

## 중수로 피더관 균열의 비파괴검사 방안

### A Methodology of Non-Destructive Testing for Cracking in PHWR Feeder Pipe

정용무, 이동훈, 정현규

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

중수로 피더관으로 결함을 탐지하기 위한 장거리 비파괴검사 기술을 개발하기 위하여 피더관 제원에 대한 유도초음파 분산선도를 계산하였으며 이것과 실제 유도초음파 신호를 단시간 푸리에 변환 신호처리를 수행하여 구한 신호를 비교한 결과 L(0,1) 및 L(0,2) 모드임을 확인하였다. 이를 바탕으로 주파수 500 kHz 에서 피더관 직관부와 곡관부 notch 에 대한 탐지능을 검사한 결과 직관부에서는 원주 방향 notch에 대한 신호만을 볼 수 있었으나 곡관부에서는 축방향 notch 신호도 볼 수 있었다. 이것은 초기에 발생한 L-모드 유도초음파가 곡관부를 통과하면서 모드 변환을 일으켰으며 실제로 곡관부에서의 축방향 결함은 엄밀한 의미에서 원주 방향 성분도 존재하기 때문이라고 판단된다. 축 방향 결함 위치에서 사각탐촉자를 사용하여 Rocking 유도초음파 기법을 적용하여 원주 방향으로 유도파를 진행시키면서 인공 결함으로부터의 신호를 수집한 결과 우수한 탐지능을 확인할 수 있었으며 적용된 초음파 모드는 Rayleigh파 (표면파)임을 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 대해서만 적용하는 것이 타당하리라 판단된다.

#### Abstract

In order to develop a long-range nondestructive testing technology to detect flaws in PHWR feeder pipes, the dispersion curves for the pipe were calculated. After Short Time Fourier Transformation (STFT) of acquired signals, it was confirmed the mode of ultrasound was L(0,1) and L(0,2) modes. The circumferential notches in the straight pipe were detectable with the L(0,1) mode at the frequency of 500 kHz. However, the axial notches were not able to resolve the signal. On the contrary, an axial notch in the bent pipe was detected with the same examination condition. It seems that the initial L(0,1) mode were converted to another modes at the bent and this converted waves were sensitive to the axial notch at the bent region. The rocking guided wave technique was applied to analyze the axial defect. It was found the ultrasonic wave generated so called rocking guided wave was Rayleigh wave (surface wave)

after review of acoustic velocity. This technique is relatively simple and easy to detect and size the defect, but it is expected lots of radiation exposure for the ultrasonic examiners and it is only possible to the bend pipe accessible. Therefore it is recommended that the long range guided wave technique be applied to the general examination of the pipe and the rocking surface wave technique be used for accurate 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 우선 곡관부 축 방향 균열의 발생 원인을 살펴보고, 곡관부 균열 위치에서 원주 방향으로 표면파를 발생시켜서 축 방향 균열을 탐지할 수 있는 Rocking 표면파 기술과 접근성이 어려운 부위에 대한 검사 방안으로 원거리 유도초음파 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. 피더관의 유도초음파 탐상

### 3.1. Rocking Rayleigh파 (Creeping wave) 탐상법

Rayleigh 파는 표면파 또는 원주 방향을 따라 갈 경우 creeping wave 라고도 하며 이를 피더관 축 방향 균열 탐상에 이용할 수 있다. Rayleigh 파를 발생시키기 위해서는 분산성이 없어서 음속의 주파수 의존성이 없다. Rayleigh 파가 생성되는 조건은 식 (1)에서 보인 바와 같이 1차 임계각 조건으로 Lucite 웨지를 사용할 경우 steel 에 대해서 약 56° 로 계산된다[1].

$$\sin \theta_{w=1} = \frac{c_{L,w}}{c_R} \quad (1)$$

, 여기서  $\theta_{w=}$  은 웨지의 입사각이고,  $c_{l,w}$ ,  $c_R$ 은 각각 웨지 및 검사체의 종파 속도이다.

