

## 장거리 유도초음파를 이용한 배관 용접부 탐상

### Pipe Inspection of Weldments

#### Using Long Range Ultrasonic Guided Wave Techniques

김용권\*, 박익근\*\*, 김현목\*\*\*, 송원준\*\*\*\*, 조용상\*\*\*\*\*, 안연식\*\*\*\*\*, Takahiro Hayashi\*\*\*\*\*

\*서울산업대학교 에너지환경대학원

\*\*서울산업대학교 기계공학과

\*\*\*한양대학교 대학원

\*\*\*\*포항산업과학연구원

\*\*\*\*\*한국전력 전력연구원

\*\*\*\*\*나고야공업대학

## 1. 서 론

평판이나 파이프, 철도 레일 등 가늘고 긴 봉형의 재료 표면에 해머나 초음파진동자 등으로 진동을 길이방향으로 전파하는 음향모드가 발생한다. 이와 같은 파동형태를 유도초음파(ultrasonic guided wave)라 한다. 즉, 유도초음파법은 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하는 파로서 광범위 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있다는 점에서 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[1-2].

본 연구에서는 발전설비 배관의 효율적인 보수 검사에 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 유도초음파의 모드 특성을 예측하여 배관의 두께 감육을 모의한 결함의 위치와 두께 감육 정도를 실험적으로 검증하고자 한다.

## 2. 이 론

### 2.1 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.

$$\mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot u) = \rho (\partial^2 u / \partial t^2) \quad (1)$$

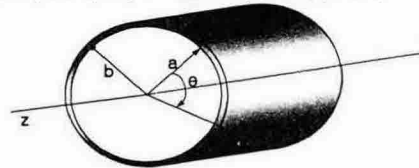


Fig. 1 A Traction-free, infinitely long hollow cylinder with inner radius(a) and outer radius(b)

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{at } r=a \quad \text{and} \quad r=b \quad (2)$$

각 방향의 응력은 다음 식 (3)로 유도되며,

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

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

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 탐촉자는 배관 외면에 부착되어 진동방향이 배관의 원주방향의 성분을 가지는 Torsional mode(T(0,1))가 송·수신된다.

### 2.2 시험편

Fig. 6(a)는 본 연구에 사용된 대구경 배관 시험편을 나타내고 있다. 용접부위의 내부에 두께 감육을 모의한 결함을 가공하였다. Fig. 6(b)는 소구경 배관 시험편을 나타내고 있으며 표면에 2-10 mm 드릴 홀과 깊이 2 mm의 노치형 결함을 가공하였다. 또한 Fig. 6(c)는 좌측에는 노치형 결함과 cluster형의 결함을 가공하였다.

### 2.3 실험장치

본 논문에서 사용한 장거리 유도초음파 탐상 장치는 GUL사(Wavemaker SE16)의 장비로 Torsional-mode를 사용했다. Fig. 7은 유도초음파를 발생하는 시스템 구성을 나타내고 있으며 신호를 송·수신하는 실험장치와 이를 구동하기 위한 제어 컴퓨터와 소구경용 탐촉자로 구성되어 있다. Fig. 8은 본 실험에서 사용된 탐촉자를 나타낸다.

### 2.4 실험방법

본 실험에서 사용된 탐촉자는 배관의 외경에 따라 탐촉자를 설치한다. 소구경 배관에 적용된 탐촉자는 나사로 고정하고 외면에 있는 나사를

조절하여 미세조정이 가능하다. 배관 좌우로 전파되는 유도초음파를 송·수신한다.

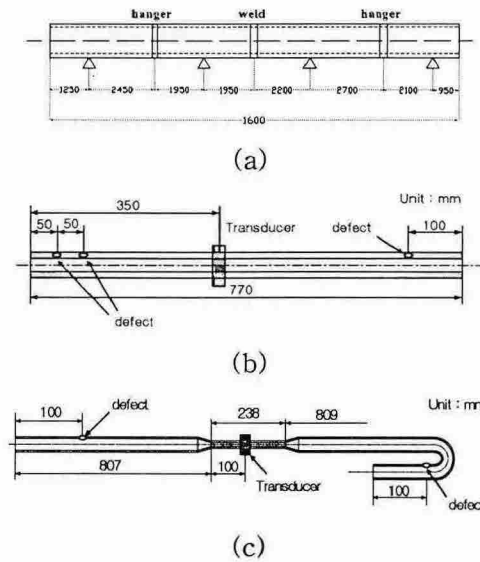


Fig. 6 The geometric of pipe specimens with variable diameters

## 3. 장거리 배관탐상실험

본 실험에서 대구경 배관에 대한 장거리 유도초음파 탐상은 Fig. 8(a)의 탐촉자를 적용하였다. 유도초음파는 탐촉자의 여러 개의 영역(segment)으로부터 획득된 RF신호정보를 Fig.10

