

유도초음파를 이용한 직선배관의
원거리 결함 탐지 실험

Experiments of Long-range Inspection Method
in Straight Pipes using Ultrasonic Guided Waves

KAERI
2006. 2

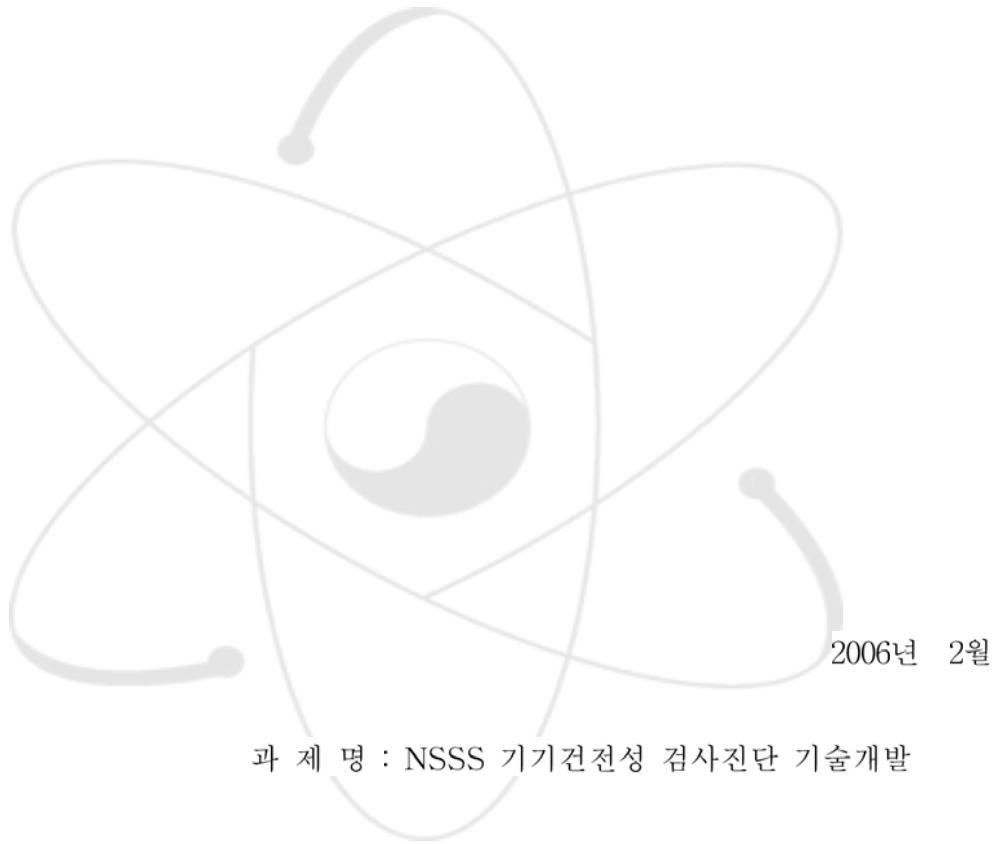
한국원자력연구소

제 출 문

한국원자력연구소 소장 귀하

본 보고서를 2005년도 “NSSS 기기건전성 검사진단 기술개발”과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 유도초음파를 이용한 직선배관의 원거리 결함 탐지 실험



과 제 명 : NSSS 기기건전성 검사진단 기술개발

주 저 자 : 엄홍섭
공 저 자 : 임사회
 주영상
 김재희

요 약 문

유도초음파 기술은 센서의 위치를 이동시키지 않고도 센서로부터 멀리 떨어져 있는 결함의 발견이 가능한 장거리 탐상 능력으로 인해 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 원자로 운전 중에 주요한 기기의 건전성을 상시 감시하는 온라인 감시 분야에 적용 가능성이 높은 것으로 알려져 있다. 반면에 유도초음파는 기존의 체적 초음파와는 달리 무한대의 파동모드가 존재하며 특히 속도가 주파수 및 두께에 의존하는 분산특성을 가지고 있어서 활용에 어려움이 있다. 따라서 검사 대상 물체에서 발생하는 유도초음파 모드를 정확하게 판별을 해야만 결함 신호를 정확하게 판단하고 특성을 파악할 수 있다.

본 보고서에서는 유도초음파 기술을 활용하여 원전 배관의 결함을 탐지하는데 있어 유도초음파 모드를 쉽게 선택할 수 있는 배열형 탐촉자 시스템과 이 시스템을 이용한 실험 내용을 기술하였다. 2장에서는 유도초음파 기술에 대한 개략적인 이론을 설명하였고, 3장에서는 사각 탐촉자와 배열형 탐촉자를 이용한 유도초음파 실험에 사용된 장치 및 실험 방법에 대해 기술하였다. 4장에서는 실험에 사용된 실험 시편의 사양에 대해서 기술하였고 5장에서는 실험에서 획득한 자료를 토대로 결함의 형태 및 크기에 따른 유도초음파의 특성을 분석하였으며, 여러 가지 신호처리 방법을 적용한 신호분석 결과를 기술하였다.

Summary

Ultrasonic guided waves have been known as one of the promising techniques which can be utilized for an on-line monitoring of nuclear power plants, because it enables us to undertake a long-range inspection of structures such as plates and pipes without moving the ultrasonic sensors. In ultrasonic guided waves, however, there are numerous modes with different wave velocities, so that the generation and detection of the appropriate wave mode of the guided wave is one of key techniques in the application of the guided waves.

This report describes experimental results of a long-range inspection method of pipes using ultrasonic guided waves. The contents of the report are as follows. In chapter 2, theory of guided wave was reviewed. In chapter 3, equipments and procedures which were used in the experiments were described. Detailed specifications of the specimens described in chapter 4. In chapter 5, we analyzed characteristics of guided wave signals according to shapes and sizes of defects and presents results of various signal processing methods.

목 차

1. 서론	8
2. 유도초음파 기술 개요	9
2.1 유도초음파의 발생과 검출	9
2.1.1 사각입사 방법	9
2.1.2 Comb Transducer를 이용하는 방법	9
2.1.3 Array Transducer를 이용하는 방법	10
2.2 유도초음파의 모드특성	11
2.3 유도초음파의 분산특성	12
2.3.1 유도초음파의 분산성	12
2.3.2 원형 배관의 분산선도	13
3. 원형배관에서 유도초음파 실험	17
3.1 실험 개요	17
3.2 실험 장치의 구성	17
3.2.1 사각탐촉자를 이용한 유도초음파 실험	17
3.2.2 배열형 탐촉자를 이용한 유도초음파 실험	18
3.3 실험 장치 설정	21
3.3.1 사각탐촉자 방법	21
3.3.2 배열형 탐촉자 방법	22
4. 시편 제작	24
4.1 SUS304 6m 시편	24
4.2 SUS304 26m 시편	27
5. 데이터 분석	28
5.1 데이터 분석 방법	28
5.1.1 Analog Persistence 방법	28
5.1.2 STFT(Short Time Fourier Transfer) 기법	28
5.1.3 WD(Wigner Distribution) 기법	30
5.2 사각탐촉자의 입사각도별 모드 분석	30
5.3 결함 종류 및 크기에 따른 유도초음파 신호 비교	32
5.4 26m 장거리 배관의 유도초음파의 전파	35
5.5 배열형 탐촉자를 이용한 6m 결함 배관 실험	38
6. 결과	49

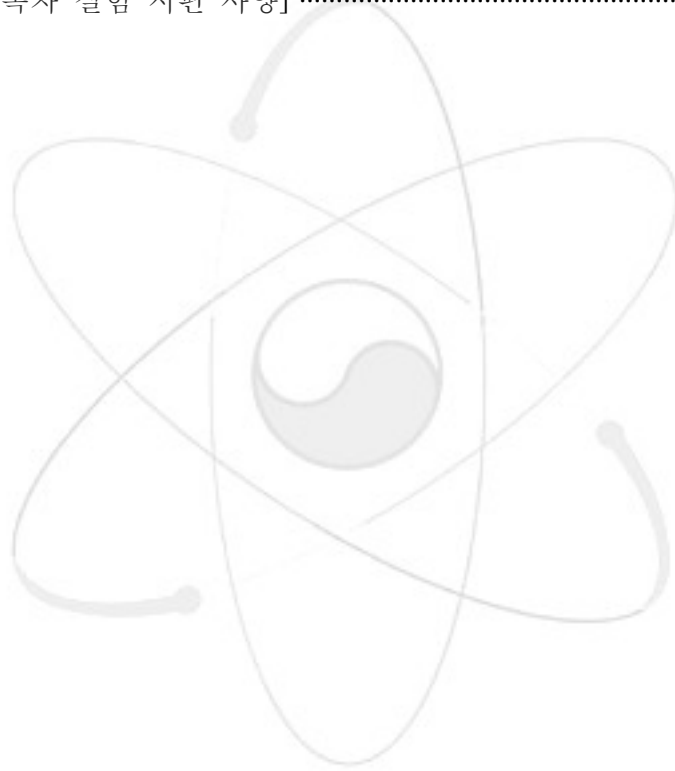
그림 목차

[그림 2.1 스넬법칙]	9
[그림 2.2 배열탐촉자의 유도초음파 발생]	10
[그림 2.3 유도초음파의 모드 종류]	11
[그림 2.4 내경과 외경이 각각 a와 b인 무한 길이의 원통형 관]	12
[그림 2.5 위상속도 분산선도]	15
[그림 2.6 군속도 분산선도]	16
[그림 3.1 Transducer]	17
[그림 3.2 탐촉자가 장착된 가변 웨지]	17
[그림 3.3 Array transducer assembly & Transducer]	18
[그림 3.4 1ch. Pulsar/Receiver]	18
[그림 3.5 8ch ultrasonic pulser/receiver]	19
[그림 3.6 8-40channel Conversion System]	19
[그림 3.7 Function Generator]	20
[그림 3.8 사각탐촉자를 이용한 Pitch/Catch 방식의 유도초음파 실험]	22
[그림 3.9 장치 연결(CASE 1)]	22
[그림 3.10 장치 연결(CASE 2)]	23
[그림 4.1 6m 배관시편]	24
[그림 4.2 길이방향 슬릿결함 시편 사양서]	25
[그림 4.3 원주방향 슬릿결함 시편 사양서]	25
[그림 4.4 홀결함 시편 사양서]	26
[그림 4.5 인접 홀결함 시편 사양서]	26
[그림 4.6 26m 배관 시편]	27
[그림 4.7 26m 배관시편의 사양서]	27
[그림 5.1 STFT 창문함수]	29
[그림 5.2 Garbor 타입 분해능]	29
[그림 5.3 일반적인 분해능]	29
[그림 5.4 30도 입사각에 대한 유도초음파 발생]	31
[그림 5.5 45도 입사각에 대한 유도초음파 발생]	31
[그림 5.6 60도 입사각에 대한 유도초음파 발생]	32
[그림 5.7 홀결함 신호]	33

[그림 5.8 원주방향 슬릿결함 신호]	34
[그림 5.9 인접 홀결함 신호]	35
[그림 5.10 장거리 배관에서 결함 검출]	36
[그림 5.11 유도초음파 신호 측정 위치]	36
[그림 5.12 측정지점 MP2의 유도초음파 신호]	37
[그림 5.13 측정지점 MP3의 유도초음파 신호]	37
[그림 5.14 측정지점 MP4의 유도초음파 신호]	37
[그림 5.15 배열탐촉자 실험을 위한 측정 위치 선정]	38
[그림 5.16 D1 슬릿결함 신호]	39
[그림 5.17 D2 슬릿결함 신호]	40
[그림 5.18 D3 슬릿결함 신호]	41
[그림 5.19 D4 슬릿결함 신호]	42
[그림 5.20 D5 슬릿결함 신호]	43
[그림 5.21 D1 홀결함 신호]	44
[그림 5.22 D2 홀결함 신호]	45
[그림 5.23 D3 홀결함 신호]	46
[그림 5.24 D4 홀결함 신호]	47
[그림 5.25 D5 홀결함 신호]	48

표 목차

[표 3.1 설정값]	18
[표 3.2 8channel ultrasonic pulser/receiver의 사양]	19
[표 5.1 홀결함 검출 실험 사양]	32
[표 5.2 원주방향 슬릿결함 검출 실험 사양]	33
[표 5.3 인접 홀결함 검출 실험 사양]	34
[표 5.4 장거리 배관 실험 사양]	36
[표 5.5 배열형 탐촉자 실험 시편 사양]	38



1. 서론

원자력발전소의 가동전 검사(PSI)와 가동중 검사(ISI)는 발전소의 안전성을 확보하는데 중요한 부분을 차지하고 있다. 원자로 운전 기간 중에 주기적으로 수행되는 ISI는 핵연료를 교체하는 시점에서 수행되므로 방사능이 존재하는 검사 환경이나 제한된 시간 등 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위한 방안의 하나로 원전 가동 중에 온라인으로 실시간 감시를 통하여 원전기기의 중요 부품에 대한 정보를 수집하여 ISI의 효율적인 수행을 하려는 시도가 이루어지고 있다.

본 연구과제에서는 원전 배관에 대한 온라인 감시에 적용할 수 있는 비파괴적 검사 방법의 개발을 수행하고 있다. 현재 일반적으로 사용하고 있는 배관 결함의 탐상 방법으로는 누출자력(MFL), 와전류(ECT), 방사선(RT), 초음파(UT) 등이 있다. 이러한 방법은 대부분 국부적인 탐상만이 가능하며, 이러한 이유로 센서를 특정방향으로 임의적인 이동을 해야 한다는 특성 때문에 온라인 감시에서는 적합하지 않다. 따라서 원전 배관의 온라인 감시를 위해서는 센서를 이동하지 않고도 센서에서 멀리 떨어진 결함을 발견할 수 있는 탐상기법의 개발이 필요하게 되었으며, 유도초음파기술은 이러한 요구를 만족시킬 수 있는 방법으로 주목을 받고 있다. 배관에 입사된 초음파는 종파와 횡파의 간섭과 중첩으로 인해 배관의 길이 방향으로 전파되는 새로운 파를 만들게 되는데 이를 유도초음파라 한다. 이 유도초음파는 고정된 센서를 이용해 발견시킬 수 있으며 장거리를 전파한다는 장점을 가지고 있다. 하지만 종파나 횡파와는 달리 배관의 두께와 주파수에 따라 수많은 모드가 발생되어 신호 분석에 많은 어려움을 가지고 있다. 따라서 시편에서 발생 가능한 모드들을 이론적으로 구하고 이 정보를 바탕으로 실제 실험 데이터를 예측하는 방법을 이용하게 된다. 분산선도(Dispersion curve)는 시편의 두께와 주파수 따른 유도초음파 모드들의 군속도와 위상속도 정보를 이론적으로 보여준다. 위상속도 분산선도를 통해 우리가 원하는 모드의 위상속도를 선택하고 그 조건에 맞는 초음파를 발생시킨 후 군속도 분산선도를 이용해 검출된 신호의 모드분석을 하게 되는 것이다. 유도초음파 발생 방법으로는 사각탐촉자 방법이 가장 일반적이다. 이 방법은 스넬법칙에 기반을 두고 있으며, 초음파의 입사 각도를 조절하여 유도초음파를 발생시키는 기법이다. 하지만 입사 각도를 정확하게 조절하기가 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 배열형 탐촉자를 사용하는 방법을 제안하고 실제 검사시스템을 제작하여 실험을 수행하였으며, 실험결과를 분석하였다.

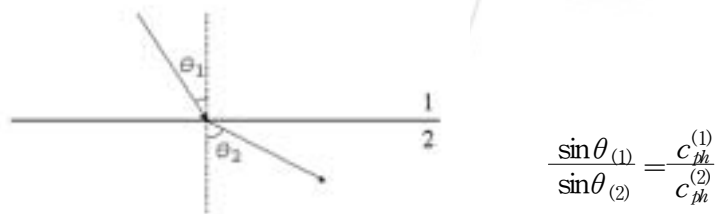
2. 유도초음파 기술 개요

2.1 유도초음파의 발생과 검출

유도초음파는 장거리를 전파할 수 있다는 장점에도 불구하고 시편의 두께와 주파수에 따라 분산성을 갖는다는 특징이 있어 실제로 활용하는데 어려운 점을 가지고 있다. 따라서 시편의 결함에 따른 신호의 올바른 분석을 위해서는 우리가 원하는 모드의 유도초음파를 발생시키는 기술 개발이 선행되어야 한다.

2.1.1 사각입사 방법

가장 일반적으로 쓰이는 방법으로서 웨지를 사용하거나 수침법을 이용하는 것이 대표적이다. 두 가지 방법의 공통점은 종파를 시편에 경사지게 입사시킴으로써 스넬 법칙에 따른 유도초음파를 발생시킨다는 것이다. 그림 2.1과 같이 매질1(웨지)에서 입사되는 초음파는 매질2(시편)에서 굴절하게 된다. 입사/굴절각과 파의 속도와 관계는 스넬 법칙에 의해 정의된다. 우리는 이미 웨지에서의 속도를 알고 있으므로 이러한 스넬 법칙에 의해 시편에 입사되는 초음파의 속도를 알 수 있다. 시편에 입사되는 각을 웨지를 사용하는 경우에는 탐촉자와 웨지, 시편 간 접촉문제가 유발될 수 있으며, 가변각의 정확한 조절이 매우 어렵다. 또한 웨지보다 느린 위상속도를 갖는 유도초음파는 발생시킬 수 없다는 단점이 있다. 수침법은 웨지를 이용하는 방법에 비해서는 발생모드의 선택폭이 넓지만 반면에 시편의 일부가 물에 잠겨있어야 한다는 문제가 있다.



[그림 2.1 스넬법칙]

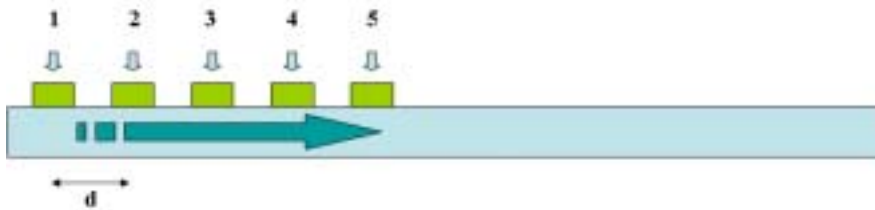
2.1.2 Comb Transducer를 이용하는 방법

이 방법은 여러 개의 탐촉자 요소를 동시에 구동하는 것으로 입사각을 변경하는 방법보다는 보다 특정한 모드를 동조하는데 유용하다. 하지만 이 방법은 접촉된 탐촉자를 기준으로 시편의 양방으로 에너지가 전달된다는 것과 주파수의 특성을 자유롭게 제어할 수 없고 동조수신기로 사용될 수 없다는 점이다. 이러한 문제점을 해결

하기 위해 최근 SPT(Synthetic phase tuning)기법이 고안되었다.

2.1.3 Array Transducer를 이용하는 방법

본 과제에서 개발된 Linear phased array transducer는 앞에서 언급한 SPT기법에 근거하여, 미리 설정된 시간지연에 따라서 각각의 요소탐촉자들이 따로 구동함으로써 탐촉자의 간격을 바꾸지 않고도 원하는 모드를 동적으로 동조할 수 있다. 선형 배열된 요소탐촉자 중에서 유도초음파의 진행방향에서 가장 멀리 위치한 탐촉자가 구동이 되면 여기서 발생하는 분산성 파는 여러 모드를 가지고 있으며 양방향으로 전파할 것이다. 속도가 다른 여러 가지 모드의 파 중에서 우리가 원하는 모드의 파가 인접한 두 번째 요소탐촉자에 도달하게 되면 이 때 두 번째 요소탐촉자를 구동시킨다. 이 순간에 다른 모드들은 다른 속도로 전파하기 때문에 이미 지나갔거나 아직 도착하지 않았을 것이다. 따라서 이러한 과정을 되풀이 하게 되면 우리가 원하는 모드의 파는 보강간섭을 일으켜 마지막 요소탐촉자를 지날 때 증폭이 일어날 것이다. 그림 2.2는 이러한 과정을 설명해 주고 있다.



