

2006년 8월  
박사학위논문

레이저 유도 초음파를 이용한 비접촉  
NDT 기법과 초음파 신호 영상화에  
의한 금속 소재 용접 결함 평가

조선대학교대학원

광응용공학과

송 경 석

레이저 유도 초음파를 이용한 비접촉  
NDT 기법과 초음파 신호 영상화에  
의한 금속 소재 용접 결함 평가

Evaluation of Metal Material Welding Flaw  
by Non-contact NDT Method using Laser  
Guide Ultrasonic Wave and Ultrasonic  
Signal Visualization

2006년 8월 25일

조선대학교대학원

광응용공학과

송 경 석

레이저 유도 초음파를 이용한 비접촉  
NDT 기법과 초음파 신호 영상화에  
의한 금속 소재 용접 결함 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함.

2006년 4월 일

조선대학교대학원

광응용공학과

송 경 석



# 목 차

LIST OF FIGURES .....	IV
LIST OF TABLE .....	VII
NOMENCLATURE .....	VIII
ABSTRACT .....	X
제 1 장 서 론 .....	1
제 1 절 연구배경 및 필요성 .....	1
제 2 절 연구목적 및 내용 .....	6
제 2 장 레이저 초음파의 메커니즘 및 Bulk Wave 검출 .....	8
제 1 절 레이저를 이용한 초음파의 발생 원리 .....	8
제 2 절 Confocal Fabry-Perot 간섭계를 이용한 초음파 수신 .....	15
제 3 절 시스템 구성 및 실험 방법 .....	25
1. 실험 시편 .....	25
2. 시스템 구성 .....	26
3. 실험 방법 .....	29
제 4 절 실험 결과 및 고찰 .....	31
1. Bulk Wave 검출 .....	31
2. 결함 신호의 검출 .....	35
3. 결함 크기 및 위치 추정 .....	37

제 5 절 요약 .....	46
제 3 장 레이저에 의한 Lamb파의 발생 메커니즘 .....	47
제 1 절 Rayleigh-Lamb 주파수관계식과 분산선도 .....	48
제 2 절 파장 매칭법을 이용한 Lamb파 발생 .....	56
제 3 절 레이저 유도 Lamb파의 모드 확인 .....	60
1. Lamb파 계측 시스템 구성 .....	60
2. Lamb파 모드 확인 .....	62
제 4 절 레이저 초음파 수신각의 결정 .....	65
제 5 절 요약 .....	67
제 4 장 Lamb파를 이용한 판재의 용접부 결함 검출 .....	68
제 1 절 결함 탐상 시스템 구성 및 실험 방법 .....	69
1. 판재 용접부 결함 검출을 위한 실험장치 구성 .....	69
2. 실험 방법 .....	71
제 2 절 시험편 제작 .....	73
제 3 절 실험 결과 및 고찰 .....	76
제 4 절 요약 .....	80
제 5 장 결함 신호의 영상화 .....	81
제 1 절 SAT를 이용한 시험편의 결함 분석 .....	82

1. 디지털 화상처리를 위한 초음파 탐상의 원리 .....	82
2. SAT를 이용한 판재 용접부의 결함 검사 이미지 .....	84
제 2 절 레이저 유도 초음파 신호의 영상화 .....	92
제 3 절 SAT 영상과 유도 초음파 영상의 비교 .....	99
제 4 절 요약 .....	104
제 6 장 결론 .....	105
Reference .....	107

# LIST OF FIGURES

Fig. 1 Comparison of Uniform Irradiation with Localized Irradiation .....	11
Fig. 2 Schematic Diagram to Show Ablation of Surface Material and Net Reactive Force on Sample .....	12
Fig. 3 Ultrasonic Wave Propagation of Thermoelastic and Ablation Regime by Pulsed Laser Source .....	12
Fig. 4 The Confocal Fabry-Perot Interferometer .....	17
Fig. 5 Schematics Diagram of Confocal Fabry-Perot Interferometer Made in this Research .....	21
Fig. 6 Confocal Fabry-Perot Interferometer .....	21
Fig. 7 Variation of Light Intensities in Confocal F-P Interferometer .....	23
Fig. 8 Variation of Transmitted Light intensity in Interferometer due to Light Frequency Shift .....	24
Fig.9 Dimensions and Shape of Specimens for Bulk Wave Detection .....	25
Fig. 10 Schematic Diagram of Experimental Equipment .....	27
Fig. 11 Non-Contact Bulk Wave Detection Part of Laser Ultrasonic .....	27
Fig. 12 Collection Head of Scattered Lights .....	28
Fig. 13 Non-Contact Ultrasonic Inspection Sequence and Method on a Specimen .....	30
Fig. 14 Multiple Reflection of Laser Generated Longitudinal Pulses within 60mm SM45C block .....	32
Fig. 15 Experimental Setup in the Ablation Regime .....	34
Fig. 16 Ultrasonic Signals Scattered from a Volumetric Void-like Flaw .....	36
Fig. 17 Ultrasonic Signals Scattered from a Planar Crack-like Flaw .....	36
Fig. 18 Propagating process of ultrasound in a specimen .....	37



Fig. 19 Ultrasonic Signal by Position of when Diameter 2mm Flaw .....	38
Fig. 20 Comparison of 3L Ultrasonic Signal by Flaw Diameter .....	40
Fig. 21 Ultrasonic Wave Signal by Each Flaw Depth in Position 8 .....	42
Fig. 22 Amplitude Value by Flaw Size and Regression Curve .....	45
Fig. 23 Geometry of the Free Plate Problem .....	49
Fig. 24 Dispersion Curves for an Steel Plate .....	55
Fig. 25 Wavelength Matching Method .....	58
Fig. 26 Lamb Waves of Which Dispersion Curves Meet with the Wavelength Line are Generated .....	59
Fig. 27 Experimental Setup for Detecting Lamb Wave .....	60
Fig. 28 Ling Array Slit of Wavelength 2 mm for Lamb Wave Generated ..	61
Fig. 29 Phase Velocity by Mode on Dispersion Curves .....	62
Fig. 30 Real Time Signal of the Lamb Wave .....	63
Fig. 31 Frequency ingredient by Lamb Wave mode and Bandpass Filter Signal in Time Domain .....	64
Fig. 32 Radiation of Leaky Lamb Wave and Detection by the Air-Coupled Transducer .....	66
Fig. 33 Experimental Setup for Flaw Detection by Lamb Wave and Air Coupled Transducer .....	69
Fig. 34 Lamb Wave Generation and Detecting Part of Experimental Setup ·	69
Fig. 35 Flaw Detecting Method by Lamb Wave .....	71
Fig. 36 Dimensions of Specimens .....	75
Fig. 37 Real Time Signal and Spectrum of Lamb Wave .....	76
Fig. 38 Horizontal Direction Distribution of Ultrasonic Signal at the Flaw Center .....	78

Fig. 39 Ultrasonic Signal Intensity and Linear Regression Curve by Flaw Size .....	79
Fig. 40 Principle of Flaw Detection by Ultrasonic Testing .....	82
Fig. 41 Flaw Signal by Flaw Position of when Applied Time Gate .....	83
Fig. 42 SAT Image and Time Gate for Internal Flaw Detecting .....	85
Fig. 43 SAT Image of Laser Welding .....	91
Fig. 44 Ultrasonic Progress Path and Amplitude Change by Flaw Existence and Nonexistence .....	92
Fig. 45 Ultrasonic and Envelope Signal for Visualization .....	93
Fig. 46 Ultrasonic Signal for Visualization and Artificial Flaw Image .....	95
Fig. 47 Ultrasonic Signal for Visualization and Natural Flaw Image .....	98
Fig. 48 Flaw comparison of SAT Image and Image which use Lamb Wave .....	103

# LIST OF TABLE

Table 1 Non-Contact Lamb Wave Generation Methods .....	3
Table 2 Compariosn of Lamb Wave as Different Sourece Types Generated by Laser .....	5
Table 3 Comparison of Plano-Plane Type and Confocal Type about Fabry-Perot Interferometer .....	16
Table 4 Characteristics of laser .....	26
Table 5 Sound velocity in SM45C .....	32
Table 6 Propagation of Longitudinal Wave and Difference Time .....	42
Table 7 Comparison Longitudinal Wave Velocity in SM45C and Detecting Wave Velocity .....	43
Table 8 Characteristic of Flaw wave .....	43
Table 9 characteristics of Laser and Slit .....	70
Table 10 Existence and Nonexistence and Dind of Flaw by Welding Condition .....	75

# NOMENCLATURE

$B$	: Bulk modulus of elasticity
$c$	: Velocity of light in vacuo = $2.9979 \times 10^8$ ms <sup>-1</sup> .
$d$	: Diameter of laser beam or illuminated spot
$E$	: Electrical capacity
$f$	: Ultrasonic frequency
$f$	: Activation function
F	: Finesse of Fabry-Perot interferometer
$FSR$	: Free spectral range
$I$	: Light intensity or electromagnetic power density per unit area
$L$	: Difference in optical path length in an interferometer
$N$	: Data sample number
$n$	: Refractive index of cavity inside interferometer
$R$	: Optical reflectivity
$R_0$	: Radius of curvature of spherical mirrors in confocal
$t$	: Transmission factor
$T$	: Temperature of specimen
$\nu$	: Frequency of laser beam
$\Delta\nu$	: Full Width at Half Maximum
$u$	: Scalar displacement of a point
$\alpha$	: Coefficient of linear thermal expansion
$\delta$	: Phase difference
$\varepsilon$	: Elastic strain

$\lambda$	: Optical wavelength
$\mu$	: Refractive index
$\rho$	: Density of specimen
$\sigma$	: Elastic stress
$c_p$	: Phase velocity
$c_L$	: Longitudinal wave velocity
$c_T$	: Shear wave velocity
$d$	: Thickness of plate
$f$	: Frequency of laser
$h$	: Half thickness of plate
$k$	: Wave number
$u$	: Distance of surface
$x_d$	: Size of Flaw

# ABSTRACT

## **A Study on the NDT of Plate Welding Part & Ultrasonic Signal visualization by Laser Guide Lamb Wave**

Song Kyung Seok

Adviser : Prof. Kim Jae-yeol, Ph.D.

Dept. of Optic Application Engineering

Graduate School of Chosun University

The longitudinal, shear and surface waves have been used to an Ultrasonic wave exploration method to identify internal defects but it has technical difficulties to detect defects in a limited space with having several millimeters board thickness. It is applicable to use Lamb wave, a kind of induction ultrasonic wave that has a relatively high inspection efficiency and defect detection sensitiveness compare to perpendicular or square explorations in terms of the internal defect detection in these kinds of thin board. The Lamb wave is a special type of induction ultrasonic wave to propagate to a board and it is effective to inspect such as board structure, cell structure, etc. Recently a laser is being used to generate Lamb wave but it not being widely utilized because of difficulties in receiving and selective generation in various modes Lamb wave generating and a low S/N ratio, wide range of generating frequency band when a laser is used.

This paper aims to study that the defect exploration method to specimen's thickness, using an characteristic of an ultrasonic wave generating in ablation area and thermoelasticity area, has been applied to using a way of receiving it by Air-Coupled Transducer and transmitting it by an ultrasonic wave and a way of noncontact receiving and transmitting ultrasonic wave using a laser.

The longitudinal, shear waves have been used in 60mm thickness specimen and Lamb wave in 3mm to run artificial defect detection test.

In this way, the usefulness of non-contact laser ultrasonic wave has been verified.

To confirm the possibility of implementation on natural defect existing at real welding part, thickness in 3mm SM45C and STS304 artificial defect specimen has been made and defect detection test using Lamb wave has been executed. Detected signal by signal treatment has been expressed in visual not RF signal. By doing so the convenience of defect detection has been attempted and the effectiveness of defect signal visualization using Lamb wave has been confirmed compare with defect image through SAT.

The understanding of generating theory of a laser ultrasonic wave and the usefulness of laser ultrasonic wave exploring Bulk Wave with long distance non-contact has been verified by using an interferometer. At this time ultrasonic wave propagation path in ablation area and thermo elasticity area has been identified and the internal circular defect and line defect have been detected by making artificial defect.

But the laser ultrasonic wave incidence by dot type using existing laser has a high S/N ratio and it has a difficulty on a thin board to make a distinguish between longitudinal, shear and surface waves in exact defect detection. And a laser has been used for non-contact receiving of ultrasonic wave signal. It is

confirmed that it is difficult to form nondestructive inspection automation and system since this method also getting a high impact according to the surface conditions of a specimen.

To overcome the limitation of generating method of the Lamb wave by laser because of this fact, the wave length has been consolidated using configuration slit and possible to generate the Lamb wave and it has been applied to nondestructive inspection.

Lamb wave has a feature in generating several modes and Lamb wave's feature to propagate flat board using Rayleigh-Lamb frequency related equation, analyzed theoretically and the predict has been made to generate the mode and frequency of the Lamb wave. The conformity of the ultrasonic wave mode for generating has been identified through the testing.

An artificial defect specimen has been made to include natural defect by using process parameter and Nd:YAG laser and the artificial defects with 1, 2 and 3mm in diameter on a welding part have been made.

Manufactured defect specimen used as a reference in a way of defect measuring test using Lamb wave to identify the location and type of defects using SAT.

The result of measuring artificial and natural defects has been able to be possible to be visualized through signal treatment. In this way, the defect detection has been easy identifying the defect by visualization not signal. Through this study, the Lamb wave which is an induction ultrasonic wave using laser has been showing high defect detection capability at welding part on a board of forming multi-Layer due to the deteriorated material by welding heat. In this way, it shows it is possible to do automation of nondestructive inspection.



# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경 및 필요성

구조물 및 기계 부품의 제조업등 산업 전반에 걸쳐 접합법중 용접이 차지하는 비중은 대단히 크며 특히 완성품 조립 등의 제조업체에서 용접이 차지하는 비중은 크게 50% 이상으로 용접은 제조업에서 주요한 공정의 하나로 발전되어 왔다.

용접은 두 대상재의 금속적 이음법으로 모재와 용가재의 용융으로 생성되는 용접부는 공정중에 많은 변수로 인하여 결함의 발생율이 다른 접합법에 비해 높다. 특히 크랙과 같은 선형 결함은 현저한 응력 집중 현상을 일으켜 강도 저하와 피로 파괴의 직접적 원인이 된다. 또한 외부환경에 의한 피로, 부식, 정적 및 동적 부하 등의 복합적인 요인으로 인하여 손상을 입을 수 있는 환경에 노출되어 있다.

이러한 문제들로 인하여 용접부의 비파괴 검사의 중요성은 더욱 높아지고 있으며 용접 제품의 제조나 사용되어지고 있는 용접 제품들에 대한 안전성 및 향후 수명 연장을 위한 정량적인 비파괴 평가법이 요구되고 있다.

용접의 주요 대상은 수mm의 두께를 가지는 판재로써 가공의 용이성과 그에 따른 경제성 등으로 인해 항공기, 선박, 자동차, 배관, 발전소와 공장 등에서 판재가 많이 사용되고 있다. 이처럼 판재의 사용이 많아지면서 판재로 구성된 구조물의 안전진단에 대한 필요성이 증가하게 되었다. 특히, 항공기나 원전과 같은 사고발생시 인적, 경제적 손실과 환경오염 등의 사회적 문제를 발생시킬 수 있는 곳에서는 더 더욱 안전성의 필요성이 요구되고 있다.

구조물이나 기계의 안전성을 판단하기 위해서는 재료의 특성을 정확히 파악하고 내부의 결함 유무를 판단하는 것이 필요하다. 게다가 재료의 미시적 구조나 물질 고유의 특성을 평가하고 정밀 분석하는 기술도 필요하게 된다. 재료 내에 결함

이나 불균질한 물질이 들어있는 경우는 구조물의 성능과 수명을 현저하게 저하시킬 수 있기 때문에 그것들의 유무, 형태, 위치 파악이 매우 중요하다. 이에 대한 검사방법으로는 방사선투과시험법, 자분탐상법, 초음파탐상법, 액체침투탐상법등 여러가지가 있지만, 그 중 초음파를 이용한 비파괴평가방법은 PZT(Piezoelectric Transducer)를 재료에 부착시켜서 재료 내부에 송신 음파를 발생시키고 결합에 반사되어 돌아온 신호 또는 재료를 투과한 신호를 PZT로 검출하고 분석하여 결합의 유무와 위치 및 크기를 알아내는 방법이다. 이 방법은 PZT와 구동장비 만을 가지고 재료내부를 송수신 신호의 시간과 진폭정보에 대한 분석으로 결합과 내부 상태 정보를 얻을 수 있기 때문에 가장 많이 사용되는 방사선 법에 비해 간편할 뿐만 아니라 안전하고 가장 신뢰성 있는 평가방법으로 인정되어 폭넓게 이용되고 있으며, 또한 초음파를 이용한 비파괴 평가방법은 재료의 결합탐상뿐만 아니라 물성치 측정 등에도 많이 이용되고 있다.

초음파탐상법은 내부의 결합 탐상시 종파, 횡파, 표면파를 이용하여 왔으나 판재 ( $t=0.3\sim 6.0\text{ mm}$ )와 같은 두께가 수 mm의 협소한 공간에서의 탐상은 결합 검출시 기술적으로 어려움이 따른다.

이러한 얇은 두께의 판재에서의 내부 결합은 수직탐상이나 사각탐상에 비해 상대적으로 검사 효율성과 결합검출 민감도가 뛰어난 Lamb파라는 일종의 유도초음파를 이용하는 것이 가장 적합하다. Lamb파는 판재에서 전파하는 유도초음파의 특수한 형태로 판재구조물, 셀구조 등의 검사에 효과적이다.<sup>1)2)</sup>

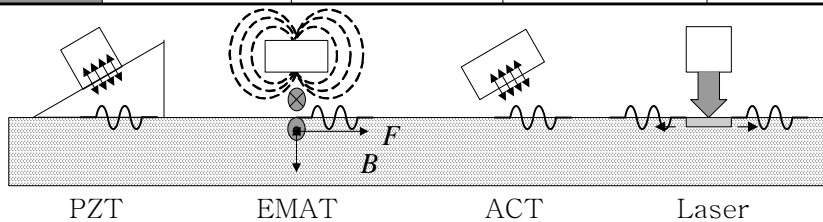
유도초음파의 대표적인 한 종류로 불려온 Lamb파는 2차원 탄성학의 평면 변형률(Plane Strain) 조건하에서 자유표면(Traction Free) 경계조건을 갖는 등방성 균질판재의 단면을 파동전파방향에 평행하게 정의하였을 때 이 단면 내에서 정의되는 유도초음파로서, 19세기말 H. Lamb<sup>3)</sup>경에 의해 이론적 기초가 완성되었다. 이후 다양한 판재에서의 유도초음파의 특성에 관한 이론적 연구와 수치계산에 의한 시뮬레이션이 시도되었으나 Lamb파의 응용은 최근 들어 활발히 이루어지고 있다.<sup>4)5)</sup>

그러나 기존의 접촉식 초음파 탐상법은 대상체에 초음파를 전파시키기 위해 접촉매질을 필요로 하기 때문에 자동화가 어려울 뿐만 아니라 작은 대상체, 복잡한 형상, 움직이는 대상체등과 같이 접촉식 탐촉자를 밀착시킬 수 없는 어려움, 고온 환경, 방사능이나 화학물질에 의한 유해 환경등에서도 적용하기 어려운 단점을 가지고 있다. 때문에 비접촉식 비파괴 평가법의 필요성이 대두 되었다.

이러한 필요성에 의해 전자초음파탐촉자(Electro Magnetic Acoustic Transducer : EMAT)<sup>6)</sup>, 에어커플드 트랜스듀서(Air-Coupled Transducer : ACT)<sup>7)</sup>, 레이저<sup>8,9,10)</sup> 등에 의한 비접촉식 Lamb파 발생기법이 연구되었다. Table 1 에서는 이러한 비접촉 Lamb파 발생기법과 기존의 접촉식 PZT 방식에 의한 Lamb파 발생기법을 비교 하였다.

Table 1 Non-Contact Lamb Wave Generation Methods

Lamb Wave Generator				
Type	PZT	EMAT	Air-Coupled Transducer	Laser (Line Array Slit)
Variables	Frequency Angle	Wavelength	Angle	Wavelength
Contactivity	Contact	Closely Non-Contact	Non-Contact	Non-Contact
Generated Wave Intensity	Excellint	Very Good	Bad	Good



이중 EMAT는 비접촉식이지만 리프트 오프(Lift Off) 효과로 인해 대상

체와의 거리가 아주 가까워야 하고, 적용재질이 강자성체라야 하며, ACT는 대상체와 대기의 매질의 음향임피던스 차이로 인해 발생효율이 낮고 발생가능 주파수 대역이 한정되어 있다. 반면 레이저에 의한 방식은 레이저 에너지에서 탄성과 에너지로의 낮은 변화효율을 극복할 수 있도록 하는 몇가지 기법들이 등장함으로써 가장 주목받는 비접촉식 Lamb파 발생기법으로 대두되고 있다. 이러한 레이저에 의한 Lamb파의 발생은 수백kHz에서 수십MHz에 이르는 넓은 주파수 대역에서 발생 가능하고 다양한 기법에 의해 발생모드의 선택이 가능하며 원격제어도 가능하다.

초기의 레이저 발생 초음파법에서는 레이저를 한 점에 집중시켜 초음파를 발생시켰는데, 이러한 방법에서는 초음파의 에너지가 특정방향으로 전파하지 못하고 흩어져 발생한 초음파의 강도가 매우 미약하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 조사 레이저의 에너지 밀도를 높이면 초음파의 강도는 강해지나 표면 손상을 주게 되므로 비파괴평가에 적합하지 않다. 따라서 적은 레이저 에너지 밀도로 초음파의 강도를 향상시키기 위한 다양한 방법들이 강구되었다. Tsukahara<sup>10)</sup>는 레이저에 의해 발생하는 초음파의 속도를 레이저의 조사속도와 일치시켜 발생초음파의 변위를 증가시키는 방법을 사용하였으며, Huang과 Krisnaswamy<sup>14)</sup>등은 레이저를 선 형태로 조사하여 이로부터 발생하는 초음파소스가 선형이 되도록 함으로써 발생 초음파의 지향성과 강도를 향상시켰다.

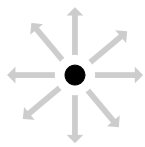
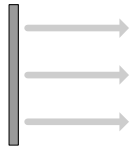
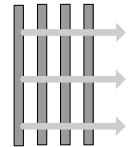


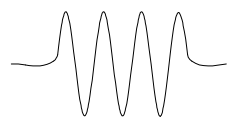
Lamb파는 다양한 모드와 주파수 성분이 동시에 발생하며, 주파수에 따라 전파속도가 다른 분산특성을 나타낸다. 이러한 특성들은 비파괴검사에 응용함에 있어 유도초음파의 검출과 분석을 어렵게 만든다. 따라서 특정 모드, 특정 파장의 유도초음파를 선택적으로 발생시킬 필요가 있다. 이를 위해 Yamanaka<sup>11)</sup>등은 레이저빔에 의해 만들어진 간섭무늬 패턴을 위상속도에 맞춰 스캐닝 하는 방법을, Cerniglia와 Jhang<sup>12)</sup>은 선형소스를 일정간격으로 배열함으로써 특정파장의 초음파를 선택적으로 발생시키는 방법을 각각 고안하였다. 이러한 방법들은 발생하는 초음파의 파장을 일정하게 함으로써 단일선형소스에 비해 발생하는 모드와 주파수대역을 제

한하는 효과를 가져왔다.

일정간격의 선형소스를 만드는 방법으로 특정 모양의 슬릿을 이용하는 방법이 최근 연구되어 지고 있는데 이는 특정 모양의 슬릿에 레이저를 투과하여 시험편에 슬릿 모양의 레이저를 조사 하는 방법이다. 시험편의 두께와 형상에 맞게 초음파 파장 조절이 쉽고 여러 형태로 쉽게 레이저 소스를 변경할 수 있는 장점을 가지고 있어 다양한 형태의 Lamb파를 발생시킬 수 있다<sup>13)</sup>.

Table 2에는 레이저 소스에 따른 발생 Lamb파의 형태에 따른 특징을 보여주고 있다.

Table 2 Comparosn of Lamb Wave as Different Sourece  
Types Generated by Laser

	Laser Source Type		
	Point	Line	Line-Array
Directivity	Bad	Good	Good
Frequency Bandwidth	Wide	Wide	Narrow
Wave Propagation			
Wave Form			

## 제 2 절 연구목적 및 내용

레이저를 이용한 Lamb파는 얇은 두께의 판재나 관에 존재하는 결함을 검출하는데 우수한 능력이 가지고 있음이 선행 연구를 통하여 검증 되었다. 그러나 지금까지의 연구는 결함 검출 능력을 검증하고자 원형 또는 선형의 인공결함에 대해서만 연구되어졌으나 자연결함은 결함의 크기나 형태 분포상태가 인공결함과는 상이하게 다르다.

본 논문에서는 접합방법으로 가장 많이 사용되어지는 용접중 빠른 용접속도, 깊은 용입 깊이, 적은 용융폭으로 열에 의한 변형이 적어 열영향부가 매우 좁다는 장점으로 최근 각광받고 있는 레이저 용접을 이용한 판재의 접합부에 대하여 Lamb파를 이용한 비접촉 비파괴 검사를 수행하고자 한다.

이를 통하여 용접열에 의한 재질의 변화로 멀티레이어(Multi-Layer)라고 볼 수 있는 용접부에 존재하는 자연결함에 대한 Lamb파의 결함 검출 능력을 검증하고자 하였고, 검출된 신호를 영상화 하여 비전문가도 쉽게 결함을 판별할 수 있도록 함이 본 연구의 목적이다.

이를 위해 다음과 같은 순서로 연구를 실시하였다.

1. 2장에서는 레이저를 이용한 초음파의 발생 원리에 대해 서술하고 레이저에 의해 발생된 벌크파(Bulk Wave)를 간섭계를 이용하여 원거리 비접촉 탐상하여 레이저 초음파의 시스템을 구성하고 유용성을 검증하였다.

2. 3장에서는 평판을 전파하는 Lamb파의 특징을 Rayleigh-Lamb 주파수 관계식을 이용하여 이론적으로 분석하여 발생시킬 수 있는 Lamb파의 모드와 주파수를 예측하는 방법에 대해 서술하고 실험을 통하여 이론적으로 발생시키고자 하는 초음파 모드와 일치하는지의 여부를 확인하였다.

3. 4장에서는 2장과 3장에서의 연구결과를 토대로 레이저 용접한 SM45C와 STS304 재질의 판재를 대상으로 하여 레이저 유도 초음파를 이용 인공 결함 검출 실험을 수행과, 검출된 신호를 분석하여 결함의 크기별 분석을 시도하였다. 또한 자연결함 검출 실험을 수행하여 자연결함에 대한 Lamb파의 유용성을 검증하도록 하였다.

4. 5장에서는 결함 검출 편의성을 도모하고자 결함 신호를 RF신호가 아닌 영상으로 표현할 수 있도록 GUI 환경의 프로그램을 구성하고, SAT를 통해 획득한 결함 이미지와 비교하여 Lamb파를 이용한 결함 신호 영상화의 유용성을 확인하고자 한다.

5. 마지막으로 6장에서는 레이저를 이용한 비접촉 초음파 탐상에 대한 연구결과를 통하여 얻어진 결과를 종합하였다.

## 제 2 장 레이저 초음파의 메커니즘 및 Bulk Wave 검출

### 제 1 절 레이저를 이용한 초음파의 발생 원리

레이저를 이용한 초음파(Laser Ultrasonics) 발생의 기본적인 원리는 고출력 펄스 레이저를 고체 표면에 조사시키면, 매우 얇은 흡수층에서, 에너지의 흡수 및 반사가 발생하는데, 흡수된 에너지에 의해 고체 표면의 온도가 매우 짧은 시간 동안 상승 및 하강하는 구배가 나타난다. 극히 짧은 시간동안에 이루어지는 온도 구배로 인해 열탄성효과에 의해 재료 내에서 순간적인 팽창이 발생하여, 고주파의 열탄성 응력, 변형률이 고체 시편 내부로 전달되는 것이다. 고체 표면에 레이저를 비추면 여러 가지 물리 현상이 나타난다.<sup>14)15)</sup> 입사광의 세기가 약할 때에는 시험체의 온도가 올라가고 이로 인하여 열파(Thermal Waves)<sup>16)</sup>와 탄성파(Elastic Waves)가 발생된다. 특히 반도체에서는 전류가 발생하기도 한다. 입사광의 세기가 강할 때에는 시험체 내부에서는 용융, 소성 변형 및 균열이 생기고, 표면에서는 용발(Ablation)이 일어나 플라즈마를 형성한다.<sup>17)18)19)20)21)</sup>

저 출력의 레이저 빔이 고체 표면에 조사되면 표면에서 레이저 빔의 흡수가 발생한다. 이와 같이 흡수된 빛(레이저 빔)은 전자기파이므로 고체 표면의 자유전자를 진동시켜 고체 표면의 온도를 국소적으로 상승시킨다. 이 때 표면 온도의 변화 양상은 레이저 빔의 시간적 펄스 폭(Time Duration)에 의존한다. 만약 레이저 펄스 폭이 충분히 길면 고체 표면의 열에너지는 고체 내부로 확산(Diffusion)되어 원래의 온도로 하강하거나 열파를 발생시킨다. 반대로 레이저 펄스폭이 매우 짧으면 표면 온도가 급격히 상승한 후 순간적으로 단열상태가 된다. 따라서 이 경우에는 국소적 가열 부분이 단열팽창을 통해 주변과의 열적 평형상태에 도달한다. 즉, 열에너지가 단열팽창을 통해 탄성에너지(초음파 에너지)의 형태로 시편 내부에 전파된다. Fig. 1(a)에서와 같이 낮은 레이저 출력영역에서의 현상을 살펴보면, 레이저 펄스가 반



무한공간의 표면을 고르게 입사할 경우 단지 온도만  $\delta T(z, t)$ 만큼 상승하고 이로 인해 발생하는 변형(strain)  $\varepsilon_{zz}$ 는

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} = \alpha \delta T(z, t) \quad (1)$$

와 같다. 여기서  $u$ 는 입자변위의  $z$ 성분이고  $\alpha$ 는 선형 열팽창 계수이다. 1차원 모델에서는  $x$ 나  $y$ 방향 성분은 없으므로,  $\varepsilon_{xi} = \varepsilon_{yj} = 0$ . 따라서 이 탄성파는 단지 표면에 수직인 종파(compressive wave)만 발생하게 되고 횡파는 발생하지 않는다.

