



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2015년 8월
박사학위논문

3축 자동 비접촉식 초음파 탐상 스캐너 제작과 신뢰성 평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

곽 남 수

3축 자동 비접촉식 초음파 탐상 스캐너 제작과 신뢰성 평가

A Study on the Manufacture and Evaluation of
3-axes Automatic Non-contact Air-coupled
Ultrasonic Testing(NAUT) Scanner

2015년 8월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

곽 남 수

3축 자동 비접촉식 초음파 탐상 스캐너 제작과 신뢰성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학박사학위신청 논문으로 제출함

2015년 04월

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

곽 남 수

곽남수의 박사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 심재기 (인)

위 원 조선대학교 교수 윤성운 (인)

위 원 조선대학교 교수 차용훈 (인)

위 원 전주대학교 교수 김홍건 (인)

위 원 조선대학교 교수 김재열 (인)

2015년 06월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES	iv
LIST OF TABLES	vii
NOMENCLATURE	viii
ABSTRACT	x
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구동향 및 연구필요성	5
1. 국내·외 연구 동향	5
가. 탄소복합소재 국외 연구동향	5
나. 탄소복합소재 국내 연구동향	9
다. 초음파 탐상기술 국외 연구동향	12
라. 초음파 탐상기술 국내 연구동향	14
2. 연구필요성	16
제 3 절 연구방법	18
제 2 장 이론적 고찰	21
제 1 절 초음파 탐상의 기본 이론	21
1. 초음파 탐상기법 개요	21
2. 초음파 탐상기법의 원리	23
가. 초음파의 종류와 성질	25
나. 초음파 전파특성	31
제 2 절 초음파의 반사와 투과	43

1. 수직 입사(Normal Incidence)	43
2. 경사 입사(Oblique Incidence)	47
가. 반사와 굴절	47
나. 반사율과 투과율	50
3. 초음파 빔의 음장특성	52
가. 원형진동자의 중심축상의 음압	52
나. 지향성(Beam spread, Angle of directivity)	56
다. 점 집속 탐촉자의 음장	58
제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 실험	61
제 1 절 NAUT 수동 탐상 실험	61
1. NAUT A-Scan 수동 탐상 장치	61
2. 아크릴, CFRP, 알루미늄 시험편제작	62
3. NAUT A-Scan 수동 탐상 실험	63
가. 초음파 집속거리에 따른 투과파 진폭 측정	63
나. 공중 초음파 탐촉자 수신면적에 따른 진폭 측정	65
다. 재질별 초음파 투과율 측정	66
라. 시험편 경사각도와 초음파 투과파의 진폭측정	68
마. 탐촉자 각도변화에 따른 투과파의 진폭 측정	70
바. 알루미늄 평판 시험편의 결함 검출	71
제 2 절 NAUT 자동 탐상 실험	73
1. 공중 초음파 3축 자동 탐상 로봇	73
2. 공중 초음파 탐촉자(Air Probe)	83
3. C _f -C 브레이크 디스크, C _f -SiC 시험편 제작	89
4. NAUT C-Scan 자동 탐상 실험	92
가. 항공기용 C _f -C 브레이크 디스크 시험편 C-Scan 탐상실험	92

나. C _f -SiC 복합체 시험편 C-Scan 탐상 실험	101
제 4 장 결과 및 고찰	104
제 1 절 NAUT A-Scan 수동 탐상결과 및 고찰	104
1. 초음파 집속거리에 따른 투과파 진폭 분석	104
2. 공중 초음파 탐촉자 수신면적에 따른 진폭 분석	105
3. 재질별 초음파 투과율 분석	106
4. 시험편 경사각도와 초음파 투과파의 진폭 분석	108
5. 탐촉자 각도변화에 따른 투과파의 진폭 분석	109
6. 알루미늄 평판 시험편의 결함 검출 결과 분석	110
제 2 절 NAUT C-Scan 자동 탐상결과 및 고찰	111
1. C _f -C 브레이크 디스크 시험편 C-Scan	111
가. 정상·결함시험편의 마스킹 여부에 따른 C-Scan 결과분석	111
나. 정상시험편 결함 시험편의 송신 주파수에 따른 C-Scan 비교분석	123
2. C _f -SiC 복합체 시험편 C-Scan	132
가. 정상·결함시험편의 C-Scan 비교분석	132
제 5 장 결론	135
Reference	137

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	Developed C _f -SiC composites	5
Fig. 1-2	Developed X-38 body flap of Cf-SiC composites in NASA	7
Fig. 1-3	NITE-SiC/SiC composites materials	8
Fig. 1-4	Aircraft C _f -C brake discs and automobiles C _f -SiC brake discs	10
Fig. 1-5	Principle of a phased array ultrasonic	14
Fig. 1-6	PAUT system and flaw detecting image	15
Fig. 1-7	Principle of non-contact air-coupled ultrasonic testing	19
Fig. 2-1	Classification according to the frequency band	22
Fig. 2-2	Principle of ultrasonic pulse reflection method	23
Fig. 2-3	Principle of ultrasonic transceiver and beam focused distance	24
Fig. 2-4	Wave of ultrasonic mode	26
Fig. 2-5	Mode conversion	27
Fig. 2-6	Asymmetric mode and symmetric mode of lamb wave	29
Fig. 2-7	Phase velocity and group velocity in plate (Aluminum, thickness : 2mm)	30
Fig. 2-8	Burst wave(10 cycle)	39
Fig. 2-9	Reflection echo wave form and frequency content	39
Fig. 2-10	Reflection and Transmission by normal incidence on the boundary	43
Fig. 2-11	Reflection and refraction of oblique incidence	47
Fig. 2-12	Angle beam probe	50
Fig. 2-13	Field of ultrasonic beam by the vibrator	52
Fig. 2-14	Calculation of the beam spread by circular transducer	57
Fig. 2-15	Beam diameter and focal zone	59
Fig. 3-1	Composition of manual NAUT units for A-Scan inspection	61
Fig. 3-2	Specimens of acrylic panel and CFRP and aluminum	62
Fig. 3-3	Specimens of aluminum(Defect and no defect)	62
Fig. 3-4	Inspect of Al specimens	71
Fig. 3-5	Configurations of NAUT measuring circuit	75

LIST OF FIGURES(continued)

Fig. 3-6	Configuration of NAUT hardware system	75
Fig. 3-7	Ultrasonic focused distance measuring circuit	76
Fig. 3-8	Design drawing of 3-axes gantry robot	78
Fig. 3-9	3D Design drawing of NAUT system	79
Fig. 3-10	Manufactured NAUT System	81
Fig. 3-11	NAUT measuring and controlling S/W	82
Fig. 3-12	Configurations of air probe	83
Fig. 3-13	Air Probe	84
Fig. 3-14	Attenuation Characteristics of sound pressure by distance	85
Fig. 3-15	Sensitivity	87
Fig. 3-16	Sound pressure	87
Fig. 3-17	Radiation characteristics(Transmitted)	88
Fig. 3-18	Radiation characteristics(Receiver)	88
Fig. 3-19	Design of C _f -C brake disc specimens	89
Fig. 3-20	Specimens of C _f -C brake disc	90
Fig. 3-21	Specimens of C _f -SiC composites specimens	91
Fig. 3-22	Color map Display of C-Scan mode by echo signal	92
Fig. 3-23	Results of C-Scan inspection (No defect specimens_no masking)	95
Fig. 3-24	Results of C-Scan inspection (Defect specimens_no masking)	96
Fig. 3-25	Results of C-Scan inspection (No defect specimens_masking_340kHz)	97
Fig. 3-26	Results of C-Scan inspection (No defect specimens_masking_400kHz)	98
Fig. 3-27	Results of C-Scan inspection (Defect specimens_masking_340kHz)	99
Fig. 3-28	Results of C-Scan inspection (Defect specimens_masking_400kHz)	100

LIST OF FIGURES(continued)

Fig. 3-29 Results of C-Scan inspection (No defect specimens_masking_340kHz)	102
Fig. 3-30 Results of C-Scan inspection (Defect specimens_masking_340kHz)	103
Fig. 4-1 Results of Focal distance and amplitude	104
Fig. 4-2 Results of Focal distance and amplitude(800kHz,400kHz)	105
Fig. 4-3 Results of masking diameter and amplitude(50mm,100mm)	105
Fig. 4-4 Results of amplitude by specimens(400kHz, 800kHz)	106
Fig. 4-5 Results of ultrasonic guide wave height(400kHz & 800kHz)	107
Fig. 4-6 Results of transmitted wave distance(400kHz & 800kHz)	107
Fig. 4-7 Results of transmitted amplitude by angle change	108
Fig. 4-8 Results of A0-mode and S0-Mode by guided ultrasonic wave	109
Fig. 4-9 Results of S0-mode and A0-mode by incident angle	110
Fig. 4-10 Result of C-Scan Inspection(No defect specimens)	115
Fig. 4-11 Result of C-Scan Inspection(Defect specimens)	122
Fig. 4-12 Comparison of C-Scan Inspection(No defect specimens)	126
Fig. 4-13 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens)	127
Fig. 4-14 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens)	131
Fig. 4-15 Comparison of C-Scan Inspection	133
Fig. 4-16 Results of C-Scan Inspection(Defect specimens)	134

LIST OF TABLES

Table 1-1 Classification of composite materials based on the matrix phases	4
Table 1-2 Applications being considered for alumina and mullite matrix CFCCs	4
Table 2-1 Aluminum of lamb wave	30
Table 2-2 Sound velocity and wavelength of various materials	37
Table 3-1 Results of Focal distance and amplitude	63
Table 3-2 Results of Focal distance and amplitude($800kH\lambda$)	64
Table 3-3 Results of Focal distance and amplitude($400kH\lambda$)	65
Table 3-4 Results of amplitude(focal distance : $50mm, 100mm$)	66
Table 3-5 Results of amplitude by materials(focal distance : $50mm$)	68
Table 3-6 Results of ultrasonic guide wave height and transmitted wave distance for amplitude($400kH\lambda$)	69
Table 3-7 Results of ultrasonic guide wave height and transmitted wave distance for amplitude($800kH\lambda$)	69
Table 3-8 Results of the angle change of specimens (Aluminum $2mm$)	71
Table 3-9 Results of the angle change of specimens (Aluminum $6mm$)	72
Table 3-10 Results of transmitted wave by air probe incidence angle	73
Table 3-11 Results of amplitude by incident angle and specimens thickness	76
Table 3-12 Composition of NAUT System	81
Table 3-13 Experiment of condition(no masking specimens)	97
Table 3-14 Experiment of condition(masking specimens)	97
Table 3-15 Experiment of condition(C_f -SiC composite specimens)	105

NOMENCLATURE

f	: Frequency
C	: Sound velocity
K	: Bulk modulus
ρ	: Density
C_L	: Longitudinal wave velocity
C_S	: Shear wave velocity
C_R	: Rayleigh wave velocity
E	: Young's module
ν	: Poisson's ratio
ΔT	: The time interval of the bottom echo
G	: Shear module
x	: Propagation distance
a_0	: Amplitude of the particle
a_x	: Displacement of particle
v	: Process speed of wave
λ_m	: Distance of medium
Z	: Acoustic impedance
P	: Sound pressure
I	: Acoustic intensity
$r_{1 \rightarrow 2}$: Reflection coefficient
$t_{1 \rightarrow 2}$: Transmission coefficient
E	: Ultrasonic energy

NOMENCLATURE(continued)

E_i	: Incident wave energy
E_r	: Reflected wave energy
E_t	: Transmitted wave energy
α	: Critical angle
P_x	: Average sound pressure
X_0	: Distance of Near field
D_C	: Angle of directivity
f_{OP}	: Focused distance
Z_B	: Beginning of the focal zone
Z_E	: End of the focal zone
F_Z	: Focal Zone
D	: Element diameter
B_D	: Beam diameter
F_Z	: Focal zone

ABSTRACT

A Study on the Manufacture and Evaluation of 3-axes Automatic Non-contact Air-coupled Ultrasonic Testing(NAUT) Scanner

By Kwak Nam-Su

Advisor : Prof. Kim Jae-Yeol, Ph.D.

Dept. of Advanced parts and materials engineering

Graduate School of Chosun University

The purpose of this paper is to conduct the study on detection identification and assessment of internal defects for the C_f -C brake disk composite and the C_f -SiC composite for aircrafts and the semi metallic brakes for motorsports by applying non-contact air-coupled ultrasonic testing, the most advanced techniques of ultrasonic testing techniques among the nondestructive testing techniques.

The Non-contact Air-coupled Ultrasonic Testing (NAUT) used in this paper is the most advanced ultrasonic testing technique. It is a nondestructive testing that complements the energy loss occurred due to the acoustic impedance difference in the air with two transmitting/receiving non-contact ultrasonic probes and enables the non-contact ultrasonic testing through high-powered

ultrasonic focusing by using high-frequency band ultrasonic Pulsar-Receiver.

Typically, the ultrasonic testing performs the ultrasonic detection using the contact ultrasonic probe, however, by using the NAUT technique, it is possible to conduct the non-contact ultrasonic testing without the couplant that delivers the ultrasonic since it is able to do the ultrasonic focusing in the air. Since the transmission and reception of the ultrasonic occurs on the steady state, the NAUT is able to conduct the ultrasonic detection on the materials in high temperature (200°C) or low temperature (10°C) which were not possible to perform with the existing contact detection at the room temperature, or specimens with rough surface, complex shape or small section.

In this paper, non-contact air-coupled ultrasonic detection experiment applied the Transmission Method and Reflection Method was conducted as follows:

First, to analyze the ultrasonic attenuation characteristics during the ultrasonic focusing, the amplitude relationship of the transmitted waves depending on the changes of the ultrasonic focusing distance was analyzed using acrylic, aluminum and CFRP specimens. The experiment was performed and the amplitude relationship of the transmitted wave was analyzed depending on the reception area of the ultrasonic probe of plane figure type.

Second, the experiment comparing the transmissivity at the frequencies of 400 kHz and 800 kHz was performed by placing each specimens of different materials between transmitting and receiving ultrasonic probes. The experiment to analyze the amplitude relationship between gradient angle and transmitted wave by using Transmission Method and Reflection Method techniques was also performed.

Third, to analyze the transmitted wave relationship between sound area and defected area of an aluminum flat type specimens, the analysis

experiment of amplitude relationship between transmitted waves, depending on the measurement mode, was performed by using the Reflection Method.

Fourth, for internal defect detection of the Cf-C brake disk and the Cf-SiC composite for aircrafts using the non-contact air-coupled ultrasonic testing, the experiment for detection position and defect size confirmation was performed with C-Scan sectional image.

제1장 서론

제1절 연구배경

현재 국내의 항공우주산업은 대규모 시설 및 연구개발 투자가 필수적인 분야로서 세계시장의 70% 이상을 점유하고 있는 서방 선진국에서는 수출산업 및 첨단산업 육성, 자주국방, 국위선양 등의 명백한 목적을 가지고 국가주도로 추진하고 있는 산업이다⁽¹⁾.

특히 항공우주산업은 70년대의 섬유산업, 80년대의 조선 및 가전제품, 90년대의 자동차산업에 이어 21세기에 우리나라가 전략적으로 이끌어 나가야 할 고부가가치의 새로운 성장동력산업이며, 또한 최근의 정보화 사회 시대의 도래로 통신·방송위성 등의 수요가 크게 증가하고 있는 서비스 산업 분야도 항공우주기술로 인하여 비약적으로 발전이 예상되고 있다⁽²⁾.

현재의 우리나라의 제조업은 항공우주기술을 응용하여 차세대 기술로의 새로운 도약이 가능한 시점이며, 특히 첨단 신소재 응용기술은 초정밀 가공 기술, 정밀전자 응용기술과 시스템 관리기술과 함께 최첨단 융복합 산업으로의 파급될 가능성이 매우 큰 기술이라 할 수 있다. 이에 따라 항공우주기술에 사용되는 첨단 신소재 부품에 대한 정량적인 신뢰성 평가기술에 대한 원천기술 연구도 활발히 진행되고 있는 상황이다.

항공우주용 첨단 신소재인 발사체 노출 부분은 고온, 고압의 가스가 배출되는 부분으로 기존의 사용되는 금속재인 몰리브데늄, 탄탈륨 그리고 텅스텐 등은 gas stream에 의한 erosion 및 corrosion 저항성이 낮아 그 수명이 매우 짧기 때문에 이에 대한 저항성이 우수한 세라믹 소재가 대체소재로 개발 및 적용되고 있다⁽³⁾.

