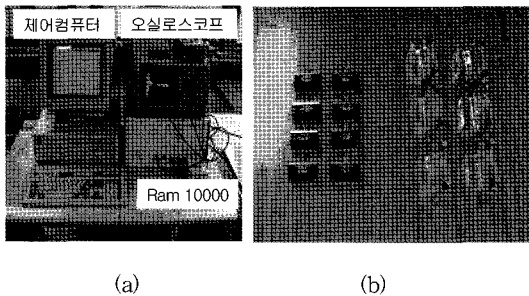


Fig. 4 (a) Experimental setup for ultrasonic guided wave testing and (b) Transducers and variable angle wedges for the generation of guided wave

Fig. 5는 가스배관내의 유도초음파 모드 분석을 위한 실험 배치를 나타낸 것이다. Pitch-catch 방식은 유도초음파 모드 특성 분석을 위해, 그리고 pulse-echo 방식은 결함 탐상을 위해 사용하였다. 본 연구에서는 수신된 신

호들의 시간-주파수 분석을 이용하여 그 특성에 대해 실험적인 연구를 수행하였다.

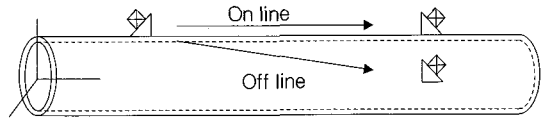


Fig. 5 Transducer set up for guided wave excitation and reception

폴리에틸렌 코팅 가스배관에 적합한 모드를 선정하기 위해 코팅이 되어 있지 않은 가스배관과 코팅이 되어있는 가스배관에 대해 pitch-catch 방법으로 발생 가능한 모드를 찾는 실험을 하였다. 유도초음파는 주어진 진동수 영역에 여러 개의 모드가 존재하고, 각 모드들은 서로 다른 전파특성을 가지므로 목적에 따라 어떠한 유도초음파 모드를 선택하여 사용할 것인가를 결정하여야 한다. 모드의 선택은 우선적으로 진동수영역을 결정함으로써 시작되는데 이를 위해서는 시편의 두께와 탐상거리, 그리고 결함에 대한 민감도를 고려하여야한다.

2.2. 코팅 없는 배관에 대한 유도초음파 실험

2.2.1. 분산선도 및 시간-주파수 분석법을 이용한 모드 분석

관에서 유도초음파의 모드를 나타내기 위해 두 개의 첨자 M(circumferential order)과 n(mode number)을 사용하고 있다. 유도초음파 모드는 크게 축 대칭 모드와 비축대칭 모드로 나눌 수 있고, 여기서 축 대칭 모드는 다시 longitudinal 모드와 torsional 모드로 나누어 생각할 수 있으며 각 모드는 다음과 같다.

- Longitudinal modes(axisymmetric modes) : L(0, n)
- Torsional modes(axisymmetric modes) : T(0, n)
- Flexural modes(non-axisymmetric modes) : F(M, n)

M = 0 인 경우에는 관의 단면상에서 유도초음파 모드 변위선도의 형상이 관의 축에 대칭인 모드이고, M = 1, 2, 3...인 경우 비축대칭 모드이다.

