

KAERI/TR-3481/2007

곡선배관에서 유도초음파 모드 확인 및 결함 탐지  
실험

Experiments for Mode Identification of Ultrasonic Guide  
Waves and Fault Detection in a Curved Pipe

*KAERI*

2007. 11

한국원자력연구원

## 제 출 문

한국원자력연구원 원장 귀하

본 보고서를 2006년도 “원전 압력기기의 상시 감시 및 성능진단 지능화 기술개발”  
과제의 기술보고서로 제출합니다.

제목 : 곡선배관에서의 유도초음파 모드 확인 및 결함탐지 실험



2007년 11월

과제명 : 원전 압력기기의 상시감시 및 성능진단 지능화 기술개발

주 저 자 :	엄홍섭
공 저 자 :	임사회
	박진호

## 요 약 문

원전 배관의 건전성 유지를 위한 온라인 모니터링 기술에 활용하기 위하여 유도초음파의 특성 파악과 결함탐지 성능에 대한 실험을 수행하였다. 유도초음파는 고정된 센서로부터 원거리 탐상이 가능하다는 장점을 가지고 있는 반면 기존의 체적초음파와는 달리 무한대의 파동모드가 존재하며 특히 속도가 주파수 및 두께에 의존하는 분산특성을 가지고 있다. 따라서 대상 물체에서 발생하는 유도초음파 모드를 정확하게 판별을 할 수 있어야 결함에서 반사되는 신호를 파악할 수 있다.

본 보고서에서는 원전 배관의 건전성 유지에 있어 주요 관심 대상인 곡선 배관에서 유도초음파를 이용한 결함 탐지 실험 내용을 기술하고 있다. 2장에서는 유도초음파 기술에 대해 개괄적인 내용을 기술하며, 3장에서는 곡관 배관의 결함 탐상을 위한 선행 실험을 비롯한 거리별 결함 신호 측정 결과를 기술하였다. 마지막으로 4장에서는 원전 배관의 결함 탐지를 위한 통합시스템인 LPIS (Long-range Piping Inspection System)와 실험에 사용된 여러 가지의 탐상 웨지 제작 과정에 대해 기술하였다.

Ultrasonic guided wave technique has been studied to apply it to the on-line monitoring of pipes in nuclear power plants. Ultrasonic guided waves can perform long-range inspection from sensor without moving its position. However they have not only numerous modes but also dispersive characteristics that the velocity of modes depends on the frequency and thickness. Thus to understand reflected guided wave signals, their modes should be identified exactly.

This report describes the result of experiments for the detection of defects by using ultrasonic guided waves in a curved pipe which is a matter of concern in the maintenance of structural health of pipes in nuclear power plants. In chapter 2, general theory of guided wave is reviewed. In chapter 3, fault detection experiments in a curved pipe and their results are described. Finally, LPIS (Long-range Piping Inspection System) which is unitary system for the defect detection of the piping are described in chapter 4.

# 목 차

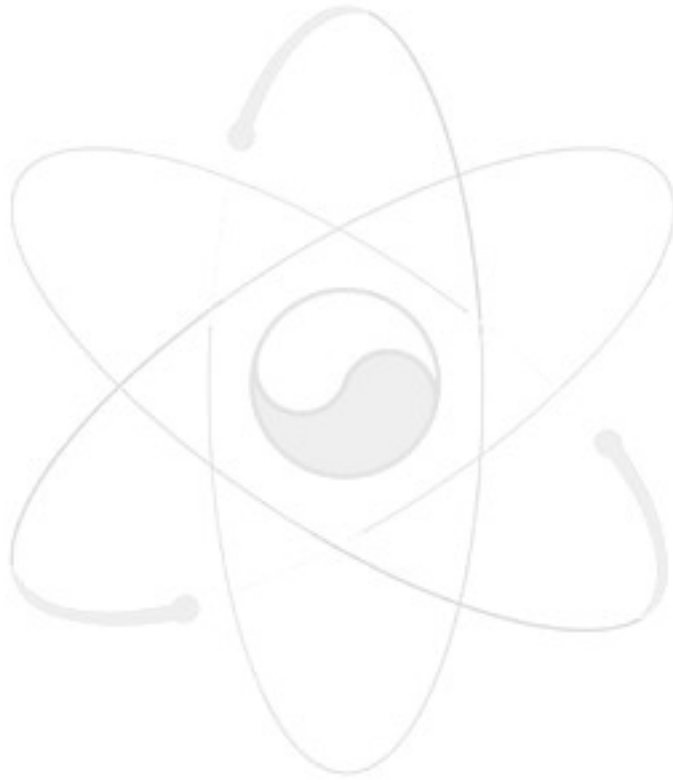
1. 서론 .....	[5]
2. 유도초음파 탐상 기술 .....	[7]
2.1 신호의 발생과 검출 .....	[7]
2.2 분산특성 .....	[7]
3. 원형 곡관배관에서 결함 측정 실험 .....	[10]
3.1 곡관 경로별 유도초음파 전파 모드 분석 .....	[10]
3.1.1 실험 개요 .....	[10]
3.1.2 이중 곡관 시편의 설계 및 제작 .....	[10]
3.1.3. 실험 방법 및 결과 .....	[11]
3.2 곡관 배관에서의 결함 탐지 .....	[22]
3.2.1 실험 개요 .....	[22]
3.2.2 실험 방법 .....	[22]
3.2.3 실험 결과 .....	[24]
4. LPIS(Long-range Piping Inspection System) .....	[30]
4.1 제작 배경 .....	[30]
4.2 장치 소개 .....	[30]
4.2.1 LPIS .....	[30]
4.2.2 검사용 웨지 제작 .....	[32]
5. 결과 .....	[34]

## 그림 목차

[그림 2.1. 위상속도 분산선도]	[8]
[그림 2.2. 균속도 분산선도]	[9]
[그림 3.1. 이중 곡관 시편]	[10]
[그림 3.2. 유도초음파 진행 경로]	[11]
[그림 3.3. 유도초음파의 전파 경로별 측정 지점]	[11]
[그림 3.4. Central path signal, C1]	[12]
[그림 3.5. Central path signal, C2 and C3]	[13]
[그림 3.6. Central path signal, C4 and C5]	[14]
[그림 3.7. Central path signal, C6 and C7]	[15]
[그림 3.8. Central path signal, C8 and C9]	[16]
[그림 3.9. Central path signal, O1 and O2]	[17]
[그림 3.10. Central path signal, O3 and O4]	[18]
[그림 3.11. Central path signal, O5 and O6]	[19]
[그림 3.12. Central path signal, O7 and O8]	[20]
[그림 3.13. Central path signal, O9]	[21]
[그림 3.14. 곡관 배관의 결함측정 방식]	[22]
[그림 3.15. 곡관 배관의 결함측정 구성도]	[23]
[그림 3.16. 직관부 거리별 time signal]	[24]
[그림 3.17. 곡관부 거리별 time signal]	[26]
[그림 3.18. 직관부 균속도 측정]	[27]
[그림 3.19. 곡관부 균속도 측정]	[27]
[그림 3.20. 곡관 결함 측정]	[28]
[그림 4.1. LPIS(Long-Range Piping Inspection System) 및 구성도]	[31]
[그림 4.2. Control program for 8ch pulser/receiver]	[31]
[그림 4.2. 미세 가변각 웨지]	[32]
[그림 4.3. 멀티 웨지 - 12 transducers (4×3 array)]	[33]
[그림 4.4. 고정각 웨지 - (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70도)×2]	[33]

## 표 목차

[표 3.1. 곡관부 모드 분석 측정] .....	[12]
[표 3.2. 측정 방식 (균속도 측정)] .....	[23]
[표 3.3. 측정 방식 (곡관부 결함 측정)] .....	[29]



# 1. 서론

원전의 안전성 확보를 위한 가동전 검사(PSI)와 가동중 검사(ISI)는 기기 건전성 진단 차원에서 매우 중요한 부분을 차지하고 있는데, ISI는 운전 기간 중에 수행되며 따라서 방사능에 노출될 위험을 가지고 있다. 온라인 모니터링 기술을 적용한 실시간 감시는 이러한 위험성을 낮출 수 있으며 원전기기의 중요 부품에 대한 정보를 상시 수집함으로써 효율적인 ISI의 수행을 가능하게 한다.

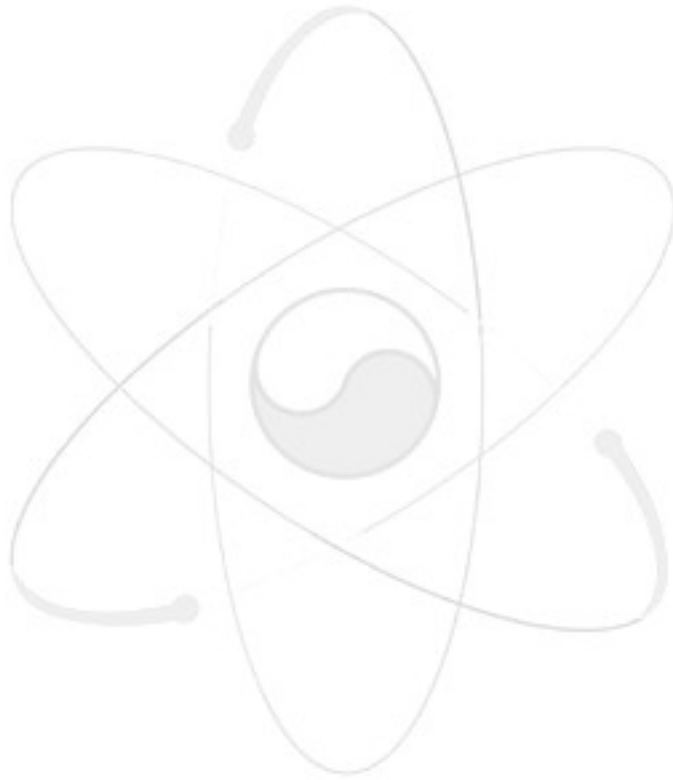
본 연구에서는 원전 배관 검사에 사용되고 있는 누출자력(MFL), 와전류(ECT), 방사선(RT), 초음파(UT)와 같은 일반적인 방법들이 가지고 있는 단점인 국부적 탐상을 탈피해 임의 지점에서의 원거리 탐상법을 개발하는데 초점을 맞추고 있으며 이러한 기술의 개발을 위해 유도초음파기술이 도입되었다.

원전 배관의 건전성 진단에 있어 대표적인 관심 부위는 용접부와 곡관부이다. 배관을 따라 진행하는 유도초음파는 용접부를 지나면서 에너지의 감소가 일어나 반사 신호의 세기가 줄어들게 된다. 따라서 용접부에 대해 동일 조건에서 유도초음파의 진행 모드별 특성을 파악하는 것이 선행되어야만 한다. 또한 곡관부를 진행하는 신호는 경로별, 즉 배관의 inner path, outer path, central path에 따라 각각 진행되는 모드의 특성이 상이하게 전파되므로 곡관부의 path에 따른 위치별 모드 특성 파악이 요구된다. 결과적으로, 이러한 실험 데이터의 토대 위에 곡관부 결함탐지를 위한 유도초음파의 적용 가능성을 실험적으로 확인하게 된다. 본 보고서에서 다루고 있는 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 곡관 경로별 유도초음파 전파 모드 분석 : 배관의 결함 탐지를 위한 최적 모드 선정을 위해서는 직관부에서 발생된 유도초음파 모드가 곡관부를 지나면서 어떠한 특성을 보이는지를 파악하는 것이 선행되어야 함. 따라서 곡관부의 경로에 따른 다점 측정방식을 통해 곡관부의 경로별 유도초음파 모드를 실험적으로 분석함.
- 이중 곡관 시편의 결함탐지 실험 및 분석 : 용접부가 포함된 곡관배관에 대한 초음파의 전파 특성 연구는 원전 배관의 특성상 그 건전성 평가에 있어 필수 과제로 볼 수 있음. 따라서 전년도 직관 배관에 관한 연구를 바탕으로, 결함이 포함된 이중 곡관 시편을 설계/제작하고 입사각에 따른 결함까지의 거리별 신호 분석을 통해 결함을 탐지하기 위한 최적 조건을 설정함.
- LPIS (Long-range Piping Inspection System) 제작: 기존 실험실 차원의 유도초음파 연구가 실제 적용 차원으로 발전되기 위해서는 정형화된 통합시스템이 필

히 요구됨. 본 연구에서는 적용범위가 더욱 광범위한 배관의 유도초음파 연구 및 검사를 위해 장거리 배관검사 시스템인 LPIS(Long-range Piping Inspection System)를 자체 설계하고 제작함.

- 배관 검사용 웨지 제작: 기존의 가변웨지는 입사/수신각의 조절이 정확하지 않으며, 여러 개의 탐촉자를 동시에 장착하는 웨지의 경우에는 탐상 매질과의 접촉에 문제가 많아 실제 실험에 있어 명확한 데이터를 수집하기 어려움. 이러한 기존 웨지를 보완/수정하여 미세 가변각 웨지, 여러 개의 탐촉자를 동시에 장착할 수 있는 멀티웨지, 다수의 고정각 웨지 등을 설계/제작함.