Rayleigh 파를 이용하여 피더관 곡관부에 축 방향 균열을 검사하기 위해서는 위와 같은 입사각 조건을 맞추어야 하는 데 실제로 배관면이 곡면이므로 Fig. 2 에 보인 바와 같이 일반적인 소형 45° 사각 탐촉자를 사용하여 원주 방향으로 입사각도를 변화시키는 데 탐촉자를 피더관 곡관부 외측 (extrados)에 위치하고 이를 앞뒤로 흔들면서 인공 결함에서의 반사파 신호를 관찰하면서 그 파형이 최대가 되는 조건이 표면파 발생 조건이 만족되는 조건이 된다. 만약 결함 신호가 의심 될 경우 반대 방향으로 표면파를 보내어서 그 거리 관계를 해석해 보면 결함 유무를 판정할 수 있다. 결함의 길이는 다양한 크기 측정 방법이 가능한 데 일반적으로 ASME 코드에서 기술하는 방식으로 보정시험을 시행한 후 여기에 14 dB 계인을 올리고 또 내부에 물이 차있을 경우 6 dB 계인을 추가하여 보정 곡선과 비교하여 크기를 평가할 수 있다. (Fig. 3 참조)

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.

### 3.2. 원거리 유도초음파 탐상법

유도초음파는 배관이나 박판과 같이 구조물의 두께가 비교적 얇을 경우, 기하학적 구조를 따라 길이 방향으로 전파하는 파동으로써 종파와 횡파가 구조물의 벽면 사이를 수없이 반사하면서 중첩되어 나타나는 새로운 초음파이다. 유도초음파는 일반적인 체적파와는 매우 다른 특성을 가지게 되는데 특히 무한개의 파 모드가 광범위한 주파수 범위에 걸쳐 존재한다는 점과 주파수와 두께에 따라 전파 속도가 변화하는 분산 특성을 가진다. 따라서 주어진 주파수 영역에서 존재하는 유도초음파 모드의 분산 특성을 나타내는 분산선도를 계산하고 이를 고려한 검사 조건을 설정해야 한다.

배관의 유도초음파에 관한 연구는 1960년대에 기초적 연구 [2] 가 수행되다가 1990년대에 열교환기 튜브나 배관의 비파괴검사에 적용하기 위한 이론적, 실험적 연구가 활발히 진행되었다 [3-12]. 최근에 원자력발전소의 증기발생기 전열관의 비파괴검사에 유도초음파를 응용하기 위한 시도가 있었으며 [9,10] 각종 석유화학 배관이나 박판의 비파괴검사에 다양하게 응용되고 있다.

### 4. 실험 방법

피더관의 분산선도를 계산하기 위하여 분산선도 계산 프로그램을 자체 개발하였으며 이를 이용하여 피더관의 제원 및 음속을 입력하여 위상속도 및 군속도 분산선도를 구했다. (Fig. 4 및 5 참조). 위상속도 분산선도를 기초로 하여 선정된 주파수 및 모드에 대한 초음파 탐촉자 입사 각도를 계산할 수 있으며 군속도 분산선도를 이용하여 발생한 유도초음파 모드 및 해당 주파수에서의 음속을 알아낼 수 있다.

본 실험에서는 고출력 tone burst 초음파 발생 장치인 Ritec RAM-10000 을 사용하여 초음파를 발진하였으며 샘플링 주파수 1 GHz 인 Lecroy 디지털 오실로스코프로 반사 신호를 수신하여 시간 영역에서 신호를 표현하고 이를 단시간 푸리에 변환 신호처리 (STFT, short Time Fourier Transformation) 하여 유도초음파 모드를 확인하였다. 실험에 사용된 피더관은 Fig. 6 와 같은 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 표면파 방법으로 검사한 결과를 Fig. 7 에 보였다. 원주 방향 90° 위치와 270° 에 대한 거리 및 비행 시간을 측정하여 음속으로 환산한 결과 2,800 ~ 2,900 m/s 로 계산되었으며 이에 따라 여기에 사용된 초음파는 Rayleigh 파 또는 표면파임을 확인할 수 있었다.