유도초음파의 전파의 특성을 이해하고 비파괴탐상에 적용하기 위해서는 주어진 진동수영역에서 존재 가능한

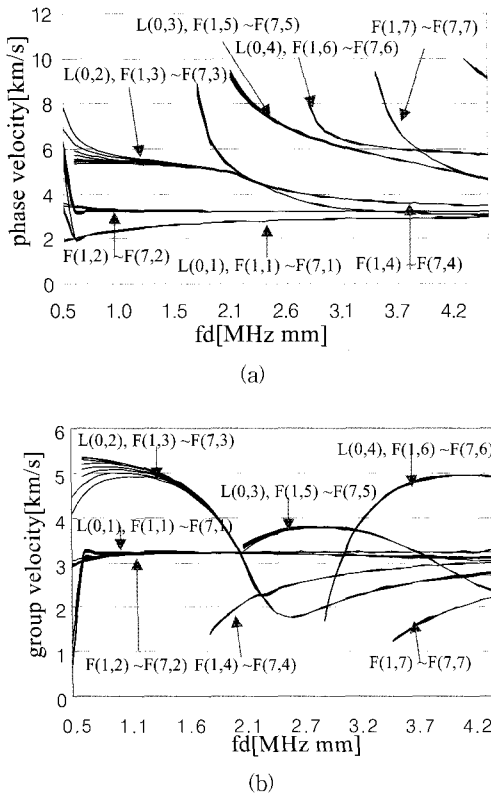


Fig. 6 (a) Phase velocity and (b) group velocity dispersion curves for the steel gas pipe with the thickness of 5.3mm and the outer diameter of 190.7mm. The longitudinal and shear wave velocities are 5.92 km/s and 3.2 km/s, respectively

모드를 찾고 각 모드의 분산특성을 이론적으로 예측하는 것이 우선적으로 행해져야 한다. Fig. 6은 외경 190.7mm이며, 두께 5.3mm인 코팅이 없는 가스배관을 전파하는 유도초음파의 분산선도를 이론적으로 구한 결과를 나타낸 것이다. 이 분산선도는 L(0,1), L(0,2), L(0,3) 그리고 L(0,4)인 Longitudinal 모드와 F(M,n)인 Flexural 모드에 대해 나타냈다.

시간-주파수 분석법을 이용한 모드 분석은 모드의 패턴을 군속도 분산선도와 비교함으로써 모드를 확인하는 방법이다. Fig. 7 (a)는 pitch-catch 기법으로 코팅이 없는 배관에서 송신과 수신 탐촉자 사이의 거리를 1m의 간격으로 놓고 30°의 각도로 획득한 신호인데, 시간영역에서의 RF 신호를 보면 여러 개의 모드가 전파되고 있음을 보여주고 있으나 구체적으로 몇 개의 모드가 그리고 어떠한 모드가 존재하는지 알기 어렵다. 그러나 Fig. 7 (b)에 나타낸 STFT를 이용하여 얻은 시간-주파수영역의 신호를 보면 주파수에 따른 도착시간의 정보가 함께 나타날 뿐 아니라, 각 모드의 분산양상이 또한 명확히 나타나고있다. 물론 STFT에 의해 얻어지는 분산양상은 유도초음파의 전파거리에 따라 분산의 정도는 달라지나 분산의 경향은 그대로 유지된다.

Fig. 7 (b)에는 좀더 쉽게 모드를 확인하기 위해서 시간 축과 주파수축을 달리하여 나타낸 것이다. 기존의 STFT는 x축이 시간 축이고, y축은 주파수 축이었기 때문에 군속도 분산선도와 패턴을 비교할 때 불편함이 있었다. 이를 개선하기 위해서 x축을 주파수축, y축을 시간 축으로 변환시켰다. 또한 배관의 두께 d가 5.3mm로 일정

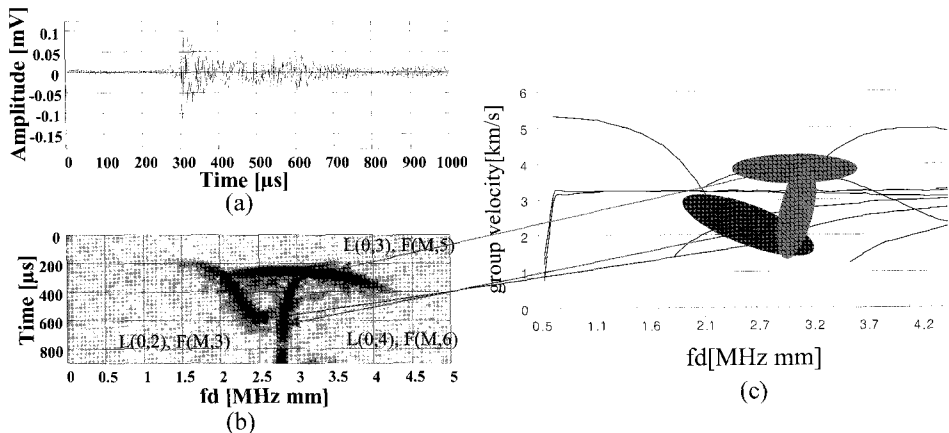


Fig. 7 Guided wave mode identification by using modified Short Time Fourier transform