Erosion 및 corrosion 저항성이 우수한 세라믹 소재는 고온 노출에 의한 thermal stress cracking과 creep 파괴에 대한 특성 향상이 요구된다. 이에 따라 최근 이러한 특성이 보완이 가능한 세라믹 섬유가 강화된 세라믹 복합재료가

주목 받고 있으며, 비산화물계 세라믹 기지상 복합소재(non-oxide ceramic matrix composite), 즉 탄소섬유(carbon fiber) 또는 탄화규소 섬유(SiC fiber)로 강화된 탄화규소 복합소재(C_f/C -SiC 또는 SiC_f -SiC Composite)가 그 후보 소재로 대두되고 있다. 또한 로켓의 효율 및 성능 향상을 위해서는 경량화가 필수적으로 요구되며, 이를 위해 발사체 부분의 소재 경량화 연구가 수행되고 있으며, 전체 공정의 제조단가의 절감을 위한 공정개발 및 품질측정·평가 기술 개발 역시 활발한 연구가 진행되고 있다.

일반 CMC 복합재료는 기지상을 중심으로 Table 1-1과 같이 분류할 수 있으며, 세라믹스 기지상 복합체(ceramic matrix composite, CMC)는 세라믹스의 취약점인 취성 파괴 문제점을 개선하고자 개발되고 있다.

CMC는 기계적 물성이 우수한 보강재를 입자, 휘스커, 또는 섬유 형태로 분산시켜 복합화 한 것으로서, 입자나 휘스커 강화 세라믹 복합체는 단일상 세라믹(monolithic ceramics)의 파괴에너지 범위를 크게 벗어나지 못하지만, 섬유 함유 세라믹 복합체(continuous fiber reinforced ceramic composite, CFCC)는 기지상에 응력이 가해져 균열이 전파될 때 섬유가 에너지를 흡수하는 역할을 하여 세라믹스의 파괴인성을 향상시킬 수 있는 소재로 알려져 있다⁽⁴⁾.

CFCC의 기지상의 산화물이거나 혹은 탄화물(탄소포함)인 경우가 대부분이며, 대표적인 산화물 기지상 CFCC로는 알루미나(alumina)와 물라이트(mullite)기지 복합체가 있다. 이 산화물 복합체들은 염이나 용융 유리에 대한 내식성이 우수하며, 고인성, 경량 및 우수한 열충격 저항성을 지니고 있으므로 Table 1-2와 같은 용도에 적용되고 있으며, 용도에 따른 장점은 표에 요약한 바와 같다.

또 다른 대표적인 CMC 는 C 또는 서두에 언급한 SiC 계의 CFCC로 C_f/C , $C_f/(C-SiC)$, C_f/SiC , SiC_f/SiC 등이 있다. C_f/C 복합체는 항공기와 자동차 브레이크 디스크에서 우주왕복선의 단열타일에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있으며, 내산화 특성을 향상시키기 위해 $C_f/(C-SiC)$ 또는 C_f-SiC 를 적용하고 있다⁽⁵⁾⁽⁶⁾.

SiC_f/SiC 복합체는 1970년대 중반에 SiC 섬유가 개발된 이후 본격적으로 개발되기 시작하였으며, 경제성과 기술적인 문제점 등으로 일반 산업용보다 특수한 용도로만 적용되고 있다. 그러나 최근 제조공정 기술의 향상으로 기술적인 진보가 이루어지고 있다⁽⁷⁾.

C_f-SiC 및 SiC_f/SiC 복합체는 높은 열전도도, 우수한 내식성 및 내마모성, 낮은 열팽창률 및 경량으로 인하여 항공우주용 부품으로 aircraft thrust deflector, jet vane, combustion chamber, elevens, body flap, shingle, 가스 터빈 엔진부품으로 inner scroll(C_f/SiC), inner scroll support, inner shroud, extension liner, combustion liner, outer shroud, turbine rotor에 적용하며, 이외에도 차세대 엔진부품, 열병합 발전용 가스터빈 부품, 열교환기뿐만 아니라 원자력 산업의 가스냉각형 4세대 원자로의 노심 구조재료와 핵융합로 블랭크 구조재료 등으로 응용하기 위하여 연구개발이 진행되고 있다.

따라서 최첨단 신소재인 탄소섬유 강화 탄화규소 복합소재의 제조공정 시 발생할 수 있는 내외부 결함검출 및 복합소재 사용 시, 사용조건 및 외부환경에 따른 물리적 거동특성을 비파괴적 기법을 통하여 판별하고 평가할 수 있는 정량적 신뢰성 평가 기법에 관한 연구가 필수적이다.

본 논문에서는 탄소섬유 강화 탄화규소 복합재의 내부결함 검출 및 판별을 위하여 비접촉 공중 초음파 탐상기법(non-contact air-coupled ultrasonic testing method)을 적용한 정량적 비파괴 평가기법에 관한 연구를 수행하고자 한다.

Table 1-1 Classification of composite materials based on the matrix phases

COMPOSITE MATERIALS			
Polymer Matrix [PMC]	Metal Matrix [MMC]	Ceramic Matrix [CMC]	Natural Composites
Thermoplastic Matrix Continuous fiber Long fiber Short fiber	Metals & Alloys Continuous fiber Short fiber Whisker Particulate	Ceramics, Glass Continuous fiber Short fiber Whisker Particulate	Timber Animal Tissue Plant Tissue
Thermosetting Matrix Continuous fiber Long fiber Short fiber		Cement, Plaster Concrete Continuous fiber Long fiber	
Thermoplastic Matrix Continuous fiber Discontinuous fiber		Carbon Continuous fiber Long fiber	

Table 1-2 Applications being considered for alumina and mullite matrix CFCCs

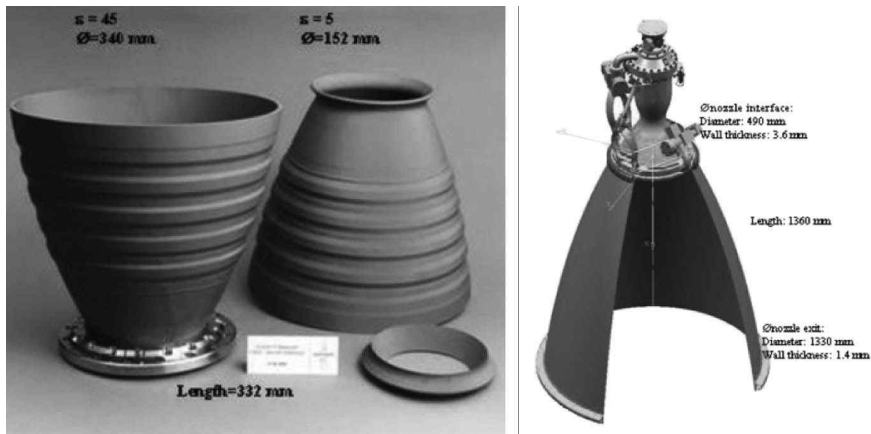
Application	Conditions imposed on Oxide matrix CFCC	Benefits demonstrated or perceived by the customer
Thermophotovoltaic burner/emitter	High thermal shock, high temp., surface combustion	Increased efficiency, multifuel capability, maximum on/off response, increased life
Heat exchanger	High temperature, high thermal stresses, highly erosive and hot corrosion	Higher temperature capability and life
Hot-gas filtration	Harsh chemical environment, high temp.	Increased life, higher temperature capability
Gas turbine engine combustion liners and shrouds	High temp., hot corrosion	Reduced emissions and increased efficiency resulting from reduced cooling air, higher temperature capability
Burner stabilizer	High corrosion	Longer life

제2절 연구동향 및 연구필요성

1. 국내·외 연구 동향

가. 탄소복합소재 국외 연구동향

독일 DLR(German Aerospace Research Center)에서는 1980년대에 LSI 공정을 개발하여 현재까지 지속적으로 연구하고 있으며, 이미 상업화되어 여러 분야에 적용되어지고 있다. 현재는 DLR과 EADS-ST Company와 C_f-SiC 복합소재를 이용하여 Rocket Propulsion System 소재로 적용하는 연구를 진행하고 있다. Fig.1-1은 C_f-SiC 복합소재를 이용한 vulcain nozzle과 aestus engine nozzle을 나타내고 있다.



(a) Vulcain Nozzle (b) Aestus engine nozzle

Fig.1-1 Developed C_f-SiC composites

DLR은 통상적인 CVI(Chemical vapor infiltration) 및 LPI/PIP(Liquid Polymer Infiltration/Polymer Infiltration and Pyrolysis) 공정과 비교하여 LSI 공정이 기술적, 경제적 측면에서 우수하며 그 응용범위가 다양하는 관

단하에 LSI 공정을 적용한 복합재료 개발에 집중하고 있다.

이미 C_f -SiC 복합소재의 브레이크 패드 개발을 완료하여 FCT Ingenieurkeramik GmbH에서 성공적으로 생산하고 있다. 현재까지 재사용 가능한 Space Vehicle의 경량 열차폐막 개발, 자동차 및 산업용 마찰패드 개발, 고온에서 변형이 없는 측정 장치 부품개발, 내열 및 내마모성 성능이 우수한 로켓용 부품 개발, 발전설비용 고온 열교환기 및 경량 개인 방호부품 등에 기술을 확보한 상태이며, 향후 1000°C이상의 고온 적용이 가능한 SiC 섬유 강화 복합재료 개발, CFRP preform 제조 기술 개발, 복잡한 형상의 부품 개발과 제작된 제품의 비파괴 검사 기술개발 등의 기술 확보를 위해 연구를 진행 중에 있다.

현재 유럽에서는 항공우주용 C_f -SiC 소재 개발이 이루어지고 있으며, 독일의 경우 1900°C까지는 견디는 궤도재 진입용 SHEFEX의 보호판넬에 LSI 공정을 이용해 제작된 C_f -SiC를 적용하였으며, 2005년도에 211km의 비행거리와 550초의 비행시간을 기록하였다.

러시아의 경우에도 궤도재진입용 FOTON의 Thermal Protection System에 C_f -SiC를 적용하는 기술을 개발, 15일간 비행 후 궤도에 진입하여 실증을 완료한 바 있다.

그 외에도 2010년부터 2013년까지 개발된 프랑스의 LEA에도 LSI 공정을 적용한 C_f -SiC 복합소재가 적용되었다. 미국의 경우, ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서는 2003년부터 LSI 공정을 이용하여 세라믹 열교환기 등의 상업용 제품개발을 주도하고 있다. 현재 상업용 CMC는 GE에서 CVI와 MI(또는 LSI) 공정 모두를 사용하여 항공기 엔진의 터빈파트, 항공우주용 구조체, 열교환기 그리고 로켓 추진제 등의 부품을 생산하고 있다.

GE 생산제품 중 MI 공정을 적용한 SiC_f -SiC 복합소재의 경우, 약 1370°C까지 사용이 가능하며, CVI 공정을 적용한 C_f -SiC의 경우는 2000°C정도까지 사용이 가능하다. 또한 ORNL에서는 에너지산업 분야에 적용하기 위한 탄소섬유 복합체 기술에 대한 검토를 거쳐 단·장기적인 추진계획을 수립하여 진행 중에 있다.

한편 현재 NASA의 경우, Spacecraft인 X-38의 Body Flap 부품 개발에

C_f -SiC 복합소재를 적용하기 위해 2억불 규모의 연구비를 투자하고 있으며, 1800℃에서 적용이 가능한 Nose Cap 개발연구를 위해 독일과 함께 5억불 규모의 프로젝트를 수행하고 있다. Fig.1-2는 미국 NASA에 개발한 X-38 C_f -SiC 복합소재 Body Flap을 나타내고 있다.

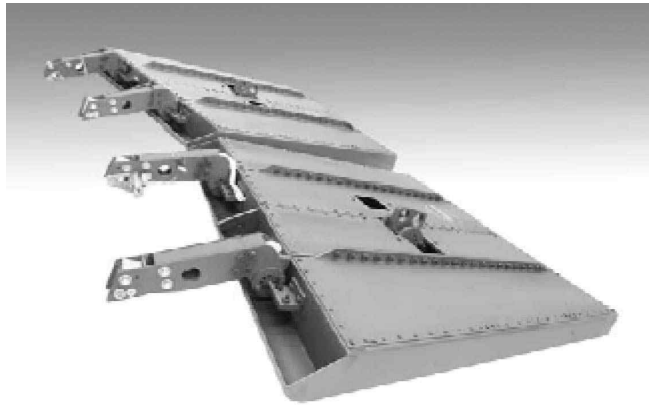


Fig.1-2 Developed X-38 body flap of C_f -SiC composites in NASA

일본의 경우에는 1991년에 항공우주용 고온구조재 연구소를 설립하여 현재까지 지속적인 연구개발을 하고 있으며, NIMS(National Institute for Materials Science)에서도 LSI 공정을 적용한 고온 C_f -SiC 복합소재 개발이 이루어지고 있다. Kyoto University에서는 CVI과 PIP 공정의 형상에 대한 제약과 높은 기공률 그리고 LSI 공정의 상(phase)조절 및 공정 개선이 필요함을 향상시킨 'NITE-SiC/SiC'를 개발하였다⁽⁸⁾.

이 기술은 현재 'NITE-SiC/SiC' 상품명으로 SiC_f -SiC 복합소재 제조를 위한 신 공정을 개발함으로써 기존의 SiC_f -SiC 복합소재보다 우수한 특성을 갖는 소재에 대한 양산기술이 확보되어 자국 내에 5,000만 엔의 자본금을 출자하여 (株)エネテック總研회사를 설립하고 SiC 섬유강화 복합소재, SiC섬유, SiC 나노분말 등의 사업화를 시작하였다. Fig.1-3은 NITE-SiC/SiC 복합소재의 개발품을 나타내고 있다⁽⁹⁾.

NITE Process(Nano-Infiltration Transient Eutectic phase process)는 PIP와 LSI 공정을 조합한 것으로서 총 2단계 공정으로 구분된다. 1단계에서는 SiC 나노분말 슬러리를 섬유에 함치시켜 1차적으로 PIP 공정을 거치게 되며, 이후 2단계에서 LSI 공정을 하게 됨으로서 PIP 공정에서 발생하는 단점들을 해결하게 되는 공정이다. 이러한 NITE 공정을 적용한 기술은 이미 2006년도 부터 도입하기 시작하였으며, 이를 이용하여 현재는 양산이 가능한 수준에 도달하였다⁽¹⁰⁾.

최근 미국과 일본은 JUPITER-II Project를 통해 원자력 반응기의 협동연구를 지속적으로 진행하고 있으며, 여기에 NITE 공정과 CVI/NITE 하이브리드 공정 등이 적용되고 있다⁽¹¹⁾. 그러므로, 방사능 노출에 의한 Swelling과 열진도 변화, 열충격에 의한 균열발생 등의 원인 규명 및 복합소재의 결함검출을 위한 비파괴 검사 및 신뢰성 평가 기술에 대한 활발한 연구가 진행되고 있는 상황이다.

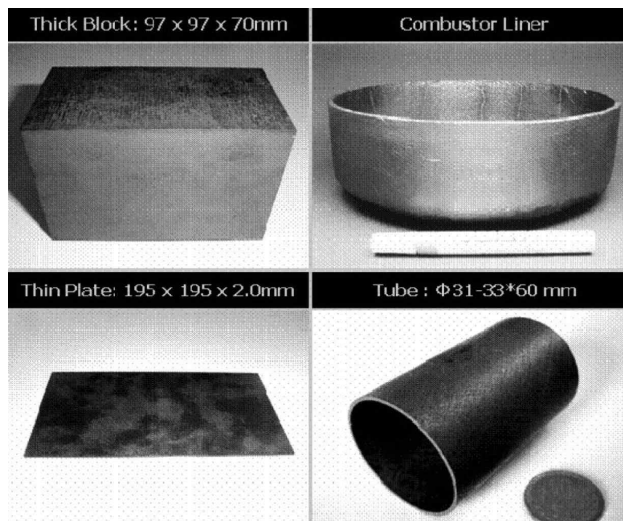


Fig.1-3 NITE-SiC/SiC composites materials

나. 탄소복합소재 국내 연구동향

국내의 경우, 한국에너지기술연구원(KIER)에서는 1980년대 후반 LSI 공정에 의한 치밀질 Si-SiC 세라믹 소재 개발 연구를 국내에서 최초로 수행한 이래, 연속상 탄소섬유(continuous 3K Yarn)를 출발원료로 사용하여 필라멘트 와인딩(filament winding) 공정으로 철강 진공침탄 열처리로 용 래디언트 튜브 버너 노즐 개발을 수행하여 150mmOD×1500mmL급 sigled-ended type 래디언트 튜브 및 open-ended type 버너 노즐 형상화 기술을 확립한 후, LSI 공정을 이용한 C_f-SiC 복합소재 시제품 제조기술을 확보하고 있다⁽¹²⁾.