## 2. 유도초음파 탐상 기술

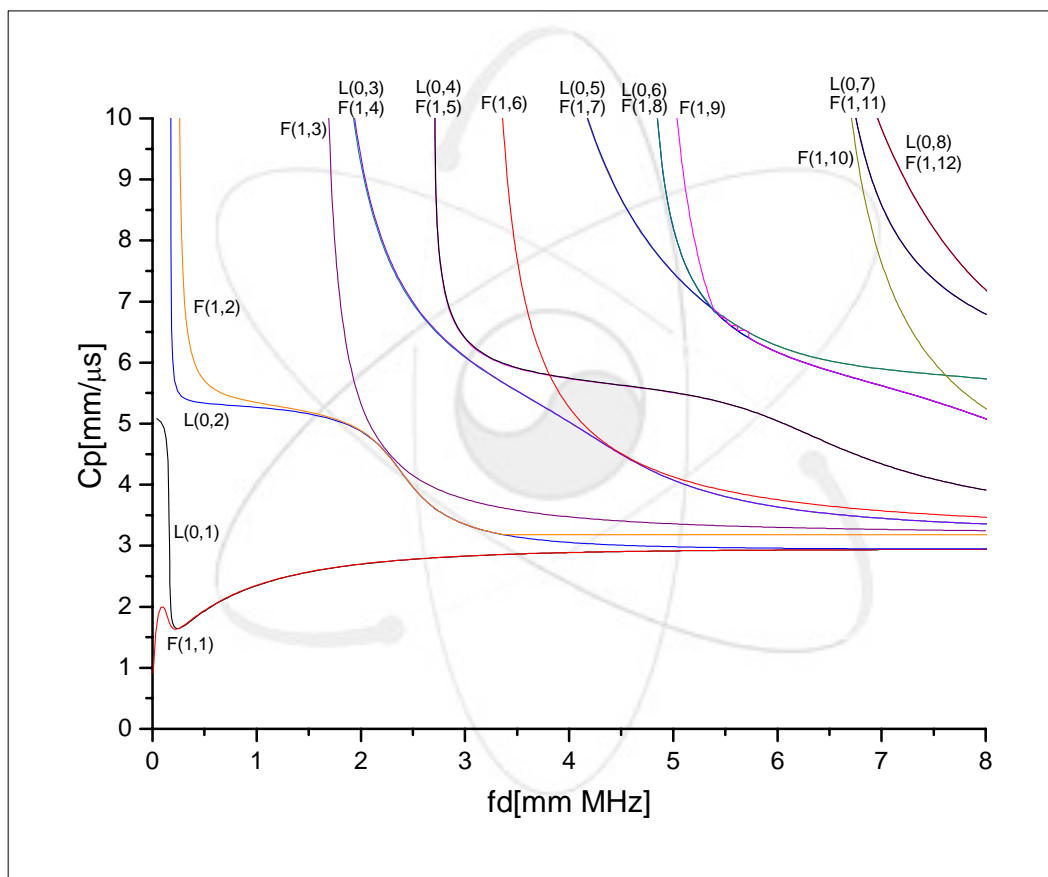
### 2.1 신호의 발생과 검출

원형 배관 내에 유도초음파를 발생시키기 위한 방법으로는 comb transducer를 이용한 방법과 array transducer를 이용한 방법을 비롯해 가장 일반적인 방법으로 사각입사 방법이 있다. 사각입사방법은 종파를 시편에 경사지게 입사시킴으로써 스넬 법칙에 따른 유도초음파를 발생시킨다는 것이 기본 개념이다. 입사 빔의 퍼짐으로 인해 정확한 입사각을 조절하는 것이 힘들고 웨지 보다 느린 위상속도를 갖는 모드는 발생시킬 수 없는 단점이 있음에도 실험 방법이 비교적 간단하여 손쉽게 모드 분석이 가능해 많이 적용되고 있다. 유도초음파는 진동형태에 따라 많은 모드가 발생될 수 있다. 일반적으로 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. 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 결함으로부터의 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.

### 2.2 분산특성

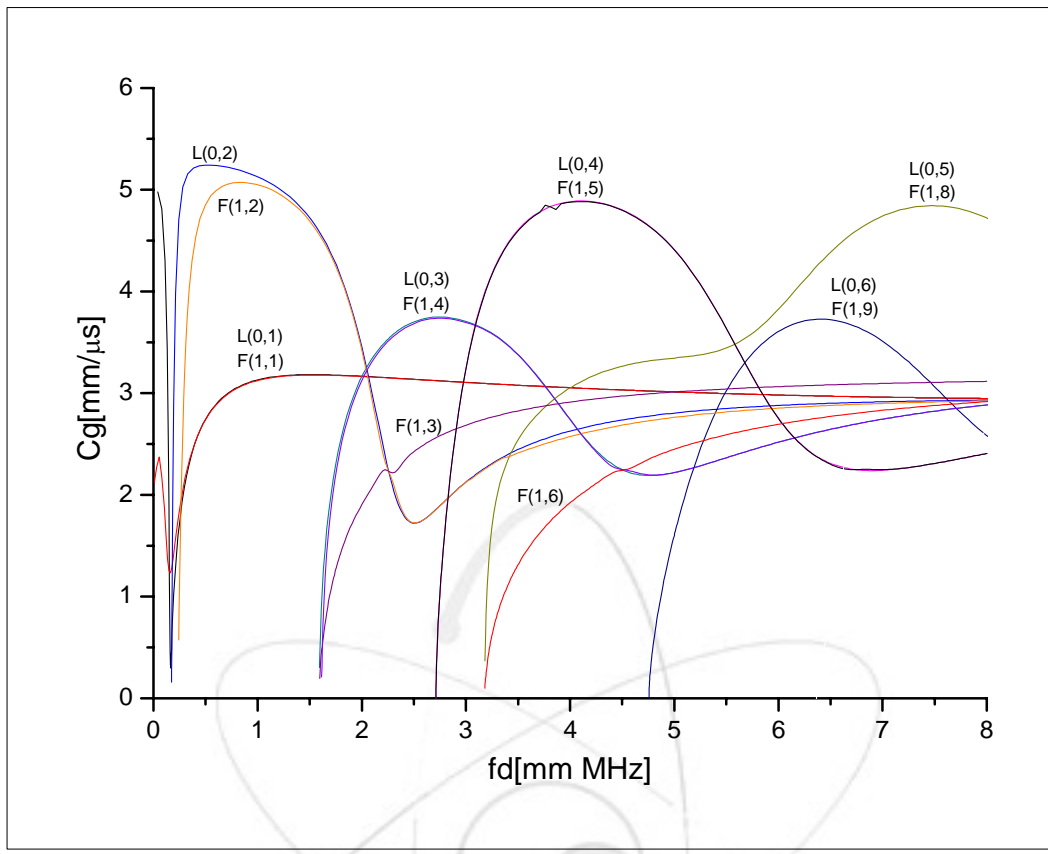
일반적으로 파의 진행방향과 진동방향이 같으면 종파, 수직인 경우를 횡파라고 정의한다. 이와 달리 유도초음파 각 모드의 입자변위(particle displacement)는 파의 진행방향에 평행한 성분과 수직인 성분을 모두 가지게 되며 이들은 파형구조(wave structure)라고 불리는 피검사체의 두께 방향에 대한 특정 분포를 나타냄으로서 특정 유도초음파 모드의 검사 민감도와 송·수신 감도를 결정짓는 인자가 된다. 또한 재료상수(종파, 횡파속도 및 밀도), 두께, 주파수하에서만 발생이 가능하며 이들 조건의 변화에 따라 길이방향으로의 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. 그림 2.1은 SUS304 원형배관에 대해 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 2.1 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.



[그림 2.2 군속도 분산선도]

### 3. 원형 곡관배관에서 결합 측정 실험

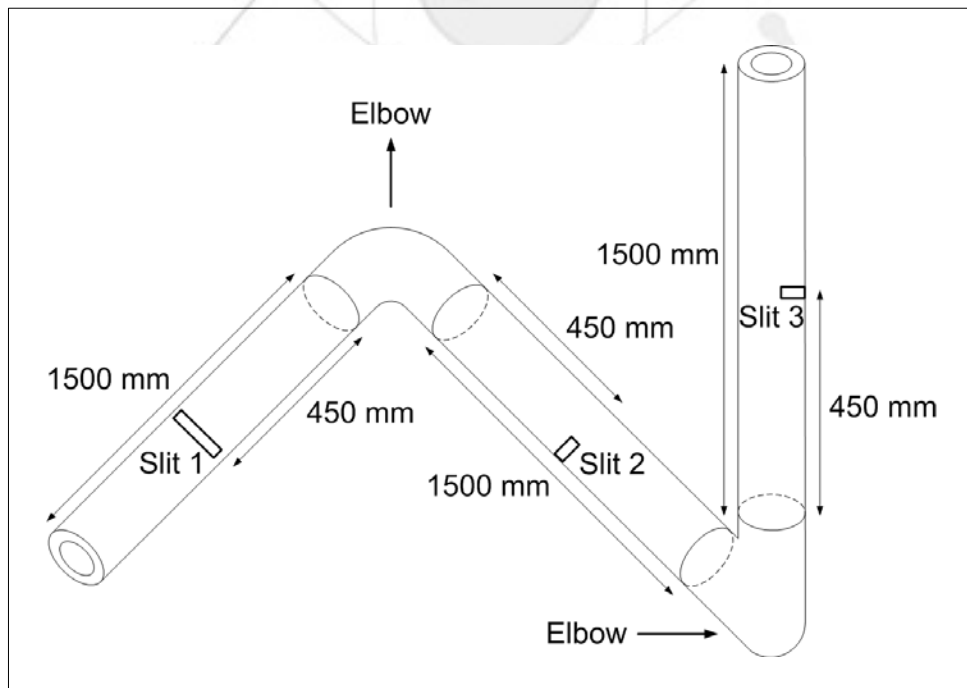
#### 3.1 곡관 경로별 유도초음파 전파 모드 분석

##### 3.1.1 실험 개요

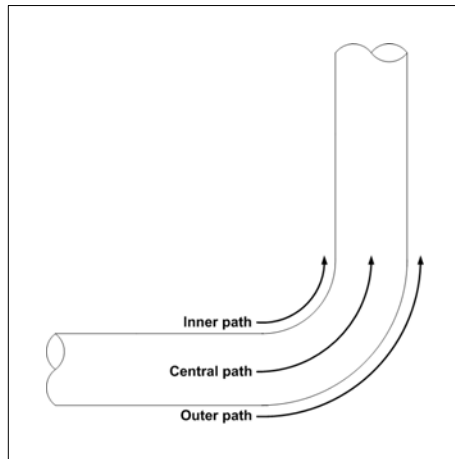
배관의 결합 탐지를 위한 최적 모드를 선정하기 위해서는 직관부에서 발생된 유도초음파 모드가 곡관부를 지나면서 어떠한 특성을 보이는지를 파악하는 것이 선행되어야만 한다. 따라서 송신용 탐촉자를 고정시킨 후 곡관부의 곡면을 따라 일정 간격으로 수신하는 신호를 측정하는 다점 측정방식을 통해 곡관부의 경로별 유도초음파 모드를 실험적으로 분석하였다. 본 실험에서는 곡률반경이 상대적으로 작아 측정이 불가능한 inner path 영역을 제외한 central path와 outer path 영역에 대해 30mm 간격으로 측정을 하였다.

##### 3.1.2 이중 곡관 시편의 설계 및 제작

본 실험을 위해 그림 3.1과 같이 SUS304재질로 된 3개의 원형 직관 배관을 2개의 엘보우와 용접하여 이중 곡관배관을 제작하였다. 직관의 길이는 1.5m로 동일하며 외경과 두께는 각각 60.3 mm, 5.5 mm이다. 직관부에서 발생된 유도초음파는 곡관부를 지나면서 그림 3.2와 같이 3가지 경로, 즉 inner path, central path, outer path를 따라 전파될 것으로 예상할 수 있다.



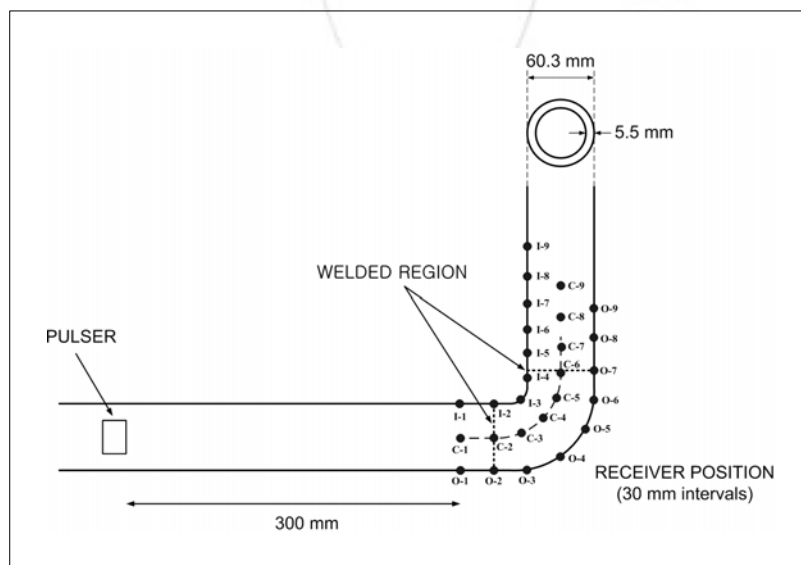
[그림 3.1. 이중 곡관 시편]



[그림 3.2. 유도초음파 진행 경로]

### 3.1.3. 실험 방법 및 결과

직관부에서 발생된 유도초음파 모드들은 곡관부를 지나가면서 경로에 따라 특성이 바뀔 것으로 예상된다. 따라서 곡관부 용접라인으로부터 300mm 떨어진 지점에 송신용 사각 탐촉자의 위치를 고정하고 그림 3.3과 같이 진행경로에 따라 30mm 간격으로 신호를 측정하였다. Inner path는 곡률이 작아 현재 보유하고 있는 탐촉자와의 접촉이 불가능해 central path와 outer path에 대해 측정이 진행되었다. 입사각의 범위는 30도, 45도, 60도 이며 수신각 또한 각각의 입사각과 동일하게 설정하였다. 실험에 사용된 탐촉자는 PANAMETRICS사의 상용 탐촉자로서 진동자의 크기는 0.5"×1.0"이며, 중심주파수는 0.5MHz이다. 배관의 두께가 5.5mm임을 고려하면 fd값은 2.75 이다. 또한 탐촉자의 빔을 배관에 사각으로 입사하기 위한 웨지는 Plexiglass 재질로써 종파속도는 2,720m/s 이다.



