

배관의 축방향 균열 검사를 위한 원주 유도초음파 모드 해석

Analysis of Circumferential Guided Wave Modes for Detection of Axial Cracks in a Pipe

정용무, 이동훈, 김상수, 정현규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로 피더관 곡관부에 축방향 균열을 탐지하기 위해 원주 유도초음파검사기술을 개발하였다. 배관의 곡률을 변수로 원주 유도초음파의 분산선도를 계산하였으며 이를 피더관 제원에 적용하였다. 평판의 경우, 즉 곡률이 무한대인 경우, 주파수가 증가함에 따라 대칭 모드와 비대칭 모드가 합쳐져서 Rayleigh파 (표면파) 형태로 가는 데 반해 곡률을 가진 배관의 경우는 주파수가 증가하더라도 합쳐지지 않았다. 곡관부 축방향 결함 위치에서 사각 탐촉자를 사용하여 Rocking 유도초음파 기법을 적용하여 원주 방향으로 유도파를 진행시키면서 인공 결함으로부터의 신호를 수집한 결과 우수한 탐지능을 확인할 수 있었으며 적용된 초음파 모드는 원주 유도초음파의 최저 모드임을 확인할 수 있었다. 이 방법은 비교적 간단하게 결함을 탐지하고 크기를 평가할 수 있기는 하나 심각한 방사능 피폭이 예상되며 검사자의 손으로 곡관부에 접근이 가능한 피더관에 대해서만 검사할 수 있다는 단점이 있으므로 앞서 원거리 유도초음파 방법으로 전반적인 검사를 수행하고 이상이 있는 피더관에 대해서 정밀 진단 시에 적용하는 것이 타당하다.

Abstract

A circumferential guided wave method was developed to detect the axial crack on the bent feeder pipe. Dispersion curves of circumferential guided waves were calculated as a function of curvature of the pipe. In the case of thin plate, i. e. infinite curvature, as the frequency increases, the S_0 and A_0 become to be coincided and eventually Rayleigh wave mode. In the case of pipe, however, as the curvature increases, the lowest modes do not coincide even in the high frequencies. A rocking technique was applied to maximize the reflected signals from the axial defects. It was found the ultrasonic wave generated by rocking technique be a circumferential guided wave after review of acoustic velocity and the dispersion curves. This technique is relatively simple and easy to detect and size the defect, but has a limitation due to the accessibility. It also expects lots of radiation exposure for the

ultrasonic examiners. Therefore it is recommended that the long range guided wave technique be applied to the general examination of the pipe and the rocking circumferential guided wave technique be used for a quantitative location and size of the flaws.

1. 서론

중수로 피더관은 중수로 압력관에 중수를 공급하고 핵분열 반응에 의해서 가열된 중수를 증기발생기로 보내는 배관으로 600 MW급 CANDU 형 원자로에는 입구측 380개, 출구측 380 개의 배관으로 구성된다. 각각의 압력관 별로 중수를 공급해야 하므로 Fig. 1 에서 보는 바와 같이 구조적으로 매우 복잡한 형상을 가지며 공간 문제로 인하여 2회 굽힘 부분이 존재한다. 중수로 피더관은 원래 초기 설계, 건설 시에는 특별한 검사 요구 사항이 필요치 않았는데 1996년 캐나다 원전에서 피더관의 감육이 발생하고 이어 2001년도에는 곡관부 균열이 발생, 누설 사고가 발생하였다. 이에 따라 피더관의 건전성을 확보하기 위한 비파괴검사가 필요하게 되었다. 그러나 균열 발생 위치인 피더관 곡관부로의 접근이 어렵고 원자로 측면은 고방사능 지역이라서 일반적인 비파괴검사 방법으로는 그 검사가 곤란하다.

이에 대한 대책으로 몇 가지 특수한 초음파 탐상 기술을 고려해 볼 수 있는데 본 논문에서는 앞서 축방향 유도초음파 기법[1-3]에 이어 원주 방향 유도초음파 분산선도를 계산하기 위한 원주 유도초음파 해석을 수행하고 컴퓨터 계산을 거쳐 곡률에 따른 분산선도를 계산하였으며 실제 축 방향 균열에 대해 적용하여 원주유도초음파 검사 기술에 대해서 그 타당성을 검토하고 실험 결과를 제시하고자 한다.

