

# 유도초음파를 이용한 대구경 배관 적용에 관한 연구 Application of Thin-Walled Tubes Using Guided Wave

박상기 · 이영호

S. K. Park and Y. H. Lee

**Key Words** : Guided Wave(유도초음파), Pipe Inspection(배관검사), Mode Analysis(모드분석), Long Range(장거리), Dispersion Curve(분산곡선)

**Abstract** : A method to test thin-walled tubes by guided ultrasonic wave is reported. The principle is that applicate two types of axially symmetric ultrasonic tube modes and "longitudinal" modes with particle displacement, which is coupled in axial and radial directions for transverse failures and torsional modes, oscillating in the circumferential direction only, for longitudinal failures. Both types of modes propagate along the tube in the axial direction. Therefore, a pulse-echo technique is possible. The pulses are excited and received at one end of the tube without contact electro-dynamic transducers. As soon as the tubes is put into a transducer coil at one end, the test of the whole tube can be accomplished in a few milliseconds. It is not necessary to rotate and transport the tubes during the test.

## 기호설명

- h : 두께
- u : 미소변위
- $\phi$  : 위치스칼라
- $\psi$  : 변위벡터
- $k_l$  : 횡파의 수(number)
- $k_t$  : 종파의 수(number)
- $\omega$  : 주파수 각
- $\lambda$  : 램(Lamb) 탄성계수
- $\mu$  : 램(Lamb) 탄성계수
- $\rho$  : 매질의 밀도

## 1. 서 론

우리가 일상생활 속에서 사용하고 있는 기기들은 금속, 세라믹, 플라스틱 등의 다양한 소재로 만들어져 있다. 이들 재료나 구조물의 신뢰성은 충분히 확보되어 있다고 생각하기 때문에 별 생각 없이 사용하게 된다. 제품의 신뢰성을 보증하기 위한 실험적

검증 데이터의 확보 수단으로는 재료, 기기, 구조물의 직접 파단면 관찰, 인장시험 등을 통해 기계적 강도를 평가하는 파괴시험 및 이것을 대신하는 비파괴시험(Nondestructive testing : NDT) 등이 있다. 비파괴시험은 소재, 기기, 구조물의 품질관리나 품질보증의 한 수단으로 이용되는 계측기법으로 재료, 제품, 구조물 등의 종류에 거의 상관없이 시험대상을 손상, 분리, 파괴시키지 않고 원형 그대로 유지한 상태에서 시험체의 표면, 내부의 결함유무와 그 상태 또는 대상물의 성질, 내부구조 등을 조사하는 시험전체를 말한다<sup>1)</sup>. 이 중에서 유도초음파(ultra-sonic guided wave)법은 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서, 광범위한 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 여러 분야에 적용될 수 있고, 기존의 종파나 횡파를 사용한 국부 검사법에 비해 탐촉자의 이동 없이 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, 보온재나 제한된 공간으로 인하여 검사자의 접근이 곤란하고 복잡하다든가, 다양한 피검사체의 형상을 따라 원거리 초음파탐상이 어려운 발전설비의 보수검사에 적극 활용되고 있다<sup>2~7)</sup>.

접수일 : 2007년 7월 18일, 채택확정 : 2007년 12월 13일  
박상기(책임저자) : 전력연구원  
E-mail : [skpark@kepri.re.kr](mailto:skpark@kepri.re.kr), Tel : 042-865-5342  
이영호 : 충남대학교 기계공학과

본 연구에서는 이러한 유도초음파의 이론적 배경을 바탕으로 산업체 현장에서 사용되고 있는 각종 배관 및 튜브류에 대하여 현장적용 시험을 수행하고 그 결과를 실험실적인 데이터와 비교분석함으로써 보다 정확한 평가가 이루어지도록 하였으며, 한편으로는 신소재, 첨단재료 등에도 이러한 비파괴평가기법을 도입하여 품질보증 확립에 기여할 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

