

## 유도초음파를 이용한 장거리 배관 탐상기법

박익근\* · 김용권\*\* · 김현묵\*\*\* · 송원준\*\*\*\* · 조용상\*\*\*\*\* · 안연식\*\*\*\*\*

\*서울산업대학교 기계공학과

\*\*서울산업대학교 에너지환경대학원 에너지시스템공학과

\*\*\*한양대학교 대학원

\*\*\*\*포항산업과학연구원

\*\*\*\*\*한국전력 전력연구원

### Long Range Ultrasonic Guided Wave Techniques for Inspection of Pipes

Ik-Keun Park\*, Yong-Kwon Kim\*\*, Hyun-Mook Kim\*\*\*, Won-Joon Song\*\*\*\*,  
Yong-Sang Cho\*\*\*\*\* and Yeon-Shik Ahn\*\*\*\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul 139-743, Korea

\*\*Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University, Seoul 139-743, Korea

\*\*\*Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*\*\*Research Institute of Industrial Science and Technology, 32 Hyoja-Dong, Nam-Ku, Pohang, Korea

\*\*\*\*\*Korea Electric Power Research Institute, Daejeon 305-380, Korea

### Abstract

Conventional non-destructive techniques for inspection of the weld in pipelines require significant test time and high cost. Ultrasonic guided waves have been widely studied and successfully applied to various non-destructive tests with advantage of the long-range inspection. In this paper, a study on the application of ultrasonic guided waves to the long-range inspection of the pipeline is presented using a long-range guided wave inspection system, Wavemaker SE16, GUL. The characteristics and setup of the long-range guided wave inspection system and experimental results in pipes of with various diameter are introduced. The experimental results in mock-up pipes with cluster type defects show that the minimum detectable wall thickness reduction with this guided wave system is 2~3% in the pipe cross section area. And the wall thickness reduction of 5% in cross section area can be detected when actual detection level is used. Therefore, the applicability of the guided wave system to long-range inspection of wall thickness reduction in pipes is verified.

\* Corresponding author : ikpark@snut.ac.kr

(Received April 6, 2005)

Key Words : Ultrasonic guided wave, Torsional mode, Dispersion Curves, Wave structure

### 1. 서 론

평판이나 파이프, 철도 레일 등 가늘고 긴 봉형의 재료 표면에 해머나 초음파진동자 등으로 진동을 가하면 파장의 100배에서 1,000배 오더의 거리를 길이방향으로 전파하는 음향모드가 발생한다. 이와 같은 파동형태를 유도초음파(ultrasonic guided wave)라 부르고 길

고 큰 구조물의 고속 비파괴검사 기법으로 최근 주목을 받고 있다. 특히 파이프 내를 수 미터에서 수백 미터 전파가 가능하다는 것이 실험적으로 검증되어 장거리 파이프의 고속진단이나 매설 배관을 검사하는 기법으로 큰 기대를 모으고 있다. 유도초음파법은 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서 광범위 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다. 이는 기존의 종파나 횡파를 사용한 국부검사(point by point)법에 비해 탐

촉자의 이동없이 고정된 지점으로부터 대형 설비 전체, 즉 여러개의 용접부를 한번에 탐상할 수 있다. 그리고 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 장거리 초음파탐상이 어려운 발전설비의 보수검사에 적극 활용되고 있다<sup>2-5)</sup>.