하다는 가정 하에 주파수에 두께  $d$ 를 곱하여 x축을 Fig. 7 (c)에 나타낸 균속도 분산선도와 일치시켰다. 이렇게 하여 획득한 Fig. 7에 보인 STFT의 결과는 균속도

분산선도와 쉽게 일치함을 쉽게 알 수 있다. 따라서, Fig. 7 (a)의 신호를 보면 몇 개의 다중 모드가 발생했는지를 파악하기 힘들지만 STFT 결과로부터 L(0,2), F(M,3) 모드, L(0,3), F(M,5) 모드, 그리고 L(0,4), F(M,6) 모드가 중첩되어있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 코팅이 없는 배관에 대한 실험 결과인데, 시간-주파수 분석법을 통해 알 수 있듯이 여러 모드가 동시에 발생한다는 것을 볼 수 있다. (a)는 입사각이 30°인 경우 pitch-catch법으로 획득한 신호로서 L(0, 2), F(M, 3) 모드, L(0, 3), F(M, 5) 모드, 그리고 L(0, 4), F(M, 6) 모드가 모두 잘 나타나고 있는 것을 알 수 있다. (b)는 입사각이 40°인 신호인데, L(0, 2), F(M, 3) 모드는 (a)의 경우 보다 선명하게 잘 나타나지만 L(0, 3), F(M, 5) 모드와 L(0, 4), F(M, 6) 모드는 약하게 나왔다. (c)는 입사각이 70°로서 L(0, 2), F(M, 3) 모드와 L(0, 1), F(M, 1) 모드가 나타났다.

2.3. 코팅 배관에 대한 유도초음파 실험

2.3.1. 폴리에틸렌 코팅 배관 내의 유도초음파 전파 특성

Fig. 9는 2.2.1절에서 언급한 코팅이 없는 배관에 적용한 것과 같은 실험 조건으로 코팅이 되어 있는 배관에 대해 실험결과를 나타내고 있는데, 코팅이 되어있지 않은 배관에 대한 실험 결과에 대해 L(0,2), F(M,3) 모드를 제외하고 다른 모드들은 잘 나타나지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폴리에틸렌 코팅배관 결함탐상에 L(0,2), F(M,3) 모드를 선정하여 이 모드에 대한 특성 분석과 이 모드를 이용하여 결함탐상을 하였다.

