

## 원주 유도초음파의 분산 특성 해석 및 가압중수로 피더관 균열 탐지에의 응용

### Analysis of Dispersion Characteristics of Circumferential Guided Waves and Application to Feeder Cracking in Pressurized Heavy Water Reactor

정용무\*<sup>†</sup>, 김상수\*, 이동훈\*, 정현규\*

Yong-Moo Cheong\*<sup>†</sup>, Sang-Soo Kim\*, Dong-Hoon Lee\* and Hyun-Kyu Jung\*

초 록 배관의 축방향 균열 검사를 위하여 원주 방향으로 진행되는 유도초음파 모드를 적용하였다. 배관의 곡률을 변수로 원주 유도초음파의 분산선도를 계산하였으며 이를 배관 검사에 적용하기 위하여 중수로 피더관의 곡관부 축방향 균열을 탐지에 적용하였다. 상대적으로 낮은 주파수에서는 Lamb 파 특성을 따르나 주파수가 증가함에 따라 평판의 경우, 즉 곡률이 무한대인 경우 첫 번째  $A_0$  모드와 두 번째  $S_0$  모드가 합쳐져서 Rayleigh 모드 형태로 변화한다. 한편 곡률을 가진 배관의 경우는 주파수가 증가하더라도 첫 번째 모드와 두 번째 모드가 합쳐지지 않았다. 이러한 해석을 기초로 하여 배관의 일종인 중수로 피더관 곡관부 축방향 결함을 탐지하기 위하여 사각 탐촉자를 사용하여 Rocking 원주 유도초음파 기법을 적용하였다. 원주 방향으로 유도파를 진행시키면서 인공 결함으로부터의 수집된 신호를 분석하여 진동 모드를 확인하였으며 두께 대비 10% 깊이의 notch도 검출할 수 있음을 확인할 수 있었다.

**주요용어:** 원주유도초음파, 분산선도, 배관검사, 균열 탐지

**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  $A_0$  mode coincide and eventually become Rayleigh wave mode. In the case of pipe, however, as the curvature increases, the lowest modes do not coincide even in the high frequencies. Based on the analysis, a rocking technique using angle beam transducer was applied to detect an axial defect in the bent region of PHWR feeder pipe. Based on the analysis of experimental data for artificial notches, the vibration modes of each signal were identified. It was found that the notches with the depth of 10% of wall thickness can be detected with the method.

**Keywords:** circumferential guided waves, dispersion curves crack detection, pipe inspection

## 1. 서 론

중수로 피더관은 중수로 압력관에 중수를 공급하고 핵분열 반응에 의해서 가열된 중수를 증기발생기로 보내는 배관으로 600 MW급 CANDU 형 원자로에는 입구측 380개, 출구측 380개의 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 2001년이래로 곡관부 균열이 발생하여, 누설 사고가 발생하고 있다. 이에 따라 피더관의 건전성을 확보하기 위한 비파괴검사를 수행해야 하는 데 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 곡물에 따른 분산선도를 계산하였으며 실제 축 방향 균열에 대해 적용하여 원주유도초음파 검사 기술에 대해서 그 타당성을 검토하고 실험 결과를 제시하고자 한다.



Fig. 1 Feeder pipes in PHWR reactor

## 2. 원주 유도초음파 분산선도 계산

배관의 유도초음파에 관한 연구는 1960년대에 기초 연구[5]가 수행되다가 1990년대에 열교환기 튜브나 배관의 비파괴검사에 적용하기 위한 이론적, 실험적 연구가 활발히 진행되었다[6-15]. Fig. 2와 같이 내경이  $a$  이고 외경이  $b$  인 2차원 선형 탄성 특성을 가진 등방성 원통 구조에서 원주 방향으로 진행하는 유도초음파의 분산선도 계산을 위한 해는 이미 여러 논문[4,15]에 밝혀져 있다. 배관의 내경 및 외경, 재료 내의 종파 및 횡파 속도를 입력한 뒤 주파수와 위상속도를 변화시키면서 고유치 문제를 풀기 위한  $4 \times 4$  행렬식을 계산하여 조건이 맞는 경우의 주파수와 위상속도를 계산하고 이를 위상속도-주파수 공간에서 도시하면 원주 유도초음파 분산선도를 작성할 수 있다.