2. 중수로 피더관 곡관부 균열 발생

중수로 피더관은 SA 106 Gr. B 재질로 제작되며 중수로 압력관에 설치되기 전에, 2회에 걸쳐서 냉간 굽힘 가공을 거친다. 이때 과도한 굽힘 응력과 변형이 가해지게 되며 결과적으로 곡관부 외측과 내측에 잔류응력의 차이가 발생한다. 이러한 잔류응력은 곡관부 외측 (extrados) 과 내측 (intrados) 의 중간 부분에서 비틀림 응력으로 나타나서 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다.

3. 원주 유도초음파 분산선도

배관의 유도초음파에 관한 연구는 1960년대에 기초적 연구[5] 가 수행되다가 1990년대에 열교환기 튜브나 배관의 비파괴검사에 적용하기 위한 이론적, 실험적 연구가 활발히 진행되었다[6-15]. 그러나 대부분의 연구가 원거리 검사를 위한 배관의 축방향 유도초음파 해석 및 실험에 치중되었으며 원주를 따라 진행하는 원주유도초음파에 대한 연구는 그리 많지 않다.

3.1 원주 유도초음파 해석

Fig. 2와 같이 내경이 a 이고 외경이 b 인 2차원 선형 탄성 특성을 가진 등방성 원통 구조를 가정하자. 운동에 대한 변위 방정식은 힘이 가해지지 않을 경우 다음과 같이 쓸 수 있다[4].

$$L[\vec{u}] \equiv c_L^2 \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - c_T^2 \nabla \times \nabla \times \vec{u} = \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} \quad \text{in } V, \quad (1)$$

, 여기서 V 는 원통을 의미하며 \mathbf{u} , c_L , c_T 는 각각 변위, 종파 및 횡파 속도이다. 이들은 재료의 밀도, ρ , Lamé 상수, λ , μ 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

경계 V 에서 변위 벡터 \vec{u} 는 다음 경계 조건을 만족해야 한다.

$$B[\vec{u}] \equiv \lambda \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \mu [\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T] \cdot \vec{n} = \vec{F} \quad \text{on } S \quad (3)$$

여기서 S 는 V 의 경계이고 \vec{n} 는 경계에서 바깥쪽으로 수직한 단위 벡터이고 \vec{F} 는 표면에서 traction 이다. $t \leq 0$ 에서 고체의 운동이 없고 표면 S 에 대해 traction load, F 가 가해진다고 가정하면 그 상태는 초기 경계조건 문제가 되며 이를 요약하면,

$$\begin{aligned} L[\vec{u}] &= \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2} && \text{in } V \\ B[\vec{u}] &= \vec{F} && \text{on } S \\ \vec{u} &= \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = 0 && \text{at } t=0 \end{aligned} \quad (4)$$

윗 식에서 정상 상태 문제의 해를 풀기 위한 지배방정식은

$$\begin{aligned} L[\vec{U}_{mn}^{(i)}] &= -\omega_{mn}^{(i)} && \text{in } V \\ B[\vec{U}_{mn}^{(i)}] &= 0 && \text{on } S \end{aligned} \quad (5)$$

윗 식에서 경계치 문제를 풀어 정리하면 $\hat{\omega}$ 와 A_m 은 주어진 n 마다 다음 고유치 문제 조건을 만족해야 한다.

$$\bar{D}^{(i)}(n, \hat{\omega}_{mn})A_m = 0 \quad (6)$$

여기서 $\bar{D}^{(i)}(n, \hat{\omega})$ 는 파수 n , 무차원 주파수 $\hat{\omega}$, 무차원 두께 변수 η 를 변수로 하는 4X4 행렬이며 각각을 풀어서 쓰면 다음과 같다[16].