## 2. 유도초음파 발생 및 수신 메카니즘

### 2.1 유도초음파의 원리

유도초음파는 박판, 원통 및 구형과 같은 자유경계면(free boundaries)을 가지는 시험체 내로 진행하며, 이것은 시험체의 전 두께를 통하여 진행되는 복잡한 진동형태로 구성되어 있다. 유도초음파는 탄성파에 의한 관과 자유경계면을 가지는 평판의 경우에 나타난다. 이러한 독특한 응답의 유도초음파는 종파나 횡파와 같은 대부분의 초음파와는 구별된다. 두께와 변환주파수가 주어진 평판에 유도초음파를 입사시키면 여러 가지의 모드가 발생한다. 이러한 모드들은 Fig. 2에서와 같이 대칭형 및 비대칭형의 두 가지 기본형을 가진다. Fig. 1은 양의 방향 x 지시와 두께 2h의 평판에서 전달되는 조화 유도초음파이다. 여기서, 미소변위 u는 위치 스칼라  $\phi$ 와 변위 벡터  $\Psi$ 에 의해 다음 관계식이 성립한다.

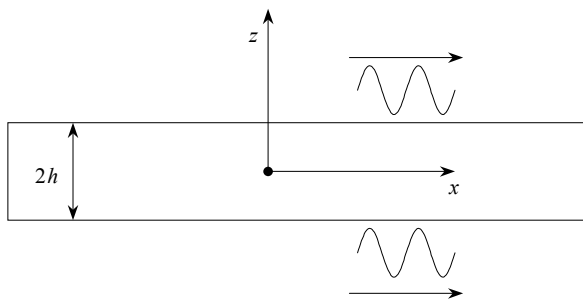


Fig. 1 Propagation of a plane harmonic Lamb waves

$$u = \nabla\phi + \nabla \times \Psi \quad (1)$$

이 경우, 파동(wave)은 2차 평면상에 표시되고, 운동경로는 좌표 y에 의존하지 않는다. 또한, 위치 벡터  $\Psi$ 는 y축 지시에서의 진폭은 0이 아닌 값을 가진다. 위치에너지  $\phi$ 와  $\Psi$ 는 각각 종파와 횡파로 나타내어지고, 다음 식을 만족한다.

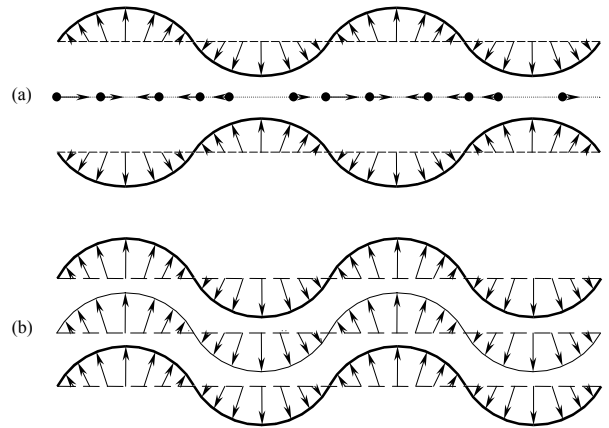


Fig. 2 Symmetric(a) and anti-symmetric mode(b)

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} + k_1^2 \Psi = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k_1^2 \phi = 0 \quad (3)$$

여기서,  $k_1$ 과  $k_t$ 는 각각 종파와 횡파의 수(number)이고, 다음과 같다.

$$k_1 = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\lambda + 2\mu}} \quad (4)$$

$$k_t = \omega \sqrt{\frac{\rho}{\mu}} \quad (5)$$

여기서,  $\omega$ 는 주파수 각이고,  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 램 탄성계수이다. 그리고,  $\rho$ 는 매질의 밀도이다. x와 z축에 따른 미소 변위벡터 u의 성분인 U와 W는 위치에너지  $\phi$ 와  $\Psi$ 로 다음식과 같이 나타내어진다.

$$U = \frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (6)$$

$$W = \frac{\partial \Psi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (7)$$

위치 값  $\phi$ 와  $\Psi$ , 변위 값 U와 W에 대한 위의 수식은 각각 파의 운동방정식과 초기조건을 만족하는 두 개의 파군(wave group)으로 나타난다. 여기서, 첫 번째 군의 파형을 대칭 유도초음파라 하고, 두 번째 군의 파형을 비대칭 유도초음파라 한다.