Fig. 1(b)과 같이 시험편 표면의 일부만 가열된다면 횡방향 압력이 있고, 응력-변형 관계는

$$\sigma_{zz} = (\lambda + 2\mu)\varepsilon_{zz} - 3B\alpha\delta T \quad (2)$$

과 같고, 운동방정식은

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - 3B\alpha \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

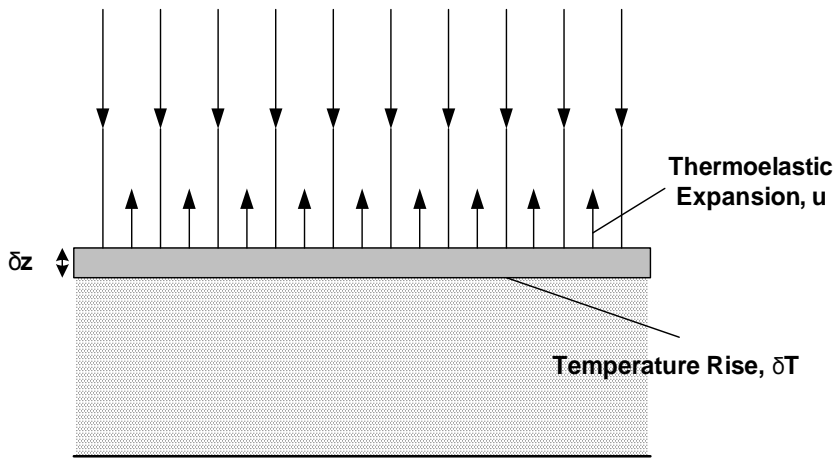
와 같이 주어진다. 여기서,  $B = \lambda + \frac{2}{3}\mu$ 는 체적 탄성계수(bulk modulus of elasticity)이다.<sup>17)</sup> 표면에 수직 방향으로 외부적인 압력이 없을 경우에는 표면에서의 응력은 0이다. 즉,  $\sigma_{zz}(z=0) = 0$ . 그러나 표면 바로 밑에는 열탄성 응력이 존재하고 이는 운동 방정식을 풀어서 구할 수 있다. 결국 이 경우는 종파, 횡파, 표면파 등 모든 파가 발생할 수 있다.<sup>22)</sup> 이 경우는 레이저의 입사 파워가 재료의 영구 변형을 가져오는 문턱값에 미치지 못할 정도로 조정이 되었을 경우에 나타나며 표면

에 어떤 결함이나 흔적을 남기지 않게 된다. 이러한 상태를 열탄성영역 (Thermolelastic Regime)이라고 한다.<sup>23)</sup>

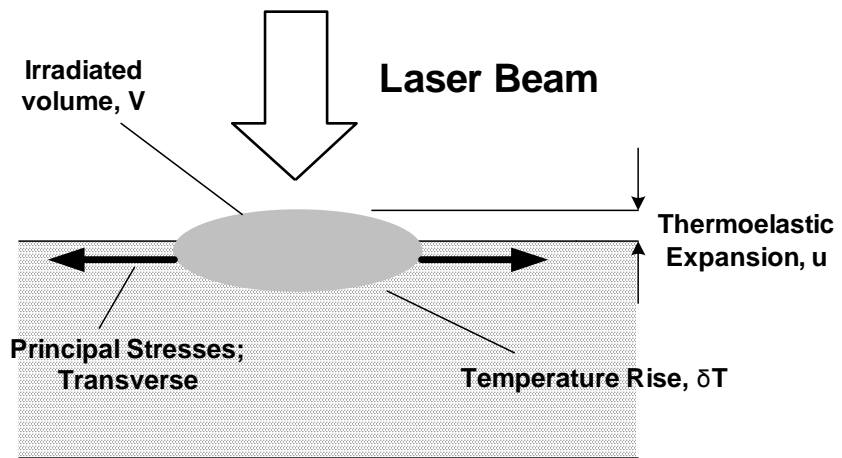
이와는 달리 펄스형 레이저 출력이 증가하거나 Fig. 2와 같이 레이저 펄스와 시험편 사이에 볼록렌즈 등을 사용하여 빔을 모아 좁으므로써 레이저의 입사 밀도를 높이면 표면의 일부가 플라즈마와 함께 재료의 일부가 증발되어 날아가게 된다. 이러한 현상을 용발(ablation)이라고 한다. 이때는 열탄성 영역과 달리 강한 파워로 입사가 되기 때문에 플라즈마의 형성과 함께 재료에 증발현상이 나타나서 표면이 손상된다.

레이저 출력이 증가함에 따라 시편표면의 온도가 기화점에 도달하게 되면 표면 물질의 용발에 의한 반동력에 의해 초음파(탄성파)가 발생하게 된다. 이러한 영역을 용발영역(Ablation Regime)이라고 한다. 이때는 열탄성영역과는 달리 강한 파워로 입사되기 때문에 재료의 표면에서 물질이 기화(Vaporization) 되거나 고체 샘플로부터 이온과 전자가 방사되어 가시광선 영역의 푸른 불꽃을 내는 플라즈마가 형성되며, 샘플 내에서는 용융(Melting), 소성변형 그리고 심지어는 균열이 형성될 수도 있다. 손상을 야기하지 않는 저 출력 레이저의 입사와는 대조적으로 고출력 레이저의 입사에서는 재료 표면의 손상을 수반한다.

이와 같이 기화된 물질은 고체 표면과 접해 있는 공기 중으로 팽창되면서 고체 표면에 반동력(Recoil Force)을 인가시킨다. 이와 같은 반발력은 고체 표면에서 초음파의 발생원으로 작용한다.



(a) Uniform Irradiation



(b) Localized irradiation

Fig. 1 Comparison of Uniform Irradiation with Localized Irradiation

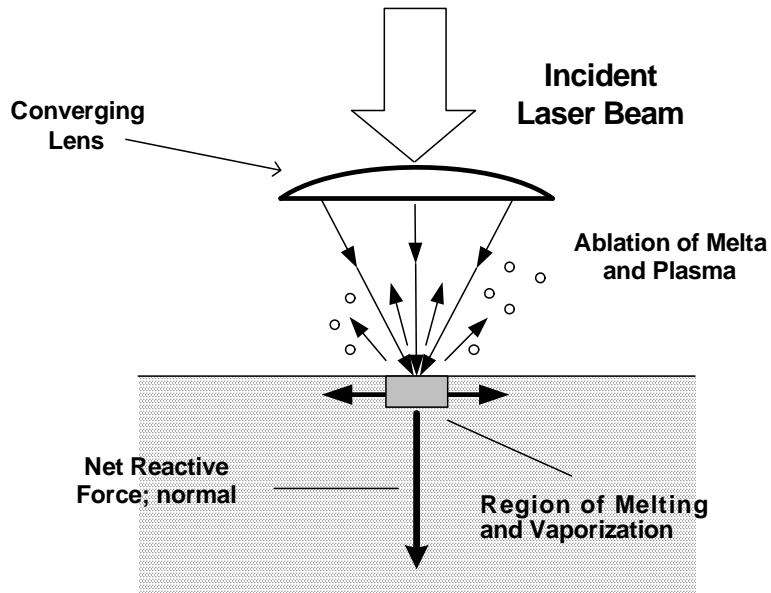


Fig. 2 Schematic Diagram to Show Ablation of Surface Material and Net Reactive Force on Sample

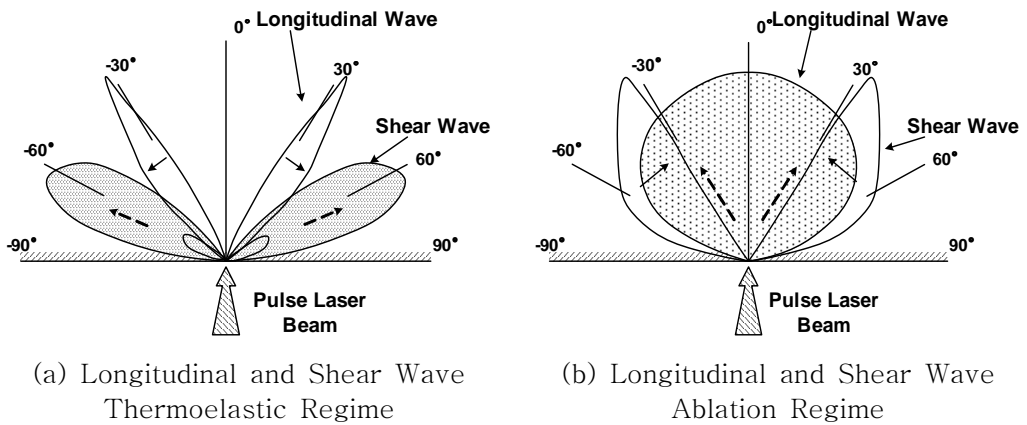


Fig. 3 Ultrasonic Wave Propagation of Thermoelastic and Ablation Regime by Pulsed Laser Source

레이저에 의해 발생된 초음파는 시편의 표면에 입사되는 에너지에 따라 열탄성 영역과 용발영역으로 구분하여 전파한다. Fig. 3은 열탄성영역과 용발영역에서의 종파와 횡파의 전파방향을 나타내고 있다. 열탄성영역에서 종파의 경우 약 30° 방향으로 강하게 발생하고, 횡파의 경우는 약 60° 방향으로 강하게 발생한다. 이에 반해 용발영역에서의 종파는 레이저 입사방향으로 강하게 전파하는 것을 볼 수 있다. 이러한 특징을 이용하여 열탄성영역에서 초음파 발생시 매질의 두께가 비교적 얇다고 가정하면 입사된 종파와 횡파는 매질의 자유 경계면에서 반사와 굴절을 하게 되고 그 결과 매질의 길이 방향으로 전파되는 유도 초음파로 발전하게 될 것이다.

레이저에 의해 발생된 초음파는 시편 내부에서의 전파형태가 레이저 빔의 직경 (Spot Size)에 따라 달라진다. 이와 같이 레이저 빔이 렌즈에 의해 집광되어 시편 표면에 집광될 때 초음파 발생원의 크기는 이러한 레이저 빔의 크기 ( $\phi$ )와 같다. 시편 내부에서 초음파의 전파모드는 Near Field 모드, Intermediate Field 모드, Far Field 모드의 3개의 모드로 분류된다. Near field 모드는 초음파가 발생원의 근방에 있을 때의 전파모드이며 평행파의 형태로 전파한다. 따라서 초음파의 전파에 따른 진폭의 감소는 없다. Far Field 모드는 초음파가 발생원으로부터 멀리 떨어져 있을 때의 전파형태이며 Spherical Wave의 형태를 갖는다. 따라서 초음파가 진행함에 따라 진폭이 진행거리에 비례하여 작아진다. Intermediate Field는 Near Field와 Far Field가 공존하는 영역이며 전파모드가 상대적으로 복잡하다. 이와 같이 초음파의 전파 모드를 판단하는 기준으로는 다음의 조건이 사용된다.

$$S = \frac{4\lambda z}{d^2} \quad (4)$$

여기에서 S가 0.1보다 작으면 near field 모드에 해당하며 S가 10보다 크면 far field 모드에 해당한다. 레이저를 이용한 초음파 탐상시에는 초음파의 전파 모드가

매우 중요한바 실험 목적에 맞도록 레이저 빔의 Spot Size를 조절하여 원하는 전파모드를 얻는 것이 중요하다.

## 제 2 절 Confocal Fabry-Perot 간섭계를 이용한 초음파 수신

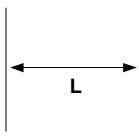
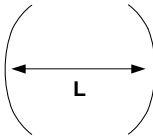
Laser-ultrasonics은 발생과 검지를 모두 비접촉식으로 수행할 때 큰 장점을 발휘할 수 있다. 1980년대 후반 이후 Fabry-Perot 간섭계를 이용한 초음파의 검지기술이 정립되면서 laser-ultrasonics은 현장적용 기술로써 새로이 인식되기 시작하였다. Fabry-Perot 간섭계(F-P 간섭계)는 기본적으로 빛의 파장을 매우 정밀하게 분석하는 장치이다. 이러한 F-P 간섭계에 빛이 입사하면 간섭계를 통과한 빛의 세기(투과율)는 입사된 빛의 파장에 의해 결정된다. 따라서 간섭계의 조건을 일정하게 유지하면 빛의 파장 변화를 정밀하게 모니터링 할 수 있다. 이제 검지용 레이저 빔이 시편의 표면에서 반사되어 간섭계에 입사할 때 시편 표면에 초음파가 도달하면 Doppler 효과에 의해 반사되는 레이저 빔의 파장이 변하게 된다. 따라서 F-P 간섭계로 입사하는 레이저 빔의 파장이 변하면 투과율이 변하므로 투과되는 빛의 세기를 광검출기로 측정하면 초음파를 측정할 수 있게 된다. 이러한 초음파에 의한 레이저 빔의 파장변화의 크기는 일정한 간섭계 조건 하에서 표면 변위의 속도에 비례한다. 따라서 초음파의 세기(진폭)가 크면 표면변위의 변화량이 크고 이 변화가 일정한 시간동안 이루어지므로 변위 속도가 크다. 따라서 F-P 간섭계의 출력신호는 초음파의 세기와 비례한다. 본 연구에서는 공초점(Confocal) F-P 간섭계를 이용하여 초음파를 측정하고자 하였으며 이 간섭계의 원리 및 구조를 기술하면 다음과 같다.<sup>17)24)25)26)27)28)</sup>

공초점 F-P 간섭계는 Connes<sup>29)</sup>가 처음으로 제안하였고 Hercher와 Johnson이 이론적으로 분석하였다. 이 간섭계는 Prism이나 Grating 분광기보다 분해능이 높을 뿐 아니라 사용이 간편하여 레이저의 결 모양 간격과 발진 선 폭을 측정하거나 투과 밴드폭(Bandwidth)을 변화시킬 수 있는 필터로 사용되기도 하며, 레이저의 주파수 동조나 주파수 안정화를 위한 기준 공진기로 사용된다. 공초점 F-P 간섭계는 같은 곡률 반경을 가지는 두 거울이 초점을 공유하도록 정렬한 것이다.

Table 3에는 평면 F-P 간섭계와 공초점 F-P 간섭계의 특징을 나타내고 있다..

공초점 F-P 간섭계와 평면 F-P 간섭계의 차이점은 공초점 F-P 간섭계가 평면 F-P 간섭계보다 정렬(Align)이 쉽고, 구면 거울의 한 쪽이 약간 기울어져도 광학 길이는 거의 변화가 없기 때문에 주파수 안정화의 기준 공진기로 사용될 때 평면 평행 간섭계보다 높은 안정도를 유지할 수 있다는 점이다. 또한 거울 가공시 구면 거울은 평면거울보다 매끄럽게 할 수 있으므로 공진기의 Finesse를 크게 할 수 있다.<sup>30)</sup> Fig. 4는 공초점 F-P 공진기에서 빔이 진행하는 경로를 표시한 그림이다. 입사되는 빔의 전기장이  $E_i$ 이고 두 거울의 반사계수와 투과 계수가 각각 r, t일 때, A로 입사된 빔은 두 반사면 사이에서 다중 반사 후 B와 D로 나오게 된다. 이 때, 구면 거울의 곡률 반경이  $R_0$ 이고 두 거울 사이의 간격이  $L = R_0$ 이면, 그림과 같이 F에서 공유 초점을 이루게 된다.

Table 3 Comparison of Plano-Plane Type and Confocal Type about Fabry-Perot Interferometer

	Plano-plane type	Confocal type
Structure		
FSR	$\frac{c}{2nL}$	$\frac{c}{4nL}$
Finesse	Acuate	Dull
Alignment	Difficult	Easy
Stability	Unstable	Stable
Scanning method	Controlled in 3 PZT	Controlled in 1 PZT
Fabry-Perot interferometer size	Big	Small



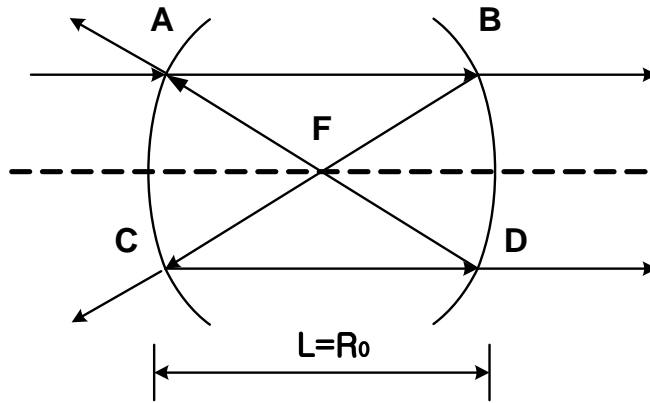


Fig. 4 The Confocal Fabry-Perot Interferometer

이때 B로 투과된 빔의 전기장  $E_B$ 는 다음과 같다.

$$E_B = E_i^2 [1 + r^4 \exp(2\delta) + r^8 \exp(3\delta) + \dots] \quad (5)$$

$$= \frac{E_i^2}{1 - r^4 \exp(\delta)}$$

여기서  $r$  과  $t$  는 각각 거울의 반사계수와 투과계수를 뜻하며, 위상차는  $\delta = 4\pi L/\lambda$  이다. 투과 빔의 세기는

$$I_B = E_B^* E_B = \frac{I_i T^2}{(1 - R^2)^2 + 4R^2 \sin^2(\delta/2)} \quad (6)$$

여기서,  $I_i (= |E_i|^2)$ 는 입사 빔의 세기, 반사율과 투과율은 각각  $T = |t|^2$  과  $R = |r|^2$  을 만족하고, 공진기의 내부에서 빔의 손실이 없다면  $R + T = 1$  인 관계가 성립한다. 또한, D점으로 투과된 전기장  $E_D$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
E_D &= E_i t^2 r^2 [1 + r^4 \exp(2\delta) + r^8 \exp(3\delta) + \dots] \\
&= \frac{E_i t^2 r^2}{1 - r^4 \exp(\delta)}
\end{aligned} \tag{7}$$

따라서 투과 빔의 세기는

$$I_D = \frac{I_i T^2 R^2}{(1 - R^2)^2 + 4R^2 \sin^2(\delta/2)} = R^2 I_B \tag{8}$$

이 된다.

입사 빔이 거울의 중심으로 입사하여  $I_B$ 와  $I_D$ 가 일치하는 경우를 결모양 조화라 하며, 이때 A와 C에서 반사된 빔의 전기장은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
E_r &= E_A + E_C \\
&= E_i [r + t^2 r^3 \exp(2\delta) + \dots] + E_i [r t^2 \exp(\delta) + r^5 t^2 \exp(3\delta) + \dots] \\
&= E_i r + E_i r t^2 \exp(\delta) [1 + r^2 \exp(\delta) + r^4 \exp(2\delta) + \dots] \\
&= E_i \left( r - \frac{r T \exp(\delta)}{1 - r^2 \exp(\delta)} \right) \\
&= E_i \frac{r [1 - \exp(\delta)]}{1 - r^2 \exp(\delta)}
\end{aligned} \tag{9}$$

따라서 반사 빔의 세기는

$$I_r = E_r^* E_r = E_i^2 \frac{4R \sin^2(\delta/2)}{(1 - R)^2 + 4R \sin^2(\delta/2)} \tag{10}$$

인 식을 얻을 수 있다.

입사 빔에 대한 투과 빔의 비는 식 (7)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{I_D}{I_i} = \frac{T^2}{(1-R^2) \left[ 1 + \frac{4R^2 \sin^2(\delta/2)}{(1-R^2)^2} \right]} \quad (11)$$

여기에  $R+T=1$ 을 이용하고 높은 Finesse를 가진 공진기의 경우  $R \cong 1$  이면, 식 (12)는

$$\frac{I_D}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (12)$$

이고, 여기서 F는 다음과 같이 정의한다.

$$F = \frac{4R^2}{(1-R^2)^2} \quad (13)$$

$\delta = 2m\pi \pm \varepsilon/2$  에서 투과곡선의 최대값의 반이 된다면,

$$\frac{1}{1 + F \sin^2(\varepsilon/4)} = \frac{1}{2} \quad (14)$$

로 쓸 수 있다. 여기서, F는 충분히 크고,  $\varepsilon$ 이 충분히 작다면,  $\sin(\varepsilon/4) = \varepsilon/4$  로 잡을 수 있다. 따라서,  $\varepsilon = 4F^{-1/2}$  이고, FSR(Free Spectral Range)은 인접한 무늬 차수들 사이의 간격으로 정의한다. Finesse는 FSR을 FWHM(Full Width at Half Maximum)으로 나눈 값으로 나타내고 다음과 같다.

$$F = \frac{2\pi}{\varepsilon} = \frac{\pi F^{1/2}}{2} = \frac{\pi R}{1-R^2} \quad (15)$$

그리고 밴드폭(FWHM,  $\Delta\nu$ )은  $FSR \times F$  이며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta\nu = \frac{c}{4L} \times F = \frac{c}{4L} \left( \frac{1-R^2}{\pi R} \right) \quad (16)$$

본 연구에서 실제로 제작한 F-P 간섭계의 구조는 Fig. 5와 같고 초음파 검출에 알맞도록 자체 제작한 공진기의 규격은 다음과 같다.

- ◎거울의 지름 : 2 inch.
- ◎거울의 곡률 반경 : 50cm
- ◎거울의 반사율 : 0.95 (중심파장 532nm)
- ◎거울 지지대 : invar 36 FM
- ◎PZT : Burleigh PZ-90 (integral linearity :  $\leq 5\%$ ,  $6\mu\text{m}/1000\text{V}$  translation)

여기에서 거울 지지대로서 쓰이는 invar는 매우 작은 열팽창계수를 가져서 온도 변화에 대해 그 형태의 변형이 거의 없는 금속으로서 공진기 길이 안정화를 위해서 필수적인 부품이다. 그러나 일반적으로 많이 쓰이는 super invar는 가공이 매우 어려운 단점이 있다. 따라서 본 공진기를 제작하는데 있어서는 다소 열팽창계수는 높지만 super invar에 비해서 질삭성이 우수한 invar 36을 사용하였다. 또한 온도나 공기중의 섭동(Fluctuation), 그리고 레이저 주파수 자체의 시간에 따른 변화에 의한 검출신호의 불안정성을 보정하기 위하여 PI control을 이용하였다. PI circuit를 통하여 PZT에 전류신호를 되먹임(Feedback)해 줌으로서 공초점 F-P 공진기에서 항상 안정적인 신호가 검출되도록 하였다. 한편, 거울의 반사율과 두 거울 사이의

거리  $d=50\text{cm}$ 를 식 (16)에 대입하여 우리가 제작한 공진기의 밴드폭(FWHM)과  $FSR$ 을 구하면, 각각  $\Delta\nu=4.9\text{MHz}$ ,  $FSR=150\text{MHz}$  이라는 것을 알 수 있다.

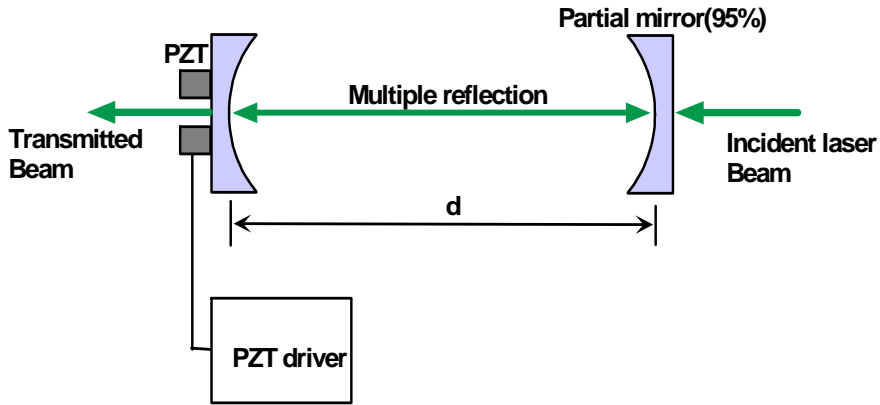


Fig. 5 Schematics Diagram of Confocal Fabry-Perot Interferometer

Made in this Research

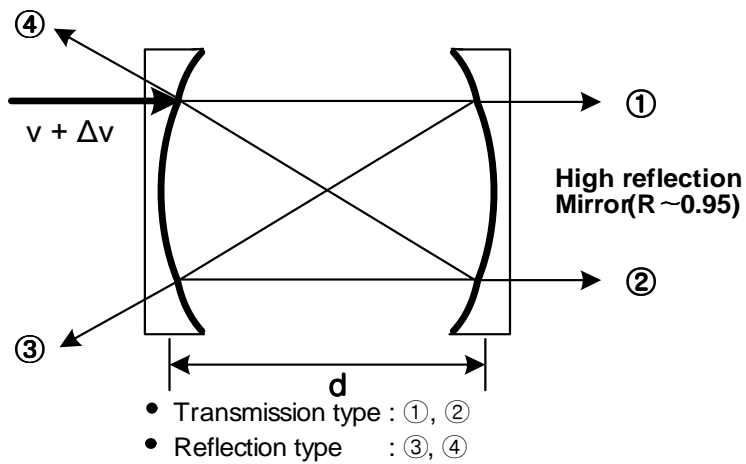


Fig. 6 Confocal Fabry-Perot Interferometer

Fig. 6에서 반사율이 일정한(본 연구에서는 95%) 거울에 레이저 빔이 입사하면 2개의 오목 거울로 구성되는 공진기(Cavity)에서 다중반사(Multiple Reflection)를 한다. 이 때 다중 반사하는 빛들은 서로 간섭을 하며 이 빛들의 위상차가  $4\pi vnd/c$ 의 정수배일 때 서로 보강간섭을 하여 투과율이 최대가 된다. 여기에서  $v$ 는 레이저 빔의 주파수이고  $n$ 은 공진기 내부의 굴절률이며  $c$ 는 빛의 속도,  $d$ 는 공진기의 길이이다.

이와 같이 간섭계의 투과율은 물리 상수들이 일정할 때 빛의 주파수(파장)와 공진기의 거리에 의존한다. Fig. 7에 간섭계의 투과율 곡선을 나타내었다. 그림에서와 같이 레이저 빔의 투과율이 공진기의 거리에 매우 민감하므로 파장변화를 측정하기 위해서는 공진기 거리를 항상 일정하게 유지하여야 한다. 이는 Fig. 5에 표시한 바와 PZT 및 PZT driver를 이용하면 공진기 거리를 항상 일정하게 유지할 수 있다. 이러한 F-P 간섭계를 이용하여 초음파를 측정할 때 측정효율을 최대화하기 위해서 투과율을 약 50%로 해야 한다. 이는 이 지점에서 일정한 파장변화에 투과율의 변화가 가장 크기 때문이다. 이러한 투과율의 조절도 앞의 PZT 구동장치를 이용한다.

앞서 언급한 바와 같이 간섭계를 통과한(또는 반사한) 4가지 종류의 빛(Fig. 6)의 세기는 입사된 빛의 파장 ( $\lambda$ )과 간섭계를 구성하는 공진기(Cavity)의 길이 ( $d$ )에 의해 결정되며 각각의 종류의 빛의 세기 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 따라서 간섭계의 조건을 일정하게 유지하면 빛의 주파수 변화를 정밀하게 모니터링 할 수 있다. 이제 검지용 레이저 빔이 시편의 표면에서 반사되어 간섭계에 입사할 때 시편 표면에 초음파가 도달하면 Doppler 효과에 의해 반사되는 레이저 빔의 주파수가 변한다. 따라서 F-P 간섭계로 입사하는 레이저 빔의 주파수 변화에 따라 간섭계를 통과한 빛의 세기가 변하며 이와 같은 빛의 세기 변화를 광검출기로 측정하면 초음파를 측정할 수 있게 된다. 이러한 초음파에 의한 레이저 빔의 파장변화의 크기는 일정한 간섭계의 조건 하에서 표면 변위의 속도에 비례한다. 따라서 초음파의 세기(진폭)가 크면 표면변위의 변화량이 크고 이 변화가 일정한 시간동안 이루어지

므로 변위 속도가 크다. 따라서 F-P 간섭계의 출력신호는 초음파의 세기와 비례한다. Fig. 7에서와 같이 레이저 빔의 투과율이 공진기의 거리에 매우 민감하므로 파장변화를 측정하기 위해서는 이 공진기 거리를 항상 일정하게 유지하여야 한다. 이와 같은 간섭계의 안정화는 PZT 및 PZT Driver를 이용하여 구현할 수 있다. 이러한 안정화된 공초점 F-P 간섭계를 이용하여 초음파를 측정할 때, 측정효율을 최대화하기 위하여 투과율을 약 50%로 하여야 한다. 이는 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 이 지점에서 일정한 주파수 변화에 의한 간섭계의 투과율 변화가 가장 크기 때문이다. 이러한 투과율의 조절은 앞서 언급한 PZT 구동장치를 이용한다.

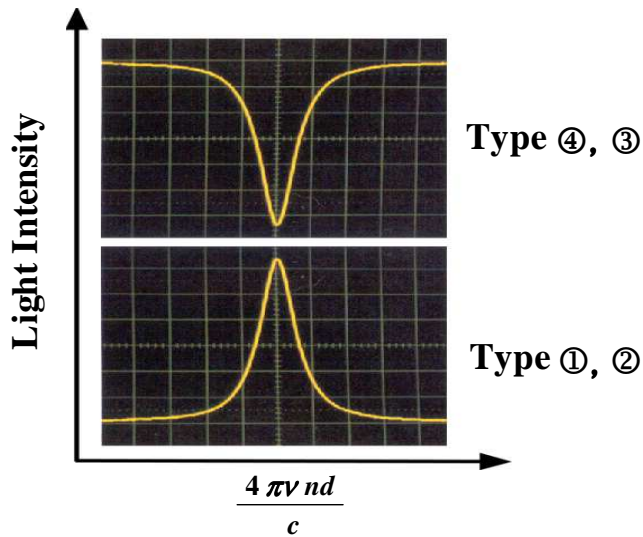


Fig. 7 Variation of Light Intensities in Confocal F-P Interferometer

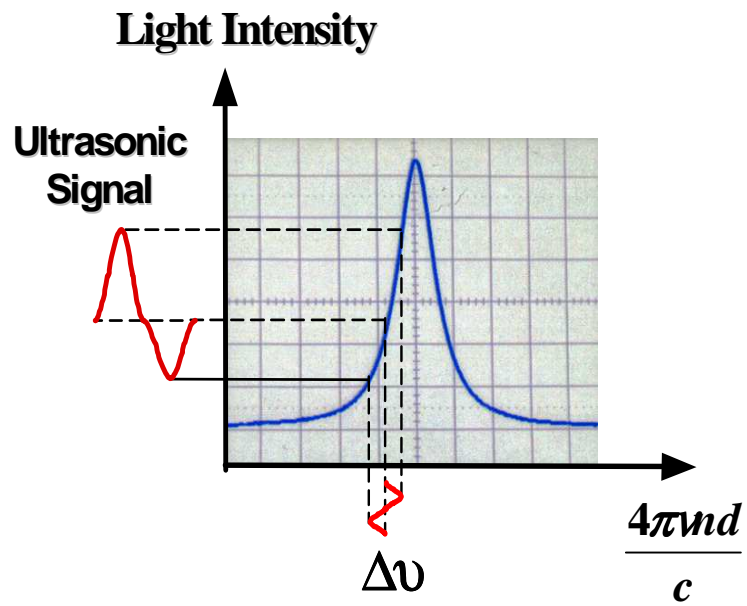


Fig. 8 Variation of Transmitted Light intensity in Interferometer due to Light Frequency Shift



### 제 3 절 시스템 구성 및 실험 방법

#### 1. 실험 시편

본 연구에 사용된 시험편은 구조물에 많이 사용되고 있는 기계 구조용 탄소 강재(SM45C)를 사용하였다. 기계적 성질은 밀도 ( $\rho$ )  $7.85 \text{ g/cm}^3$ , 인장강도  $48 \text{ Kgf/mm}^2$ , 연신율 20%이다. 그리고 구조물에서 사용되고 있는 두께를 고려하고 초음파의 신호모드를 구분하기 쉽도록 하기 위하여 크기는 가로×세로×두께가  $300 \times 50 \times 60 \text{ mm}$ 로 하였다.

또한 실제 비파괴 평가의 목적인 내부 결함의 검출을 위해서 재료 내부에 구멍을 내어서 인공결함을 직경 2, 3, 4, 5 mm 크기로 제작을 하였고, 시험편의 한쪽 측면은 미세한 균열을 가공하기 위하여 Wire Cutting가공으로 폭 0.25mm의 Slit 홈을 축방향으로 5, 10, 15, 20 mm 깊이로 각각 가공을 하였고 마지막으로 표면결함의 신호와 내부 결함 신호의 차이점을 관찰하기 위해서 균열 결함의 반대쪽 표면에서 Wire Cutting가공으로 폭 0.25mm의 Slit 홈을 5, 10, 15, 20 mm 깊이 방향으로 가공을 하였다.

아래의 Fig. 9는 레이저를 이용한 비접촉 Bulk Wave 검출과 내부 결함 검출 실험을 위해 사용된 시험편을 나타내고 있다.

