

# 유도초음파기법을 이용한 튜빙 결함측정에 관한 연구

주경문<sup>†</sup>·천근영\*·이정석\*

## A Study for Tubing Pipe Flaw Sizing by Using Guided Ultrasonic Wave

Kyung Mun Joo<sup>†</sup>, Keun Young Cheon\* and Jeong Seok Lee\*

### ABSTRACT

There is extensive tubing pipe in the nuclear power plant under high temperature and pressure. Erosion and corrosion defects are expected on this tubing pipe due to environmental and mechanical factors. In this study, Guided Ultrasonic Wave technique was applied to detect defects. The technique explores the advantages of the Guided Ultrasonic Wave method that inspects along the wall of the pipe and can travel long distances, providing rapid collection of data. This paper presents a case study of the Guided Ultrasonic Wave testing of 3/8" tubing pipe. This study offers to understand detected signals through correlation between amplitude and depth of defects.

**Key Words** : Guided Ultrasonic Wave(유도초음파), Optimal frequency(최적주파수), Cut-off frequency(단절주파수), Bulk wave(체적파), EDM(Electrical Discharge Machining, 방전가공)

### 1. 서론

가압중수로형 원자력발전소의 결함연료담지계통은 연료에 결함이 발생하였을 때 결함 위치를 확인하기 위한 설비이며, 핵연료 채널당 1개씩 총 380개의 시료채취를 위한 튜빙이 설치되어 있다. 이는 좁은 공간에 복잡하게 배치되어 있어 운전 중 열팽창과 기기 진동 등으로 튜빙 지지대 또는 튜빙간의 상호접촉에 의한 손상과 튜빙의 연결 용접부에 결함 등이 발생하여 중수 누설로 인한 발전정지가 야기되고 있다. 검사대상의 기하학적 형상(40m 이상 길이를 가진 곡선의 소구경 튜빙), 공간 협소 및 고방사선지역의 작업환경에 의해 기존의 비파괴검사 방법으로 검사가 불가능하다. 이에

따라 조기에 결함 튜빙을 검출하여 예방정비를 실시하기 위한 새로운 검사기법이 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 가압중수로형 결함연료담지계통 튜빙과 동일한 3/8" 튜빙 시험편에 인공결함을 삽입하여 유도초음파기법에 의한 결함 검출 및 크기 측정 가능성을 고찰하고자 한다.

### 2. 이론적 고찰

유도초음파 검사기법은 구조물의 기하학적 구조를 따라 전파하는 초음파를 이용한 방법으로써, 기존의 체적파(bulk wave)를 사용한 국부검사법에 비해 탐촉자 이동없이 고정된 지점으로부터 대형설비를 한번에 탐상할 수 있을 뿐만 아니라 절연체나 코팅재의 제거 없이 구조물이 설치된 상태로 검사를 수행할 수 있다.

Fig. 1은 기존초음파 검사와 유도초음파 검사 기법을 비교하여 그림으로 나타내었다.<sup>1)</sup>

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

E-mail : kmjoo@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5636 FAX : (042)870-5649

\* 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

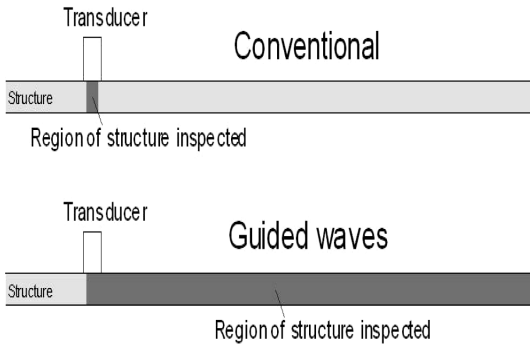


Fig. 1 Guided Wave Propagation

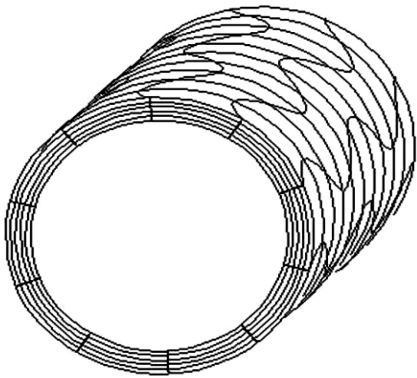


Fig. 2 Shape of Torsional Mode T(0,1)