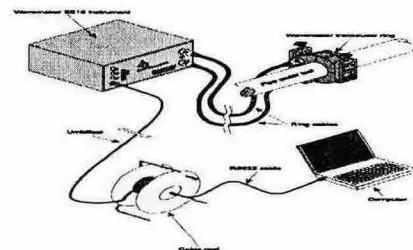


Fig. 7 Experimental setup of Guided wave inspection system

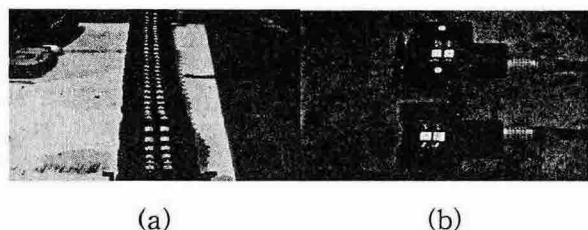


Fig. 8 (a) Inflatable ring transducer and (b) solid ring transducer

과 같이 시스템에 구성된 컴퓨터로 배관의 탐상 결과를 나타낸다. Fig. 10(a)의 탐상 결과로부터 용접선, 행거(hanger)와 플랜지 신호는 명확하게 검출됨을 보여주고 있다.

소구경 배관의 탐상 결과를 다음 Fig. 10(b),(c)에 나타낸다. Fig. 10(b)는 7.7 m의 배관 탐상의 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 배관의 횡단면에 대한 단면감소율 2-3% 정도이다. 결함신호를 식별할 때, 플랜지 신호에 26dB 아래의 결함 검출레벨(call level)를 적용하며 횡단면에 대한 단면감소율이 5%이상 되어야 결함 검출이 가능하다. 또한 Fig. 10(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.

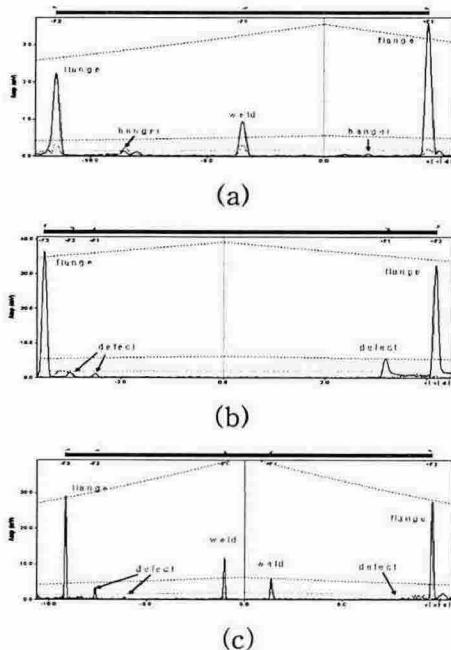


Fig. 10 Experimental result of variable diameter pipe((a) 508 mm, (b) 38 mm, (c) 38 & 51 mm)

#### 4. 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.

#### 참고문헌

1. Nagai, T., Hyodo and M., Takamura, K. : Long Range Ultrasonic Technique for Inspection of Buried Pipelines, Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection, 10 (1997), 622 -627
2. Mudge, P.J. and Lank, A.M. : A Long Range Method of Detection of Corrosion under Insulation in process Pipework, Journal of the Japanese Society of Non-Destructive Inspection, 1997, 4, 314-319
3. Hayashi : T. Numerical Simulation of Guided Wave Propagation, Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 12 (2003), 662-665
4. Rose, J.L., Jiao, D. and Spanner, J.Jr. : Ultrasonic Guided wave NDE for Piping, Materials Evaluation, 5 (1996), 1310-1313
5. Nagai, T, Hyodo, M. and Takamura, K. : Guided Ultrasonic Testing as a Practical Technology, Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 12 (2003), 667-671
6. Kameyama, S., Misu, K., Wadaka, S., Tanaka, Y., Koike, M. and Suchiro, S. : Ultrasonic Test Instrument Using Guided Wave, Journal of the Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 12 (2003), 672-678
7. 박익근, 김용권, 조용상, 안연식, 조 윤호 : Comb Transducer를 이용한 파이프 내 유도초음파 모드의 거동에 관한 연구, 한국비파괴검사학회지, 2 (2004), 142-150