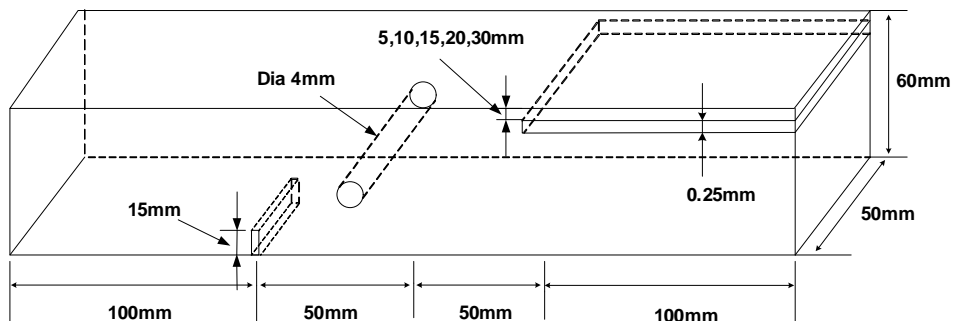


Fig.9 Dimensions and Shape of Specimens for Bulk Wave Detection

## 2. 시스템 구성

열 발생원으로 Q 스위칭된 Nd:YAG 레이저를 사용한다. 펄스 레이저의 시간 폭은 10 ns의 레이저를 사용하였고 파장은 532 nm를 사용하였다. 내부결함을 검출하기 위하여 광학계를 구성하였고 F-P 간섭계로 얻은 신호를 오실로스코프(Lecory 9345)를 통하여 디스플레이 및 데이터 저장을 하였다. 그리고 컴퓨터를 사용하여 파형의 특성 및 차이를 해석하였다.

레이저 간섭계를 이용한 초음파 측정 장치의 구성은 Fig. 10, Fig. 11과 같다. Fig. 10에서 산란광의 전송에는 현장적용 및 다용도로 사용할 수 있는 이동형 시스템의 개발을 위하여 광섬유를 적용하였다. 이와 같은 레이저 간섭계를 이용한 초음파의 측정 효율에 영향을 미치는 요인은 시편 표면에서 반사된 산란 광 포집효율, 간섭계출력광의 Bandwidth(간섭 효율), 그리고 초음파 주파수에 따른 감도(Reflection 또는 Transmission Scheme) 등이다. 실험에 사용되어진 펄스 레이저의 사양은 Table 4와 같다.

Table 4 Characteristics of laser

Laser Type	Pulsed Nd:YAG laser
Wavelength	Fundamental : 1064 nm Used : 532 nm
Pulse duration	6 ~ 8 ns
Incident energy	200 mJ
Pulse repetition rate	10 Hz
Beam diameter	6 mm

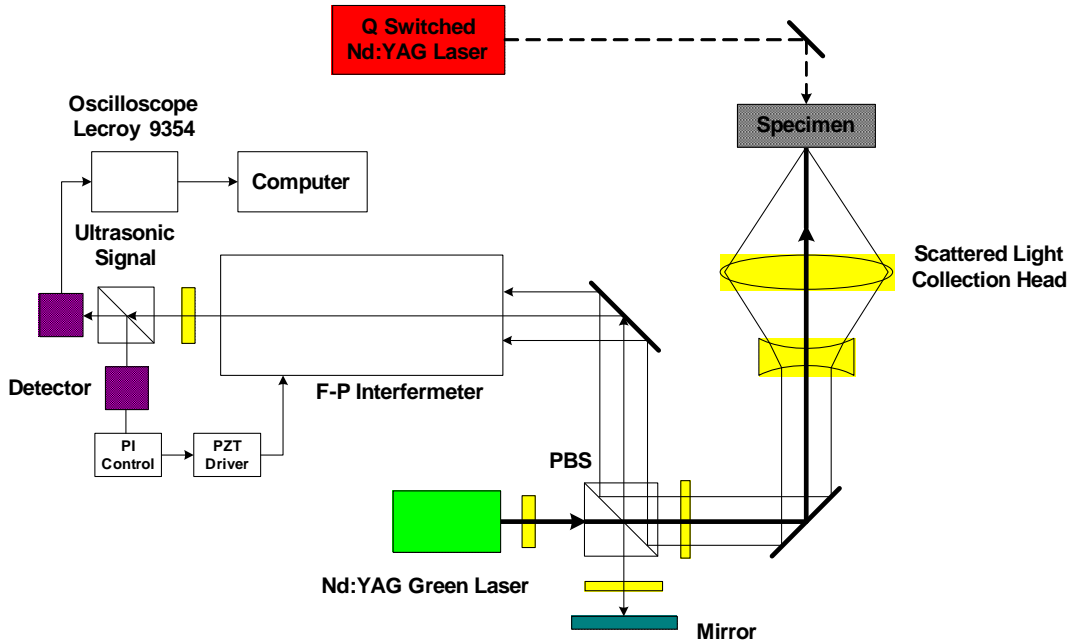


Fig. 10 Schematic Diagram of Experimental Equipment

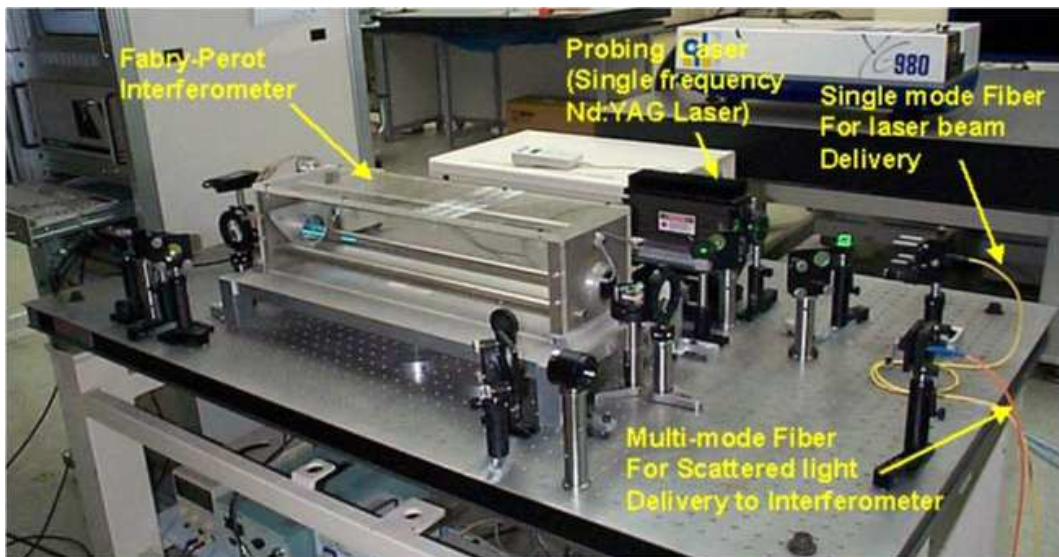


Fig. 11 Non-Contact Bulk Wave Detection Part of Laser Ultrasonic

Fig. 10의 구성에서 산란광의 포집효율을 증대하기 위하여 산란 광 포집용 측정 헤드를 Fig. 12과 같이 설계하였다. Fig. 12의 측정 헤드는 측정 대상의 표면에서 초음파에 의해 파장이 천이된 산란광을 포집한 후 광섬유를 이용하여 간접계에 전송하는 역할을 수행한다. 이번 실험에서 산란광의 포집량을 증대하기 위해 직경 100 mm의 렌즈를 사용하였다.<sup>30)31)</sup>

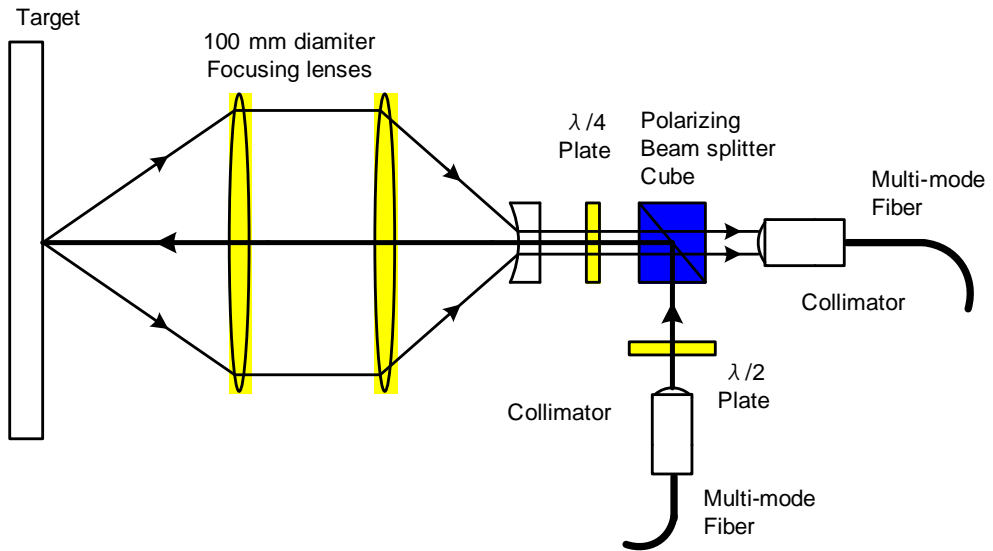


Fig. 12 Collection Head of Scattered Lights

### 3. 실험 방법

Fig. 9와 같은 평행판 형태인 고체 시험편의 한쪽 면에 펄스 레이저를 입사시키고 초음파를 발생시켰을 경우 시험편에서 발생된 초음파 신호의 검출을 위해 bulk Wave의 경우에는 초음파가 시험편을 통과하여 전파하기 때문에 시험편의 뒤쪽에 초음파 검지용 레이저 간섭계(Fabry-Perot interferometer)의 안정화를 통해 초음파의 비접촉식 검지를 실현하였으며 이와 같이 안정화된 레이저 간섭계를 이용하여 시험편의 결합신호를 비접촉으로 검출하였다.

검출된 결합신호는 레이저 간섭계(F-P Interferometer)를 사용하여 오실로스코프를 통해 디스플레이 및 파형의 저장이 이루어진다. 오실로스코프로 얻어진 신호를 PC를 통하여 신호처리를 행하였고 데이터 처리 및 분석을 행하였다. 초음파 검지용 레이저 Spot 크기의 확대를 통한 초음파 탐상 면적의 증대와 레이저 간섭계의 효율 증대를 실현하여 시험편 결합의 측정정도를 향상시켰다. 우선 비접촉 검지의 효율을 높이기 위해 레이저 빔과 시험편 사이에 볼록렌즈를 사용하여 빔을 모아줌으로써 레이저 입사 밀도를 높이는 용발 영역에서 투과법으로 실험을 하였다. 레이저 빔이 시험편에 입사하면 모든 초음파가 발생되나, 표면의 물질이 플라즈마 불꽃을 내면서 매질로부터 증발됨과 동시에 매질 표면에 미치는 반발력의 합이 표면에 수직방향으로 가장 크게 되므로 종파의 발생에 가장 효과적인 방법이다. 레이저를 시험편에 조사한 순서는 Fig. 13과 같다.

레이저 조사 위치는 원형 결합은 중심으로부터 7mm 지점을 첫 번째로 하여 결합의 중심으로 조사하였고, 선형결합은 결합의 시작부분을 기점으로 5mm 지점부터 결합의 끝단 방향으로 조사하였다.

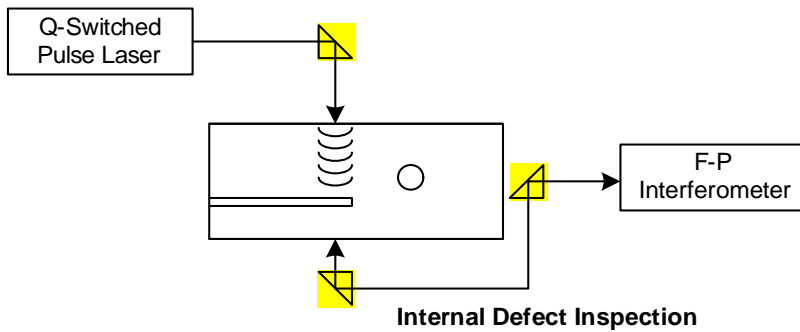
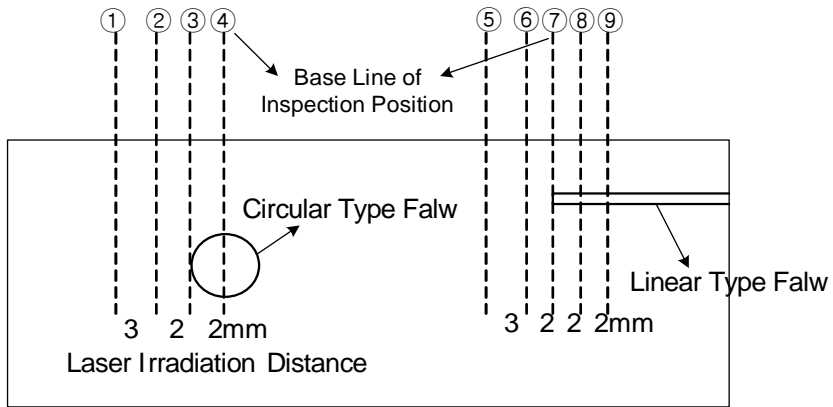


Fig. 13 Non-Contact Ultrasonic Inspection Sequence and Method on a Specimen

## 제 4 절 실험 결과 및 고찰

### 1. Bulk Wave 검출

투과법의 경우는 특정 부분의 반사신호를 이용하는 것이 아니라 시험편 두께 전체를 투과한 투과파의 신호만이 나타난다. 이 투과신호의 크기에 따라 결함의 유무를 판단할 수 있다. 즉 결함 존재시 음파 진행이 결함에 의해 방해를 받음으로써 신호의 지시 높이가 저하되는 것을 이용한다. 시험편을 통과한 신호들은 내부 결함의 경우에는 시험편 표면으로부터의 깊이, 결함의 크기와 위치 등이며 표면 결함의 경우에는 크기와 위치 정보들을 포함하고 있다. 이러한 수치들은 대개 길이 정보이다. 레이저 초음파 실험에서 검출된 Bulk Wave와 기존의 문헌에 나와 있는 이론적인 값들과의 비교를 통해서 음속을 측정하고 비교한다.

실험에 사용된 시험편은 Fig. 9와 같은 기계구조용 탄소강(SM45C)을 대상으로 하였고 내부 결함이 없는 곳을 선택하여 Bulk Wave의 음속을 측정하였다.

실험방법은 시험편의 두께 방향으로 전파하는 종파와 횡파를 측정하기 위해 원형 Nd:YAG 레이저를 시험편에 입사시키고, F-P 간섭계를 활용하여 시험편의 입사면 반대쪽에서 비접촉으로 초음파 신호를 측정하였다. Fig. 14는 시간 영역에서의 레이저 조사에 의한 결함이 없는 시험편을 레이저 입사점 반대편에서 F-P 간섭계를 이용하여 비접촉으로 얻은 측정결과이다. 본 연구에서 레이저 빔을 시험편에 30회 조사하였고 그 결과 측정된 파형을 동기화평균을 하여 나타내었다.

파형에서 시간축의 맨 처음에 나타나는 신호는 Q-스위치 트리거에 의한 신호를 보여주고 있다. L은 초음파의 발생지점으로부터 반대편으로 전파하는 초음파를 감지한 것이고, 3L은 시험편을 한번 왕복한 후의 얻어진 종파이고, 2LS는 1번의 왕복은 종파로 나머지 한번은 횡파로 전파한 것이며 5L은 두 번 왕복한 종파 신호를 나타낸 것이다. 실험에서 얻은 파형의 해석을 통하여 각 피크에서의 음속값을 계산해 보면 Table 5와 같다.

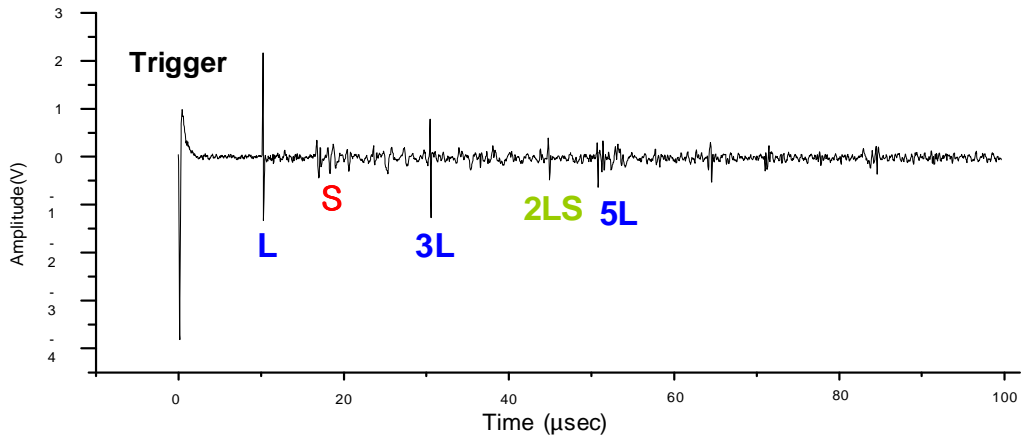


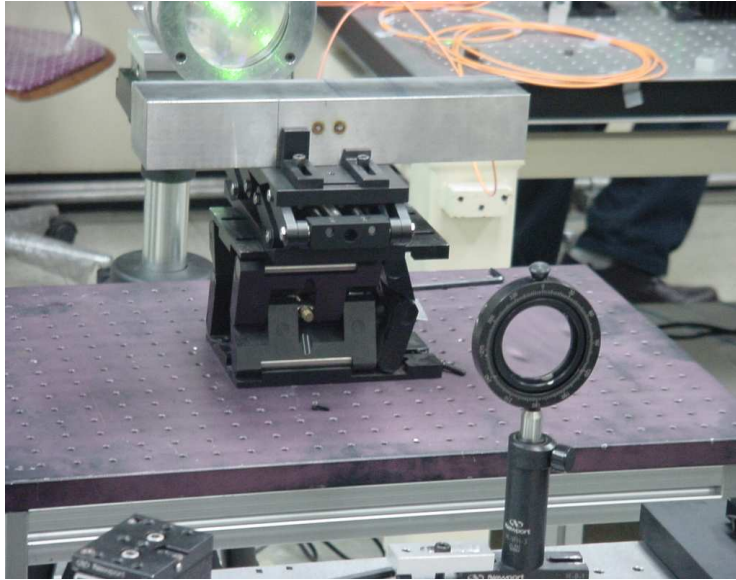
Fig. 14 Multiple Reflection of Laser Generated Longitudinal Pulses within 60mm SM45C block

Table 5 Sound velocity in SM45C

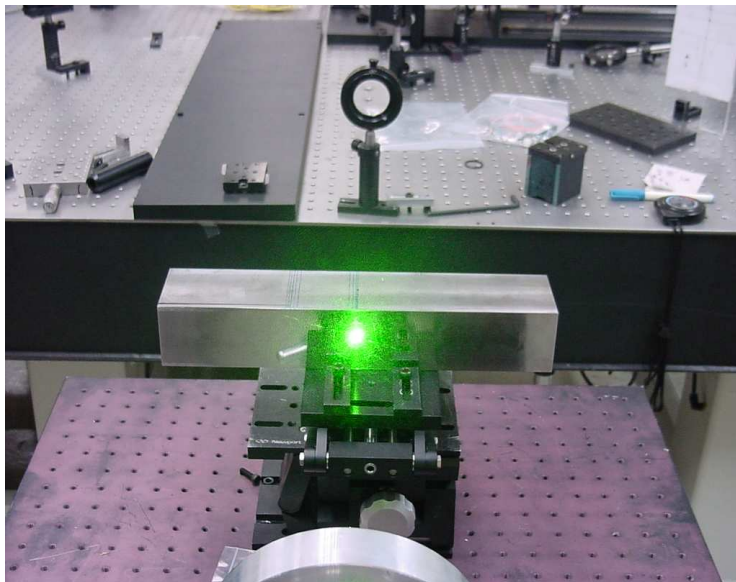
Component	Propagating time	Propagating distance	Sound velocity	Error
L	$1.018 \times 10^{-5}$ sec	60 mm	5,893.90 m/s	0.78 %
3L	$3.042 \times 10^{-5}$ sec	180 mm	5,917.15 m/s	0.39 %
5L	$5.062 \times 10^{-5}$ sec	300 mm	5,926.50 m/s	0.23 %
S	$1.862 \times 10^{-5}$ sec	60 mm	3,222.34 m/s	0.65 %



다중 반사가 일어나는데 걸린 시간은 일정하며, 피크 신호간의 시간차는 10.18  $\mu\text{sec}$ , 시험편의 두께가 60 mm이므로, 시편 내 종파의 전달 속도는 5,893 m/sec로 계산된다. 또한 S는 횡파로서 신호 발생지점으로부터 시간차는 18.62  $\mu\text{sec}$ 이고, 시편 내 횡파의 전달 속도는 3,222 m/sec 이다. Table 5를 보면 전반적으로 계산되어진 음속값은 이론치와 차이가 많지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 신호가 매우 정확하게 단일 피크의 형태로 나타나기 때문에 정확한 도착시점을 구별해 낼 수가 있기 때문이다. Fig. 15는 용발 영역에서의 실험 장치와 레이저 빔의 모습이다. 용발 영역에서는 열탄성 영역보다 강한 출력의 에너지를 필요로 하기 때문에 Fig. 3에서처럼 볼록렌즈를 사용하여 빔을 모아줌으로써 시험편에 입사되는 에너지의 밀도를 높게 하였다. (a)에서처럼 강한 빔이 시험편에 입사되면 시험편이 플라즈마와 함께 증발되면서 표면이 손상됨을 알 수 있다.



(a) Part of Transmitter



(b) Part of Receiver

Fig. 15 Experimental Setup in the Ablation Regime

## 2. 결함 신호의 검출

일반적으로 구조물의 파손방지 및 건전성 확보를 위해서는 그 구조물의 잔존수명 예측이 필요하고, 이를 위하여 구조물 내부에 존재하는 기공 및 균열의 정량적인 크기 측정이 필요하다. 실제 비파괴 평가의 목적은 기계나 구조물의 안정성을 고려하여 파괴가 일어나기 전 미리 결함해석을 통한 사전 방지에 그 목적이 있다.

본 실험의 목적은 기존의 접촉식 방법들이 가지고 있던 단점들을 극복하기 위하여 레이저 초음파법의 장점인 비접촉식으로 내부결함을 탐상하고 결함의 유무·크기·위치 그리고 종류까지도 측정이 가능한가를 확인하고 실제 산업현장에서의 적용 가능성을 알아보기 위함이다. 앞장에서와 같은 시스템 구성과 실험방법을 이용하여 펄스 레이저에 의해 발생되어진 초음파 신호를 F-P 간섭계를 적용하여 정확한 파형을 검출하였고 검출된 신호를 가지고 결함해석을 하였다.

결함해석에 있어서 높은 지향성을 가지고 전파하는 일반적인 초음파 실험과 달리 레이저 초음파법에서는 앞장에서 보였던 것과 같이 발생음파가 모든 방향을 따라 전파하는 점을 고려해야 한다. 게다가 모든 종류의 파가 발생하게 되어 검출되어진 파를 해석하는데 어려움을 가지게 된다. 초음파 신호를 결함에 입사시켰을 때 결함과 상호작용은 산란파의 연속된 일련의 결과로서 나타나며, 결함을 판별할 수 있는 특징을 가지게 된다. 부피를 갖는 기공형상의 결함과 크랙형상의 결함에 의한 여러 산란파가 Fig. 16과 Fig. 17<sup>34)</sup>로 주어진다. 크랙 선단에 의한 회절파는 기공형상의 결함에 대해서는 존재하지 않으며 이러한 특성을 이용하여 두 결함의 분류가능성을 살펴볼 수 있다. 내부 결함의 검출은 기존의 초음파법의 경우 대개 펄스반사법이나 투과법을 이용하여 결함의 크기 및 위치 추정이 가능하였다. 이번 실험에서는 시험편에 구멍을 내고 와이어가공에 의한 균열을 만들어 인공결함의 신호를 관찰함으로써 결함에 관한 모든 정보를 검출하였다.

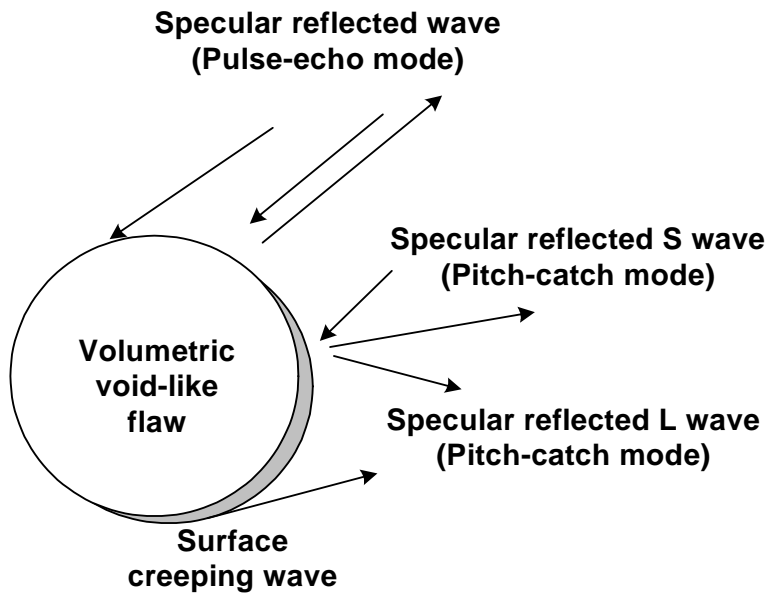


Fig. 16 Ultrasonic Signals Scattered from a Volumetric Void-like Flaw

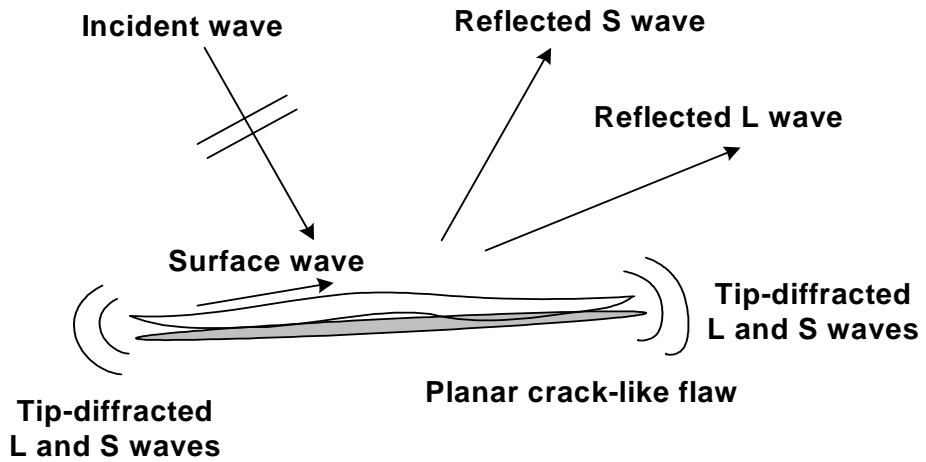


Fig. 17 Ultrasonic Signals Scattered from a Planar Crack-like Flaw

### 3. 결함 크기 및 위치 추정

Fig. 18은 발생되어진 파의 전파과정을 보여주고 있다. 레이저 빔과 간섭계를 동일한 축으로 하여 동시에 움직인다. 시험편에 레이저 빔을 조사하는 순서는 Fig. 13과 같다. 인공결함이 없는 경우에는 레이저의 입사에 의해 직접적으로 전파한 종파와 횡파가 간섭계에 모두 검출되어질 것이다. 그러나 결함이 존재하게 되면 결함에 의해서 반사와 회절된 빔이 기존의 파형에 섞여 들어가게 된다. 그러므로 결함의 유무가 결정되어질 수 있다. 본 논문에서는 결함에 의해 생성되어지는 파와 산란되는 파를 가지고 결함의 해석을 하였다.

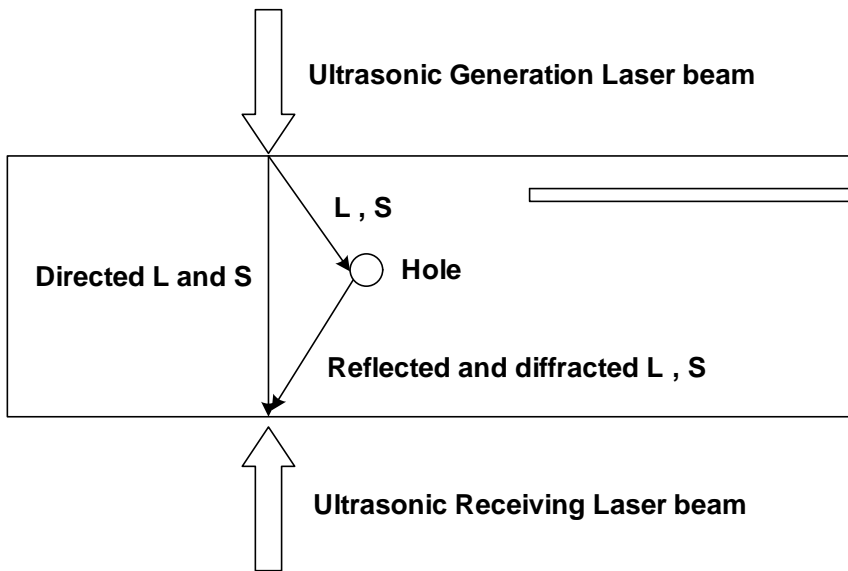


Fig. 18 Propagating process of ultrasound in a specimen

Fig. 19를 보면 결함이 없는 경우와 결함이 있는 경우의 파형 비교 시에 확연히 나타나는 점은 결함부로 접근해감에 따라서 수신된 각각의 진폭값을 비교해 보면 알 수 있다. 시험편을 직접적으로 전파한 종파(L)와 횡파(S)의 진폭값이 감소되고 있으며 시험편을 한번 왕복한 후의 얻어진 종파인 3L 신호의 진폭값이 현저하게

감소하고 있으며 5L의 신호는 나타나지 않음을 확인할 수 있다. 3L 부분의 진폭값의 변화를 결함 크기별, 측정 Position별로 Fig. 20(a, b, c, d)에 나타내었다.

Fig. 20에서 Position 1에서의 진폭의 평균값은 0.985였고 결함의 중심에서의 평균 진폭값은 0.255로 결함의 영향을 받지 않는다고 볼 수 있는 Position 1 대비 Position 4의 진폭값은 25%로 떨어짐을 알 수 있다. 이는 종파의 진행경로에 결함이 존재함으로써 종파가 반사되어 진폭의 변화가 생김을 알 수 있다. 또한 결함의 크기별 진폭의 변화율은 결함의 크기가 2, 3, 4, 5mm로 커짐에 따라 41.6%, 27.7%, 17.6%, 20.5%,로 적어지는 경향을 볼 수 가 있다.