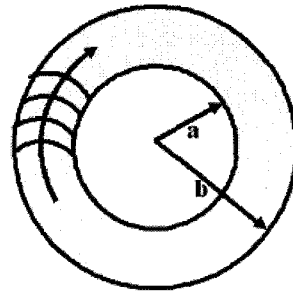


Fig. 2 Cross-section of the pipe for a propagation of circumferential guided wave

본 연구에서는 이미 발표된 원주유도파에 대한 분산선도의 해[4,15]를 기초로 하여 원주 유도초음파 분산선도를 계산하는 전산 프로그램을 개발하였다. 평판 및 다양한 곡률을 가진 배관에 대해 원주 유도초음파 위상속도 분산선도를 계산한 결과를 Figs. 3 (a)~(f)에 나타냈다.

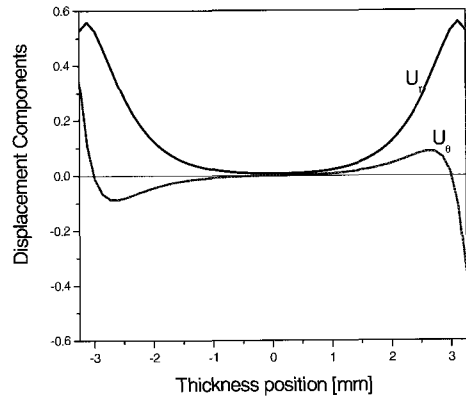
Fig. 3 (a)에 보인 바와 같이 곡률이 없는 평판의 경우, 즉  $\eta = a/b = 1.0$  인 경우에는 원래 전형적인 Lamb 파 모드에서 주파수가 증가함에 따라 상대적으로 두께대비 파장이 짧아지며, 비대칭 모드 ( $A_0$ ) 와 대칭 모드 ( $S_0$ ) 가 합쳐지고 Rayleigh 모드로 변화한다. 즉 평판의  $S_0$  모드의 경우 주파수가 매우 낮을 때에는( $\text{freq.} \approx 0$ ) 진행 방향에 평행한 변위 성분만 존재하고 에너지 분포도 두께 방향으로



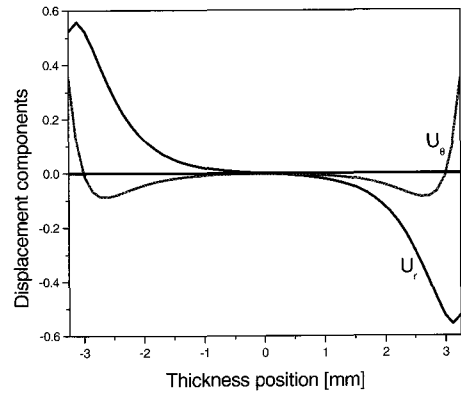
고르게 분포하나 주파수가 증가함에 따라 그 양상이 복잡해져서 원주 방향 변위(파의 진행 방향 변위)와 반경 방향 변위(표면에 수직한 변위)가 복잡하게 나타난다. 주파수가 매우 높은 경우 변위 벡터나 에너지는 표면 근처에 집중되어 내면과 외면을 진행하는 한 쌍의 Rayleigh 모드처럼 변화한다. 한편  $A_0$  모드의 경우도 주파수가 매우 낮을 때에는 (freq.  $\approx 0$ ), 진행 방향에 수직한 변위, 즉 표면에 수직한 변위만이 존재하나 주파수가 증가함에 따라 변위 양상이 복잡해지고 위상 속도와 군속도가 급격히 변화하기 때문에 분산성이 큰 상태가 되며 주파수가 더 높아지면  $S_0$  모드와 합쳐져서 내면과 외면을 진행하는 한 쌍의 Rayleigh 모드처럼 진행한다. 그러나 곡률을 가진 원주파의 경우에는 엄밀하게 따져서 평판에서 말하는 비대칭 모드나 대칭 모드라고 볼 수 없기 때문에 분산선의 아래로부터 순서대로 첫 번째, 두 번째, 세 번째 모드...로 부른다. Figs. 3(b)~(f)에서 보인 바와 같이 곡률이 증가함에 따라, 즉  $\eta$ 가 작아질수록 첫 번째 모드(준-대칭 모드)와 두 번째 모드(준-비대칭 모드)의 간격이 커지며 주파수가 증가하더라도 합쳐지지 않는다.