[그림 2.2 배열탐촉자의 유도초음파 발생]

이웃한 요소탐촉자 사이의 시간지연 ($\Delta\tau$)는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta\tau = \frac{d}{c_p} \quad (\text{식 2.1})$$

여기서 d 는 이웃한 요소탐촉자 사이의 간격이고 c_p 는 원하는 모드의 위상속도이다. SPT기법은 호이겐스원리에 기초를 두고 있다. N개 요소의 array transducer의 마지막 요소탐촉자와 경계점까지의 거리가 x 라 할 때, 모드가 동조된 신호는 각각의 요소탐촉자에서 발생한 신호의 시간지연 합이다. 따라서 n 번째 요소탐촉자에 의해 수신되는 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$s_n(t) = \sum_{m=1, m \neq n}^N s_{mm}(t - \frac{(m-1)d}{c_p}), \quad n=1,2,3,\dots,N \quad (\text{식 2.2})$$

여기서 m 은 발신 요소탐촉자의 번호이고, $s_{mm}(t)$ 은 m 번째 요소탐촉자에 의해 발신되고 n 번째 요소탐촉자에 의해 수신된 파이다. 여기서 $s_{mm}(t)$ 는 경계에서 발생하는

모드변환 및 반사계수에 대한 정보들을 포함하고 있다. 이 식에서 원하는 모드의 위상속도 c_p 에 의해 동조되었다. 수신모드에서는 시간지연 순서는 반대가 된다. 이는 파가 반대로 진행하기 때문이다. 송수신시 동일한 모드에 동조한다고 하면 시간지연은 다음과 같다.

$$\Delta\tau' = \Delta\tau = \frac{d}{c_p} \quad (\text{식 2.3})$$

이 경우에 수신되는 신호는

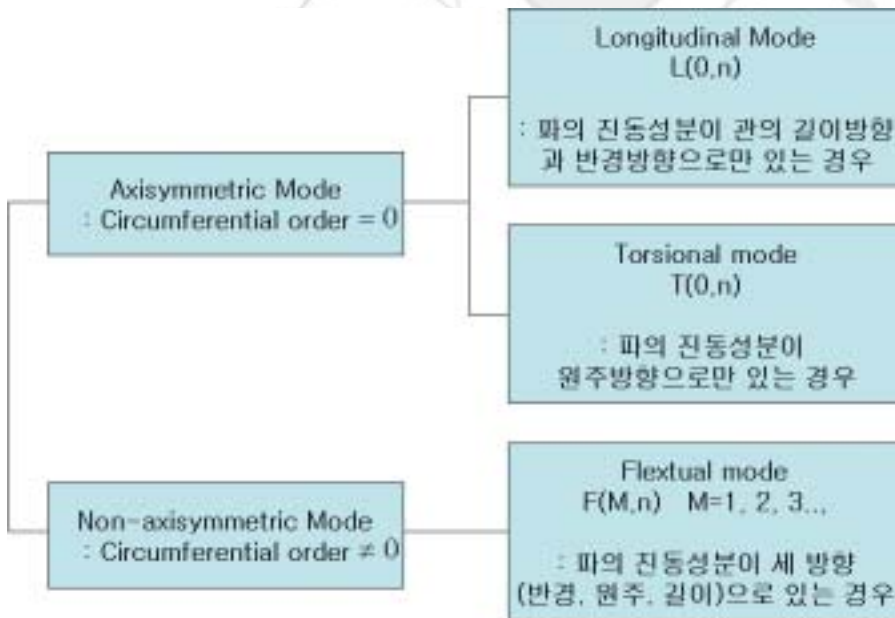
$$s(t) = \sum_{n=N}^1 s_n(t - (n-1)\Delta\tau') \quad (\text{식 2.4})$$

과 같이 주어진다.

2.2 유도초음파의 모드특성

유도초음파의 진행방향이 관의 길이방향인 경우 유도초음파 모드를 나타내기 위해서 두 개의 첨자 circumferential order와 mode number을 사용하고 있다.

Longitudinal 모드와 Torsional 모드는 circumferential order가 0에서 무한한 수의 모드를 가지고 있고, circumferential order가 1, 2, 3.....에서도 circumferential order에 대해 무한한 수의 Flexural 모드의 수를 가지고 있다.



[그림 2.3 유도초음파의 모드 종류]

유도초음파가 관을 전파할 때 Longitudinal 모드, Flexural 모드, Torsional 모드의

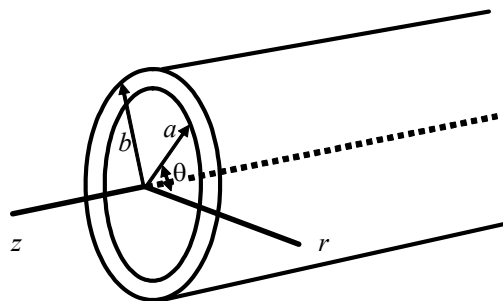
세 종류의 모드가 존재할 수 있다. 일반적으로 실험적으로 주로 사용되는 모드는 축 대칭인 Longitudinal 모드이다. 그 이유는 일반적인 초음파 센서로 잘 발생될 수 있으며, 축 대칭이기 때문에 분석이 간단하기 때문이다. 그러나 비축대칭 센서의 사용 또는 비축대칭 결합으로부터의 반사 등으로 인하여 실험적으로 비축대칭인 모드, 즉 Flexural 모드가 생성될 수 있기 때문에 비축대칭 모드에 대한 연구가 필수적이다. 그리고 Torsional 모드는 실험적으로 발생시키고 수신하는데 있어서 일반적인 초음파 센서로는 효율이 떨어져서 잘 사용되지 않고 있다.

2.3 유도초음파의 분산특성

일반적으로 파의 진행방향과 진동방향이 같으면 종파, 수직인 경우를 횡파라고 정의한다. 이와 달리 유도초음파 각 모드의 입자변위(particle displacement)는 파의 진행방향에 평행한 성분과 수직인 성분을 모두 가지게 되며 이들은 파형구조(wave structure)라고 불리는 피검사체의 두께 방향에 대한 특정 분포를 나타냄으로서 특정 유도초음파 모드의 검사 민감도와 송·수신 감도를 결정짓는 인자가 된다. 또한 재료상수(종파, 횡파속도 및 밀도), 두께, 주파수하에서만 발생이 가능하며 이들 조건의 변화에 따라 길이방향으로의 파동 벡터 성분이 다른(파동의 위상속도가 다른) 다양한 모드가 발생된다. 이와 같이 유도초음파는 시편의 두께와 주파수에 따라 진행속도가 달라지기 때문에 이러한 물리적 특성을 나타낼 수 있는 이론적인 해를 바탕으로 얻어지는 분산선도가 필요하게 된다.

2.3.1 유도초음파의 분산성

탄성, 균질, 등방성 고체 매질 내에서 파동의 진행을 지배하는 파동방정식은 고체 내에서의 운동방정식, 응력-변형 관계식, 그리고 변형-변위 관계식으로부터 얻어진다.



[그림 2.4 내경과 외경이 각각 a와 b인 무한 길이의 원통형 관]

변위만으로 표시한 고체 매질 입자의 파동 방정식은 다음과 같다.

$$\mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) = \rho (\partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2) \quad (\text{식 2.5})$$

여기서 \mathbf{u} 는 입자의 변위 벡터, ρ 은 밀도, μ 와 λ 는 Lamé의 탄성 상수이다. 위 식의 해는 다음과 같은 변위 포텐셜을 정의하면 구할 수 있다.

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \mathbf{H} \quad (\text{식 2.6})$$

여기서 Φ 는 종파 성분을 나타내는 스칼라 포텐셜이고, \mathbf{H} 는 횡파 성분을 나타내는 벡터 포텐셜이며 각각 변위의 비회전 및 회전 성분에 해당된다. 따라서 위 식은 다음과 같은 두 개의 스칼라 및 벡터 파동방정식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_L^2 \nabla^2 \Phi &= \partial^2 \Phi / \partial t^2 \\ C_T^2 \nabla^2 \mathbf{H} &= \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2 \end{aligned} \quad (\text{식 2.7})$$

여기서, $C_L^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$ 이고 $C_T^2 = \mu / \rho$ 이다. (식 2.8)

원통좌표에서 변위와 응력 성분들은 변위 포텐셜과의 관계식으로부터 구해진다.

$$\begin{aligned} U_r &= \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \\ U_\theta &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} + \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \\ U_z &= \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (\text{식 2.9})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \lambda \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \\ \sigma_{r\theta} &= \mu \left(\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right) \end{aligned} \quad (\text{식 2.10})$$

$$\sigma_{zr} = \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{u_z}{\partial r} \right)$$

Helmholtz방정식을 만족하는 원통형 탄성체에서의 포텐셜은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi &= f(r) \cos(M\theta) \cos(\omega t + kz) \\ H_r &= g_r(r) \sin(M\theta) \sin(\omega t + kz) \\ H_\theta &= g_\theta(r) \cos(M\theta) \sin(\omega t + kz) \\ H_z &= g_3(r) \sin(M\theta) \cos(\omega t + kz) \end{aligned} \quad (\text{식 2.11})$$

여기서 k 는 파수이고, 알려지지 않은 함수 f 와 g 의 일반적인 해는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f &= A Z_M(\alpha_1 r) + B W_M(\alpha_1 r) \\ g_3 &= A_3 Z_M(\beta_1 r) + B_3 W_M(\beta_1 r) \\ 2g_1 &= (g_r - g_\theta) = 2A_1 Z_{M+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{M+1}(\beta_1 r) \\ 2g_2 &= (g_r + g_\theta) = 2A_2 Z_{M-1}(\beta_1 r) + 2B_2 W_{M-1}(\beta_1 r) \end{aligned} \quad (\text{식 2.12})$$

여기서, $\alpha^2 = \omega^2/v_1^2 - k^2$ 이고 $\beta^2 = \omega^2/v_2^2 - k^2$ 이다. (식 2.13)

그리고, $\alpha_1 = |\alpha r|$ 이며 $\beta_1 = |\beta r|$ 이다. (식 2.14)

여기에서, Z_M 과 W_M 은 α 와 β 가 실수인가 허수인가에 따라 Bessel 함수 J_M 과 Y_M 으로 나타내거나, modified Bessel 함수, I_M 과 K_M 이 된다.

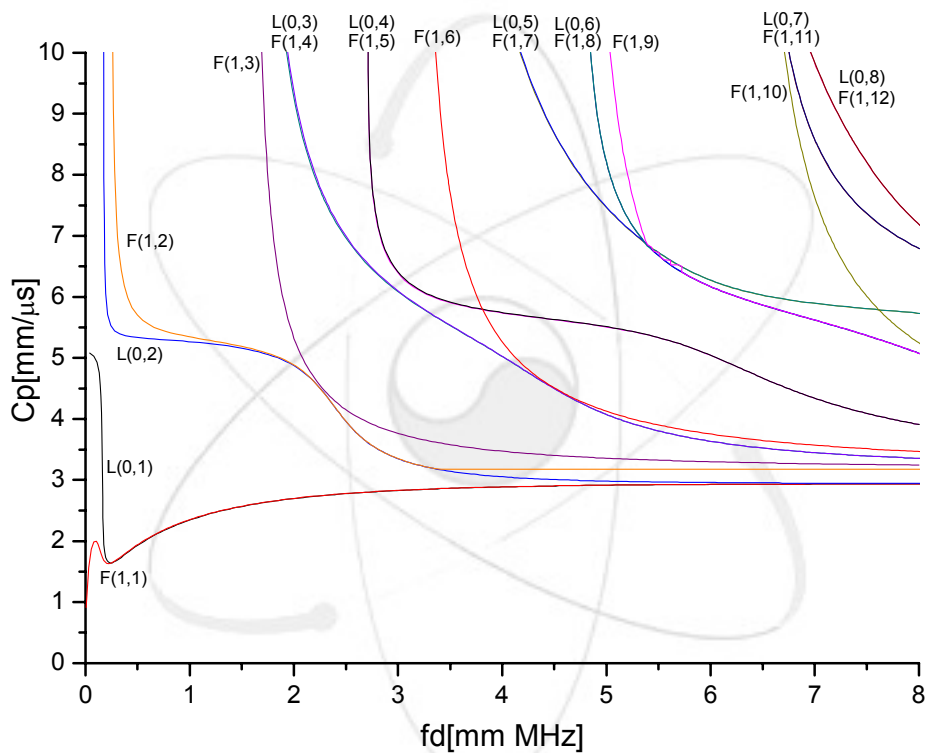
원통형 탄성관의 경계면이 자유로울 경우, 다음 경계조건으로부터 운동방정식의 해는 구해진다.

$$\sigma_{rr} = \sigma_{rz} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{at} \quad r = a \quad \text{and} \quad r = b \quad (\text{식 2.15})$$

각각의 n 에 따른 6×6 행렬로부터 A, B, A_1, B_1, A_3, B_3 값을 구하고 주파수 별 위상속도를 구할 수 있다.

2.3.2 원형 배관의 분산선도

그림 2.5는 2.3.1절에서 계산된 값을 바탕으로 얻어진 각 모드별 fd (주파수와 두께의 곱)에 따른 위상속도의 분산선도를 보여주고 있다. 실험 조건에서 정해지는 fd 값에 수직선을 그으면 각 모드의 분산선과 만나는 위상속도를 알 수 있다. 따라서 해당되는 모드의 위상속도의 조건에 맞는 초음파를 배관에 입사시키게 되면 우리가 원하는 모드의 유도초음파를 발생시킬 수 있다.

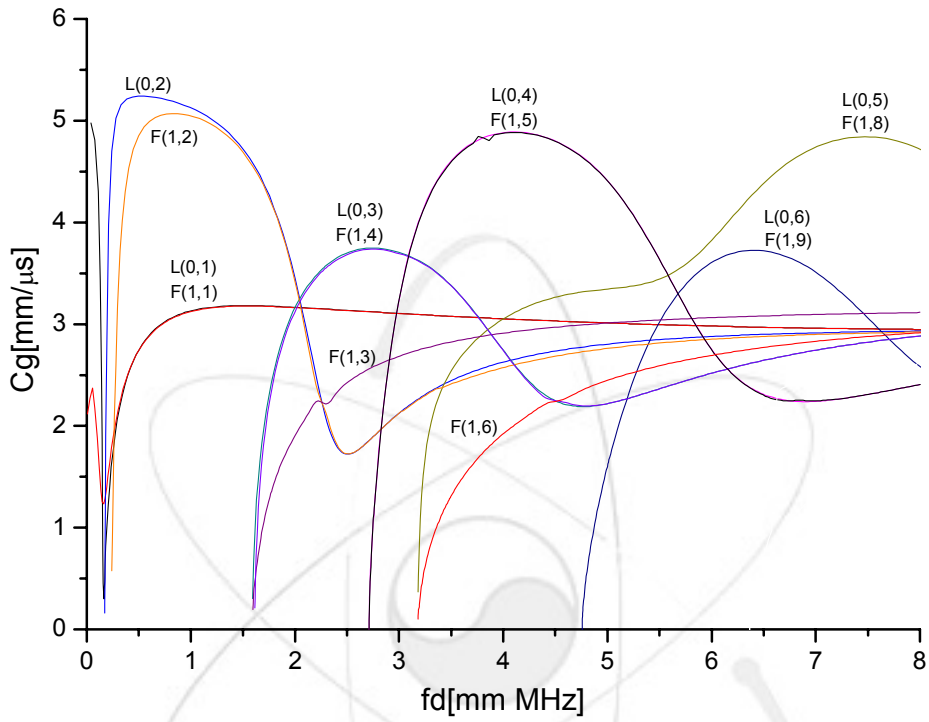


[그림 2.5 위상속도 분산선도]

파의 위상속도는 우리가 측정할 수 없다. 따라서 각각의 모드에 해당되는 군속도 분산선도를 구해야 하며 이를 토대로 측정값과 비교하여 모드 분석을 할 수 있다. 위상속도와 군속도는 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$V_g = \frac{d\omega}{dk}$$

$$= \frac{c_{ph}^2}{c_{ph} - (fd) \frac{dc_{ph}}{d(fd)}} \quad (\text{식 2.16})$$



[그림 2.6 군속도 분산선도]

3. 원형배관에서 유도초음파 실험

3.1 실험 개요

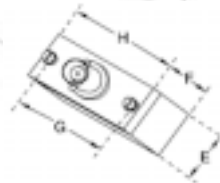
본 실험에서는 기존의 방법인 사각탐촉자 방법과 배열탐촉자 방법 등 두 가지 방법을 이용해 유도초음파의 발생과 검출 실험을 수행하였다. 사각탐촉자 방법은 입사각을 조절할 수 있는 아크릴 웨지를 사용하였으며, 배열탐촉자 방법의 경우에는 40개의 요소탐촉자로 이루어진 배열형 탐촉자 장치를 사용했다. 8개의 요소탐촉자가 선형으로 1조를 이루고 있으며, 원주방향으로 5개 조의 선형탐촉자 뭉치가 시편에 장착된다. Function Generator의 주파수를 바꿔줌에 따라 요소탐촉자들의 초음파 발진 시간차를 조절하게 되며 이러한 방법으로 우리가 원하는 모드의 유도초음파를 발생시키게 된다.

3.2 실험 장치의 구성

3.2.1 사각탐촉자를 이용한 유도초음파 실험

(1) Transducer

PANAMETRICS사의 상용탐촉자로서 진동자의 크기는 0.5"×1.0"이다. 본 실험에서는 중심주파수가 0.5MHz와 1.0MHz인 탐촉자가 사용되었다.



E : 0.73"
F : 0.63"
G : 1.31"
H : 1.53"

[그림 3.1 Transducer]

(2) 가변 웨지

초음파의 입사각도를 조절할 수 있는 Plexiglass 재질의 웨지이다. 이 웨지의 종파 속도는 2,720m/s 이다.



[그림 3.2 탐촉자가 장착된 가변 웨지]

3.2.2 배열형 탐촉자를 이용한 유도초음파 실험

(1) Array transducer assembly & Transducer

72도 간격으로 배열된 5개의 탐촉자들이 하나의 원형그룹(이하 채널)을 이루어 배관의 길이 방향으로 8개가 배치된다. 먼저 Array transducer assembly를 배관에 체결하고, 각각의 라인에 8개의 탐촉자와 spacer를 끼운 후 고정시킨다.

탐촉자들의 address는 다음과 같이 정해진다.

A Channel: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7, A-8

B Channel: B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6, B-7, B-8

C Channel: C-1, C-2, C-3, C-4, C-5, C-6, C-7, C-8

D Channel: D-1, D-2, D-3, D-4, D-5, D-6, D-7, D-8

E Channel: E-1, E-2, E-3, E-4, E-5, E-6, E-7, E-8



[그림 3.3 Array transducer assembly & Transducer]

(2) 1ch Pulser/Receiver

Receiver로부터 들어오는 신호를 수신하기 위해 PANAMETRICS사의 상용제품이 사용되었다. 기기의 설정값을 표3.1에서 보여주고 있다.



[그림 3.4 1ch. Pulser/Receiver]

Mode	THRU
PRF	EXT-ENC
Energy	100 μ J
Damping	50 Ohm
HP FILT	1 KHz
LP FILT	5 MHz
INPUT ATTEN	10.0 dB
OUT ATTEN	0 dB
GAIN	60.0 dB
SENSITIVITY	095.9 dB

[표 3.1 설정값]

(3) 8ch ultrasonic pulser/receiver

8개의 독립된 채널의 초음파신호를 발진/수신하는 장치로서 주요 특성은 표 3.2와 같다.



[그림 3.5 8ch ultrasonic pulser/receiver]

Receiver Gain	0-60dB
High-pass Filter	0.1/0.5/1/5 MHz
Low-pass Filter	10/15/25/35 MHz
Damping	10-250 Ohm
기타	Pulse/Echo, Through-Transmission 가능, Analogue 출력단자

[표 3.2 8ch ultrasonic pulser/receiver의 사양]

(4) 8-40channel Conversion System

Function Generator에서 설정된 주파수 간격으로 각각의 채널을 triggering하는 장치이다.



[그림 3.6 8-40channel Conversion System]

Front panel은 중앙부의 7×8 단자와 오른쪽 하단에 두 개의 단자로 구성되어 있다. 중앙 단자부의 상단 5×8 단자들은 각각 배열 탐촉자로 연결되는데, A~E는 채널의 주소를, 1~8은 각 채널에 해당되는 길이방향 탐촉자들의 주소이다. 중앙 단자부 하단의 2×8 단자들은 각각 8channel ultrasonic pulser/receiver로 연결된다. 또한 오른쪽 하단에 있는 두 개의 단자들은 function generator와 Oscilloscope의 trigger 단자로 각각 연결된다.

(5) Function Generator

각 채널의 Triggering frequency를 조절하는 장치이다. Array transducer assembly의 각 channel간의 발진시간차에 따라 발생하는 모드가 달라진다.