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 수 밖에 없어서 방사선 피폭량이 증가하는 단점이 있다.

원거리 유도초음파 방법으로 발생하는 유도초음파의 모드를 확인하기 위하여 피더관 끝에서 반사된 신호를 STFT 처리 한 결과를 Fig. 9에 보였다. 주파수 500 kHz에서 수집한 시간 영역에서의 신호를 단시간 푸리에 변환 신호처리를 하여 이를 군속도 분산선도와 비교한 결과 발생한 모드는 L(0,1) 과 L(0,2) 인 것으로 판명되었다. 군속도 분산선도에서 보이는 것과 같이 L(0,3) 와 L(0,4)는 기울기가 급하여 분산성이 심한 관계로 실제 상황에서는 신호를 얻기가 어렵다고 판단된다. 한편 취득한 L(0,1) 모드 신호와 L(0,2) 모드를 다시 시간 축에서 보면 L(0,1) 모드 속도가 빠르기 때문에 앞에서 나타나며 그 신호 형상도 매우 크고 날카롭기 때문에 이 주파수 상태에서는 가장 최적의 조건이라고 판단된다.

Fig. 10에 이러한 조건에서 피더관 직관부 인공 notch에 대한 유도초음파 신호 결과와 곡관부 축 방향 notch에 대한 결과를 보였다. 인공 notch에 대한 상세 제원은 Table 1과 Fig. 6 에 표기하였다. 유도초음파의 진행 방향은 항상 피더관의 축 방향을 따라 가기 때문에 이에 수직한 결함인 원주 방향 결함에서의 반사 에너지가 있을 것이나 축 방향 결함은 거의 반사 에너지가 없으리라고 예측할 수 있다. Fig. 10 (a) 에 피더관 직관부에서 4개의 notch 에 대한 실험 결과를 보면 예측한 바와 같이 피더관 끝에서 반사된 신호 (BW) 가 가장 큰 신호로 나타나고 그 앞에 #3 (원주 방향) 및 #4 notch (원주 방향) 로부터의 신호가 나타났다. 그러나 축방향 notch인 #1 및 #2 notch 신호는 나타나지 않았다.

한편 Fig. 10 (b)에 보인 바와 같이 곡관부 90° 위치에 있는 축방향 notch 는 예상외로 큰 신호로 나타나고 있다. 이것은 비록 발견한 초음파 모드가 L(0,1) 으로 축방향 결함과는 무관하더라도 피더관 곡관부를 통과하면서 모드변환을 일으켜서 복잡한 모드가 발생하며 이중에 어떤 모드가 축방향 notch를 감지한 것으로 판단된다. 현재로서는 곡관부 모드 변환에 대한 분산 관계는 알려져 있지 않으며 다만 유도초음파가 피더관 곡관부를 통과하면서 모드 변환이 일어날 가능성이 높는데 곡관 형상 자체에 따르거나 실제로 곡관부에서의 벽두께가 일정치 않을 경우, 곡관부 단면이 타원형으로 찌그러져 있을 경우가 해당된다. 향후 압전 방식의 초음파 탐촉자 보다는 자외선 센서 방식이나 전자기음향센서 (EMAT) 방식을 사용하여 분산선도에 기초한 보다 정확한 주파수를 발견하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있으리라 판단된다.

## 6. 결론

- 1) 피더관 곡관부 결함을 탐지하기 위한 초음파 검사 기술을 개발하기 위하여 피더관 체원에 대한 유도초음파 분산선도를 계산하였으며 이것과 실제 유도초음파 신호를 단시간 푸리에 변환 신호처리를 수행하여 구한 신호를 비교한 결과 L(0,1) 및 L(0,2) 모드임을 확인하였다.
- 2) 이를 바탕으로 주파수 500 kHz 에서 피더관 직관부와 곡관부 notch 에 대한 탐지능을 검사한 결과 직관부에서는 원주 방향 notch에 대한 신호만을 볼 수 있었으나 곡관부에서는 축방향 notch 신호도 볼 수 있었다. 이것은 초기에 발생한 L-모드 유도초음파가 곡관부를 통과하면서 모드 변환을 일으켰으며 실제로 곡관부에서의 축방향 결함은 엄밀한 의미에서 원주 방향 성분도 존재하기 때문이라고 판단된다.
- 3) 축 방향 결함 위치에서 Rocking 유도초음파 기법을 적용하여 원주 방향으로 유도파를 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.