본 연구의 대상체인 피더관에 대한 결함의 민감도를 예측하기 위해서 평판에서의  $A_0$  모드에 상응하는 첫 번째 모드와  $S_0$  모드에 상응하는 두 번째 모드에 대해 사용주파수 2.25 MHz에서의 두께 방향으로의 변위 벡터의 분포를 Fig. 4에 보였으며 두께 방향으로의 에너지 분포를 Fig. 5에 보였다. Fig. 4에서 횡축은 배관의 반경 방향으로의 두께를 의미하며 종축은 변위 벡터의 크기를 나타내고  $U_r$  과  $U_\theta$  는 각각 반경 방향 및 원주 방향 변위 벡터를 의미한다. 변위 벡터나 에너지 분포를 보면 앞서 예측한대로 Rayleigh 파의 특성인 내면과 외면에서 한 파장 깊이, 즉 총 두께 6.5 mm 중  $\approx 1.5$  mm 이내에 집중되고 있음을 알 수 있다. 실제로 중앙 부분에서는 에너지 밀도가 거의 없고 양 표면에 집중되기 때문에 중앙부에 존재하는 결함에 대해서는 거의 검출하지 못할 것으로 예측되는 데 피더관에 발생하고 있는 결함은 내면에서 시작해서 바깥쪽으로 진행되는 전형적인 응력부식균열이므로 결함 검출에는 큰 문제가 없다고 판단된다.

위에 원주유도초음파 분산선도 분석에서 본 바와 같이 Rayleigh 파는 비교적 높은 주파수에서 음속



(a) The 1st mode (corresponds to the  $A_0$  mode in the plate)



(b) The 2nd mode (corresponds to the  $S_0$  mode in the plate)

Fig. 4 Through-thickness displacement field for the circumferential guided waves of frequency 2.25 MHz in the feeder pipe:  $U_r$  and  $U_\theta$  denote the radial and circumferential displacement vector

의 주파수 의존성이 없으며 식 (1)에서 보인 바와 같이 1차 임계각 조건으로 Lucite 웨지를 사용할 경우 steel에 대해서 약  $56^\circ$ 로 계산된다[4].

$$\sin \theta_{w=} = \frac{c_{l,w}}{c_R} \tag{1}$$

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

관부에 축 방향 균열을 검사하기 위해서는 위와 같은 입사각 조건을 맞추어야 하지만 실제로는 배관 외면이 곡면이므로 정확한 입사 각도를 맞추기 어렵기 때문에 Fig. 6에 보인 바와 같이 일반적인 소형 45° 사각 탐촉자를 피더관 곡관부 외측(extrados)에 위치하고 rocking motion으로 원주 방향으로의 입사 각도를 변화시키면서 반사파 신호 파형이 최대가 되는 조건에서 결함을 탐상한다.

이러한 rocking 원주유도초음파 방식으로 축방향 균열을 탐지하고 그 길이를 평가하기 위해서 일반적인 초음파검사 방법, 예컨대 정해진 크기의 인공 결함을 가진 보정시험편을 사용하여 ASME 코드에 명시된 결함 탐지 및 평가 방식으로 보정시험을 시행하여 Fig. 7에 보인 바와 같이 거리-진폭 곡선을 작성한 후 탐상기의 증폭율을 14 dB 높여서 탐상한다. 만약 배관 내부에 물이 차있을 경우라면 배관 내면에서의 초음파 방사에 의한 에너지 손실을 고려하여 6 dB를 추가하여 탐상기의 증폭율을 총 20 dB 높인 상태에서 탐상하면서 거리-진폭 보정 곡선을 기초로 균열 길이를 평가할 수 있다. 한편 만약 결함 신호가 의심될 경우에는 반대 방향으로 원주유도파를 보내어서 그 거리 관계를 해석해 보면 결함 유무를 확인할 수 있다. 그러나 이 방법을 적용하여 중수로 피더관을 검사할 경우 검사자가 초음파 탐촉자를 가지고 접근이 가능한 피더관에 대해서만 제한적으로 검사할 수 있음을 밝혀둔다.