반면 유도초음파는 상기와 같은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 발전설비의 보수검사에 적용하는데 아직 해결되어야할 어려움이 남아있다. 유도초음파는 판 표면 간을 왕복 전파하는 종파·횡파의 간섭 및 공명에 의해 형성된 파동모드이기 때문에 전파 송·수신 메카니즘이 상당히 복잡하다. 즉 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. 예를 들면 속도가 다른 다수의 진동모드가 중첩되어 수신파형의 해석이 어렵다는 점, 우리가 바라는 진동모드를 얻기 위해서는 입사탐촉자를 적절히 조정해야하는 점 등이다. 이러한 유도초음파의 전파형태를 아는 가장 유효한 수단으로는 레일리-램방정식 등의 이론식으로부터 구한 분산선도가 이용된다. 분산선도로부터 복수의 진동모드의 전파속도를 구하는 것이 가능하고 수신된 반사파형으로부터 탐촉자와 이상부위까지의 거리를 아는 것이 가능하다. 그러나 결함이나 불균질영역, 파이프의 엘보우 부분으로부터의 반사율이나 모드변환율, 초음파감쇠율 등을 구하고 결함이나 불균질 영역을 정량적으로 평가하는 것은 아직 불가능하다.

그러나 이러한 어려운 문제를 안고 있지만 최근에는 장거리 비파괴검사가 가능한 파이프라인의 유도초음파 검사 시스템이 영국의 Guided Ultrasonic Ltd. ([www.guided-ultrasonics.com](http://www.guided-ultrasonics.com))와 Plant Integrity Ltd ([www.plantintegrity.co.uk](http://www.plantintegrity.co.uk))에 의해 상용화되었고 미국의 SWRI에서는 배관에서 유도초음파를 발생시키기 위해 자왜 센서(magnetostrictive sensor)를 채택하고 있는데, 시스템 또한 자체적으로 개발하여 장거리 배관의 결함을 신속하게 탐상할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 발전설비 배관의 효율적인 보수검사에 적용하기 위한 예비 연구로 유도초음파 기법의 실용기술 측면에서 장거리 배관탐상을 위해 영국의 Guided Ultrasonic Ltd.에서 개발한 유도초음파검사 시스템을 적용하고, 배관 내에서의 유도초음파의 분산선도에 나타난 각종 모드의 분산특성과 파형 구조로부터 유도초

음파의 모드특성을 예측하여 배관 용접부의 두께 감육을 모의한 결함의 위치와 두께 감육 정도를 실험적으로 검증하고자 한다.

## 2. 유도초음파의 특징

배관내에서 운동 방정식은 Navier's 방정식으로부터 식 (1)과 같이 유도되어지며 배관에서 유도초음파가 전파한다고 가정하고, Fig. 1과 같이 경계면이 자유로운 경우 경계 조건을 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho (\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2) \tag{1}$$

여기서,  $\mathbf{u}$ 는 변위 벡터이며,  $\rho$ 는 밀도,  $\mu$ 와  $\lambda$ 는 Lamé의 탄성상수이다.

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \\ \text{at } r = a \text{ and } r = b \end{aligned} \tag{2}$$

각 방향의 응력은 다음 식 (3)로 유도되며,

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} = & \left\{ -\lambda(a^2 + \xi^2)f + 2\mu \left[ f' + \frac{n}{r}(g_3' - \frac{g_3}{r}) + \xi g_1' \right] \right\} \\ & \times \cos n\theta \cdot \cos(\omega t + \xi z) \\ \sigma_{r\theta} = & \mu \left\{ -\frac{2n}{r}(f - \frac{f}{r} - (2g_3'' - \beta^2 g_3) - \xi \frac{n+1}{r} g_1 - g_1') \right\} \\ & \times \sin n\theta \cdot \cos(\omega t + \xi z) \\ \sigma_{rz} = & \mu \left\{ -2\xi f - \frac{n}{r} \left[ g_1' + (\frac{n+1}{r} - \beta^2 + \xi^2)g_1 \right] - \frac{n\xi}{r} g_3 \right\} \\ & \times \cos n\theta \cdot \sin(\omega t + \xi z) \end{aligned} \tag{3}$$

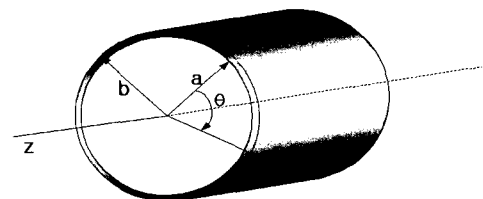


Fig. 1 A Traction-free, infinitely long hollow cylinder with inner radius(a) and outer radius(b)