[그림 3.7 Function Generator]

요소 탐촉자 사이의 시간지연은 다음과 같은 관계식을 만족한다.

$$\Delta\tau = d/C_P \quad (\text{식 3.1})$$

$\Delta\tau$ 는 요소 탐촉자 사이의 시간 지연, d 는 요소 탐촉자들의 중심간 거리 그리고 C_P 는 원하는 wave mode의 위상속도를 나타낸다. 분산선도를 참조해서 원하는 wave mode를 선택한 후 $\Delta\tau$ 값을 결정한다.

(6) Oscilloscope

초음파신호의 모니터링과 더불어 데이터를 얻는 장치로 이용된다.

본 실험에 사용된 장비는 Tektronix사의 TDS 510A이다.

Ch1에는 1 channel Pulser/Receiver로부터 수신신호가 입력되고, Ch3은 Trigger로 사용된다.

☞ Oscilloscope 사용 Tips (Tektronix TDS 510A 기준)

① Trigger 설정

: 본 장비는 별도의 external connector가 없이 4개의 channel 중에 사용자가 임의로 지정할 수 있게 되어있다. Trigger 버튼을 누르면 trigger로 사용될 channel을 설정하는 화면을 볼 수 있다.

② Average 설정

: Ch.1으로 들어오는 수신신호는 S/N ratio가 좋지 않기 때문에 신호와 잡음을 구분하기가 힘들다. 이러한 문제점은 신호의 averaging를 통해 어느 정도 해소할 수 있다. Vertical control panel의 more버튼을 누른 후 다이얼이나 key pad를 이용해 average값을 설정할 수 있다. Average값이 크게 되면 신호의 재구성시간이 느려지게 되므로 100 정도의 값에서 조절하면 된다.

③ Acquisition Mode

: 본 장치는 5개의 측정 모드(Sample, Peak Detect, Hi Res, Envelope, Average)를 제공한다. 각각의 acquisition mode의 변환은 acquisition menu버튼을 이용한다. 본 실험에서는 Sample mode를 사용한다. Display의 왼쪽 상단에 Acquisition readout이 표시된다.

④ Sampling rate

: Acquisition readout에 표시되는 값으로, 데이터의 초당 시간분할을 나타낸다. 예를 들어, 1MS/s라 함은 1초를 10^6 으로 분할하여 보여준다는 의미이다. Display의 크기는 한정되어 있으므로 이러한 sampling rate를 조절함으로써 신호의 모니터링을 하게 된다.

⑤ Cursor measurement

: 본 장비는 3-types (Horizontal Bar Cursors, Vertical Bar Cursors, Paired Cursors)의 cursor measurement를 제공한다. 본 실험에서는 주로 Vertical bar cursor를 이용해 horizontal parameter (time 또는 frequency)를 측정한다.

3.3 실험 장치 설정

3.3.1 사각탐촉자 방법

스넬법칙에 의해 계산된 입사각으로 시편에 초음파를 입사시킨다. 본 실험에서는

하나의 탐촉자를 사용하는 Pitch/Catch 방식을 통해 실험을 수행하였다.

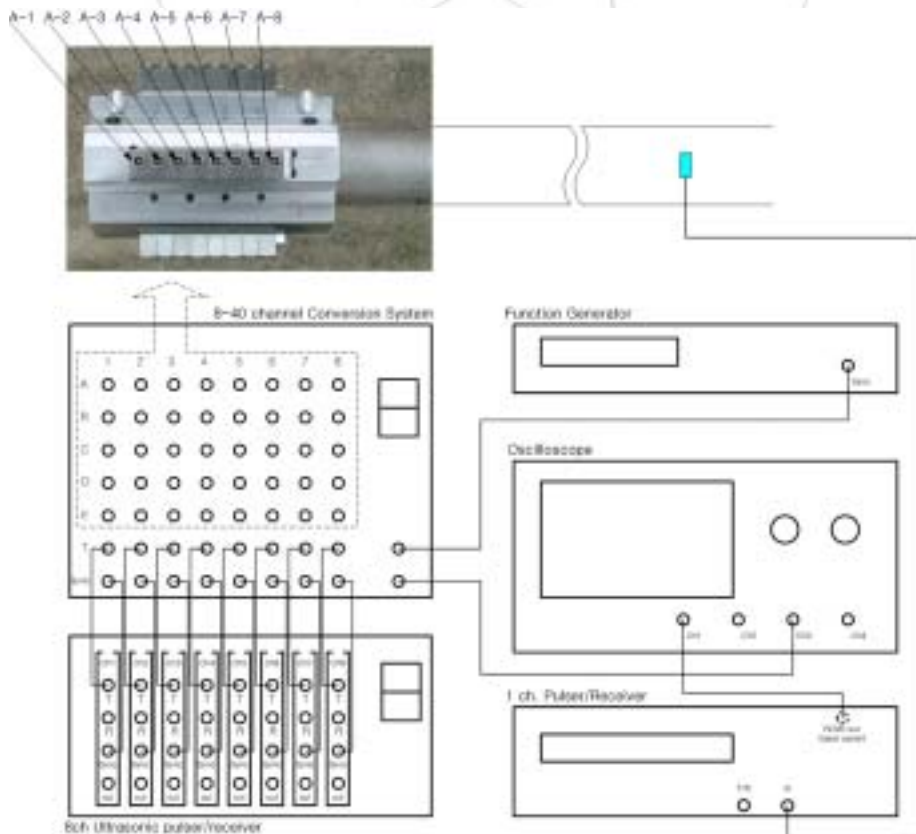


[그림 3.8 사각탐촉자를 이용한 Pitch/Catch 방식의 유도초음파 실험]

3.3.2 배열형 탐촉자 방법

(1) CASE 1

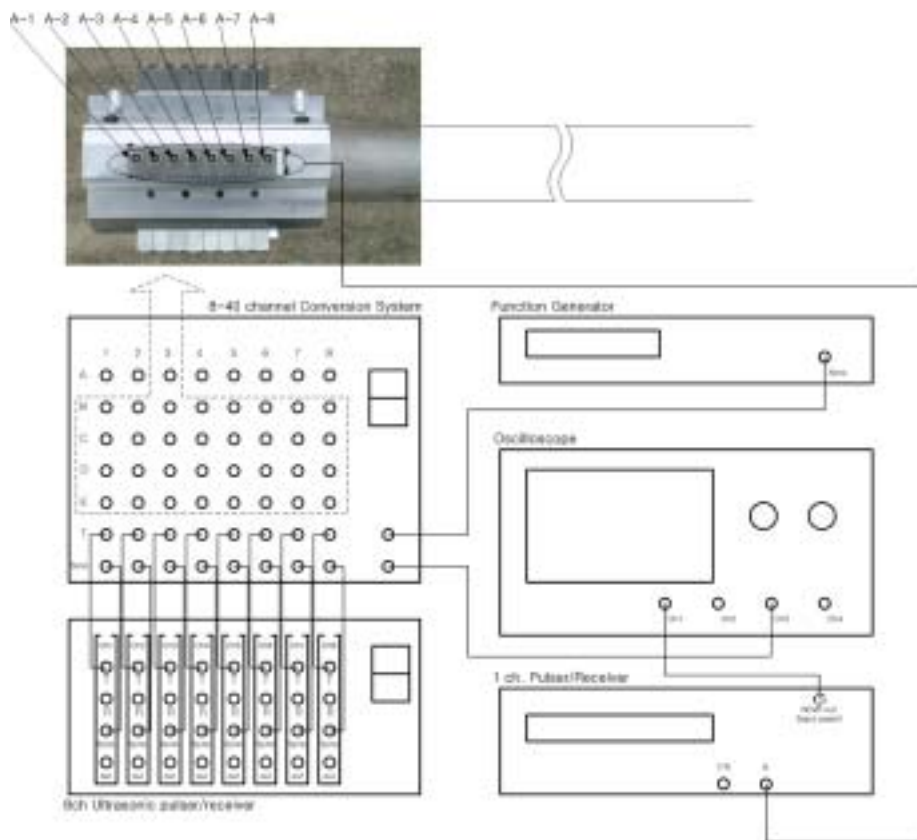
: 8개의 채널에서 초음파 신호를 발진하고 하나의 수신용 탐촉자를 이용하는 방법으로 pulse/echo 방식과 유사한 방법이다. 8개 채널 40개의 탐촉자는 각각 8-40channel Conversion System으로 연결되고, 수신용 탐촉자는 1ch Pulser/Receiver의 Receiver 단자로 연결된다.



[그림 3.9 장치 연결(CASE 1)]

(2) CASE 2

: 탐촉자 중에서 A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7, A-8은 수신을 담당하고, 나머지 32개의 탐촉자는 발진을 담당하는 방법으로 pitch/catch 방식과 유사하다. 32개의 탐촉자는 각각 8-40channel Conversion System로 연결되고, A-1, A-2, A-3, A-4, A-5, A-6, A-7, A-8은 순차적으로 1channel Pulsar/Receiver의 Receiver 단자로 연결된다. 8개의 독립된 수신신호들은 시간차를 고려해 Data Sum을 하게 된다.



[그림 3.10 장치 연결(CASE 2)]

4. 시편 제작

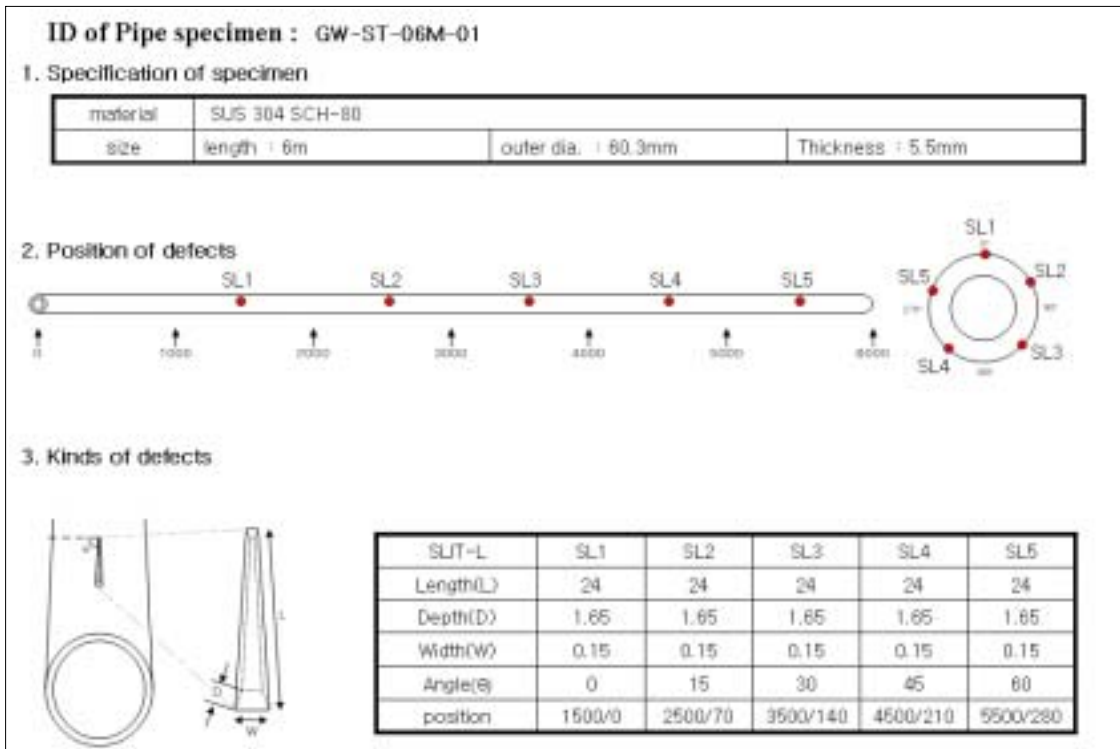
4.1 SUS304 6m 시편

결합의 종류, 크기가 다른 4개의 시편이 제작되었다. 용접효과를 없애기 위해 시제품으로 나오는 SUS304 6m 배관이 준비되었으며, 결합 가공 방법은 EDM방식을 사용했다.

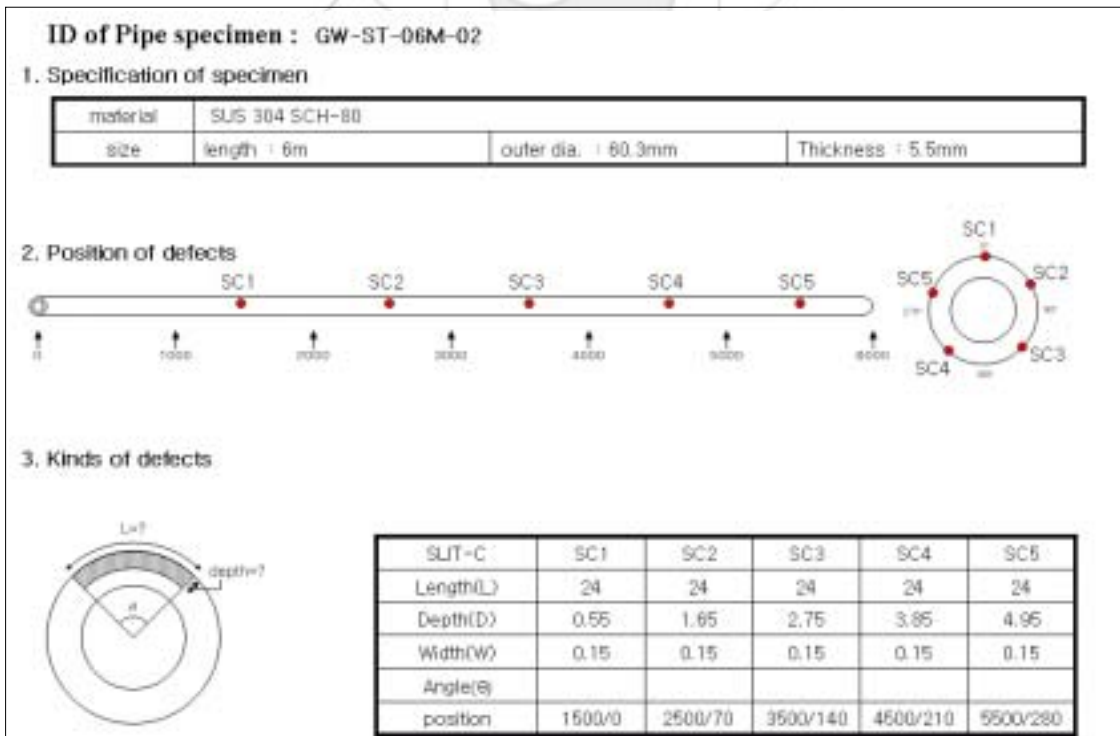


[그림 4.1 6m 배관시편]

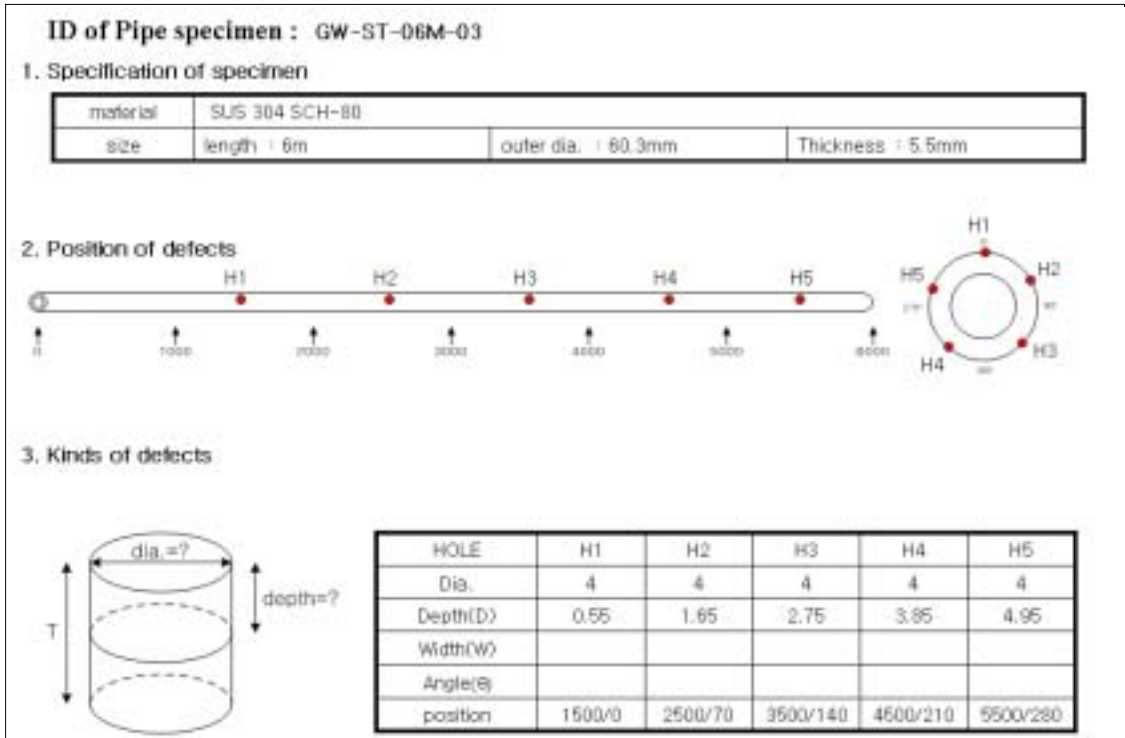
그림 4.2~4.5는 각각의 시편에 대한 사양서이다.



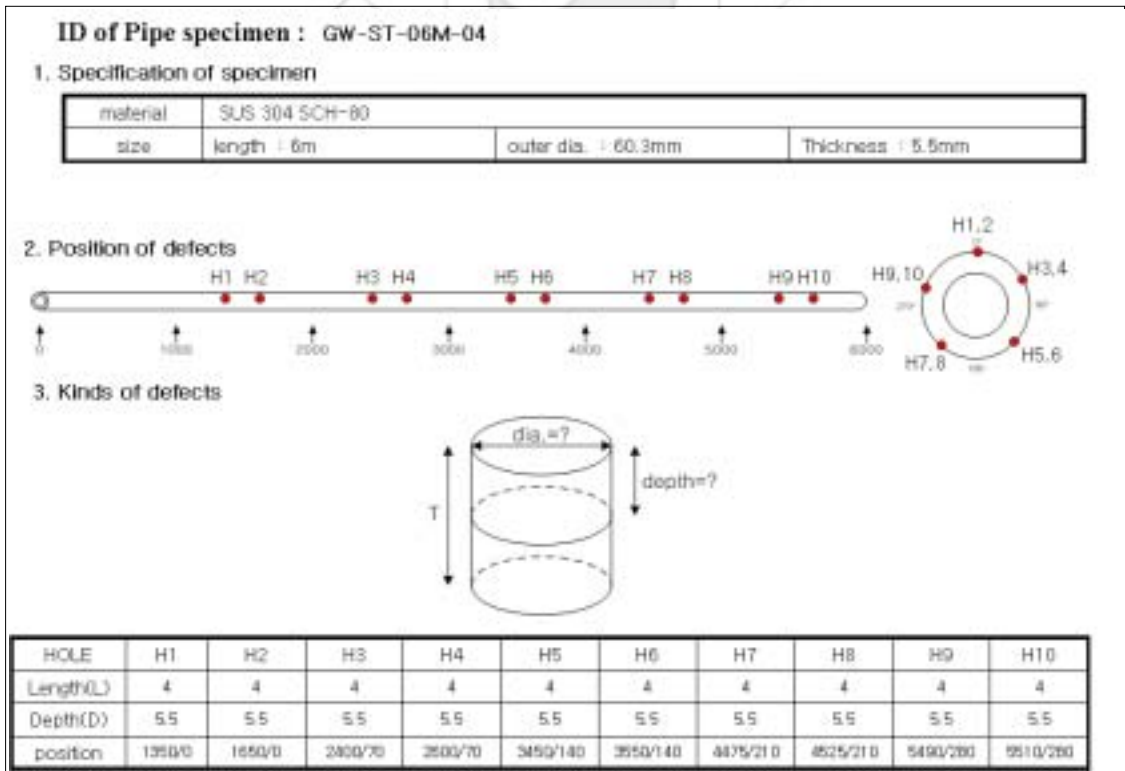
[그림 4.2 길이방향 슬릿결함 시편 사양서]



[그림 4.3 원주방향 슬릿결함 시편 사양서]



[그림 4.4 흘결함 시편 사양서]



[그림 4.5 인접 흘결함 시편 사양서]

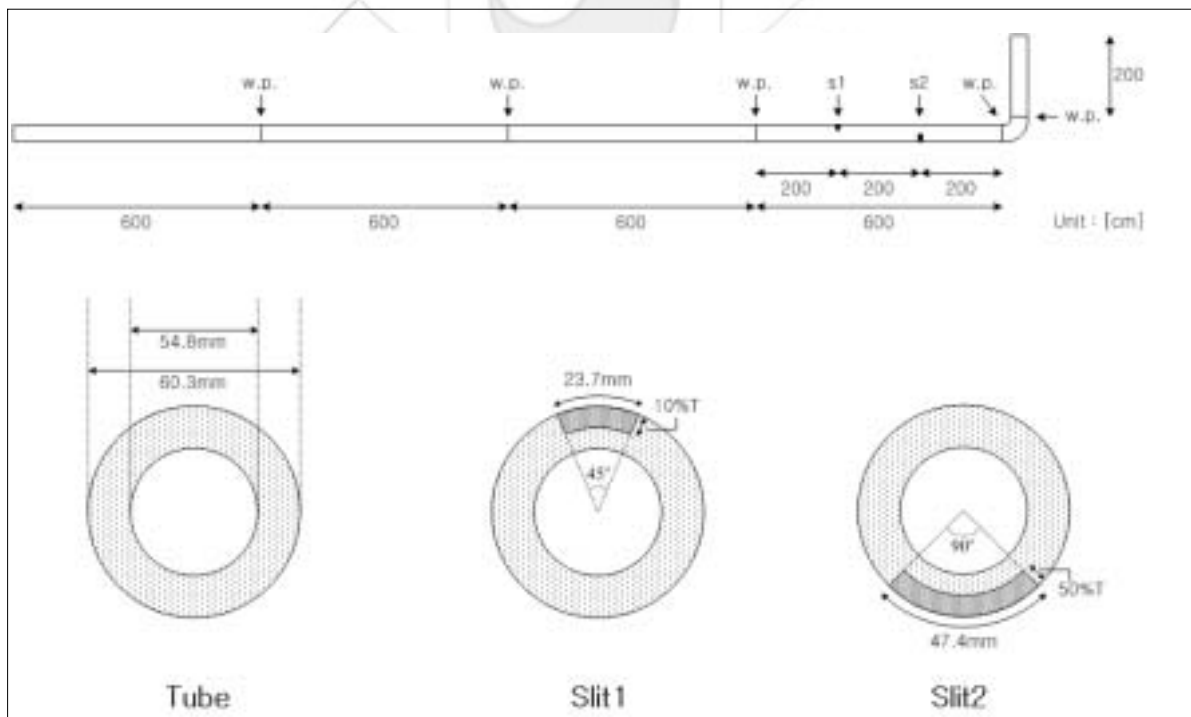
4.2 SUS304 26m 시편

4개의 6m 배관과 1개의 2m 배관을 용접하여 총 26m 장거리 배관시편이 제작되었다. 먼저 6m 배관 4개를 용접하여 선형으로 연결하였으며, 한 쪽 끝은 2m 배관을 90도 방향으로 용접하여 연결하였다.