3. 실험적 검증

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 시험편은 피더관 직관부 내면 및 외면에 각각 길이 25 mm, 두께 대비 10% 깊이, 폭 200 μm 인 EDM notch를 가공하였다. 원주 유도초음파 방법을 적용하기 위하여 주파수 2.25 MHz, 45° 사각 탐촉자를 원주 방향으로 흔들면서 신호를 수집하였는데 탐촉자와 결함의 상대 위치는 배관 단면에서 보아 탐촉자의 위치를 12시 위치에 놓고 축 방향 notch의 위치를 3시 위치(90°)에서 반사 신호를 수집하였으며 다음에 반대 원주 방향으로 초음파를 보내서 9시 위치(270°)에서 신호를 수집하였다.

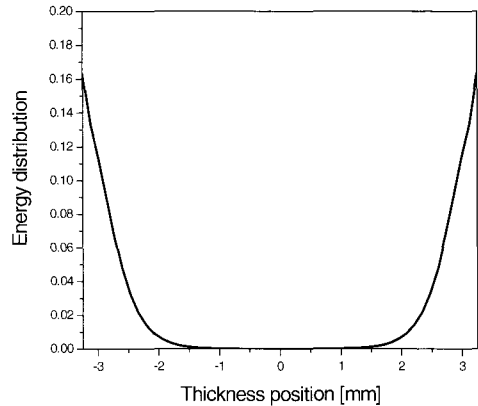


Fig. 5 Through-thickness energy distribution of the 1st mode at frequency 2.25 MHz for the feeder pipe. The energy distribution of the 2nd mode is similar to the 1st mode at the same frequency.

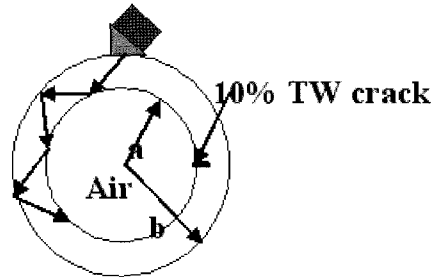


Fig. 6 Concept of rocking guided wave technique

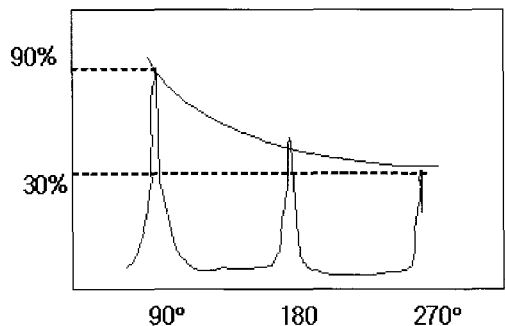
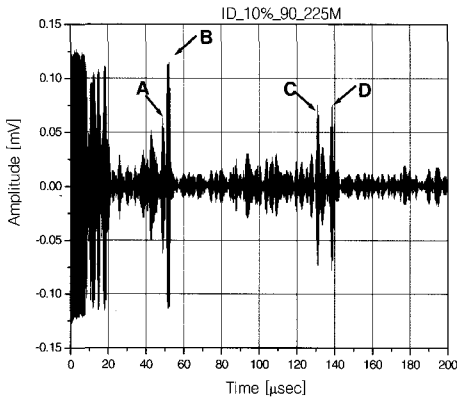
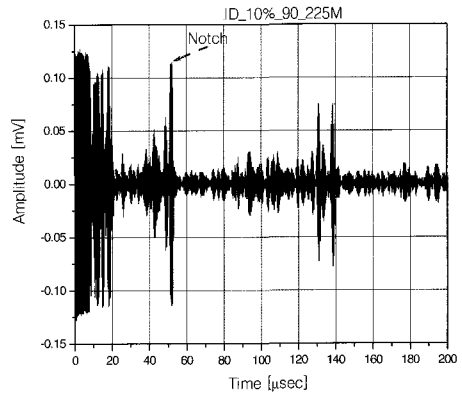