$$\begin{aligned} d_{11} &= \frac{\hat{\omega}^2}{\kappa^2} [J_{n-2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) + J_{n+2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) - 2(\kappa^2 - 1)J_n(\frac{\hat{\omega}}{\kappa})], \\ d_{12} &= \frac{\hat{\omega}^2}{\kappa^2} [Y_{n-2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) + Y_{n+2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) - 2(\kappa^2 - 1)Y_n(\frac{\hat{\omega}}{\kappa})], \\ d_{13} &= (-1)^{(i+1)} \hat{\omega}^2 [J_{n-2}(\hat{\omega}) - J_{n+2}(\hat{\omega})], \\ d_{14} &= (-1)^{(i+1)} \hat{\omega}^2 [Y_{n-2}(\hat{\omega}) - Y_{n+2}(\hat{\omega})] \\ d_{21} &= \frac{\eta \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [J_{n-2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa}) + J_{n+2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa}) - 2(\kappa^2 - 1)J_n(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{22} &= \frac{\eta \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [Y_{n-2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa}) + Y_{n+2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa}) - 2(\kappa^2 - 1)Y_n(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{23} &= (-1)^{(i+1)} \eta^2 \hat{\omega}^2 [J_{n-2}(\eta \hat{\omega}) - J_{n+2}(\eta \hat{\omega})] \\ d_{24} &= (-1)^{(i+1)} \eta^2 \hat{\omega}^2 [Y_{n-2}(\eta \hat{\omega}) - Y_{n+2}(\eta \hat{\omega})] \\ d_{31} &= \frac{(-1)^i \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [J_{n-2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) - J_{n+2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{31} &= \frac{(-1)^i \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [J_{n-2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) - J_{n+2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{32} &= \frac{(-1)^i \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [Y_{n-2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa}) - Y_{n+2}(\frac{\hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{33} &= -\hat{\omega}^2 [J_{n-2}(\hat{\omega}) + J_{n+2}(\hat{\omega})] \\ d_{34} &= -\hat{\omega}^2 [Y_{n-2}(\hat{\omega}) + Y_{n+2}(\hat{\omega})] \\ d_{41} &= \frac{(-1)^i \eta^2 \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [J_{n-2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa}) - J_{n+2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{42} &= \frac{(-1)^i \eta^2 \hat{\omega}^2}{\kappa^2} [Y_{n-2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa}) - Y_{n+2}(\frac{\eta \hat{\omega}}{\kappa})] \\ d_{43} &= -\eta^2 \hat{\omega}^2 [J_{n-2}(\eta \hat{\omega}) + J_{n+2}(\eta \hat{\omega})] \end{aligned} \quad (7)$$

$$d_{44} = -\eta^2 \hat{\omega}^2 [Y_{n-2}(\eta \hat{\omega}) + Y_{n+2}(\eta \hat{\omega})]$$

윗 식에서 m, n 은 각각 정수이고 $J_n(x)$ 와 $Y_n(x)$ 는 각각 제 1차 및 제 2차 bessel 함수이며 다음의 무차원 변수들을 사용한다.

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{r}{b} \\ \hat{\omega} &= \frac{\omega b}{c_T} \\ \eta &= \frac{a}{b} \\ \kappa &= \frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \end{aligned} \quad (8)$$

3.2. 원주 유도초음파 분산선도 계산

배관의 내경 및 외경, 재료 내의 종파 및 횡파 속도를 입력한 뒤 주파수와 위상속도를 변화시키면 식 (7)의 4X4 행렬 d_{ij} 를 계산하여 식(6)의 조건이 맞는 경우의 주파수와 위상속도를 계산하고 이를 위상속도-주파수 공간에서 도시하면 원주 유도초음파 분산선도를 작성할 수 있다. 본 연구에서는 식 (7)의 행렬 계산 및 위상속도 분산곡선을 구하기 위한 컴퓨터 프로그램을 작성하였으며 평판 및 다양한 곡률을 가진 배관에 대해 원주유도초음파 위상속도 분산선도를 계산하였으며 Fig. 3 (a)~(f)에 분산선도 계산 사례를 보였다.

곡률 $\eta = a/b = 1.0$ 인 경우, 즉 박판인 경우에 주파수가 증가함에 따라 비대칭 모드 (A_0) 와 대칭모드 (S_0) 가 합쳐져서 하나의 모드로 존재하며 이는 Rayleigh 파 모드인 데 반해 η 가 작아질수록 즉 외면과 내면의 원주 길이 차이가 커질수록 대칭 모드와 비대칭 모드의 간격이 크며 주파수가 증가하더라도 합쳐지지 않는다. 이것은 박판에서 주파수가 높은 경우 대체로 Rayleigh 파 모드로 가는데 반해 내면 길이와 외면 길이가 다르기 때문에 합쳐지지 않으며 내면을 따라 진행하는 내면 유도초음파 (또는 내면 표면파)와 외경을 따라 진행하는 외면 유도초음파(외면 표면파)가 별도로 존재하기 때문이라고 판단된다.