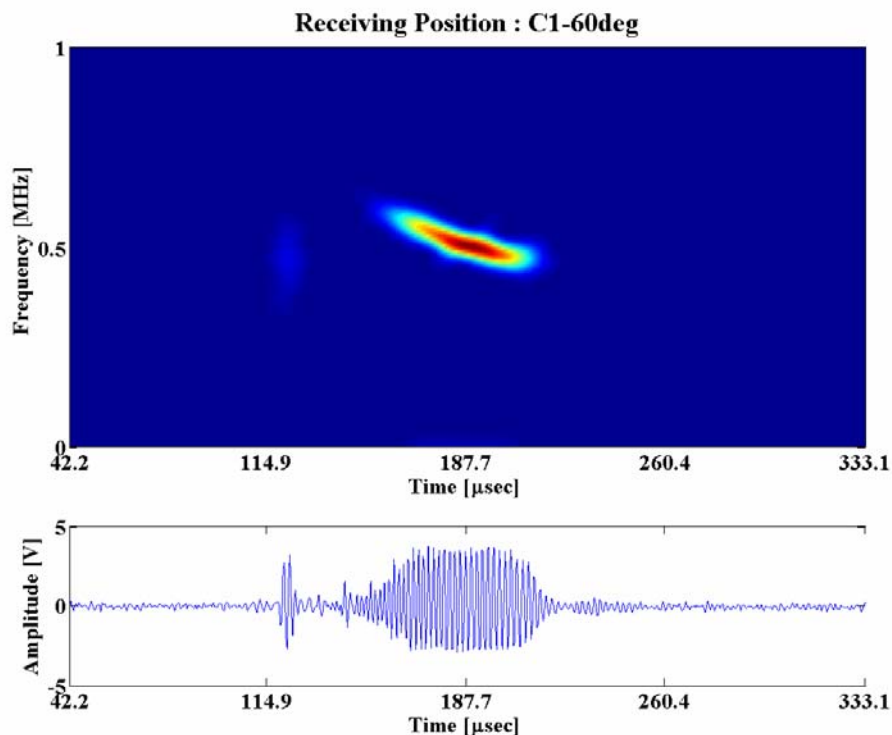
[그림 3.3. 유도초음파의 전파 경로별 측정 지점]

표 3.1은 측정방식을 보여주고 있다. 각각의 조건을 고려해 총 162여 회의 실험이 수행되었으며 각각의 시간 데이터에 대해 STFT를 통한 모드 분석 작업이 진행되었다.

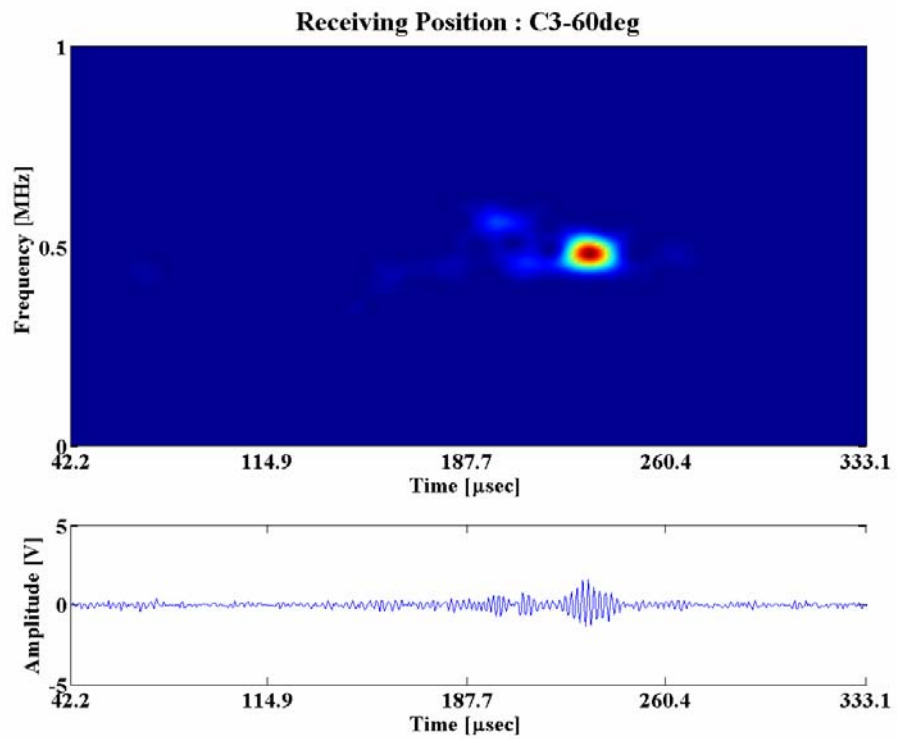
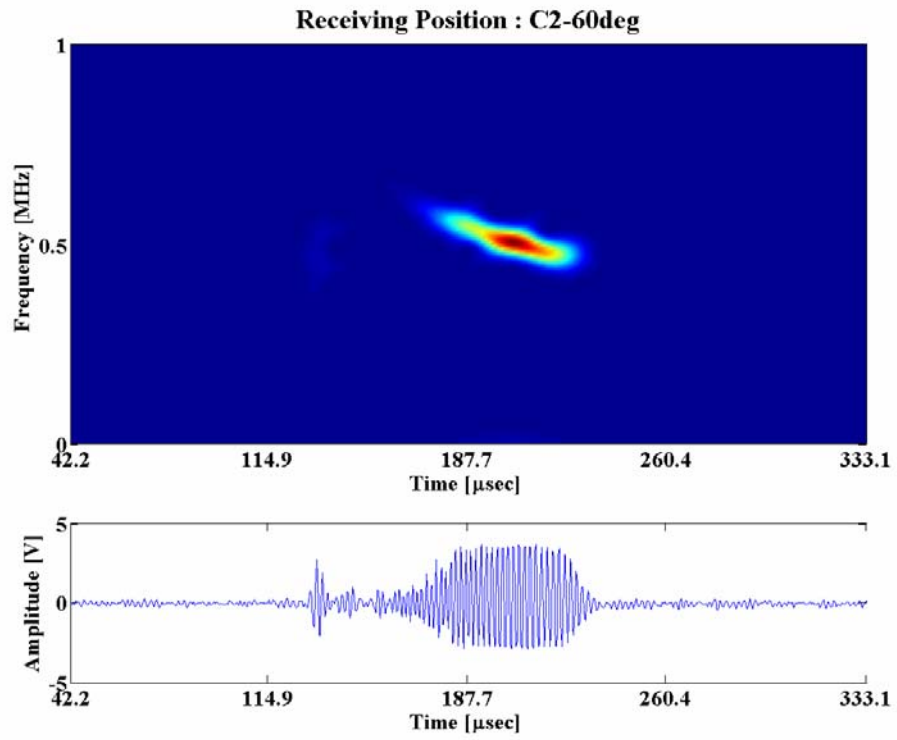
[표 3.1. 곡관부 모드 분석 측정]

곡 관 부		
입사/수신각(도)	30, 45, 60	조합에 의한 총 실험 횟수 : 3(각도)×9(측정지점)×2(경로)×3(시도) = 162회
측정지점 (point)	9	
경로별 위치	Outer / Central	

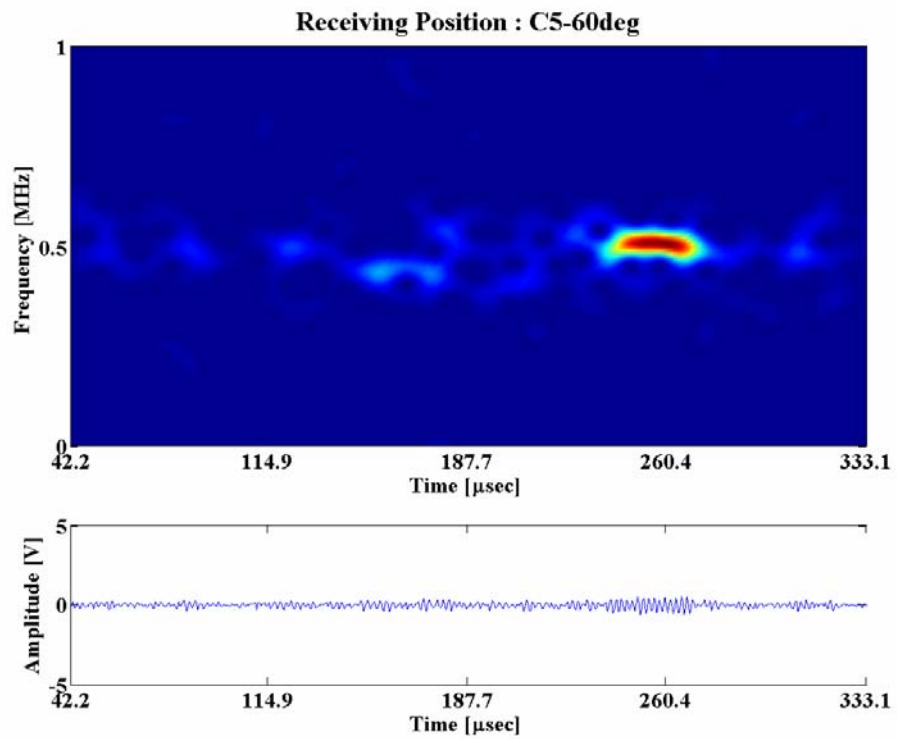
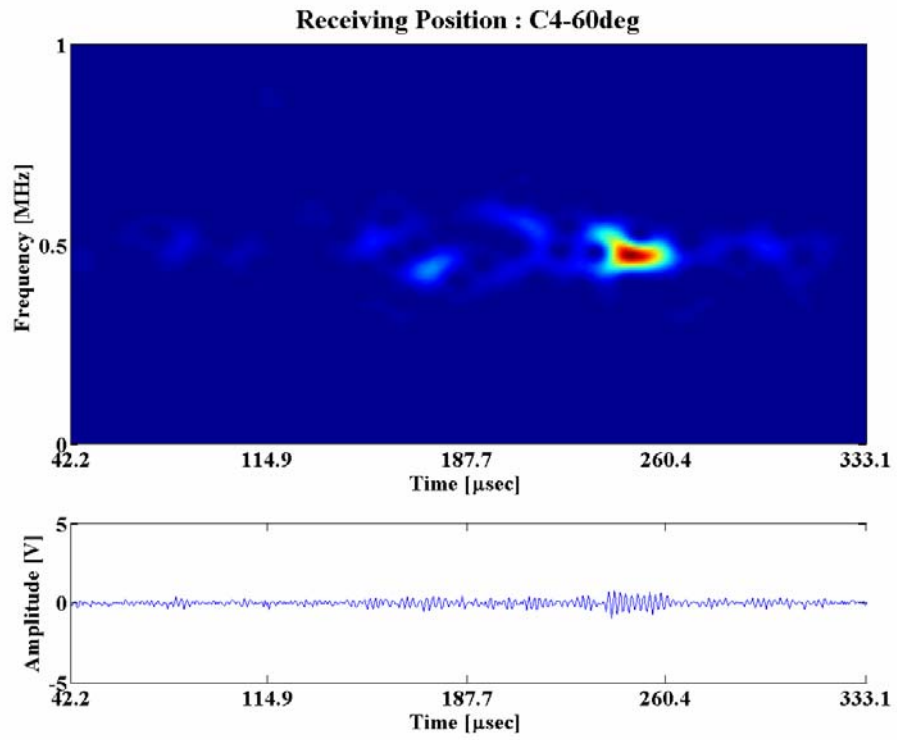
경로별 모드 실험 결과를 그림 3.4~3.13에서 보여 주고 있다. 각각의 RF 신호에 대해 STFT를 수행했으며 앞장에서 제시한 분산선도와 비교해 각각의 모드를 판별하였다. Central path에서는 상대적으로 빠른 모드인 L(0,2)가 비교적 명확하게 전파되고 있으며, outer path에서는 L(0,1) 모드가 명확하게 전파되고 있음을 확인할 수 있다.



[그림 3.4. Central path signal, C1]