또한 한국에너지기술연구원은 2007년부터 한국세라믹 기술원(KICET), 한국원자력연구원(KAERI)과 협동으로 SiC 섬유강화 SiC 복합소재를 위한 원천 기술을 개발 중에 있으며, KIER에서는 near-net shape 프리폼 형상 기술 확립, KICET에서 연속상 SiC 장섬유 개발, KAERI에서는 KIER에서 형상화 된 성형체를 이용하여 CVI 공정에 의한 치밀질 SiC_f-SiC 복합소재 개발기술 확립 연구를 수행하고 있다.

한국원자력연구원에서는 CVD, CVI 공정 및 탄화규소 분말을 이용한 고온 가압소결 공정, 고분자 함침공정(PIP) 등을 적용하여 SiC_f/SiC 복합소재 제조를 위한 기반 기술과 세라믹 섬유의 인성강화를 위한 섬유코팅 기술을 보유하고 있으며, 또한 내방사성 특성 평가를 위한 조사 시험 기술, 가혹 환경에서의 기계적 특성 평가기술, 내환경 특성 평가기술 등을 확보해 나가고 있다.

한국세라믹기술원은 초고온용 섬유제조를 위한 고분자 전구체 제조기술 및 개질에 대한 기초기술 및 SiC 섬유 제조 기초기술 및 SiC 섬유 제조 기초기술 개발을 수행한 바 있으며, 이 사업을 통해 촉매공정을 통한 폴리카보실란(polycarbosilane)의 상압반응 합성기술을 개발하였고, 이로부터 반결정형 SiC 섬유의 제조기술을 확립하였다.

또한 알루미늄의 직접도핑기술 개발과 이로부터 제조된 개질 고분자 전구체를 이용하여 섬유를 만들고, 1800℃ 이상에서 소결하여 치밀하고 완전 결정화된 섬유를 제조하는데 성공하였다.

최근에서는 그 후속으로 섬유제조방법을 다양화하여 제조되는 SiC 섬유의 사이즈와 형상을 조절함으로써 그 응용 분야를 개척하는 시도를 하고 있다.

한편 국내의 산업체 중, 대양산업에서는 국내 출연연구소와 방위산업체와 공동으로 피치 함침공정을 이용한 C_f-C 복합소재를 이용하여 군사용 로켓 노즐 개발을 시도하여 제품개발과 성능평가를 수행한 바 있으며, 민간항공용 로켓 엔진 확대부 소재를 C_f-C 복합소재로 개발하여 성능평가를 수행한 바 있다.

또한 한국에너지기술원과는 정부사업에 참여하여 철강 진공침탄 열처리용 래디언트 튜브(radiant tube) 및 래디언트 버너 노즐용 C_f-SiC 복합소재 국산화 개발을 성공적으로 수행하였으며, 이 사업을 통해 LSI 공정을 이용한 C_f-SiC , SiC_f-SiC 복합소재 생산을 위한 수지함침 시스템, 필라멘트 와인딩 시스템, 고온진공저항가열로, 고온 진동유도가열도 등의 기초장비를 구축하고 있다.

(주)DACC에서는 ADD, KARI 등의 연구기관 함께 군수용, 항공용 C_f-C 복합소재 제품을 개발하여 국내에서 가장 처음으로 상품화 한 기업으로 CVD 및 피치 함침 공정을 이용한 C_f-C 복합소재 제조기술을 확보하고 있다. 또한 1990년대 후반부터는 산학연 공동으로 탄소/탄소 복합체 개발을 수행해 왔으며, 10여간의 개발기간을 거쳐 현재, F-16 탄소/탄소 브레이크 디스크를 개발을 완료하여 한국공군 및 해외시장에 양상 공급 중에 있다. Fig.1-4는 (주)DACC에서 개발한 항공기용 C_f-C 브레이크 디스크 및 자동차용 C_f-SiC 브레이크 디스크를 나타내고 있다.



Fig.1-4 Aircraft C_f-C brake discs and automobiles C_f-SiC brake discs

이외에도 (주)DACC에서는 군수용 추진기관 내열 부품을 1990년대 초부터 연구개발 하였으며, 현재 제품의 양산화가 이루어진 상태이며, 2009년도 현대 자동차/현대모비스와 공동으로 C_f -SiC 복합체를 재료로 하는 자동차용 브레이크 시스템 개발을 완료하고, 양산시스템을 구축하고 있다.

현재는 (주)DACC와 한국에너지기술연구원에서 ‘열보호용 내열 실리콘카바이드(SiC) 복합재료 및 경량화 기술’ 개발사업을 진행하고 있으며, 이 사업을 통해 우주 발사체 노즐용 탄화규소섬유 강화 탄화규소 복합소재 제조를 위한 원천기술 개발과 시작품 개발연구를 진행 중에 있다.

본 논문에서는 (주)DACC에서 개발한 항공기용 C_f -C 브레이크 디스크를 양산제품을 대상으로 비접촉 공중 초음파 탐상 기법을 적용한 비파괴 검사 기초 실험 및 응용연구를 수행하고자 한다.

다. 초음파 탐상기술 국외 연구동향

(1) 위상배열 초음파검사(PAUT:Phased Array Ultrasonic Testing)

미국기계학회 ASME Code Section V Article 4의 T-421.1에서 CIT(Com-pulverized Imaging Technology)의 방법 중의 하나로 PA법의 사용을 인정하고 있으며, ASTM(미국재료시험학회)에서는 ASTM E 2491.2006 “위상배열법의 장치 및 시스템특성평가를 위한 표준장려사항”을 발표하였다.

일본에서는 원자로냉각재순환계배관의 용접부에 발생한 SCC(stress corrosion crack)의 실기배관 샘플을 사용한 라운드 로빈 테스트에서 PAUT가 호평을 받아 JEAG4207-2004(경수형 원자력발전소용 기기의 가동중 검사시의 초음파탐상 지침)의 5장에 “위상배열법에 의한 결함깊이 치수 측정요령”에 대한 기준이 설정되어 있다.

미국과 유럽에서는 원자력발전설비에 대한 UT의 인증시스템이 구축되어 있어 자격인증 PD(Performance Demonstration)가 이뤄지고 있으며, 미국에서는 1989년에 ASME Section XI 에 PD에 관한 규정이 Appendix VIII로 추가되었다. 유럽에서는 미국의 PD인증에 상당하는 규정 ENIQ (European Network for Inspection Qualification)이 도입되어 영국, 프랑스, 독일, 네덜란드 등 각국이 적용해 가고 있다⁽¹³⁾.

(2) 레이저 초음파 검사(Laser Ultrasonic Testing)

1980년대 말부터 복합재료의 군용기 이용에 관여해온 미국의 LMA(Lockheed Martin Aeronautic)사는 레이저 UT기술을 개발하여 2000년 6월 이후 약 7년간 20,000개 이상의 부품을 검사할 수 있는 자체 기술력을 확보하였다.

일본의 TOSHIBA사는 광 케이블을 사용하는 레이저 UT를 개발하였다. 깊이가 0.1mm의 미소 표면균열을 검출할 수 있고 그 균열 깊이가 0.5mm 일 경우 표준편차 $\pm 0.2\text{mm}$ 이라는 고정밀도 측정이 가능한 기술을 개발하였다⁽¹⁴⁾.

(3) 공명 초음파 분광법(Resonant Ultrasonic Spectroscopy)

공명 초음파 분광법(RUS)은 재료의 성질(탄성계수)을 측정하고, 비파괴 평가를 위해 이용되는 최신기법으로서 100kHz에서 수십 MHz에 걸치는 넓은 주파수범위에서 구조물의 기계적 공명주파수를 측정하는 것이다⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾.

이 기술은 미국 Los Alamos 국립연구소의 과학자들에 의해 최초로 개발되었으며, 현재 Wisconsin대학, Alabama대학, California 대학(San Diego), Colorado주립대학 등에서 연구가 진행되고 있고, 합금, MEMS(Micro Electro Mechanical System), 생체조직(뼈)의 기계적 성질을 파악하는데 이용되고 있다.

Los Alamos국립연구소와 연구협약에 의해 RUS기술개발을 해온 Dynamic Resonance Systems사(Wyoming주 Powell)는 재료의 탄성측정용 상품(소프트웨어 MODULUS)을 시장에 출시하였다⁽¹⁷⁾.

라. 초음파 탐상기술 국내 연구동향

(1) 위상배열 초음파검사(PAUT:Phased Array Ultrasonic Testing)

PA 프로브(탐촉자)는 많은 요소(16~256개)로 구성되어 있으며 이들 요소는 외부의 입력에 따라 각각 독립적으로 펄스를 발신/수신 할 수 있으며, 프로브는 요소들의 선형배열, 2차원 매트릭스배열, 원형배열 그리고 기타 복잡한 형태이며, 많이 이용되는 프로브의 진동수는 2 MHz에서 10 MHz 대역폭을 가지며 PA시스템은 요소들을 조정하고, 에코(반사파)를 수신하여 디지털화 하고, 이들 에코정보를 여러 가지 표준 양식에 맞추어 도식화하는 컴퓨터로 작동되는 기기로 구성된다.

파동의 위상변화는 실제로 이들 발신신호의 시간을 조절(time delay)함으로써 합성된 파동을 원하는 방향으로 전파하게 할 수 있으며, 큰 파면은 제일 처음 발진된 것이고 나중에 발진된 파도들과의 가감현상으로 합성파는 화살 방향으로 전진한다. Fig.1-5는 위상배열 초음파 검사의 원리를 나타낸 그림으로 초음파 빔의 형성에 따라 시간 지연과 다중빔 형성의 원리를 나타낸다.

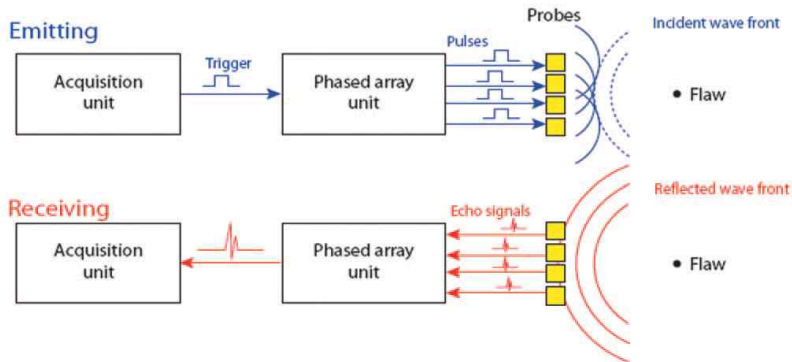


Fig.1-5 Principle of a phased array ultrasonic

수신과 해석 소프트웨어는 작업자가 입력하는 검사각도, 초점거리, 주사방식 등의 입력에 맞추어 시간지연을 계산하며, 이 계산은 위상정확도를 얻기 위해 2나노초의 정확도가 요구되며, 펄스가 방출되면 각 요소는 빔을 발송하게

되고 이 빔들은 서로 가감 상쇄하고 파면을 형성하여 전파하고 결합에 의한 반사파의 수신은 이 수순이 역방향으로 돌아옴으로 빔을 조정할 수 있다. 초음파의“펄스·에코”빔은 A, B, C Scan 등 같이 검사대상의 내부를 보면서 불연속부위에 관한 정보를 해석하여 단면의 이미지를 보여준다.



Fig.1-6 PAUT system and flaw detecting image

국내의 원자력 발전소는 현재 이 기술을 원자로 압력용기, 냉각재 순환계 배관에 대한 가동 중 검사에서 PD(Performance Demonstration) 인증을 위한 방법을 중점적으로 적용시키고 있다.

근래에 와서 국내에서도 PAUT시스템장비들을 외국에서 도입하여 활용하는 예가 증가하는 추세이며, 한국수력원자력(주), KPS(구 한전기공), 한국전력연구원 (KEPRI) 등은 원자력을 포함한 발전소 보수관련 업무에 활용하고 있으며, 두산중공업은 중화학공업제품 검사에 활용하고 있다.

서울 메트로는 PA를 장착한 차축 초음파 자동탐상장치(KJTD PAL3)를 설치했고, 철도공사가 3대 도입계약을 했으며 비파괴검사업체들은 작년부터 도입하기 시작했는데 PAUT검사장비수요가 급속히 증가하고 있다.

대한검사기술(주), 삼영검사엔지니어링(주), 한국공업엔지니어링, 유영검사(주), 지스컴(주) 등 NDT업체들은 일본 Olympus사의 OmniScan(휴대용)장비를 보유하고 있으며 삼성중공업의 선박 용접부위 검사와 GS 칼텍스 등 화학플랜트의 SUS배관용접부위 검사에 적용하고 있으며, 특히 대한검사기술(주)은 최초로 장비를 도입하였고 대만과 사우디아라비아에 검사 용역을 성공리에 마친 바 있다.

2. 연구필요성

탄소섬유 강화 탄소규소 복합체는 고비중의 슈퍼합금 소재의 경량화 대체재로 이용된 소재로서 우주 발사체나 로켓 엔진요소 부품 소재로 적용되기 시작하여 항공기용 엔진 노즐, 연소기 챔버, 가스 터빈, 열교환기나 고온 화학공업용 소재로 광범위 하에 활용되고 있다⁽¹⁸⁾.

또한 고온에서의 우수한 내마모성과 마찰 특성으로 인하여 항공기나 육상 수소용 장치의 브레이크 시스템 소재에 적극적으로 활용되고 있으며, 내화성, 고온 기계적 특성(creep resistance), 중성자나 방사능에 대한 적응성으로 인하여 발전용 고온 핵반응기(fission & fusion) 소재로 활용이 기대되는 있는 소재이다.

그러나 탄소섬유 강화 탄화규소 복합체의 경우, 일반 산업용에 비해 항공우주나 국방용 부품이나 소재로 활용분야가 광범위한 공공성이 큰 소재기술이 때문에 우리나라의 경우, 현재까지는 기술이전을 통한 추진은 2015년 이후에 활발히 진행될 것으로 판단된다.

또한, 가스터빈, 고효율 열교환기나 고온 화학공업용 소재 등은 원천기술 확보를 통한 spin-off 대상 성과물이 될 수 있기 때문에 이들에 대한 맞춤형 산업원천기술권리와 확보 및 이의 산업체 기술이전을 통한 상용화 유도는 어느 정도 가능할 것이다.

이에 따라 탄소섬유 강화 탄화규소 복합체의 성공적인 연구개발은 항공우주, 국방, 원자력 등 차세대 미래성장동력 산업뿐만 아니라 최근의 저탄소·녹색생장에 부응할 수 있는 신재생에너지 산업(풍력 및 태양열 발전), 차세대 전지(연료전지, 슈퍼캐패시터), 청정연료(차세대 복합발전, 석탄 액화)등의 산업분야에 적용할 수 있는 새로 세라믹 소재 기술이 될 수 있으며, 산업맞춤형 원천기술의 확립을 통해 시장 다변화와 세계시장 진출을 통한 우리나라의 소재 산업을 활성화시킬 수 있는 경제·산업적으로 매우 중요한 기술이라 할 수 있다.

또한 현재의 우리나라의 제조업은 항공우주기술을 응용하여 차세대 기술로의 새로운 도약이 가능한 시점이며, 특히 첨단 신소재 응용기술은 초정밀 가공 기술, 정밀전자응용기술과 시스템 관리기술과 함께 산업으로의 파급될 가능성이 매우 큰 기술이라 할 수 있다.

항공우주용 첨단 신소재인 발사체의 노즐 부분은 고온, 고압의 가스가 배출되는 부분으로 기존의 사용되는 금속재인 몰리브데늄, 탄탈륨 그리고 텅스텐 등은 gas stream에 의한 erosion 및 corrosion 저항성이 낮아 그 수명이 매우 짧기 때문에 이에 대한 저항성이 우수한 세라믹 소재가 대체소재로 개발 및 적용되고 있다.