### 2.2 유도초음파의 모드 특성

유도 초음파의 진행방향이 관의 길이방향인 경우 유도 초음파 모드를 나타내기 위해서 두 개의 첨자

원주방향 차수와 모드수를 사용하고 있다. 원주방향 차수가 0인 경우에는 관의 축에 대해 대칭이고 0이 아닌 경우에는 축 대칭 모드(axisymmetric modes)를 나타내는데, 축 대칭인 모드는 다시 종형 모드와 비틀림형 모드로 파가 관의 벽 속에서 진동하는 양상에 따라 구별되어진다. 종형 모드는 파의 진동하는 성분이 관의 길이방향과 반경방향으로만 있는 경우로서  $L(0,n)$ 로 나타내며, 비틀림형 모드는 파의 진동성분이 원주방향으로만 있을 경우로서  $T(0,n)$ 로 나타낸다. 그리고 원주방향 차수가 1, 2, 3...인 경우에는 비축대칭인 모드(non-axisymmetric modes)를 나타내는데 이것을 굽힘형 모드라고 부르며  $F(0,n)$ 로 표시한다. 굽힘형 모드의 경우에는 관의 벽 속에서 파의 진동성분이 세 방향(반경, 원주 그리고 길이방향)으로 모두 존재한다.

- 종형 모드 :  $L(0,n)$     축대칭 모드
- 비틀림형 모드 :  $T(0,n)$     축대칭 모드
- 굽힘형 모드 :  $F(0,n)$     비축대칭 모드

종형 모드와 비틀림형 모드는 원주방향 차수가 0에서 무한한 수의 모드를 가지고 있고, 또한, 원주방향 차수가 1, 2, 3... 에서도 원주방향 차수에 대해 무한한 수의 굽힘형 모드의 수를 가지고 있다. 유도초음파가 관을 따라 전파할 때 종형 모드, 굽힘형 모드, 비틀림형 모드의 세 종류 모드가 존재할 수 있다. 일반적으로, 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 종형 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 발생될 수 있으며, 축 대칭으로 분석이 매우 간단하기 때문이다. 그러나 비축대칭 센서의 사용 또는 비축대칭 결함으로부터의 반사 등으로 인하여 실험적으로 비축대칭인 모드, 즉 굽힘형 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고 비틀림형 모드는 실험적으로 발생, 수신하는데 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어지기 때문에 잘 사용하지 않고 있다.

### 3. 시스템 구성

#### 3.1 시험편

Fig. 3은 대구경 배관 시험편을 나타내고 있으며, 바깥지름 508mm, 두께 19mm, 길이 16m이다. 이

배관은 실제 발전설비 배관으로 사용되었던 것이며, 중앙부에 용접이음을 하였고 수직, 수평행거와 지지대(support)로 고정되어 있다. 또한, 내부 용접부에 두께 감육을 모의한 결함을 가공하였으며, 이에 대한 그림 및 설명은 Fig. 11의 (a)와 (b)에 나타나 있다.