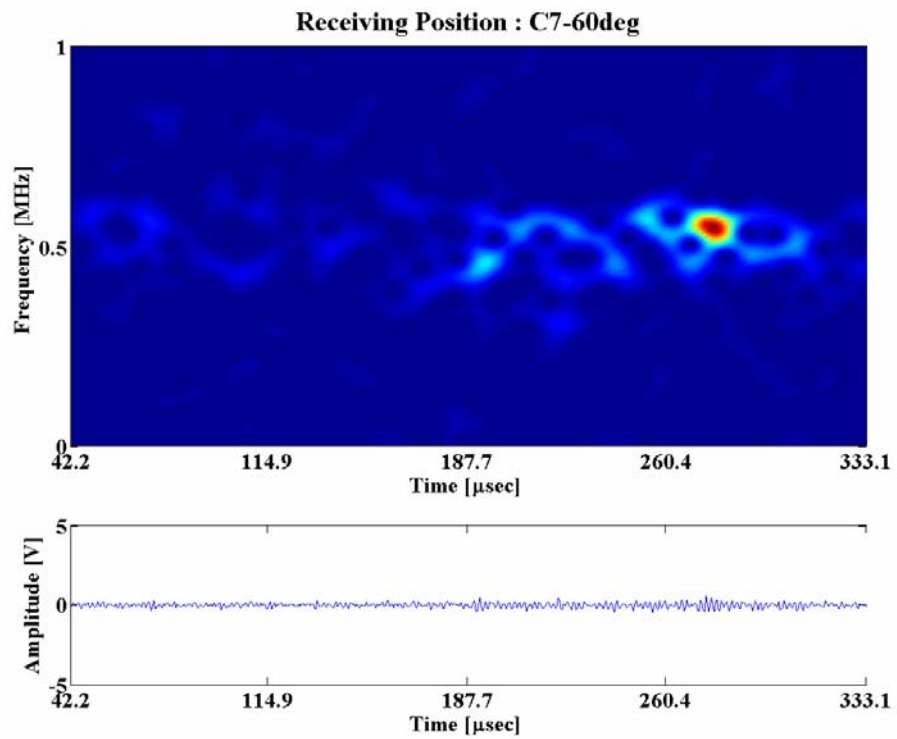
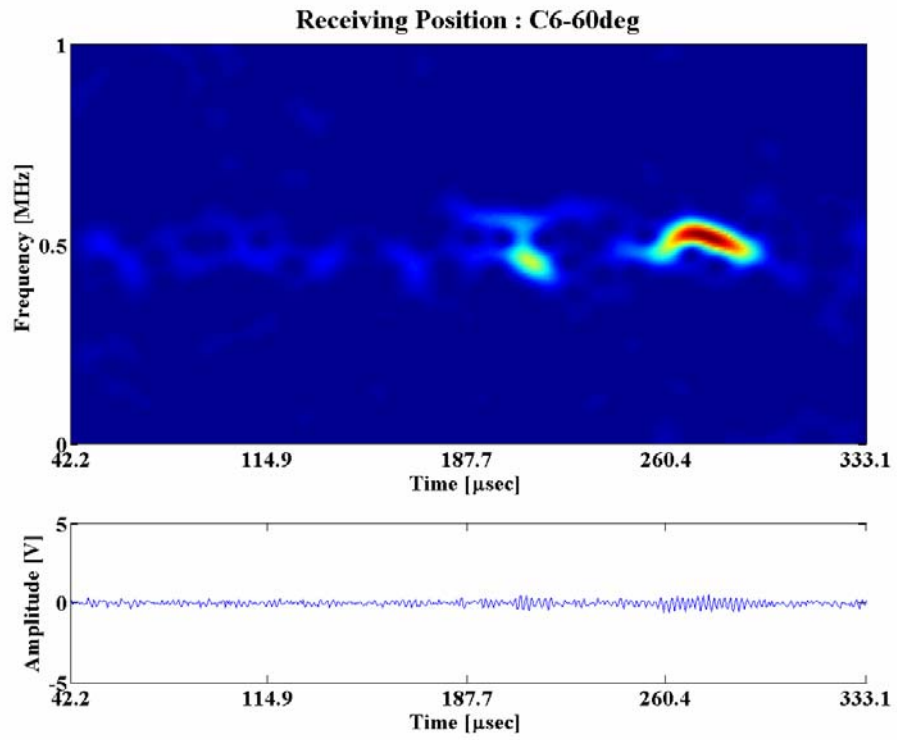


[그림 3.5. Central path signal, C2 and C3]

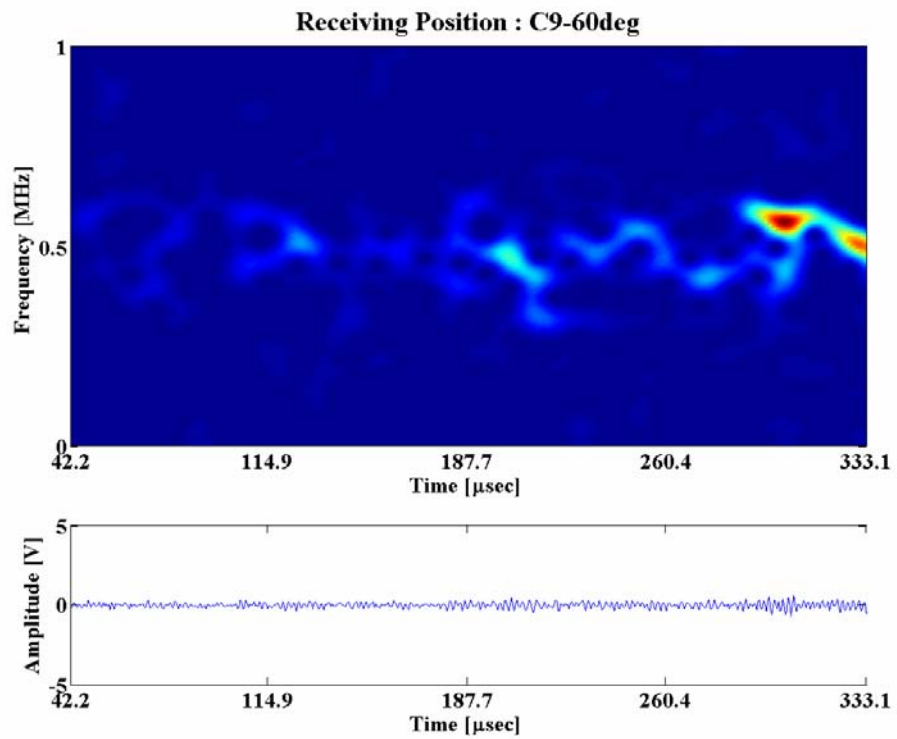
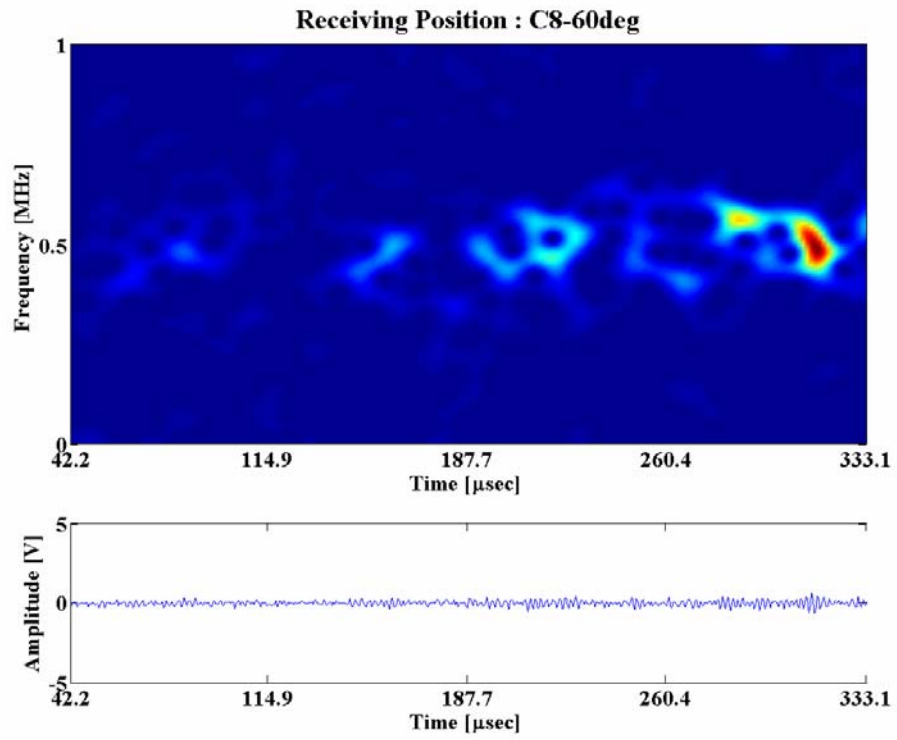


[그림 3.6. Central path signal, C4 and C5]

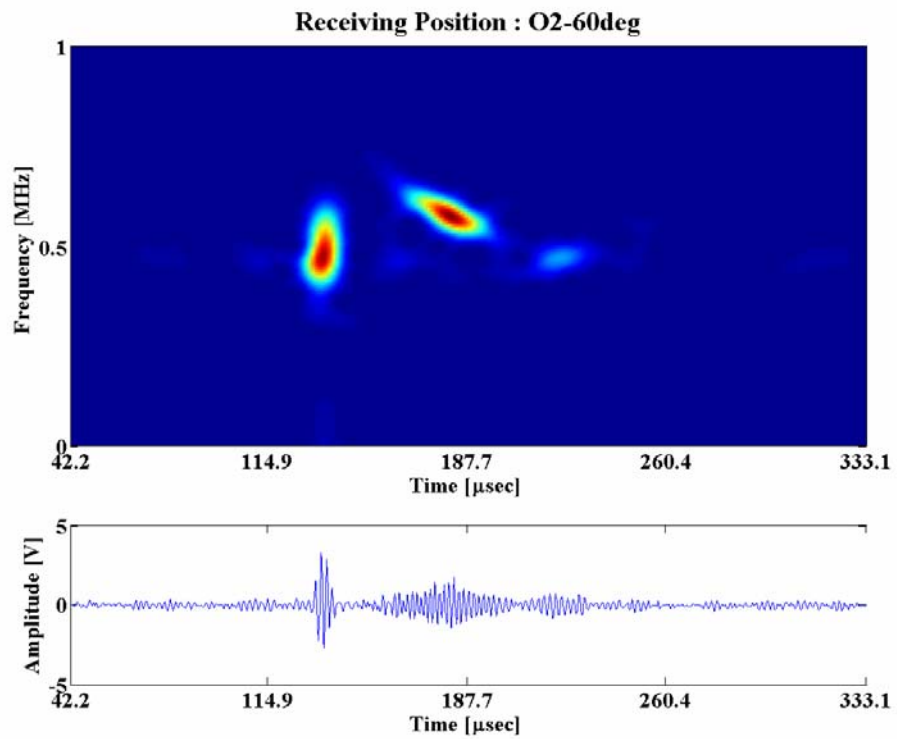
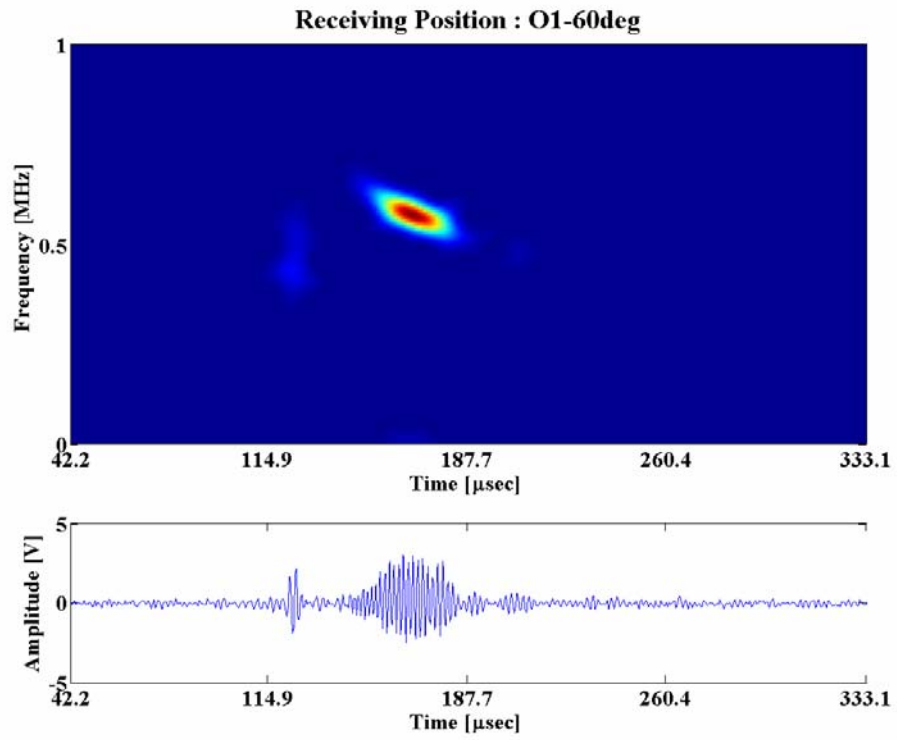




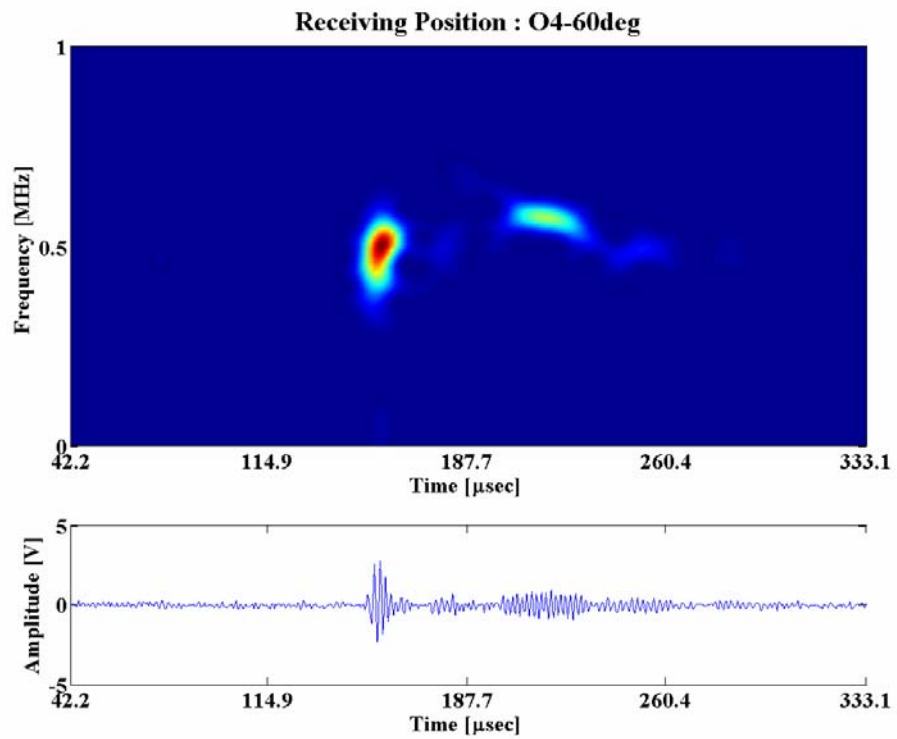
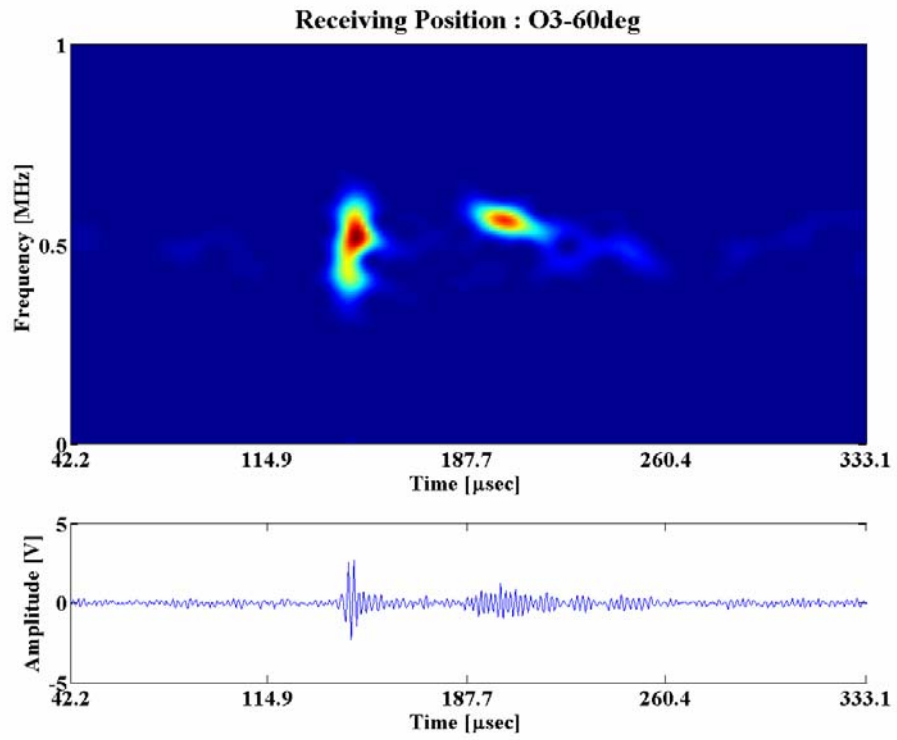
[그림 3.7. Central path signal, C6 and C7]