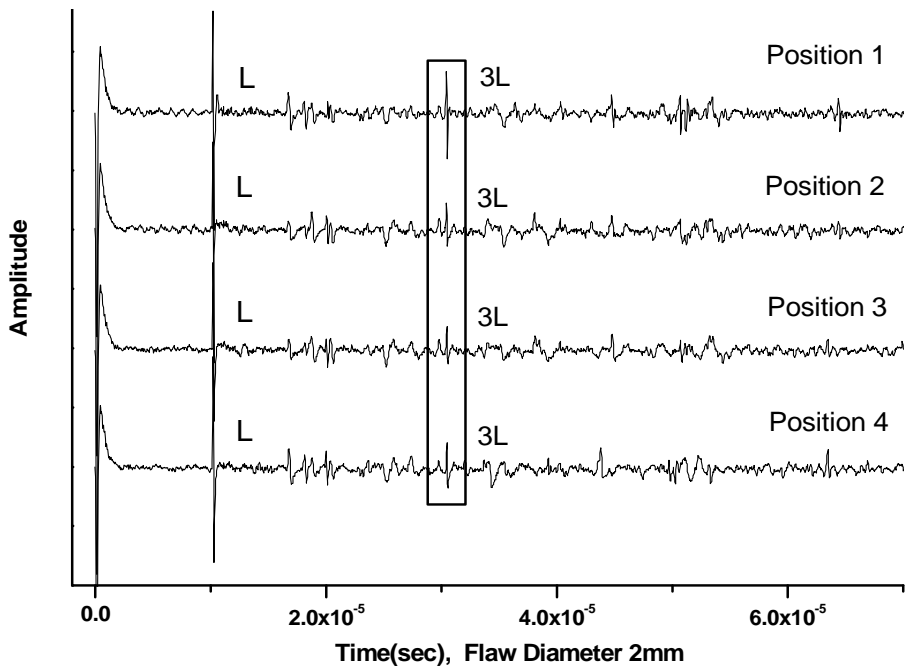
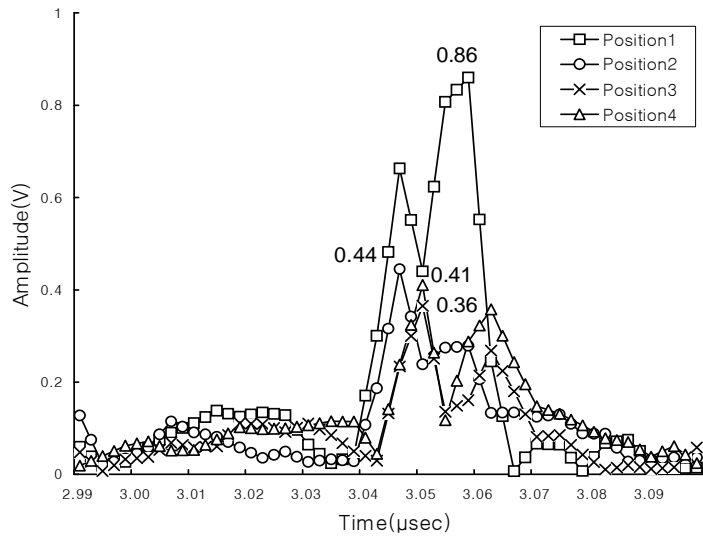
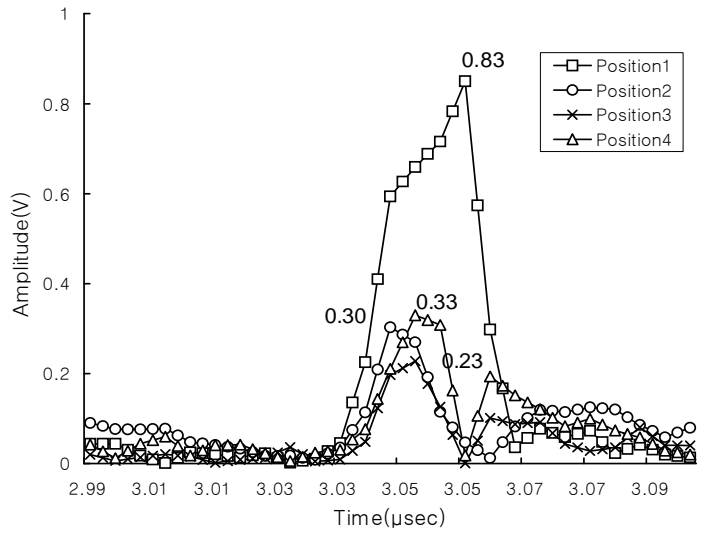


Fig. 19 Ultrasonic Signal by Position of when Diameter 2mm Flaw

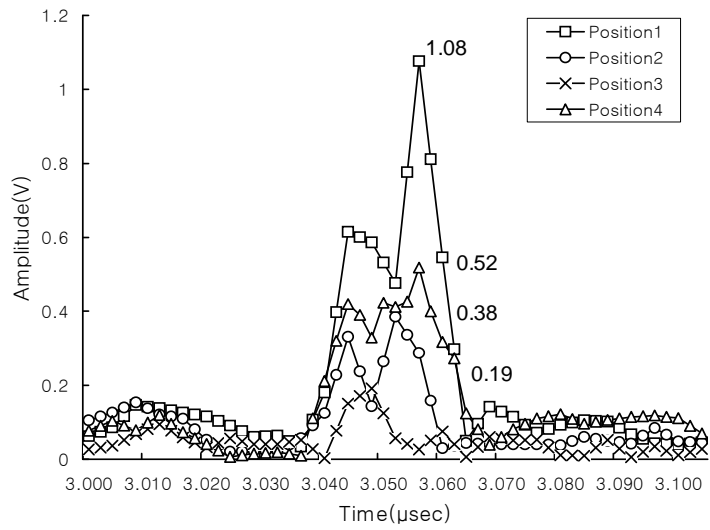


(a) Flaw Diameter 2 mm

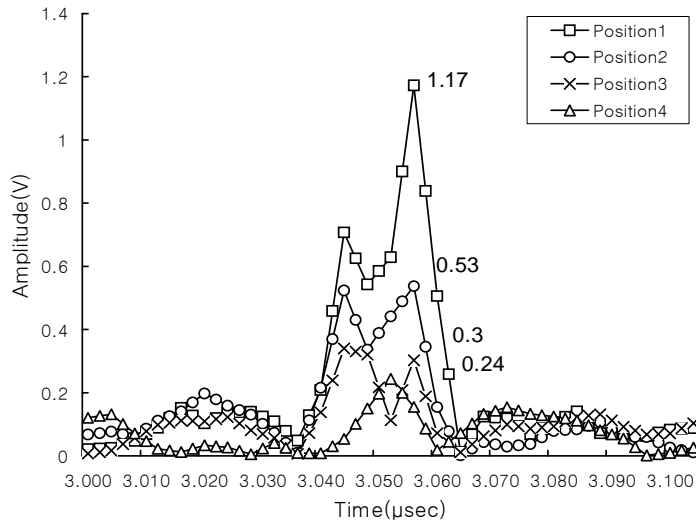


(b) Flaw Diameter 3 mm

Fig. 20 Comparison of 3L Ultrasonic Signal by Flaw Diameter



(c) Flaw Diameter 4 mm



(d) Flaw Diameter 5 mm

Fig. 20 Comparison of 3L Ultrasonic Signal by Flaw Diameter



균열의 경우는 Fig. 21과 같이 균열의 깊이가 5, 10, 15, 20 mm로 증가할 때 수신된 신호의 진폭값을 비교해 보면 그 진폭값이 균열이 증가할수록 급격하게 감소함을 관찰할 수 있다. 이것은 레이저의 펄스에너지 성분이 균열의 깊이가 깊어질수록 입사된 펄스에너지가 균열 선단과 표면에서 입사 초음파와 수직인 균열면에 의해 거의 소실된다. 또한 결함이 시작하는 지점부터는 균열에 의해서 L과 3L 신호 사이에 전파시간이 결함의 깊이에 비례하여 커짐을 볼 수 있는데 이는 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 초음파의 전파 거리고 비례하여 증가함 때문이다. Table 6에는 결함의 깊이별 초음파 전파 시간과 L과 3L 사이의 시간차를 나타내었고 Table 7에는 각 종파 사이의 시간차를 결함의 깊이 즉 전파 거리에 따라 계산하고 이를 일반적인 SM45C 내부에서의 종파 전파 시간과 비교하여 보았다. 그 결과 종파의 속도 9,894m/sec에서 거의 차이가 없음을 확인 하였다.

이것으로서 결함의 유무를 확인할 수 있었고 결함의 크기 또한 추정이 가능하였다. Table 8은 결함의 유무를 확인할 수 있는 특징변수를 나타낸 것이다. 원형결함(기공)의 경우 레이저 빔이 결함부로 접근해감에 따라 결함의 2mm전 지점에서 크랙의 경우보다 초음파 신호의 산란으로 인하여 5L의 신호들이 나타나지 않았지만 크랙의 경우에는 5L 신호들이 선명하게 나타남을 확인할 수 있었다. 그리고 크랙 선단부에서는 다중반사 신호가 나타났지만 원형결함의 경우는 산란으로 인하여 다중반사 신호가 나타나지 않았다.

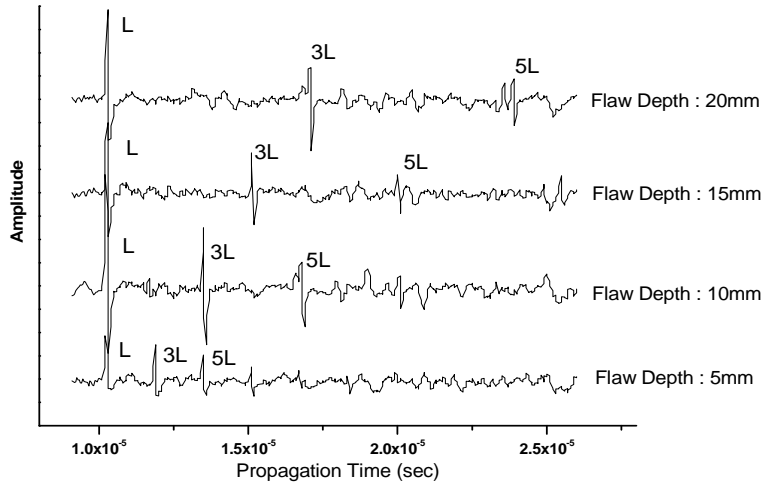


Fig. 21 Ultrasonic Wave Signal by Each Flaw Depth in Position 8

Table 6 Propagation of Longitudinal Wave and Difference Time

Flaw Depth	Ultrasonic Propagation Time				
	L	3L-L	3L	5L-3L	5L
20	$1.03 \times 10^{-5}$	$0.68 \times 10^{-5}$	$1.71 \times 10^{-5}$	$0.65 \times 10^{-5}$	$2.36 \times 10^{-5}$
15	$1.03 \times 10^{-5}$	$0.48 \times 10^{-5}$	$1.51 \times 10^{-5}$	$0.49 \times 10^{-5}$	$2.00 \times 10^{-5}$
10	$1.02 \times 10^{-5}$	$0.33 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$	$0.33 \times 10^{-5}$	$1.68 \times 10^{-5}$
5	$1.02 \times 10^{-5}$	$0.17 \times 10^{-5}$	$1.19 \times 10^{-5}$	$0.16 \times 10^{-5}$	$1.35 \times 10^{-5}$

Table 7 Comparison Longitudinal Wave Velocity in SM45C and Detecting Wave Velocity

Propagation Time	Propagation Distance(mm)	Time difference (sec)	Velocity (m/sec)	Error (vs 5,894m/sec)
3L-L	40	$0.68 \times 10^{-5}$	5,882	0.2%
	30	$0.48 \times 10^{-5}$	6,250	6.0%
	20	$0.33 \times 10^{-5}$	6,060	2.8%
	10	$0.17 \times 10^{-5}$	5,882	0.2%
5L-3L	40	$0.65 \times 10^{-5}$	6,154	4.4%
	30	$0.49 \times 10^{-5}$	6,122	3.8%
	20	$0.33 \times 10^{-5}$	6,060	2.8%
	10	$0.16 \times 10^{-5}$	6,250	6.0%

Table 8 Characteristic of Flaw wave

Characteristic	Case I	Case II	Test domain
Multi Reflected of Longitudinal	5L (×)	5L (○)	Time
Longitudinal Amplitude	Low	High	
Multi Reflected of Defect Signal	○	×	
Amplitude of Frequency Signal	Low	High	Frequency

◎ Case I : With Flaws

○ Case II : Without Flaws

결함의 크기에 따라 수신된 초음파 크기가 비례한다고 가정하면 최대 신호로부터 결함의 크기를 알 수 있으며, 노이즈 레벨보다 작아지는 지점을 찾음으로써 검출 가능한 최소 크기를 추정할 수 있다.

Fig. 22는 Position별 결함의 크기에 따른 초음파 신호와 결함의 크기에 따른 회귀선도를 같이 나타내고 있다.

본 연구에서 사용한 회귀선도에 대한 수식은 다음과 같다.

$$y = y_0 + A_1 e^{-x_d/t_1} \quad (17)$$

위 식을 이용하여 회귀분석한 결과 각각의 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

$$y = 0.2456 + 2.45545 e^{-x_d/0.72875} \quad (18)$$

여기서  $y$ 는 초음파 신호의 amplitude 값이고  $x_d$ 는 결함의 직경이다.

( Error :  $y = \pm 0.33$ ,  $A_1 = \pm 4.84$ ,  $t_1 = \pm 0.55$  )

이러한 회귀선도는 결함의 크기와 초음파의 강도가 매우 높은 상관관계를 갖는다는 것을 보여주고 있다. 따라서 상대강도의 크기로부터 결함의 크기를 추정하는 것이 가능하며, 회귀선도의 기울기가 클수록 결함크기를 더 높은 정확도로 추정할 수 있다.

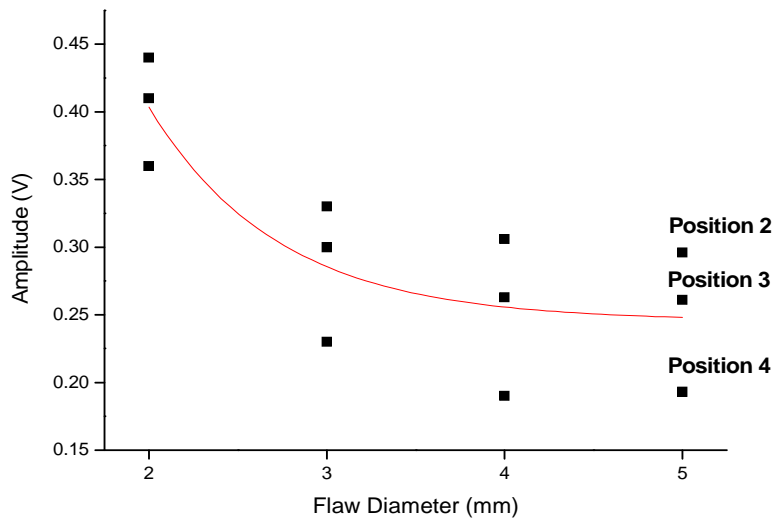


Fig. 22 Amplitude Value by Flaw Size and Regression Curve

## 제 5 절 요약

본 장에서는 레이저를 이용하여 금속 내부에서 초음파를 발생시키는 메커니즘에 대해 알아보았고, 레이저에 의해 발생된 종파와 횡파를 이용하여 결함을 내포한 인공시험편에 대해 초음파 탐상 실험을 하였다.

F-P 간섭계를 이용하여 비접촉으로 초음파 결함 신호를 수신하였으며, 수신된 초음파를 분석함으로써 레이저를 이용한 초음파 탐상의 유용성 검증을 시도하였으며 이를 요약하면 다음과 같다.

(1) 레이저에 의해 발생되어진 초음파 신호를 Fabry-Perot 간섭계를 이용하여 비접촉으로 측정된 속도 파형과 기존의 PZT 방법으로 측정된 초음파의 속도 파형과 비교하여 일치함을 확인함으로써 레이저를 이용한 초음파의 유용성을 검증하였다.

(2) Fabry-Perot 간섭계를 활용하여 비접촉으로 초음파 신호를 측정함으로써 기존의 접촉식 방법들이 가지고 있었던 문제점을 해결 할 수 있었다.

(3) 열탄성 영역과 용발영역에서 종파와 횡파의 전파각도를 확인하였고, 이를 이용하여 결함의 형상에 따른 결함의 검출이 가능하였다.

(4) 인공결함으로부터 얻어진 신호를 분석하고 결함과 신호간의 관계를 회귀분석을 통하여 얻어냄으로써 결함 신호의 크기와 전파 시간에 따른 결함의 크기와 위치 분석이 가능함을 알 수 있었다.

(5) 위와 같은 결과로써 초음파를 이용한 레이저 유도 초음파법은 비접촉 비파괴 탐상으로 그 유용성을 검증하였으나 시편의 표면상태에 따라 영향을 많이 받고 수신율 향상을 위하여 용발영역에서 실험을 실시하여 시편의 표면에 손상을 남기는 단점도 확인할 수가 있었다.

## 제 3 장 레이저에 의한 Lamb파의 발생 메커니즘

2장에서는 종파와 횡파를 이용하는 기존의 접촉식 초음파 탐상이 가지는 여러 가지 단점을 해소하기 위해 레이저를 이용한 초음파 발생과 발생된 Bulk Wave를 내부 결함 탐상에 응용하여 보았다.

그러나 2장에서 실시한 시험에 사용한 인공시험편의 두께는 판재로 보기에 어렵고, 초음파 전파 특성으로 얇은 판재에서의 결함 신호 분석은 기술적으로 어려움이 따른다. 또한 레이저를 한 점에 집중시켜 초음파를 발생시키는 방법은 초음파의 에너지가 특정 방향으로 전파하지 못하고 흩어져 발생한 초음파가 매우 미약하여 신호 대 잡음비가 높다.

본 장에서는 판재에서의 결함 측정시 가장 유용하다고 알려진 Lamb파의 특성을 알아보기 위하여 평판에서의 경계조건과 지배방정식으로부터 Lamb파의 특성분석을 가능하게 하는 Rayleigh-Lamb의 주파수관계식에 대해 알아보고, 유도된 주파수관계식의 해를 수치적으로 계산하여 위상 및 군속도에 대한 분산선도를 구하여 보고자 한다.

또한 구해진 분산선도를 이용하여 레이저에 의해 발생시킬 수 있는 Lamb파의 모드와 주파수를 예측하고, 실험을 통하여 예측한 모드와 일치하는지의 여부를 확인하고자 한다.

## 제 1 절 Rayleigh-Lamb 주파수관계식과 분산선도

유도초음파(Guided wave)는 특정한 경계면을 따라 전파하는 탄성파의 한 종류로 일반적인 벌크파의 가장 큰 차이점은 경계조건의 유무에 있다. 벌크파의 경우 어떠한 경계조건도 없는 무한한 공간상을 전파한다고 가정하기 때문에 지배방정식만 만족하면 된다. 반면, 유도초음파의 해는 지배방정식은 물론 경계조건도 만족해야만 한다. 따라서 많은 경우 유도초음파에서는 해석해가 아직 규명되지 않는 경우가 많다. 또한, 벌크파가 주로 종파와 횡파 정도의 진동모드를 갖는데 반해, 유도초음파에서는 매우 다양한 모드를 갖는다. 또한, 각 모드별로 주파수에 따라 전파속도가 달라지는 특성을 갖는데, 이를 속도 분산성이라고 한다. 이처럼 많은 모드가 발생하면서 동시에 각 모드별로 수신하고 해석하기가 매우 어렵다.

따라서 평판에서 전파하는 유도초음파인 Lamb파를 이용하기 위해서는 발생하는 모드를 분석하고 선별해야할 필요가 있다. 여기서는 Lamb파가 갖는 경계조건들을 고려하여, 연속방정식과 운동방정식, 응력-변위관계식으로부터 다음과 같이 Rayleigh-Lamb 주파수 관계식으로 알려진 식을 유도하고 이로부터 발생하는 모드들에 대한 분산선도를 구하였다.<sup>33)</sup>

운동방정식

$$\sigma_{\ddot{u}_{i,j}} + \rho f_j = \rho \ddot{u}_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (19)$$

변위-변형률 관계식

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (20)$$



등방성 재료에서의 연속방정식

$$\sigma_{i,j} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (21)$$

여기서,  $\sigma$ 는 응력,  $\rho$ 는 밀도,  $f$ 는 단위체적당 작용하는 힘,  $\varepsilon$ 는 변형률  $u$ 는 변위,  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 Lamé 상수이다.

위 식들로부터 응력과 변형률에 대한 항들을 소거하면,

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{i,jj} + \rho f_i = \rho \ddot{u}_i \quad (22)$$

식(22)으로부터 Helmholtz 디컴포지션에 의해 다음과 같이 두개의 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (\text{Longitudinal Wave}) \quad (23)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_3^2} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (\text{Shear Wave}) \quad (24)$$

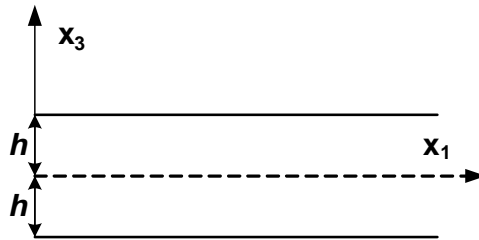


Fig. 23 Geometry of the Free Plate Problem

Fig. 23 에는 이러한 지배방정식을 적용하고자 하는 평판의 형상에 대해 설명하고 있다. 평면변형률로 가정한다면 변위와 응력은 포텐셜의 항으로 다음과 같이 나

타낼 수 있다.

$$u_1 = u = \frac{\partial \Psi}{\partial x_1} + \frac{\partial \Psi}{\partial x_3} \quad (25)$$

$$u_2 = 0 \quad (26)$$

$$u_3 = \frac{\partial \Psi}{\partial x_3} - \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \quad (27)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_3^2} \right) \quad (28)$$

$$\sigma_{33} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \quad (29)$$

(23)과 (24)의 해를 다음과 같은 형태라고 가정하자.

$$\Phi = \Phi(x_3) \exp[\lambda(kx_1 - \omega t)] \quad (30)$$

$$\Psi = \Psi(x_3) \exp[\lambda(kx_1 - \omega t)] \quad (31)$$

위 식들을 식(23)과 (24)에 대입하면 다음과 같이 각 파동의 진폭에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\Phi(x_3) = A_1 \sin(\beta x_3) + A_2 \cos(\beta x_3) \quad (32)$$

$$\Psi(x_3) = B_1 \sin(q x_3) + B_2 \cos(q x_3) \quad (33)$$

여기서,  $\beta^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2$ ,  $q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2$ ,  $\omega$ 는 각주파수,  $k$ 는 파수(Wave number),  $c_L$ 은 종파속도,  $c_T$ 는 횡파속도,  $k$ 는 평판의 중심으로부터 표면까지의 거리(평판 두께의 1/2)를 나타낸다. 파수  $k$ 는 수치적으로  $\omega/c_\beta$ 와 같다. 식 (32)와 (33)를 식(25)~

(29)에 대입하고  $\exp[i(kx_1 - \omega t)]$ 을 생략하여 표현하면 다음과 같다.

$$u_1 = \left[ ik\Phi + \frac{d\Psi}{dx_3} \right] \quad (34)$$

$$u_3 = \left[ \frac{d\Phi}{dx_3} - ik\Psi \right] \quad (35)$$

$$\sigma_{33} = \lambda \left( -k^2\Phi + \frac{d^2\Phi}{dx_3^2} \right) + 2\mu \left( \frac{d^2\Phi}{dx_3^2} - ik \frac{d\Psi}{dx_3} \right) \quad (36)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left( 2ik \frac{d\Phi}{dx_3} + k^2\Psi + \frac{d^2\Psi}{dx_3^2} \right) \quad (37)$$

여기서 복소수항으로 나타나는  $x_1$ 방향으로의 변위가  $x_1$ 에서 코사인항으로 표현된다면 평판의 중심점에 대해 대칭적인 움직임을, 반대로  $x_1$ 에서 사인항으로, 표현된다면 비대칭적인 움직임을 나타내게 된다. 반면, 실수항으로 나타나는  $x_3$  방향의 변위에 대해서는 그 역이 성립한다. 따라서 이러한 관계로부터 파동전파 모드를 다음과 같이 대칭, 비대칭의 두 부류로 나눌 수 있다.

#### ◇ Symmetry Mode

$$\Phi = A_2 \cos(px_3)$$

$$\Psi = B_1 \sin(qx_3)$$

$$u = u_1 = ikA_2 \cos(px_3) + qB_1 \cos(qx_3)$$

$$w = u_3 = -pA_2 \sin(px_3) - ikB_1 \sin(qx_3)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left[ -2ikpA_2 \sin(px_3) + (k^2 - q^2)B_1 \sin(qx_3) \right]$$

$$\sigma_{33} = -\lambda(k^2 + p^2)A_2 \cos(px_3) - 2\mu \left[ p^2 A_2 \cos(px_3) + ikqB_1 \cos(qx_3) \right] \quad (38)$$

◇ Antisymmetry mode

$$\Phi = A_1 \sin(\rho x_3)$$

$$\Psi = B_2 \cos(q x_3)$$

$$u = u_1 = ikA_1 \sin(\rho x_3) - qB_2 \sin(q x_3)$$

$$w = u_3 = \rho A_1 \cos(\rho x_3) - ikB_2 \cos(q x_3)$$

$$\sigma_{31} = \mu[2ik\rho A_1 \cos(\rho x_3) + (k^2 - q^2)B_2 \cos(q x_3)]$$

$$\sigma_{33} = -\lambda(k^2 + \rho^2)A_1 \sin(\rho x_3) - 2\mu[\rho^2 A_1 \sin(\rho x_3) - ikqB_2 \sin(q x_3)] \quad (39)$$

여기서 경계조건  $x_3 = \pm d/2 = \pm h$ 에서  $\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0$ 을 적용하여 정리하면, 다음과 같은 Rayleigh-Lamb 주파수 관계식을 얻을 수 있다.

$$( \text{Symmetric Mode} ) \quad (40)$$

$$( \text{Antisymmetric Mode} ) \quad (41)$$

이러한 Rayleigh-Lamb 주파수관계식은 19세기 말에 처음으로 유도된 바 있으며, 이후 여러 방법에 의해 유도되었으나 변위포텐셜법을 이용한 Achenbach와 파셜웨이브법의 Auld에 의한 방법이 가장 유명하다. 이 주파수관계식의 해는 수치적인 방법으로만 풀 수 있는 것으로 알려져 있다. 여기서  $h$ 는 복소수로 허수부가 양수일 경우 전파하면서 파동이 지수적으로 증가하며, 음수인 경우에는 감쇠, 0인 경우는 에너지가 보존되는 것으로 해석할 수 있다.

파동에 감쇠나 증가가 없는 것으로 가정하여 파수  $kh$ 가 실수부만으로 구성된다 고 가정하면, 위의 두 식을 수치해석을 위해 다음과 같이 변형시킬 수 있다.

$$\frac{\tan(qh)}{q} + \frac{4k^2 p \tan(ph)}{(q^2 - k^2)^2} = 0 \quad (\text{Symmetric Mode}) \quad (42)$$

$$q \tan(qh) + \frac{(q^2 - k^2)^2 \tan(ph)}{4k^2 p} = 0 \quad (\text{Antisymmetric Mode}) \quad (43)$$

이러한 가정하에, 다음단계를 거쳐 수치적으로 해를 구할 수 있다.

- (1) 주파수와 두께의 곱( $\omega h$ )을 선택한다.
  - (2) 위상속도 ( $c_p$ )<sub>0</sub>를 결정한다.
  - (3) ( $\omega h$ )값과 ( $c_p$ )값을 이용하여 식 (42)와 (43)에서 좌항값의 부호를 확인한다.
  - (4) ( $c_p$ )<sub>1</sub> > ( $c_p$ )<sub>0</sub>인 다른 위상속도를 선택하여 식 (42)와 (43)의 좌항값의 부호를 확인한다.
  - (5) (3)단계와 (4)단계의 과정을 부호가 바뀔때까지 반복한다. 연속함수이므로 부호가 바뀐 지점에서 그 사이에 0 점을 포함하게 된다. 부호가 바뀐 지점에서의 위상속도를 각각 ( $c_p$ )<sub>n</sub> 과 ( $c_p$ )<sub>n+1</sub> 이라고 하자.
  - (6) 뉴턴-랩슨법이나 바이섹션법과 같은 알고리즘을 이용하여 ( $c_p$ ) <  $c_p$  < ( $c_p$ )<sub>n+1</sub> 사이에 존재하는 최대한 0 에 접근하는 정확한 위상속도값을 구한다.
  - (7) 하나의  $\omega h$  값에서 여러 모드의 위상속도가 존재하므로 (2)에서 (6)의 과정을 반복한다.
  - (8) 다른  $\omega h$  값에 대해서도 (2)와 (7)사이의 단계를 반복한다.
- 이러한 단계를 거쳐 완성되어진 분산곡선을 Fig. 24에 나타내었다.

한편 위상속도의 분산성으로 인해 유사한 주파수를 가진 한 무리의 파동이 전파하는 경우 실제 파동의 전파속도는 위상속도와 다르게 된다. 이러한 현상은 군속도의 개념을 이용하여 설명할 수 있는데, Stokes는 아주 근접한 주파수 성분을 갖는 두 파동을 이용하여 군속도에 대해 다음과 같이 설명하였다.

위상속도의 분산성으로 인해 유사한 주파수를 가진 한 무리의 파동이 전파하는 경우 실제 파동의 전파속도는 위상속도와 다르게 된다. 이러한 현상은 군속도 개념을 이용하여 설명할 수 있다. 군속도는 위상속도로부터 구할 수 있다.

$$c_g = -\frac{d\omega}{dk} \quad (44)$$

$k = \omega/c_p$ 이므로 이를 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} c_g &= d \left[ d \left( \frac{\omega}{c_p} \right) \right]^{-1} \\ &= d \left[ \frac{d\omega}{c_p} - \omega \frac{dc_p}{c_p^2} \right]^{-1} \\ &= d \left[ c_p - \omega \frac{dc_p}{d\omega} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (45)$$

(45)식에서  $\omega = 2\pi/f$ 를 이용하여 다음과 같이 수식을 다시 쓸 수 있다.

$$c_g = d \left[ c_p - (fd) \frac{dc_p}{d(fd)} \right]^{-1} \quad (46)$$

여기서  $fd$ 는 주파수와 판의 두께의 곱이다.  $c_p$ 의 미분계수가 영(Zero)이 될 때  $c_g = c_p$ 이다. 또한  $c_p$ 의 미분계수가 무한대로 접근하면  $c_g$ 는 영(Zero)이 된다.

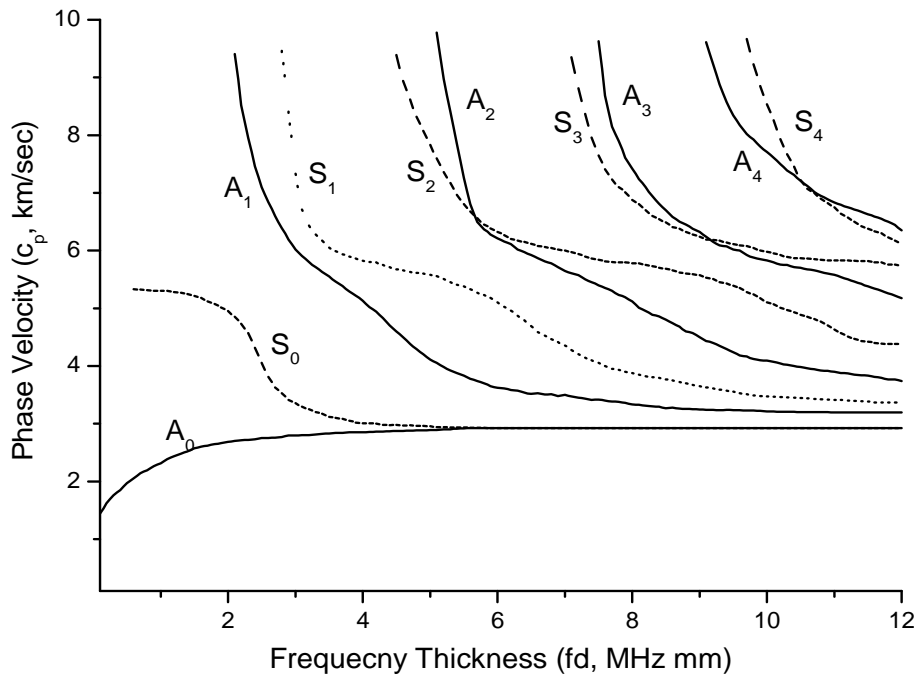


Fig. 24 Dispersion Curves for an Steel Plate

## 제 2 절 파장 매칭법을 이용한 Lamb파 발생

레이저를 이용한 초음파 발생시 레이저를 점 형태로 시험편에 조사하면 원형태로 초음파가 전파하기 때문에 일정 거리 이상 떨어진 위치에서의 초음파 세기는 거리에 비례하여 약해지게 된다. 이를 개선하기 위하여 레이저를 특정 형태의 슬릿에 투과시켜 점형태의 레이저 소스가 아니라 선형태로 바뀌춤으로서 발생하는 초음파도 슬릿과 동일한 선형이 되어 발생되게 된다. 이때 발생하는 초음파는 선형에 수직인 방향으로 전파하는 방향성을 갖게 된다. Fig. 25는 선형 슬릿을 이용시 초음파의 전파 방향을 나타내고 있다.

그리고 이렇게 발생된 초음파는 재료가 가지는 분산성으로 인해 상당히 넓은 영역의 주파수 성분을 내포하고 매우 다양한 모드가 존재한다. 또한 각각의 모드에서도 주파수의 변화에 따라 속도도 모두 다르다는걸 1절에서 확인하였다.