Fig. 7 Determination of DAC curve by rocking surface wave technique

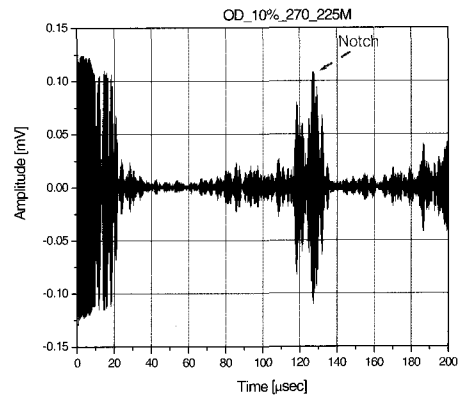
피더관 직관부 축방향 notch 에 대해 rocking 원주유도초음파 방법으로 검사한 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 보였다. Fig. 8에서는 깊이가 두께 대비 10% 인 내면 결함에 대해 원주 방향 3시 위치와 9시 위치에서 검사한 결과를 보였으며 Fig. 9에서는 동일한 조건으로 외면 결함에 대한 결과를 보였다. 결함이 원주 방향 3시 위치에 있는 경우 (Fig. 8(a)와 Fig. 9(a) 참조) 첫 번째 신호군이 3시 위치 거리에서 직접 반사된 신호이며 원주를 360° 돌고 다시 3시 위치에서 반사된 신호가 두 번째 신호군으로 나타나는 데 이것은 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)에 보이는 9시 위치에서의 결함의 반사 신호와 같은 시간에서 나타나는 것으로써 확인할 수 있다.



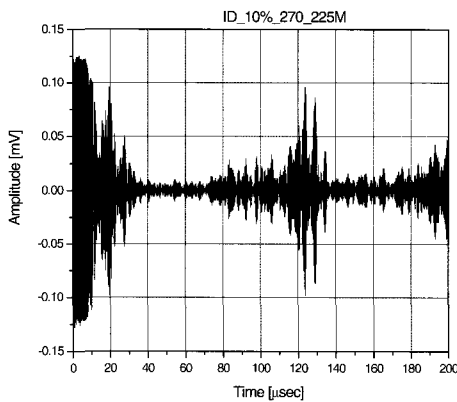
(a) A notch located at 3 o'clock position of circumference



(a) A notch located at 3 o'clock position of circumference



(b) A notch located at 9 o'clock position of circumference



(b) A notch located at 9 o'clock position of circumference

Fig. 8 Signals from ID notch with the depth of 10% of wall thickness by rocking guided wave technique from the circumference of a straight feeder pipe

Fig. 9 Signals from OD notch with the depth of 10% of wall thickness by rocking guided wave technique from the circumference of a straight feeder pipe

본 실험에서는 소형 압전 초음파 탐촉자를 사용하여 rocking 운동을 하면서 신호의 최대값이 나타나는 조건을 잡았기 때문에 입사 초기에 다중 반사 등 복잡한 신호가 나타나고 있다. 또한 피더관에 해당하는 분산선도인 Fig. 3(d)의 분산선도에서 주파수 2.25 MHz에서  $\text{freq} \times \text{thickness} = 16.25$ 에서 각각 속도가 다른 여러 개의 모드가 존재하기 때문에 시간 영역에서 측정하면 하나의 결함 신호에 대해서도 여러 개의 신호가 나타나며 이런 복잡한 현상으로 인하여 신호 해석에 어려움이 있다. 압전형 초음파 탐촉자를 사용한 유도초음파 신호를 시간 영역에서 판독하기 위해서는 이러한 속도가 다른

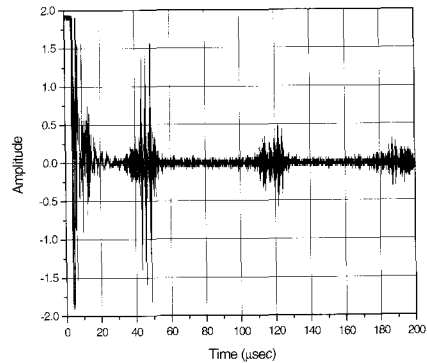
여러 모드를 고려해야 하며 신호의 형상도 날카로운 신호는 속도의 분산성이 없으며 분산선도에서 수평축에 평행한 모드이므로 해석하기에 용이한 반면에 넓게 퍼져 보이는 신호는 분산성이 있는 즉 수평축에 대해서 기울기를 가진 모드이므로 해석에 어려움이 따른다. 평판에서의  $A_0$ 에 해당하는 첫 번째 모드는 속도가 가장 낮으므로 이에 해당하는 신호는 시간축에서 가장 뒤에 나타날 가능성이 있다. 한편 Fig. 3(d)에서 위상속도 분산선도를 나타내고 있는 데 본 실험 조건(freq \* thickness = 16.25) 근처에서의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 모드들의 분산선도는 횡축에 거의 평행하므로 위상속도와 군속도가 거의 같다고 보아 별도의 군속도 분산선도는 제시하지 않았다.