또한 로켓의 효율 및 성능향상을 위해서는 경량화가 필수적으로 요구되며, 이를 위해 발사체 부분의 소재 경량화 연구가 수행되고 있으며, 전체 공정의 제조단가의 절감을 위한 공정개발 역시 활발한 연구가 진행되고 있다.

국내의 첨단신소재 개발에 따른 소재특성 분석기술과 하이브리드 복합소재의 비파괴 평가기술은 제조공정에 필수적으로 연관되어 있으며, 대외 기술경쟁력 확보와 우위를 선점하기 위해서는 원천기술 확보가 반드시 필요하다.

따라서 탄소섬유 탄화규소 복합체의 제조공정 시 발생할 수 있는 품질결함 및 측정기술 개발의 원천기술에 대한 선행기술이 시급히 진행되어야 할 것이며 신뢰성평가를 위한 최첨단의 비파괴 검사기법 및 기술에 대한 연구가 필수적으로 필요한 상황이다.

본 논문에서 비파괴 검사 기술 중 초음파 탐상기법의 최첨단 기법인 비접촉 공중 초음파 탐상기법을 적용하여 탄소섬유 강화 탄화규소 복합체의 내부결함 검출 판별 및 평가에 관한 연구를 수행하여 기초연구 및 응용연구를 수행하고자 한다.

제3절 연구방법

본 논문에서는 비파괴 검사 기술 중 초음파 탐상기법의 최첨단 기법인 비접촉 공중 초음파 탐상기법을 적용하여 항공기용 C_f-C 브레이크 디스크 복합체 및 C_f-SiC 복합체의 내부결함 검출 판별 및 평가에 관한 연구를 수행하고자 한다.

기존의 접촉식 초음파 검사는 시험 재질의 내부구조에 따라 매질 자체에 흡수되기도 하고, 불균일한 입자들의 영향으로 산란되기도 한다. 또한 경로 상에 조직의 불연속성이나 불균질성을 만나게 되면 반사를 일으킨다⁽¹⁹⁾.

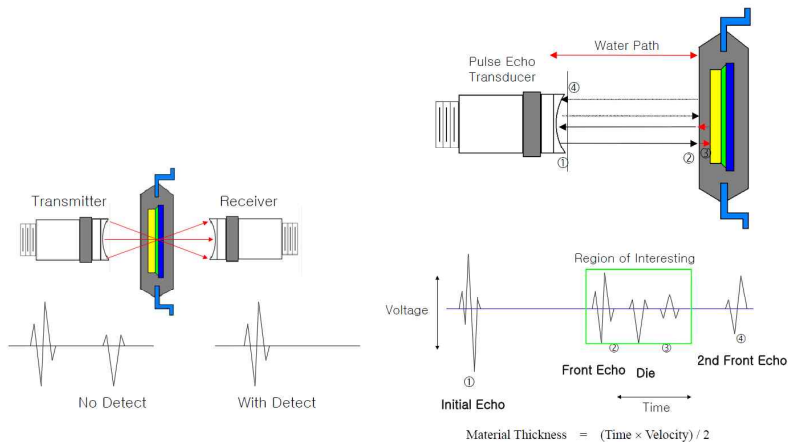
초음파가 매질속의 결함을 만나게 되면 결함의 형태, 초음파 주파수, 신호의 입사각등에 따라 복잡한 형태의 반사 신호를 생성하는데, 이러한 측정대상물에 다양한 환경 조건이 초음파 탐상 결과의 신뢰성을 저하시키는 원인이 되기도 하며, 검사자의 숙련도에 따라 검사결과의 차이가 발생되기도 한다⁽²⁰⁾.

반면 본 논문에서 이용한 비접촉 공중 초음파 검사(Non-contact Air-coupled Ultrasonic Testing, NAUT)는 최첨단의 초음파 탐상기법으로 공기 중의 음향 임피던스 차이로 생기게 되는 에너지 손실을 고감도의 2개의 송/수신부 비접촉 초음파 탐촉자로 보완하고 고주파대역의 초음파 Pulser-Receiver를 사용하여 고풍력의 초음파 집속이 이루어져 비접촉 초음파 탐상을 가능하게 하는 비파괴 검사 기법이다⁽²¹⁾.

일반적으로 초음파 탐상 검사 시 접촉식 초음파 프로브를 이용한 초음파 탐상을 실시하지만, NAUT 기법은 공기 중에 초음파 집속이 이루어지므로 초음파를 전달하는 접촉매질(medium)없이도 비접촉 초음파 탐상이 가능한 기법이다. NAUT는 초음파의 송신 및 수신이 안정된 상태에서 이루어지므로 상온 기준으로 기존의 접촉식 탐상으로 불가능하였던 고온(200℃), 저온(10℃) 이내의 물질이나 시험편의 표면이 거친 부분, 복잡한 형상, 미소구간 등에서도 초음파 탐상이 가능하다⁽²²⁾.

이러한 NAUT 기법의 이점을 이용하면 접착매질에 상관없이 초음파 탐상이 가능하고 재질에 따른 송수신 초음파 탐촉자를 변경하면 기존 초음파 탐상검사에 결함 측정이 어려웠던 탄소섬유강화 탄화규소 복합체 및 CMC(Ceramic Matrix Composites), CFRP, GFRP 등의 하이브리드 복합소재 및 천연섬유와 바이오복합재료, 리튬이온셀 배터리 등의 내부 결함 판별 및 다층 박리 결함 판별에 우수한 검출능력을 가지는 기술이다⁽²³⁾. Fig.1-7은 비접촉 공중 초음파 탐상기법의 원리를 나타내고 있는 그림이다.

그림에서 볼 수 있듯이 비접촉 공중 초음파 탐상기법의 2개의 측정기법을 사용할 수 있다. 첫 번째는 Transmission Method 기법으로 주로 검사 대상체의 내부 결함 유무를 판별하고자 할 때 2개의 송수신 초음파 탐촉자를 수직으로 배열하고 검사 대상체 내부로 초음파를 집속시켜 에너지 손실차이를 초음파 음압으로 산출한 후, 내부결함이 있을 경우에는 결함부위에는 공기층이 형성되어 있으므로 초음파 투과가 원활하지 않게 된다. 이때의 초음파 에코신호를 측정하여 A-Scan, B-Scan, C-Scan 으로 측정결과를 획득할 수 있다. 두 번째는 Reflection Method 기법으로 주로 검사 대상체의 표면결함 및 미세 형상 측정과 5mm이내의 박판 내부 결함을 측정할 때 사용하는 기법이다. 이 기법도 Transmission Method처럼 초음파 에코 신호를 측정하여 A-Scan, B-Scan, C-Scan 으로 측정결과를 획득할 수 있다⁽²⁴⁾.



(a) Transmission Method

(b) Reflection Method

Fig.1-7 Principle of non-contact air-coupled ultrasonic testing

본 논문에서는 Transmission Method 및 Reflection Method 기법을 적용한 비접촉 공중 초음파 탐상 실험을 다음과 같이 수행하였다.

첫째, 초음파 집속 시 초음파 감쇠 특성을 분석하기 위하여 아크릴, 알루미늄, CFRP 시험편을 이용하여 초음파 집속 거리를 일정하게 변화시킬 때 투과파의 진폭의 관계를 분석하고 평면형 타입의 초음파 탐촉자의 수신면적에 따른 투과파 진폭 관계를 분석하는 실험을 수행하였다.

둘째, 초음파 가이드 파형 분석을 위하여 송수신 초음파 탐촉자 사이에 각각 다른 재질의 시험편을 두고 400kHz와 800kHz의 주파수로 투과율을 비교하는 실험을 수행하였으며, Transmission Method 및 Reflection Method 기법을 이용한 경사 각도와 투과파의 진폭관계를 분석하는 실험을 수행하였다.

셋째, 알루미늄 평판 시험편의 건전부와 결함부의 투과파 관계를 분석하기 위해 Reflection Method 이용하여 측정모드에 따른 투과파의 진폭관계 분석 실험을 수행하였다.

넷째, 비접촉 공중 초음파 자동 탐상 시스템을 이용한 항공기용 C_f -C 브레이크 디스크 및 C_f -SiC 복합체, 내부 결함 검출을 위해 C-Scan 평면화상으로 검출하여 결함위치 및 결함크기 판별에 관한 실험을 수행하였다.

제2장 이론적 고찰

제1절 초음파 탐상의 기본 이론

1. 초음파 탐상기법 개요

초음파란 음향 진동의 일종이며 일반적으로 인간의 가청범위 상한(약 20kHz)을 초과하는 주파수의 음파를 초음파라고 한다. 인간이 공기 중에서 감지할 수 있는 소리의 주파수 영역은 20~20,000Hz(파장 : 약 17~0.017m)범위이다. 초음파는 전자파와 비교하면 속도가 늦기 때문에 수 MHz 정도의 높은 주파수를 사용하므로써 비교적 파장이 짧고 파의 직진성도 좋아지고 높은 분해능의 파형을 생성하여 할 수 있다⁽²⁵⁾.

초음파는 이미 의료진단 분야에서 중요한 위치를 차지하고 있지만, 과학연구와 산업적 응용에서도 빠른 속도로 발전하고 있다. 산업에서 초음파의 응용범위는 재료접합, 초음파가공/세척기(10~50kHz), 잠수함탐지, 음향측심기나 어군탐지기(근거리 : 20~50kHz; 원거리 : 5kHz이하), 초음파 진단장치와 초음파 탐상장치(2~5MHz), 초음파현미경(100MHz~3GHz), 침입경보, 유속·유량기, 두께 측정기 등 실로 광범위하다.

초음파는 다음과 같은 특이한 성질을 가지고 있기 때문에 비파괴검사에 활용되고 있다. ①파장이 짧다. 초음파탐상에 사용하는 초음파의 파장은 수 mm이다. 따라서 지향성이 예리하며 빛과 비슷하며 직진성을 갖는다. ②탄성적으로 기계·액체·고체의 성질이 음향적으로 현저히 다르기 때문에 초음파는 액체와 고체의 경계면에서 반사, 굴절, 회절하는 성질이 있다. 따라서, 결함과 같은 불연속부에서 잘 반사하고 결함검출을 가능하게 된다. ③고체 내에서 잘 전파한다. 물질 내에서 초음파의 전파속도는 전달되는 물질의 종류와 초음파의 종류에 의해 결정된다. ④원거리에서 초음파빔은 확산에 의해 약해진다.

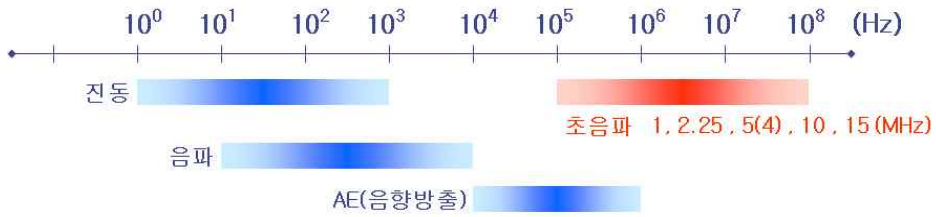


Fig.2-1 Classification according to the frequency band

⑤재료에 따라 결정입계면에서 초음파가 산란에 의해 약해진다. ⑥고체 내에서는 종파 및 횡파의 2종류의 초음파가 존재하며 이들은 서로 모드변환을 일으킨다. 또한, 초음파는 재료내부를 전파하면서 재료내부 조직의 영향을 받기 때문에 방사선과 같이 재료내부를 평가할 수 있다⁽²⁶⁾. 이와 같은 방법보다 체계적이고 정량적으로 이용하여 초음파를 시험체에 전달하여 내부에 존재하는 불연속으로부터 반사한 초음파의 에너지량, 초음파의 진행시간 등을 분석하여 불연속의 위치 및 크기를 정확히 알아내는 방법이 초음파 탐상 기법이다.

초음파 탐상의 적용은 시험체내의 불연속 시험체의 크기 및 두께, 시험체의 균일도 및 부식상태 등의 검사에 적용하며 이외에도 유속측정 및 콘크리트 검사 등 그 적용범위가 매우 넓어지고 있다. 초음파 탐상방법에는 원리면으로 여러 가지 방법이 있으나, 결함(불연속)을 검출하기 위한 초음파탐상법으로는 펄스-에코법이 가장 널리 사용되고 발전되고 있다⁽²⁷⁾.

2. 초음파 탐상기법의 원리

초음파 탐상검사(ultrasonic testing; UT)는 초음파가 가지고 있는 물리적 성질을 이용하여 시험체 중에 존재하는 결함을 검출하고, 검출한 결함의 성질과 상태를 조사하는 비파괴 검사이다. 초음파에 의한 비파괴평가기술은 원자력 발전설비, 석유화학 플랜트 등 거대설비기기의 건전성(integrity) 및 신뢰성 확보와 잔존수명 예측기술로 그 적용범위가 확대되어 가고 있다⁽²⁸⁾.

초음파 비파괴검사 기술은 파괴시험이나 다른 비파괴 검사 기술에 비해 간편한 측정, 높은 측정 정밀도, 검사결과 도출의 신속성, 검사비용의 절감 등 많은 장점을 가지고 있다. 초음파탐상검사는 철강 재료나 그 용접부의 비파괴검사방법으로 압력용기나 건축철골 등의 구조물에 주로 적용되고 있다⁽²⁹⁾. 철강재료 이외에 신소재로 주목받고 있는 세라믹이나 섬유강화 플라스틱, 탄소섬유 강화 탄화규소 복합체 등 첨단재료의 초음파에 의한 재료평가에 적용될 때는 초음파 비파괴평가(ultrasonic nondestructive evaluation; UNDE)라는 용어가 많이 사용되고 있다. Fig.2-2은 초음파 펄스반사법의 원리를 나타내고 있는 그림이다.

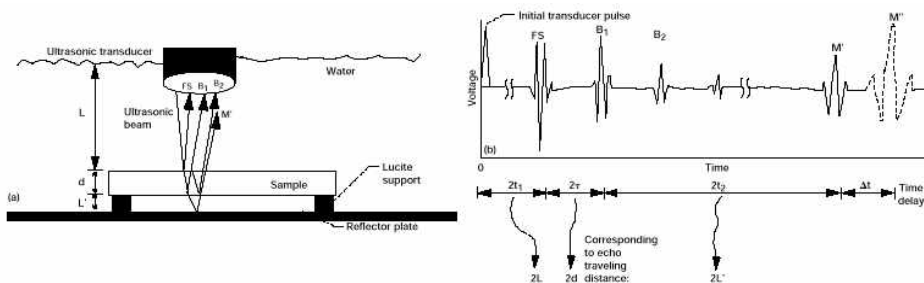


Fig.2-2 Principle of ultrasonic pulse reflection method

재료 내부에 초음파 펄스를 입사시킬 때 반사파 또는 에코라고 한다. 재료 내부에 결함(flaw) 등의 반사원이 없으면, 송신펄스의 저면 반사파(backwall echo)는 표면·저면에서 반사를 반복하기 때문에 여러 개의 저면에코만 관찰된다. 재료 내부의 음속 C 가 일정하다고 가정하면, 저면에코의 시간간격 Δt 는

빔 진행거리 $2L$ 을 전파하는데 필요한 시간이고, $C=2L/\Delta t$ 의 관계가 있다.

시험체의 판 두께 L 을 모르는 경우, 시험체의 음속(velocity)을 알고 있으면 Δt 를 측정함으로써 L 을 구할 수 있다. 반대로 시험체 두께 L 을 알고 있을 때는 Δt 를 측정함으로써 음속 C 를 구할 수 있다. 초음파가 물체 내부를 전파할 때, 전파과정에서 에너지가 손실되기 때문에 수신강도는 저하한다⁽³⁰⁾.

이론적으로 $2L$ 의 전파에 대한 초음파 크기 저하는 단위 길로 나타내고, 감쇠계수(attenuation coefficient)를 측정할 수 있다. 음속이나 감쇠는 재료의 기본 물성치로써 재료의 종류, 상태에 의존하기 때문에 이러한 측정값의 변화로 조직이나 기계적 성질 등을 평가할 수 있다. Fig.2-3은 초음파 탐상시의 송수신 원리와 빔 진행거리를 나타내고 있다.