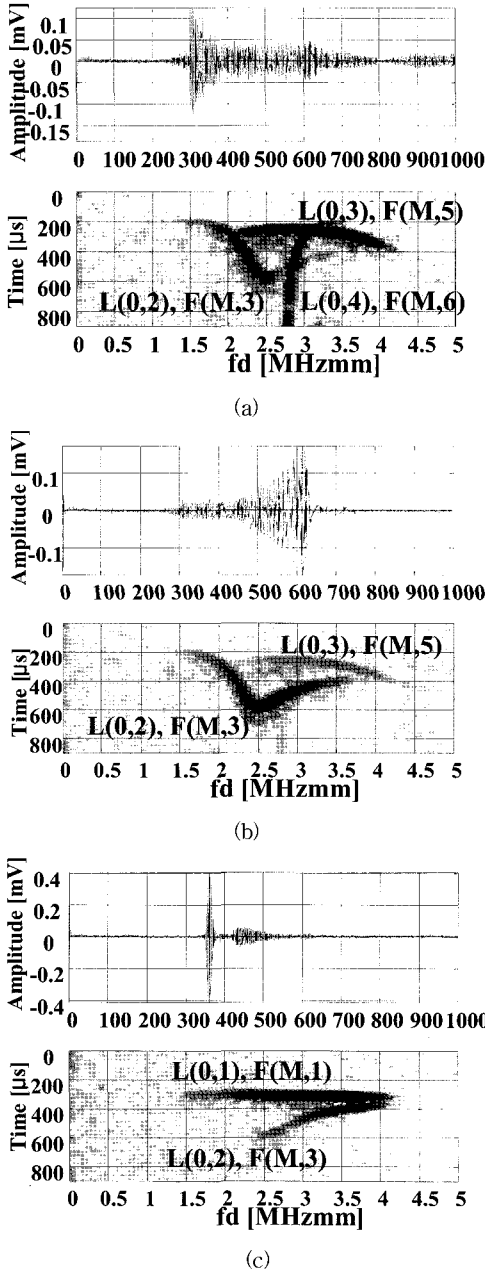
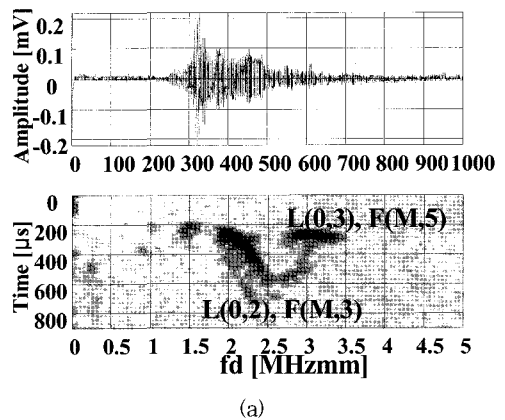


Fig. 8 RF waveforms and their short time Fourier transforms at various angles from the pipe without coating (a) 30°, (b) 45° and (c) 70°



(a)

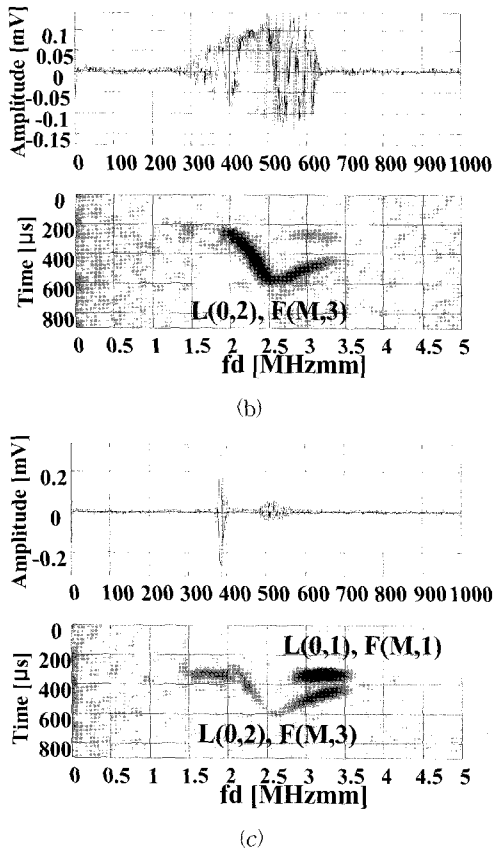


Fig. 9 RF waveforms and their short time Fourier transforms at various angles from the coated pipe (a) 30°, (b) 45° and (c) 70

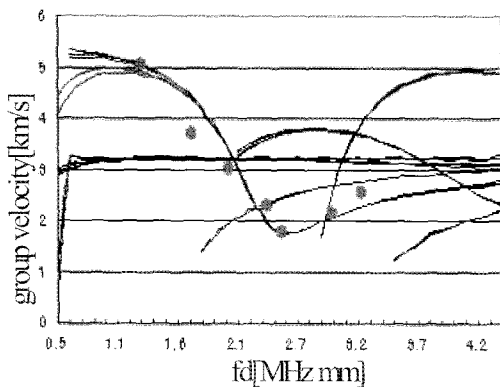


Fig. 10 Group velocity dispersion curves for steel piping without coating and experimentally measured group velocities (circle marks) of guided waves in the polyethylene coating pipe