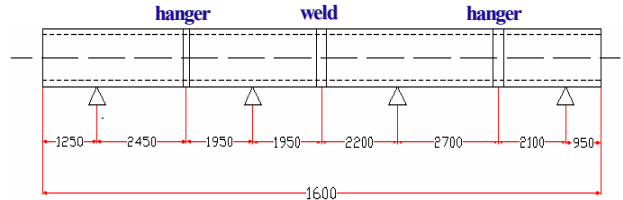


Fig. 3 The geometric of pipe specimens with large diameters

#### 3.2 실험장치

본 연구에서 사용된 장거리 유도초음파 탐상 장치는 GUL사(Wavemaker SE16)의 장비로 유도 초음파를 발생하여 구조물의 용접부, 결함 또는 부식으로 인한 두께 감육부에 대한 평가를 할 수 있다. 본 실험에 사용된 배관과 같은 구조물 내에서 발생할 수 있는 유도초음파 모드는 종형, 비틀림, 굽힘형 모드로 본 시스템이 발생 가능한 모드는 종형, 비틀림형 모드이다. Fig. 4는 유도 초음파를 발생시키는 시스템구성을 나타내고 있으며, 신호를 송·수신하는 실험장치와 이를 구동하기 위한 제어 컴퓨터와 탐촉자로 구성되어 있다.

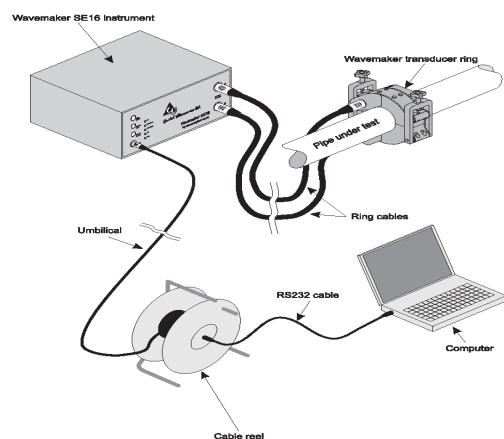


Fig. 4 The diagram of the wavemaker SE16 system

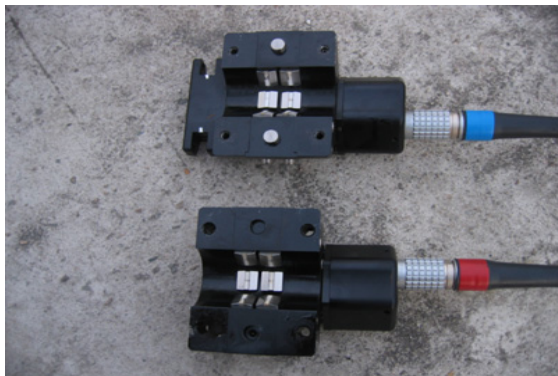
#### 3.2.1 탐촉자

본 시스템에서 사용되는 탐촉자는 배관의 직경에 따라서 적용되는 탐촉자가 다르며, 대구경 배관에

적용되는 Fig. 5(a)의 탐촉자 구성은 2개의 열과 4개 구역으로 나뉘어 있으며, 총 80개의 요소로 이루어지고 탐촉자의 요소 간격은 35 mm이다. Fig. 5(b)는 소구경 배관에 적용하며 두개의 부분으로 분리되어 있으며 사용한 주파수는 45-65kHz이다. 이



(a)



(b)

Fig. 5 Inflatable(a) and solid(b) transducer

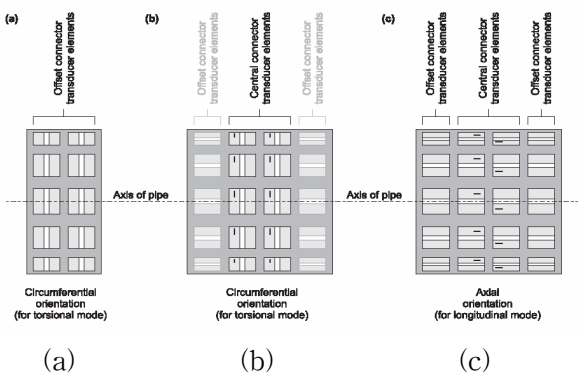


Fig. 6 Transducer element orientation in a ring

탐촉자는 2개의 열과 6개 구역으로 나뉘어 있으며 총 12개의 요소로 이루어진 탐촉자의 요소 간격은 16mm이다. Fig. 6은 본 실험에서 적용한 탐촉자의 배열 형상을 나타내며 유도 초음파의 발생모드를

조절하기 위한 센서의 방향을 표시한다. Fig. 6(a),(b)는 비틀림 모드를 발생시키며, (c)는 종형 모드를 발생시킬 수 있다.