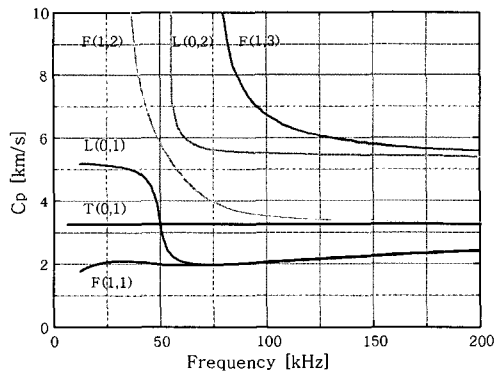
여기서,  $\alpha^2 = \omega^2/v_1^2 - \xi^2$ 이고,  $\beta^2 = \omega^2/v_2^2 - \xi^2$ 이며,  $\xi$ 는 파수,  $r$ 은 반경,  $n$ 은 원주방향 차수이다<sup>6)</sup>.

경계조건 식 (2)에 식 (3)를 대입하면 다음의 특성(characteristic) 방정식을 얻을 수 있다.

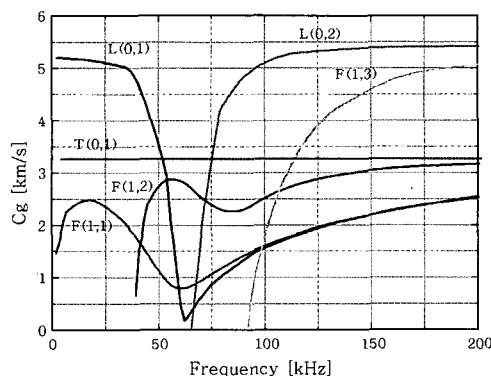
$$|C_{ij}| = 0, \quad (i, j = 1 \text{ to } 6) \quad (4)$$

이 행렬식은 주파수식이라고도 부르며, 이 식 (4)을 이용하여 이론적인 분산곡선을 얻을 수 있고 배관내에 존재하는 모드들을 해석하여 배관의 건전성을 평가할 수 있다.

본 논문에서 적용하는 시스템에서 탐측자는 배관 외면에 부착되어 진동방향이 배관의 원주방향의 성분을 가지는 Torsional mode(T(0,1))가 송·수신되며, 사용되어지는 주파수가 T(0,2)모드의 Cutoff 주파수(332kHz) 이하의 20-60kHz이므로 다른 T모드는 고려하지 않아도 된다고 생각된다. 또한 진동방향이 배관의 원주 방향으로 따르는 성분을 갖는 Flexural mode(F(n,m))도 함께 송·수신된다고 생각된다. 여기서, n은 원주방향 변위 분포를 나타내는 차수이며, m은 두께방향 변위분포를 나타내는 모드 차수이다. 즉, 원주방향 차수가 0이면 변위분포가 축대칭임을 나타낸다. Fig. 2는 식 (4)에서 얻어진 이론적인 분산곡선을



(a) Phase velocity



(b) Group velocity

Fig. 2 Dispersion curve of guided wave

나타낸다. 그리고 Fig. 3는 본 논문에서 발생된 T(0,1) mode의 변위 파형구조를 나타낸다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 시험편

Fig. 4(a)는 본 연구에 사용된 대구경 배관 시험편을 나타내고 있다. 이 배관의 바깥지름은 508 mm이며, 두께는 19 mm, 길이는 16 m이다. 이 배관은 실제 발전설비 배관으로 사용되고 있으며 중앙부에 용접부, 수직, 수평행거와 지지대(support)로 지지되고 있다. 용접부 내부에 두께 감속 결함을 가공하였다. Fig. 4(b)는 소구경 배관 시험편을 나타내고 있으며 이 배관의 바깥지름은 38 mm이며, 두께는 5 mm, 길이는 7.7 m이다. 표면에 2~10 mm 드릴 홀과 깊이 2 mm의 노치형 결함을 가공하였다. 또한 Fig. 4(c)는 바깥지름이 51 mm이며, 두께는 6 mm, 길이는 약 8 m인 배관을 길이가 약 2.4 m인 Fig. 4(b)의 배관 양쪽에 용접이음을 하였다. 그리고 좌측에는 약 깊이 4 mm, 길