[그림 4.6 26m 배관 시편]

그림 4.7은 26m 배관시편의 사양서이다.



[그림 4.7 26m 배관시편의 사양서]

5. 데이터 분석

5.1 데이터 분석 방법

5.1.1 Analog Persistence 방법

실험에 사용된 LeCroy사의 오실로스코프 wavesurfer model은 persistence기능이 내장되어 있다. 이 기능은 파형을 표시함에 있어 반복되는 신호의 변화를 보여준다. Persistence display는 파형의 반복 샘플링에 의해 구현된다. 일반적인 오실로스코프는 시간과 진폭의 2차원 데이터를 보여주는데 반해 persistence기능이 실행되면 샘플링 된 데이터의 발생수로 나타내는 축적도가 3번째 차원의 데이터로 표현된다. Saturation level은 신호발생의 최대 모집단의 백분율로 결정된다. 따라서 이러한 백분율이 낮아지면 적은 모집단에서 포화되므로 변화가 심한 신호까지도 확연하게 볼 수 있다. saturation level이상의 발생 모집단을 갖는 모든 픽셀들은 가장 높은 강도로 표현되며, 레벨 이하의 모집단들은 단계별 강도로 표현된다. 아울러 데이터 모집단은 실시간으로 업데이트 된다. 퍼시스턴스 기능의 동작시간은 얼마나 오랫동안 픽셀 데이터를 지속시킬 것인가를 조절함으로써 시간이 지남에 따라 신호가 어떻게 변하는 지를 보여준다. 이 동작시간은 각각의 발생 수에 대한 모집단에 비례한다. 퍼시스턴스 시간은 0.5초부터 무한대까지 조절가능하다.

5.1.2 STFT(Short Time Fourier Transfer) 기법

STFT의 수학적 표현은 다음과 같다.

$$S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h^*(\tau - t) s(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (\text{식 5.1})$$

그림 5.1은 이 수식에 대한 그림적 표현이다. 여기서 검은색으로 표현된 부분이 푸리에 변환을 위한 짧은 구간의 창문으로서 함수 $h(t)$ 로서 표현된다. 창문의 폭은 Δt 이며 창문의 형태 (shape)는 다양하게 있다. 이 경우 일반적으로 해닝 창문 (Hanning Window)을 사용한다. 이러한 창문은 $t=0$ 부터 시작하여 $t=t_{\max}$ 까지 이동한다. 이때 창문을 Overlap 하는 경우가 있으며 일반적으로 50% Overlap하여 사용한다.

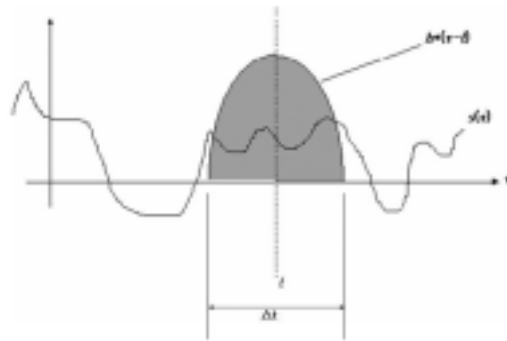
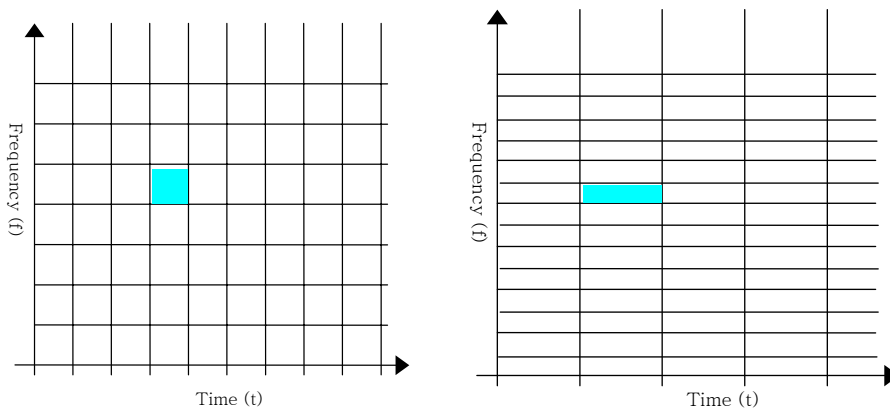


그림 5.1 STFT 창문함수

따라서 $S(t,f)$ 는 시간과 주파수 축에 대한 2차원 배열이 되며 창문의 사이즈에 따라서 시간분해능 (Time Resolution)이 결정된다. 시간의 분해능을 증가시키기 위해서는 창문의 사이즈를 축소하면 된다. 이 경우 불확실성의 원리에 의해서 이 창문 속에 있는 데이터에 대한 푸리에 변환을 취한 값들의 주파수 분해능이 나쁘게 된다. 그림 5.2는 Garbor가 제시한 STFT에 대한 시간-주파수 분해능이며, 그림 5.3은 일반적인 STFT의 시간-주파수 분해능이다. Garbor의 방법은 시간분해능 및 주파수 분해능이 동일하도록 창문을 선정했으며, 일반적인 STFT는 다음의 불확실성 법칙 (Uncertainty Principle)에 따라서 창문의 사이즈를 자유롭게 조정할 수 있다.

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq 1/2$$

즉 Garbor의 방법은 시간-주파수 분해능을 고정하였으므로 신호에 따라서 시간 분해능, 주파수 분해능을 조정할 수가 없다. 일반적인 STFT는 분해능 조정이 가능하다. 그러나 이 방법도 불확실성의 원리에 의해서 시간의 분해능을 증가시키면 주파수의 분해능이 감소한다.



5.1.3 WD(Wigner Distribution) 기법

앞에서 논의된 푸리에 변환은 무한대 시간의 창문을 이용하며, STFT 변환은 주어진 짧은 구간의 창문을 이용하였다. 여기에 사용된 신호는 원래 신호 $s(t)$ 를 이용한다. 그러나 백색 잡음 속에 신호가 묻혀 있다면 푸리에 변환을 통하여 신호에 포함된 주파수 성분을 명확히 찾아내기는 어렵다. 이 경우에 주로 사용되는 방법으로 자기상관함수(auto correlation)의 푸리에 변환이다. 신호 $s(t)$ 의 자기상관함수의 푸리에 변환을 주파수 스펙트라 (frequency spectra)라 불린다. 유사하게 비 정상상태의 신호가 백색 잡음 속에 숨겨져 있다면, 이 신호 $s(t)$ 에 대한 순간자기 상관 함수 (instantaneous auto correlation)의 푸리에 변환을 이용한다면, 비정상상태의 신호도 보다 명확히 찾을 수 있다. 이것을 수학적으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$W(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \frac{\tau}{2})s^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-j2\pi f\tau} d\tau \tag{식 5.2}$$

이 관계식을 위그너분포(Wigner distribution)라 불린다. 이 방법을 전자신호처리학회에 빌(Vill) 이 소개함으로써 위그너-빌 분포의 함수가 널리 사용하게 되었다. 여기에 사용되는 창문은 일반 푸리에 변환과 같이 무한대 시간이다. 그러나 실제로 컴퓨터를 이용하여 위그너 분포를 구하려면 무한대의 창문을 사용할 수 없으므로 STFT처럼 짧은 구간의 창문을 이용한다. 이러한 창문 $h(t)$ 을 이용한 위그너 분포를 가상 위그너분포 (pseudo Wigner distribution)이라 불린다. 따라서 가상 위그너 분포는 다음과 같이 표현된다.

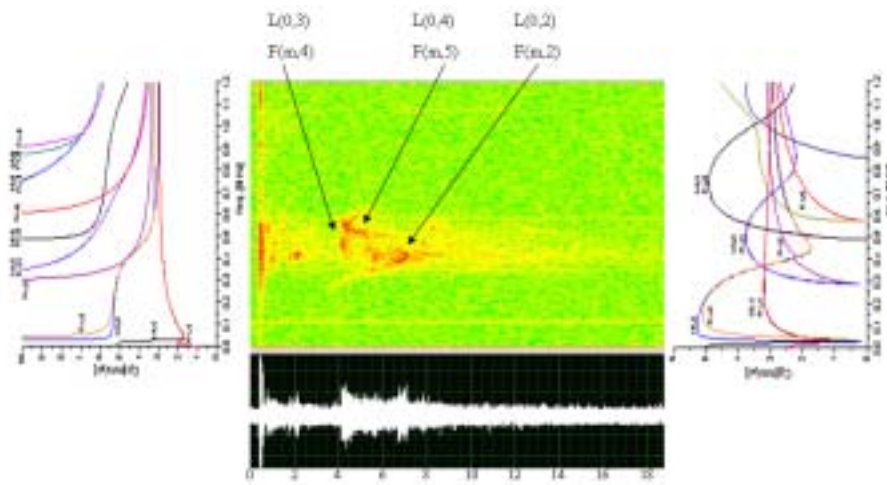
$$W_{pw}(t, f) = \int_{-T_w}^{T_w} s(t + \frac{\tau}{2})s^*(t - \frac{\tau}{2})h(\frac{\tau}{2})h^*(-\frac{\tau}{2})e^{-j2\pi f\tau} d\tau \tag{식 5.3}$$

여기서 T_w 가 창문의 크기이다. 이 경우에 시간 분해능은 창문의 이동이, STFT 혹은 웨이브렛 변환처럼 창문 크기 혹은 시간이동 factor b 만큼 이동하지 않고, 연속적으로 모든 데이터에 대해서 이루어지므로 시간 분해능이 완벽하다. 그러나 주파수분해능은 창문의 크기에 따라서 영향을 받는다.

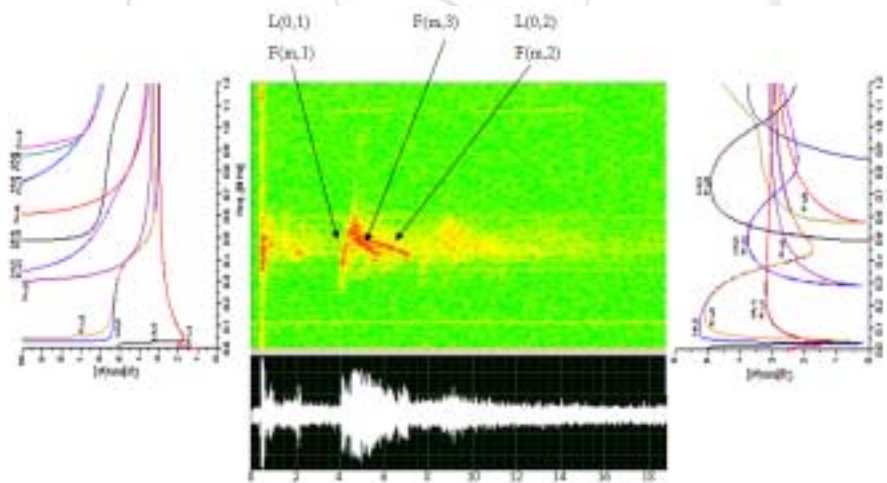
5.2 사각탐촉자의 입사각도별 모드 분석

실험에서 공통으로 사용되는 SUS304 재질의 원형 배관의 유도초음파 발생 모드를 알아보기 위해 6m 배관시편에 대한 사각탐촉자 실험을 수행하였다. 입사각도는 각각 30도, 45도, 60도이며, 사용된 탐촉자의 중심주파수는 0.5MHz이다. 그림 5.4는

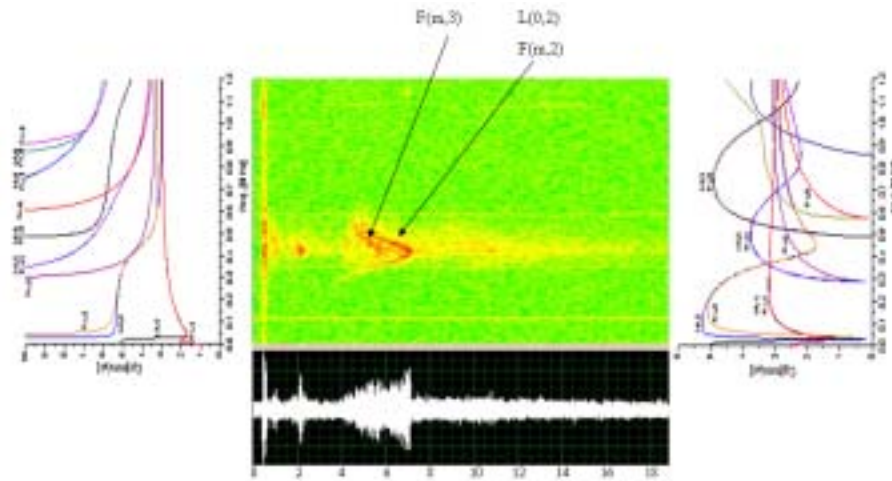
30도 입사각도에 대한 결과이다. 그림의 하단은 실험으로부터 얻어진 RF신호를 보여주고 있으며, 중앙은 STFT 결과이다. 또한 왼쪽과 오른쪽은 각각 위상속도 분산선도와 군속도 분산선도를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 L(0,3), L(0,4), F(m,4), F(m,5) 모드가 먼저 도착을 하고 L(0,2), F(m,2) 모드가 도착하는 것을 알 수 있다. 이렇듯 여러 가지 모드가 동시에 발생하는 이유는 입사각도가 30도로 고정되었다 하더라도 탐촉자로부터 나오는 초음파 빔의 퍼짐현상으로 인해 실제로는 여러 각도의 초음파가 입사됨에 기인한다. 그림 5.5와 그림 5.6은 각각 초음파 입사각도 45도와 60도에 대한 결과이다. 비교적 비슷한 속도를 갖는 여러 모드들이 발생하는 이유로 인해 실제 RF신호에서는 군집형태를 보여주고 있다.



[그림 5.4 30도 입사각에 대한 유도초음파 발생]



[그림 5.5 45도 입사각에 대한 유도초음파 발생]



[그림 5.6 60도 입사각에 대한 유도초음파 발생]

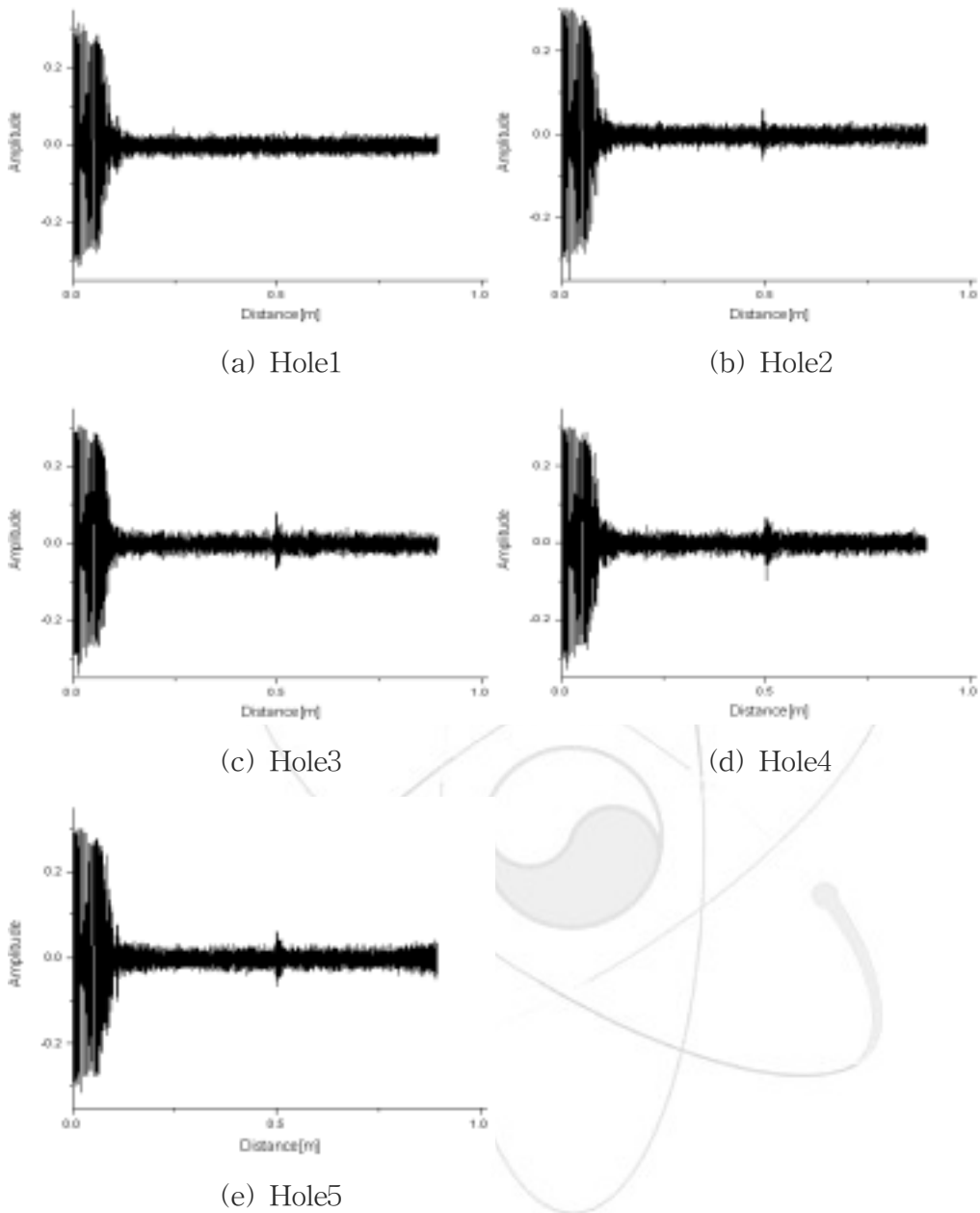
5.3 결함 종류 및 크기에 따른 유도초음파 신호 비교

배관의 홀결함과 슬릿결함의 크기에 따른 유도초음파의 특성을 파악하기 위한 실험이 수행되었다. 원주방향 홀결함과 슬릿결함에 대한 자세한 실험 사양은 표 5.1 과 표 5.2에 나와 있다. 그림 5.7과 같이 홀결함의 경우 30% 결함 이상부터 신호가 검출 되었으며, 슬릿결함의 경우에는 그림 5.8과 같이 10% 결함까지도 신호가 검출되었다.