Fig. 8(a)에서 원주 방향 3시 위치에서 두께 대비 10% 인 내면 notch에 대한 결과를 보면 시간 축 50  $\mu\text{sec}$  근처와 130  $\mu\text{sec}$  근처에서 여러 개의 신호들이 보이는데 이들 중 비교적 날카로운 신호들의 음속을 계산해 보면 신호 "A"는 Fig. 3(d) 분산선도에서 두 번째 모드 (평판에서  $S_0$ 에 상응하는 모드로 주파수 2.25 MHz에서 위상속도=3.21 km/s로 계산됨)에 해당되고, 신호 "B"는 첫 번째 모드 (평판에서  $A_0$ 에 상응하는 모드이며 2.25 MHz에서 위상속도=2.74 km/s로 계산됨)에 해당됨을 알 수 있다. 한편 신호 "C"와 신호 "D"는 각각 초음파가 원주 한 바퀴를 일주한 뒤 다시 3시 위치에서 반사된 두 번째 신호인데 Fig. 8(b)에 보인 9시 위치 notch에서 직접 반사된 신호와 동일하다.

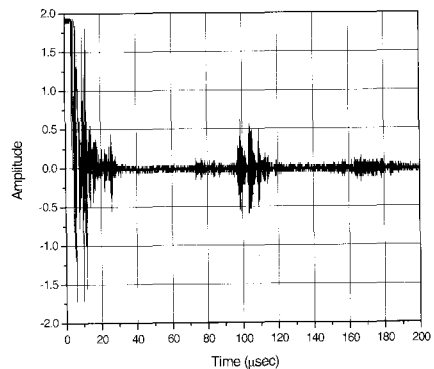
Fig. 10은 같은 방법을 실제 피더관 곡관부 인공 notch 결합에 적용한 결과이다. 이 방법은 비교적 신호 크기가 양호하므로 Fig. 6과 Fig. 7에 보인 개념을 적용하여 ASME 방식에 따라 보정 시험을 수행한 뒤 배관 내면이 공기인 경우에는 14 dB drop 방법으로, 만약 내면이 물로 차 있을 경우에는 내면에서의 에너지 손실을 감안하여 20 dB drop 방법으로 결함의 길이를 평가하여 실제 검사에 적용할 수 있으리라 판단된다.

이 방법은 비교적 정확한 결함의 정량 평가가 가능하기는 하나 실제 다수의 피더관에 대해서 검사 부위와의 접근이 가능하지 않고 접근 가능한 피더관의 경우에만 적용할 수 있으며 고방사능 지역이므로 많은 시간을 소모할 수 없다는 단점이 있다. 향후 전자기음향센서(EMAT) 방식이나 자외선센서 방식에 의해 축방향으로 진행되는 원거리 유도초음파

검사 기술이 개발되면 일차적으로 축방향 원거리 유도초음파 방식으로 검사한 후 이상이 있다고 판단되는 피더관에 대해서만 본 연구에서 제시한 원주유도초음파 방식에 의한 정량 평가를 수행하는 것이 최적의 방법이라고 판단된다.



(a) A notch located at 3 o'clock position of circumference



(b) A notch located at 9 o'clock position of circumference

Fig. 10 Typical signals by rocking guided wave technique from the circumference of a bent feeder pipe

#### 4. 결론

- 1) 피더관 곡관부 축방향 균열을 탐지하기 위하여 원주 유도초음파 검사기술을 개발하였다. 원주 유도초음파 전파 특성을 파악하기 위한 위상속도 분산선도 해석 전산 프로그램을 작성하였다. 다양한 곡물에 대한 위상속도 분산선도를 계산하여 사용 주파수에서 가능한 파동 모드를 예측하였다.