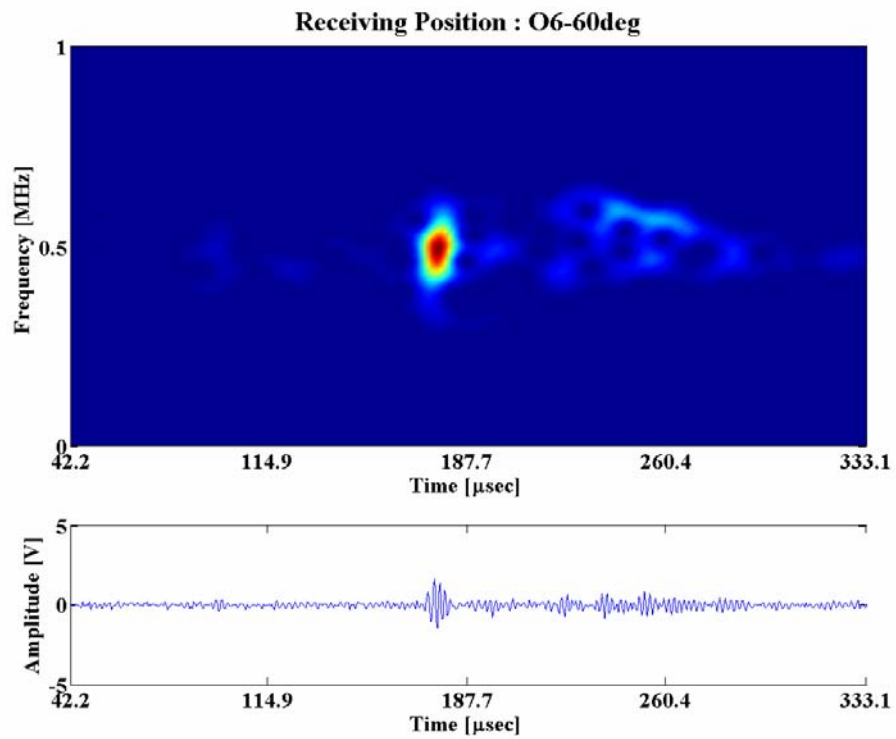
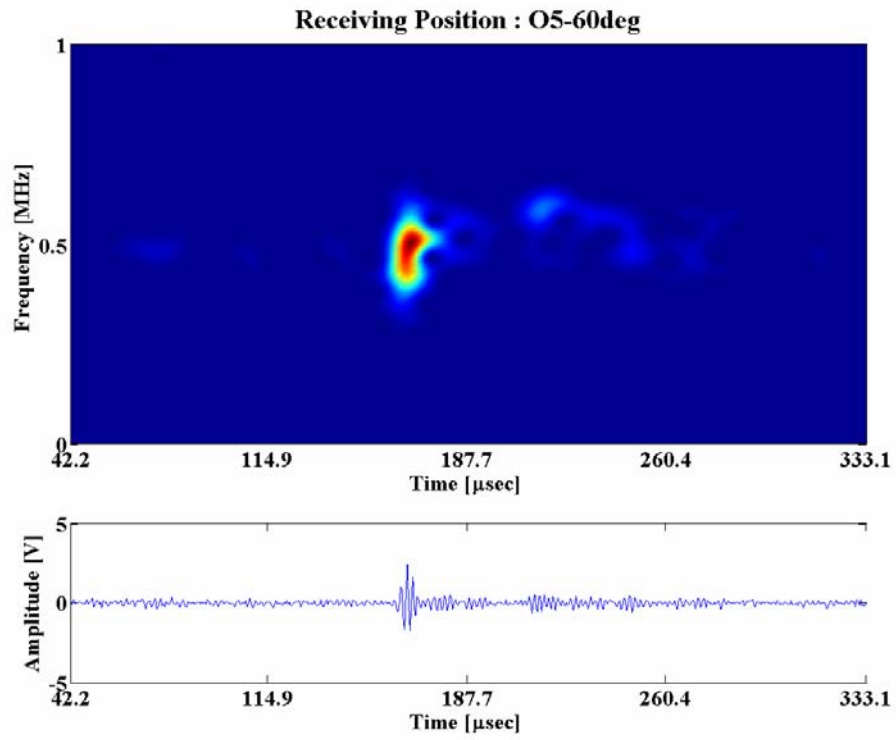
[그림 3.8. Central path signal, C8 and C9]



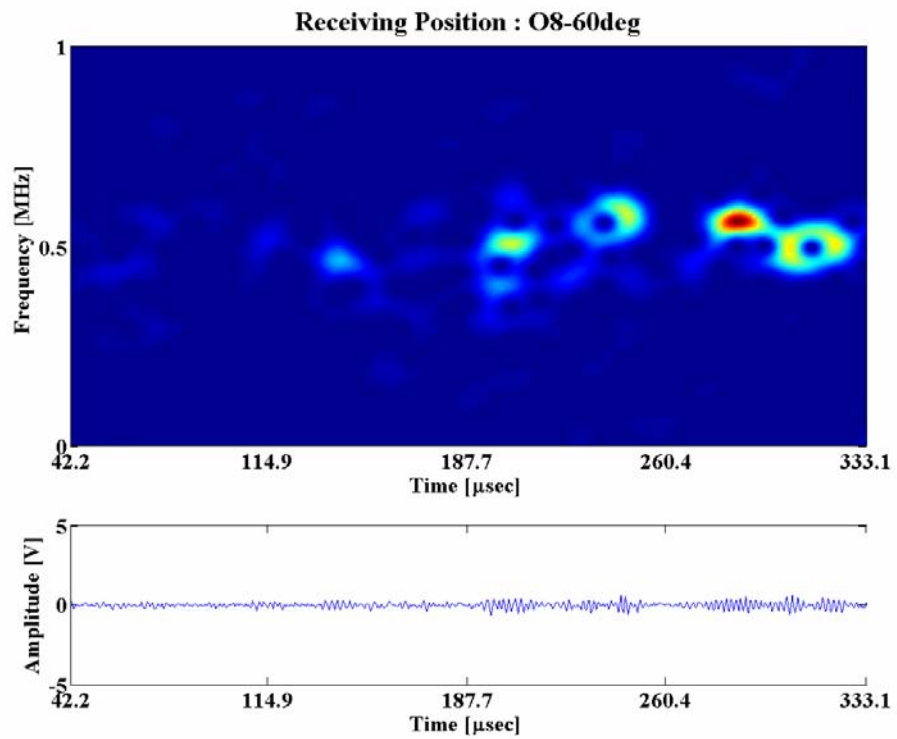
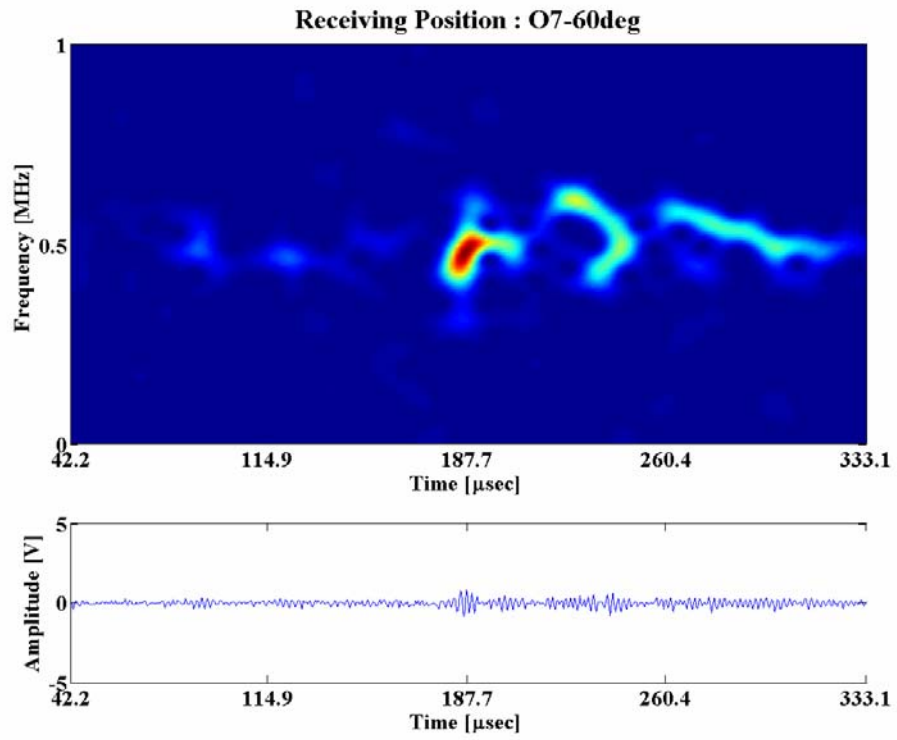
[그림 3.9. Central path signal, O1 and O2]



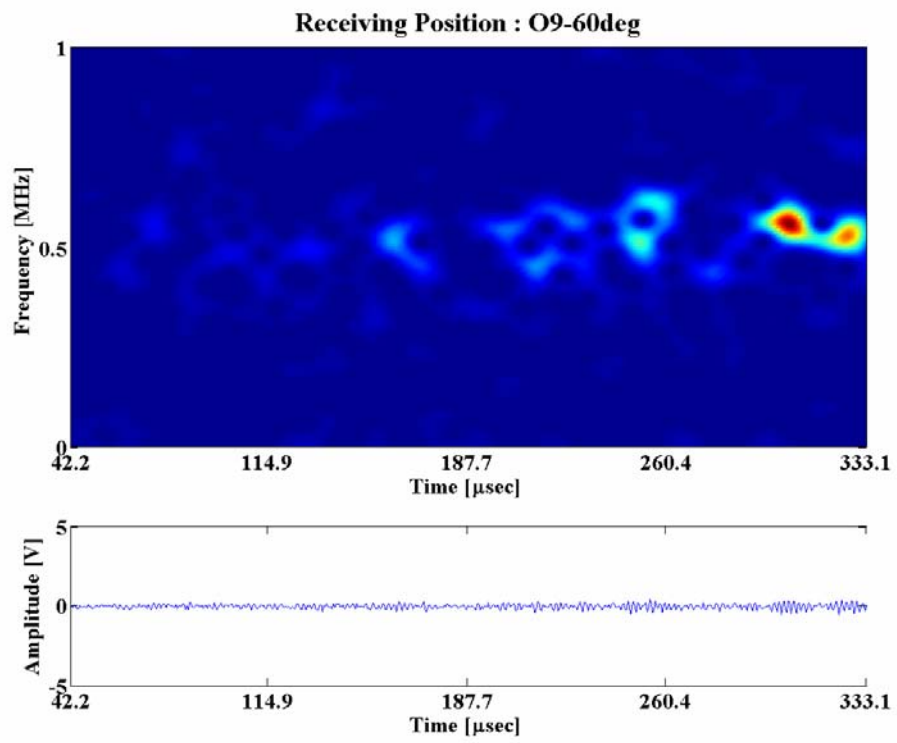
[그림 3.10. Central path signal, O3 and O4]



[그림 3.11. Central path signal, O5 and O6]



[그림 3.12. Central path signal, O7 and O8]

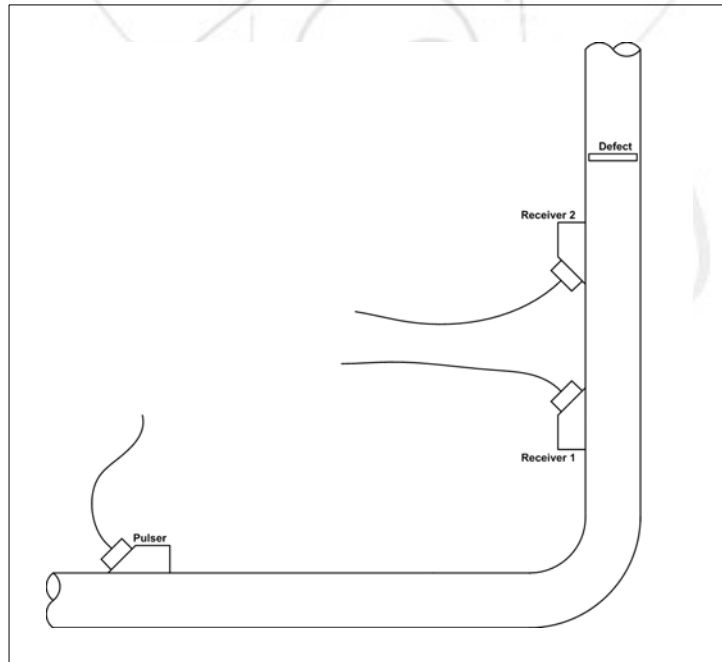


[그림 3.13. Central path signal, O9]

## 3.2 곡관 배관에서의 결함 탐지

### 3.2.1 실험 개요

직관부에서 발생된 유도초음파 신호는 곡관부를 지나면서 많은 외곡이 발생하게 된다. 따라서 결함측정에 있어 pulse/echo 방식은 신호의 판별이 매우 힘들다. 본 실험에서는 그림 3.14와 같이 결함에 대한 수신 탐촉자의 위치에 따라 두 가지 형태의 pitch/catch 방법을 적용하였다. pulser로부터 발생된 신호를 receiver 1로 수신하게 되면 곡관부를 지난 유도초음파 신호를 측정할 수 있다. 이런 방식으로 일정 거리 간격으로 측정을 하게 되면 신호의 개형을 파악할 수 있다. 또한 receiver 2에서 신호를 측정하게 되면 결함에서 반사된 신호를 측정할 수 있다. Receiver 2에 수신되는 신호에는 결함 쪽으로 진입하는 신호와 결함으로 반사되어 되돌아오는 신호가 동시에 나타날 것으로 예상되며, 두 신호 그룹의 분리는 시간 도메인에서 신호의 이동 성향을 파악함으로써 알 수 있다. 즉 receiver 2가 결함 쪽으로 이동함에 따라 진입신호 그룹은 시간 도메인에서 오른쪽으로 이동할 것이며 반사 신호 그룹은 왼쪽으로 이동할 것이다. 따라서 receiver 1과 2에서 측정된 신호를 비교/분석함으로써 결함신호를 추출할 수 있을 것이다.