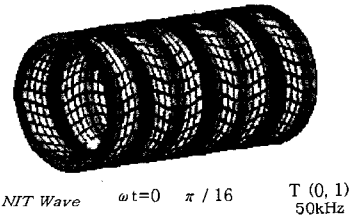


Fig. 3 Displacement wave structure of torsional mode

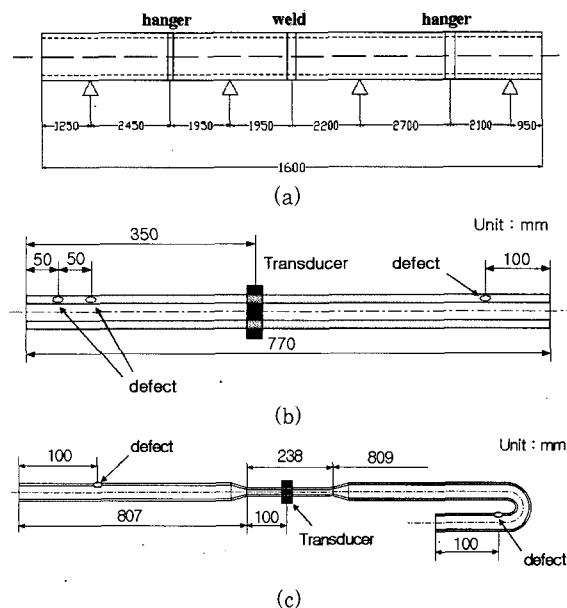


Fig. 4 The geometric of pipe specimens with variable diameters

이 20~50 mm의 노치형 결함과 2~4 mm 드릴 홀을 가공하였고, 우측에는 약 깊이 3 mm로 2~10 mm 드릴로 cluster형의 결함을 가공하였다.

### 3.2 실험장치

본 논문에서 사용한 장거리 유도초음파 탐상 장치는 GUL사(Wavemaker SE16)의 장비로 Torsional mode를 사용했다. Fig. 5은 유도초음파를 발생하는 시스템 구성을 나타내고 있으며 신호를 송·수신하는 실험장치와 이를 구동하기 위한 제어 컴퓨터와 소구경용 탐촉자로 구성되어있다. 또한 대구경의 배관에 적용하는 탐촉자의 구성도 Fig. 5와 동일하다. Fig. 6는 본 실험에서 사용된 탐촉자를 나타낸다.

Fig. 6(a)는 대구경의 배관에 적용하며 공기압에 의해 배관에 고정되고 사용한 주파수는 20~28 kHz이다. 이 탐촉자의 구성은 2개의 열과 4개 구역으로 나뉘어 있으며 총 80개의 요소로 이루어지며 요소 탐촉자의 간격은 35 mm이다. 소구경 배관에 적용하기 위한 탐촉자는 Fig. 6(b)와 같이 두개의 부분으로 분리되어 있으며 사용한 주파수는 45~60 kHz이다. 이 탐촉자

는 2개의 열과 6개 구역으로 나뉘어 있으며 총 12개의 요소로 이루어지며 요소 탐촉자의 간격은 16 mm이다.

### 3.3 실험방법

본 실험에서 사용된 탐촉자는 배관의 외경에 따라 탐촉자를 설치했으며, 대구경용 탐촉자는 구성된 센서의 수가 총 80개로 수가 많아 배관에 정확히 부착시키기에 상당히 어려움이 있다. 또한 소구경 배관에 적용된 탐촉자는 구성된 센서의 수가 총 12개이며, 배관의 부착은 2분할된 탐촉자를 나사로 고정하고 외면에 있는 나사를 조절하여 미세조정이 가능하다. Fig. 6의 배관에 따라 탐촉자를 설치하여 좌우로 송·수신되는 유도초음파를 얻었다.