위에 원주유도초음파 분산선도 분석에서 본 바와 같이 Rayleigh 파는 비교적 높은 주파수에서 음속의 주파수 의존성이 없으며 식 (9)에서 보인 바와 같이 1차 임계각 조건으로 Lucite 웨지를 사용할 경우 steel 에 대해서 약 56° 로 계산된다[4].

$$\sin \theta_{w=} = \frac{c_{l,w}}{c_R} \quad (9)$$

, 여기서 $\theta_{w=}$ 은 웨지의 입사각이고, $c_{L,w}$, c_R 은 각각 웨지 및 검사체의 종파 속도이다. 피더관 곡관부에 축 방향 균열을 검사하기 위해서는 위와 같은 입사각 조건을 맞추어야 하지만 실제로는 배관 외면이 곡면이므로 Fig. 4에 보인 바와 같이 일반적인 소형 45 사각 탐촉자를 사용하여 원주 방향으로 입사 각도를 변화시키는 데 탐촉자를 피더관 곡관부 외측 (extrados)에 위치하고 이를 좌우로 흔들면서 인공 결함에서의 반사파 신호를 관찰하면서 그 파형이 최대가 되는 조건을 구했기 때문에 사용된 초음파 모드가 원주 유도초음파인지 또는 표면파, 즉 Rayleigh 파인지 확실히 구분하기 어렵다. 그러나 이 방법에서 파동 모드를 정확히 알아낼 수 없더라도 ASME 코드에서 기술하는 방식으로 보정시험을 시행한 후 여기에서 Fig. 5에 보인 바와 같이 14 dB 계인을 올리고 또 내부에 물이 차있을 경우 6 dB 계인을 추가하여 보정 곡선과 비교하여 크기를 평가할 수 있다. 만약 결함 신호가 의심될 경우 반대 방향으로 표면파를 보내어서 그 거리 관계를 해석해 보면 결함 유무를 판정할 수 있다. 이 방법은 검사자가 초음파 탐촉자를 가지고 접근이 가능한 경우에만 사용할 수 있으며 중수로 피더관에 대한 현장 검사에 적용할 수 있으나 검사자의 방사선 피폭 문제가 있다.

4. 실험 방법

자체 제작한 고출력 tone burst 초음파 발생 장치를 사용하여 초음파를 발진하였으며 샘플링 주파수 1 GHz 인 Lecroy 디지털 오실로스코프로 반사 신호를 수신하여 시간 영역에서 신호를 표현하고 유도초음파 모드를 확인하였다. 실험에 사용된 피더관은 Fig. 6과 같이 피더관 직관부에 4개의 인공 결함을 가공한 시편을 사용하였으며 가공된 결함의 제원은 Table 1과 같다. Rocking 유도초음파 방법을 적용하기 위하여 주파수 2.25 MHz, 45° 사각 탐촉자를 사용하여 피더관 결함에 대해서 90° 위치에서 원주 방향으로 탐촉자를 rocking 하면서 축 방향 notch 신호를 수집하였으며 다음에 반대 원주 방향으로 초음파를 보내서 270° 위치에서 신호를 수집하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

피더관 직관부 축방향 notch 에 대해 rocking 원주유도초음파 방법으로 검사한 결과를 Fig. 7에 보였다. 원주 방향 90° 위치와 270° 위치에 대한 거리 및 비행 시간을 측정하여 음속으로 환산한 결과 2,800 ~ 2,900 m/s 로 계산되었으며 이에 따라 여기에 사용된 초음파는 원주유도파임이 거의 확실하나 본 실험에서는 탐촉자 입사각을 연속적으로 변화시켰으며 또 파형이 envelope 형태로 나타남에 따라 분산성 또는 불연속적인 여러 모드 또는 Rayleigh 파가 존재할 가능성도 배제할 수 없다.

Fig. 8은 같은 방법을 곡관부 인공 notch 결함에 적용한 결과이다. 곡관부의 경우는 직관부와는 달리 외측 (extrados) 와 내측 (intrados) 의 두께가 일정하지 않을 확률이 있으며 진원 보다는 타원형에 가까울 가능성이 있으므로 직관부 신호보다는 약간 저하된 신호를 취득하였다. 이 방법은 비교적 신호 크기가 양호하며 정식으로 ASME 방식에 따라 보정 시험을 수행한 뒤 실제 검사에 적용할 수 있으리라 판단된다. 그러나 실제 검사 시에 숙련된 검사자가 손으로 각도를 조절하면서 최대 진폭 조건을 찾아야 한다는 단점이 있으며 특히 많은 시간을 소모할 수밖에 없어서 방사선 피폭량이 증가하는 단점이 있다.