인접결함에 대한 분해능을 알아보기 위해 그림 5.9와 같이 결함 사이의 거리가 다른 5가지 경우에 대해 실험을 수행하였다. 최소 2cm 인접결함까지 비교적 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

배관 길이/외경/두께/재질	6 m / 60.325 mm / 5.55mm / SUS304				
결함 종류 / 실험 횟수	홀결함 / 5 회				
사각탐촉자 입사각도	70 도				
중심 주파수 / 발생 모드	0.5 MHz / L(0,1) ~ F(m,1)				
결함 ID	Hole1	Hole2	Hole3	Hole4	Hole5
Diameter[mm]	4	4	4	4	4
Depth[mm]	0.55(10%)	1.66(30%)	2.77(50%)	3.88(70%)	4.99(90%)

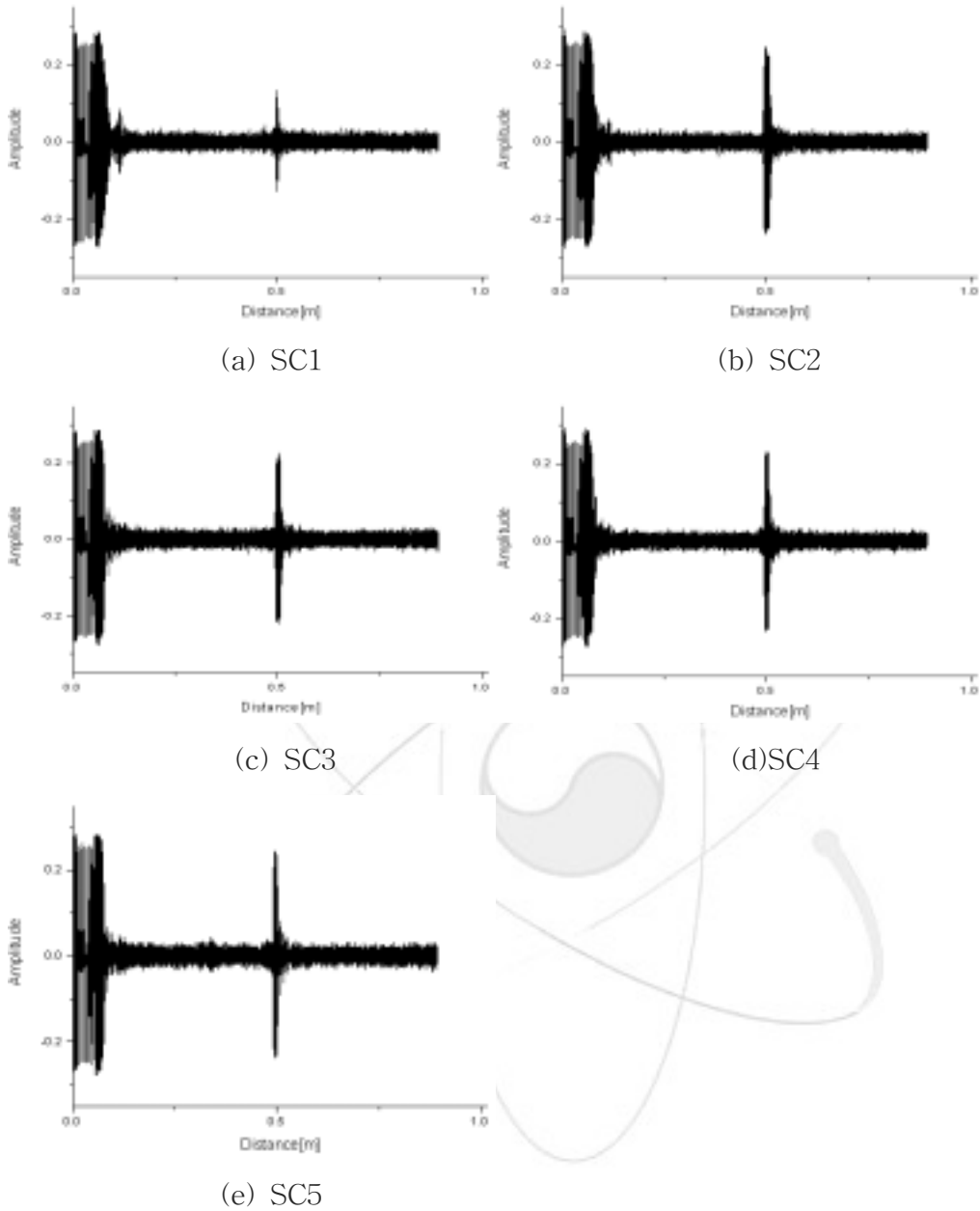
[표 5.1 홀(hole) 결함 검출 실험 사양]



[그림 5.7 홀결함 신호]

배관 길이/외경/두께/재질	6 m / 60.325 mm / 5.55mm / SUS304				
결함 종류 / 실험 횟수	원주방향 선결함 / 5 회				
사각탐촉자 입사각도	70 도				
중심 주파수 / 발생 모드	0.5 MHz / L(0,1) ~ F(m,1)				
결함 ID	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
Length[mm]	24	24	24	24	24
Depth[mm]	0.55(10%)	1.66(30%)	2.77(50%)	3.88(70%)	4.99(90%)

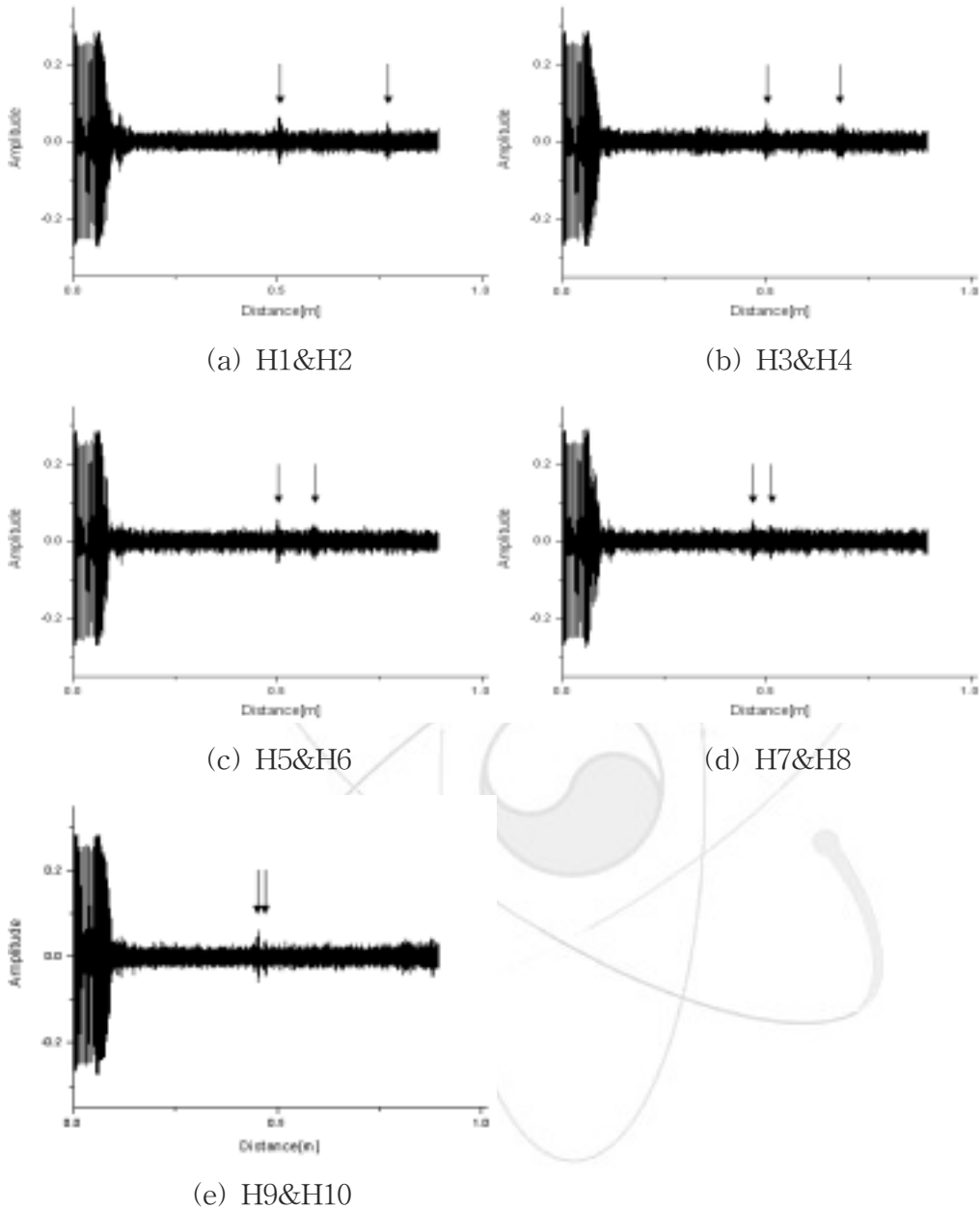
[표 5.2 원주방향 슬릿(slit) 결함 검출 실험 사양]



[그림 5.8 원주방향 슬릿결함 신호]

배관 길이/외경/두께/재질	6 m / 60.325 mm / 5.55mm / SUS304				
결함 종류 / 실험 횟수	인접 흘결함 / 5 회				
사각탐촉자 입사각도	70 도				
중심 주파수 / 발생 모드	0.5 MHz / L(0,1) ~ F(m,1)				
결함 ID	H1&H2	H3&H4	H5&H6	H7&H8	H9&H10
결함 간 거리[mm]	300	200	100	50	20
Diameter[mm]	4	4	4	4	4
Depth[mm]	5.55(100%)	5.55(100%)	5.55(100%)	5.55(100%)	5.55(100%)

[표 5.3 인접 흘결함 검출 실험 사양]



[그림 5.9 인접 홀결함 신호]

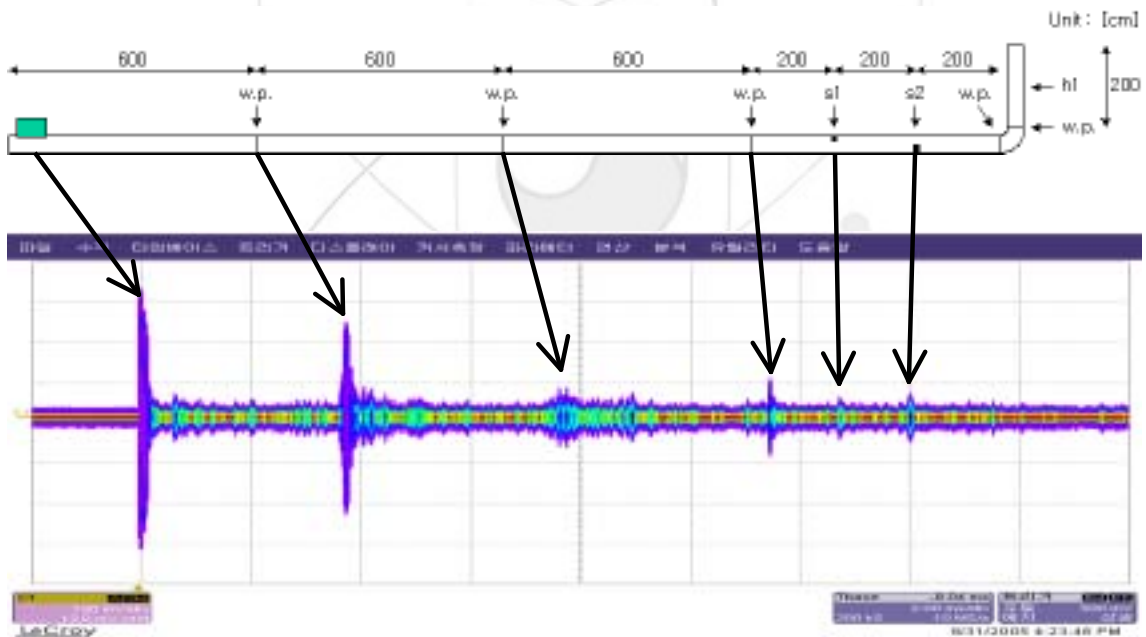
5.4 26m 장거리 배관의 유도초음파의 전파

앞 절에서 설정된 실험 조건을 토대로 26m 장거리 배관에 대한 유도초음파 신호를 분석하였다. 표 5.4는 실험 사양을 보여주고 있다. 배관의 끝점에서 측정을 하였으며 그림 5.10과 같이 용접부위의 신호를 비롯한 결함신호까지도 명확하게 확인할 수 있음을 알 수 있다. 반면 곡관부에 대한 신호의 크기는 매우 작게 나왔다. 이는 배관을 타고 진행하는 유도초음파의 에너지 감소 때문으로 추정된다. 따라서 우리

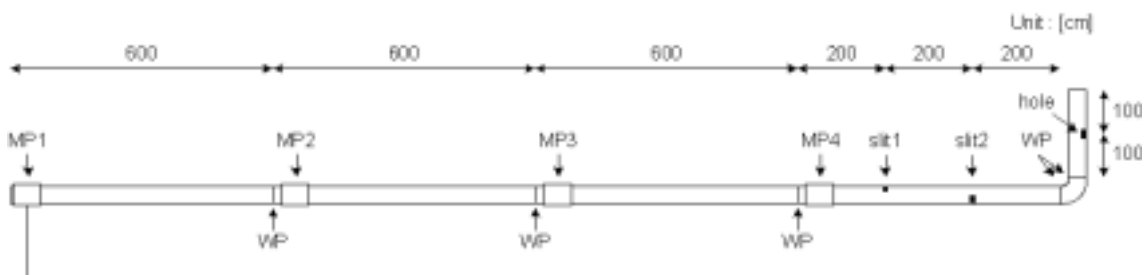
는 곡관부 쪽으로 측정지점을 옮겨가면서 신호를 측정하였다. 그림 5.11은 신호측정 위치를 보여주고 있으며, 여기서 W.P.는 용접부위를 나타내며 MP#은 측정 위치를 나타낸다. 그림 5.12, 5.13, 5.14은 측정위치에 따른 신호를 보여준다. 측정 위치를 곡관부 쪽으로 옮길수록 곡관용접부 신호가 뚜렷하게 보인다. 또한 측정 위치 MP4 신호의 경우, 곡관부를 지나 돌아오는 끝단 신호까지 볼 수 있다.

배관 길이/외경/두께/재질	6 m / 60.325 mm / 5.55mm / SUS304		
결함 종류 / 실험 횟수	장거리 결함 / 5 회		
사각탐촉자 입사각도	70 도		
중심 주파수 / 발생 모드	0.5 MHz / L(0,1) ~ F(m,1)		
결함 ID	s1	s2	h1
결함 종류	원주방향 선결함	원주방향 선결함	홀결함
Diameter[mm]	-	-	7
Length[mm]	23.7	47.4	-
Depth[mm]	0.55(10%)	2.77(50%)	5.55(100%)

[표 5.4 장거리 배관 실험 사양]



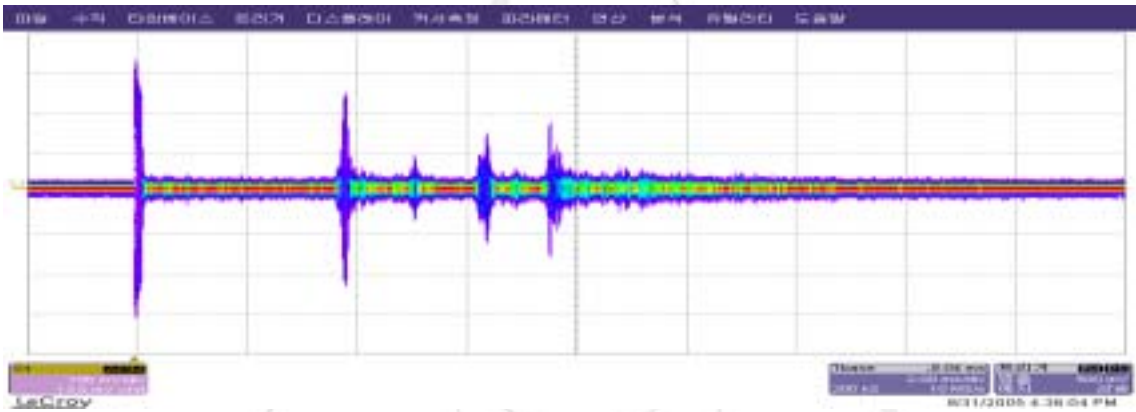
[그림 5.10 장거리 배관에서 결함 검출]



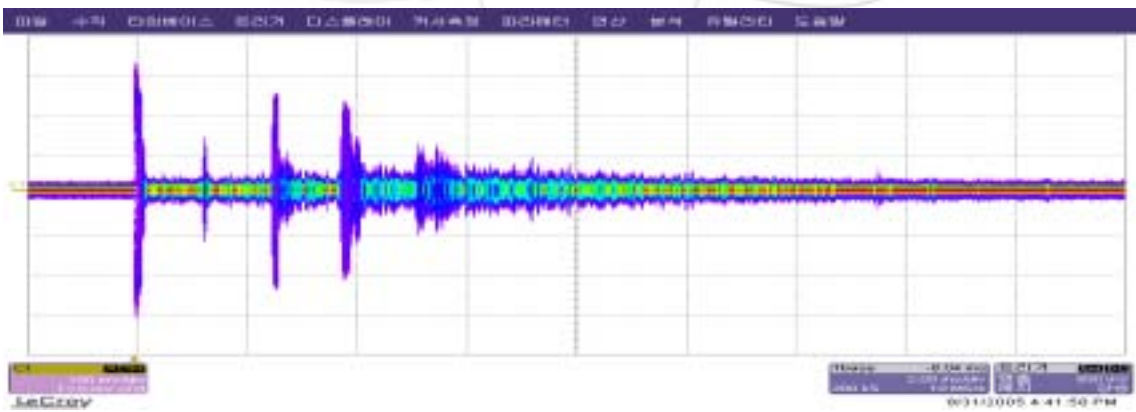
[그림 5.11 유도초음파 신호 측정 위치]



[그림 5.12 측정지점 MP2의 유도초음파 신호]



[그림 5.13 측정지점 MP3의 유도초음파 신호]



[그림 5.14 측정지점 MP4의 유도초음파 신호]

5.5 배열형 탐촉자를 이용한 6m 결함 배관 실험

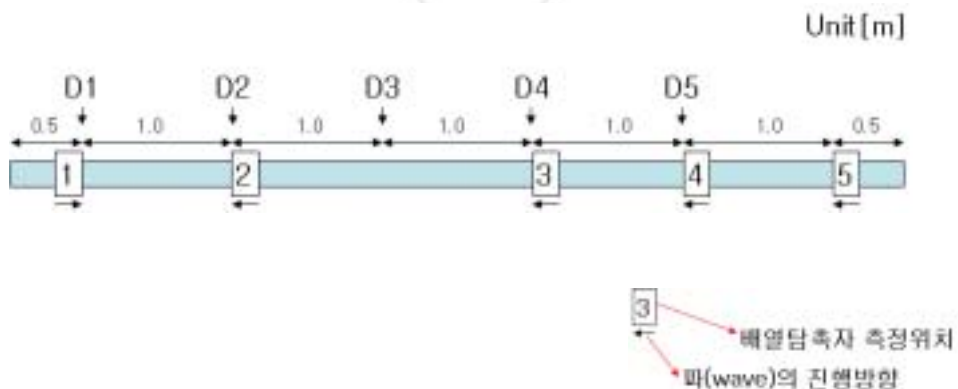
배열형 탐촉자를 이용한 결함 신호의 측정을 위해 그림 5.15와 같이 측정위치를 선정하였다. 탐촉자로부터 결함까지의 거리는 1m이며, D#은 결함의 위치를 나타내고 있다. 그림 5.16~5.25는 슬릿결함과 홀결함에 대한 3D-RF신호와 신호처리 결과를 보여준다. 신호처리는 STFT, Gaber-spectrum, Choi-Williams distribution, Wigner-ville distribution 방법을 사용했다.