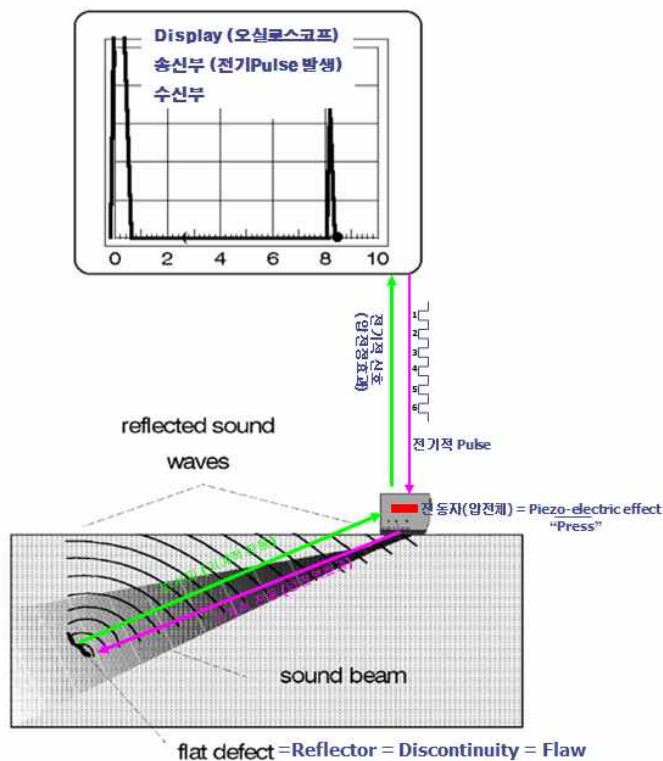
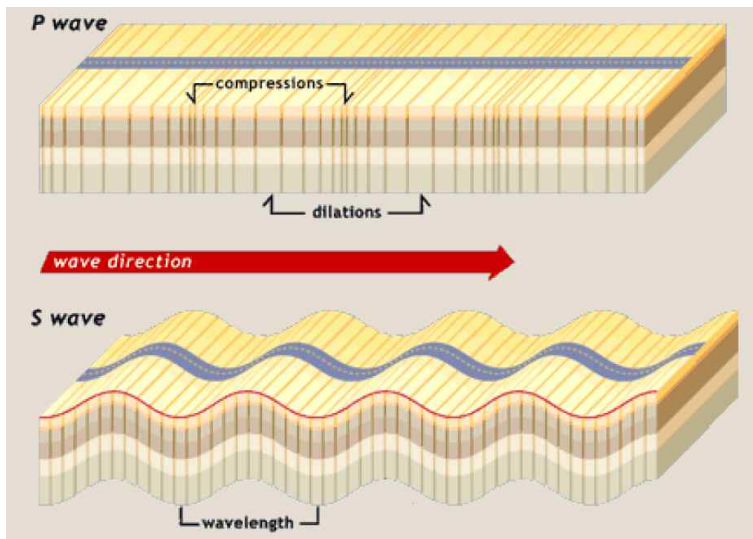


Fig.2-3 Principle of ultrasonic transceiver and beam focused distance

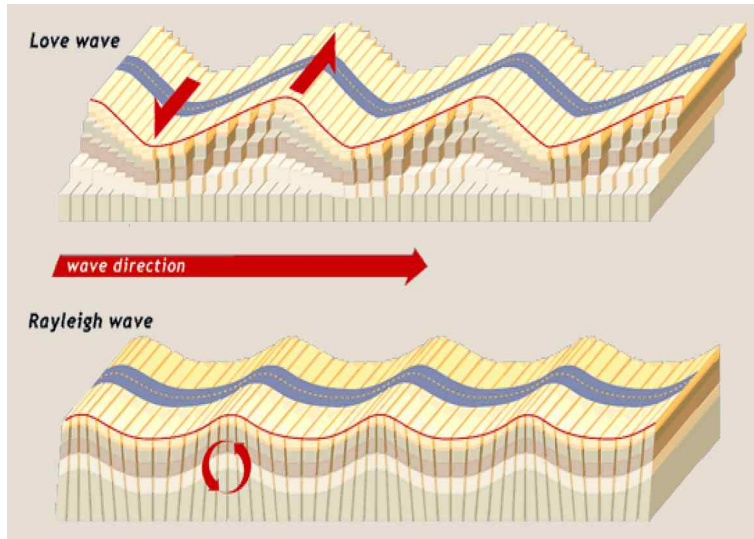
초음파 탐상검사는 Fig.2-3에서와 같이 보통 1~10MHz의 초음파펄스를 시험체에 입사시켰을 때 내부에 결함이 있으면 그곳에서 반사되어 되돌아오는 초음파(에코)가 탐촉자에 수신되는 원리를 이용하여 주로 내부 결함의 위치 및 크기 등을 비파괴적으로 조사하는 검출기법이다⁽³¹⁾. 결함의 위치는 송신된 초음파가 수신될 때까지의 시간으로부터 측정되고, 결함의 크기는 수신되는 초음파의 에코높이 또는 결함에코가 나타나는 범위로부터 측정한다.

가. 초음파의 종류와 성질

초음파에는 여러 가지의 파동모드가 있는데, 재료나 모드 및 전파 매체의 조건에 따라 이들이 혼재하고 계면에서는 모드 변환이 일어난다. 초음파 계측에서는 이러한 여러 가지 모드의 특징을 이용하여 측정하기 때문에 X선 등에 비해 전파의 해석이 복잡해지는 요인이 된다. 일반적으로 고체 내에서 관찰되는 초음파 모드에는 종파(longitudinal wave), 횡파(shear wave), 표면파(rayleigh wave) 그리고 판파(lamp wave)등이 있다. Fig.2-4는 초음파의 진동모드를 도시적으로 나타내고 있다.



(a) Longitudinal wave and shear wave



(b) rayleigh wave and lamb wave

Fig.2-4 Wave of ultrasonic mode

(1) 종파(longitudinal wave)

종파는 Fig.2-4 (a)와 같이 파의 진행에 따라 밀(compression)한 부분과 소(rarefaction)한 부분으로 구성되기 때문에 일명 압축파(compressive wave)라고도 불린다. 종파는 입자의 진동방향이 파를 전달하는 입자의 진행방향과 일치하는 파를 말한다. 이 파는 초음파탐상검사의 수직탐상에 주로 이용되는 진동형태로, 다른 형태의 파로 변환되기도 한다. 종파는 고체뿐만 아니라 액체, 기체에서도 존재하며, 강의 경우 음속이 $5900m/s$ 로 가장 빠르다.

(2) 횡파(shear wave)

일반적으로 강 용접부의 초음파 사각탐상에서는 SV파(vertically shear wave)라 불리는 횡파(transverse wave, shear wave, S-wave) 초음파가 주로 이용되고 있다. SV파는 탐상면에 대해 초음파의 진행방향이 수직으로 진동하는 횡파를 말하고, SH파(horizontally shear wave)는 초음파가 탐상면과 수평

방향으로 진동하는 횡파를 말한다.

SH파는 횡파 진동자를 탐촉자의 축방향으로 이용, 진동자로부터 발생한 횡파를 점성이 높은 접촉매질을 통하여 시험체에 전파시킨다. SH파는 SV파와 같은 반사면에서 모드변환이 없고 탐상도형이 간단하여 판정이 용이하며, 굴절각을 90도에 가깝도록 하면 표면 SH파가 되어 높은 효율로 탐상면을 따라 전파하는 것이 가능하다⁽³²⁾.

지금까지 주로 이용되고 있는 SV파 사각탐상은 고체표면에 거의 수직으로 전파하는 파로, 수직 방향의 특성평가에 적합하다. SV파는 고체 계면에서 반사 시 Fig.2-5와 같이 횡파→종파→횡파로 모드변환을 일으키고 다중에코의 멀티모드파가 되기 때문에 시험체가 얇은 경우에는 파의 판정이 곤란하게 된다.

이에 비해 SH파는 고체표면층 직하로 전파하기 쉬운 진동면을 갖고 횡파→종파로의 모드변환을 하지 않기 때문에 순수모드로 취급 가능하다. 횡파는 동일한 재질에 대해서 종파속도의 약 1/2정도이기 때문에 동일한 주파수에서 종파에 비해 짧은 파장을 갖게 된다.

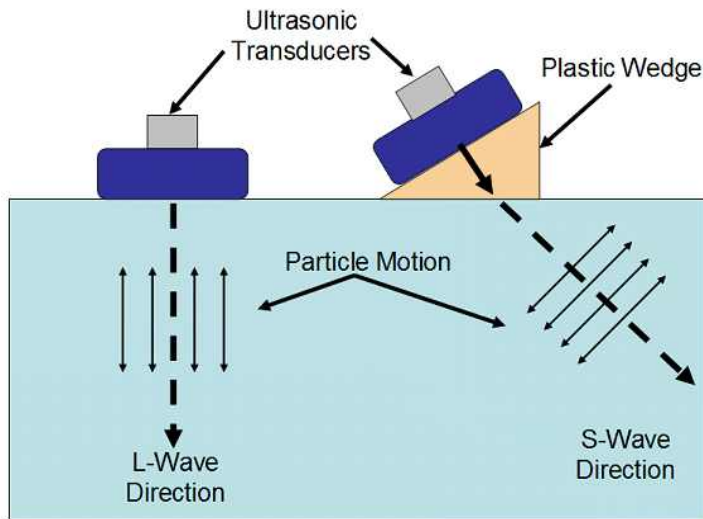


Fig.2-5 Mode conversion

(3)표면파(rayleigh wave)

고체 내에서 종파와 횡파는 서로 독립적으로 존재할 수 있으나, 경계면에서 일반적으로 종파와 횡파가 발생하고 조건에 따라서는 거의 완전히 상호 모드 변환한다. Fig.2-4의 (b)는 자유경계면, 즉 공기에 접해있는 경계면에서 표면파의 설명도로 나타내고 있으며, 입자의 진동은 표면에 수직인 횡파성분과 평행한 종파 성분이 있다. 따라서 입자는 그 위치에서 타원형으로 진동하며 재료의 표면층만을 전파해 간다.

표면파는 표면으로부터 1파장 정도의 매우 얇은 층에 에너지의 대부분이 집중해 있고, 표면근부의 입자는 종진동과 횡진동의 혼합된 거동을 나타낸다. 표면파는 Rayleigh에 의해 최초로 설명되었으며, 시험체의 표면결함검출에 주로 사용되며, 음속은 횡파의 약 90% 정도이다.

표면파는 시험체 표면으로부터 1파장 정도 깊이의 범위에서 전파한다. 높은 주파수는 음압이 표면근방에 집중하기 때문에 개구한 결함의 검출에 적합하고, 낮은 주파수는 표면 아래 수 mm 정도까지 전파하므로 표면직하의 결함검출에 유리하다. 그러나 기본적으로 표면파는 탐상면상의 장애물이나 요철에 의한 표면상태의 영향을 받기 쉬운데, 이로 인한 초음파 감쇠가 크고 방해 에코가 쉽게 나타날 수 있기 때문에 필렛 용접부 등의 결함탐상에는 적절하지 않다.

표면파의 한 종류인 크리핑파(creeping wave)는 재료의 표면 방향으로 전파하는 종파를 사용하는 탐상법으로 크리핑파의 송·수신은 비교적 용이하나 횡파에 의한 반사파도 동시에 전파하기 때문에 탐상도형이 복잡해져 결함 에코의 해석이 어렵고, 결함에서 에너지의 일부가 연속적으로 횡파(SV파)로 모드 변환하여 전파하기 때문에 감쇠가 현저해지는 단점이 있다.

크리핑파는 시험체에 종파 임계각으로 입사한 경우에 발생하고 시험체 내부를 직진하는 종파로 시험체표면의 영향을 받지 않으므로 표면직하(subsurface)의 탐상에 유리하다. 거리에 따라 감쇠가 심하기 때문에 탐상 범위는 일반적으로 짧다. Head wave 또는 Lateral wave라고도 한다.

경계면이 물인 경우에는 이 파는 표면에서 발생하여 수중에 누설되므로 길게 지속되지 못한다. 이것을 누설탄성표면파(leaky surface acoustic wave; LSAW)라 부른다. 누설탄성표면파는 물을 접하고 있는 면에 종파를 경사로 입사시켰을 때 표면층으로 전파하는 탄성파이다. 이 파는 전파하면서 종파로 모드 변환되고 수중에서 누설된다. 파가 전파하는 깊이는 표면 아래 약 1파장 정도이다. 누설탄성표면파는 초음파현미경에 활용되어 표면층 미소영역에서의 탐상이나 조직관찰, 응력측정 등에 응용이 시도되고 있다.

(4)판파(Lamb wave)

얇은 판의 비파괴검사에 주로 적용되는 판파는 유도 초음파(guided ultrasonic wave; GUW)의 한 종류로 램파(Lamb wave)라고도 한다. 이 파는 몇 파장 정도의 두께를 갖는 금속 내에 존재하는데, 재료의 진 두께를 통하여 진행되는 복합된 진동형태로 구성되기 때문에 박판의 결함검출에 사용된다. 판파의 진동양식의 특성은 밀도, 금속의 탄성특성과 구조, 금속시편의 두께 및 주파수에 영향을 받는다. 판파는 Fig.2-6과 같이 비대칭모드(A-mode), 대칭모드(S-mode)의 2종류가 있다.

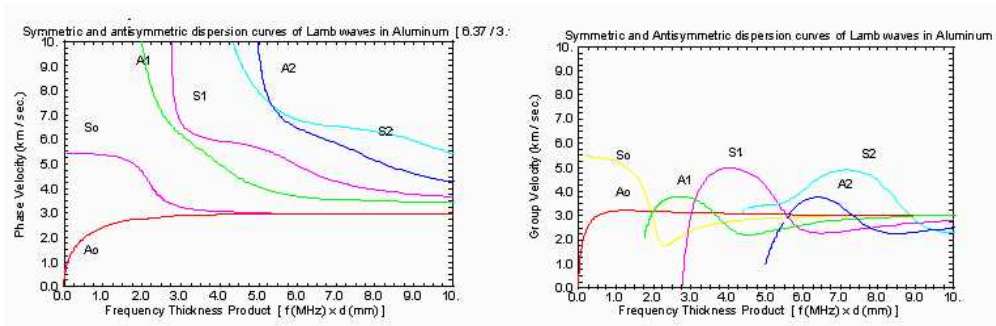


Fig.2-6 Asymmetric mode and symmetric mode of lamb wave

판파는 구조물의 기하학적인 구조를 따라 전파하기 때문에 기존의 종파나 횡파를 사용한 국부검사(point by point)법에 비해 탐촉자의 이동 없이 고정된 지점에서 대형 설비 전체를 한번에 탐상할 수 있어 광범위하고 또한 장거리 비파괴탐상을 효율적으로 수행할 수 있어 시간적, 경제적 효율이 뛰어나다⁽³³⁾. 판파는 위와 같은 장점을 가지고 있음에도 불구하고 아직 해결되어야 할 어려움으로 유도초음파가 전파해가는 모두가 무한히 많이 존재함으로 인해 다양한 모드의 선택을 통한 측정 민감도를 향상시킬 수 있는 장점도 있지

만, 여러 개의 모드가 동시에 수신될 때 신호해석과 모드확인(mode identification)이 어렵다는 단점이 있다.

Fig.2-7은 두께 2mm의 알루미늄 박판에서의 발생 가능한 판의 위상속도 (phase velocity)와 군속도(group velocity) 분산곡선을 나타낸다. 판파 모드 중, 영문자 A는 비대칭형(Anti-symmetric)모드를 의미하며 S는 판재의 중심축에 대해 대칭형(Symmetric)변형을 나타내는 모드를 의미한다. 각 모드는 해당 $f \cdot d$ 범위에 따라 차이는 있으나 일반적으로 위상속도가 주파수에 따라 변화하는 분산성을 갖고 있으며, 그 분산적 특성이 주파수나 구조물의 두께에 대해 매우 민감하게 변화하게 된다.



(a) Phase velocity

(b) Group velocity

Fig.2-7 Phase velocity and group velocity in plate(Aluminum, thickness : 2mm)

Table 2-1 은 알루미늄에서 다양한 입사각에서 발생하는 판파 모드를 나타내고 있다.