### 3.2.2 펄서/리시버

Fig. 7은 본 실험에 사용될 장거리 유도초음파 시스템의 본체와 신호취득을 위한 모듈로서 GUL사에서 제작하였다. 본 장비는 탐촉자 요소의 배열이 Fig. 6(a)와 동일하여 이 구조에서 발생할 수 있는 유도 초음파의 모드는 비틀림(Torsional) 모드이다. 또한 Fig. 6(c)와 같이 센서의 방향을 바꾸면 종형(Longitudinal) 모드를 발생시킬 수 있다. 본 연구에 적용된 펄서/리시버는 GUL사에서 제공하는 Software를 통하여 제어되며 유도 초음파의 특성상 배관을 따라서 좌우로 전파되고 탐촉자로부터 신호를 송·수신하여 Software를 통해서 좌우가 분리되므로 분석이 가능하다. 이 펄서/리시버는 중심주파수 20~65kHz의 유도 초음파 모드를 발생시킨다. 이 장비의 장점으로서는 배관 구조물의 특별한 표면 처리 없이 탐상이 가능하며 최대 100m의 탐상범위를 가지고 있다. 그리고 다양한 직경의 배관에 적용이 가능하며, 코팅이나 매설된 배관에도 좋은 분해능으로 결함을 검출할 수 있다.



Fig. 7 Ultrasonic guided wave measuring system

### 3.3 실험방법

본 실험에서 사용된 탐촉자는 배관의 외경에 따라 다른 형태의 탐촉자를 적용하며, 구성된 센서의 수가 총 80개로 배관에 정확히 부착시키기에 다소 어려움이 있으며, Fig. 8은 배관을 따라 설치된 탐촉자의 상태를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 세로축상의 0.5~1.5사이에 두 개의 선이 모여 있어 탐촉자가 검사하고자 하는 대상체에 잘 부착되어 있음을 알 수 있다<sup>8)</sup>.

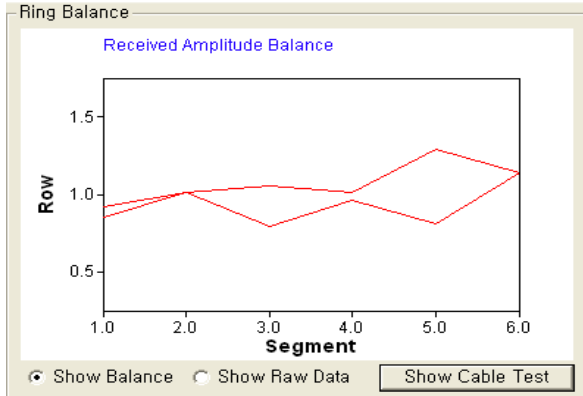


Fig. 8 The ring balance graph

### 3.4 유도 초음파 모드 식별

Fig. 9는 직경 38mm, 두께 6mm의 강관에서 발생되는 비틀림 모드의 위상속도(a)와 군속도 분산곡선(b)을 보여주고 있으며, 주파수가 높아짐에 따라 각 모드들이 일정속도에 수렴되고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 10은 장거리 유도 초음파 시스템으로부터 수신된 여러 개의 신호들을 나타내고 있으며, Fig. 10(b)는 (a)에서 수신된 신호를 RF 신호로 변환하여 나타낸 것으로서, 결과 그래프로부터 결함신호와 플랜지(flange) 신호파형을 명확히 확인할 수 있다.