## 4. 배관탐상결과 및 고찰

Fig. 7은 각각의 배관으로부터 획득한 유도초음파 신호로서, 이 신호는 탐촉자의 여러 개의 영역(segment)으로부터 획득된 RF신호 중에서 하나이며, 여러 개의 신

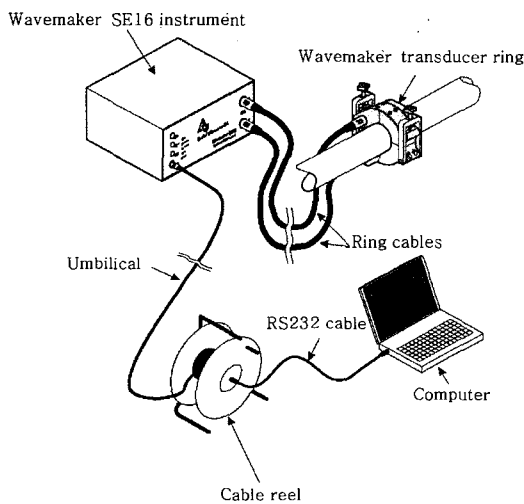


Fig. 5 Experimental setup of long range Guided wave inspection system with solid ring transducer

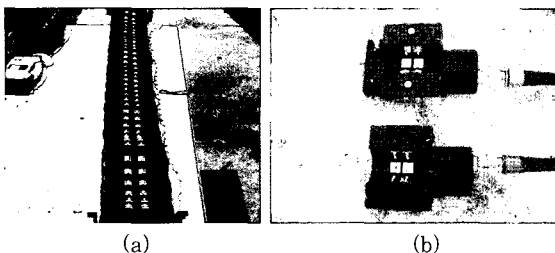


Fig. 6 (a) Inflatable ring transducer and (b) solid ring transducer

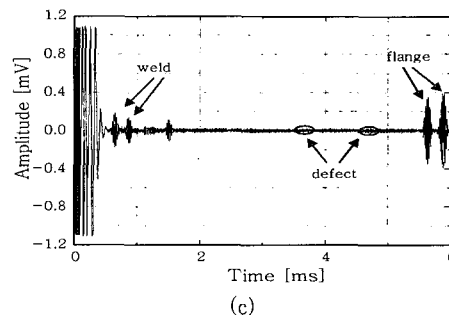
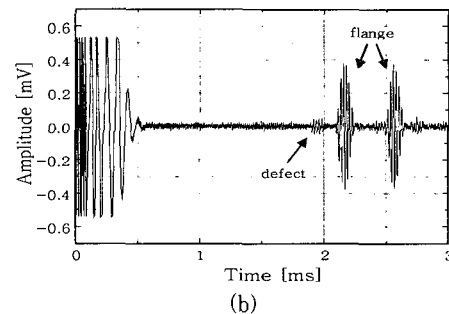
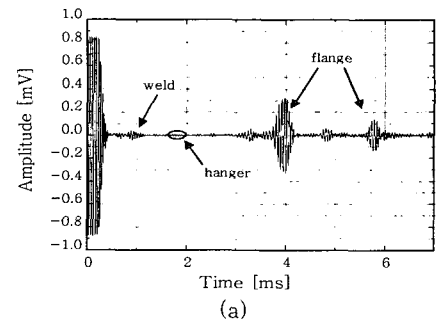


Fig. 7 Received RF-signal from variable diameter pipe((a) 508 mm, (b) 38 mm, (c) 38 & 51 mm)

호로부터 얻은 정보를 Fig. 9와 같이 시스템에 구성된 컴퓨터로 배관의 탐상결과를 나타낸다.