## 후 기

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

## 참고 문헌

1. J. L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", pp.96, Cambridge University Press (1999)
2. D. C. Gazis, J. Acoust. Soc. Am., 31 (5), pp.568-573 (1959).
3. J. J. Ditri and J. L. Rose, J. Appl. Phys. 72 (7), pp.2589-2597 (1992).
4. J. J. Ditri, J. Acoust. Soc. Am., 96, pp.3769-3755 (1994).
5. J. L. Rose, J. J. Ditri, A. Pilarski, K. M. Rajana, and F. Carr, NDT & E Int., 27 (6), pp.307-310 (1994).
6. H. Kwun and K. A. Bartels, J. Acoust. Soc. Am., 99(2) pp.962-968 (1996).
7. D. N. allyne, M. Lowe and P. Cawley, J. NDE, 15 (1) pp.11-20 (1996).
8. H. J. Shin and J. L. Rose, J. NDE, 17(1), pp.27-36 (1998).
9. 신현재, J. L. Rose, 비파괴검사학회지, 20(1), pp.1-9 (2000).
10. 송성진, 박준수, 신현재, 비파괴검사학회지 21(4), pp.406-414 (2001).
11. Y. Cho and J. L. Rose, Nondestr. Test Eval. 12, pp.323-339 (1996).
12. J. Li and J. L. Rose, J. Acoust. Soc. Am., 109 (2), pp.457-464 (2001).

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.

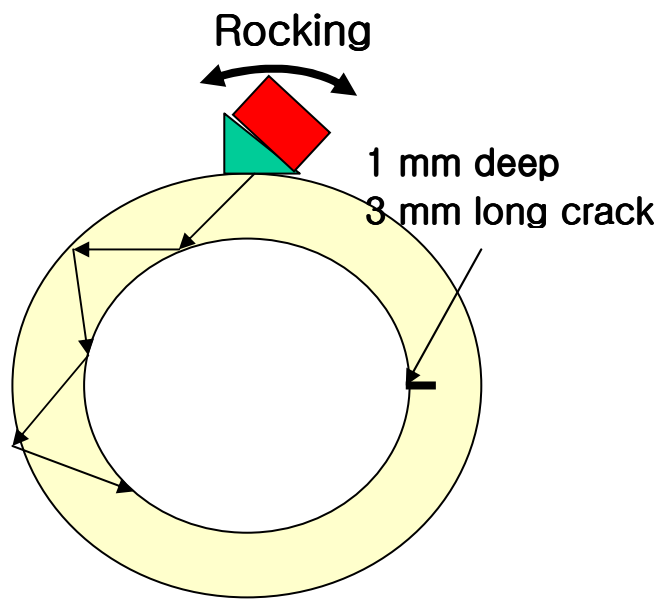


Fig. 2. 피더관 축방향 결함의 Rocking 표면과 탐상법

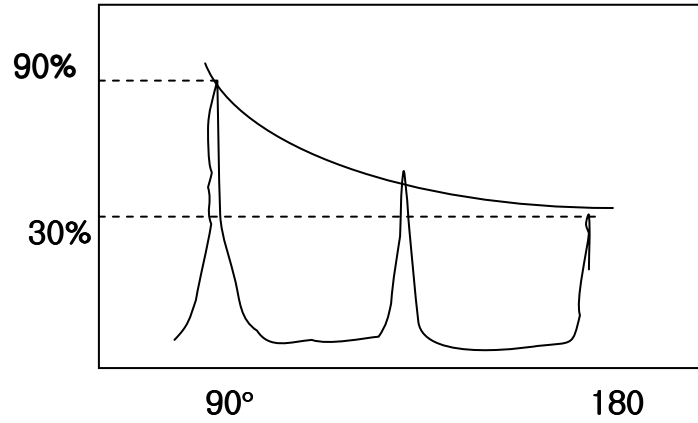


Fig. 3. Determination of DAC curve by rocking surface wave technique.