Fig. 10은 코팅된 배관 내의 유도초음파 군속도를 실험적으로 측정하여 이를 코팅이 없는 배관의 분산 선도에 나타낸 것이다. 이 경우 송신과 수신에 사용된 탐촉자는 중심 주파수가 0.5MHz이고, 파이프의 상단에 정렬되어 있으며 입사각은 코팅 처리되지 않은 파이프에서의 4.2 km/s의 위상속도에 부합되게 40°로 하였다. 결과적으로, 코팅된 파이프의 군속도는 L(0,2), F(M,3) 모드의 분산선도와 비슷한 유형을 따르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 송신과 수신 탐촉자 사이의 축 거리의 변화에 따른 유도초음파의 진폭 변화를 보여주고 있다. "On-line"은 측정 시 탐촉자들을 파이프 상단에 나란히 정렬시켜 수행한 결과이고, "Off-line"은 송신 탐촉자를 파이프의 상단에 두고, 수신 탐촉자를 원주방향으로 90° 위치 방향에 놓고 실험을 수행한 결과이다. "On-line" 측정의 경우 일반적으로 거리의 증가에 따라 진폭이 감소하는 반면, "Off-line" 측정에서는 진폭이 오히려 증가한다. 이들의 진폭은 1m 지점에서 거의 같아지는 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 유도초음파가 거리에 따른 원주방향의 진폭 변화를 보여주고 있다. 송·수신 탐촉자 거리가 (a) 50cm, (b) 70cm, 그리고 (c) 90cm에서 원주방향의 진폭 변화를 나타낸 것이다. 측정 시 송신 탐촉자를 파이프의 상단에 고정시키고, 수신 탐촉자를 각각의 거리에서 원주 방향으로 회전하면서 유도초음파의 진폭을 측정하였는데, Fig. 12에 보인 바와 같이 유도초음파는 비축대칭으로 진행하는 것을 알 수 있다.

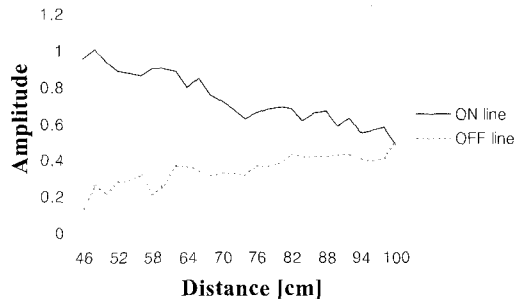


Fig. 11 Amplitude variations for the change of the distance between sending and receiving transducers. "On-line" indicates that the sending and receiving transducers are on top of the pipe, and "Off-line" indicates that the sending transducer is on top of the pipe and the receiving transducer is on the side of the pipe