이처럼 다양한 모드가 동시에 발생하게 되면 비파괴검사에 이용하기 위한 분석이 매우 어려우므로 발생하는 모드와 주파수를 선택할 수 있어야 한다.

레이저에 의해 발생 Lamb파를 선택하는 방법은 펄스폭이 매우 짧은 레이저를 발생시키고자 하는 Lamb파의 주파수에 맞춰서 조사함으로써 특정 위상속도에 맞는 Lamb파를 발생시키는 방식, 레이저 조사 경로차에 의해 발생한 간섭무늬 패턴을 위상 속도에 맞춰 스캐닝 함으로써 간섭무늬 패턴의 간격과 파장을 일치시키고 동시에 위상속도를 조절함으로써 위상속도와 파장을 동시에 조절하는 방법<sup>16)</sup>, 선형 소스를 여러개 등간격으로 배열하여 조사함으로써 선형소의 간격과 일치하는 파장의 Lamb파를 발생시키는 방식 등이 있다. 이중 선형소스의 배열방법이 다른 방식에 비해 구조적으로 간단하며, 배열간격의 조절을 통해 쉽게 발생파장을 선택할 수 있다.

선형 배열 슬릿을 통과한 레이저에 의해 발생된 초음파는 인접한 다른 슬릿에서 발생한 파형과 중첩되어 전체적으로는 일정한 파장을 발생시키는 결과를 보인다. 따라서 발생하는 초음파의 주파수 영역은 제한되고 수신신호를 해석하는 것이

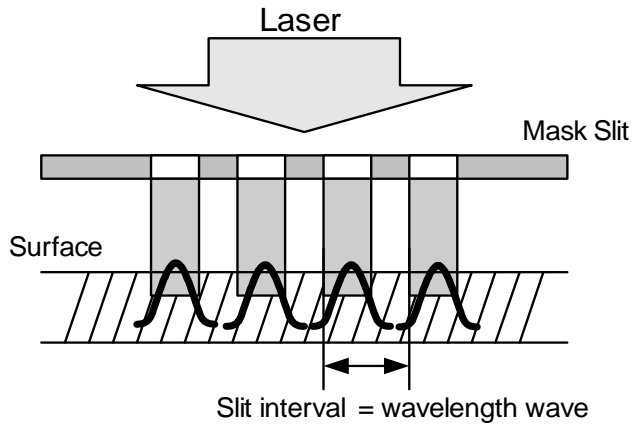


보다 용이해진다. 이러한 방법을 파장 매치법(Wavelength Matching Method)이라 한다.

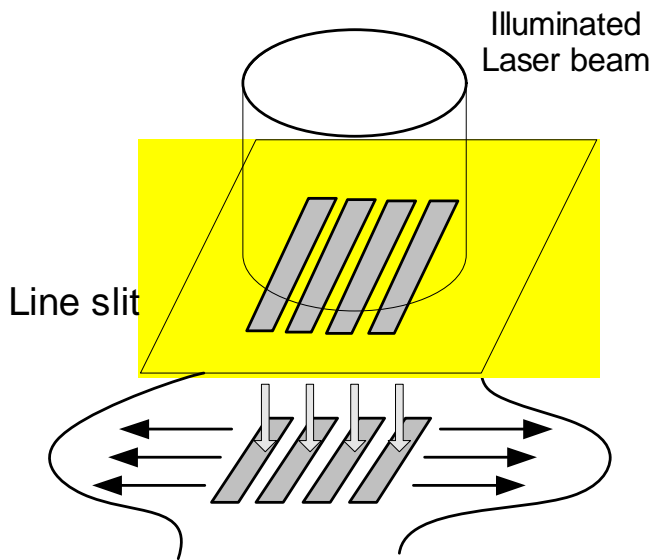
파장 매치법을 이용하여 발생하는 Lamb파의 모드를 제한할 수 있으며 발생하는 주파수와 모드는 위상속도의 분산선도로부터 예측 할 수 있다. 즉 파장을  $\lambda$ , 주파수를  $f$  판의 두께를  $d$  라 하면 위상속도  $c_p$ 는

$$(47)$$

로 나타낼 수 있다. 이 식으로부터 위상속도는 분산선도 상에서  $\lambda/d$ 를 기울기로 하는 직선으로 나타내며, Fig. 26에서 보는 것과 같이 직선과 분산선도상의 각각의 모드를 나타내는 곡선들과 교차하는 지점에 해당하는 Lamb파가 발생하게 되면 이 지점에서의  $f/d$ 값을 두께  $d$ 로 나눔으로써 발생하는 모드와 발생 주파수를 이론적으로 계산할 수 있다.



(a) Generation of Signal Wavelength Wave



(b) Lamb Wave Source Generated by Line Array Slit

Fig. 25 Wavelength Matching Method

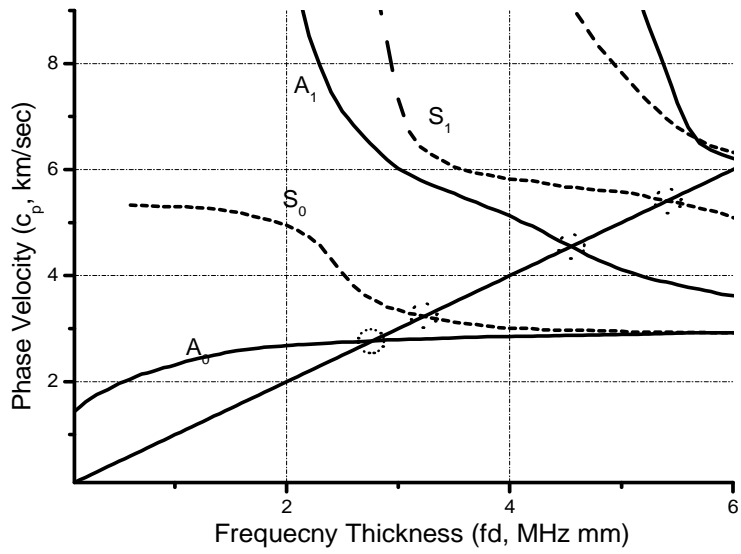


Fig. 26 Lamb Waves of Which Dispersion Curves Meet with the Wavelength  
Line

### 제 3 절 레이저 유도 Lamb파의 모드 확인

#### 1. Lamb파 계측 시스템 구성

등간격의 원호배열 슬릿을 통과한 레이저가 시험편의 표면에서 예측한 주파수의 모드가 발생하는지의 여부를 확인하기 위해 ACT를 사용하여 발생된 Lamb파를 측정하였다.

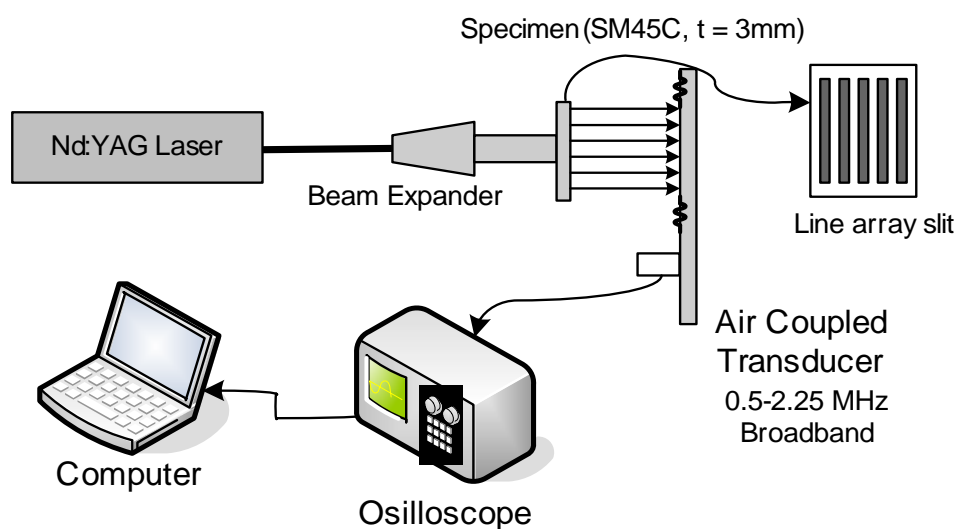


Fig. 27 Experimental Setup for Detecting Lamb Wave

Fig. 27은 선형배열 슬릿을 이용한 Lamb파의 발생 및 측정을 위한 구성도이다. 파장 1064 nm, 펄스폭 20 ns, 입사에너지 100 mJ 의 Nd:YAG 펄스레이저를 사용하여 Lamb파를 발생하였다. 사용한 레이저의 에너지는 시험편의 표면을 손상시키기에 충분하지만 선형 배열 슬릿을 통과시키기 위하여 빔폭을 확대시켜 단위면적당 입사 에너지를 감소시켜 시험표면이 손상하는 것을 방지하였다.

실험에 사용한 판재 시험편은 SM-45C 재질의 두께 3 mm를 갖는 판재를 사용하였다. 레이저에 의해 발생한 Lamb파를 수신하기 위하여 수신대역폭이 0.5 ~

2.25 MHz 인 ACT(Air Coupled Transducer)를 사용하였고 수신된 신호는 오실로스코프를 통하여 저장하여 분석하였다. 선형 레이저 소스로 만들기 위한 선형 배열 슬릿은 간격은 2 mm로 하여 레이저에 의해 발생하는 초음파의 파장이 2 mm를 갖도록 하였다.

Fig. 28은 본 연구에서 사용한 라인 배열 슬릿을 나타내었다.

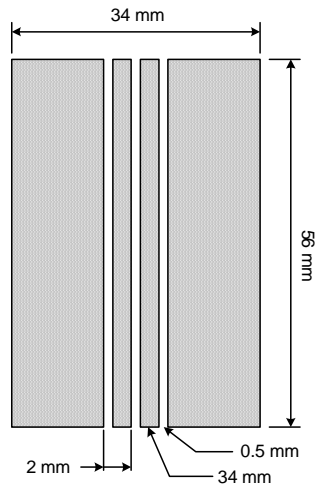


Fig. 28 Ling Array Slit of Wavelength 2 mm for Lamb Wave Generated

## 2. Lamb파 모드 확인

Fig. 30은 Lamb파 측정 시스템으로부터 측정한 Lamb파의 신호를 보여주고 있다. Fig. 29은 이러한 신호의 분산선도와 주파수 영역에서의 분석결과를 보여주고 있다. 분산곡선에서 위상속도와 주파수와 두께의 곱과의 관계를 나타내는 기울기 ( $\lambda/d$ )선과 교차하는 곳에서 Lamb파가 발생되어야 한다.

분산선도에서의 정보를 보면  $A_0$  모드에서는 2.873 km/sec,  $S_0$  모드에서의 위상속도는 2.989 km/sec 이고  $fd$ 값은 4.35, 4.5 이다.

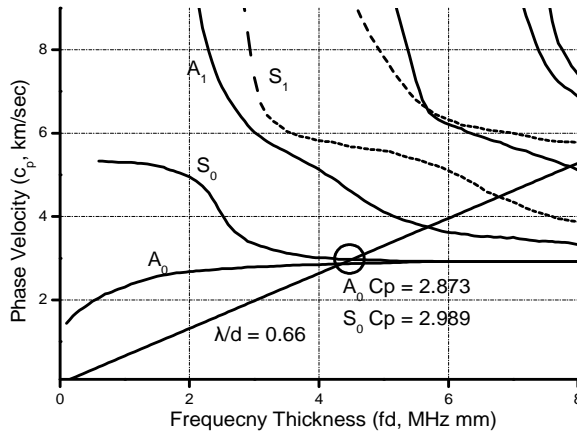


Fig. 29 Phase Velocity by Mode on Dispersion Curves

Fig. 30은 3 mm 두께의 SM45C 판재에서 측정된 Lamb파의 신호를 측정된 실시간 신호를 보여주고 있다. 실시간 신호로부터 주파수가 구분되는 두 신호가 발생하였음을 확인할 수 있다. 제일 앞부분의 신호는 비교적 높은 주파수에 빠른 속도로 전파하는 것으로 보아  $S_0$  모드로 보이며, 그 뒤에 나타난 좀 더 낮은 주파수 성분을 갖는 신호는  $A_0$ 로 모드일 것으로 추정된다.

Fig. 30의 신호를 보면  $A_0$  모드의 신호가  $S_0$  모드의 신호보다 훨씬 큰 에너지를 가지고 있음을 보여주는데, 이는  $A_0$  모드의 Lamb파가 비파괴검사에 응용하기에

더 적절하다는 것을 보여준다.

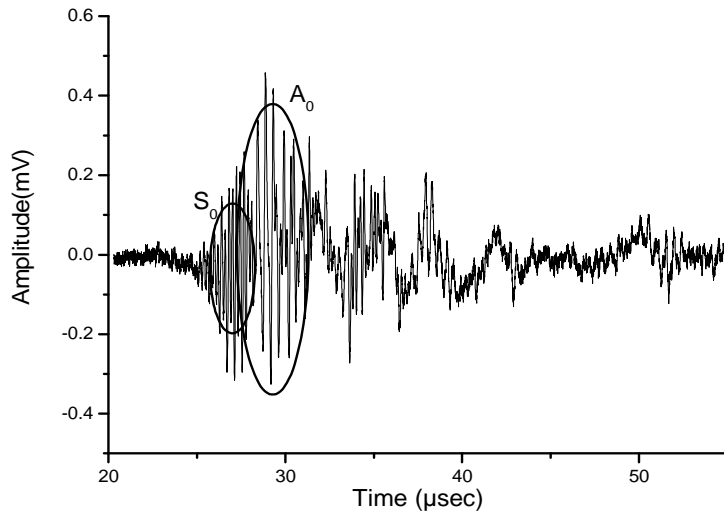


Fig. 30 Real Time Signal of the Lamb Wave

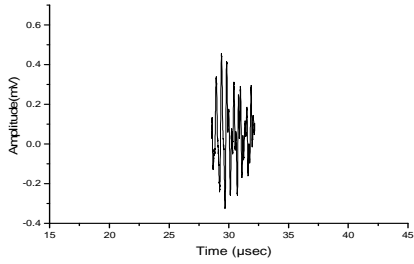
Fig. 31는 각 모드의 주파수 분석 결과를 나타낸다.

레이저에 의해 발생한 Lamb파가 예측한  $A_0$ ,  $S_0$  모드인지를 확인하기 위해 각 신호를 주파수 영역에서 분석하여 예측했던 발생 주파수와 비교하였다.

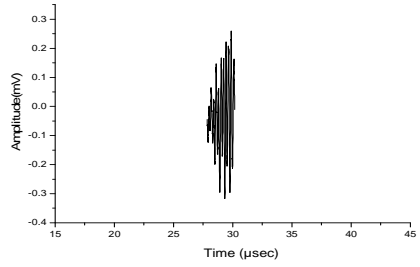
실시간 신호로부터 주파수가 확연히 구분되는 두 신호가 발생하였음을 확인할 수 있는데 신호의 앞부분은 비표적 높은 주파수에 빠른 속도로 전파하는 것으로 보아  $S_0$  모드로 추정할 수 있으며, 바로 뒤에 따라오는 신호는 낮은 주파수와 속도를 갖는 것으로 보아  $A_0$  모드로 볼 수 있다.

$A_0$  모드와  $S_0$  를 비교해 보면  $A_0$  모드가  $S_0$  모드에 비하여 보다 많은 에너지를 가지고 있음을 보여주며, 이로부터  $A_0$  모드가 Lamb파에서 비파괴검사에 이용하기가 적절하다는걸 보여주고 있다.

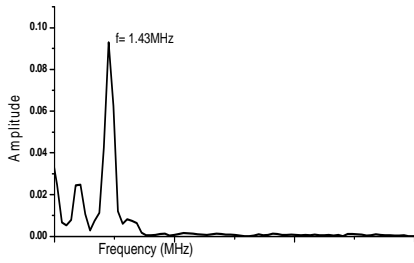
수신한 파형이 분산선도로 예상한  $A_0$ ,  $S_0$  모드인지를 확인하기 위해서는 주파수 성분을 확인해야 한다. 이를 위하여 푸리에 변환을 하여 주파수 성분과 측정된 파형의 군속도를 비교하면 정확한 발생 모드를 확인할 수 있다.



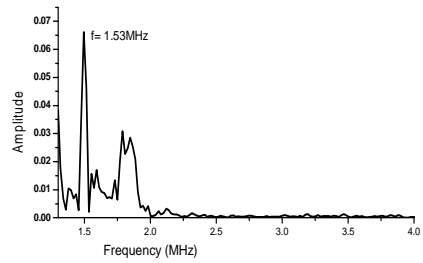
(a)  $A_0$  Mode Ultrasonic Waveform



(b)  $S_0$  Mode Ultrasonic Waveform



(c) FFT Analysis of  $A_0$  Mode Signal



(d) FFT Analysis of  $S_0$  Mode Signal

Fig. 31 Frequency ingredient by Lamb Wave mode and Signal in Time Domain



## 제 4 절 레이저 초음파 수신각의 결정

판재에서 발생하는 유도 초음파는 그 분산성으로 인해 여러 가지 모드의 신호가 같이 전파되기 때문에, 획득된 신호를 해석하는데 있어서 어려움이 있다. 이러한 문제는 2절에서 언급한 파장 매칭법을 이용하여 발생하는 모드를 제한함으로써 어느 정도 개선될 수 있다. 그러나 이러한 과정을 거친 후에도 한 가지 이상의 모드가 동시에 전파되기 때문에 이를 구분할 방법이 요구된다.

비접촉식으로 초음파를 수신하는 방법은 EMAT를 이용하거나, Laser, ACT를 이용하는 방법들이 있다. EMAT는 비접촉식이긴 하나 대상체에 매우 근접해야 하며, Laser를 이용하는 방법은 정밀도는 매우 높으나 낮은 신호대 잡음비와 중복되어 발생하는 여러 모드를 구분할 수 없다는 문제점이 있다 반면, ACT는 대상체에서 수 Cm 떨어진 곳에서 초음파 수신이 가능한 장점이 있다. ACT의 이용은 초음파가 판재를 전파하면서 공기 중으로 누설되는 Leaky Wave를 수신하는 방식이다. 이러한 Leaky Wave는 고체매질에서와는 다르게 종파성분만 존재하며 수신각도에 매우 민감함으로 수신각도가 중요하다.

발생하는 Leaky Wave는 각 모드의 위상속도의 차이로 인해서 발생하는 각도에 차이가 있으며 이 각도는 식 (48)에서 의해 결정된다. 따라서 수신하는 ACT의 각도를 조절하면 혼재되어 발생하는 모드 중에서 원하는 모드만의 수신이 가능하다. 이러한 방법을 수신각 조정(Transducer Angel Tuning)이라 한다.

Fig. 32 에서는 ACT(Air-Coupled Transducer)의 수신각도와 Lamb파의 위상속도의 관계를 보여주고 있다.

$$\Theta = \sin^{-1}\left(\frac{\textit{Acoustic Velocity in air}}{\textit{Phase Velocity of LambWave}}\right) \quad (48)$$

따라서 앞서 언급한 파장 매치법에 의한 유도초음파 발생 기법과 수신각 조정

을 결합함으로써 특정 모드의 유도 초음파를 선택적으로 이용할 수 있다.

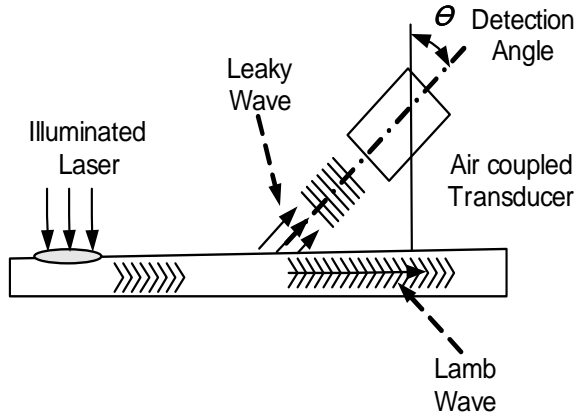


Fig. 32 Radiation of Leaky Lamb Wave and Detection by the Air-Coupled Transducer

과장 매칭법에 의해 발생하는  $A_0$  모드를 대상으로 하여 ACT의 수신각을 6~16°까지 1°씩 단계적으로 변화시키면서 진폭이 가장 클 때의 각도를 수신각도로 하였다. Lamb파는 수신각도의 변화에 따라 수신되는 신호의 모드가 달라지는데 수신각의 변경에 따라  $A_0$  모드는 다른 모드에 간섭을 받지 않고 선별적으로 검출할 수 있는데 반해  $S_0$  모드는  $S_0$  모드를 수신할 수 있는 각도로 변경하여도  $A_0$  모드와 함께 검출된다. 또한  $A_0$  모드의 진폭이 더 크게 수신되는 특징이 있다. 이는 ACT를 이용하여  $A_0$  모드만 선택적으로 수신하는 것은 가능하지만  $S_0$  모드만을 수신하는 것을 사실상 불가능하다는 것을 의미한다. 따라서  $A_0$  모드가  $S_0$  모드에 비해 비파괴검사에 좀 더 적합하다는 것을 보여주고 있다.

## 제 5 절 요약

Rayleigh-Lamb 관계식으로부터 수치적인 방법으로 분산선도로부터 선형배열 슬릿을 통과하여 일정한 파장을 레이저가 발생시킬 수 있는 Lamb파의 모드와 주파수를 예측할 수 있었다.

또한 예측한 Lamb파의 모드와 주파수를 실험을 통하여 비교하기 위하여 레이저 유초 초음파를 발생시킬 수 있는 시스템을 구성하였고 발생된 Lamb파는 ACT를 이용하여 비접촉으로 검출하였다.

(1) 2mm의 파장을 갖도록 슬릿을 설계하였을 때 이론적으로 발생하리라고 예측한 1.45MHz의  $A_0$  모드와 1.5MHz의  $S_0$  모드가 각각 발생하였음을 검출신호와 주파수분석을 통하여 확인하였다.

(2) 검출신호에서  $A_0$ 모드와  $S_0$ 모드를 살펴보면  $A_0$  모드가  $S_0$  모드에 비해 에너지가 크고,  $A_0$  모드는 ACT의 수신각을 조절함으로 선택적으로 수신이 가능하다. 따라서 Lamb파의 여러 모드중에서 비파괴검사에 적합한 모드는  $A_0$  모드이다.

(3) 여러 비접촉 검사법 중에서 ACT를 이용하는 방법이 가장 손쉽게 산업현장에서 응용할 수 있음을 확인하였다.

## 제 4 장 Lamb파를 이용한 판재의 용접부 결함 검출

3장에서는 레이저를 이용한 유도초음파의 일종인 Lamb파의 발생메커니즘과 발생된 Lamb파를 비파괴검사에 응용하고자 Rayleigh-Lamb 주파수관계식을 통한 분산선도에 대해 알아보았다. 발생한 Lamb파는 분산선도에서 볼 수 있듯이 여러 모드가 존재하는데 파장 매칭법과 트랜스듀서의 수직각 조정을 통하여 특정 모드를 선택적으로 결정함으로써 비파괴 검사시 Lamb파를 유용하게 사용할 수 있음을 확인할 수 있었다.

본장에서는 이러한 분석결과를 토대로 판재의 접합법으로 주로 사용하는 용접시 발생하는 용접부의 결함을 대상으로 Lamb파의 결함 검출 능력 평가를 위한 실험을 실시하였다. 실험에 사용한 시험편은 3mm 두께를 갖는 SM45-C와 SUS304를 Nd:YAG 레이저를 이용 맞대기 용접하여 제작하였다.

결함 검출시 사용한 센서로는 ACT를 사용하였고 기본적인 초음파 탐상법인 투과법을 이용하여 결함의 유무를 확인하였다.

# 제 1 절 결함 탐상 시스템 구성 및 실험 방법

## 1. 판재 용접부 결함 검출을 위한 실험장치 구성

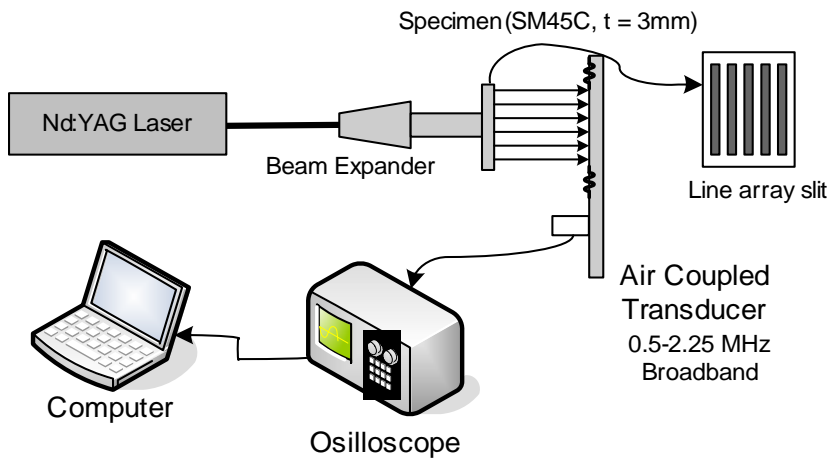


Fig. 33 Experimental Setup for Flaw Detection by Lamb Wave and Air Coupled Transducer

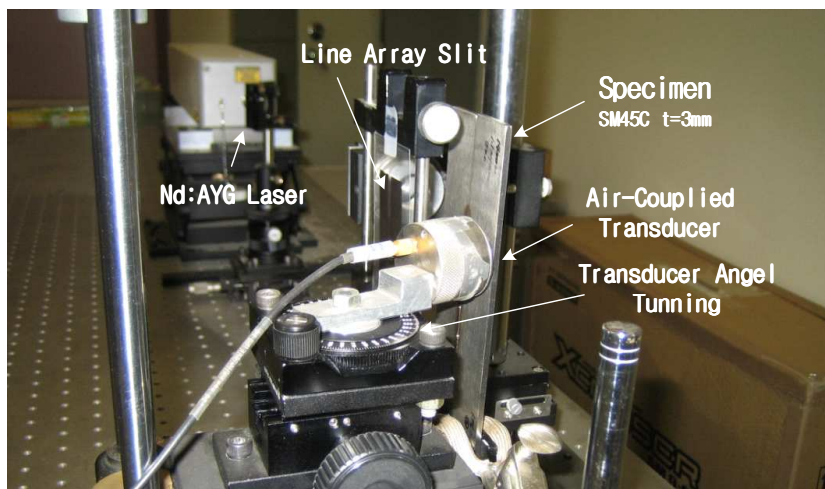


Fig. 34 Lamb Wave Generation and Detecting Part of Experimental Setup

Fig. 33과 Fig. 34는 판재 용접부에 존재하는 결함을 검출하기 위해 사용한 실험장치의 구성을 보여주고 있다. 대부분의 구성은 3장에서 사용된 시스템과 동일하다.

열 발생원으로 Q-스위칭된 Nd:YAG 레이저를 사용하였고, 레이저의 시간폭은 20 ns, 파장은 1064 nm인 레이저를 사용하였다. 결함 신호의 검출은 ACT를 이용하여 수신하였다. ACT는 앞에서 언급했듯이 Lamb파의 발생과 수신을 비접촉식으로 수행하기 위하여 선택하였다. ACT의 이용은 다른 비접촉식 방법에 비해 시편 표면이 오염여부에 관계없이 사용 가능하고, 수신신호의 신호대 잡음비도 상대적으로 우수하며, EMAT와는 달리 비교적 시편과 떨어진 거리에서도 신호의 수신이 가능하다.

3mm 두께의 판재에서  $A_0$ 의 Lamb파를 발생시키기 위하여 선형 배열 슬릿을 제작하여 파장이 2.0mm로 설정하였다. 실험에 사용된 펄스 레이저의 사양과 슬릿의 형태 및 크기는 다음과 같다.

Table 9 Characteristics of Laser and Slit

Item	Characteristics
Laser	Nd:YAG Laser
Wavelength of Laser	1064 nm
Pulse Duration	10 ns
Incident Energy	100mJ
Pulse Repetition Rate	10Hz
Beam Diameter	20 mm
Slit Shape	Line Array
Slit Size	34×56 mm
Wavelength of Lamb Wave	2 mm

## 2. 실험 방법

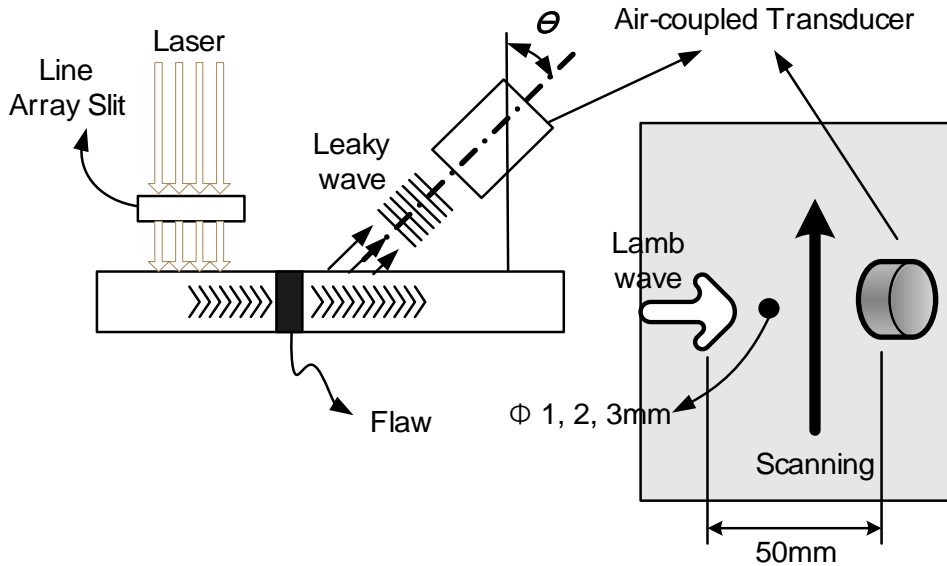


Fig. 35 Flaw Detecting Method by Lamb Wave

Fig. 35는 결함 검출을 위한 실험 방법에 대해 나타내고 있다.

기본적인 초음파 탐상법은 투과법을 이용하여 결함을 검출하였다. 선형 배열 슬릿을 통과한 레이저에 의해 특정 모드 Lamb파를 발생시키고 발생한 Lamb파는 용접부를 통과하여 ACT를 통하여 수신되게 된다. 이때 결함이 없는 용접부는 초음파가 수신되나 결함이 존재하게 되면 결함에 Lamb파가 반사되어 ACT로 수신되는 신호는 없어지거나 약해지게 된다. 이를 이용하여 결함의 유무와 결함의 크기를 추정할 수 있다.

레이저와 ACT는 Lamb파가 진행하는 방향과 일치하게 정렬하고 시험편을 Lamb의 진행방향과 수직방향으로 이동시키면서 결함을 검출하였다.

ACT의 수신각은 3장에서 언급한바와 같이 여러 각도로 수신하여 그중 가장 큰 진폭값을 갖는 수신각을 사용하였다. 본 실험에서는 수신각을  $15^\circ$ 로 하여 Lamb파

를 수신하였다. 수신각은 식(48)에 의하여 수치적으로 구할 수 있으나 본 연구에서 탐상하고자 하는 대상은 용접부가 존재하는 다중 레이어를 가지는 판재이다.

Lamb파가 용접부를 통과할 때 용접부의 용접조건에 따른 표면형상의 변화와 재질의 변화에 따라 Lamb파의 모드가 변하게 된다. 때문에 이론적으로 구한 수신각으로는 정확한  $A_0$  모드의 Lamb파를 수신할 수 없다.



## 제 2 절 시험편 제작

기계구조용 중탄소강인 SM45C는 고주파 담금질에 의해 표면을 경화시키면 피로 강도가 높아져 마모에 강한 기계부품으로 사용할 수 있어 그 용도가 광범위하다.