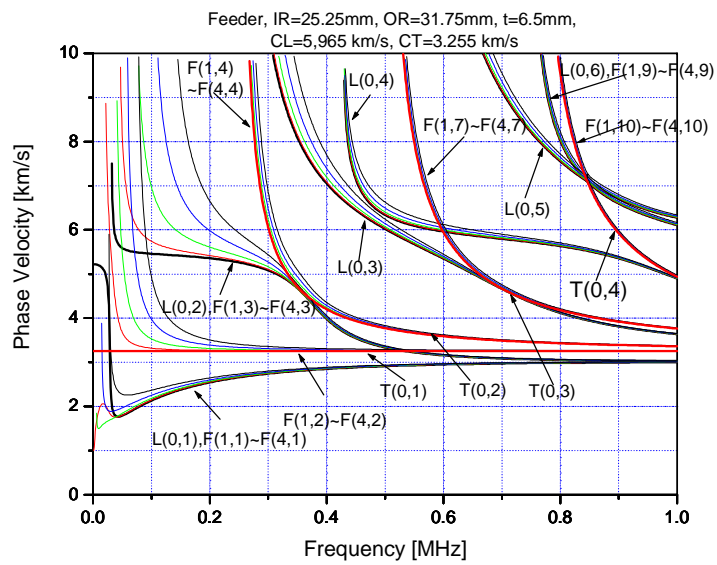


Fig. 4. Dispersion curves of phase velocity for feeder pipe.



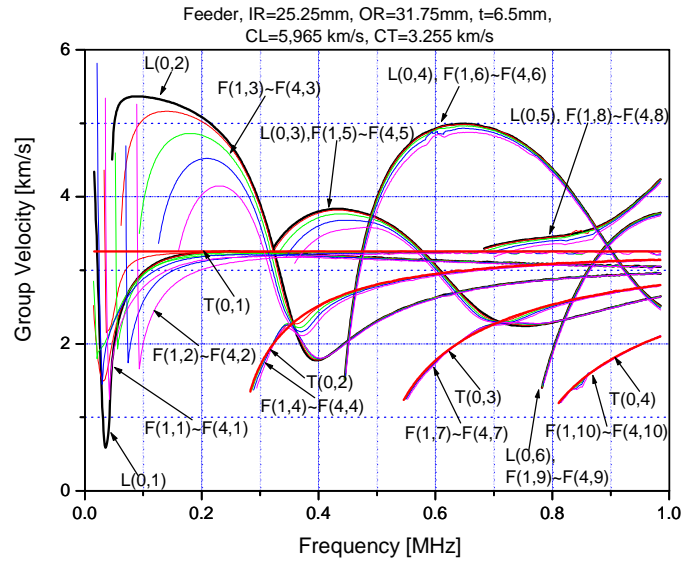


Fig. 5. Dispersion curves of group velocity for feeder pipe.