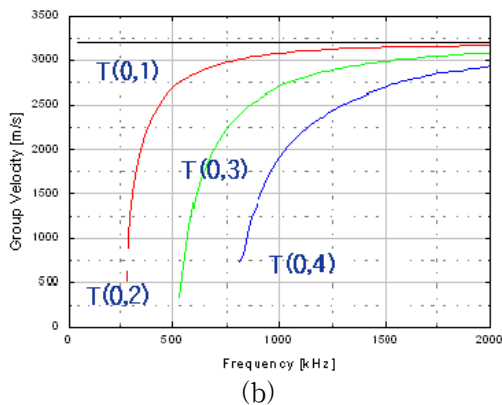
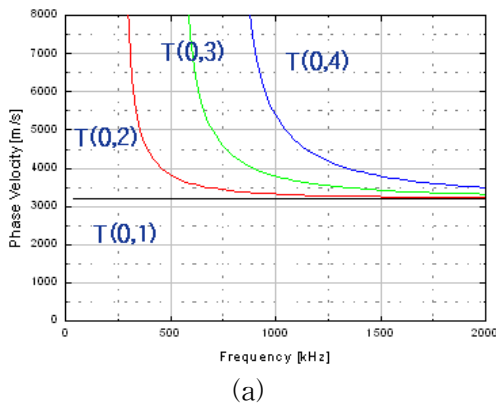


Fig. 9 Dispersion curves for Torsional mode of steel pipe(outer diameter : 38mm, thickness : 6mm)

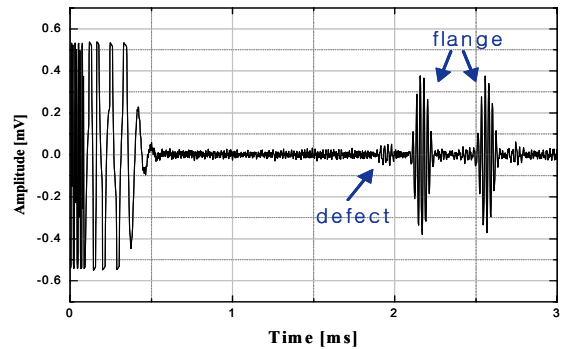
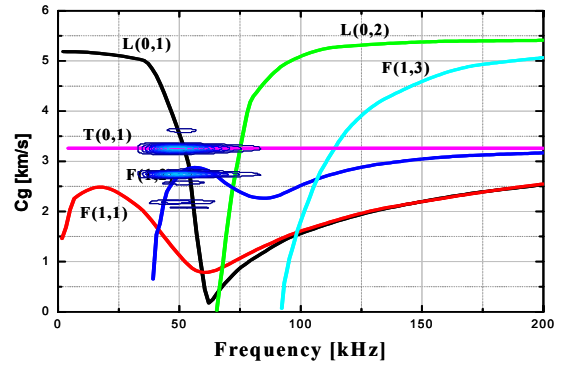


Fig. 10 Received RF-signal(a) and Wavelet transform of RF-signal(b)

### 3.5 대구경 배관탐상 적용결과

Fig. 11의 (a)와 (b)는 각각 대구경 배관에 대한 실험모습과 인공결함을 만들어 놓은 그림을 나타낸다. 배관 중앙에 용접부와 배관을 고정하기 위한 수직·수평 행거와 지지대로 이루어져 있으며 유도 초음파 탐상은 Fig. 5(a)와 같은 대구경 배열형 탐촉자를 적용하였다.