SM45C를 이용하는 제조라인의 다목적화를 위해 소재가 가지고 있는 고유한 성질을 상실하지 않는 용접공정을 도입하기 위해 요즈음 산업현장에서 레이저 용접에 대한 연구가 진행되고 있다. 레이저 용접은 고에너지 밀도 열원에 의해 단시간에 용융, 응고 과정이 진행되기 때문에 일반용접에 비해 종횡비(Aspect Ratio)가 대단히 크고, 용입깊이가 깊고, 열영향부(Heat Affected Zone: HAZ)가 작은 용접을 할 수 있다. 레이저용접은 용가재를 사용하지 않는 용접방법으로 높은 출력밀도로 매우 짧은 시간 내에 용접하기 때문에 적절한 열확산과 적은 내부응력을 형성하여 용접변형이 적다. 그래서 레이저 용접은 일반용접에 비해 금속조직이나 기계적 성질측면에서 모재에 영향을 미치는 부분이 매우 작아 우수한 평가를 받고 있다.

그러나 레이저 용접은 공정변수에 민감하다는 문제점이 있다. 레이저 용접에서 용접공정변수로는 레이저빔의 출력, 레이저빔 이송속도, 초점거리, 보호가스의 유량 및 종류, 레이저빔의 파장 및 재질에 따라 용접결과가 다양하게 나타나기 때문이다.

이와 같이 레이저용접은 고출력, 빠른 속도로 용접하는 장점이 있지만, 주위조건의 변화에 따라 용접 건전성이 달라지기 때문에 용접 공정변수 변화에 대한 용접성 평가가 중요하다. 용접의 건전성을 평가하기 위해 용접후 단면을 절단해서 관찰하면 생산성에 많은 문제가 있고, 용접중 재료내부에서 일어나는 현상을 직접 관찰을 하는 것은 어렵다. 따라서 레이저 용접부에 대한 건전성 평가로 비파괴평가법 적용이 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 위와 같은 필요성으로 SM45C를 레이저 용접하여 용접부에 존재

하는 결함을 비파괴적으로 검출하기 위하여 다음과 같은 시편을 제작하였다.

SM45C의 기계적 성질은 밀도 ( $\rho$ )  $7.85g/cm^3$ , 인장강도  $48Kgf/mm^2$ , 연신율 20% 이다. 시편의 가로×세로×두께가  $150 \times 30 \times 3$  mm 크기로 절단하여 비드온플레이트(Bead-on-Plate)용접을 실시하였고, 각각의 시편은 레이저 용접 전에 시편의 표면을 아세톤으로 세척한 후 건조시켜 시편 표면의 이물질을 깨끗이 제거하였다.

시편을 용접하기 위하여 사용한 Nd:YAG 레이저의 파장은  $1.06\mu m$ 이고, 최대출력은 2.8kW이다. 평균유효출력은 2kW인 연속파이고, 레이저빔은 직경이  $600\mu m$ 인 Step-Index-type 광섬유를 통해서 전달된다. 작업대는 겐트리 타입으로 회전축이 부착되어 있는 가공장치로서 x, y, z 축 이송거리는  $1000mm \times 500mm \times 400mm$ 이며, x축, y축에 대한 위치정밀도는  $\pm 5\mu m$ , z축에 대한 위치정밀도는  $\pm 1\mu m$ , 반복정밀도는  $\pm 8\mu m$ 이다. 보호가스는 빔조사 부위에서 발생하는 플라즈마를 제거하고, 용접특성을 향상시키기 위해 불활성가스인 아르곤을 이용하였다.

Fig. 36에는 시험편의 형상과 크기를 나타내었고, Table 10은 레이저 용접시 자연결함을 내포하도록 용접 조건을 달리하면서 용접했을 때 용접부에 내포하는 결함의 유무와 결함의 종류를 나타낸다. 결함의 유무와 결함 종류를 판별하기 위하여 SAT(Scanning Acoustic Tomograph)를 이용하였고 SAT에 대한 자세한 내용은 5장에서 다루었다.

실제 비파괴 평가의 목적인 내부 결함 검출을 위해서 결함이 검출되지 않은 시편의 용접부에 원형의 인공결함을 제작하였다. 원형결함의 크기는 1, 2, 3 mm의 크기로 하였고 드릴을 이용하여 용접부를 완전히 관통하도록 하였다.

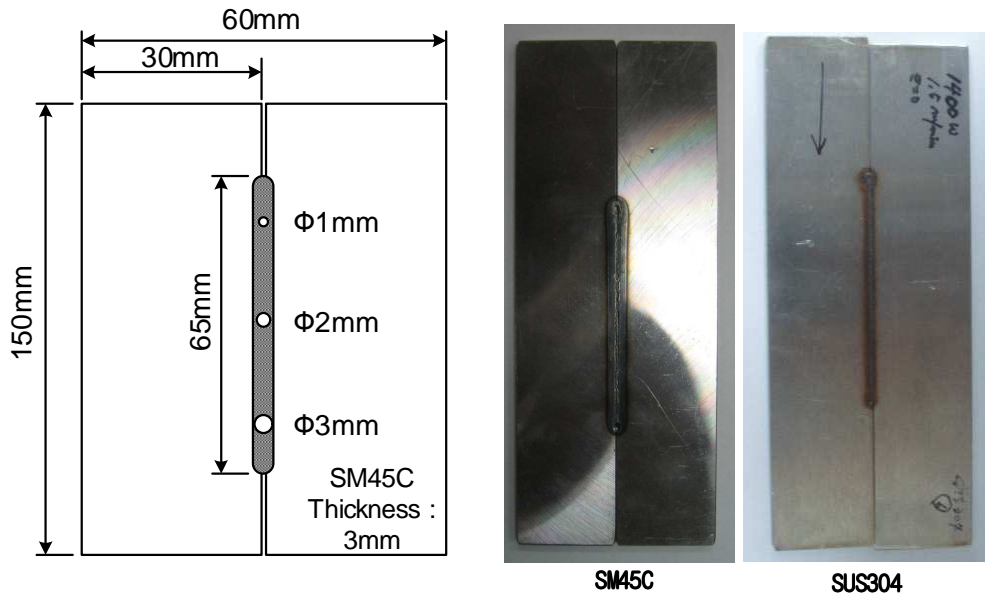


Fig. 36 Dimensions of Specimens

Table 10 Existence and Nonexistence and Kind of Flaw by Welding Condition

Specimen Number	Welding Condition				Welding Flaw
	Power	Speed	Focus Length	Material	
LW-1	1800	1.1	0	SM45C	Existence
LW-2	1800	1.1	0	SM45C	Nothing
LW-3	1800	1.1	0	SM45C	Nothing
LW-4	1800	1.3	0	SM45C	Existence
LW-5	1800	0.8	0	SM45C	Nothing
LW-6	1800	0.6	0	SM45C	Existence
LW-7	1400	1.1	0	SUS304	Existence
LW-8	1400	1.1	0	SUS304	Nothing
LW-9	1400	1.1	0	SUS304	Existence
LW-10	1400	1.25	0	SUS304	Nothing
LW-11	1400	1.35	0	SUS304	Existence
LW-12	1400	1.5	0	SUS304	Existence

### 제 3 절 실험 결과 및 고찰

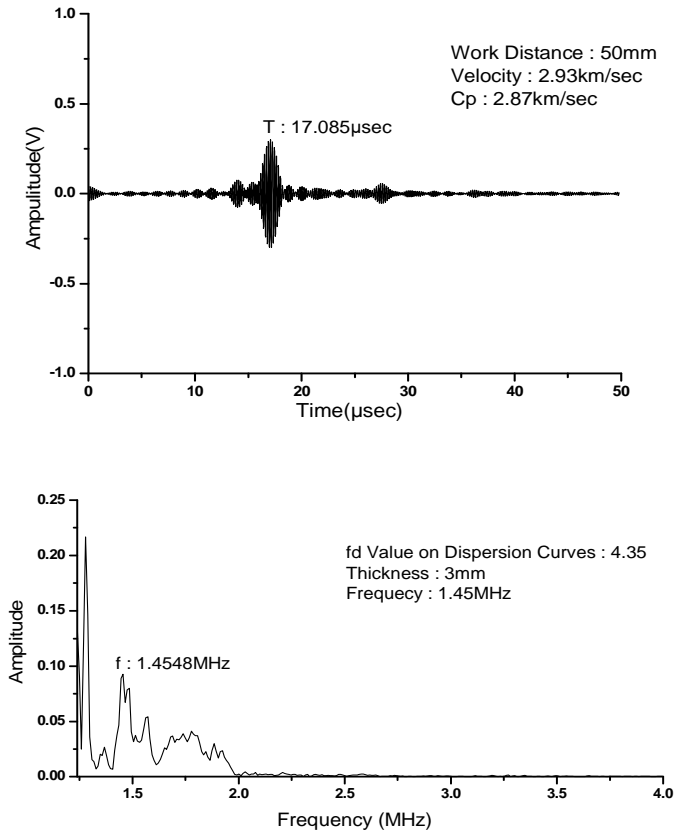


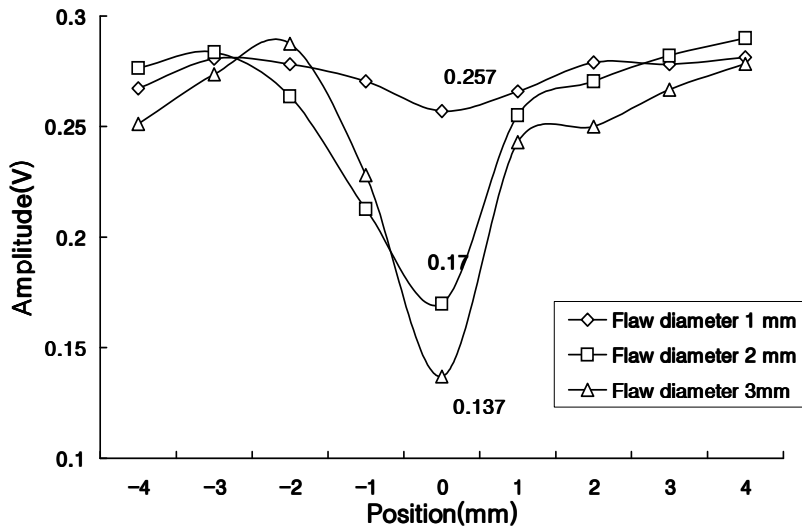
Fig. 37 Real Time Signal and Spectrum of Lamb Wave

Fig. 37은 용접시편 LW-5번의 용접부를 통과하여 나온 Lamb파의 실시간 신호와 스펙트럼 분포이다. ACT의 수신각도는  $A_0$  모드의 신호를 가장 안정적으로 수신할 수 있는  $15^\circ$ 로 하였고, 안정적인 파형을 얻기 위하여 수신시 50회 평균하여 수신하였다.

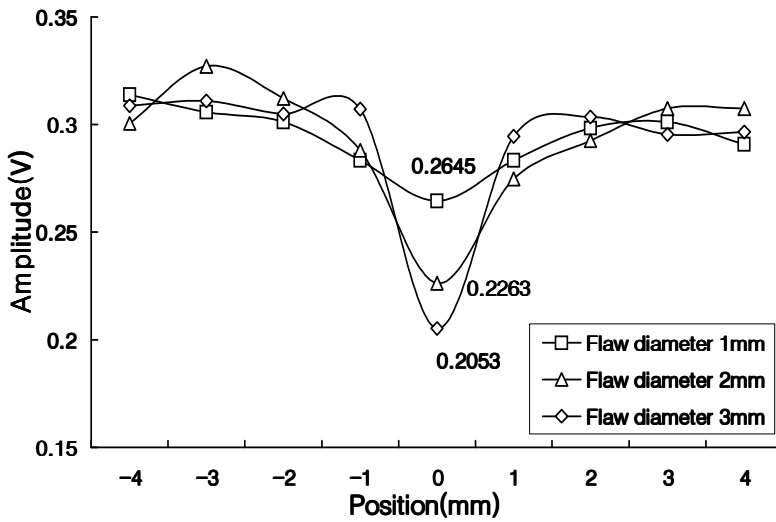
파형에서 시간축의 맨 처음에 나타나는 신호는 Q-스위치 트리거에 의한 신호를 보여주고 있다.  $A_0$  모드의 파형의 시간을 측정한 결과 파형의 전파시간은

$1.708 \times 10^{-5}$  sec로 속도는 2.93 km/sec 로 나타남을 알 수 있다. 이는 3장에서 분산 선도를 이용하여 구한 군속도와 거의 일치하고 레이저를 이용하여 파장 매칭법을 이용하여 발생시킨 Lamb파가 비파괴검사에 적용할 수 있음을 다시 한 번 보여주고 있다.

Fig. 38은 Fig. 35에 나타낸 실험 방법대로 각각의 재질에 대해서 직경 1, 2, 3 mm의 크기로 만든 인공결합의 중심으로부터 위아래로 탐상위치를 변경하면서 탐상한 투과신호분포를 나타내고 있다. 결합의 중심에서 신호의 강도가 가장 적었으며 중심에서 벗어남에 따라 커지고 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) Distribution Ultrasonic Signal of SM45C



(b) Distribution Ultrasonic Signal of SUS304

Fig. 38 Horizontal Direction Distribution of Ultrasonic Signal at the Flaw Center

결함의 크기와 결함을 통과한 신호가 선형적으로 반비례한다고 가정하면 투과 신호의 크기로부터 결함의 크기를 추정할 수 있다. Fig. 39에서 결함의 크기에 따른 초음파 신호의 변화를 선형 회귀직선과 함께 보여주고 있다. 회귀직선에 대한 수식은 다음과 같다.

$$y = -0.0448 + 0.2996 x_d$$

$$( y = A + Bx_d \quad \text{Error} : A = \pm 0.0165, B = \pm 0.0357 )$$

이러한 회귀직선은 결함의 크기와 신호강도가 매우 높은 상관관계를 갖는다는 것을 보여준다. 따라서 상대강도의 크기로부터 결함의 크기를 추정하는 것이 가능하며 회귀직선의 기울기가 클수록 결함크기를 더욱 정확하게 추정할 수 있다.

회귀직선의 기울기를 높이는 방법 중 하나로써 5장에서 설명할 SAT를 이용한 초음파 영상화시 좀 더 나은 해상도를 얻기 위한 방법으로 사용되어진 초음파 빔의 집속법을 사용하면 검출 가능한 결함의 크기도 작아질 것이다.

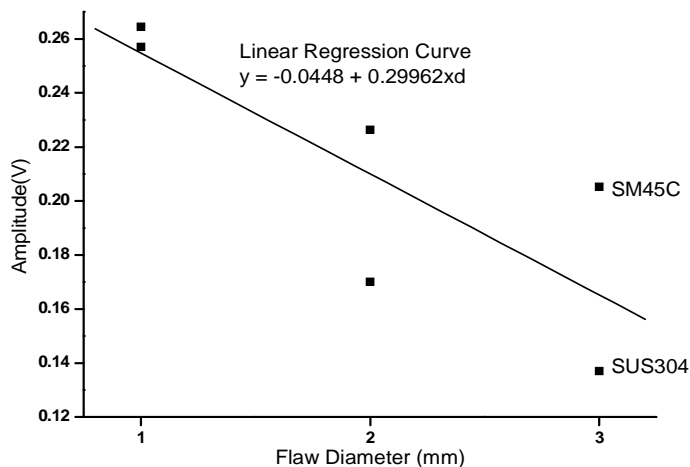


Fig. 39 Ultrasonic Signal Intensity and Linear Regression Curve by Flaw Size

## 제 4 절 요약

5장에서는 선형 배열 슬릿에 의해 발생하는 레이저 유도 Lamb파를 판재 용접부에 존재하는 결함을 검출해 보았다. 결함 검출능력을 확인하기 위해 인공적으로 가공된 원형 결함으로부터 검출한 신호의 분포를 측정하는 실험을 수행하였다. 레이저로부터 유도된 Lamb파의 검출은 ACT를 이용하였다.

(1) ACT를 이용한 Lamb파 수신각 조절은 판재의 용접부가 밀도가 틀린 다중 레이어임을 감안하여  $A_0$ 모드를 가장 안정적으로 수신할 수 있는 각도를 실험을 통하여 선정하였다.

(2) 인공결함에 대한 횡방향 진폭 변위분포측정 실험에서 초음파 신호의 진폭값을 이용하여 결함의 유무를 확인할 수 있었고, 결함크기와 진폭간의 관계를 회귀분석을 통하여 얻어냄으로써 결함의 크기를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

(3) 실험에서 사용한 비과괴탐상법은 투과법을 이용하였으며 이를 통한 초음파 신호는 결함의 크기에 대한 정보는 가지고 있지만 결함의 위치정보는 포함하고 있지 않다. 따라서 투과법을 이용한 결함의 위치 검출은 본 실험에서 제외되었다.

(4) 투과법 대신 반사법을 사용한다면 결함으로부터 반사되어진 신호로부터 결함의 크기, 위치 및 결함의 형상에 대해서도 알 수 있고 이를 이용한다면 용접부에 존재하는 결함의 종합적인 정보를 분석할 수 있을 것이다.



## 제 5 장 결함 신호의 영상화

기존의 일반적인 초음파 탐상에서는 RF파를 이용한 A-Scope 표시방식이 압도적으로 사용되어 왔지만, A-Scope 방식만으로 결함의 평가를 수행하는 경우, 고도의 기술, 경험, 숙련을 필요로 한다는 단점과 시간에 따른 진폭 변화인 1차원적인 정보만을 매체로 하여 결함의 치수나 형상을 인간이 직감으로 평가하는 것은 상당한 숙련이 필요한 단점을 가지고 있다. 따라서 B-Scope, C-Scope, 3차원 입체 표시등의 화상표시법을 효과적으로 적용함으로써 용접구조물등의 비파괴평가가 필요한 곳에서 효과를 기대할 수 있을 것이다.

본 장에서는 결함의 유무와 위치를 비전문가일지라도 손쉽게 파악할 수 있도록 4장에서 실험을 통하여 얻어진 결함신호를 2차원 영상화 하고자 한다. 또한 SAT(Scanning Acoustic Tomograph)장비를 이용하여 판재의 결함 검출 이미지와 비교하여 Lamb파를 이용한 초음파 영상화의 유용성을 확인해 보았다.

# 제 1 절 SAT를 이용한 시험편의 결함 분석

## 1. 디지털 화상처리를 위한 초음파 탐상의 원리

초음파 신호를 이용하여 영상을 얻는 SAT의 원리는 초음파의 반사에 있다. 일반적으로 경계면에서 수직으로 음파가 입사할 때 음파는 반사하는 성분과 통과하는 성분으로 나누어진다. 이 두개로 나누어지는 비율은 경계면에 접하는 2개의 물질의 음향 임피던스(Impedence) ( $Z = \rho \times V$ )에 따라 달라진다.

이 음향 임피던스 값의 차가 크면 클수록 경계면에서의 음파의 반사량은 커지게 된다. 만약 같은 물질로 구성되어 있는 경우는 임피던스가  $Z_1 = Z_2$  이므로 반사파는 영(Zero)이 된다. 반대로 밀도차이가 있는 경계면이 존재하게 되면 ( $Z_1 > Z_2$ , or  $Z_2 > Z_1$ ) 반사파가 존재하게 되고, 기체와 고체처럼 밀도차가 대단히 클 경우는 초음파의 전반사가 일어나 투과하지 못하는 현상이 발생한다. 비파괴 탐상의 원리는 시험편 내부에 결함이 존재할 경우 결함과 시험편 사이의 임피던스 차에 의해 반사파가 발생하고 반사되어진 초음파를 트랜스듀서를 이용하여 수신함으로써 결함을 검출하는 원리이다.

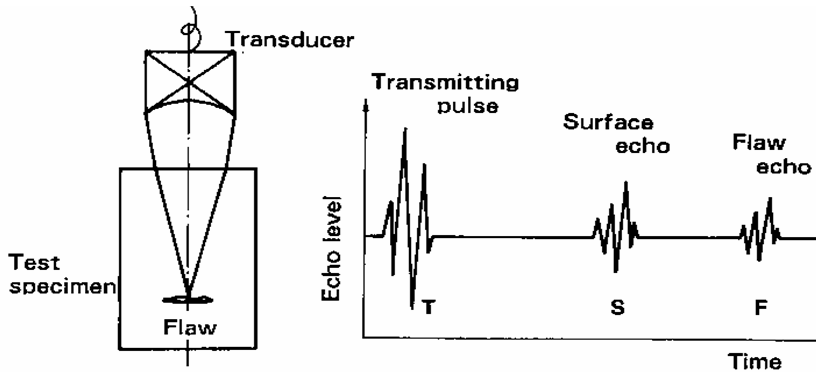


Fig. 40 Principle of Flaw Detection by Ultrasonic Testing

Fig. 40 은 SAT의 기본 원리에 대해 나타내고 있다. 탐촉자로부터 발생한 초음파가 전파하면서 각 경계면에서의 임피던스차에 의해 반사되어진 신호를 시간에 따라 나타내고 있다. 시험편의 표면과 저면사이 에 결함이 존재할 경우 S와 F사이에 결함신호가 지시되게 된다.

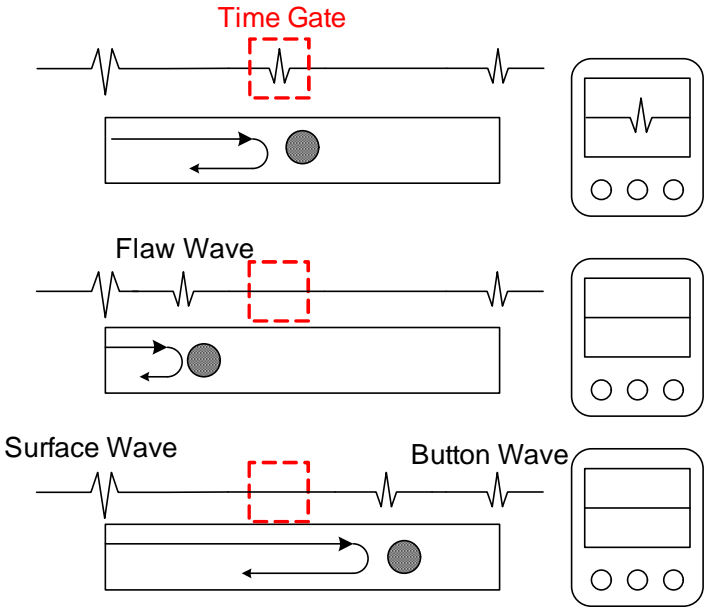


Fig. 41 Flaw Signal by Flaw Position of when Applied Time Gate

Fig. 41는 결함의 위치에 따른 초음파 신호의 변화를 보여주고 있다. 초음파 진행방향에 존재하는 결함은 위치(깊이)가 변함으로써 결함신호의 시간위치가 변하게 된다. 여기에 Time Gate를 걸어줌으로 특정 시간대만을 영상화 데이터로 사용할 수 있다. 게이트를 위치를 변경함으로써 내부의 영상화하고자 하는 깊이를 변경할 수 있어 탐상하고자 하는 곳을 정밀하게 탐상할 수 있게 된다. 게이트의 폭을 줄일 수록 측정하는 두께 방향의 해상도가 높아지고, 결함의 크기와 위치를 정밀하게 탐상할 수 있다.

## 2. SAT를 이용한 판재 용접부의 결함 검사 이미지

시험편 제작시 최대한 자연결함을 내포하도록 용접 조건을 변경하면서 제작하였으나, SAT 검사결과 12개의 시편중 LW-1, 4, 6, 7, 9, 11, 12번에만 자연결함이 존재하는 것으로 확인됐다. 나머지 무결함 시편은 앞장에서 Lamb파의 비파괴검사의 유용성을 증명하기 위하여 인공결함을 제작하는데 사용하였다.

결함의 여부는 시험편의 표면 상태 기울기등을 모두 고려하여 판단하였다. LW-3, 8, 10 이미지를 보면 결함으로 의심할 수 있는 부분이 있으나 이는 용접부 표면의 경사로 인해 나타난 이미지이므로 결함이라 볼 수 없다.

Fig. 42는 용접부에 대한 SAT 화상이미지를 얻기 위한 설정값과 초음파신호를 나타내고 있다. 초음파 신호의 첫 번째 피크는 시험편의 표면에서 반사된 표면파이며 두 번째 피크 신호는 저면파이다. 표면파와 저면파 사이에 타임게이트를 설정하여 시험편 내부에 존재하는 결함을 검출하도록 설정하였다.

Fig. 42의 이미지에서 양 끝단에 결함처럼 보이는 부분은 용접부 끝단에 접한 무용접부가 표시된 부분이다. SAT 검사시 이미지의 크기를  $75 \times 50$  mm로 하여 용접부에 해당하는 65 mm를 완전히 포함시켰다.

Lamb파를 이용한 결함 이미지와의 비교에서 결함의 위치와 크기를 비교하기 위하여 용접시험편의 왼쪽 용접 시작부를 기점으로 하여 결함의 위치와 크기를 나타내도록 하였다.

본 논문에서는 Lamb파를 이용한 결함 이미지 획득시 투과법을 이용하였으므로 결함의 종류에 대한 분석은 제외하였다. 결함의 종류를 분석하기 위해서는 결함으로부터 반사된 초음파의 분석이 필요하다. 결함의 형상과 종류, 대표적으로 체적결함과 선형결함에서 반사되어 나온 초음파 정보는 상이하므로 이를 분석하면 체적결함과 선형결함의 분류가 가능하다.

각 시편에 대한 용접조건 및 결함 유무는 Table 10에 나타내었고 Fig. 43는 각 시편에 대한 SAT 화상 이미지를 보여주고 있다. 여기에 결함의 위치와 수평분포 크기를 더불어 나타내었다.

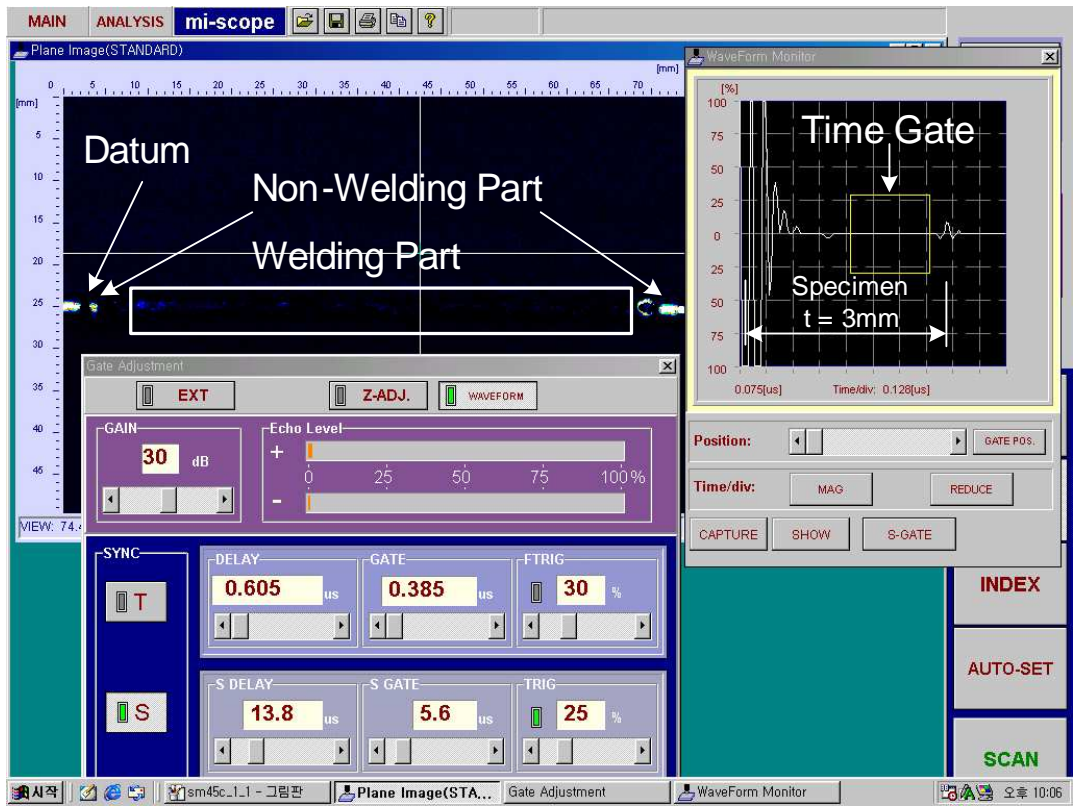
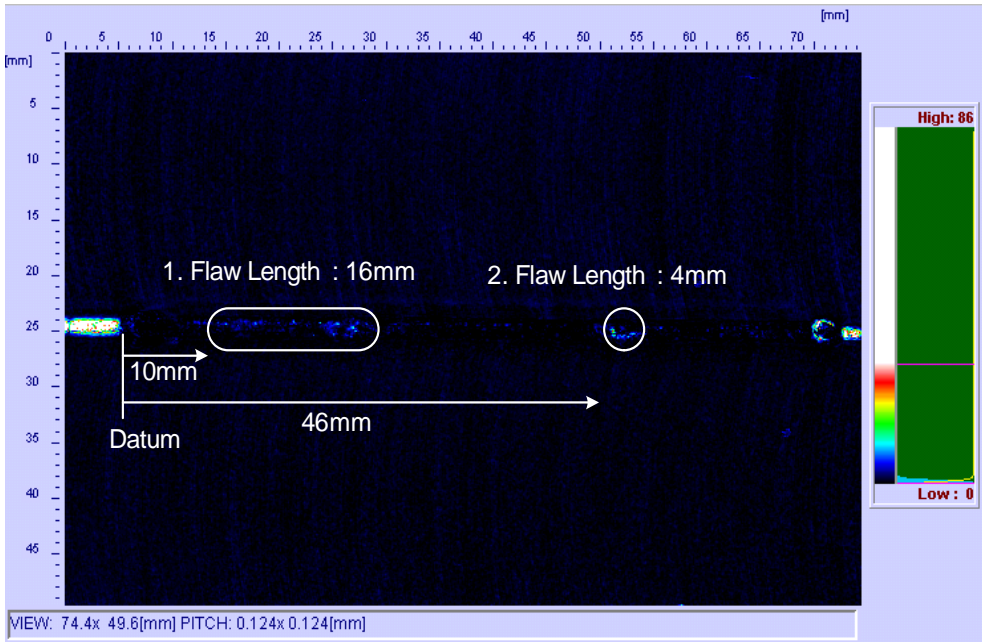
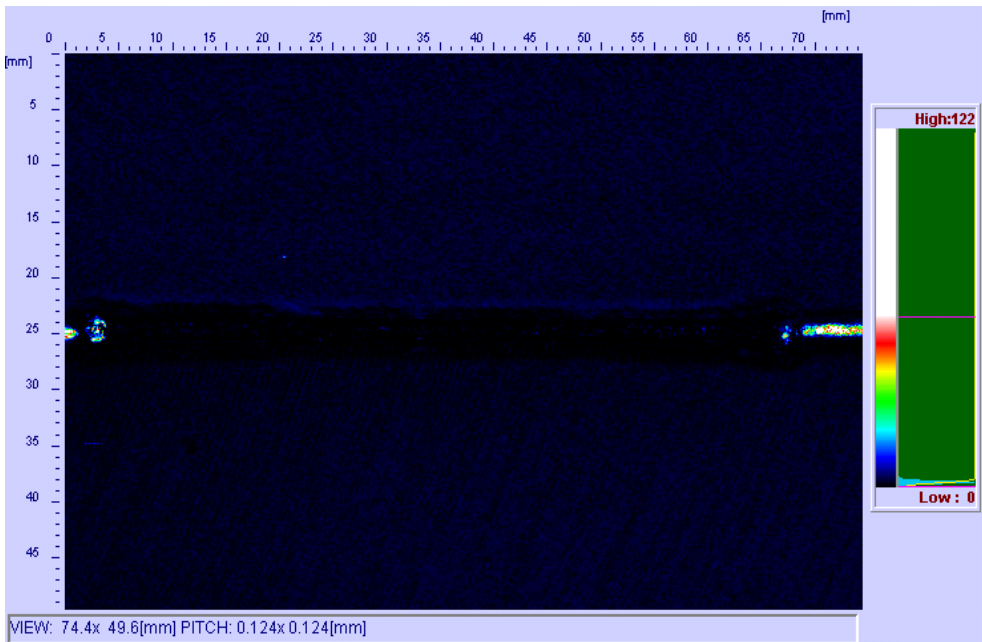