RF신호 분석 결과, 800 μ s 지점에서 결함신호가 나와야 함에도 불구하고 결함 신호가 대부분 보이지 않았다. 이는 요소탐촉자의 에너지가 매우 적기 때문으로 추정된다. 신호처리 방법에 따른 결함 탐색률을 비교해 본 결과, STFT와 Choi-Williams distribution 방법이 여타 처리방법에 비해 양호한 결과를 보였다.

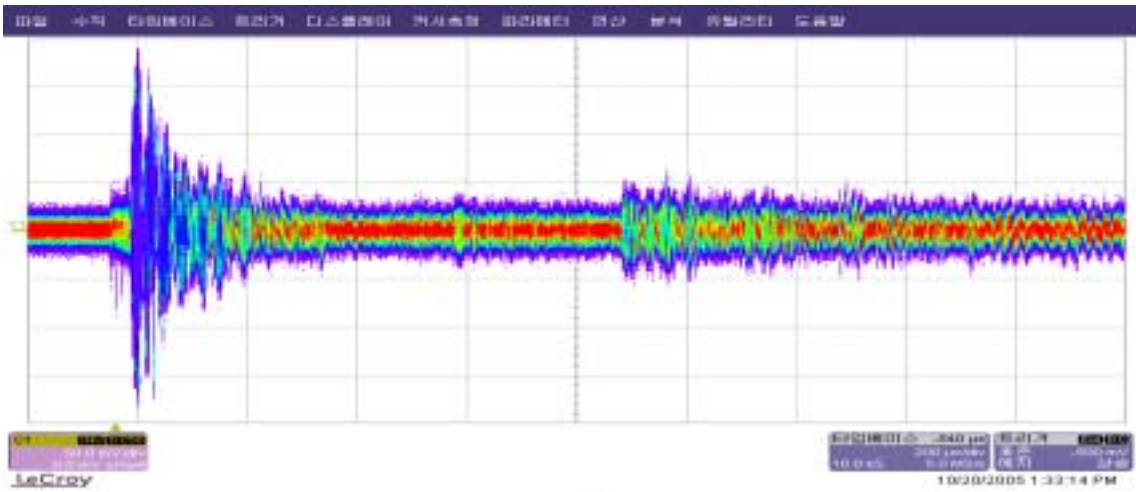
그림 5.16은 D1 슬릿결함에 대한 결과이다. 오른쪽 균집형 신호는 끝단 신호이며, 800 μ s 근처에서 결함신호가 보인다. STFT, Choi-Williams distribution 처리 결과에서 결함신호를 볼 수 있으며, 다른 신호처리에서는 결함신호의 구별이 어렵다. 그림 5.14와 5.15에서도 비교적 결함신호를 구별할 수가 있었으나, 30% 슬릿결함 이후에는 결함신호를 구별하기가 어려웠다. 또한 홀결함은 90%결함에서도 조차 신호를 볼 수 없었다.

결함위치	D1(90%)	D2(70%)	D3(50%)	D4(30%)	D5(10%)
slit	length: 24	length: 24	length: 24	length: 24	length: 24
	Depth: 4.95	Depth: 3.85	Depth: 2.75	Depth: 1.65	Depth: 0.55
hole	Dia: 4	Dia: 4	Dia: 4	Dia: 4	Dia: 4
	Depth: 4.95	Depth: 3.85	Depth: 2.75	Depth: 1.65	Depth: 0.55

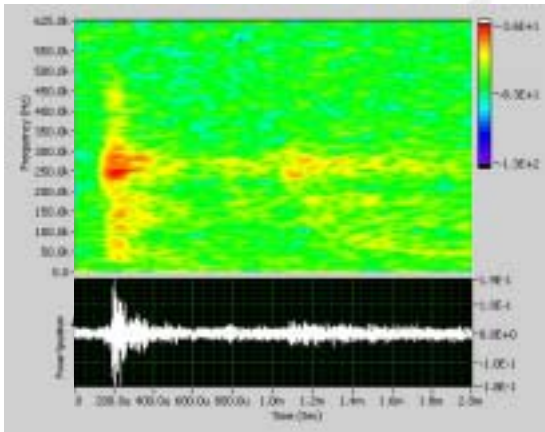
[표 5.5 배열형 탐촉자 실험 시편 사양]



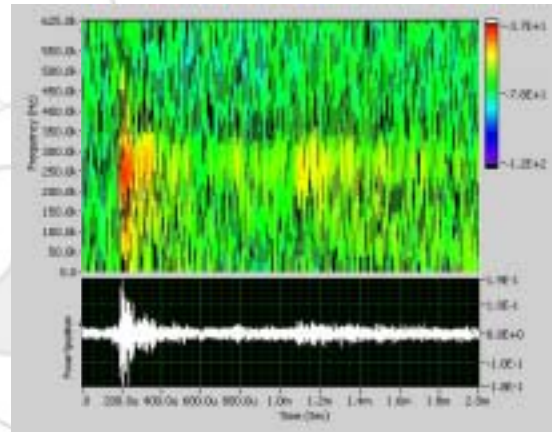
[그림 5.15 배열탐촉자 실험을 위한 측정 위치 선정]



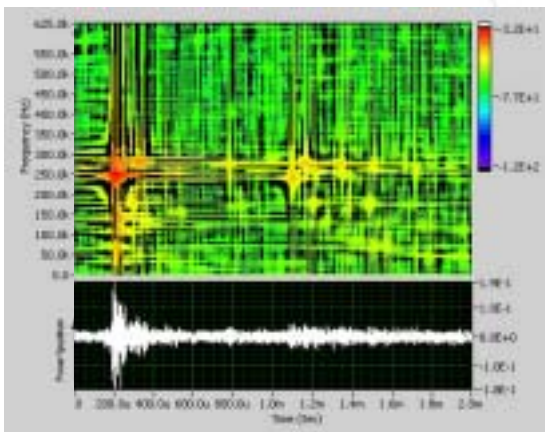
(a) 3D-RF 신호



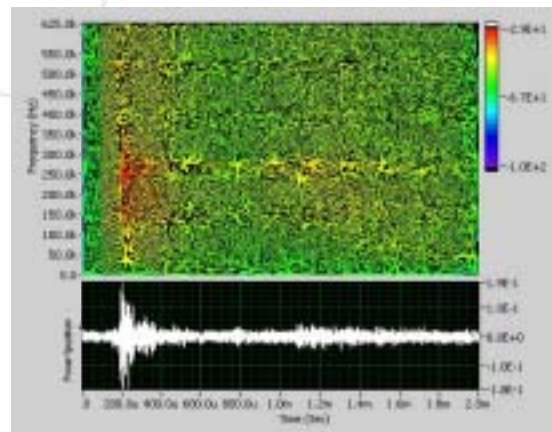
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

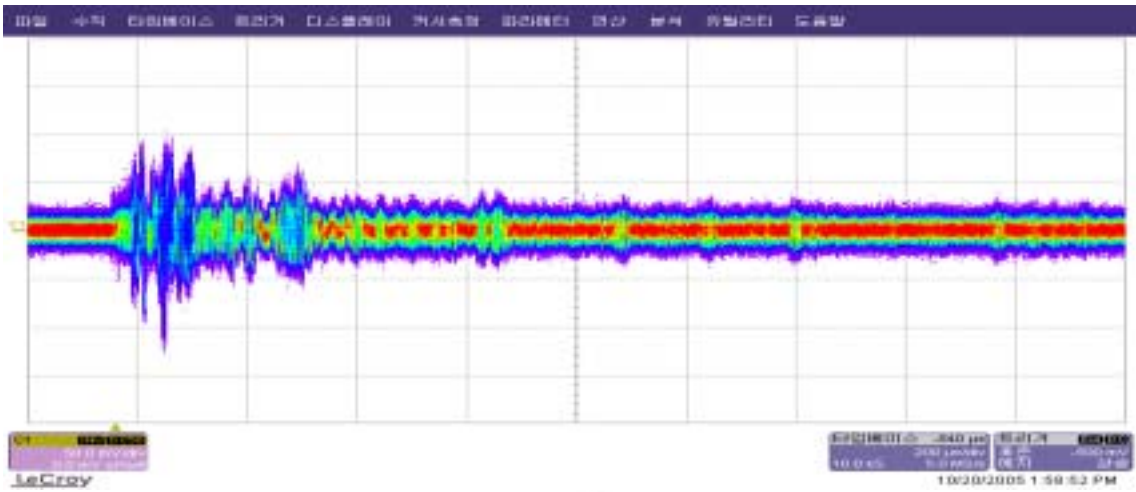


(d) Choi-Williams distribution

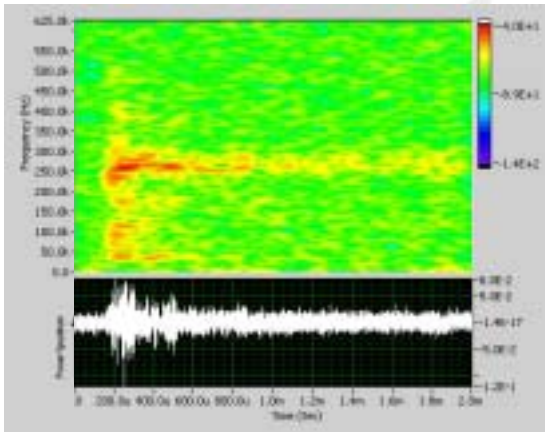


(e) Wigner-ville distribution

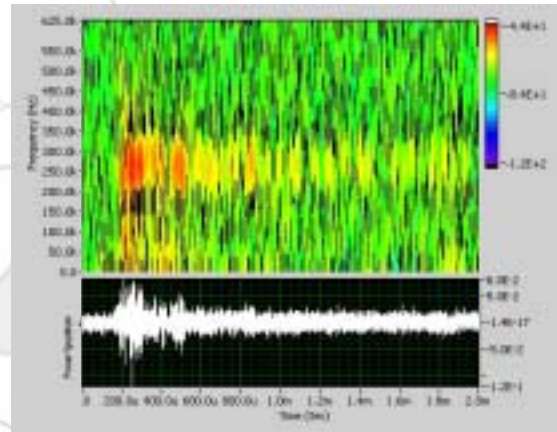
[그림 5.16 D1 슬릿결합 신호]



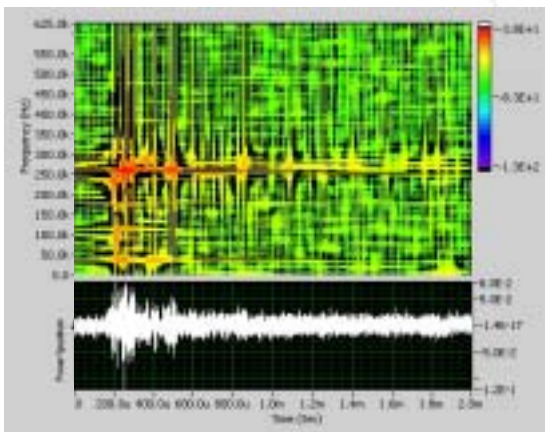
(a) 3D-RF 신호



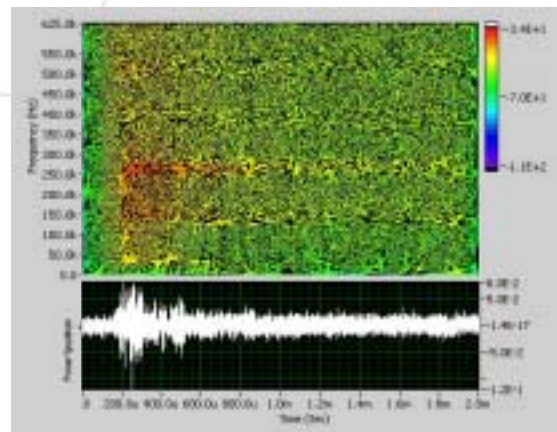
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

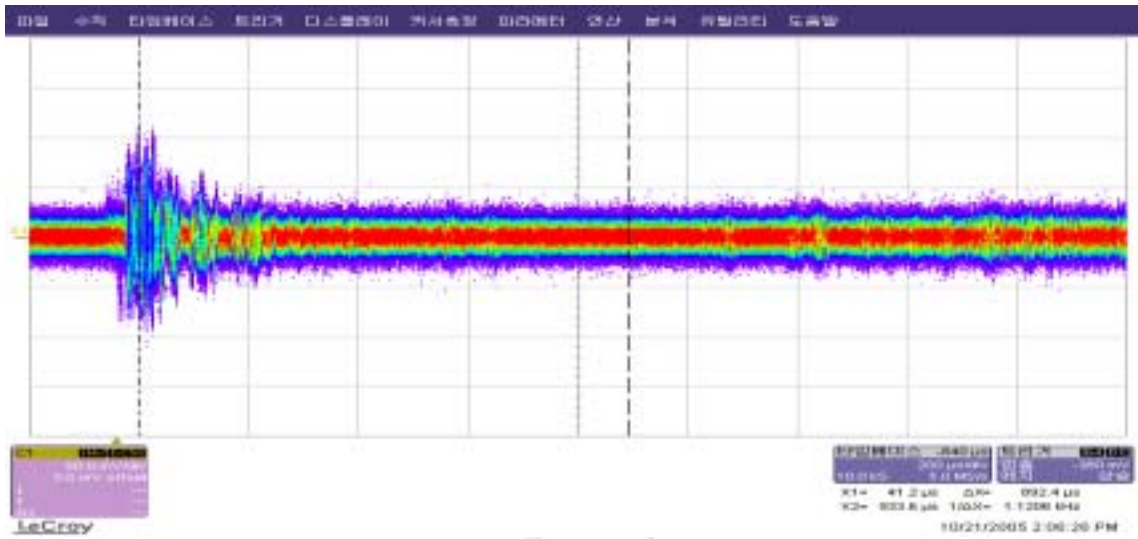


(d) Choi-Williams distribution

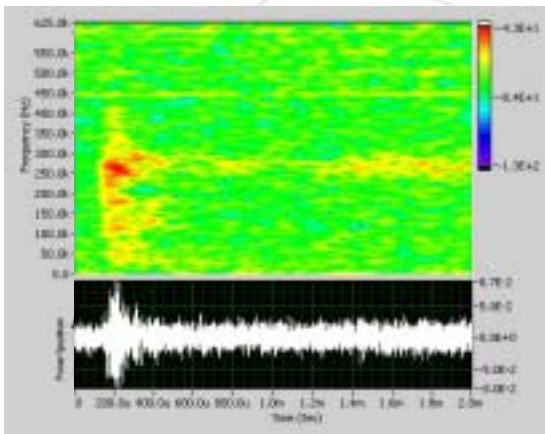


(e) Wigner-ville distribution

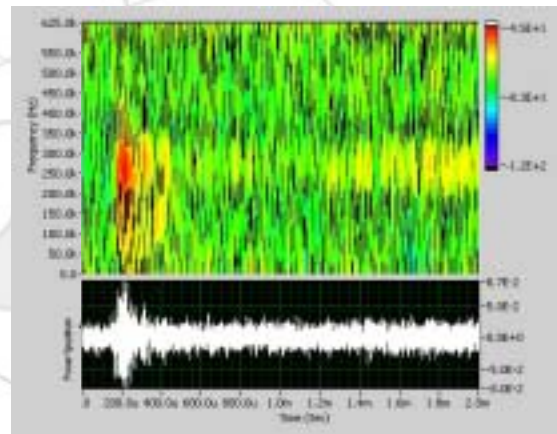
[그림 5.17 D2 슬릿결합 신호]



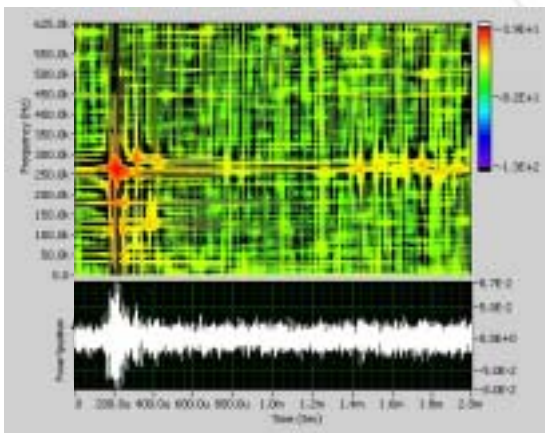
(a) 3D-RF 신호



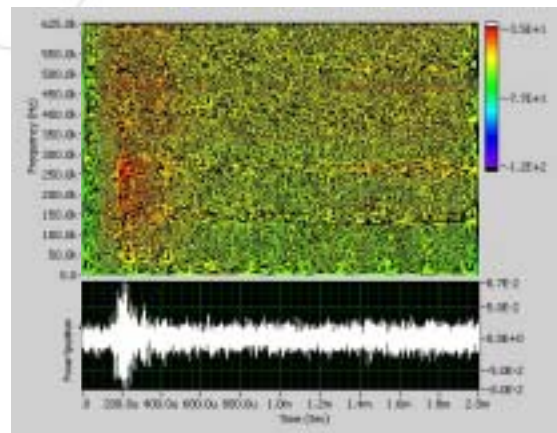
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

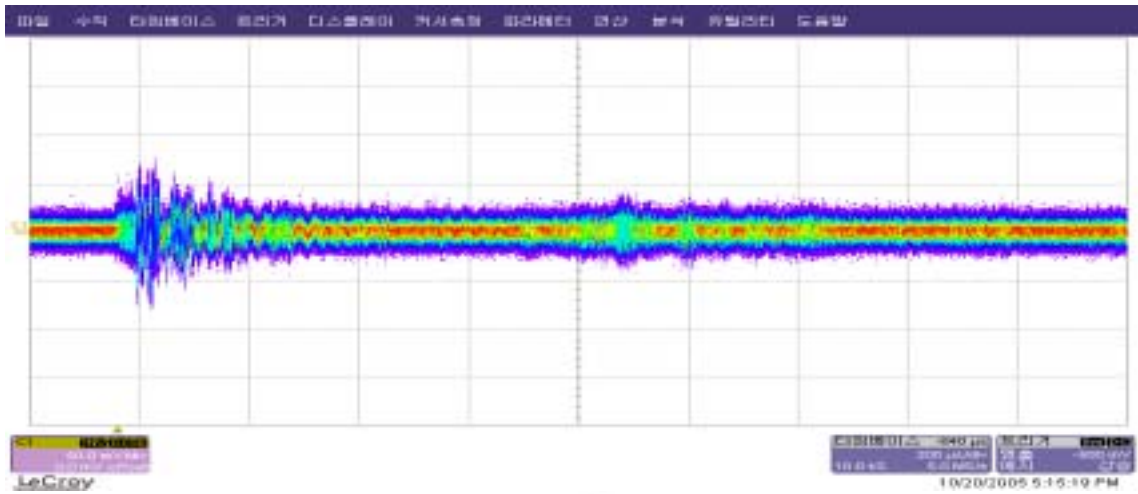


(d) Choi-Williams distribution

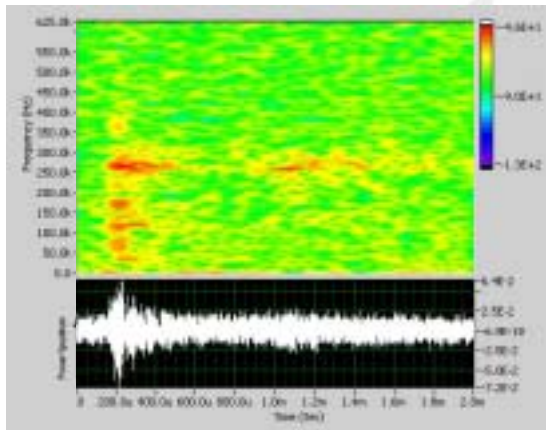


(e) Wigner-ville distribution

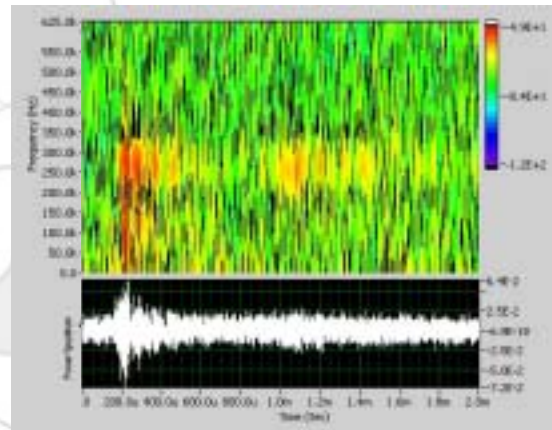
[그림 5.18 D3 슬릿결합 신호]