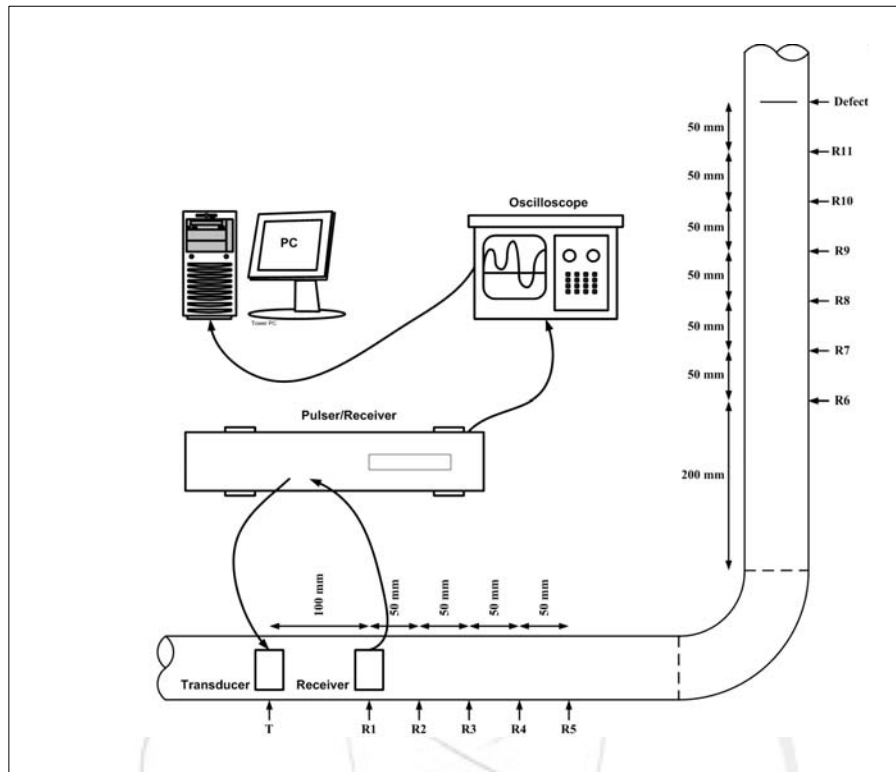
[그림 3.14. 곡관 배관의 결함측정 방식]

### 3.2.2 실험 방법

곡관부를 지나는 유도초음파 모드를 분석하기 위해서는 이에 앞서 직관부에서 발생된 모드들의 군속도를 측정하는 단계가 선행되어야만 한다. 이를 위해 그림 3.15와



같은 실험 구성을 하였다. Pulsar/receiver에서 송수신 되는 신호는 오실로스코프로 부터 모니터링 됨과 동시에 데이터 저장이 가능하며 저장된 데이터는 PC로 전송되어 분석이 이루어진다. T 지점에서의 초음파 입사로 인해 발생된 유도초음파는 R1~R5 지점에서 단계적으로 측정된다. 이러한 균속도 측정법은 웨지에서의 속도차이를 배제할 수 있으므로 비교적 정확한 측정을 할 수 있다. 표 3.2는 균속도 측정 방식을 보여주고 있다.



[그림 3.15 곡관 배관의 결함측정 구성도]

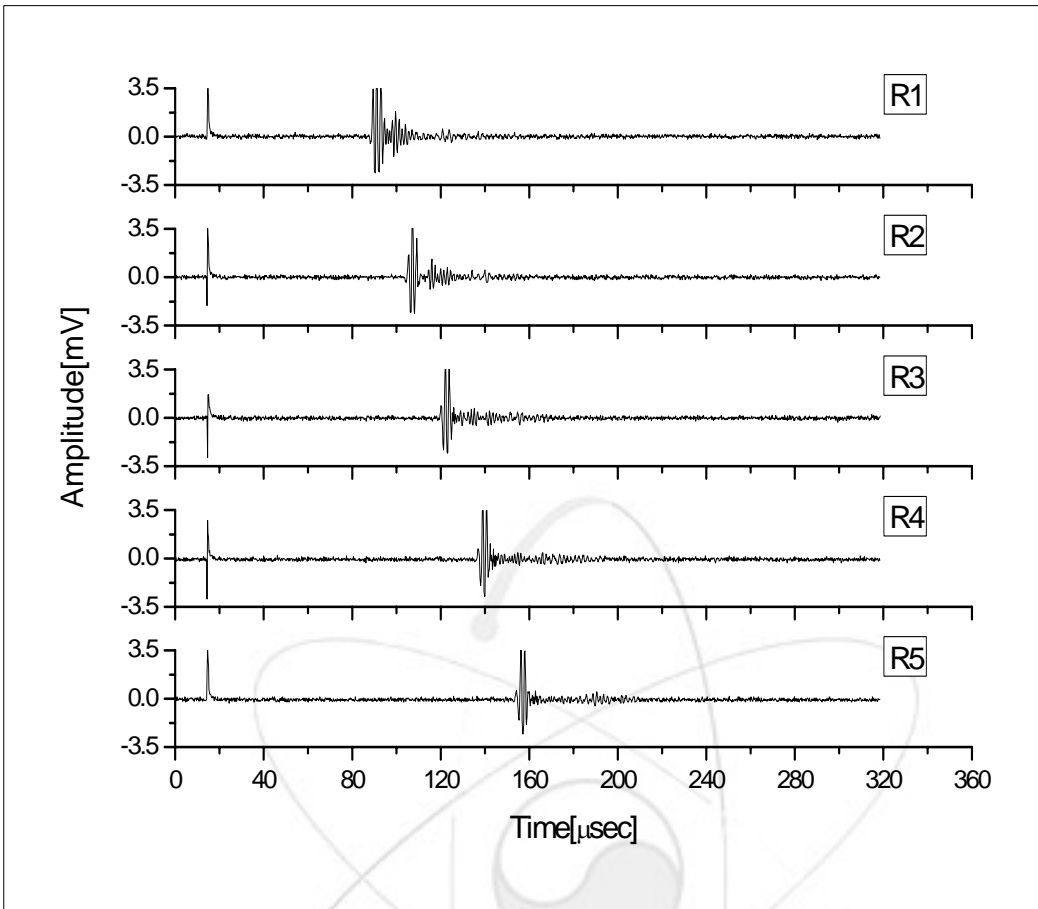
표 3.2. 측정 방식(균속도 측정)

직 관 부		
입사/수신각(도)	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70	조합에 의한 총 실험 횟수 : 9(각도)×5(거리)×3(시도) = 135회
측정거리(mm) : pulser로 부터의 거리	100, 150, 200, 250, 300	
곡 관 부		
입사/수신각(도)	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70	조합에 의한 총 실험 횟수 : 9(각도)×7(거리)×3(경로)×3(시도) = 567회
측정거리(mm) : 용접부로 부터의 거리	200, 250, 300, 350, 400, 450, 500	
경로별 위치	Outer / Central / Inner	

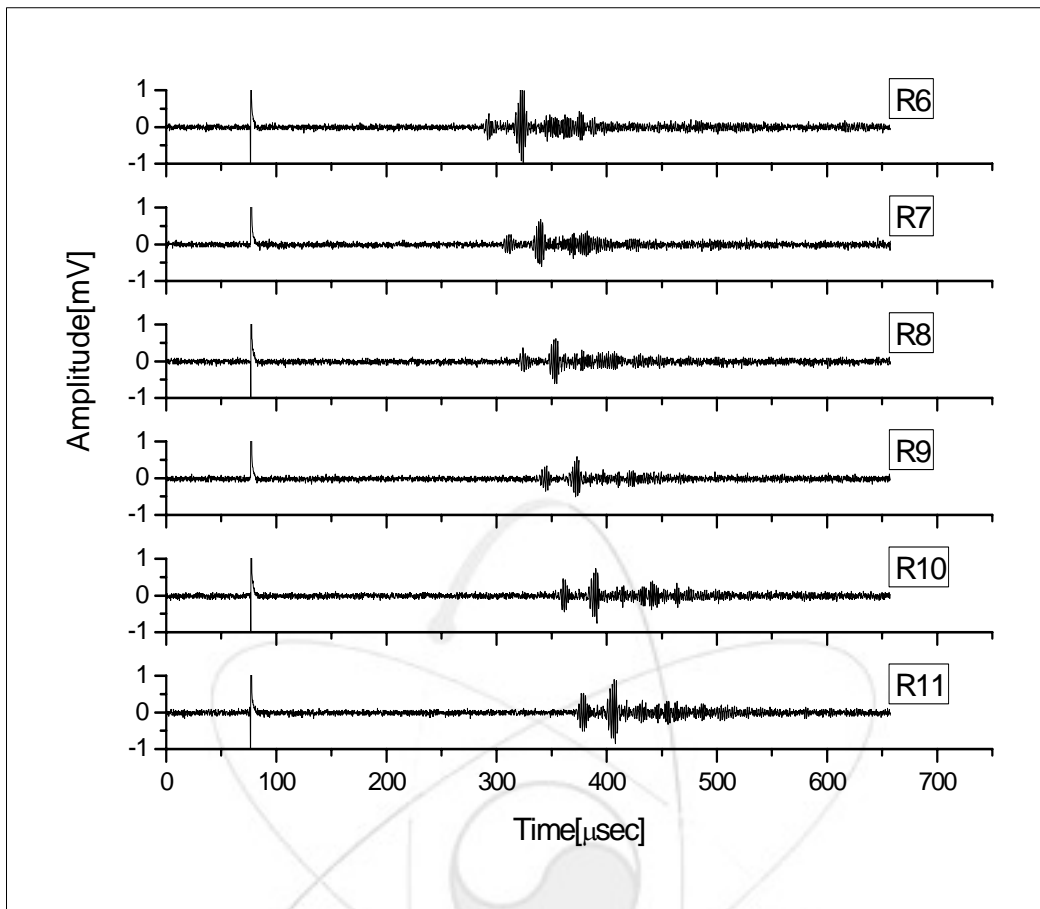
### 3.2.3 실험 결과

그림 3.16과 3.17은 직관부(수신지점 R1~R5)와 곡관부 (수신지점 R6~R11)의 거리별 time signal을 보여 주고 있다. 이를 토대로 계산된 군속도를 그림 3.18과 3.19에서 보여 준다. 실험 결과 두 개의 모드가 관측되었으며 상대적으로 속도가 빠른 모드는 3038 m/s의 속도를 갖는 L(0,2)모드이며, 뒤따르는 모드는 2327 m/s의 속도를 갖는 L(0,1) 모드로 판명되었다. 두 모드의 속도를 구하기 위해 Linear fitting을 수행하였다. 이렇게 발생된 두 모드가 곡관부를 지나면서 어떻게 특성이 바뀌는지를 살펴보기 위해 R6~R11 지점에서 군속도 측정이 이루어졌다. 직관부에 비해 RF 신호에 왜곡이 발생됨을 확인하였으며 이는 곡관부 자체의 경로에 따른 전파 특성에 기인될 것으로 예상된다.

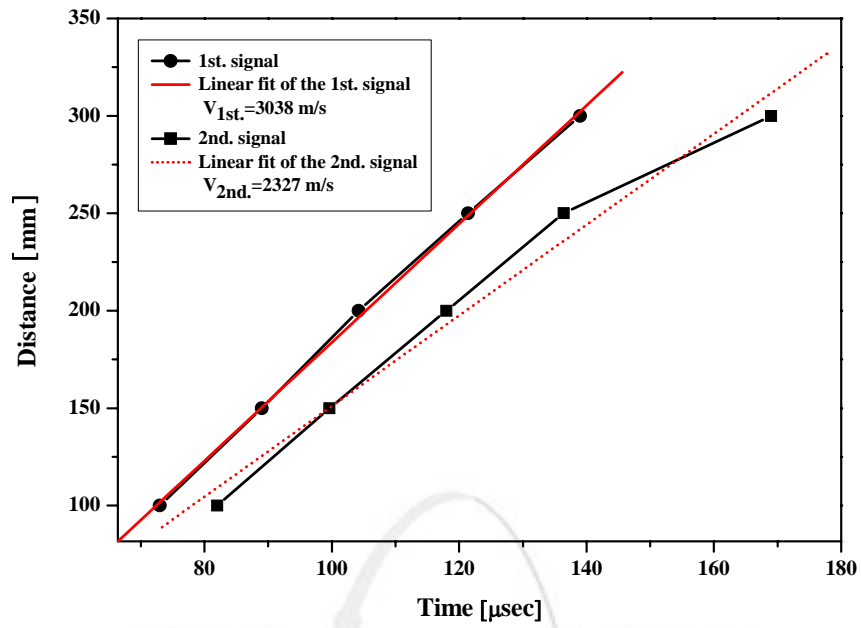
곡관부를 지난 유도초음파 모드의 군속도 측정결과를 그림 3.8에서 보여주고 있다. RF신호를 관찰한 결과 상대적으로 느린 모드인 L(0,1) 모드는 곡관부를 지나면서 감쇠가 심해 확인이 불가능했으나 L(0,2) 모드는 곡관부를 지난 후에도 전파가 원활하게 이루어져 그 측정이 가능하였다. 여기서 주목할 사실은 같은 L(0,2) 모드일지라도 곡관부의 전파 경로에 따라 분리되어 측정이 된다는 것이다. 즉 동일한 L(0,2) 모드가 가까운 경로와 먼 경로를 따라 전파됨에 따라 두 신호로 분리된다는 것이다.