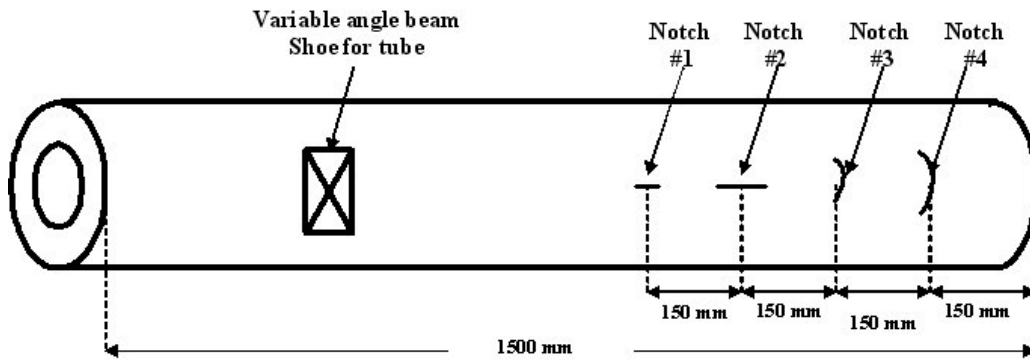
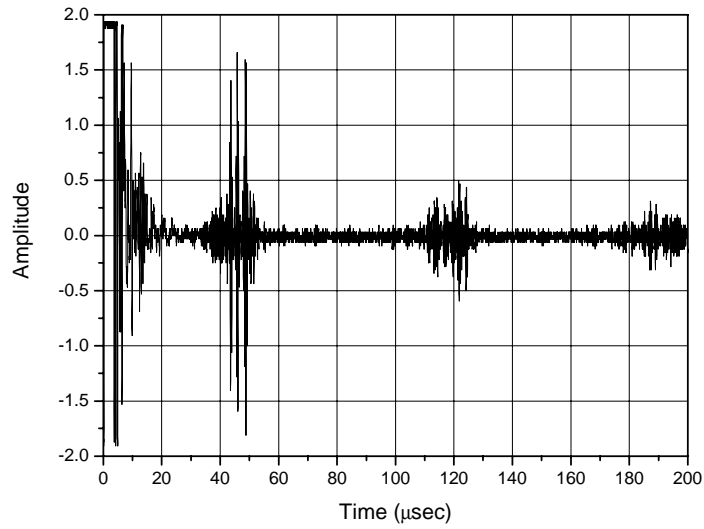
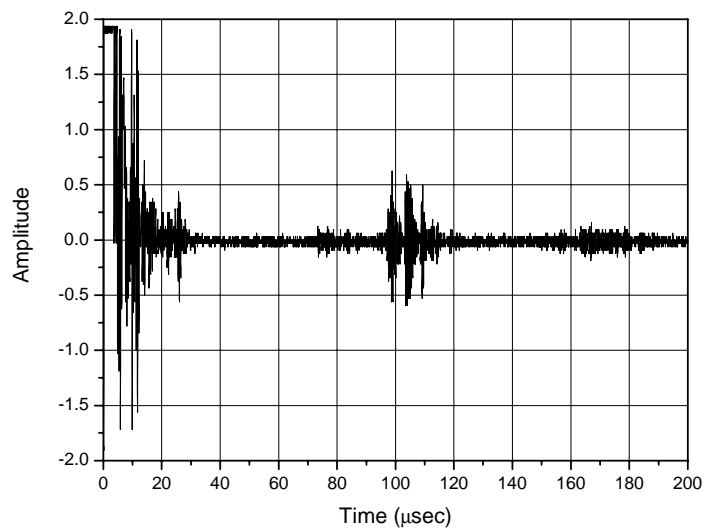


Fig. 6. Configuration of guided wave inspection of artificial notches in Feeder pipe.