Table 2-1 Aluminum of lamb wave

Incidence angle	Wave mode
33°	1st A-mode
31°	1st S-mode
25.6°	2nd A-mode
19.6°	1st S-mode
14.7°	3rd A-mode
12.6°	3rd S-mode
7.8°	4th S-mode

나. 초음파 전파 특성

(1) 음속

초음파가 매질 속을 전파하는 속도, 즉 음속 C 는 일반적으로 초음파가 전파하는 매체의 탄성계수와 밀도에 의해 결정된다.

$$C = \sqrt{\frac{E(\text{탄성계수})}{\rho(\text{밀도})}} \quad (2.1)$$

기체 및 액체 중에서는

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{101,325 \text{ kg/m.s}^2 \times 1.401}{1.293 \text{ kg/m}^3 / (1 + 20/273)}} = 343 \text{ m/s} \quad (2.2)$$

여기서, K 는 체적탄성계수, ρ 는 밀도이다. 20°C 1기압의 공기에서는

$$\begin{aligned} P &= 760 \text{ mmHg} = 1.03323 \text{ kgf/cm}^2 = 10,332.3 \text{ kg/m}^2 \\ &= 10,332.3 \times 9.8065 \text{ N/m}^2 = 101,325 \text{ N/m}^2 \end{aligned} \quad (2.3)$$

(여기서, $101,325 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kgf/m.s}^2$, 비열비 $k = 1.401$,

$\rho = 1.293 / (1 + 20/273) \text{ kg/m}^3$ 이다.)

푸아송비(ν)를 고려한 종파속도 C_L , 횡파속도 C_s 는 다음 식으로 표시된다. 물의 경우는 $K = 2.2 \times 10^9 \text{ N/m}^2 = 2.2 \times 10^9 \text{ kg/m.s}^2$, $\rho = 1,000 \text{ kg/m}^3$ 이므로

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.2 \times 10^9 \text{ kg/m.s}^2}{1,000 \text{ kg/m}^3}} = 1,483 \text{ m/s} \quad (2.4)$$

고체 중에서는 종파와 횡파가 존재하고 푸아송비(ν)를 고려한 종파속도 C_L ,

횡파속도 C_S 는 다음 식으로 표시된다.

$$C_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.5)$$

연강의 경우는 $E = 21,400 \text{ kgf/mm}^2 = 21,400 \times 9.80665 \times 10^6 \text{ kg/ms}^2$, $\nu = 0.28$
 $\rho = 7,700 \text{ kg/m}^3$ 으로 하면 종파속도 C_L 는 $5,902 \text{ m/s}$ 가 된다.

또, $G = 8,200 \text{ kgf/mm}^2 = 8,200 \times 9.80665 \times 10^6 \text{ kg/ms}^2$ 로 하면, 횡파의 음속
 C_S 는 $3,232 \text{ m/s}$ 가 된다.

$$C_S = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2.6)$$

E : 종탄성계수 또는 영률 (*Young's module*)

ν : 푸아송비 (*Poisson's ratio*, 강에서는 약 0.28, 알루미늄은 약 0.34)

K : 체적탄성계수 (*bulk modulus*, 기체의 경우는 압력 \times 비열비, K)

G : 횡 (전단) 탄성계수 (*shear modulus*) 또는 강성률

한편, 표면파의 음속 C_R 은 Bergmann의 근사식으로 다음과 같이 표시된다.

$$C_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \cong 0.9C_S \quad (2.7)$$

식 (1.5)의 종파속도 C_L 이 어떻게 유도되었는지를 살펴보기 위한 큰 입방체 중을 전파하는 종파를 생각한다. 스트레인을 ϵ , 응력을 σ 라 한다.

$$\sigma = E\epsilon \quad \epsilon = \frac{\sigma}{E} \text{이므로}$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\sigma_2}{E}\nu - \frac{\sigma_3}{E}\nu \quad (2.8)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\sigma_1}{E}\nu - \frac{\sigma_3}{E}\nu \quad (2.9)$$

$\sigma_3 = \sigma_2$ 라 생각할 수 있으므로

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{2\sigma_2}{E}\nu \quad (2.10)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E}(1 - \nu) - \frac{\sigma_1}{E}\nu \quad (2.11)$$

종파는 시험체 중을 전파하는 경우에 횡방향으로는 작용하지 않는다고 생각 하는 것이 타당하므로 $\epsilon_2 = 0$ 이라 하면

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2.12)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{2\nu}{E} \sigma_1 \frac{\nu}{1-\nu} = \frac{\sigma_1}{E} \left[1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu} \right] = \frac{\sigma_1}{E} \left[\frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} \right] \quad (2.13)$$

위 식을 정리하면

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \left[\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} \right] = \frac{\sigma}{E \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-\nu)}} \quad (2.14)$$

따라서 $E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$ 는 횡방향으로 진동하지 않을 때 영률이다. 그래서 종파음속 C_L 은 식 (2.5)와 같이 유도될 수 있다.

(2) 푸아송비가 음속비에 미치는 영향

식 (2.6)에서 알 수 있듯이 종탄성계수 E , 횡탄성계수 G 및 푸아송비 ν 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$G = \frac{E}{[2(1+\nu)]} \quad (2.15)$$

이 관계를 이용하여 푸아송비 ν 와 음속비 (C_L/C_S)와의 관계를 구할 수 있다. 식 (2.5)와 식 (2.6)의 비를 취하고 식 (2.15)를 대입하고 정리하면

$$\frac{C_L}{C_S} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2.16)$$

또 ν 를 음속비 (C_L/C_S)의 함수의 형으로 표시하면

$$\nu = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1}{(C_L/C_S)^2 - 1} \right] \quad (2.17)$$

(3) 탄성계수와 음속과의 관계

식 (2.16)과 식 (2.17)으로부터 종탄성계수 E 를 음속과 밀도 ρ 로 나타내면

$$E = \rho C_S^2 \frac{3C_L^2 - 4C_S^2}{C_L^2 - C_S^2} = \rho C_S^2 \left[3 - \frac{C_S^2}{C_L^2 - C_S^2} \right] \quad (2.18)$$

C_L 과 C_S 를 정밀한 초음파두께측정기로 측정하고 밀도 ρ 를 별도로 측정하면, 이 식으로 종탄성계수 E 를 구할 수 있다. 이 식에서

$\rho = 7,700 \text{ kg/m}^3$, $C_L = 5,900 \text{ m/s}$, $C_S = 3,230 \text{ m/s}$ 라 하면,

$E = 20,600 \times 10^6 \text{ kg/ms}^2$ 이다. 이것을 kgf/mm^2 으로 환산하면

$$\begin{aligned} E &= \frac{20,600 \times 10^6 \text{ kg/ms}^2}{[(9.80665 \times 10^6 \text{ kg/ms}^2) / (1 \text{ kgf/mm}^2)]} \\ &= 21,067 \text{ kgf/mm}^2 \approx 21,000 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned} \quad (2.19)$$

(4) 파장과 주파수

공기 중에서는 음파는 종파(압축파 또는 소밀파라고 함)로 기압이 밀한 부분과 소한 부분으로 존재한다⁽³⁴⁾. 수면에 돌을 떨어뜨렸을 때 수면파의 산파산 또는 골과 골 사이의 간격을 파장(wavelength)이라 부르고 λ 로 표시한다. 그리고 파의 산파산 또는 골과 골 사이의 시간 간격을 파의 주기(period)라 하고 T 로 표시한다. 또, 단위시간당의 주기수를 주파수(frequency)라 하고 f 로 표시하는데, 주파수와 주기와의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.20)$$

파동을 f 로 표시되는 주파수는 근래까지도 일초 당 사이클 수로 표시되어 왔으나 현재에는 물리학자 Hertz의 주창으로 국제단위로 인정받은 Hertz, 약자로 Hz로 표시하고 있다.

$$1Hz = 1\text{cycle per sec}$$

$$1kHz = 1,000Hz = 1,000\text{cycle per sec}$$

$$1MHz = 1,000,000Hz = 1,000,000\text{cycle per sec}$$

또한, 시간과 위치에 대해서도 파형은 동일하다, 이 때 C 는 파동의 속도이고 다음 식으로 나타난다. 다시 말해 입자가 매초 f 회 진동한다고 1초 마다 파장 λ 의 f 배 만큼 파는 진행하게 된다. 바꿔 말하면 음속 C 1초간에 진행하는 것은 동일하게 된다.

$$C = \frac{\lambda}{T} = f \cdot \lambda \quad (2.21)$$

$$k = \frac{\omega}{C} \quad (2.22)$$

강 중에 종파가 전파할 때 주파수 2MHz와 5MHz인 경우의 파장을 구해보면

$$\lambda = \frac{C}{f} = 5,900 \times 10^6 / 2 \times 10^6 = 2.95\text{mm} \quad (2.23)$$

이고, 5MHz의 경우는 1.18mm가 된다. 또 강 중에서 초음파의 전파거리를 계산해보면 전파거리 x 는 음속 C 에 전파시간 T 를 곱한 값으로 $1\mu\text{s}$ 간에 전파되는 거리는

$$x = C \cdot T = 5,900 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-6} = 5.9\text{mm} \quad (2.24)$$

초음파의 파장은 주파수와 반비례의 관계가 있기 때문에 주파수가 높으면 파장은 짧아진다. 초음파가 반사되는 반사원의 크기는 파장의 1/10정도이고, 반사된 초음파의 음압(sound pressure)에서 크기가 측정 가능한 결함의 최소 크기는 파장의 1/2정도로 알려져 있다. 따라서 작은 결함까지 검출하기 위해서는 파장이 짧은 초음파, 즉 높은 주파수의 초음파를 사용할 필요가 있다⁽³⁵⁾. 그러나 너무 높은 주파수를 사용하면 파장이 짧아져 시험체의 결정입계 등에서 산란이 발생하기 때문에 시험체 내부까지 초음파가 도달하지 못한다. 즉, 주파수는 시험체 및 검출할 결함에 적당한 크기로 결정해야 한다.

일반적으로 초음파 계측에서는 1~10MHz의 주파수가 많이 이용되고 있다. 따라서 강중에서의 초음파 파장은 대략 6~0.6mm정도를 사용하고 있다. Table 2-2는 여러 물질에 대한 음속과 주파수 5MHz에서의 파장값을 나타내고 있다.

Table 2-2 Sound velocity and wavelength of various materials

Materials	Density (ρ) [g/cm ³]	Shear wave velocity [m/s]	Longitudinal wave velocity [m/s]	Longitudinal wavelength[mm]		
				2.25[MHz]	3[MHz]	5[MHz]
Aluminum	2.69	3,130	6,350	2.8	2.1	1.3
Steel	7.7	3,200	5,900	2.6	1.9	1.2
Brass	8.54	2,070	4,630	2.1	1.5	0.93
Acrylic resin	1.18		2,670	1.2	1.3	0.53
Bakelite	1.4		2,590	1.15	0.86	0.52
Water(20°C)	1.0		1,480	0.66	0.49	0.30
Oil	0.92		1,390	0.62	0.46	0.28
Air	0.0012		330	0.15	0.11	0.066

기체, 액체, 고체의 매체 중을 전파하는 음속은 음속 모드와 매체의 재료상수에 따라서 고유한 값을 가진다. 예를 들어 종파를 비교해보면, 공기 중에서의 음속은 약 340m/s, 수중에서는 약 1,480m/s, 강중에서 약 5,900m/s 이고, 세라믹 중에서는 약 10,000m/s 를 초과하는 경우도 많다⁽³⁶⁾.

음속은 액체, 기체 내에서 온도의 영향을 강하게 받기 때문에 온도에 대응

해서 음속이 변하게 된다. 반면, 고체 내에서 온도의 차이에 의한 음속의 변화는 거의 없지만 모드 차이에 의한 음속차이가 크다. 예를 들어 강중에서의 종파음속 C_L 은 $5,900m/s$ 횡파음속 C_S 는 $3,230m/s$ 표면파의 음속 C_R 은 $2,980m/s$ 이다. 음속은 또한 재료에 따라 차이를 보인다. 강의 열처리에 의해서 조직이 조대해져도 음속의 변화는 아주 작다. 따라서 초음파탐상에서는 측정대상의 재료에서 음속은 일정하다고 가정하고 탐상을 하게 된다⁽³⁷⁾.

(5) 연속파와 펄스파

현재 초음파 탐상에 이용되고 있는 초음파의 대부분은 펄스파이나, 초음파에서는 연속파의 이론을 보통적으로 사용한다. 연속파에서는 파의 사이클 수가 충분히 많기 때문에 주파수는 중심주파수에 고정된다. 그래서 연속파의 이론을 적용할 수 있고 연속파의 이론을 사용하면 식은 비교적 간단해진다.

그러나 보통의 탐상에서는 펄스파를 사용하는데, 이 펄스파는 엄밀히는 규정되어 있지 않지만 1~3파의 광대역의 것이나 3~5파 정도의 협대역을 사용한다. 특히 높은 거리 분해능이 요구되는 경우에는 1.5 사이클의 펄스가 사용된다. Fig.2-8은 공칭 주파수 10MHz의 수직탐촉자로 얻어진 반사에코의 파형과 그 주파수 분석 결과의 예이다. 펄스의 경우에는 fig.2-8의 주기파수 분석 결과에서 알 수 있듯이 공칭주파수 부근에 중심주파수의 성분을 포함하고 있음을 알 수 있다.

과동공학에서는 음파의 간섭이 가장 중요한 역할을 하고 있고 펄스에서는 충분한 간섭을 일으키지 않는 경우도 있다. 또 펄스 수가 적으면 불명확해지고 주파수 다시 말해 파장이 주요인이 되고 있는 과동방정식은 의미를 잃어버리게 된다. 초음파탐상검사에서 여러 종류의 이론은 연속파의 이론에 의한 경우도 많기 때문에 실제 측정의 결과와 이론이 일치하지 않는 경우가 있다. 초음파탐상에서 정량성을 요구하는 경우에는 이들 문제에 대해 충분히 고찰하는 동시에 펄스의 성질에 대해서 구체적으로 정해진 해석을 할 필요가 있다⁽³⁸⁾.

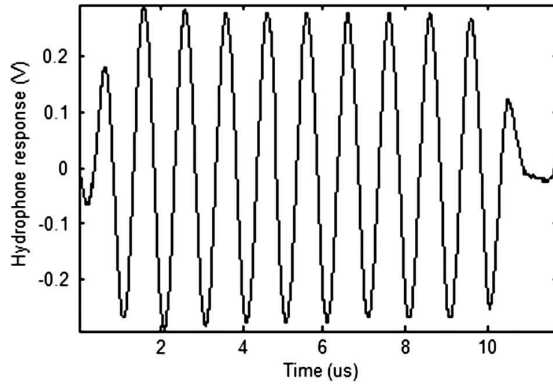


Fig.2-8 Burst wave(10 cycle)

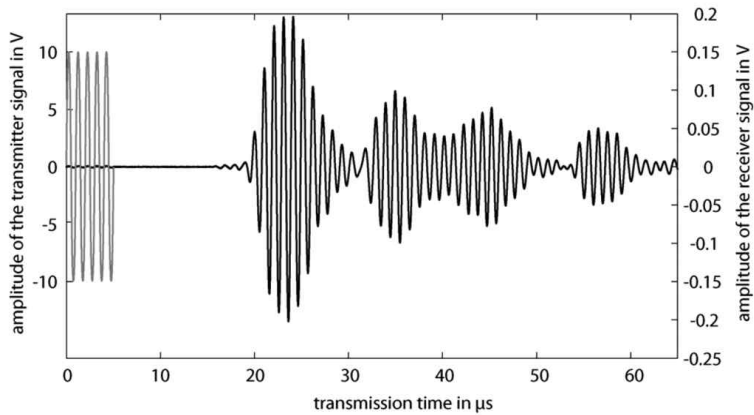


Fig.2-9 Reflection echo wave form and frequency content

(6) 파의 진행공식

기계적 진동인 파가 매질 내를 진행해 갈 때 임의시간 t 에서 매질 내의 입자가 정지위치에서 어떤 지점으로 이동한 것을 수식으로 나타내면 다음 식 (2.25)와 같이 된다.

$$a = a_0 \sin 2\pi ft \tag{2.25}$$

단, a_0 : 입자의 진폭

f : 입자의 진동 주파수

a : 시간 t 에서의 입자의 변위

식 (2.26)은 매질에서의 기계적인 파동의 움직임을 나타내는 식으로써 일정한 시간 t 에서 처음 여기된 입자로부터 떨어져 있는 입자들의 상태를 나타내주는 식이다.

$$a_x = a_0 \sin 2\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad (2.26)$$

단, a_x : 기계적 파동이 매질에서 처음 입자로부터 x 거리만큼 떨어져 있는 시간 t 에서의 입자의 변위(displacement)

a_0 : 매질에서의 입자의 진동 크기와 같은 파의 진폭

v : 파의 진행속도

T 시간(주기)에 속도 V 의 기계적 진동파가 매질내의 λ 거리를 진행한다면

$$\lambda = VT \text{ or } V = \frac{\lambda}{T} \quad (2.27)$$

여기서 시간 T 는 주파수 f 와 다음의 관계가 있으므로 즉,

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.28)$$

식 (2.27)과 (2.28)를 합하면 진동 운동의 기본공식을 얻게 된다.

$$V = \lambda \cdot f \quad (2.29)$$

(7) 음향임피던스

초음파가 제1매질을 통하여 제2매질로 투과되어 갈 때, 입사된 초음파 에너지의 일부는 제1매질과 제2매질의 경계에서 반사하게 되고 나머지 제2매질로 투과된다. 이 반사되는 양을 결정하는 특성은 두 매질의 음향 임피던스 (Acoustic Impedance)이다⁽⁴⁰⁾. 만약 두 물질의 음향 임피던스가 완전히 똑 같다면 반사되는 양은 없을 것이고, 두 물질의 음향 임피던스가 아주 많이 차이 난다면(예를 들어, 제1매질 금속에서 제2매질 공기 중으로 초음파가 진행 할 때), 실질적으로 완전한 반사가 일어나게 된다. 이러한 특성은, 어떤 검사체내에 존재하는 불연속을 검출 할 때 검사체를 이루는 제1매질과 불연속을 이루는 제2매질의 음압차에 의한 초음파 반사량을 이용하여 검사하는 초음파탐상검사의 기초원리가 된다.