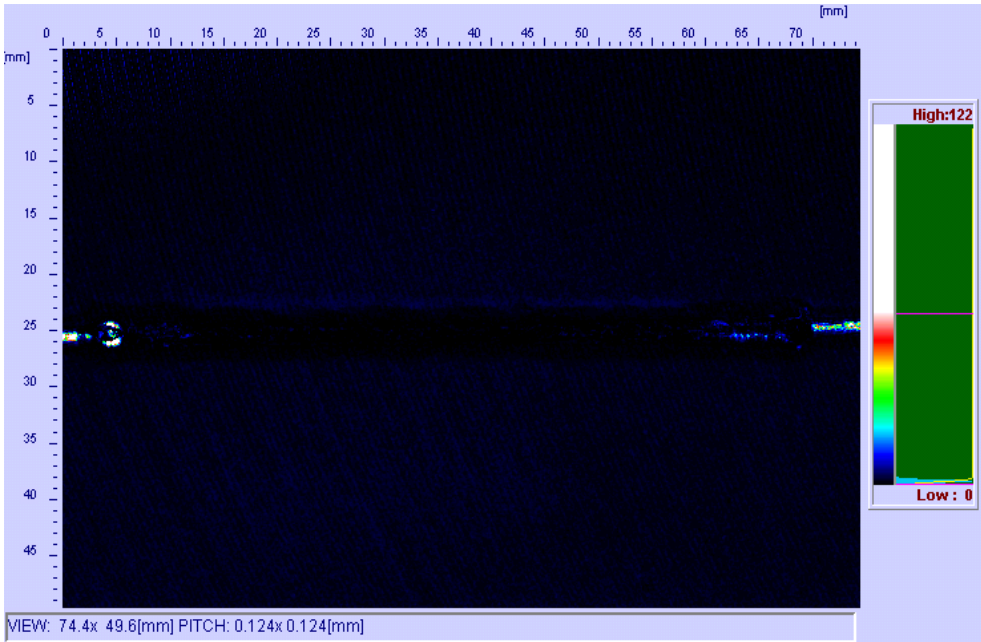
Fig. 42 SAT Image and Time Gate for Internal Flaw Detecting



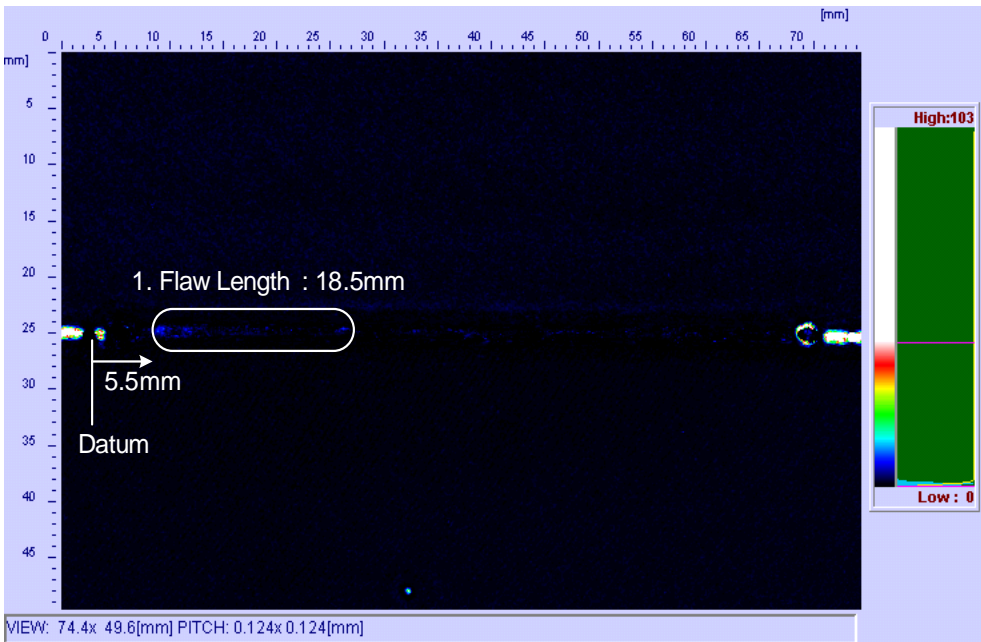
(a) LW-1 SAT Image, Porosity



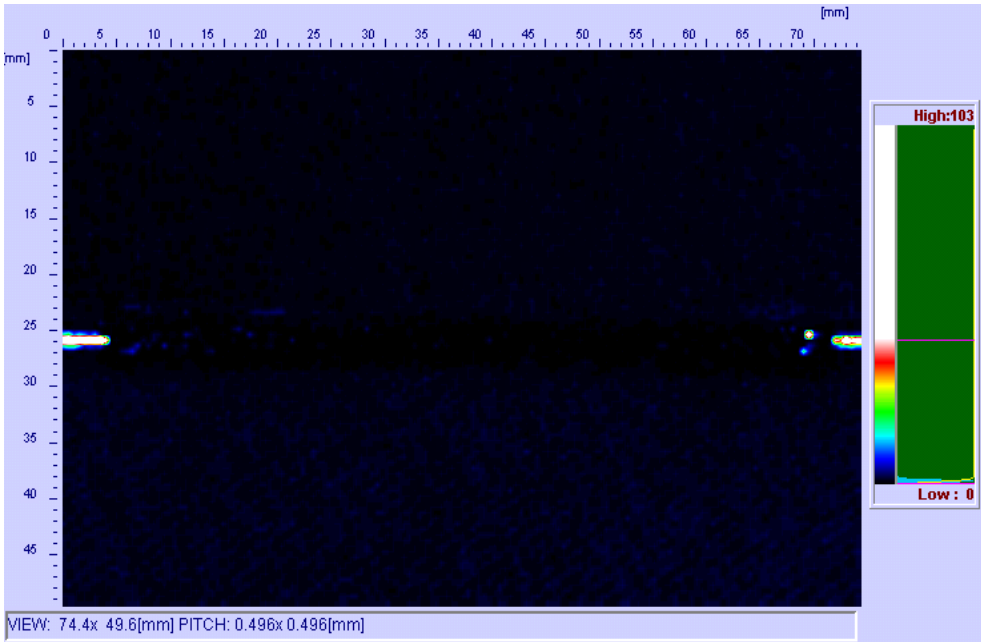
(b) LW-2 SAT Image, Non-Flaw



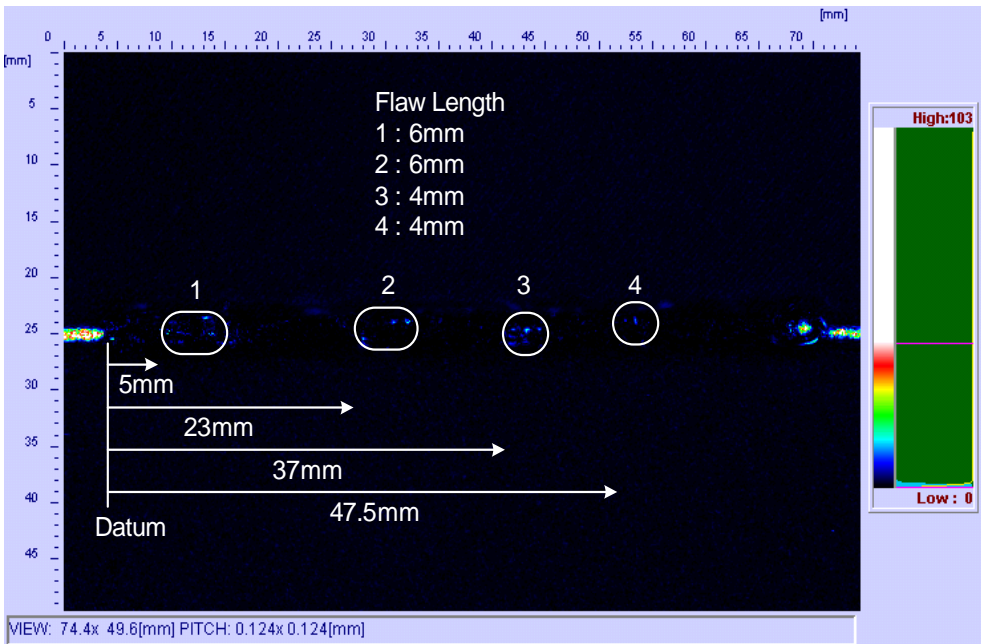
(c) LW-3 SAT Image, Non-Flaw



(d) LW-4 SAT Image, Lack of Fusion

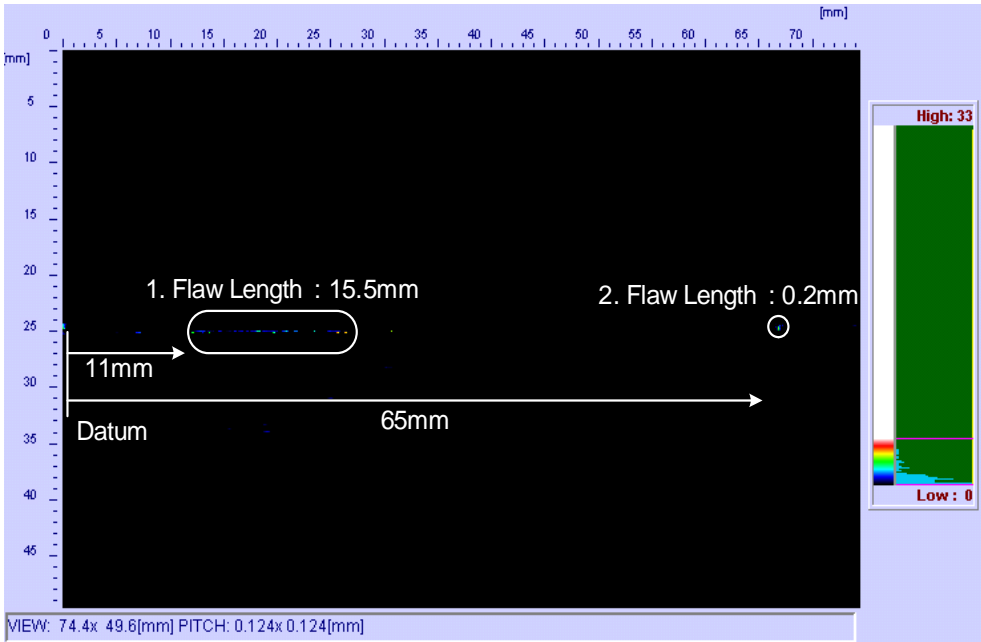


(e) LW-5 SAT Image, Non-Flaw

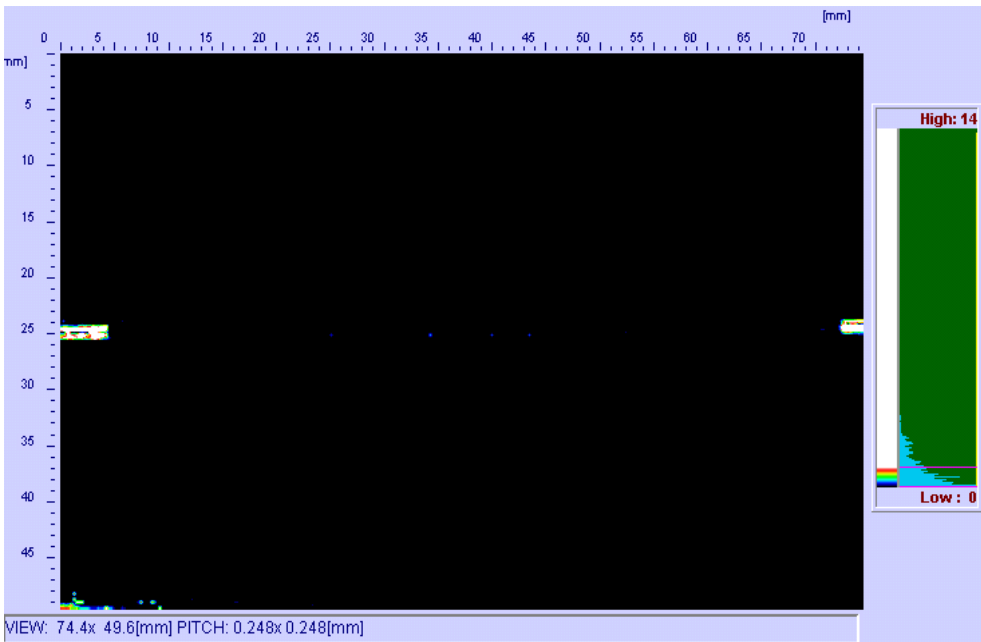


(f) LW-6 SAT Image, Porosity and Lack of Fusion

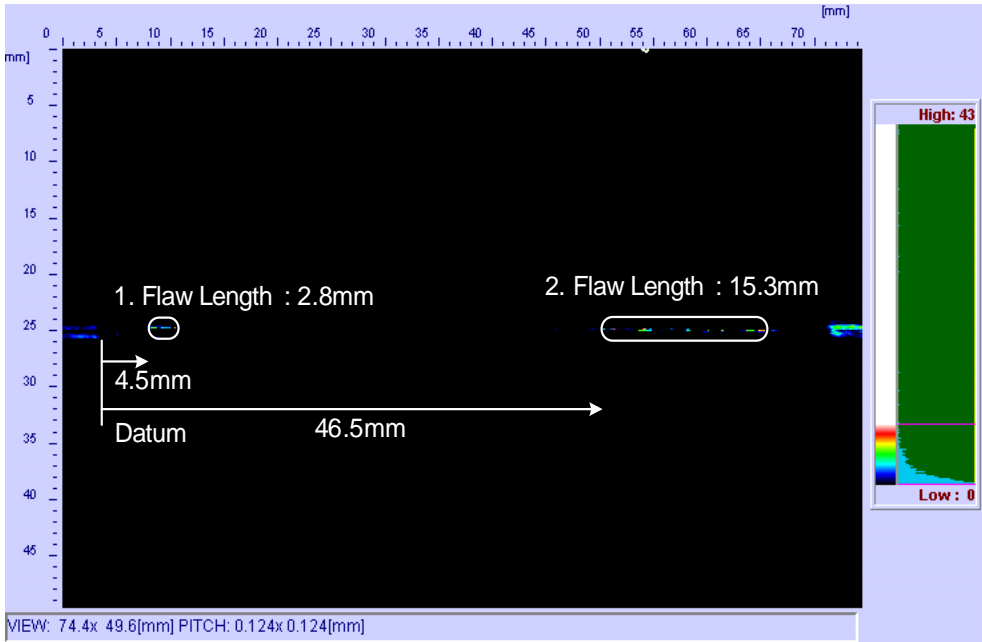




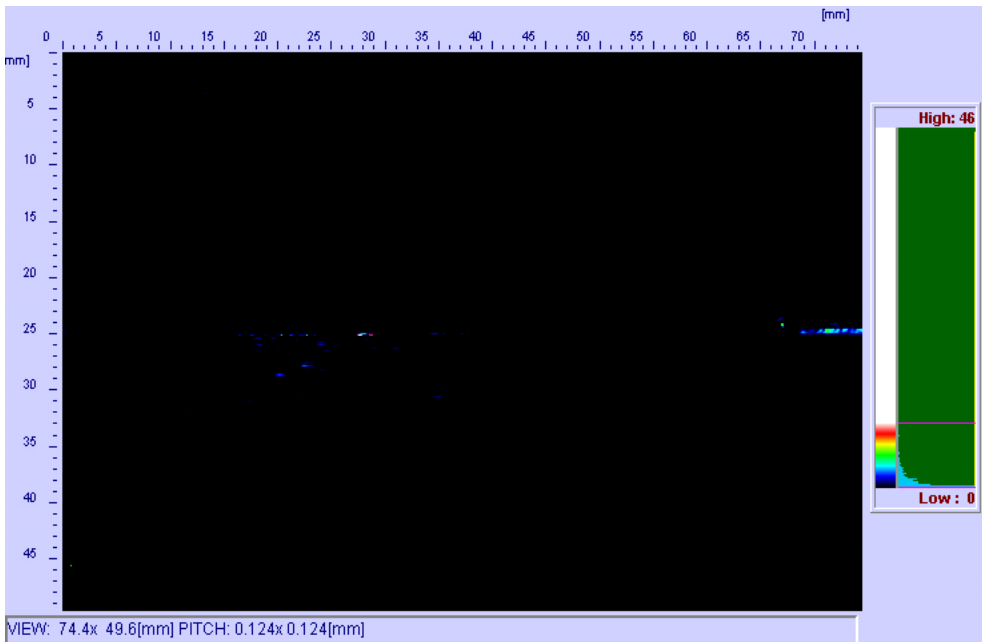
(g) LW-7 SAT Image, Lack of Fusion



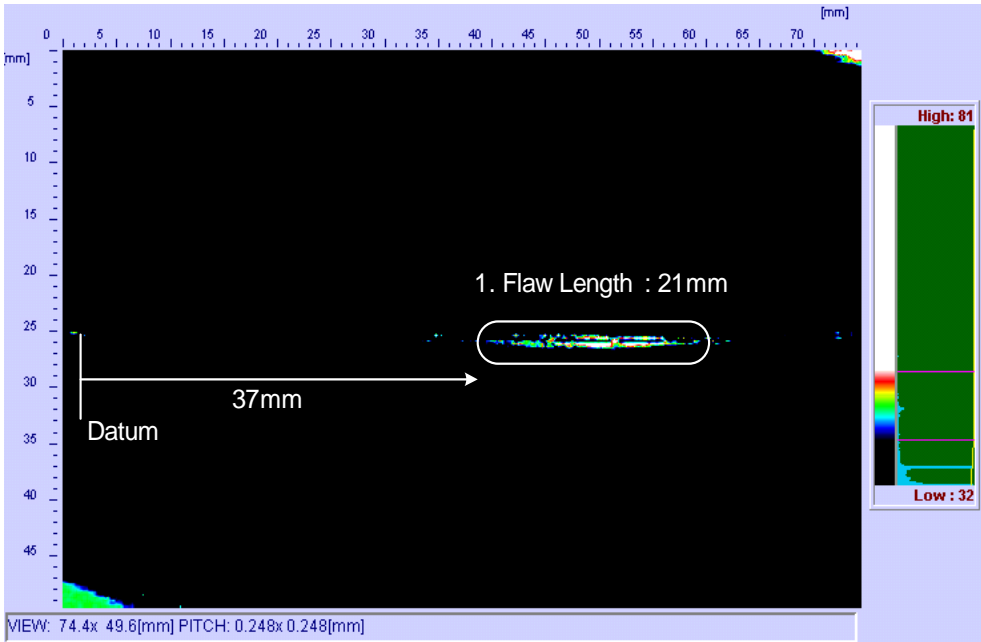
(h) LW-8 SAT Image, Non-Flaw



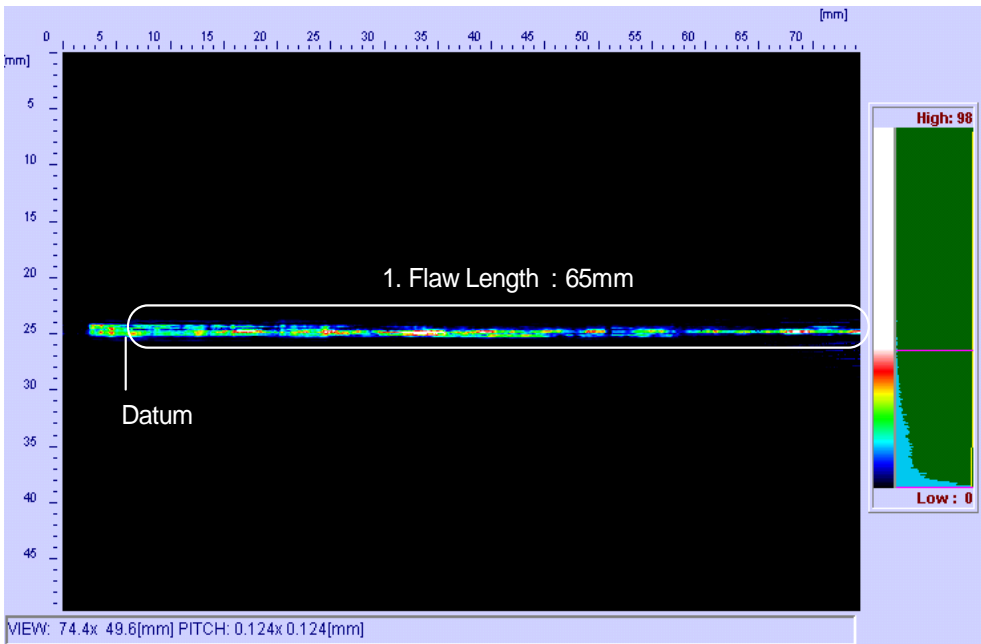
(i) LW-9 SAT Image, Porosity and Lack of Fusion



(j) LW-10 SAT Image, Porosity and Lack of Fusion



(k) LW-11 SAT Image, Lack of Fusion



(l) LW-12 SAT Image, Lack of Fusion

Fig. 43 SAT Image of Laser Welding Specimen

## 제 2 절 레이저 유도 초음파 신호의 영상화

4장에서 레이저로 유도된 Lamb파를 이용하여 인공결함 검출에 대한 실험은 투과법을 이용하였다. 투과법은 초음파의 진행경로에 비연속물이 존재시 초음파가 반사 산란되어 수신되는 초음파의 강도가 약해지거나 없어지게 된다. 이를 이용하여 결함이 유무와 크기를 추정할 수 있다.

Fig. 44는 투과법에서의 결함의 존재에 따른 초음파의 신호를 나타내었다.

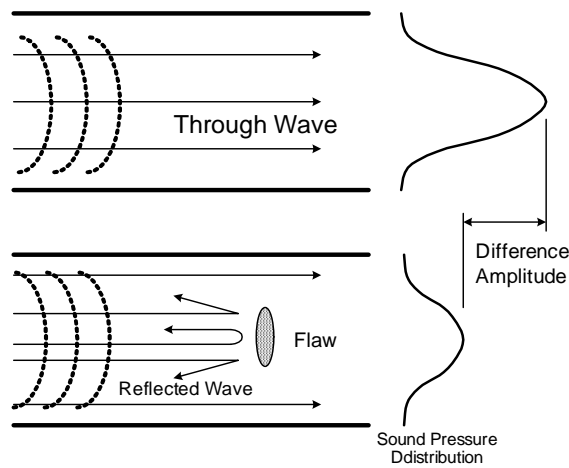


Fig. 44 Ultrasonic Progress Path and Amplitude Change  
by Flaw Existence and Nonexistence

4장에서 실험한 인공결함에 대한 결함 영상화는 결함의 중심으로부터 좌우로  $\pm 5$  mm를 0.5mm 단위로 총 20번 탐상하여 영상화하였다.

초음파 신호를 Lowpass Filter를 이용하여 Fig. 45와 같이 포락선 형태로 처리하였는데 이는 결함의 유무를 진폭값으로만 파악하였기에 다른 신호 정보를 배제하여 이미지 처리 시간을 단축시키고자 함이다.

또한 결함 이미지는 초음파 신호의 최대값과 최소값의 차이를 1Byte 해상도로 표현하였다. 결함 파형의 신호를 기준으로 문턱값을 적용하여 결함 신호와 무결함

신호의 최대 피크값만을 추출하여 이미지화 하였다.

Fig. 46과 Fig. 47은 인공결합과 자연결합에 대한 초음파 신호 영상화 이미지이다. Fig. 46과 Fig. 47에서 위쪽의 영상은 Lamb파의 포락선 파형과 그 파형을 이용한 이미지를 나타내었고, 아래쪽은 문턱값을 적용하여 문턱값 이상의 진폭을 가지는 신호만을 가지고 영상화한 확대 이미지와 신호를 보여주고 있다.

Fig. 46에서 보면 인공결합의 크기가 1 mm일 때 결합이미지에서는 2mm로 인공결합이 2mm 일때는 4mm, 3mm 일때는 5mm로 실제 결합의 크기보다 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 선형 슬릿을 이용하여 Lamb파를 발생시에는 Lamb 파의 진행이 슬릿과 동일한 선형태로 전파하게 되는데 결합의 경계면에서 반사와 모드변환이 발생하여 결합의 경계부에 근접하는 초음파도 영향을 받기 때문이다.

Fig. 47은 자연결합에 대한 이미지를 나타내고 있다. 자연결합은 인공결합과 같이 완전한 실린더 형태의 결합과는 결합의 형상, 크기, 방향, 분포등이 상이하게 다르므로 그에 따른 결합의 신호 또한 매우 복잡하게 나타남을 알 수 있다.

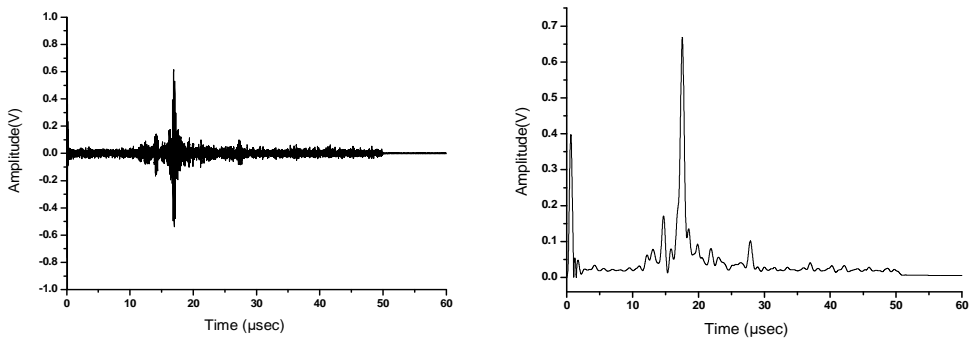
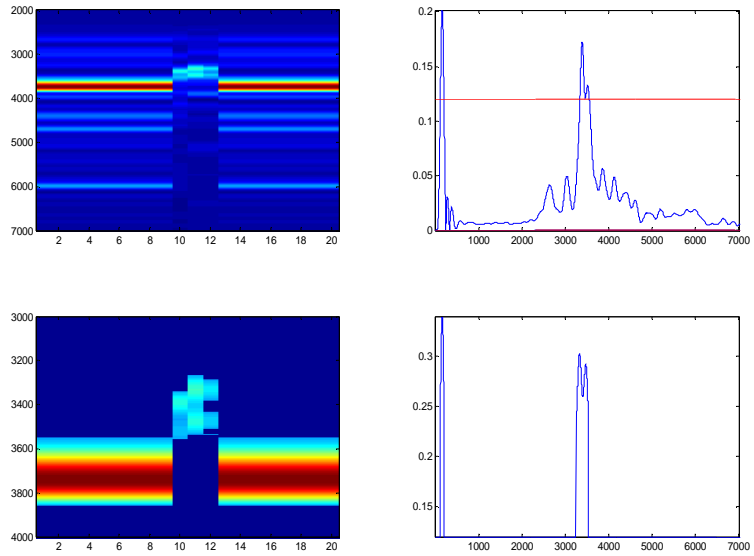
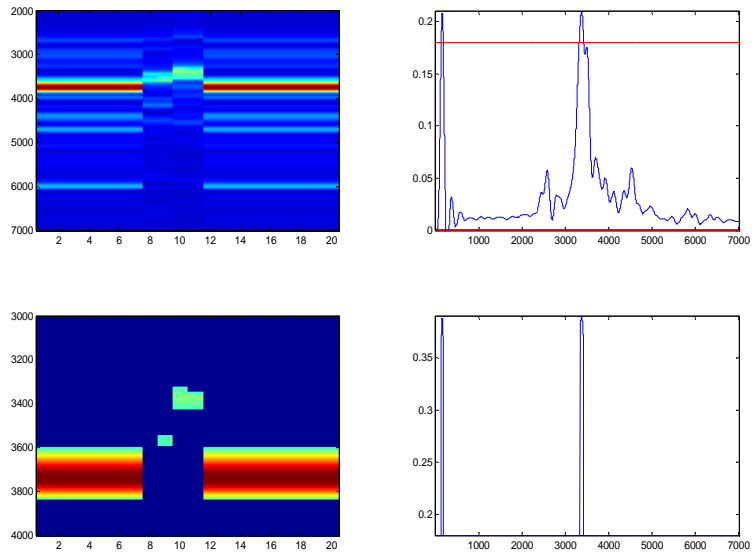