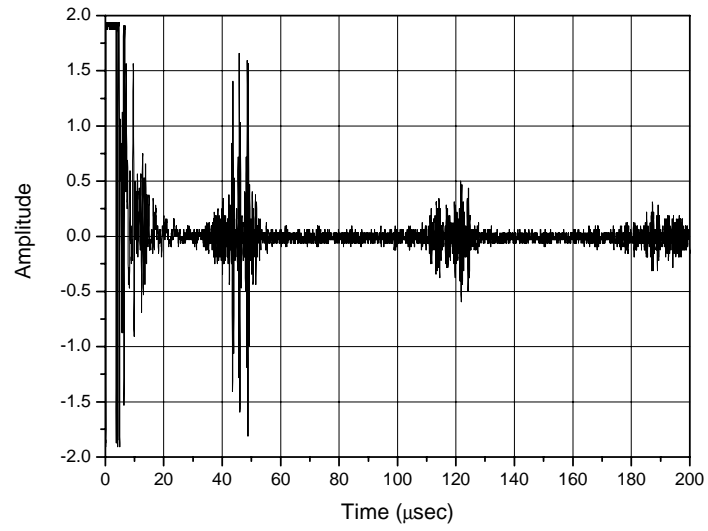


(a) A notch is located at  $90^\circ$  position of circumference

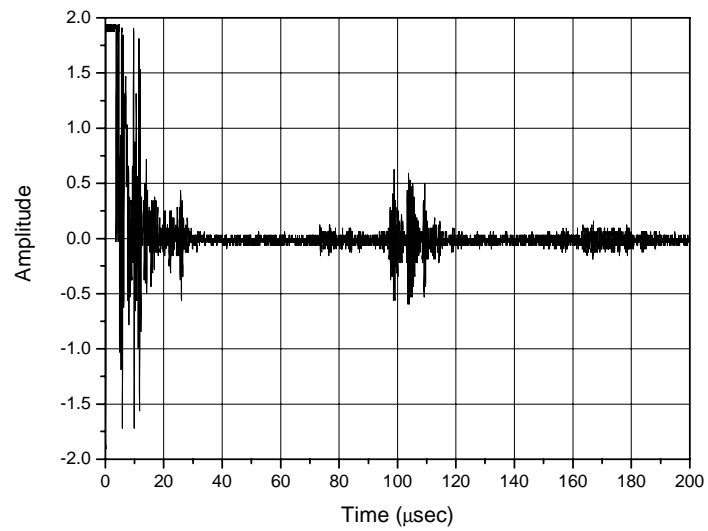


(b) A notch is located at  $270^\circ$  position of circumference.

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.