튜빙에서 유도초음파는 기존의 체적파와 달리 탐촉자에 의해 형성된 파가 구조물을 따라 전파될 때 파의 진행방향에 평행한 성분과 수직인 성분을 갖는 입자 변위(Particle Displacement)에 따라 굽힘형(F모드), 종형(L모드), 비틀림 모드(T모드)가 존재하는데 구조물의 두께 방향에 대한 유도초음파 모드의 송수신 민감도를 결정하는 특정한 파형구조(Wave Structure)가 있으며, 무한개의 유도초음파 모드가 존재하고 이러한 무한개의 모드는 진동수와 구조물의 벽 두께에 따라 전파속도가 변화하는 분산특성을 갖고 있다.<sup>1-3)</sup>

본 연구에서는 주파수변화에 대해 속도가 일정하고 튜빙 전 두께를 통하여 진동하면서 진행하며 넓은 주파수 범위에 걸쳐 사용할 수 있는 특징을 가진 축대칭 비틀림 모드 중 두께방향의 입자변위가 없는 T(0,1) 모드를 사용하였다. Fig. 2는 T(0,1) 모드의 진동 형태를 보여주고 있다.

주파수변화에 전파속도가 일정하게 되는 지점의 주파수를 단절주파수(Cut-Off Frequency)라 하는데,

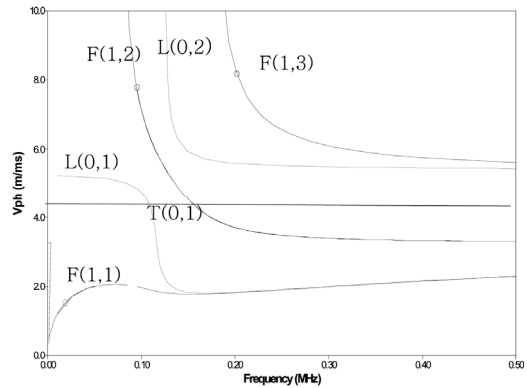


Fig. 3 Dispersion curves for the 3/8" tubing

각 모드별 단절 주파수가 다른 것을 알 수 있다. 결함탐상을 위해 사용되는 검사주파수는 단절주파수 보다 높은 주파수를 사용해야만 정확한 신호 수집 및 평가에 대한 신뢰성을 확보 할 수 있다. 따라서 모든 주파수 영역 내에서 전파속도가 일정한 T(0,1) 모드를 사용하였다.<sup>1,2)</sup>

Fig. 3은 영국 Imperial College에서 개발한 Disperse Software를 이용하여 시험체에 존재하는 모드와 주파수에 따른 속도 변화를 분산 곡선으로 나타냈다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험장치 구성

본 연구에서 사용된 유도초음파탐상 시스템은 GUL(Guided Ultrasonics Ltd)사의 Wavemaker G3™으로 탐촉자링을 튜빙 외면에 부착시켜 배관의 원주방향으로 진동하면서 축방향으로 파를 진행시키는 비틀림형 모드T(0,1)를 사용하였다. 결함에 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 Software를 통해 신호를 분석했다. Fig. 4는 유도초음파 발생 시스템 구성을 나타내고 있으며, 신호를 송·수신하는 장비와 이를 구동하기위한 제어 컴퓨터, 탐촉자링으로 구성되어 있다.

본 시스템에서 사용되는 탐촉자링의 구성은 2개의 열과 3개 구역으로 나뉘어져 있으며, 총 6개의 탐촉자가 설치되며 탐촉자 간 간격은 16mm이다. 송·수신은 소프트웨어를 통하여 제어되며 송신기에서 전파된 에너지는 배관을 따라서 좌우로 전파되고 반사체를 만나면 모드 변환과 함께 에너지가



Fig. 4 Guided Wave Inspection System

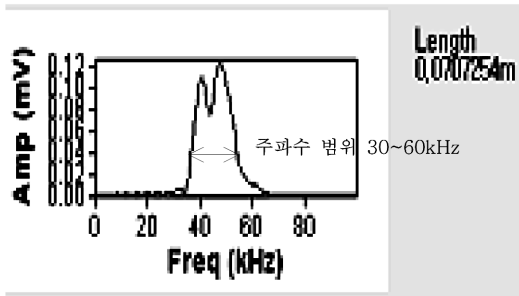


Fig. 5 frequency range

반사되어 수신기에 전달되어 진다.