Fig. 45 Ultrasonic Signal and Envelope Signal for Visualization

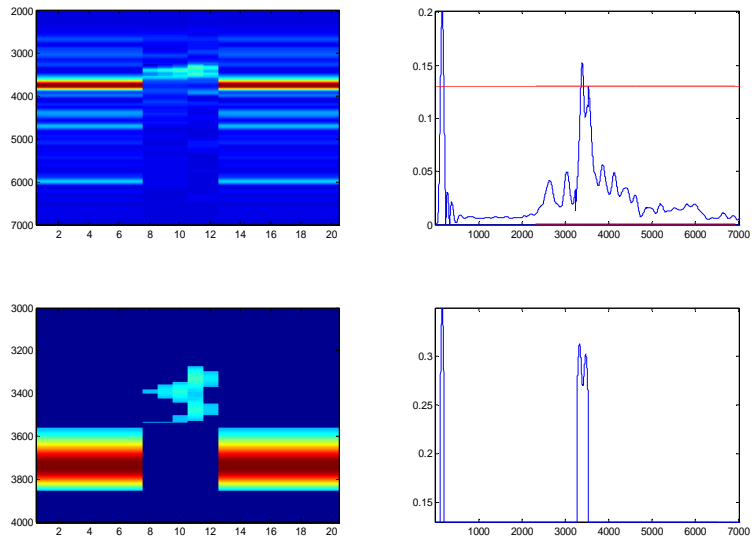


(a) Flaw Size Diameter 1 mm



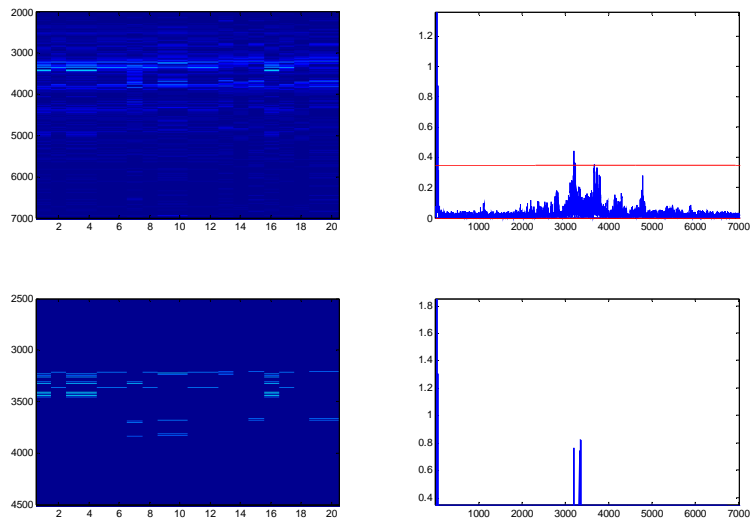
(b) Flaw Size Diameter 2 mm

Fig. 46 Ultrasonic Signal for Visualization and Artificial Flaw Image



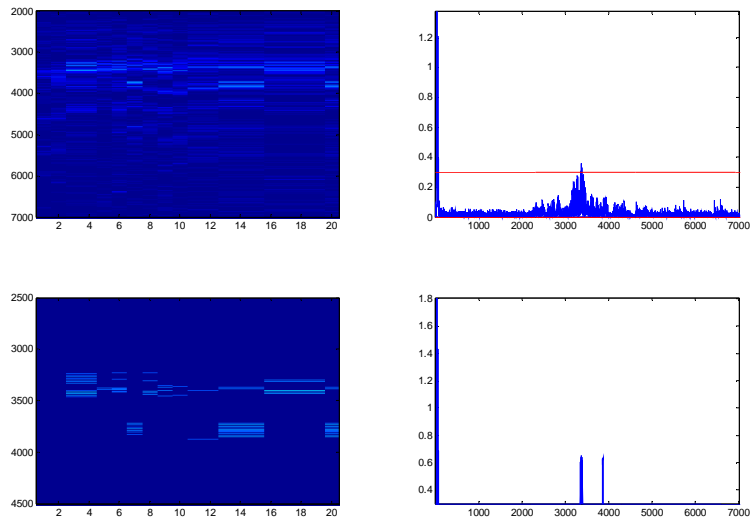
(C) Flaw Size Diameter 3 mm

Fig. 46 Ultrasonic Signal for Visualization and Artificial Flaw Image

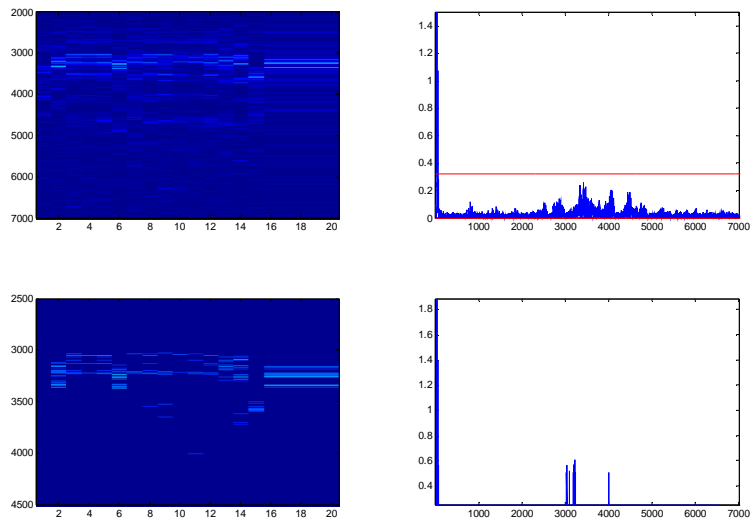


(a) Natural Flaw Image of Specimen LW-1

Fig. 47 Ultrasonic Signal for Visualization and Natural Flaw Image



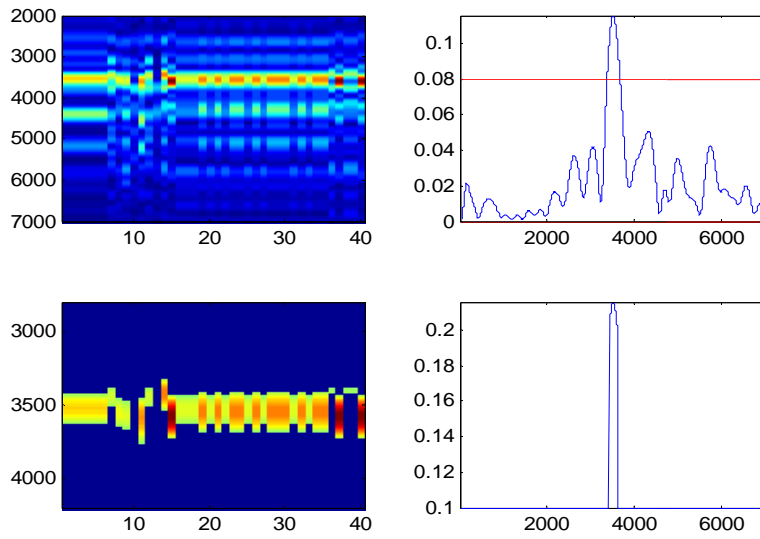
(b) Natural Flaw Image of Specimen LW-4



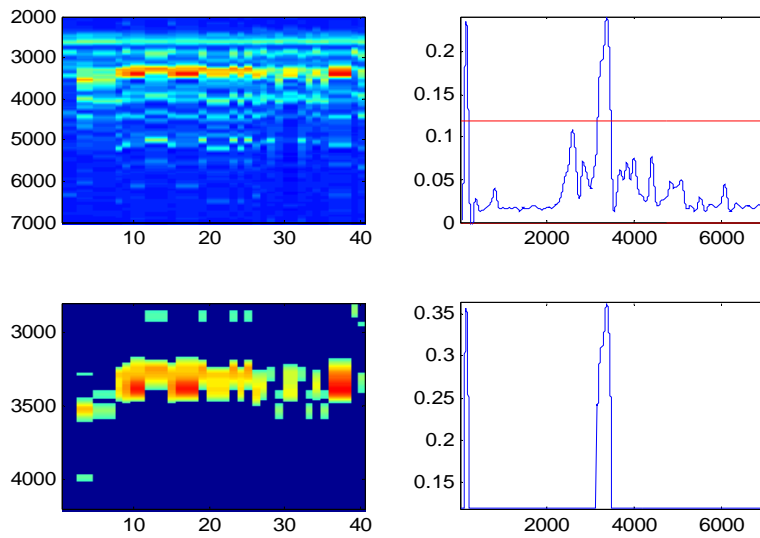
(c) Natural Flaw Image of Specimen LW-6

Fig. 47 Ultrasonic Signal for Visualization and Natural Flaw Image



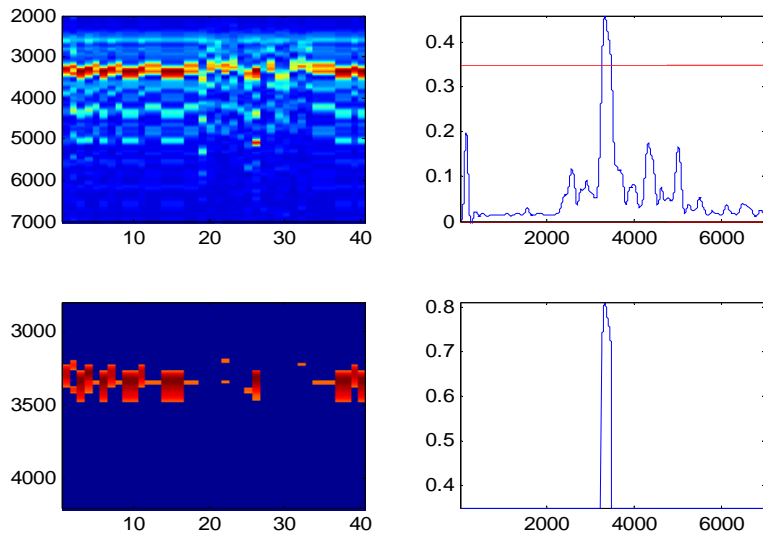


(d) Natural Flaw Image of Specimen LW-7

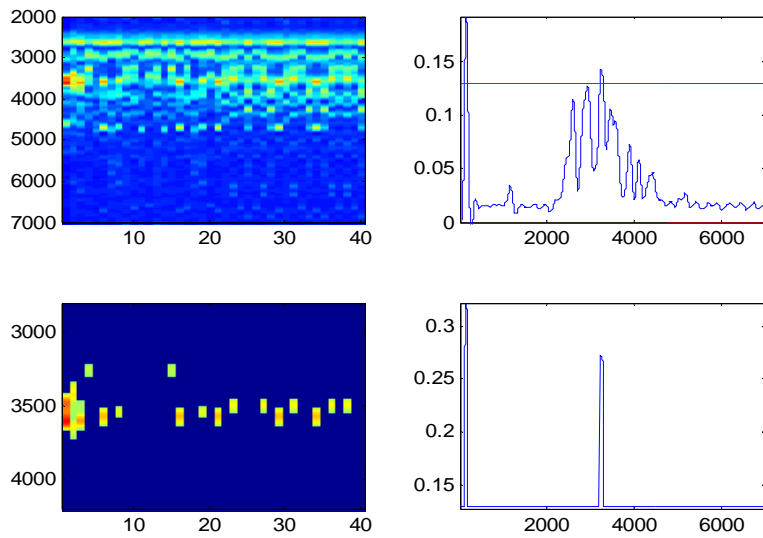


(e) Natural Flaw Image of Specimen LW-9

Fig. 47 Ultrasonic Signal for Visualization and Natural Flaw Image



(f) Natural Flow Image of Specimen LW-11



(g) Natural Flow Image of Specimen LW-12

Fig. 47 Ultrasonic Signal for Visualization and Natural Flow Image

### 제 3 절 SAT 영상과 유도 초음파 영상의 비교

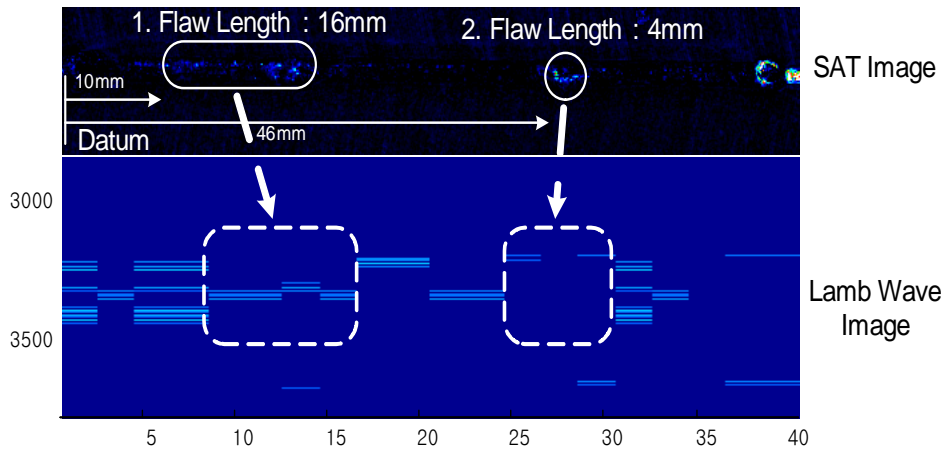
2절에서는 레이저로 유도한 Lamb파를 이용하여 인공결합과 자연결합에 대해서 결합 신호를 영상화하였다. Lamb파를 이용한 결합 영상의 유용성을 검증하기 위하여 자연결합에 대해서 SAT를 이용한 결합 이미지와 Lamb파를 이용한 결합 이미지를 비교하여 결합의 위치와 분포를 분석하고자 한다.

Fig. 48에 자연결합에 대한 SAT 이미지와 Lamb파 이미지를 비교하여 나타내었다.

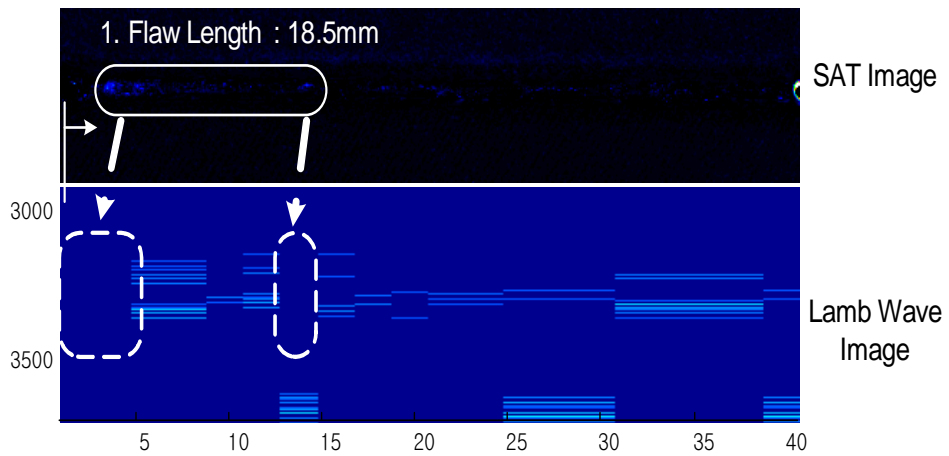
Lamb파를 이용하여 결합을 영상화할 때 사용된 문턱값은 각각 LW-1 은 0.33, LW-4와 LW-6은 0.3, LW-7은 0.08, LW-9는 0.12, LW-11은 0.33, LW-12는 0.13이다.

SAT 이미지에 나타난 결합 영상과 Lamb를 이용한 영상을 비교하여 보면 결합의 위치는 거의 비슷하게 나타나는 것을 확인할 수 있으나, 결합 크기등을 분석하기에 해상도가 충분하지 못함을 알 수 있다.

결합 이미지에 대한 해상도를 높이기 위해서는 결합의 크기보다 빔폭이 작아야 하므로 이에 대한 추후 연구가 필요하다. 본 실험에서 사용한 슬릿을 통과한 레이저의 폭은 20mm로 결합부를 통과한 결합신호이더라도 작은 결합을 탐상하기에 충분치 못하고 또한 실험에 사용된 결합은 자연결합으로써 결합의 크기와 분포를 파악하기가 더욱 난해 하다고 할 수 있다.

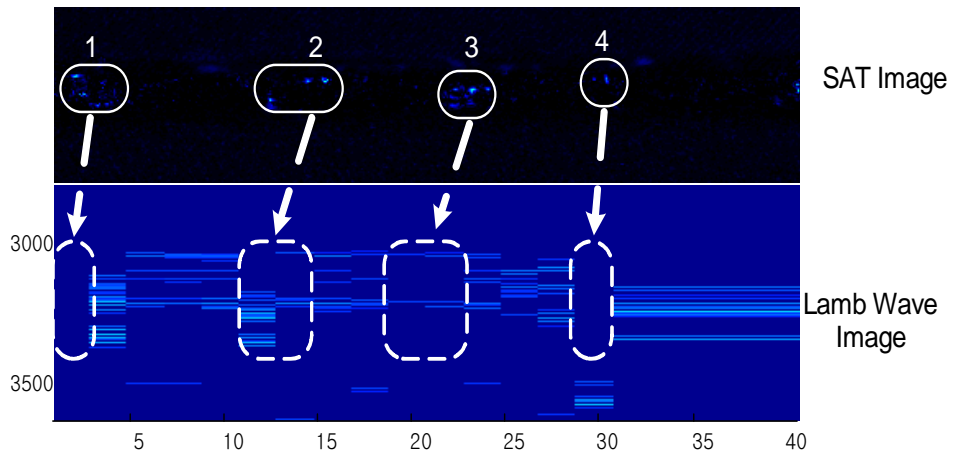


(a) Flaw Image of LW-1

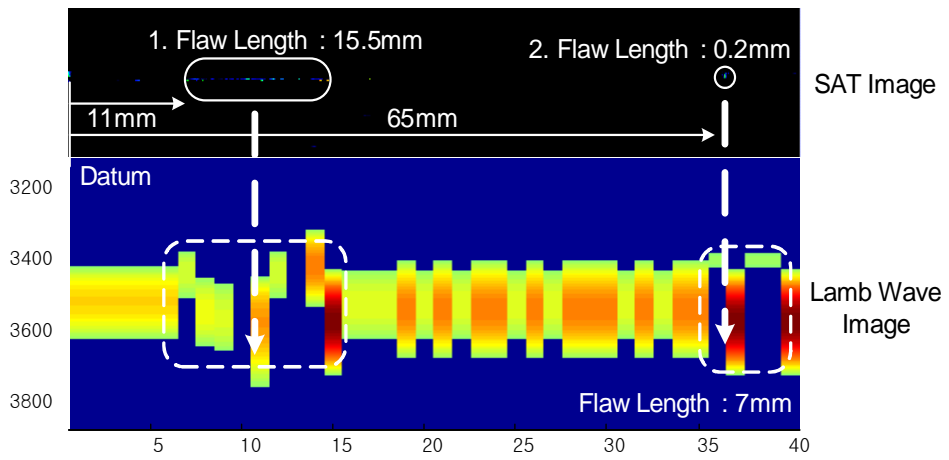


(b) Flaw Image of LW-4

Fig. 48 Flaw Comparison of SAT Image and Image by Lamb Wave

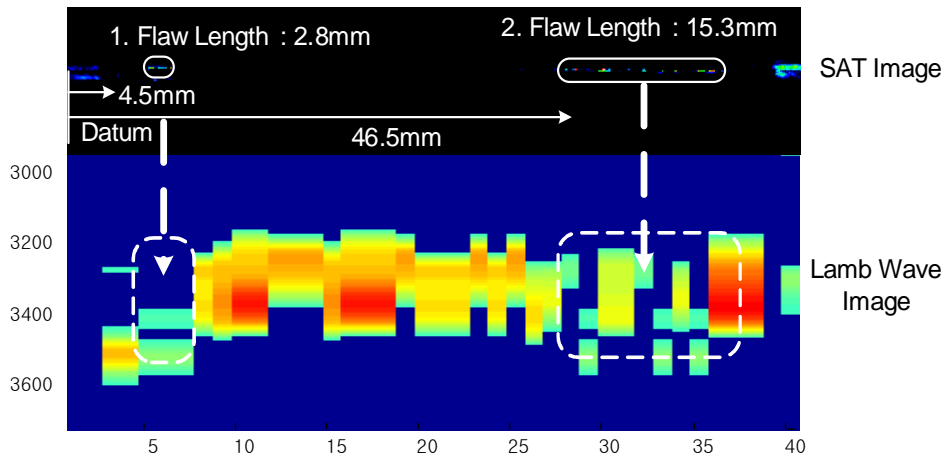


(c) Flaw Image of LW-6

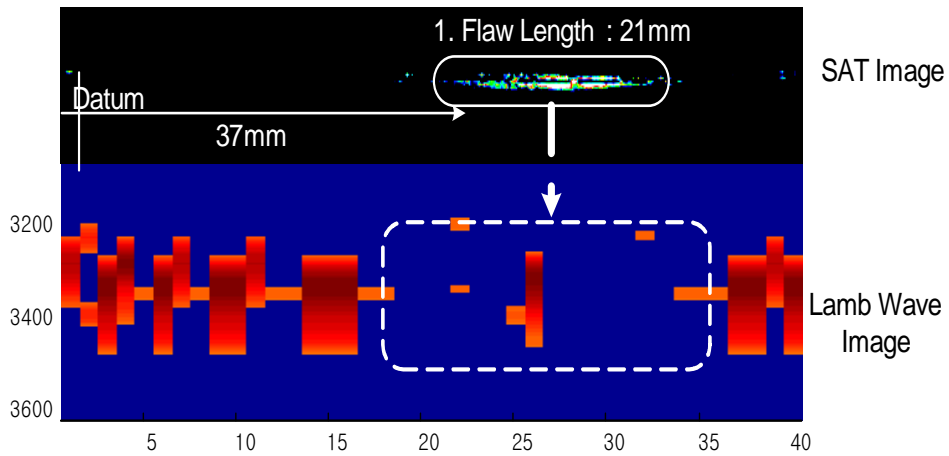


(d) Flaw Image of LW-7

Fig. 48 Flaw Comparison of SAT Image and Image by Lamb Wave

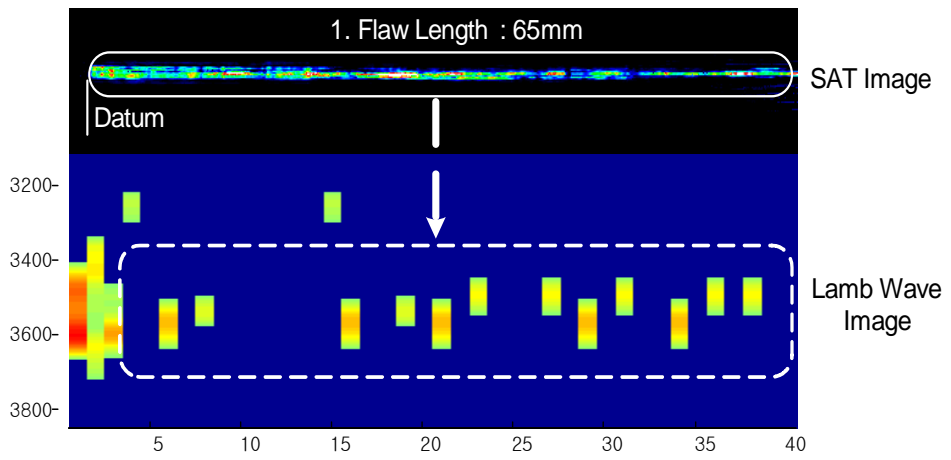


(e) Flaw Image of LW-9



(f) Flaw Image of LW-11

Fig. 48 Flaw Comparison of SAT Image and Image by Lamb Wave



(g) Flaw Image of LW-12

Fig. 48 Flaw Comparison of SAT Image and Image by Lamb Wave

## 제 4 절 요약

5장에서는 4장에서 구성한 Lamb파 비접촉 탐상 시스템을 이용하여 결함의 유무를 확인할 수 있도록 초음파 신호를 영상화 하였다. 결함의 유무를 분석하기 위하여 초음파의 진폭차이를 이용하였으며, 결함 파형을 기준으로 문턱값을 적용하여 설정값 이상의 파형만을 영상화 이미지로 사용하였다.

Lamb파를 이용한 결함 이미지를 검증하기 위하여 SAT를 이용하여 자연결함을 내포하는 시험편을 탐상하였고, 이를 Lamb파를 이용한 결함 이미지와 비교하여 보았다.

(1) SAT를 이용하여 제작한 용접시험편을 탐상한 결과 7개의 시험편에서 자연결함을 내포하고 있는 것을 확인하였고 그 이미지를 참조 데이터로 사용하였다.

(2) 인공결함에 대하여 결함 신호를 영상화하였고, 영상화된 이미지를 통하여 결함의 검출이 가능함을 확인하였다.

(3) 자연결함에 대한 결함 이미지와 SAT 결함 이미지를 비교하여본 결과 결함의 유무와 위치 파악은 가능함을 확인되었으나 정확한 분석을 위한 해상도가 부족함을 알 수 있었다. 이를 해결하기 위해서는 초음파의 빔폭을 결함의 크기보다 작게 하여 해상도를 높여줌으로써 해결할 수 있다



## 제 6 장 결 론

본 연구에서는 레이저 용접한 판재의 비파괴검사를 목적으로 점원형태의 레이저 유도 초음파에 대해 알아보았고 선형 배열 슬릿을 이용한 선택 모드 Lamb파를 이용하여 비접촉 비파괴탐상 실험을 실시하였다. 또한 검출한 Lamb파를 이용하여 초음파 신호를 영상화 하는 연구를 수행하였으며 그 결론을 다음과 같이 정리하였다.

1. 점원형태의 레이저를 이용하여 열탄성영역과 용발영역에서 초음파 발생과 전파방향 특성을 알아보았고, 이를 이용하여 기존의 접촉식 초음파 탐상법의 단점을 보완할 수 있는 비접촉 탐상에 대해 연구하였다. 더불어 결함의 크기, 종류, 형상 검출에 대해 연구하였다.

(1) 레이저를 이용하여 발생한 초음파 신호를 Fabry-Perot 간섭계를 통하여 비접촉 수신하였고, 수신된 파형을 PZT 를 이용하여 측정된 초음파 파형과 비교하였을 때, 종파와 횡파의 속도 파형과 일치함을 알 수 있었다.

(2) 측정하고자 하는 시편의 두께와 형상에 따라 초음파 발생영역, 레이저 입사 에너지, 탐상기법등을 조절하여 기존 접촉식 초음파 탐상법을 대체할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 인공결함으로부터 결함의 크기별, 위치별 신호를 분석하여 결함의 유무, 크기, 위치를 평가하는데 있어 유용한 탐상기법이 될 수 있음을 확인하였다.

2. 판재에서 레이저를 등간격 선형배열 슬릿을 통과하여 일정한 파장을 갖도록 하여 레이저 유도 초음파를 발생시키면 판재의 경계면에서 다중반사와 모드변환을 거쳐 여러 모드를 갖는 Lamb파를 발생시킬 수 있다. Lamb는 파장 매칭법으로 분산선도로부터 발생시킬 수 있는 Lamb파의 모드와 주파수가 예측 가능하며, 실험을 통하여 예측한 모드와 동일함을 확인하였다. 발생 진폭과 수신면에서  $A_0$ 모드가  $S_0$

모드에 비해 유리하다는 것을 확인하였다.

3. SM45C와 SUS304 재질의 두께 3 mm의 시편을 제작하였다. 제작은 Nd:YAG 레이저를 이용하였고 자연결함을 내포하도록 하였다. 또한 인공결함을 제작하여 Lamb파의 결함 검출능력을 확인하였다.

(1) 비접촉 수신을 위하여 환경요소에 영향을 덜 받는 Air-Coupled Transducer를 이용하였고 실험을 통하여  $A_0$  모드 수신할 수 있는 최적 수신 각을 결정하였다.

(2) 초음파 탐상법중 투과법으로 Lamb파를 검출할 수 있도록 시스템을 구성하였으며, 인공결함에 대한 횡방향 진폭 변위분포측정 실험에서 초음파 신호의 진폭값을 이용하여 결함의 유무를 확인할 수 있었고, 결함크기와 진폭간의 관계를 회귀분석을 통하여 얻어냄으로써 결함의 크기를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 실험을 통하여 얻어진 Lamb파를 영상화하여 결함의 검출을 손쉽게 할 수 있도록 하였다. Lamb파를 이용한 영상의 유용성을 검증하고자 SAT를 이용하여 용접부에 존재하는 자연결함 이미지를 획득하였다.

SAT 이미지와 Lamb파 이미지를 비교분석한 결과 결함 이미지의 해상도를 높이는 방법을 적용한다면 인공결함과 자연결함 탐상에 Lamb파의 진폭을 이용한 결함 이미지가 유용함을 확인하였다.

5. 이상으로 판재에서 용접부의 비파괴 평가에 이용하기 위하여 이루어진 레이저 유도 초음파인 Lamb파의 발생에 대한 연구과 결함 검출능력 및 영상화를 통한 결함 검출 유용성을 검증하였으며 이를 이용하여 기존 접촉식 비파괴 평가법을 대체할 수 있음을 확인하였다.

## Reference

1. Bork U. and Challis. R.E., 1995, "Nondestructive evaluation of the adhesive fillet size in a t-peel joint using ultrasonic lamb waves and a linear-network for data discrimination", Meas. Sci. Technol.. Vol. 6, No. 1, pp. 72-84
2. Alleyne D.N., and Cawley P., 1992, "The interaction of Lamb waves with defects", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control., Vol. 39, No. 3, pp. 381-397
3. Lamb H., 1889. "The Flezure of an Elastic Plate", in Proc. London Math. Soc., pp. 85-90
4. Worlton D. C., 1961, "Experimental confirmation of Lamb Waves at Megacycle Frequencies", The American Institute of Physics, Vol. 32, No. 6, pp. 967-971
5. Gazis D.C., 1959, "Three-Dimensional Investigation of the Propagation of Waves in Hollow Circular Cylinders 1. Analytical Foundation", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 31, No. 5, pp. 568-578
6. D. A. Oursler and J. W. Wagner. 1995, "Narrow-band hybrid pulsed laser/EMAT system for noncontact ultrasonic inspection using angled shear waves", Material Evaluation, Vol. 53, pp. 593-597
7. Gachagan, A., Hayward, G., Kelly, S.P. and Galbraith, W., 1996, "Charaterization of air-coupled transducers", IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, v.43 no.4, pp. 678-689
8. Dewhurst R.J., Edwards c., Mckie A.D., and Palmer, S.B., 1987, "Estimation of the thickness of thin metal sheet using laser generated ultrasound", Appl. Phys. Lett., Vol. 51, No. 14, pp. 1066-1068

9. Hutchins D.A., and Lundgren K., 1987, "A laser study of transient Lamb waves in thin materials", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 85, No. 4, pp. 1441-1448
10. Tsukahara Y., 1991, "Analysis of the elastic wave excitation in solid plates by phase velocity scanning of a laser beam", Appl. Phys Lett., Vol. 59, No. 25, pp. 2384-2385
11. Yamanaka K, Kolosov O. V., Nagata Y., and Koda T., 1993, "Analysis of excitation and coherent amplitude enhancement of surface acoustic waves by the phase velocity scanning method", J Appl. Phys. Vol. 74, No. 11, PP. 6511-6522
12. Cerniglia D. Jhang K. Y., and Djordjevic B. B., 2000, "Non-Contact Ultrasonic testing of Aircraft Lap Joint", Proceeding of 15th world Conference on Non-Destructive Testing, edied by G. Nardoni et al., Italian Society for NDE, 161th in CD title
13. H J Kim, K Y Jhang, M J Shin, J Y Kim, "A noncontact NDE method using a laser generated focused-lamb wave with enhanced defect-detection ability and spatial resolution", NDT&E International, Vol 39, 312-319, 2006
14. Scrub, C. B., Dewhurst, R. J., Huchins, D. A. and Plamer, S. B., 1982, Research Techniques in Nondestructive Testing, ed Sharpe, R. S. (Lodon: Academic Press) Vol. 5, ch. 8, 281.
15. C. B. Scruby, R. J. Dewhurst, D. A. Hutchins, and S.B. Palmer, "Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals," J. Appl. Phys., Vol. 51, No. 12, pp. 6210-6216, 1980.
16. Opsal, J. and Rosencwaig, A., 1982, J. Appl. Phys. 53, 4240.
17. Scruby C. B., and Drain L. E., 1990, Laser Ultrasonics: Techniques and Applications, Adam Hilger.
18. 윤석왕, 김호철 외3명, "물리음향학Ⅱ", 아카넷, pp. 261~315, 2001.

19. C. B. Scruby and L. E. Drain. "Laser Ultrasonic: Techniques and Application", Adam higer, 1990.
20. C. B. Scruby R. J. Dewhurst, D A. Hutchins, and S. B. Plamer. "Quantitative studies of thermally generated elastic waves in laser-irradiated metals" J. Appl. Phys. Vol. 51, No. 12 pp. 6210-6216, 1980.
21. Aussel, J. D., Le Burn, A. and Badboux, J. C., "Generating Acoustic Waves by Laser: Theoretical and Experimental Study of Emission Source," Ultrasonics, Vol 26, 1998.
22. Aindow, A. M., Dewhurst, R. J. Hutchins, D.A. and Palmer, S. B., 1980, Proc. Acoustics 80 conf., 277.
23. 4. Hutchins, D. A., Dewhurst, R. J. and Plamer, S. B., 1981a, Ultrasonics 19, 103.
24. S.G. Pierce, W.R. Philp, A. Gachagan, A. McNab, G. Hayward, and B. Culshaw, "Surface-bonded and embedded optical fibers as ultrasonic sensors", Appl. Optics, Vol. 35, No. 25, pp. 5191-5157, 1996.
25. W.J Staszewski, S.G. Pierce, K. Worden, W.R Philp, G.R. Tomlinson, and B. Culshaw, "Wavelet signal processing for enhanced Lamb-wave defect detection", Opt. Eng., Vol. 36, No. 7, pp. 1877-1888, 1997.
26. A. Gachagan, G. Hayward, A. McNab, P. Reynolds S.G. Pierce, W.R. Philp, and B. Culshaw, "Generation and reception of ultrasonic guided waves in composite plates using conformable piezoelectric transmitters and optical-fiber detectors", IEEE Trans. Ultrasonic., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 46, No. 1, pp. 72-81 1999.
27. J.J Alcoz, C.E. Lee and H.F. Taylor, "Embedded fiber-optic Fabry-Perot ultrasound sensor", IEEE Trans. Ultrasonic., Ferroelect., Freq. Contr., Vol. 37, No. 4, pp. 302-306 1990.

28. J.F. Dorigi, S. Krishnaswamy, and J.D. Achenbach, "Stabilization of an embedded fiber optic Fabry-Perot sensor for ultrasound detection", *IEEE Trans. Ultrasonic., Ferroelect., Freq. Contr.*, Vol. 42, No. 5, pp. 820-824, 1995.
29. Connes, F. A. and white, H.E., 1976, *Fundamentals of optics*, 4th Edn(New York: McGraw-Hill) 271, 281-283, 301
30. 김재열, 김훈조, 고명수 외4명, "구조물의 비파괴평가를 위한 레이저 초음파법 적용", 한국비파괴검사학회, 추계학술대회논문집, pp. 24~29, 2002.
31. 임충수, 오기장 외4명, "레이저 응용 초음파를 이용한 금속 시편의 결정 입경 측정연구", 한국비파괴검사학회, 춘계학술대회논문집, pp. 59~63, 2002.
32. J. W. Wagner, "Optical detection of ultrasound," In : R.N. Thurston, A.D. Pierce (Eds.), *Ultrasonic Measurements Methods, Physical Acoustics*, Vol. XIX, Academic Press, pp. 201-266 1990.
33. Joseph L. Rose, "Ultrasonic Waves in Solid Media", pp. 101~113, 1999.
34. 정현조, 김진호, "고주파수 근사 이론을 이용한 결함으로부터의 초음파 산란장 해석", 한국비파괴검사학회지, Vol. 20, No. 2, 2000.