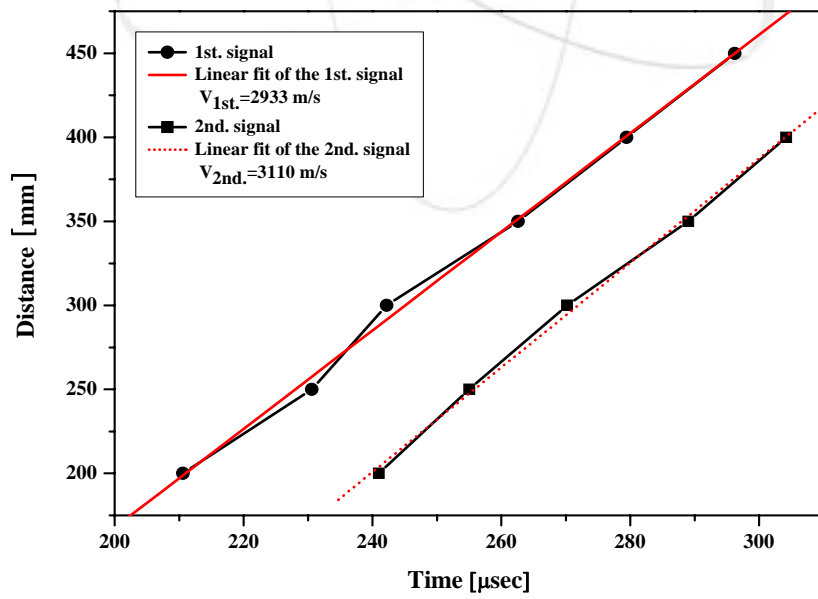
[그림 3.16. 직관부 거리별 time signal]



[그림 3.17. 곡관부 거리별 time signal]



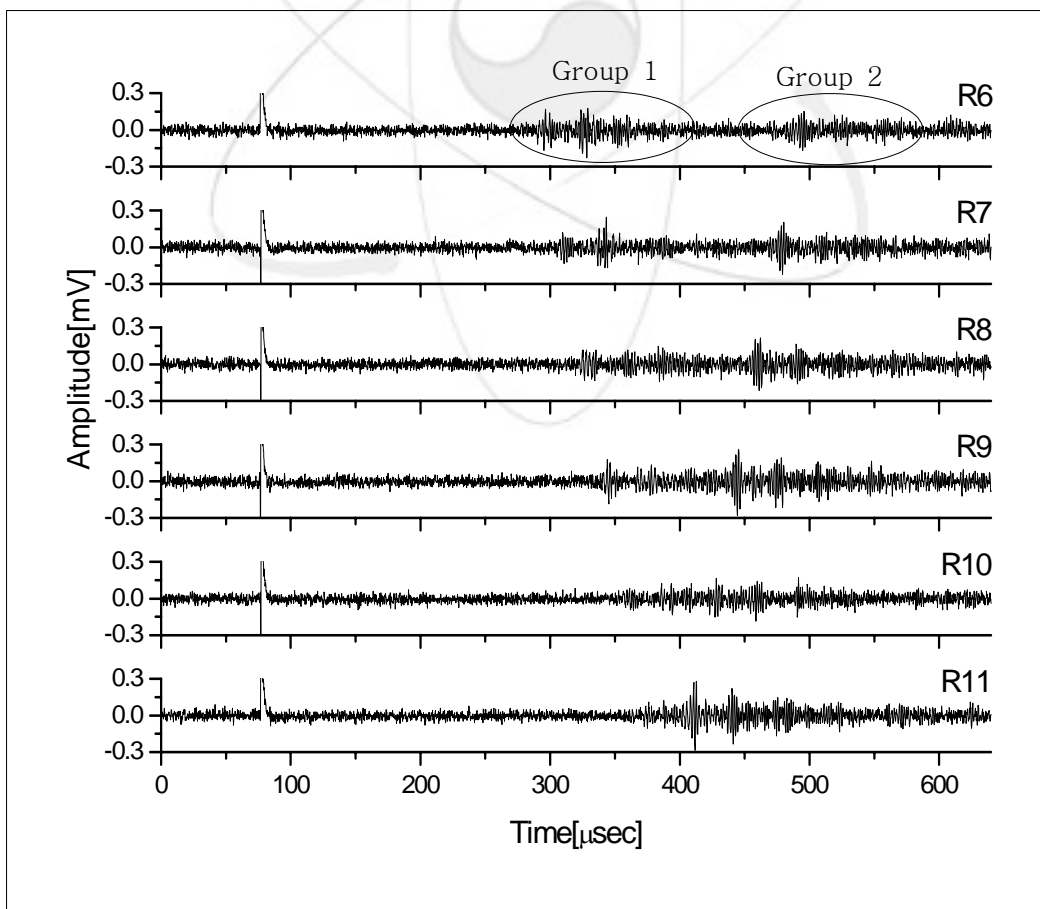
[그림 3.18 직관부 균속도 측정]



[그림 3.19 곡관부 균속도 측정]

앞 절에서 기술된 바와 같이 곡관부 이전에 발생된 유도초음파는 곡관부를 지나 결함에서 되돌아오며 이러한 신호는 다시 곡관부를 지나 송신 탐촉자 쪽으로 전파된다. 이러한 경우 곡관부를 2번 지나게 되므로 그 신호들이 아주 미약할뿐더러 분석에 많은 어려움이 있다. 따라서 그림 3.14의 receiver2의 위치에서 결함신호를 측정하였다. 그 결과를 그림 3.20에서 보여주고 있으며, 표 3.3은 측정방식을 보여주고 있다.

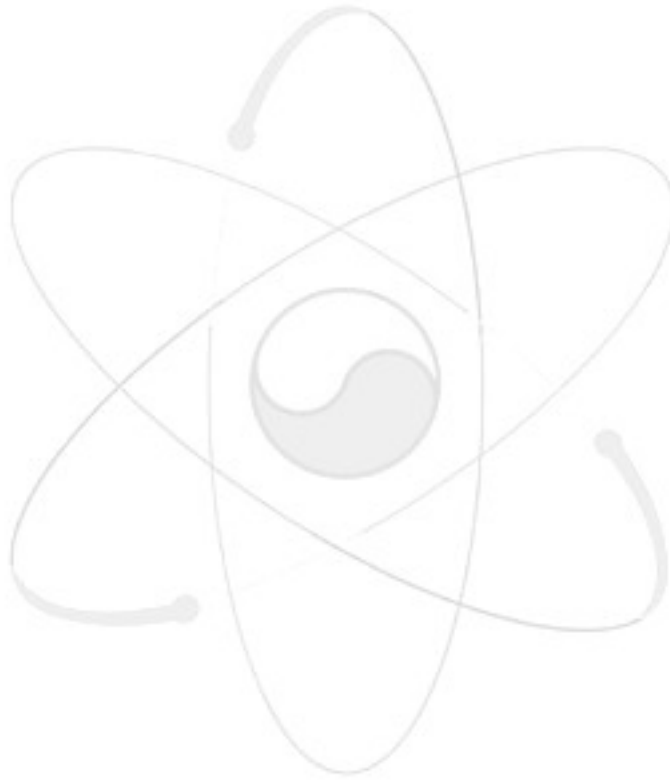
100 $\mu$ sec 근처의 trigger 신호와 더불어 두 개 그룹의 신호가 보인다. 먼저 나타나는 group 1은 수신 탐촉자의 위치가 결함에 다가갈수록 오른쪽으로 이동하고 있으며 group 2는 왼쪽으로 이동하고 있다. 따라서 group 1은 곡관부로부터 전파되어 결함 쪽으로 진입하는 신호이며 group 2는 수신 탐촉자 지점을 지나 결함에서 반사되어 나오는 신호로 판명된다. 신호가 group으로 나타나는 이유로는 곡관부의 경로 차이에 의한 것으로 예상할 수 있다.



[그림 3.20 곡관 결함 측정]

표 3.3. 측정 방식(곡관부 결함 측정)

곡 관 부		
입사/수신각(도)	30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70	조합에 의한 총 실험 횟수 :9(각도)×7(거리)×3(경로)×3(시도) = 567회
측정거리(mm) :용접부로 부터의 거리	200, 250, 300, 350, 400, 450, 500	
경로별 위치	Outer / Central / Inner	



## 4. LPIS(Long-range Piping Inspection System)

### 4.1 제작 배경

실제 적용 차원의 유도초음파 연구를 위해 정형화된 통합시스템인 장거리 배관검사 시스템(LPIS)를 자체 설계하고 제작하였다. 적용범위가 더욱 광범위한 본 시스템은 국내 연구진에 의해 자체 개발한 다채널 펄서/리시버가 장착되어 기존의 단채널 펄서/리시버로는 구현이 불가능했던 time reversal tech.의 적용이 가능하게 되었다. 각각의 펄서는 소프트웨어에 의해 발진시간을 조절할 수 있기 때문에 multi-pulsing이 가능하며 동시에 리시버로의 전환이 가능하므로 multi-receiving도 가능하다.

### 4.2 장치의 구성

#### 4.2.1 LPIS

그림 4.1과 같이 LPIS는 다음과 같은 여러 요소로 구성되어 있다.

(1) System rack

: 일체형 검사 장비를 구현하기 위한 통합 시스템을 제작하였다.

(2) 모니터

: 각각의 펄서에 대한 시간지연 상태와 신호의 파형의 모니터링 한다. 펄서/리시버의 제어 상황과 송신/수신 신호의 실시간 감시가 가능하다.

(3) Oscilloscope

: 수집된 신호를 분석하고 제어 PC로 데이터를 송신하는 역할을 한다.

(4) 키보드

: 제어 PC와 Oscilloscope를 조작함.

(5) 8ch P/R

: 8 채널 펄서/리시버로써 각각의 펄서/리시버가 단독으로 구동이 가능하므로 multi-pulsing과 multi-receiving이 가능하다.

(6) Multiplexer

: 8개의 탐촉자와 8ch P/R과의 연결을 제어함으로써 각각의 채널에 대해 선택적으로 데이터 수집을 할 있도록 하는 장치이다.

(7) 5800 PR

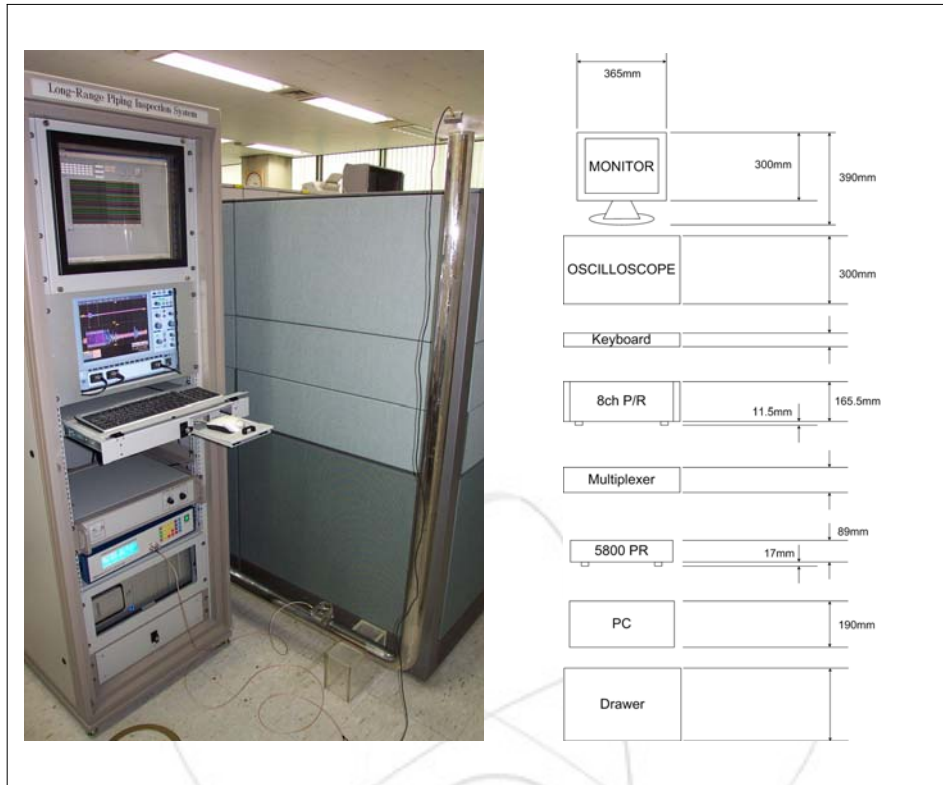
: 단채널 펄서/리시버로서 8ch P/R의 보조 기능을 수행하게 되며, 8ch P/R이 all pulsing으로 동작할 때 receiver 역할을 담당하게 된다.