반사체의 형태에 따라 전달되어진 신호의 양상이 다르며, 주파수 변화에 따라 신호의 크기 및 거동이 변화하는데 이것은 신호평가 분석기술의 중요한 요소이다. Fig. 5는 송·수신기의 주파수 범위를 보여주고 있다.

3.2 시험편 설계 제작

가압중수로 시료채취 튜빙의 결함의 검출 가능성을 실험하기 위해 시료채취 튜빙과 동일한 재질과 두께로 제작하였으며 사양은 Table 1과 같다.

인공결함 가공은 튜빙 지지대 또는 튜브간의 상호 접촉에 의한 마모보다 더 보수적인 결함의 검출가능 여부를 확인하기 위해 EDM 노치로 가공하였다. 상세 사양을 Table 2에 나타내었다.

3.3 신호수집 및 평가

신호수집을 하기 전에 소프트웨어가 시스템의 모든 매개변수들을 제대로 탐지 하였는지 여부를 확

Table 1 Specification of the Material

Tubing Material	Outside Diameter (mm)	Inside Diameter (mm)	Length (m)
SS 304	9.525	6.225	6

Table 2 Specification of the Specimen

Direction of the defects	EDM Notch Depth (%)	Angle	Length (mm)
Axial	20	0°	12
	40	90°	
	60	180°	
	80	270°	
Circ.	20	0°	
	40	90°	
	60	180°	
	80	270°	

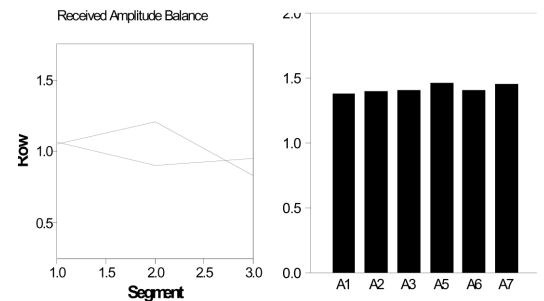


Fig. 6 Results of the Capacitance and coupling Tests

인하였다. 또한 탐촉자의 정전용량(capacitance) 및 커플링을 점검함으로써 수집된 데이터에서 발생할 수 있는 오류를 사전에 제거하고자 하였으며, 탐촉자 각각의 세그먼트들이 제 기능을 적절히 수행하고 있는지 여부를 점검하였다. 점검결과 모든 시스템이 정상적임을 확인한 후 신호수집을 수행하였다 Fig. 6은 탐촉자 정전용량과 커플링 점검 화면이다.

소프트웨어에 의한 가공전의 원 데이터 추이를 분석함으로써 취득된 데이터의 전기적 노이즈 및 주변 소음에 의한 영향여부를 평가, 취득된 데이터의 품질을 검증하였다. Fig. 7은 원 데이터의 추이를 보여주고 있다.

초음파신호는 거리가 증가함에 따라 금속조직 경계면에서의 산란, 흡수 및 반사에 의한 감쇄로 신호의 크기가 감소되므로 거리전폭보정곡선(DAC)

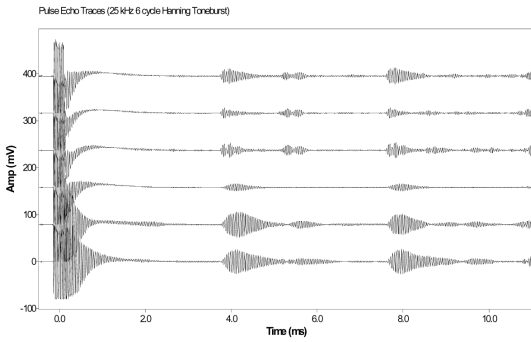


Fig. 7 Plot of the raw data traces

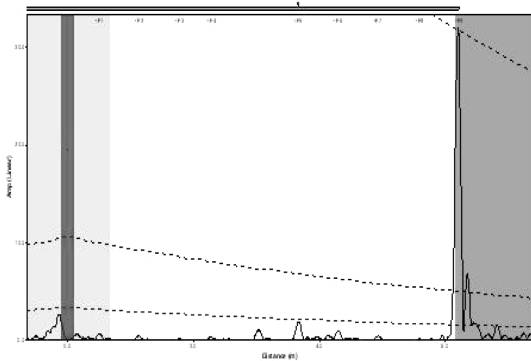


Fig. 8 Setting DAC curve at the end of the signal

을 통한 평가로 신호진폭의 보정을 수행하였으며, 유도초음파 전달 에너지가 전반사되어 수신되는 결함시험편의 끝단 부위 신호를 100%로 설정하였다. Fig. 8은 결함시험편의 끝단 부위 신호를 100%로 설정한 DAC 곡선을 보여주고 있다.