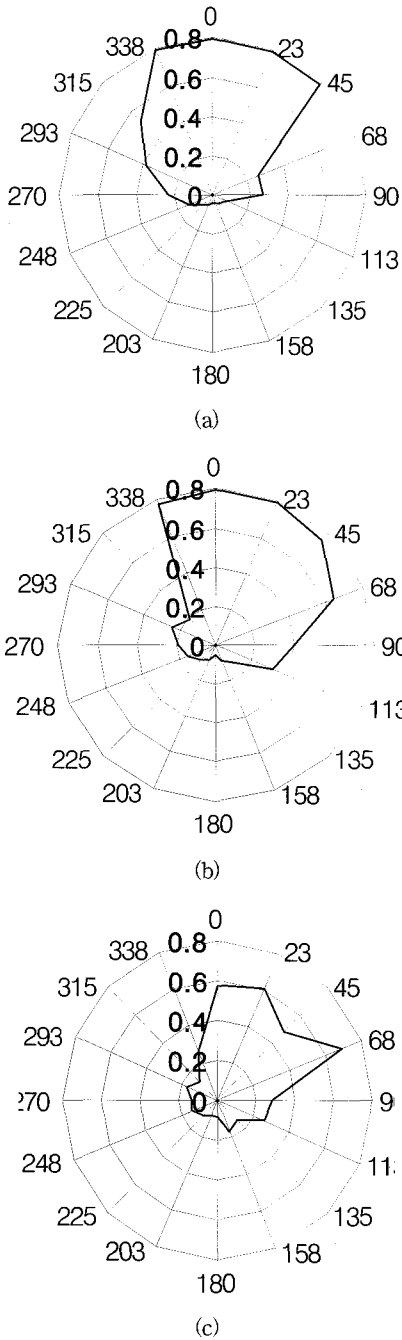


Fig. 12 Circumferential amplitude distribution of the guided waves at different distances between sending and receiving transducers. (a) 50 cm, (b) 70 cm and (c) 90 cm

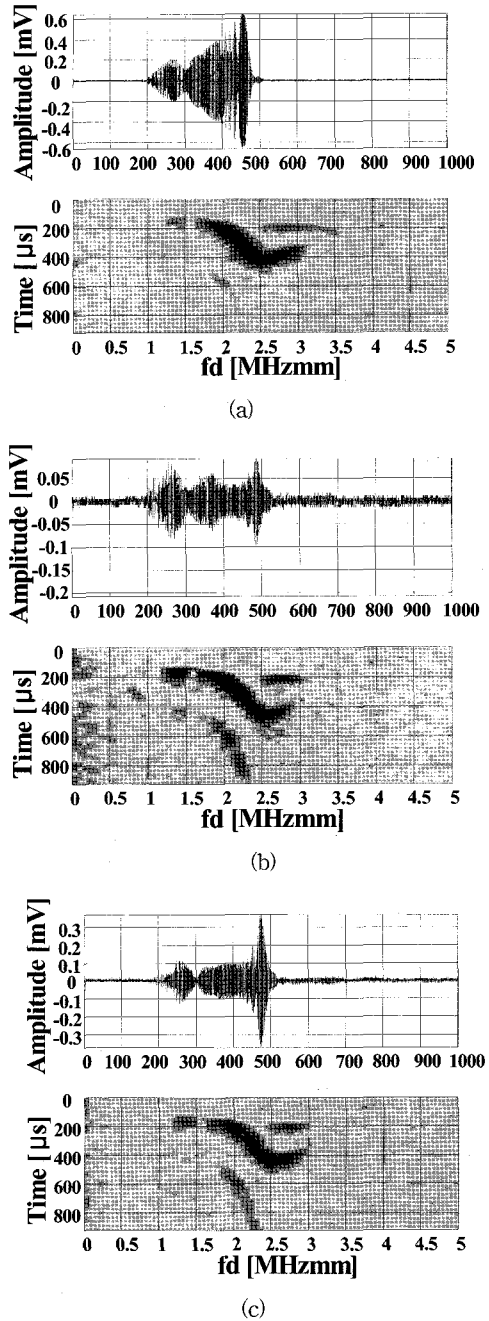


Fig. 13 Guided wave signals and their time-frequency representations when the distance between sending and receiving transducers is 70cm while the circumferential angle between the transducers are (a) 90, (b) 180 and (c) 270 degrees

Fig. 13은 송·수신 탐촉자 거리를 70 cm로 유지한 상태에서 송·수신 탐촉자간의 원주방향 각도를 (a) 90°, (b) 180° 그리고 (c) 270° 로 하여 유도초음파 RF신호를 획득하고, 이에 대한 시간-주파수 분석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 시간 영역 신호는 많은 변화를 보였지만 분산 특성은 Fig. 10에서 보인 모드 형태와 일치했다. 그리고 0.5MHz에서 유도초음파 군속도는 1.85km/s이다. 실제로 이런 모드의 분산 패턴은 L(0,2), F(M,3) 모드와 매우 유사한 패턴을 나타내고 있다.