Fig. 9(a)의 탐상 결과로부터 용접선, 행거(hanger)와 플랜지 신호는 명확하게 검출됨을 보여주고 있다. 배관내의 용접부 식별은 동시에 표시되는 대칭 모드(Black line) 및 비대칭 모드(Red line)의 대비에 의해 가능하다. 용접부의 원주 방향에 균등한 반사원의

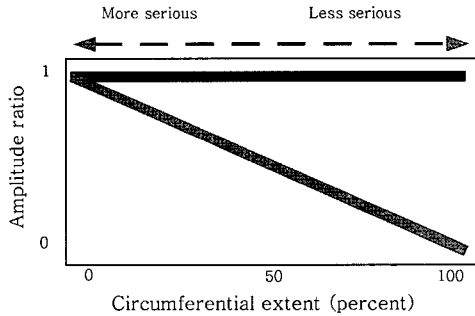


Fig. 8 The estimated cross-section loss

경우, 검출된 신호는 대칭 모드가 지배적이며, 부식과 같은 두께 감육부가 원주 방향의 일부분에 존재하여 반사원이 될 경우에는, 비대칭 모드와 대칭 모드가 동시에 검출된다. 다만, 배관상의 행거, 지지대 및 불균일한 용접선에 있어서도 부식과 같은 두께 감육에 의한 유사한 신호가 나오기 때문에 결함 평가를 하는데 어려움이 있다. 그렇기 때문에 배관상의 위치를 파악해 두는 것이 중요하다.

용접부내에 가공된 결함에 대한 탐상은 대칭 모드와 비대칭 모드의 대비에 의해 가능하다. Fig. 8은 대칭 모드와 비대칭 모드를 통한 결함형상을 평가하는 방법을 도식적으로 나타낸다. 진폭비가 커질수록 균일한 두께 감육 결함이며, 반대로 진폭비가 작아질수록 시험편의 단면적에 대하여 국소부위에 집중된 결함으로 평가할 수 있다.

소구경 배관의 탐상 결과를 다음 Fig. 9(b),(c)에 나타낸다. Fig. 9(b)는 7.7 m의 배관탐상의 결과로 탐촉자의 좌측에 4 mm 드릴 홀과 깊이 2 mm의 노치형의 결함신호를 얻을 수 있었으며 우측에서는 2~10 mm 드릴 홀의 신호를 얻었다. 소구경 배관에 대한 드릴 홀 결함의 검출 한계는 본 실험의 결과로부터 배관의 횡단면에 대한 단면감소율 2~3% 정도이다. 결함신호를 식별할 때, 플랜지 신호에 26dB 아래의 결함 검출레벨(call line)을 적용하며 실험결과로부터 횡단면에 대한 단면감소율이 5%이상 되어야 결함 검출이 가능함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 9(c)의 시험편으로부터 용접부, 결함과 플랜지신호를 탐상결과로 확인할 수 있다. 드릴 홀 결함에 대한 대칭 모드의 신호의 크기는 횡단면에 대한 단면감소율이 커짐에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었으며, 원주방향으로 가공된 노치형 결함은 홀 결함과 같은 경향을 보이지만 횡단면에 대해서는 비례 관계가 다르다. 이것은 T 모드가 관의 축방향 정보를 포함하기 때문이라 생각된다.