#### 4. 실험결과

##### 4.1 결함검출

상기 인공시험편의 노치형 결함에 대한 신호 분석 결과 모든 인공결함이 검출되었다. 특히 OD Axial 80%, 60%, 40%, Circ. 80%, 60% 인공결함에 대해서는 우수한 감도를 얻을 수 있었다. 반면에 OD Axial 20%, Circ. 40%, 20% 인공결함 신호는 확인가능하나 신호가 약해 노이즈와 구분이 어려웠다. Fig. 9는 인공시험편의 노치결함 신호를 나타내고 있다.

##### 4.2 결함크기측정

본 시험결과 인공결함 깊이가 증가함에 따라 신

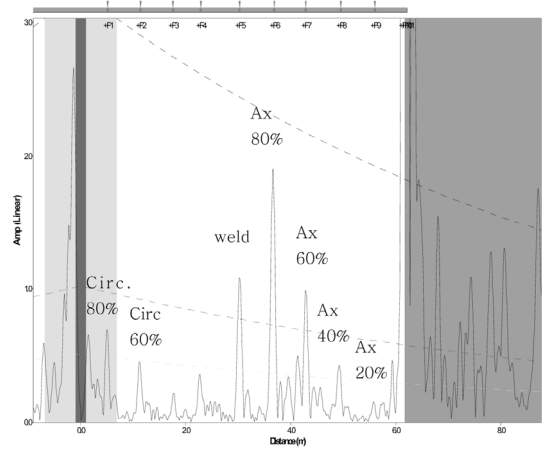


Fig. 9 Experimental result of 3/8" tubing

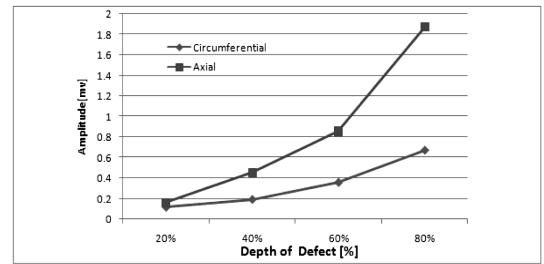


Fig. 10 Amplitude values about depth of the defects

호 진폭크기는 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

특히, 동일한 깊이를 갖는 결함이라도 가공 방향에 따라 신호크기가 다르다는 것을 알 수 있다. 이는 T모드의 경우 재료의 격자를 원주방향으로 진동시키면서 시험체에 진행하므로, 진동방향과 수직인 축방향 결함이 원주방향보다 에너지 반사율이 높아 반사되는 에너지의 크기(Amplitude)가 축방향 인공결함이 더 큼을 알 수 있다.

Fig. 10은 인공시험편의 결함깊이에 따른 신호 진폭의 크기를 나타내고 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서 3/8" tubing 시험편에 대한 인공결함 크기별 진폭의 크기, 검출능 및 신호형상을 연구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 신호의 진폭은 결함깊이에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
- 2) 유도초음파 T(0,1)모드를 사용하여 원거리 검

사(6m)가 가능함을 확인하였다.

3) T(0,1)모드 사용시 축 방향 결함이 원주방향 결함보다 검출감도가 더 좋은 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 소구경 튜빙의 축방향과 원주방향 결함을 검출할 수 있는 주파수 범위와 모드를 선정하였으며, 또한 발생된 결함에 대한 검출 및 정량적 평가기법을 제시함으로써 향후 용접부와 그 주변의 결함에 대한 추가 연구를 통해 원자력 발전소 소구경 튜빙(3/8", 1/2") 검사에 유도초음파를 적용할 수 있는 기반을 마련하였다.

### 참고문헌

1. D. N. Alleyne and P. Cawley, "The Interaction of Lamb Waves with Defects" IEEE Trans Ultrason., Ferro. Freq. cont. Vol. 39, No. 3, pp. 381~397, 1992
2. P. Cawley, M. J. S. Lowe, D.N. Alleyne, B. Pavlakovic and P. Wilcos, "Practical Long Range Guided Wave Testing: Application to Pipe and Rail", Material Evaluation, 61(1), pp. 66~74, 2003
3. S. J. Song, "Detection of Scale Inside of Water Supply Pipes using Guided Waves", 9th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, QNDE, 2002