그러므로 음향 임피던스는 초음파가 물질 내에 진행하는 것을 방해하고 저항이라고 정의할 수 있고 Z 로 표시한다. 이 음향 임피던스 Z 는 물질의 밀도가 ρ 와 매질 내에서의 초음파의 속도 V 곱으로 구할 수 있다.

$$Z = \rho \cdot V \tag{2.30}$$

(8) 음압과 음향 강도(Acoustic Impedance and Intensity)

음압은 일반적으로 초음파가 물질 내를 진행할 때 물질에 가하는 힘의 크기 즉, 압력을 의미하여 P 로 표시한다. 이 음압 P 는 음향 임피던스 Z 와 입자의 진폭 a 로써 구해진다.

$$P = Z \cdot a \tag{2.31}$$

단, P : 음압

Z : 음향 임피던스

a : 입자의 진폭

음향강도(acoustic intensity)는 파의 진행방향에 수직인 단위면적 당 진행하는 초음파의 기계적 에너지의 투과강도를 말하며 I 로 표시한다. 초음파의 강도 I 는 음압 P 와 음향 임피던스 Z 와 입자의 진폭 a 와의 함수이다.

$$I = \frac{P^2}{2Z} \quad (2.32)$$

그리고

$$I = \frac{P \cdot a}{2} \quad (2.33)$$

단, I : 음향강도, a : 입자의 진폭

제2절 초음파의 반사와 투과

1. 수직 입사(Normal Incidence)

2개의 매질이 Fig.2-10과 같이 평행한 면으로 밀착해 있을 때 한쪽 매질에서 다른 쪽 매질로 초음파가 경계면에 수직으로 입사하면 경계면에서 수직으로 반사하고 나머지는 수직으로 투과한다. 즉, 탐촉자로부터 재료 내부에 초음파를 송신하였을 때 초음파에너지의 대부분은 경계면에서 반사되고 일부만 투과한다. 경계면에서 음파의 반사량은 두 매질의 음향 임피던스 비에 좌우되는데, 경계면에서의 반사와 굴절현상은 초음파탐상검사에서 결함 등의 검출에 있어 중요한 역할을 한다⁽⁴¹⁾. 음향임피던스는 서로 다른 재질에서의 음속차에 기인하며, 재질이 음파의 진행을 방해하는 것을 의미한다. 일반적으로 경계면에 초음파가 수직 입사한 경우 초음파는 그 곳에서 반사되는 성분과 투과하는 성분으로 나누어진다. 반사와 투과의 비율은 경계면에 접하는 두 물질의 음향임피던스에 따라 정해진다. 이 때 경계면에서의 음압반사율(reflection coefficient) $r_{1 \rightarrow 2}$ 는 다음 식을 표시된다.

$$r_{1 \rightarrow 2} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.34)$$

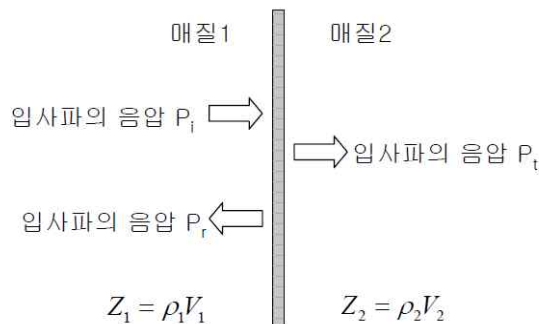


Fig.2-10 Reflection and Transmission by normal incidence on the boundary

Fig.2-10과 같이 제 1매질의 음향임피던스를 Z_1 , 제 2매질의 음향임피던스를 Z_2 라 할 때, 음압반사율 $r_{1 \rightarrow 2}$ 은 입사파의 음압 P_i 에 대한 반사파의 음압 P_r 의 비로 나타낼 수 있다. 음압 P_i 의 초음파가 경계면을 통과하여 매질 2에서 음압이 P_t 가 되었다고 하자. 이때의 음압투과율(transmission coefficient) $t_{1 \rightarrow 2}$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$t_{1 \rightarrow 2} = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 1 + r_{1 \rightarrow 2} \quad (2.35)$$

여기서, $r_{1 \rightarrow 2}$ 는 제1매질에서 제2매질로 초음파가 수직입사 했을 때의 음압 반사율이다. 매질 2로부터 매질1에 초음파가 수직으로 입사하였을 때의 음압 투과율 $t_{2 \rightarrow 1}$ 은 다음 식으로 주어진다.

$$t_{2 \rightarrow 1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1 + r_{2 \rightarrow 1} \quad (2.36)$$

여기서, $r_{2 \rightarrow 1}$ 은 초음파가 제2매질에서 제1매질로 초음파가 수직 입사 했을 때의 음압반사율이다. 따라서 제1매질에서 제2매질로 수직 입사했을 때 초음파가 완전반사하고 매질1에 되돌아 왔을 때의 음압투과율, 다시 말해 경계면을 초음파가 왕복 통과하는 비율을 음압왕복 투과율이라 하고, 그 때의 음압을 P_T 라 하면 음압왕복투과율 $T_{1 \rightarrow 2}$ 는 다음 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} T_{1 \rightarrow 2} &= t_{1 \rightarrow 2} \times t_{2 \rightarrow 1} = \frac{P_t}{P_i} \times \frac{P'}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \times \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ &= \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = 1 - r_{1 \rightarrow 2}^2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

매질1과 매질2는 음향임피던스가 다르기 때문에 초음파 에너지로 생각하면 다음과 같이 된다. 음압 P 의 초음파의 단위면적당의 에너지 E 는 다음 식으로 표시된다.

$$E = \frac{P^2}{Z} \quad (2.38)$$

즉, 에너지는 초음파가 전파하는 매질에서 음압의 제곱에 비례하고, 초음파가 전파하는 음향임피던스에 반비례한다. 매질1로부터 매질2에 초음파가 수직으로 입사하였을 때 입사파의 음압을 P_i , 투과파의 음압을 P_t 라 하면 입사파의 에너지 E_i 는 다음 식으로 주어진다.

$$E_i = \frac{P_i^2}{Z_1} \quad (2.39)$$

반사파의 에너지 E_r 는 다음 식으로 주어진다.

$$E_r = \frac{P_r^2}{Z_1} = \frac{P_i^2 r_{12}^2}{Z_1} = E_i \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.40)$$

투과파의 에너지 E_t 는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} E_t &= \frac{P_t^2}{Z_2} = \frac{P_i^2 t_{12}^2}{Z_2} = \frac{P_i^2 Z_1 t_{12}^2}{Z_1 Z_2} = E_i \frac{Z_1 (2Z_2)^2}{Z_2 (Z_1 + Z_2)^2} \\ &= E_i \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= E_i \frac{(Z_1 + Z_2)^2 + 4Z_1Z_2 - (Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \\
 &= E_i \frac{(Z_1 + Z_2)^2 - (Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} = E_i - E_r \tag{2.41}
 \end{aligned}$$

따라서

$$E_i = E_r + E_t \tag{2.42}$$

식 (2.42)의 결과는 입사파의 에너지가 반사파의 에너지와 투과파의 에너지로 나누어지는 것을 의미하고 매우 상식적인 결과이다. 물로부터 강에 초음파가 수직 입사할 때 음압반사율은 +0.936 이기 때문에 음압투과율은 1.936 이 되고 경계면에서 거의(에너지로 87.6%) 반사하는 것으로, 강 중에 투과한 초음파의 음압은 입사음압의 1.936 배이다. 이것은 강의 음향임피던스가 물의 음향임피던스보다 상당히 크기 때문이다. 그러나 투과파의 에너지 식 (2.40)과 식 (2.41)로부터

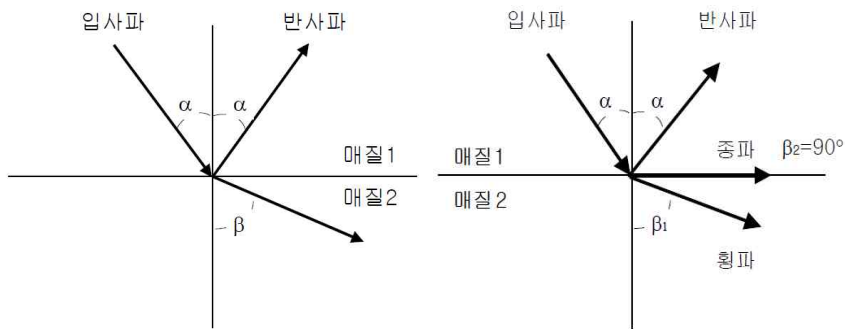
$\frac{E_t}{E_i} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) t_{1 \rightarrow 2}^2 = \left(\frac{1.5}{45.4}\right) 1.936^2 = 0.12412$ 이 되고 입사파 에너지의 12.4% 만이 강중에 투과한다.

국부수침법에 의한 강관의 탐상 시, 표면에코 S와 저면에코 B의 에코높이를 비교하면, 표면에코 S는 수중을 전파하여온 초음파가 물과 강관과의 경계면에서 반사한 비율(음압반사율 $r_{1 \rightarrow 2}$)에 대응한다. 한편 저면에코 B는 물과 강관과의 경계면을 투과한 초음파(음압투과율 $t_{1 \rightarrow 2}$)가 강관의 저면 다시 말해 강관과 공기와의 경계면에서 반사(100%→음압반사율=1)하고, 다시 물과 강관과의 경계면을 투과한 초음파(음압투과율 $t_{2 \rightarrow 1}$)의 비율(음압왕복 투과율 $T_{1 \rightarrow 2}$)에 대응한다.

2. 경사 입사(Oblique Incidence)

가. 반사와 굴절

초음파가 경계면에 경사로 입사하면 반사파와 굴절파도 경사를 갖고 발생한다. 액체와 기체 사이에서는 입사파·반사파·굴절파 모두 종파이나, 고체 내에서의 입사파는 종파 또는 횡파일 수 있으며 반사파 또는 굴절파는 입사파의 종류와 상관없이 종파와 횡파의 2종류로 발생한다. Fig.2-11은 이 관계를 나타내고 있다.



(a) Snell's law (b) Critical angle

Fig.2-11 Reflection and refraction of oblique incidence

Fig.2-11 (a)에서와 같이 입사각 α_L , α_S 와 반사각 β_L , β_S 및 굴절각 θ_L , θ_S 사이에는 빛과 같은 관계가 성립한다. 입사축의 속도를 C_i , 굴절축의 속도를 C_L , C_S 라 하면 파동방정식으로 다음의 식을 유도할 수 있다

$$\frac{C_i}{\sin \alpha_L} = \frac{C_L}{\sin \theta_L} = \frac{C_S}{\sin \theta_S} \quad (2.43)$$

이 식을 스넬의 법칙(Snell's law)이라 부르고 α , 반사각 β , 굴절각 θ 와 음속의 관계는 이 식으로 나타낼 수 있다. 매질2의 음속 C_L, C_S 가 매질1의 C_i 보다 클 때 입사각 α 를 증가해가면 굴절각 $\theta = 90^\circ$ 가 된다. 이때의 α 를 임계각(critical angle)이라 부르고 이 이상의 입사각에서는 굴절과는 존재하지 않고 모두 반사해 버린다. 이 현상을 전반사라 부른다⁽⁴²⁾.

Fig.2-11 (a),(b)에서 알 수 있듯이 초음파가 경계면에 경사 입사하였을 때 반사와 굴절에 의해 종파의 일부가 횡파로 변환되는 경우가 있다. 이러한 모드변환에 의해 횡파가 발생했다고 말한다. 모드는 물질내부의 진동양식을 구별할 때 사용되는 용어로 종파, 횡파 및 표면파는 각각 종파모드, 횡파모드 및 표면파모드라 불린다. 즉 표면파는 모드변환에 의해 종파나 횡파로 변환된다.

Fig.2-12는 사각탐촉자의 초음파 입사 과정을 나타내고 있다. 아크릴수지 중을 전파하여 온 종파 초음파는 강 내부에 입사하고 굴절 투과하였을 때 모드변환에 의해 강 내부에서는 횡파 초음파가 전달되어 간다. 사각탐촉자에서 강재 내부에 횡파만을 전파시키기 위해서는 아크릴 수지의 켄트 각도 범위를 계산하면 아크릴수지와 강재와의 경계면 경사 입사시의 반사 및 굴절을 식 (2.43)에 적용하고, 강재중의 종파 음속 C_L' 는 $5,900m/s$, 횡파 음속 C_S' 는 $3,230m/s$, 그리고 아크릴수지 중의 종파 음속 C_L 은 $2,730m/s$ 이다.

$$\frac{\sin\alpha_L}{\sin\theta_L} = \frac{C_i}{C_L'}$$

$$\frac{\sin\alpha_L}{\sin\theta_S} = \frac{C_i}{C_S'} \tag{2.44}$$

아크릴수지의 썬기각도 α 는 입사각에 상응한다. 또 강제 중에 횡파만을 전달시키기 위해서는 굴절 종파가 나오지 않도록, 다시 말해 굴절종파에 대한 임계각 α_{LC} (제1임계각) 이상으로, 또 굴절 횡파가 나오도록 다시 말해 굴절횡파에 대한 임계각 α_{SC} (제2임계각) 미만이 되도록 조정할 필요가 있다. 임계각 α_{LC} , α_{SC} 를 식 (2.44)에 대입하면 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{\sin\alpha_{LC}}{\sin\theta_L} = \frac{C_i}{C_L'}, \quad \alpha_{LC} = \sin^{-1} \frac{C_i}{C_L'} \sin 90^\circ \cong 27.6^\circ$$

$$\frac{\sin\alpha_{SC}}{\sin\theta_S} = \frac{C_i}{C_S'}, \quad \alpha_{SC} = \sin^{-1} \frac{C_i}{C_S'} \sin 90^\circ \cong 57.7^\circ$$

따라서 입사각이 $28^\circ \leq \alpha \leq 57^\circ$ 가 되도록 썬기각도 α 를 가공하면 좋다. 또 이 입사각 α 의 범위에서 횡파굴절각 θ_S 의 범위를 구하면

$$\frac{\sin\alpha_{LC}}{\sin\theta_S} = \frac{C_i}{C_S'}, \quad \theta_S = \sin^{-1} \left(\frac{C_S'}{C_i} \cdot \sin\alpha_{LC} \right)$$

$$\alpha_{LC} = 28^\circ \text{일 때, } \theta_S = \sin^{-1} \left(\frac{3,230}{2,730} \cdot \sin 28^\circ \right) \cong 33.7^\circ$$

$$\alpha_{LC} = 57^\circ \text{일 때, } \theta_S = \sin^{-1} \left(\frac{3,230}{2,730} \cdot \sin 57^\circ \right) \cong 82.9^\circ$$

따라서 횡파의 굴절각 범위 θ_S 는 $35^\circ \leq \theta_S \leq 80^\circ$ 가 된다. 보통 초음파탐상 검사에 이용되고 있는 사각탐촉자의 굴절각은 45° , 60° 및 $35 \sim 80^\circ$ 의 범위에 포함되어 있고 이들 탐촉자를 이용한 경우 강중에는 횡파만이 전파되고 종파는 전달되지 않는다.