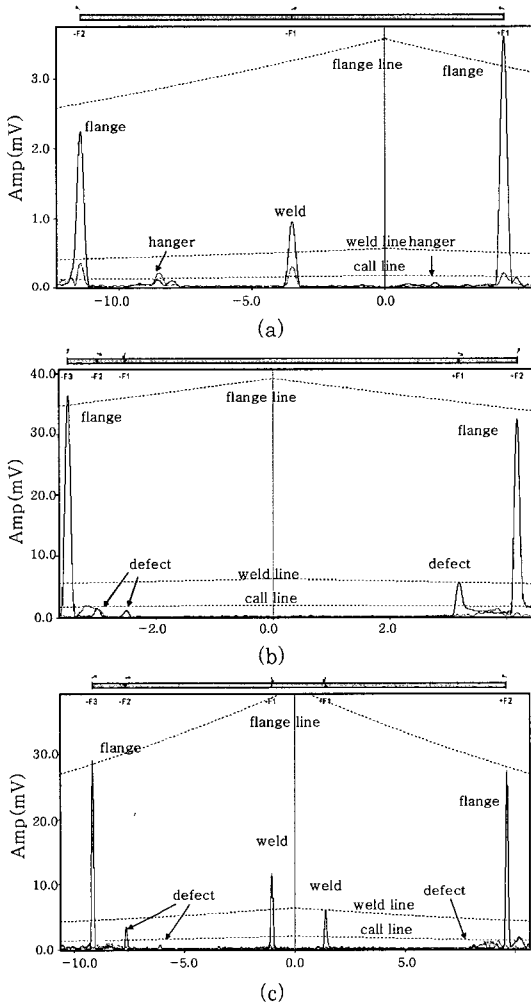


Fig. 9 Experimental result of variable diameter pipe(a) 508 mm, (b) 38 mm, (c) 38 & 51 mm

### 5. 결 론

본 논문에서는 발전설비에 사용되는 배관에 대한 장거리 유도초음파 탐상의 유용성 유무를 실험적으로 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 배관내의 용접선, 모의결함과 형상에 대한 장거리 유도초음파의 탐상 가능성을 실험적으로 확인하였다.
- 2) 장거리 유도초음파 시스템의 검출한계는 배관의 횡단면에 대한 단면감소율 2-3 %이며, 실제 결함 검출레벨에 의한 식별은 배관의 횡단면에 대한 단면감소율 5%이상 되어야 검출이 가능하였다.

## 참 고 문 헌

1. T. Hayashi : Numerical Simulation of Guided Wave Propagation, *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, **52-12**(2003), 662-665
2. D. N. Alleyne and P. Cawley : Long Range Propagation of Lamb Waves in Chemical Plant Pipework, *Materials Evaluation*, **52-7**(1997), 504-508
3. T. Nagai, M. Hyodo and K. Takamura : Long Range Ultrasonic Technique for Inspection of Buried Pipelines, *Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection*, **51-10**(2002), 622-627 (in Japanese)
4. P. J. Mudge, A. M. Lank and D. N. Alleyne : A Long Range Method of Detection of Corrosion under Insulation in process Pipework, *Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection*, **46-4**(1997), 314-319 (in Japanese)
5. 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*, **21-4**(2001), 406-414 (in Korean)
6. D. C. Gazis : Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders. I. Analytical Foundation, *Journal of the Acoustical Society of America*, **31-5**(1959), 568-573
7. H. J. Shin, Joseph L. Rose, S. J. Song : Inspection of Heat Exchanger Tubing Detects with Ultrasonic Guided Waves, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **20-1**(2000), 1-9 (in Korean)
8. J. L. Rose and D. Jiao and J. Spanner, Jr : Ultrasonic Guided wave NDE for Piping, *Materials Evaluation*, **51-5**(1996), 1310-1313
9. D. N. Alleyne and P. Cawley : Optimization of Lamb wave inspection Techniques, *NDT & E International*, **25-1**(1992), 11-22
10. T. Nagai, M. Hyodo and K. Takamura : Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology, *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, **52-12**(2003), 667-671 (in Japanese)
11. S. Kameyama, K. Misu, S. Wadaka, Y. Tanaka, M. Koike and S. Suchiro : Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave, *Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, **52-12**(2003), 672-678 (in Japanese)
12. I. K. Park, Y. K. Kim, Y. S. Cho, Y. S. Ahn, and Y. H. Cho : A Study on the Behavior of Ultrasonic Guided Wave Mode in a Pipe Using Comb Transducer, *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, **24-2**(2001), 142-150 (in Korean)