#### 3.5.1 시험편



(a)



(b)

Fig. 11 Photo. of the large-diameter pipe

### 3.5.2 배관탐상 결과

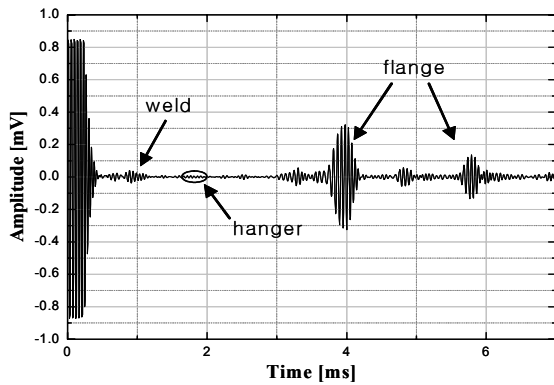


Fig. 12 Received RF-signal from large diameter pipe

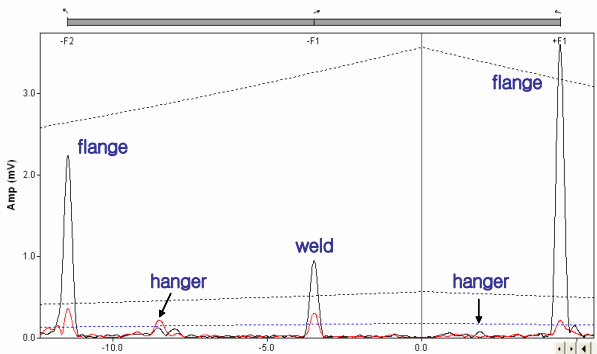


Fig. 13 Experimental result of large diameter pipe(508mm)

Fig. 12는 대구경 배관에서 획득한 RF신호로서 탐측자의 여러 영역으로부터 획득한 신호 중의 하나이며, Fig. 13과 같이 시스템에 구성된 컴퓨터 상의 프로그램을 통하여 탐상결과를 알 수가 있으며, 그림에서 3개의 선은 위로부터 각각 플랜지부, 용접부, 부식부를 나타내는 보정곡선이고, 가로축은 탐

측자의 설치위치로부터 해당 신호파형까지의 거리를 나타내며, 세로축은 각 파형의 크기를 그리고 중앙의 녹색선은 탐측자가 설치된 지점을 나타낸 것으로서 대칭적인 감육을 나타내는 검은색 신호와 비대칭적인 감육을 나타내는 붉은색 신호의 꼭지점 (pick point) 차이가 크므로 배관의 상태가 비교적 양호함을 알 수가 있다.

## 4. 현장 적용시험

### 4.1 발전소 주증기관



Fig. 14 Photo. of the main steam pipe

Fig. 14는 508mm 주증기관이며, 가열기 출구에서 터빈 입구까지의 배관의 상태를 진단하기 위해 현장에 설치된 탐측자를 나타낸다.

본 실험에서 대구경 장거리 유도 초음파를 적용한 결과 각 주파수에 따라 상당히 많은 노이즈로 인해 시험편으로부터 신호를 정확히 구별하기 힘든 탐상결과를 얻었다<sup>8)</sup>. 이러한 탐상결과 of 원인으로 첫째, 탐측자의 설치 위치에 문제가 있었다. 기본적으로 탐측자는 인공장애물(여기서는 헤더)에서 2 m 이상 떨어진 곳에 설치해야 하나, 현장 여건상 탐측자를 헤더 바로 옆에다 설치하여 시험함으로써 원하는 신호를 얻는 것이 불가능 하였고, 둘째는 Fig. 15의 결과 그래프에서 볼 수 있는 바와 같이 수많은 노이즈(Noise)가 포함되어, 신호해석이 불가능 하였는데 이는 아마도 배관의 어느 부분에서 용접작업이나 Grinding 작업을 하고 있었던 것으로 판단되며, 그래프에서 가로축과 세로축은 각각 탐측자 설치위치로부터의 거리와 파형의 진폭을 나타내며, 검은색 파형은 대칭신호를 그리고 붉은색 파형은 비대칭신호를 표시한다.