향후 압전 방식의 초음파 탐촉자 보다는 자왜 센서 방식이나 전자기음향센서(EMAT) 방식을 사용하여 분산선도에 기초한 보다 정확한 주파수를 발진하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

6. 결론

- 1) 피더관 곡관부 축방향 균열을 탐지하기 위한 원주유도초음파 검사기술을 개발하기 위하여 위상속도 분산선도 이론 및 해석 프로그램을 작성하였다. 다양한 곡률에 대한 위상속도 분산선도를 계산하여 사용 주파수에서 가능한 파동 모드를 예측하였다.
- 2) 주파수 2.25 MHz에서 박판의 경우 대칭 모드와 비대칭모드가 합쳐져서 Rayleigh 파 형태로 나타났으나 곡률이 존재하는 경우 두 모드는 합쳐지지 않았다. 이것은 각각 내면을 진행하는 원주유도초음파와 외면을 따라 진행하는 원주유도초음파가 각각 다른 위상 속도를 가지기 때문이라고 판단된다. 그러나 rocking 운동에 따라 입사각이 다양하게 연속적으로 변화하면서 신호를 취득하였기 때문에 내면 또는 외면을 따라 진행하는 Rayleigh 파의 가능성도 배제할 수 없다.
- 3) 축 방향 결함 위치에서 Rocking 유도초음파 기법을 적용하여 원주 유도초음파를 진행시키면서 인공 결함으로부터의 신호를 수집한 결과 우수한 탐지능을 확인할 수 있었다. 앞으로 ASME 코드 방식으로 보정시험을 한 뒤 이를 결함 탐지 및 평가에 적용하는 것이 가능할 것이라고 판단된다. 그러나 이 방법은 심각한 방사능 피폭이 예상되며 검사자의 손으로 곡관부에 접근이 가능한 피더관에 대해서만 검사할 수 있다는 단점이 있다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업 중 중수로 피더관 결함 검사 기술 개발 과제에서 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 정용무, 이동훈, 정현규, "중수로 피더관 균열의 비파괴 검사방안", 비파괴검사학회 2003 춘계학술 발표회 논문집, pp. 43-49, 대전 (2003.5).
2. 정용무, 이동훈, 정현규, "중수로 피더관 결함에 대한 초음파검사", 제10회 원전기기전전성 심포지엄, 서귀포 (2003.5)
3. Y. M. Cheong, D. H. Lee, H. K. Jung, "Optimization of ultrasonic guided wave parameters for crack detection in feeder pipe of PHWR nuclear power plants", Ultrasonic International '03, Granada, Spain (Jun. 30 ~ July 4, 2003).
4. J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", pp.96, Cambridge University Press (1999).
5. D. C. Gazis, J. Acoust. Soc. Am., 31 (5), pp.568-573 (1959).
6. J. J. Ditri and J. L. Rose, J. Appl. Phys. 72 (7), pp.2589-2597 (1992).
7. J. J. Ditri, J. Acoust. Soc. Am., 96, pp.3769-3755 (1994).
8. J. L. Rose, J. J. Ditri, A. Pilarski, K. M. Rajana, and F. Carr, NDT & E Int., 27 (6), pp.307-310 (1994).
9. H. Kwun and K. A. Bartels, J. Acoust. Soc. Am., 99(2) pp.962-968 (1996).
10. D. N. allyne, M. Lowe and P. Cawley, J. NDE, 15 (1) pp.11-20 (1996).
11. H. J. Shin and J. L. Rose, J. NDE, 17(1), pp.27-36 (1998).

12. 신현재, J. L. Rose, *비파괴검사학회지*, 20(1), pp.1-9 (2000).
13. 송성진, 박준수, 신현재, *비파괴검사학회지* 21(4), pp.406-414 (2001).
14. Y. Cho and J. L. Rose, *Nondestr. Test Eval.* 12, pp.323-339 (1996).
15. J. Li and J. L. Rose, *J. Acoust. Soc. Am.*, 109 (2), pp.457-464 (2001).
16. J. Qu and L. J. Jacobs, *Mater. Eval.* pp.85-93 (2003).

Table 1. Dimensions of artificial notches on feeder pipe.

Notch	Length (mm)	Depth (mm)	Width (mm)
#1 (axial)	25	1.2 (20%t)	0.4
#2 (axial)	50	2.4 (40%t)	0.5
#3(circum)	25	1.2 (20%t)	0.5
#4(circum)	50	2.4 (40%t)	0.5



Fig. 1 Feeder pipes in CANDU reactor.