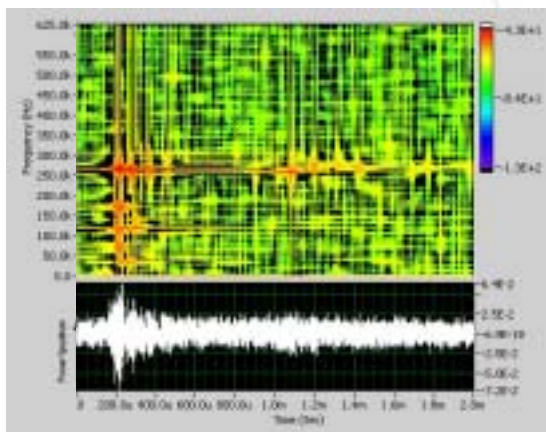
(a) 3D-RF 신호



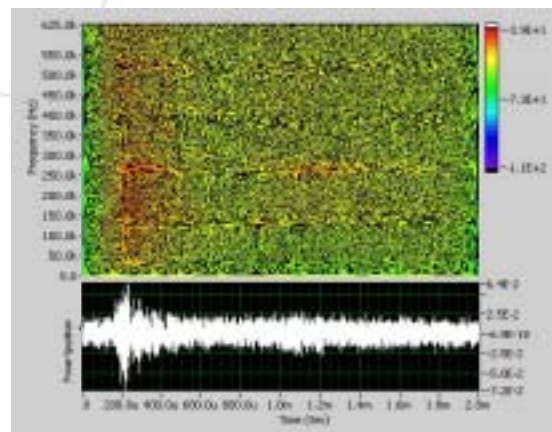
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

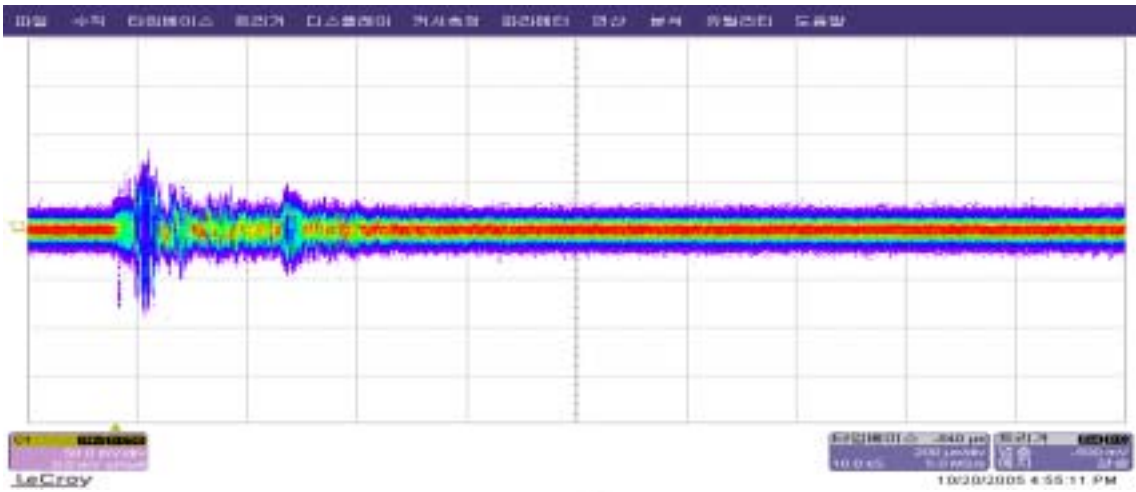


(d) Choi-Williams distribution

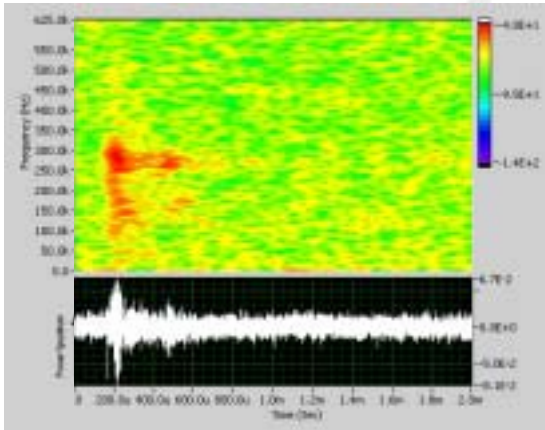


(e) Wigner-ville distribution

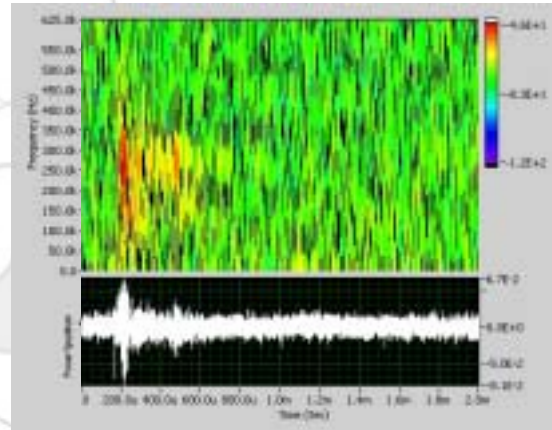
[그림 5.19 D4 슬릿결함 신호]



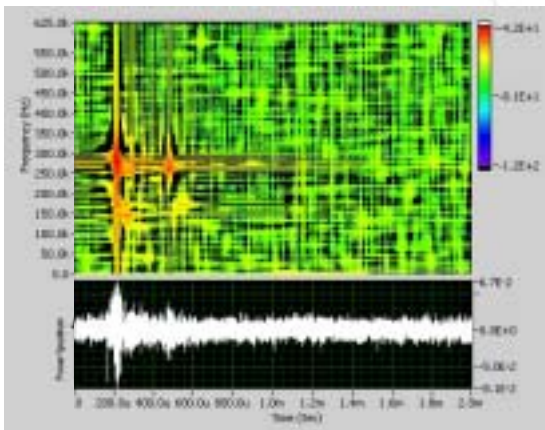
(a) 3D-RF 신호



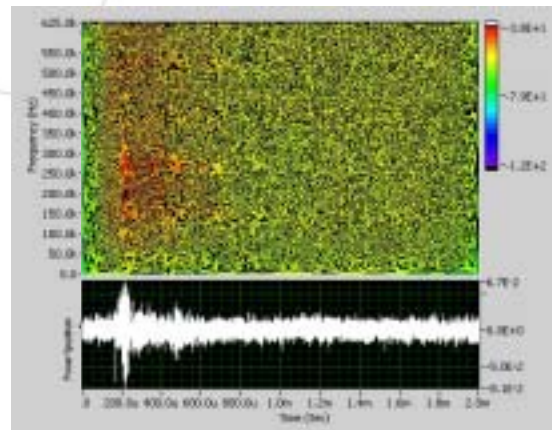
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

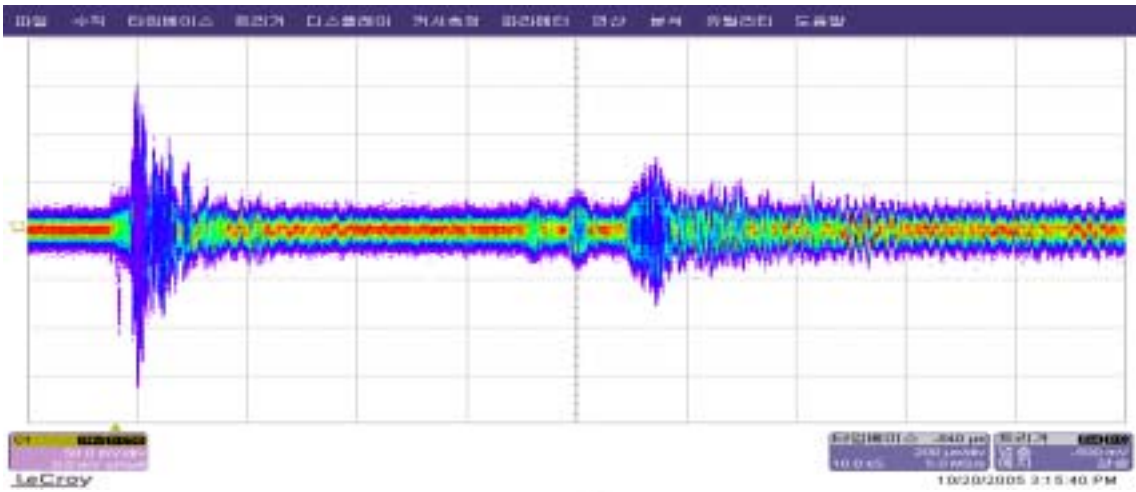


(d) Choi-Williams distribution

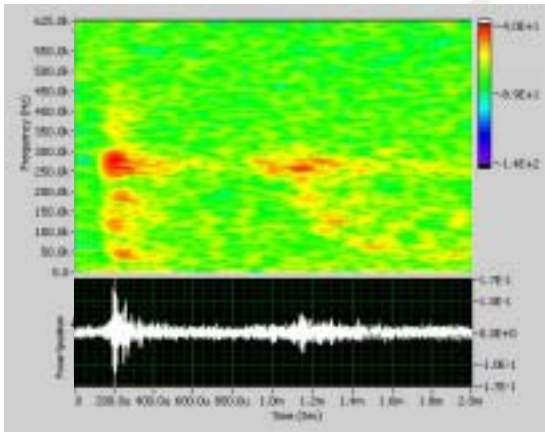


(e) Wigner-ville distribution

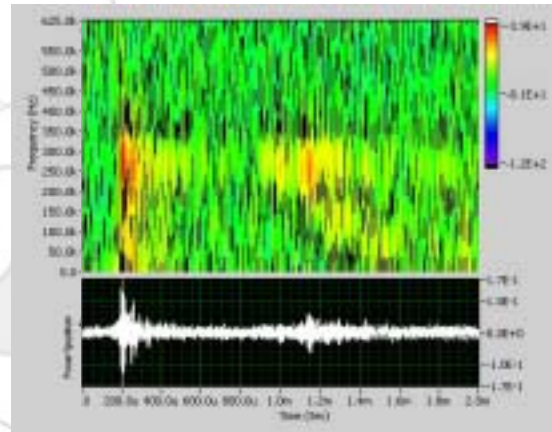
[그림 5.20 D5 슬릿결함 신호]



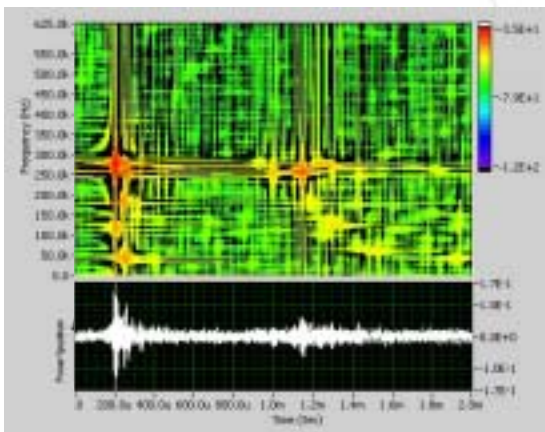
(a) 3D-RF 신호



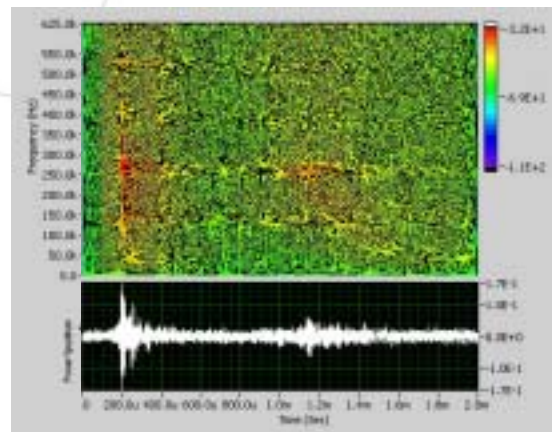
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

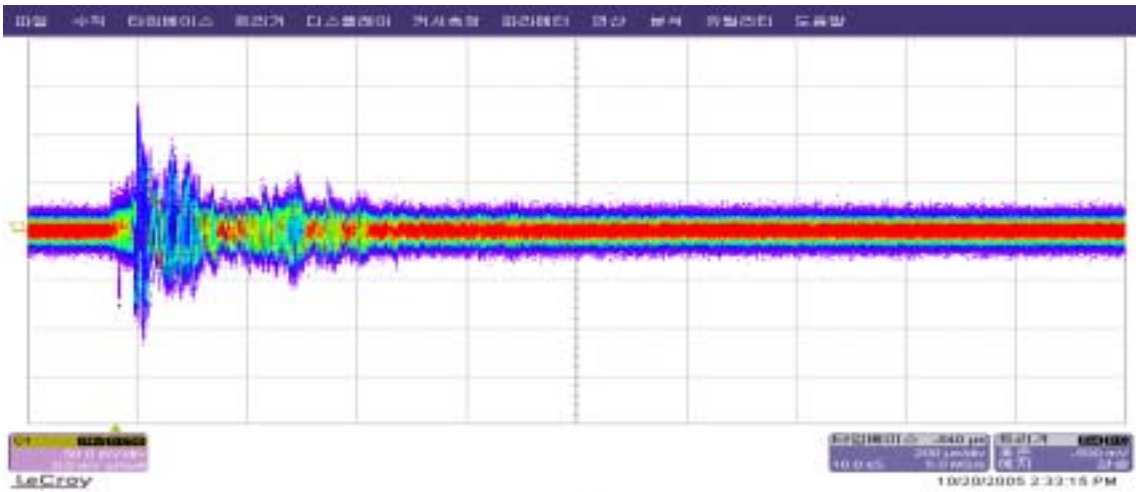


(d) Choi-Williams distribution

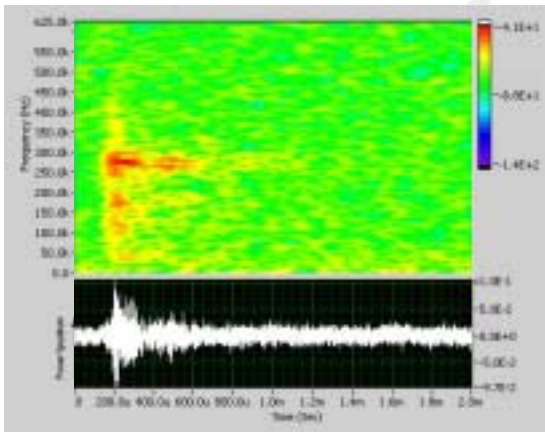


(e) Wigner-ville distribution

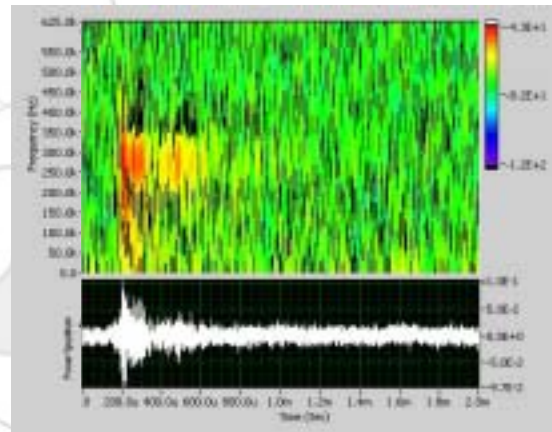
[그림 5.21 D1 홀결함 신호]



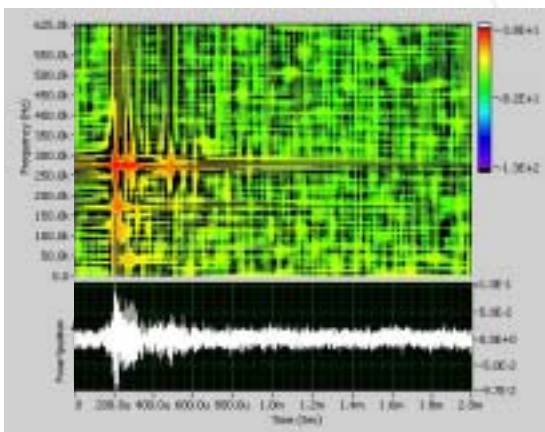
(a) 3D-RF 신호



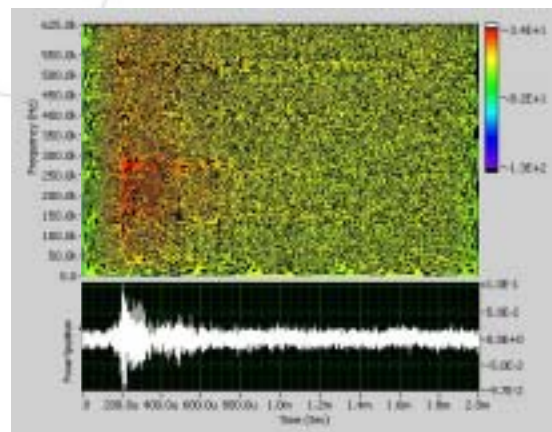
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

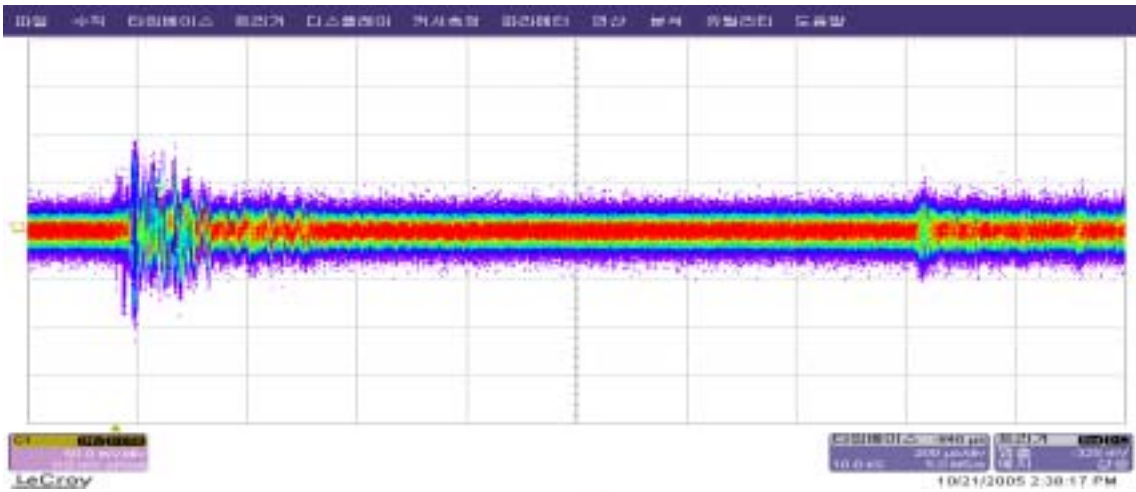


(d) Choi-Williams distribution

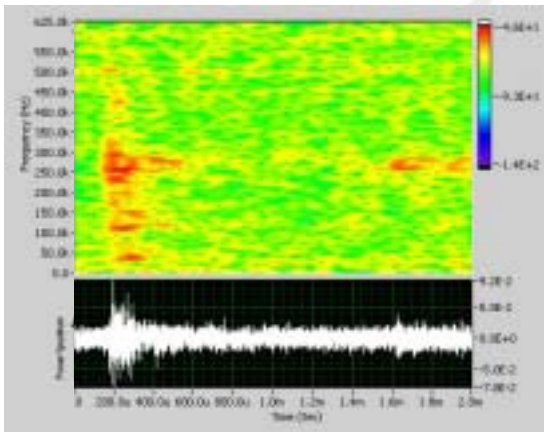


(e) Wigner-ville distribution

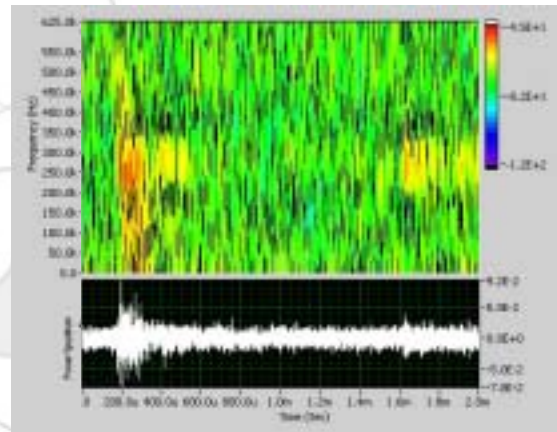
[그림 5.22 D2 홀결함 신호]