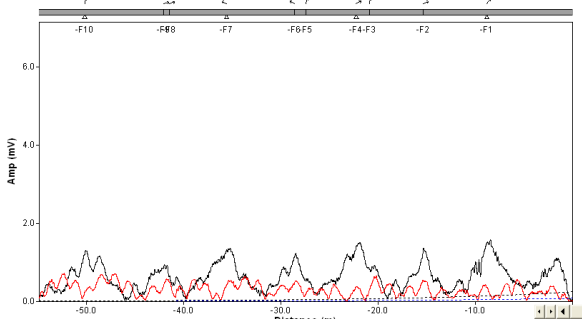


Fig. 15 Experimental results of the pipe at thermal power plant

#### 4.2 정유공장



Fig. 16 Photo. of oil line

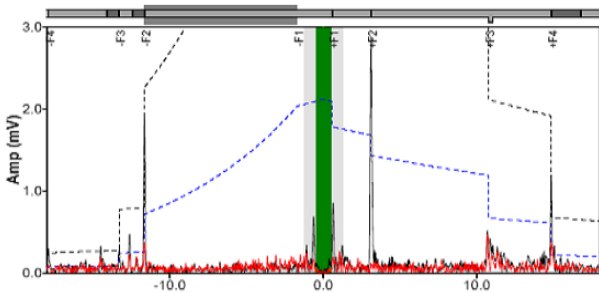


Fig. 17 Test result of 609mm pipe

본 실험은 울산에 있는 정유공장의 요청으로 이루어 졌으며, 진단의 초점은 도로를 가로지르는 배관의 상태를 진단할 수 있는지 여부에 있었다. 진단결과 약 16m 도로를 횡단하는 609mm배관의 건전성 진단에는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었으며, Fig. 16은 시험을 위해 탐촉자가 설치된 사진을 나타내며, Fig. 17의 결과 그래프에서 중앙의 녹색 선은 탐촉자의 설치위치를 표시하고 있고 검은색과

파란색선은 각각 용접부와 부식부분을 나타내는 보정곡선(DAC curve)으로서 배관의 각 용접부 신호를 나타내는 파형을 제외하고는 대부분의 파형들이 이들 선의 아래부분에 위치하고 있어 배관의 상태가 비교적 건전함을 알 수 있었다<sup>8)</sup>.

### 5. 결론

유도초음파를 이용하여 대구경 배관에 적용한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 대구경 배관에 장거리 유도 초음파를 적용한 결과 각 주파수에 따라 상당히 많은 노이즈로 인해 시험편으로부터 신호를 정확히 구별하기 힘든 탐상 결과를 얻었으며, 이러한 실험으로 부터 유도초음파가 주변환경에 민감한 영향을 받는다는 사실을 확인할 수 있었다.
2. 도로를 횡단하는 배관의 건전성 진단에 있어서는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었으며, 곡관부의 신호 또한 잘 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.
3. 본 연구를 통하여 발전소의 배관뿐만 아니라 특히, 정유 및 화학공장에서도 그 적용성이 뛰어난을 입증할 수 있었다.

### 참고문헌

1. 박은수, 박익근, 송성진, 2005, "비파괴 평가공학", 학연사, pp. 1~2.
2. S. J. Song, J. S. Park and H. J. Shin, 2001, "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.
3. D. N. alleyne and P. Cawley, 1997, " Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework", Materials Evaluation, Vol. 52, No. 7, pp. 504~508.
4. Y. H. Cho, 2001, "Understanding and Application of Ultrasonic Guided Waves", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 21, No. 4, pp. 446~460.
5. H. J. Shin, 2000, "Nondestructive testing by

- using guided wave technique”, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 3, pp. 238~245.
6. Tatsuyuki Nagai, masami Hyodo and Kenichi Takamura, 2002, "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.
7. P. J. Mudge and A. M. Lank, 1997, "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.
8. 안연식, 조용상, 박상기, 길두송, 박병철, 2006, "발전설비 유도초음파 비파괴검사 기술개발" 최종 보고서, 산업자원부, pp. 90~129.