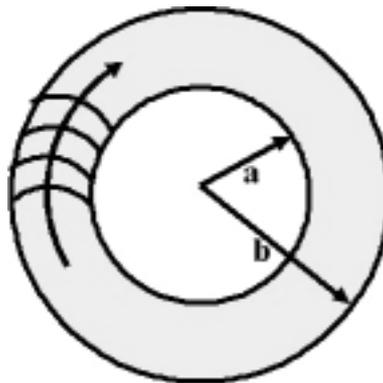
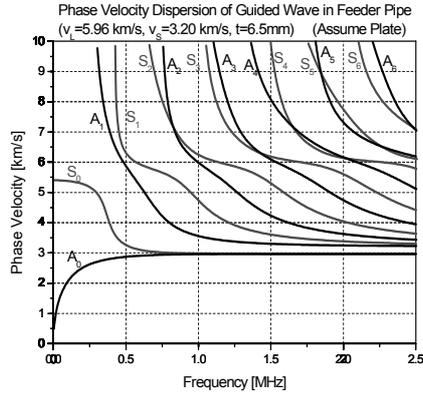
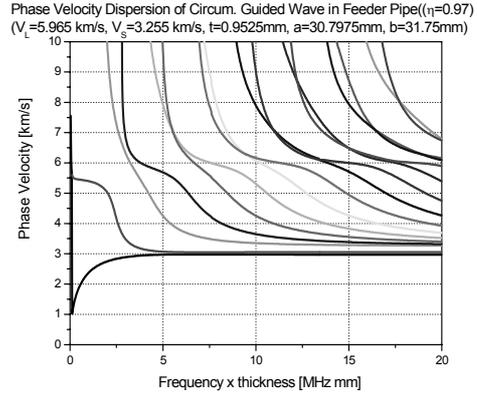


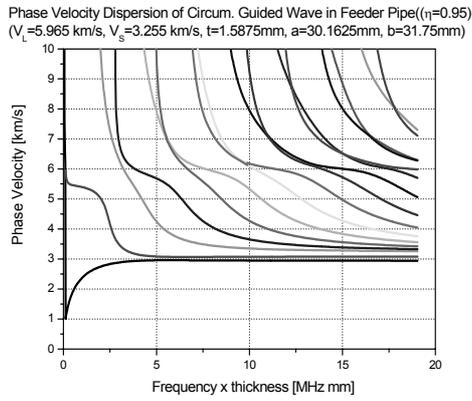
Fig. 2 Cross-section of the pipe for a propagation of circumferential guided wave.



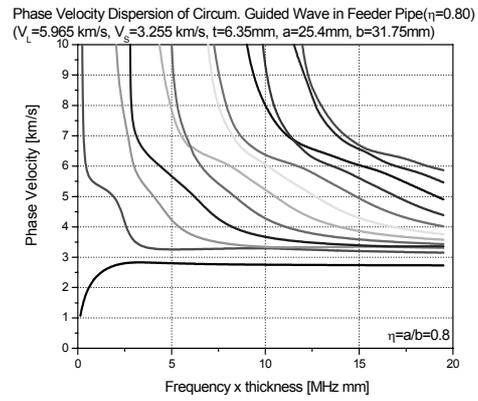
(a) $\eta = 1.0$ (plate, no curvature)



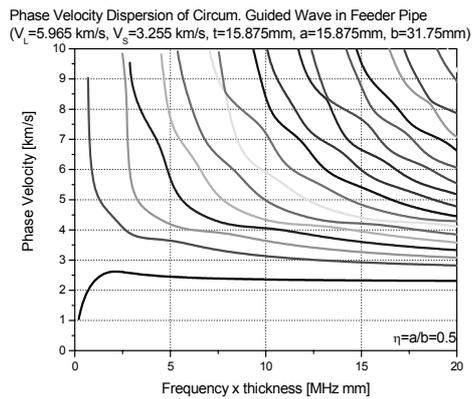
(b) $\eta = 0.97$



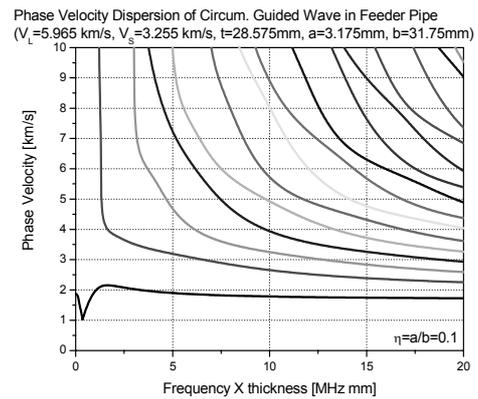
(c) $\eta = 0.95$



(d) $\eta = 0.8$



(e) $\eta = 0.5$



(f) $\eta = 0.1$

Fig. 3 Phase velocity dispersion curves for the case of (a) $\eta = 1.0$ (plate, no curvature), (b) $\eta = 0.97$, (c) $\eta = 0.95$, (d) $\eta = 0.8$, (e) $\eta = 0.5$ (f) $\eta (=a/b) = 0.1$.