- 2) 주파수 2.25 MHz에서 평판의 경우에는  $A_0$  모드와  $S_0$  모드가 합쳐지며 곡률이 증가함에 따라 두 모드는 합쳐지지 않으며 피더관에 대한 유도초음파 분산특성을 분석한 결과 변위 및 에너지가 내면 근처와 외면 근처에 집중된 한쌍의 Rayleigh 모드 형태로 진행함을 확인할 수 있다.
- 3) 축 방향 결함에 대해 압전형 초음파 탐촉자를 사용하여 rocking motion에 의한 원주 유도초음파 기법을 적용할 경우 다중 모드에 의한 다중 신호가 나타났으나 비교적 분산성이 적은 날카로운 신호에 대해 음속을 계산한 결과 각각의 모드를 확인할 수 있었다.
- 4) 관벽 두께 대비 10% 깊이의 내면 notch 및 외면 notch에 대한 신호를 수집한 결과 우수한 탐지능을 확인할 수 있었으며 향후 ASME 코드에서 제시하는 결함 검사법을 준용하여 10% notch를 기준으로 보정시험을 한 뒤 균열 탐지 및 균열 길이를 정량적으로 평가할 수 있다고 판단된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] 정용무, 이동훈, 정현규, "중수로 피더관 균열의 비파괴검사 방안", 비파괴검사학회 2003 춘계학술발표회 논문집, pp. 43-49, (2003)
- [2] 정용무, 이동훈, 정현규, "중수로 피더관 결함에 대한 초음파검사", 제10회 원전기기전전성 심포지엄, 서귀포, (2003)
- [3] Y. M. Cheong, D. H. Lee and 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, (2003)
- [4] J. L. Rose, Ultrasonic Waves in Solid Media, pp. 96, Cambridge University Press (1999)
- [5] D. C. Gazis, "Three dimensional investigation of propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 31, No. 5, pp. 568-573, (1959)
- [6] J. J. Ditri and J. L. Rose, "Excitation of guided elastic wave modes in hollow cylinders by applied surface tractions," J. Appl. Phys. Vol. 72, No. 7, pp. 2589-2597, (1992)
- [7] J. J. Ditri, "Utilization of guided elastic waves for the characterization of circumferential cracks in hollow cylinders," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 96, pp. 3769-3755, (1994)
- [8] J. L. Rose, J. J. Ditri, A. Pilarski, K. M. Rajana and F. Carr, "A fuided wave inspection technoque for nuclear steam generator tubing," NDT & E Int., Vol. 27, No. 6, pp. 307-310, (1994)
- [9] H. Kwun and K. A. Bartels, "Experimental observation of elastic-wave dispersion in bounded solids of various configurations," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 99, No. 2 pp. 962-968, (1996)
- [10] D. N. Alleyne and P. Cawley, "The excitation of Lamb waves in pipes using dry-couped piezoelectric transducers," J. NDE, Vol. 15, No. 1, pp. 11-20, (1996)
- [11] H. J. Shin and J. L. Rose, "Guided wave tuning principles for defect detection in tubing," J. NDE, Vol. 17, No. 1, pp. 27-36, (1998)
- [12] 신현재, J. L. Rose, 송성진, "유도초음파를 이용한 열교환기 튜브 탐상", 비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 1, pp. 1-9, (2000)
- [13] 송성진, 박준수, 신현재, "폴리에틸렌 코팅 가스 배관의 광범위탐상을 위한 유도초음파 모드 선정 및 결함 검출", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 4, pp. 406-414, (2001)
- [14] Y. Cho and J. L. Rose, "Guided wave in water loaded hollow cylinder," Nondestr. Test Eval. Vol. 12, pp. 323-339, (1996)
- [15] J. Li and J. L. Rose, "Excitation and propagation of non-axisymmetric guided waves in a hollow cylinder," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 109, No. 2, pp. 457-464, (2001)
- [16] J. Qu and L. J. Jacobs, "Guided circumferential waves and their applications in characterizing cracks in annular components," Mater. Eval. Vol. 61, No. 1, pp. 85-93, (2003)