(8) Drawer : 탐촉자 등의 기타 장비 보관

(9) 제어 PC : 8ch P/R의 제어 및 데이터 분석용 장치

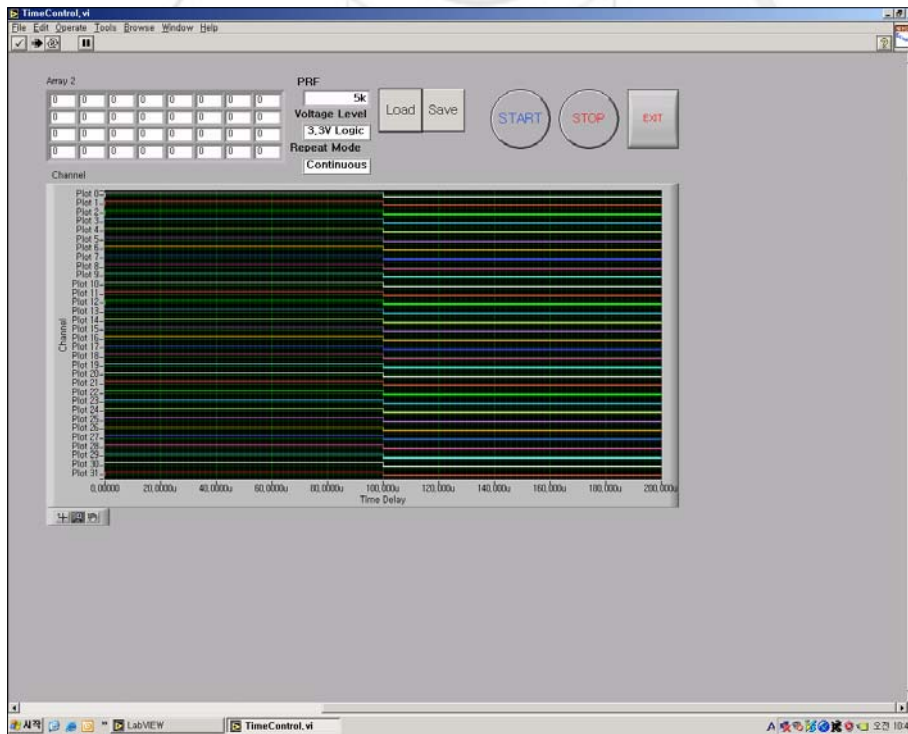
(10) 기타 : 무선랜을 이용하여 원격으로 시스템을 제어할 수 있게 설계함.





[그림 4.1. LPIS(Long-Range Piping Inspection System) 및 구성도]

그림 4.2는 8ch pulse/receiver용 제어 프로그램을 보여준다. 8개 센서의 pulsing time을 각각 설정할 수 있으며, PRF 및 Voltage level, repeat mode등을 설정할 수 있다.



[그림 4.2. Control program for 8ch pulser/receiver]

#### 4.2.2 검사용 웨지 제작

기존의 가변웨지는 입사/수신각의 조절이 정확하지 않으며, 여러 개의 탐촉자를 동시에 장착하는 웨지의 경우에는 탐상 매질과의 접촉에 문제가 많아 실제 실험에 있어 명확한 데이터를 수집하기 어렵다. 이러한 기존 웨지를 보완/수정하여 미세 가변각 웨지, 여러 개의 탐촉자를 동시에 장착할 수 있는 멀티웨지, 다수의 고정각 웨지 등을 설계/제작하였다.

##### (1) 미세 가변각 웨지

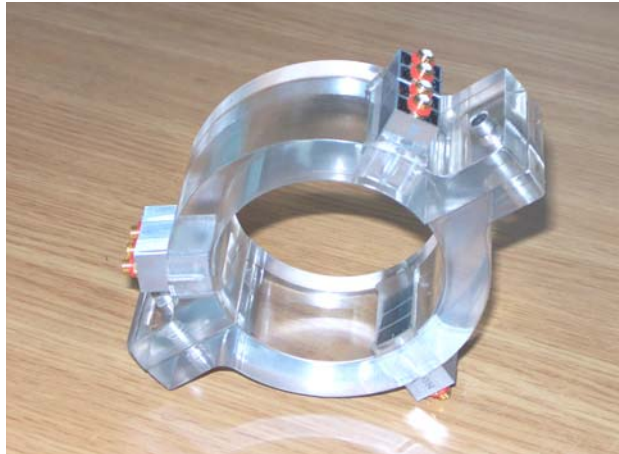
기존의 가변각 웨지는 입사각과 수신각의 조절이 비교적 정확하지 못하고 가변각 조절부의 접합이 잘 이루어지지 않은 단점을 가지고 있다. 이에 각도 조절용 판을 장착하고 조임 볼트에 스프링을 삽입함으로써 상기 문제점을 보완한 한층 개선된 가변각 웨지를 설계/제작하였다.



[그림 4.2 미세 가변각 웨지]

##### (2) 멀티 웨지

기존에 사용했던 멀티 웨지는 각각의 탐촉자에 웨지를 독립적으로 부착을 하고 탐촉자의 고정 장치 또한 세 부분으로 구성되었기 때문에 배관 장착에 있어 매우 복잡한 과정이 요구된다. 따라서 웨지 자체에 곡률을 주어 상용 탐촉자를 직접 장착하는 방식을 사용하고 웨지의 배관 장착을 용이하게 개발한 진보된 멀티 웨지를 설계/제작하였다.



[그림 4.3 멀티 웨지 - 12 transducers (4×3 array)]

(3) 고정각 웨지

두 개의 웨지로 이루어진 가변각 웨지의 에너지 손실을 줄이기 위해 입사각이 고정 (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70도)된 고정각 웨지를 쌍으로 제작하였으며, 배관 곡관부의 미세 측정을 위한 소형 탐촉자용 웨지를 제작함.



[그림 4.4 고정각 웨지 -(30, 35, 40, 45, 50, 55, 60,65, 70도)×2]

## 5. 요약 및 결론

원전 배관의 건정성 유지를 위한 온라인 감시기술 개발에 있어 곡관 배관의 결함 탐지력에 대한 연구는 매우 중요한 부분이라 할 수 있다. 이에 유도초음파를 이용한 스테인리스 스틸 곡관 배관의 결함 탐지를 위한 실험적 연구가 진행되었다.

본 실험을 위해 SUS304재질로 된 3개의 원형 직관 배관을 2개의 엘보우와 용접하여 이중 곡관 배관을 제작하였다. 직관의 길이는 1.5m로 동일하며 외경과 두께는 각각 60.3 mm, 5.5 mm이다. 곡관 배관의 결함 탐지를 위한 최적 모드를 선정하기 위해서는 직관부에서 발생된 유도초음파 모드가 곡관부를 지나면서 어떠한 특성을 보이는지를 파악하는 것이 선행되어야만 한다. 따라서 송신용 탐촉자를 고정시킨 후 곡관부의 곡면을 따라 일정 간격으로 수신하는 신호를 측정하는 다점 측정방식을 통해 곡관부의 경로별 유도초음파 모드를 실험적으로 분석하였다. 본 실험에서는 곡률반경이 상대적으로 작아 측정이 불가능한 inner path 영역을 제외한 central path와 outer path 영역에 대해 30mm 간격으로 측정을 하였다. 측정된 데이터에 대해 각각 STFT를 수행한 결과, central path에서는 상대적으로 빠른 모드인 L(0,2)가 비교적 명확하게 전파되고 있으며, outer path에서는 L(0,1) 모드가 명확하게 전파되고 있음을 확인할 수 있었다. 곡관 배관의 결함 탐지를 위해 직관부와 곡관부의 균속도 측정이 성행되었다. 웨지에서의 시간 지연을 피하기 위해 5개 측정 지점에 대해 pitch/catch 방식의 실험을 수행하고 linear fitting을 통한 기울기로 균속도가 측정되었다. 직관부에서는 두 개의 모드가 관측되었으며 상대적으로 속도가 빠른 모드는 3038 m/s의 속도를 갖는 L(0,2)모드이며, 뒤따르는 모드는 2327 m/s의 속도를 갖는 L(0,1) 모드로 판명되었다. 이렇게 발생된 두 모드가 곡관부를 지나면서 어떻게 특성이 바뀌는지를 살펴보기 위해 총 6개 측정 지점에 대해 신호를 측정하였으며 그 결과, 상대적으로 느린 모드인 L(0,1) 모드는 곡관부를 지나면서 감쇠가 심해 확인이 불가능했으나 L(0,2) 모드는 곡관부를 지난 후에도 전파가 원활하게 이루어져 그 측정이 가능하였다. 여기서 주목할 사실은 같은 L(0,2) 모드일지라도 곡관부의 전파 경로에 따라 분리되어 측정이 된다는 것이다. 즉 동일한 L(0,2) 모드가 가까운 경로와 먼 경로를 따라 전파됨에 따라 두 신호로 분리된다는 것이다. L(0,2) 모드를 이용한 곡관 시편의 결함이 측정되었다. 곡관부를 지나신 신호는 S/N 비가 좋지 않기 때문에 신호 분별을 위해 거리별 측정을 수행하였다. 이러한 방법을 사용할 경우 일정 거리의 변화에 따른 시간 정보를 알 수 있으므로 모드의 전파특성을 비교적 쉽게 파악할 있다. 측정 결과 두 개의 그룹 신호가 측정되었다. 수신용 탐촉자가 결함에 다가갈수록 오른쪽으로 이동하는 그룹은 곡관부로부터 전파되어 결함 쪽으로 진입하는 신호이며, 왼쪽으로 이동하는 그룹은 수신 탐촉자 지점을 지나 결함에서 반사되어 나오는 신호로 판명된다. 또한 신호가 group으로 나타나는 이유로는 곡관부의 경로 차이에 의한 것으로 예상할 수 있다.

실제 적용 차원의 유도초음파 연구를 위해 정형화된 통합시스템인 장거리 배관검사

시스템(LPIS)를 자체 설계하고 제작하였다. 적용범위가 더욱 광범위한 본 시스템은 국내 연구진에 의해 자체 개발한 다채널 펄서/리시버가 장착되어 기존의 단일 채널 펄서/리시버로는 구현이 불가능했던 시간 역전 기법 (time reversal technique)의 적용이 가능하게 되었다. 각각의 펄서는 소프트웨어에 의해 발진시간을 조절할 수 있기 때문에 multi-pulsing이 가능하며 동시에 리시버로의 전환이 가능하므로 multi-receiving도 가능하다.

기존의 가변웨지는 입사/수신각의 조절이 정확하지 않으며, 여러 개의 탐촉자를 동시에 장착하는 웨지의 경우에는 탐상 매질과의 접촉에 문제가 많아 실제 실험에 있어 명확한 데이터를 수집하기 어렵다. 이러한 기존 웨지를 보완/수정하여 미세 가변 각 웨지, 여러 개의 탐촉자를 동시에 장착할 수 있는 멀티웨지, 다수의 고정각 웨지 등을 설계/제작하였다.

유도초음파를 이용한 곡관 배관의 결함 탐지를 위해 실험적 연구를 수행한 결과 비교적 명확한 결함 신호를 측정할 수 있었다. 이는 유도초음파를 이용한 장거리 결함 탐상에 있어 곡관 배관에서 적용 가능하다는 것을 시사한다. 따라서 향후 펄서의 성능 개선이 완료되면 보다 정확한 장거리 배관의 결함 탐상이 가능할 것이다.

서 지 정 보 양 식

서 지 정 보 양 식							
<b>수행기관보고서번호</b>		위탁기관보고서번호		표준보고서번호		INIS 주제코드	
KAERI/TR-3481/2007							
제목 / 부제		곡선배관에서의 유도초음파 모드 확인 및 결함탐지 실험					
연구책임자 및 부서명 (AR,TR 등의 경우 주저자)		엄홍섭 (원전기기상태감시진단랩)					
연구자 및 부서명		임사회 (고속로개발그룹), 박진호(원전기기상태감시진단랩)					
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구원		발행년	2007.11	
페이지	37 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>유도초음파는 고정된 센서로부터 장거리 탐상이 가능하다는 장점을 가지고 있는 반면 기존의 체적 초음파와는 달리 무한대의 파동모드가 존재하며 특히 속도가 주파수 및 두께에 의존하는 분산특성을 가지고 있다. 따라서 대상체에 발생하는 유도초음파 모드를 정확하게 판별을 해야만 반사신호의 특성을 파악할 수 있다.</p> <p>본 보고서에서는 (1) 유도초음파 기술에 대해 개괄적인 내용 (2) 곡관 배관의 결함 탐상을 위한 선행 실험과정을 비롯한 거리별 결함 신호 측정 결과 (3) 원전 배관의 결함 탐지를 위한 통합시스템인 LPIS (Long-range Piping Inspection System)와 실험에 사용된 각종 탐상 웨지의 제작 과정에 대해 기술하였다.</p>					
주제명키워드 (10단어내외)		유도초음파, 배관, 원거리검사, 모드, 검사장비					

BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET							
Performing Org. Report No.		Sponsoring Org. Report No.		Standard Report No.		INIS Subject Code	
KAERI/TR-3481/2007							
Title / Subtitle		Experiments for Mode Identification of Ultrasonic Guided Waves and Fault Detection in a Curved Pipe					
Project Manager and Department (or Main Author)		H.S.Eom (Advanced Condition Monitoring Lab.)					
Researcher and Department		S.H.Lim (Fast Breed Reactor Development Group), J.H.Park (Advanced Condition Monitoring Lab.)					
Publication Place	Daejon	Publisher	KAERI		Publication Date	2007.11	
Page	37 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>Ultrasonic guided waves can perform long-range inspection from sensor without moving its position. However they have not only numerous modes but also dispersive characteristics that the velocity of modes depends on the frequency and thickness. Thus to understand reflected signals correctly, modes of the signals should be identified exactly.</p> <p>This report describes (1) general theory of ultrasonic guided waves, (2) preliminary experiments for the defect detection of a curved pipe and analysis results of reflected signals according to the distance from defects, and (3) LPIS (Long-range Piping Inspection System) which is unitary system for the defect detection in a pipe, and wedges used in experiments.</p>					
Subject Keywords (About 10 words)		ultrasonic guided waves, pipe inspection, online monitoring, array transducer					