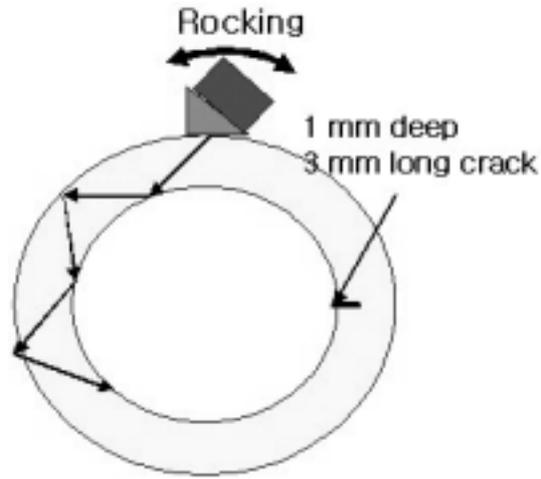


Fig. 4 Concept of rocking guided wave technique.

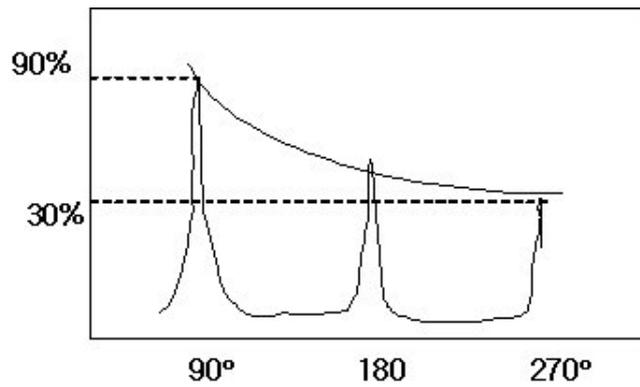


Fig. 5 Determination of DAC curve by rocking surface wave technique.

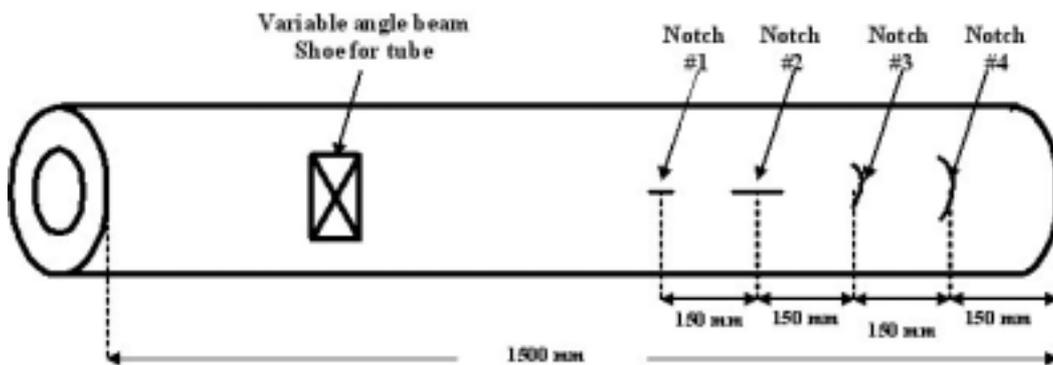
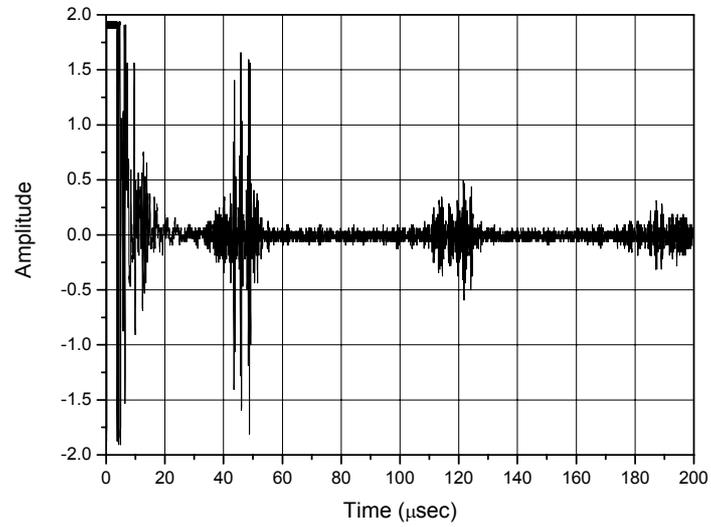
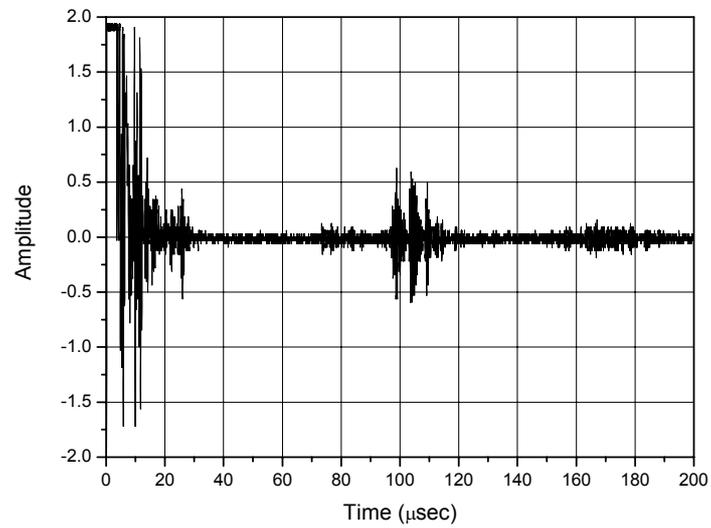