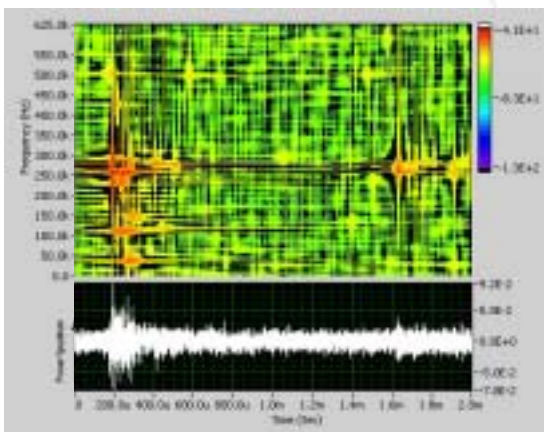
(a) 3D-RF 신호



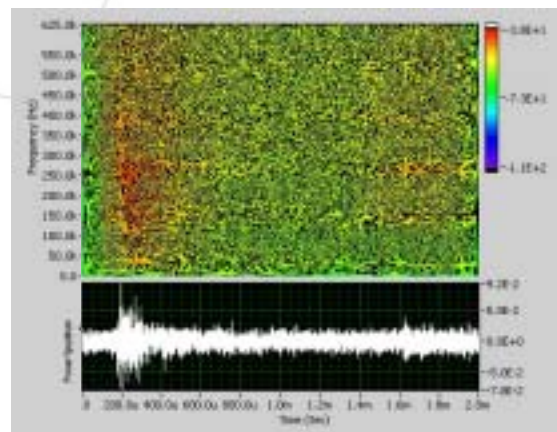
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

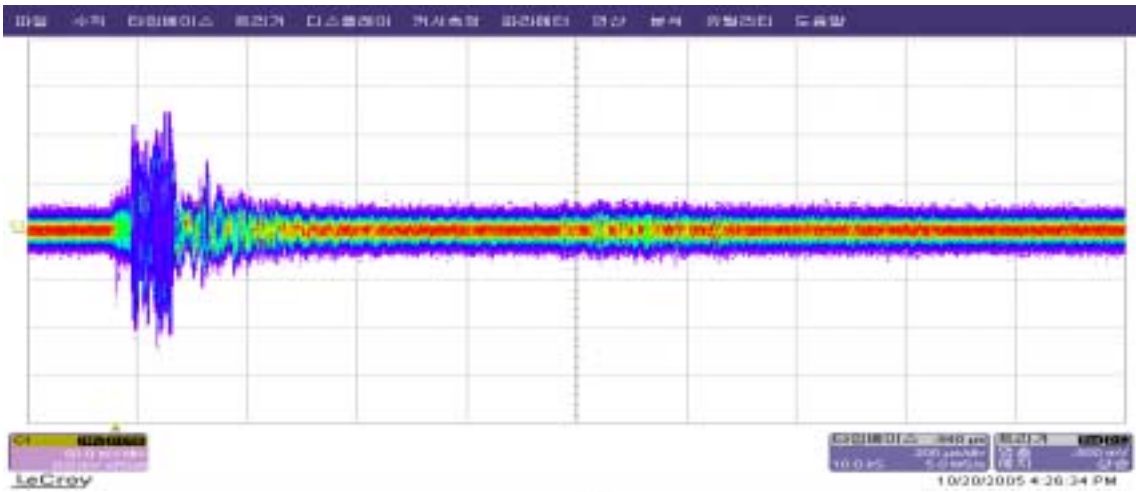


(d) Choi-Williams distribution

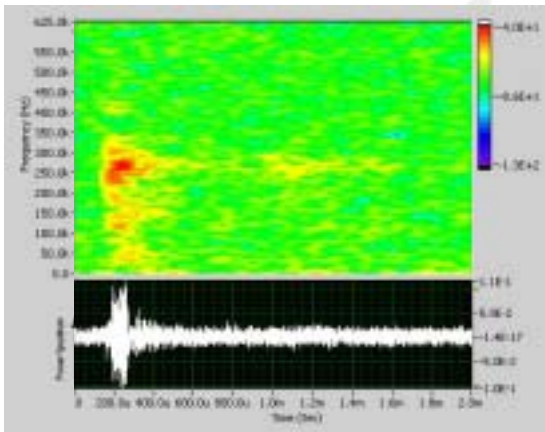


(e) Wigner-ville distribution

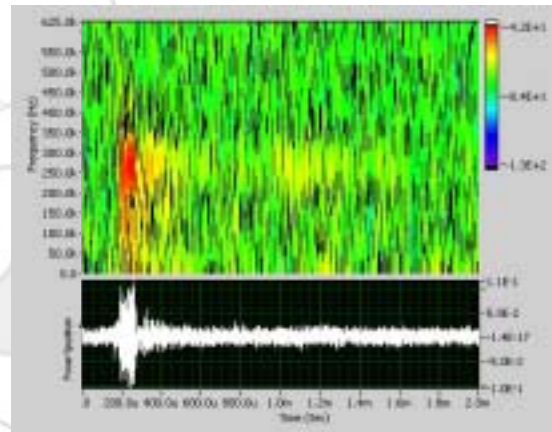
[그림 5.23 D3 홀결함 신호]



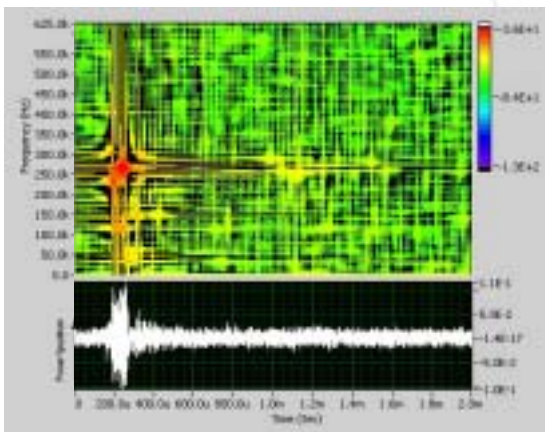
(a) 3D-RF 신호



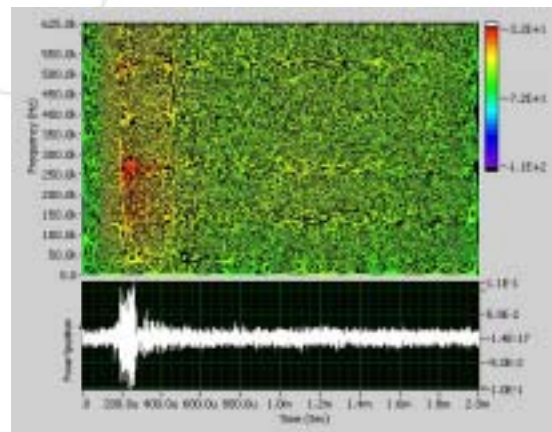
(b) STFT



(c) Gabor spectrum

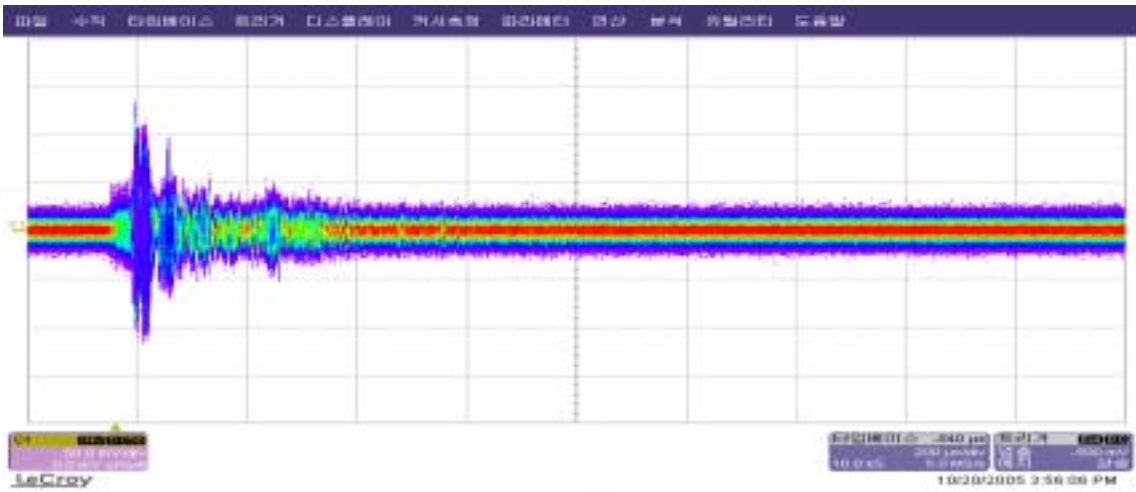


(d) Choi-Williams distribution

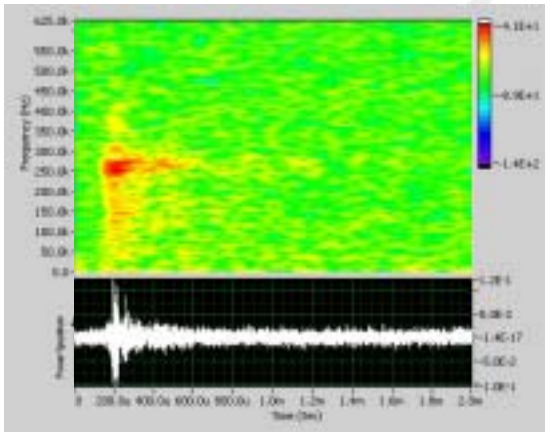


(e) Wigner-ville distribution

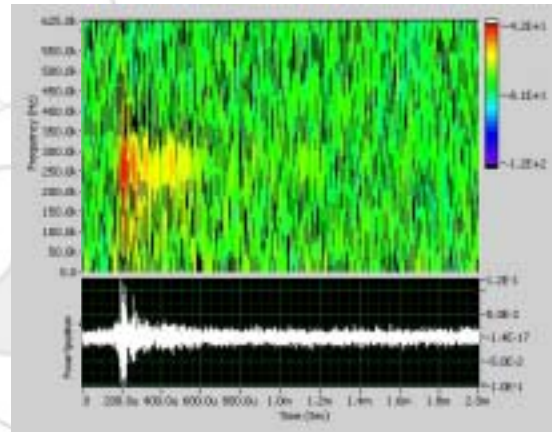
[그림 5.24 D4 홀결함 신호]



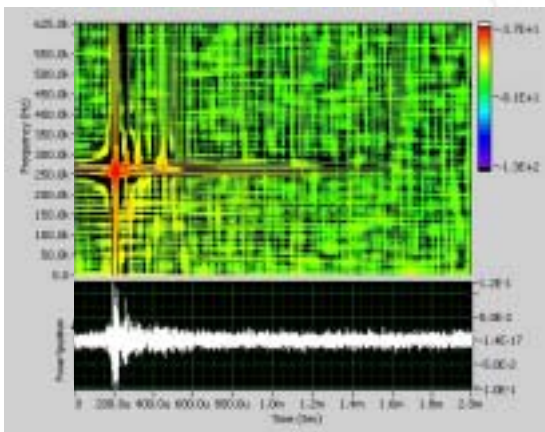
(a) 3D-RF 신호



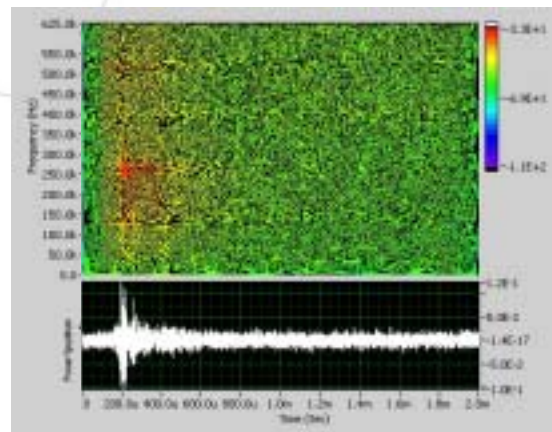
(b) STFT



(c) Gabor spectrum



(d) Choi-Williams distribution



(e) Wigner-ville distribution

[그림 5.25 D5 홀결함 신호]

6. 결과

원전 배관의 온라인 감시에 적용할 수 있는 비파괴적 검사 시스템의 개발을 위해 사각탐촉자 방법과 본 연구과제에서 개발한 배열형 탐촉자 시스템을 이용해 스테인리스 배관에 대한 유도초음파 실험을 수행하였고, 유도초음파의 분산특성과 모드 분석을 위한 분산선도를 얻기 위해 이론적인 고찰을 수행하였다.

결함의 종류와 크기에 따른 유도초음파 특성을 알아보기 위해 결함의 깊이가 배관 두께의 10%, 30%, 50%, 70%, 90%인 길이방향 결함, 원주방향 결함, 홀(hole) 시편이 각각 제작되었으며, 인접 결함들과의 분해능을 살펴보기 위해 결함 사이의 거리가 각각 300mm, 200mm, 100mm, 50mm, 20mm인 관통 홀 결함에 대한 시편이 제작되었다. 또한 유도초음파의 장거리 전파 특성을 알아보기 위해 4개의 6m배관과 1개의 2m배관으로 용접 결함된 26m장거리 배관이 제작되었다.

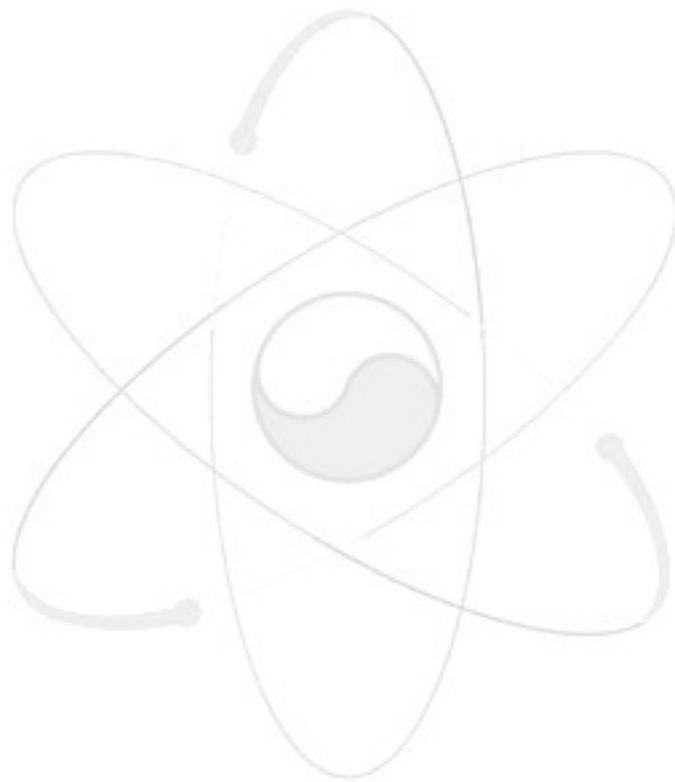
사각탐촉자를 이용한 입사각도별 유도초음파의 특성을 파악하기 위해 입사각도 30, 45, 60도에 대한 신호를 STFT기법을 이용해 신호처리한 후 이론적으로 구한 분산선도와 비교분석하였다. 또한 결함의 종류 및 크기에 따른 유도초음파 수신 신호를 비교하였는데 홀결함의 경우, 배관 두께의 30% 이상의 결함에 대해서는 RF 신호 자체에서도 명확하게 확인할 수 있었다. 원주방향 결함에 대해서는 모든 결함이 명확하게 검출되었고, 인접 결함과의 분해능을 알아본 결과 최소 인접거리 20mm까지도 결함신호를 분리할 수 있음을 확인하였다.

26m장거리 배관에 대한 실험에서는 각각의 용법 부위 신호와 더불어 유도초음파 발생 위치로부터 16m 떨어져 있는 결함까지도 확인할 수 있었다. 하지만 곡관부의 신호는 명확하지 않았으며, 이는 배관을 따라 진행하는 유도초음파의 에너지 감소가 원인으로 추정되었다. 이를 확인하기 위하여 측정위치를 곡관부 쪽으로 이동하면서 신호를 받아 본 결과 곡관부의 끝단신호까지 명확하게 검출되었다.

배열형 탐촉자를 이용한 6m 결함시편에 대한 실험에서는 각각의 결함으로부터 일정한 거리에 탐촉자를 장착한 후 동일 조건으로 실험을 수행하였다. 또한 3D-RF 신호, STFT, Gaber spectrum, Choi-Williams distribution, Wigner-Ville distribution 등과 같은 여러 가지 신호처리 기법을 적용해 결함신호를 분석하였다. 원주방향 슬릿결함의 경우에는 90%~50% 결함에서는 신호검출이 가능하였고, 신호처리 기법을 비교한 결과 STFT기법과 Choi-Williams distribution기법이 본 실험에 적절함을 확인하였다. 반면 30% 이하의 결함에서는 신호검출이 어려웠으며, 홀 결함의 경우에는 결함의 크기에 따른 신호검출이 불가능했다.

배열탐촉자 방법은 사각탐촉자 방법에 비해 유도초음파 모드의 선택이 자유롭다는 가장 큰 장점을 지니고 있는 반면 각 탐촉자들의 에너지가 낮을 경우 동기화를 잘

하더라도 좋은 결과를 얻기 힘들었다. 따라서 요소탐측자에서 발생하는 유도초음파의 에너지를 높여야 명확한 결합신호의 검출이 가능할 것으로 판단된다. 실험에서 나타난 이런 문제점을 개선하는 배열탐측자 시스템의 업그레이드가 현재 진행 중이며 시스템의 업그레이드가 끝나면 차기 년도에는 장거리 곡관 배관에 대해서 실험을 수행할 예정이다.



서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식					
수행기관보고서번호		위탁기관보고서번호		표준보고서번호	
KAERI/TR-3143/2006					
제목 / 부제		유도초음파를 이용한 직선배관의 원거리 결함 탐지 실험			
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		엄홍섭 (종합안전평가부)			
연구자 및 부서명		임사회 (종합안전평가부), 김재희 (종합안전평가부) 주영상 (기계공학연구부)			
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	2006.2
페이지	52 p.	도표	있음(O), 없음()	크기	21x29.7 Cm.
참고사항					
공개여부	공개(O), 비공개()		보고서종류	기술보고서	
비밀여부	대외비(), _ 급비밀				
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)					
<p>유도초음파 기술을 활용하여 원전 배관의 결함을 탐지하는데 있어 유도초음파 모드를 쉽게 선택할 수 있는 배열형 탐촉자 시스템의 개발과 동 장비를 이용한 결함 탐지 실험을 기술하였다. 2장에서는 유도초음파 기술에 대한 개략적인 이론을 설명하였고, 3장에서는 사각 탐촉자와 배열형 탐촉자를 이용한 유도초음파 실험에 사용된 장치 및 실험 방법에 대해 기술하였다. 4장에서는 실험에 사용된 실험 시편의 사양에 대해서 기술하였고 5장에서는 실험에서 획득한 자료를 토대로 결함의 형태 및 크기에 따른 유도초음파의 특성을 분석하였으며, 여러 가지 신호처리 방법을 적용한 신호분석 결과를 기술하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		유도초음파, 배관검사, 온라인감시, 배열탐촉자			

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET					
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.	
KAERI/TR-3143/2006					
Title / Subtitle		Experiments of Long-range Inspection Method in Straight Pipes using Ultrasonic Guided Waves			
Project Manager and Department (or Main Author)		H.S.Eom (Integrated Safety Assessment Div.)			
Researcher and Department		S.H.Lim (Integrated Safety Assessment Div.), J.H.Kim (Integrated Safety Assessment Div.) Y.S.Joo (Mechanical Engineering Div.)			
Publication Place	Daejon	Publisher	KAERI	Publication Date	2006.2
Page	52 p.	Ill. & Tab.	Yes(O), No ()	Size	21x29.7 Cm.
Note					
Open	Open(O), Closed()		Report Type		
Classified	Restricted(), ___Class Document				
Sponsoring Org.			Contract No.		
Abstract (15-20 Lines)		<p>This report describes experimental results of a long-range inspection method of pipes using ultrasonic guided waves. In chapter 2, theory of guided wave was reviewed. In chapter 3, equipments and procedures which were used in the experiments were described. Detailed specifications of the specimens described in chapter 4. In chapter 5, we analyzed characteristics of guided wave signals according to shapes and sizes of defects and presents results of various signal processing methods.</p>			
Subject Keywords (About 10 words)		ultrasonic guided waves, pipe inspection, online monitoring, array transducer			