3.3.2. 결함탐상

이전 절에 논의한 모드 분석은 폴리에틸렌 코팅 가스 배관의 결함 검출을 위한 모드를 선택하기 위한 것이다. 이 절에서는 이렇게 선택된 모드를 적용하여 실제 결함 검출을 수행한 결과를 기술하였다. 결함검출을 위해 pulse-echo 방식으로 결함신호를 획득하였다. 실험 조건은 입사각 40°, 중심주파수 0.5 MHz로 같은 탐촉자를 사용하였다. Fig. 14에 직경 1.7mm의 구멍에 대한 결함 탐상 결과와 100:1의 비율로 테이퍼 된 결함에 대한 탐상 결과를 나타내었다. 탐촉자는 두께 손실과 원통형 광통결함에서부터 각각 620mm, 520mm 떨어진 곳에 위치시켰다. 시간-주파수 영역에서 결함을 맞고 돌아온 신호 패턴은 선정된 모드임이 확인되고, 0.5 MHz의 군속도 분산선도를 이용하여 신호 도착시간으로부터 측정된 결함의 위치는 각각 619.8 mm, 518 mm이었다. 결과적으로 결함을 성공적으로 검출하였으나 유도초음파를 이용하여 결함의 종류 및 결함 크기 산정은 수행하지 못하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리에틸렌 코팅 가스배관에 광범위 비파괴탐상을 적용하기 위한 유도초음파 모드 선정과 특성파악, 그리고 수신신호의 모드 분석을 위한 시간-주파수 분석법을 적용하였다. 본 연구에서 연구한 신호처리 기법은 최근에 연구가 수행되고있는 시간-주파수 분석법인 SIFT를 이용하였는데, 모드 확인이 더욱 편리하도록 SIFT의 축을 보완하여 형태를 비교하도록 표현방식을 개선하였다.

유도초음파는 수많은 모드가 있는데 이중에서 L(0, 2), F(M, 3) 모드를 이용하여, 코팅 배관 결함탐상 연구를 수행하였고, 이 모드의 거리에 대한 진폭 변화, 원주방향으

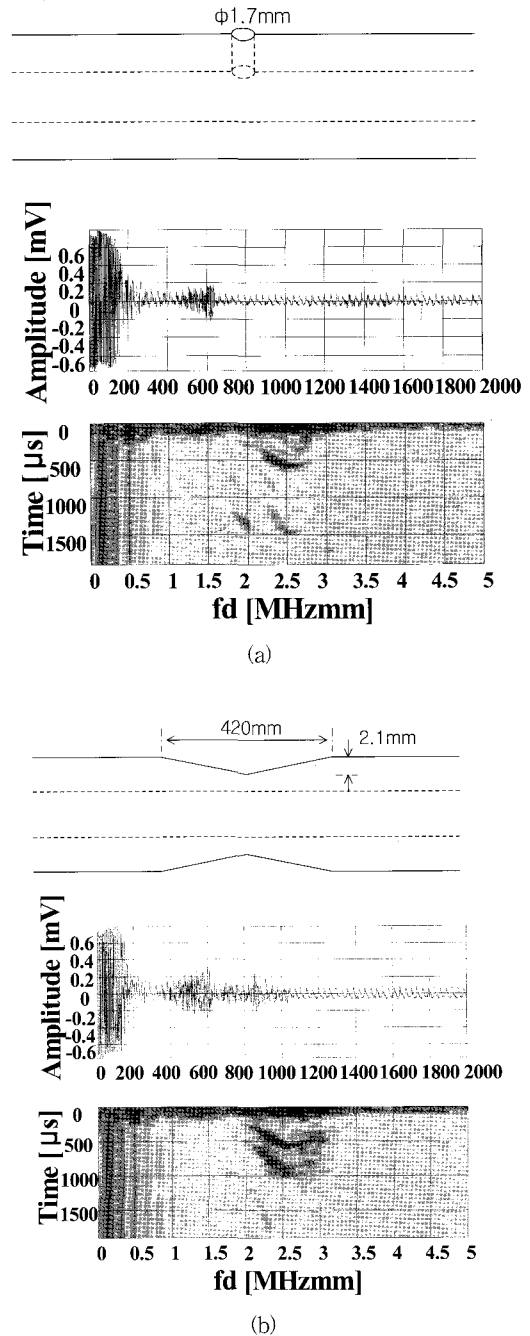


Fig. 14 Specifications of artificial defects and guided wave signals captured from the defects in polyethylene coated pipes (a) through wall hole and (b) wall thinning with 100:1 taper