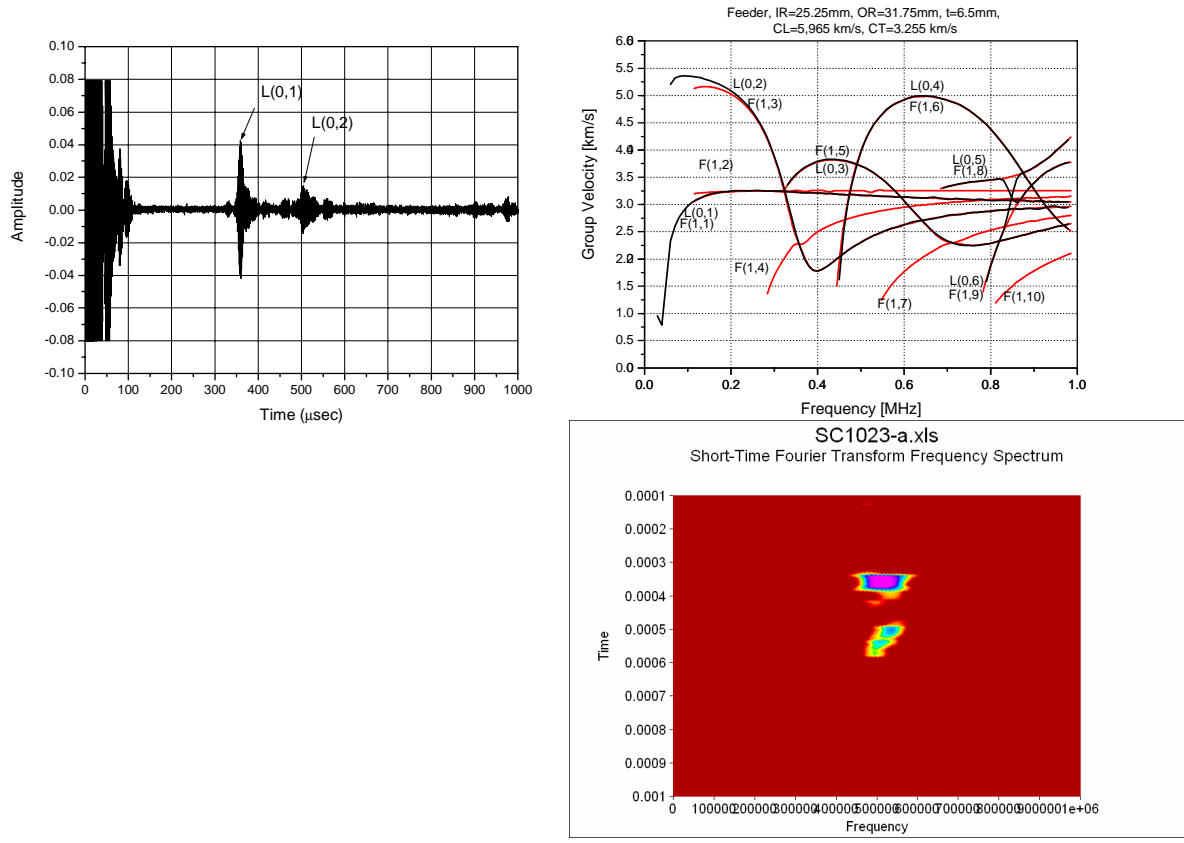
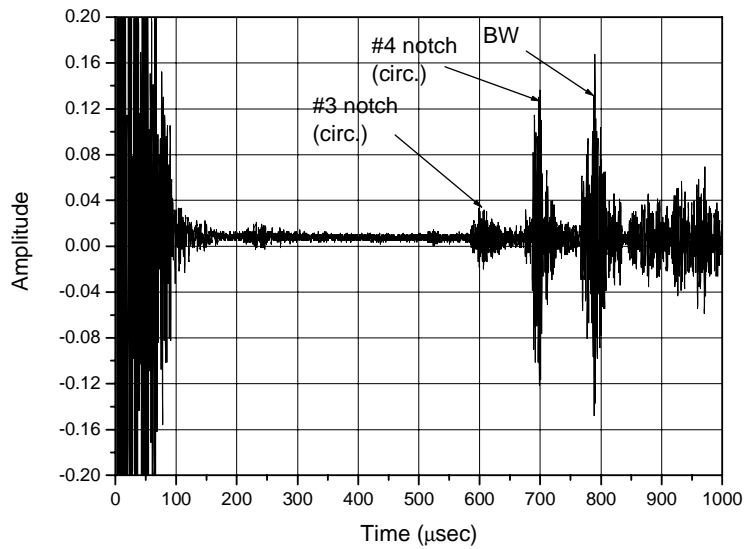
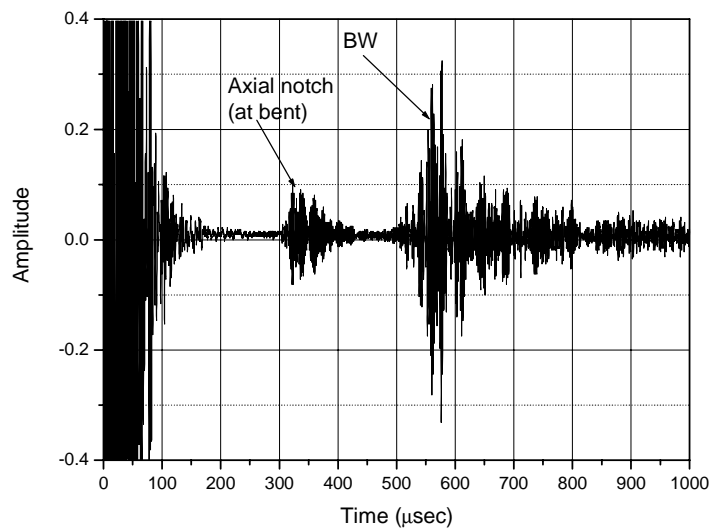


Fig. 9. Signal from the end of feeder pipe and comparison of group velocity dispersion curve and result of STFT signal processing.



(a) Guided wave signal from straight feeder pipe with 4 notches ( $f= 500$  kHz,  $L(0,1)$  mode).



(b) Guided wave signal from bent feeder pipe with a notch. ( $f= 500$  kHz,  $L(0,1)$  mode).

Fig. 10. Guided wave signals from artificial notches of feeder pipes.