Fig. 6 Configuration of guided wave inspection of artificial notches in Feeder pipe.

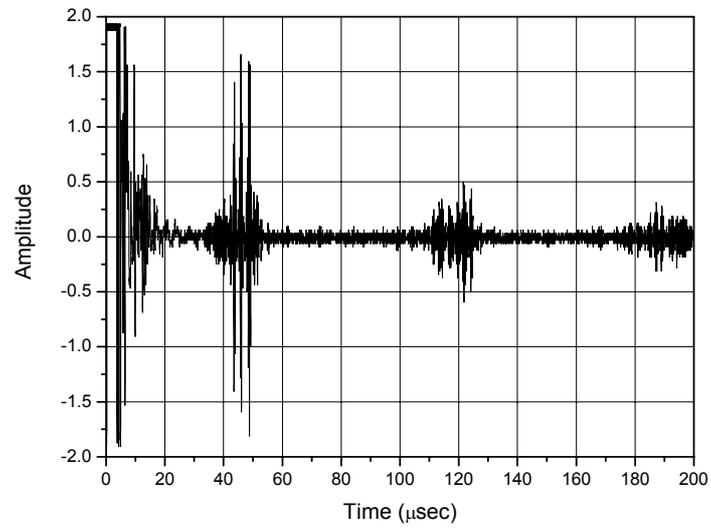


(a) A notch is located at 90° position of circumference

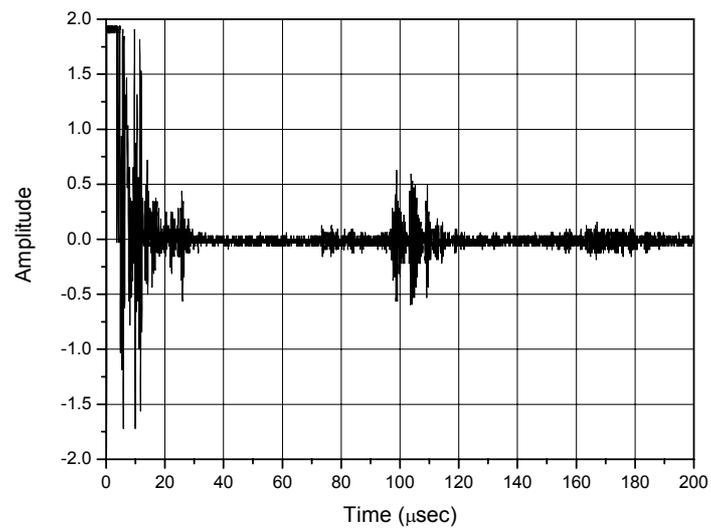


(b) A notch is located at 270° position of circumference.

Fig. 7 Typical signals by rocking guided wave technique from circumference of a straight feeder pipe.



(a) A notch is located at 90° position of circumference



(b) A notch is located at 270° position of circumference.

Fig. 8 Typical signals by rocking guided wave technique from circumference of a bent feeder pipe.