로 진폭 변화 등의 특성을 pitch-catch 방법으로 조사하였다. 그리고 선정된 모드를 사용하여 원통형 관통결함, 두께손실에 대한 결함탐상을 하였다.

## 5. 후 기

본 연구는 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Gazis, D. C., "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 31, No. 5, pp. 568-573, May (1959)
- [2] Armenakas, A. E., Gazis D. D., Herrmann, G., "Free Vibrations of Circular Cylindrical Shells", Pergamon Press, (1969)
- [3] Greenspon, Joshua E., "Vibrations of a thick-walled cylindrical shell Comparison of the exact theory with approximate theories," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 32(5), 571-578, (1960)
- [4] Fitch, A. H., "Observation of Elastic-Pulse Propagation in Axially Symmetric and Nonaxially Symmetric Longitudinal Modes of Hollow Cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 35, 706-708 (1963)
- [5] Brook, M, Ngoc, T. D. K., and Eder, J., "Ultrasonic inspection of steam generator tubing by cylindrical guided waves," *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol. 9, pp. 243-249, (1990)
- [6] Ditri, J. J. and Rose, J. L., "Excitation of guided wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions," *J. App. Phys.*, Vol. 72(7), 2589-2597, (1992)
- [7] Ditri, J. J., "Utilization of guided elastic waves for the characterization of circumferential cracks in hollow cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 96, 3769-3775, (1994)
- [8] Rose, J. L., Ditri, J. J., Pilarski, A., Rajana, K. M. and Carr, F. "A guided wave Inspection Technique for Nuclear Steam Generator Tubing," *NDT&E International*, Vol. 27, No. 6, pp. 307-310, (1994)
- [9] Kwun, H. and Bartels, K.A., "Experimental observation of elastic-wave dispersion in bonded solids of various configurations," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 99(2), pp. 962-968, (1996)
- [10] David N. Alleyne, and Peter Cawley, "Optimization of Lamb wave inspection technique," *NDT&E International*, Vol. 25, No. 1, pp. 11-22, (1992)
- [11] Shin, H.J. and Rose, J.L., "Guided Wave Tuning Principles for Defect Detection in Tubing", *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 17, No. 1, pp. 27-36, (1998)
- [12] Younho Cho, Joseph L. Rose, "Guided waves in a water loaded hollow cylinder", *Nondestr. Test. Eval.*, Vol. 12, pp. 323-339, (1996)
- [13] Joseph L. Rose, Younho Cho, "Ultrasonic guided wave inspection potential in the power generation field", *Safety & NDT' 95*, pp. 101-115, Oct, (1995)
- [14] Younho Cho, Derrick D. Hongerholt, Joseph L. Rose, "Lamb Wave Scattering Analysis for Reflector Characterization", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. Vol. 44, No. 1, pp. 44-52, (1999)
- [15] 신현재, Joseph L. Rose, 송성진, "유도초음파를 이용한 열 교환기 튜브 결함 탐상", *비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-9, (2000)
- [16] Alleyne D. N., Lowe M., Cawley P., "The inspection chemical plant pipework using lamb waves: defect sensitivity and field experience", *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. O Thompson and D. E. Chimenti eds, Plenum Press, New York, Vol.19, Vol 15, P. 1589, (1996)
- [17] H. Kwun, K. A. Bartels, "Magnetostrictive sensor technology and its applications", *Ultrasonics*, Vol. 36, pp. 27-36, (1998)
- [18] H. J. Shin and Song, S. J., "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)