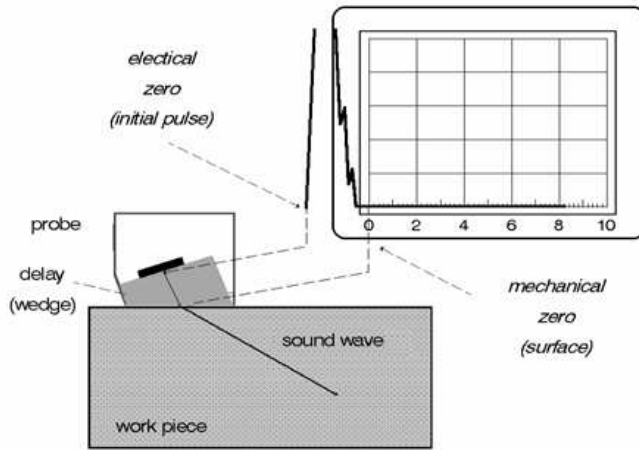


Fig.2-12 Angle beam probe

나. 반사율과 투과율

고체 내에서의 초음파는 종파와 횡파 모두 전파한다. 경계면에 초음파가 경사 입사하였을 때 입사각에 따라서는 반사의 경우도 굴절 투과의 경우도 종파와 횡파 모두가 발생하기도 하고 어느 한쪽만 발생하기도 한다. 이 때문에 경사입사시의 음압반사율 및 음압투과율을 모두 계산하는 방법은 복잡하다. 따라서 실제 초음파탐상검사에 필요한 범위에 한하여 그 계산결과를 나타낸다.

일반적으로 강과 알루미늄을 각각 제1매질로 하고 공기를 매질2로 하였을 때 종파 음압 반사율의 입사각 의존성의 계산결과는 입사각에 따라서 반사율이 크게 변화하는 것을 알 수 있는데, 특히 강의 입사각 70° 부근에서의 음압 반사율은 최소값인 약 13%이다. 이것은 입사한 종파의 초음파의 대부분이 횡파로 모드 변환한 것을 의미하고 종파의 대부분은 소실한 것이다. 이와 같은 현상을 모드변환 손실이라 한다⁽⁴³⁾.

각각의 면에서 초음파의 반사각과 모서리 전체로 보았을 때 음압반사율은 다음과 같이 구할 수 있다. 굴절각이 70° 일 때 시험체 저면에서의 초음파 입사각 70° 이기 때문에 음압반사율은 1 다시 말해 전반사(100%)가 된다.

저면의 반사파는 횡파만으로 반사각은 입사각과 같은 70° 이다. 저면의 수직

한 면에서는 입사각이 20°가 되고 반사파는 모드변환에 의해 횡파 외에 종파도 발생한다. 횡파의 반사각은 20°, 종파의 반사각은 β_L 은 다음과 같이 된다.

$$\beta_L = \sin^{-1} \left(\frac{5,900}{3,230} \sin 20^\circ \right) \approx 38.7^\circ$$

이 위치에서의 음압반사율은 입사각 20°에 대해 음압 반사율은 0.5(50%)가 되고 모서리에서의 입사파의 음압에 대한 반사파의 음압비는 $100\% \times 0.5 = 50\%$ 가 된다. 같은 방법으로 굴절각 45° 및 60° 경우의 모서리에서 음압반사율을 구하면 100% 및 13%가 된다. 다시 말해 굴절각이 60° 및 70° 경우, 음압반사율의 저하(모드변환 손실)에 의해 모서리부터의 에코높이는 각각 13% 및 50%가 된다. 굴절각 60° 경우에는 모드변환손실이 상당히 크다. 이 때문에 모서리형 결함(예를 들면 세로구멍, 표면균열 등의 표면개구결함, 한편 용접의 용입불량 등)을 탐상하는 경우, 통상의 초음파탐상검사에는 굴절각 60°의 탐촉자는 사용하지 않는다.

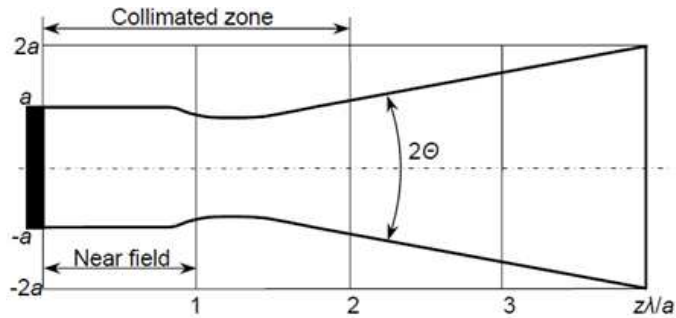
STB-A2 표준구멍(세로구멍)으로부터의 에코높이가 일정하게 되도록 탐상기의 감도를 조정하여 기공과 같은 구형결함을 탐상하면, 굴절각 45°의 탐촉자에 의한 결함에코높이는 굴절각 70°의 탐촉자에 비해 약 절반의 높이에 해당된다. 결함에코높이를 같게 하기 위해서는 굴절각 45°의 탐촉자에서는 굴절각 70°보다도 감도를 6dB만큼 높여줄 필요가 있다. 이 차는 탐상감도의 조정시에 발생한 세로구멍부분의 모드변환손실 영향분에 상당한다⁽⁴⁴⁾.

이상 기술한 것은 초음파 빔의 중심이 모서리에 부딪혔을 때의 계산값이다. 실제의 초음파탐상에는 모서리에서의 입사각이 굴절각 60°의 경우 굴절각 60°보다 약간 작은 각도일 때 에코가 최대가 되고 그 때의 빔 진행거리는 약간 짧아진다. 한편 굴절각 70°의 경우는 굴절각 70°보다 약간 큰 각도일 때 에코가 최대가 되고 이 때의 빔 진행거리는 약간 길어진다.

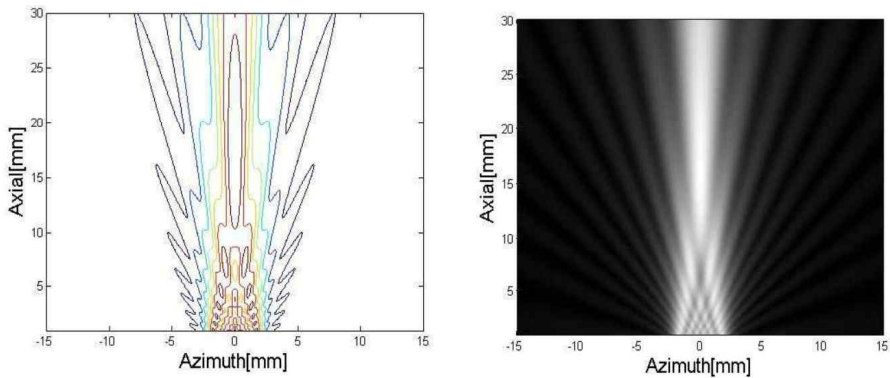
3. 초음파 빔의 음장특성

가. 원형진동자의 중심축상의 음압

탐촉자의 진동자에 전압이 가해지면 진동자는 진동한다. 이 때 진동자에 접해 있는 매질도 진동하고 초음파가 되어 매질 속에 빔으로 전달되어 간다. 초음파의 전파양식은 진동자의 크기, 진동자의 진동주파수에 따라 진동자의 전파 매질 속에서 독특한 음의 크기 분포가 형성되는데 이것이 음장이다. Fig.2-13은 초음파 진동자가 생성하는 초음파 빔의 음장 형태를 나타낸다.



(a) Near field and far field



(b) Field distribution of the ultrasonic beam

Fig.2-13 Field of ultrasonic beam by the vibrator

Fig.2-13 (b)에서 볼 수 있듯이, 흰 부분은 음압이 높고, 검은 부분은 음압이 낮은 부분이다. 진동자에서 가까운 곳에서는 가는 모양으로 되고 음압의 변화가 심하고 복잡하지만 원거리에서는 음압의 변화가 비교적 단순하다는 것을 알 수 있다. 원형 진동자의 음축상(중심축상)의 음압은 다음 식으로 주어진다.

$$P_x \cong 2P_0 \sin \left[\frac{ka}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{a} \right)^2} - \frac{x}{a} \right) \right] \quad (2.45)$$

여기서, P_x : 진동자 전면 중심축상에서의 평균음압

$$k = 2\pi/\lambda$$

a : 진동자의 반지름

식 (2.45)에서 $x \geq a$, 즉 충분한 원거리라 가정하면 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_x &= 2P_0 \sin \left[\frac{ka}{2} \cdot \frac{x}{a} \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a}{x} \right)^2 - 1 \right) \right] \\ &= P_0 \frac{\pi D^2}{4\lambda x} = P_0 \frac{A}{\lambda x} \end{aligned} \quad (2.46)$$

여기서, D : 진동자의 지름

A : 진동자의 단면적

λ : 파장

원형진동자의 중심축상의 음압은 거리 x 가 증가함에 따라 점점 작아지는 것을 알 수 있다. x_0 보다 가까운 범위를 근거리(Fresnel zone or near field)이라 하는데, 중심축상의 음압 P_x 의 최후의 산의 위치까지의 거리를 나타내고 있으며, 다음 식으로 주어진다.

$$x_0 = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 \cdot f}{4C} \quad (2.47)$$

여기서, D : 원형진동자 지름

λ : 파장

f : 주파수

C : 음속

(1) 근거리 음장(Fresnel zone, near field)

진동자 표면으로부터 발생하는 음파들의 에너지 상호작용으로 인해 진동자 표면으로부터 일정한 거리 내에서는 초음파의 강도 및 방향이 불규칙하게 되고, 근거리 음장 내에서는 하나의 불연속이 여러 개의 지시를 나타낼 수 있으며, 근거리 음장 내에서는 하나의 불연속이 여러 개의 지시를 나타낼 수 있으며, 불연속으로부터의 반사지시의 강도가 크게 변화할 수 있게 때문에 결함의 해석에서는 상당한 주의가 필요한 이 일정한 거리를 근거리 음장이라 하며, 근거리 음장의 길이는 다음과 같이 표현될 수 있다⁽⁴⁵⁾.

식 (2.47)으로부터 근거리음장한계거리 x_0 는 진동자 지름의 제곱에 비례하고 파장에 반비례하고 파장에 반비례하여 변화하는 것을 알 수 있다. x_0 보다 먼 거리에서는 중심축상에서의 거리에 의한 음압 P_x 는 근사적으로 식 (2.48)로 표현할 수 있다. 즉, 근거리 음장이내에서는 정확한 탐상이 어렵기 때문에 직경이 작은 진동자를 사용하거나 파장이 긴(즉 주파수가 낮은) 진동자를 사용함으로써 근거리 음장을 줄일 수 있다.

$$X_0 = \frac{D^2}{\lambda} \quad (2.48)$$

여기서, X_0 : 근거리 음장의 길이

D : 진동자의 직경

λ : 파장

(2) 원거리 음장(Fraunhofer zone, Far field)

근거리 음장밖의 영역이 원거리 음장이 되며, 이 음장내에서 반사파의 강도는 초음파 진행거리가 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소한다. 원거리 음장에서 지시의 강도가 지수함수적으로 감소하는 이유는 초음파의 진행에 따른 감쇠(Attenuation) 및 분산(Beam Spread) 때문이다. 감쇠의 원인은 산란(Scattering)과 흡수(Absorption)이다.

빔의 분산은 근거리 음장에서는 고려하지 않고, 원거리 음장에서 빔의 분산각은 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$\sin\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2.49)$$

여기서, θ : 빔의 분산각

λ : 파장

D : 진동자의 직경

원거리 음장에서 P_x 는 진동자의 면적 A 에 비례하고, 거리 x 에 반비례하고 있다. 중심축상의 음압이 거리에 반비례하여 작아지는 것은 초음파가 확산해 가며 전파해가기 때문이다.

나. 지향성(Beam spread, Angle of directivity)

(1) 원형진동자의 지향성

진동자는 일정방향으로 초음파를 강하게 방사하는 성질이 있다. 이것을 지향성이라 한다. 충분한 원거리에서는 중심축(음축) 상에서 제일 강하고 음축으로부터 멀어질수록 급격히 약해진다⁽⁴⁶⁾. 그 정도는 진동자가 클수록, 주파수가 높을수록 현저해진다. 음축상의 음압을 1로 하고 주목하고자하는 방향의 음압을 나타내는 함수를 지향계수라 부른다. 원형진동자의 지향계수 D_C 는 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$D_C = \frac{2J_1(m)}{m} = \frac{2J_1(ka \cdot \sin\theta)}{ka \cdot \sin\theta} \quad (2.50)$$

여기서, $J_1(m)$: 제1종 베셀함수(Bessel function)

m : $(ka \cdot \sin\theta)$

k : $2\pi/\lambda$ (Wave number)

a : 진동자의 반지름, (진동자의 지름 D)/2

θ : 주목하는 방향의 음축으로부터의 각도(지향각)

D_C 와 m 의 관계를 식 (2.50)로 계산한 결과는 fig.2-21에 나타낼 수 있으며, $m = 3.83$ 에서 $D_C = 0$ 이 되고, $m = 3.83$ 에 대응하는 각도 θ 를 지향각이라 부른다. 그 각도를 θ_0 라 하면 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \sin^{-1} \frac{3.83}{ka} = \sin^{-1} 3.83 \frac{\lambda}{\pi D} \\ &= \sin^{-1} \left[1.22 \frac{\lambda}{D} \right] (rad) \approx 70 \frac{\lambda}{D} (degree) \end{aligned} \quad (2.51)$$

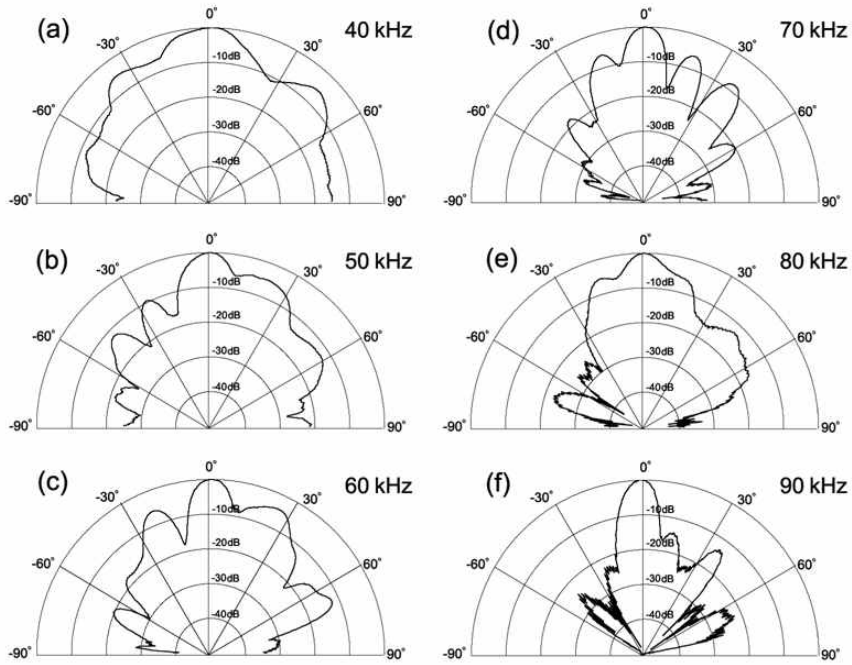


Fig.2-14 Calculation of the beam spread by circular transducer

Fig.2-14에서 볼 수 있듯이 진동자의 중심축 방향의 음압이 가장 강하고, 경사각이 커지게 되면 음압은 점점 약해지게 된다. 실제로는 진동자에 송신된 초음파 에너지는 진동자의 중심축 방향을 포함한 지향각까지의 범위에 집중된다. 지향각은 진동자의 지름에 반비례하고 파장에 비례하며 지향각이 크면 지향성은 둔하고, 지향각이 작으면 지향성은 예리하다고 볼 수 있다⁽⁴⁷⁾.

(2) 직사각형 진동자의 지향성

사각탐촉자에는 직사각형의 진동자를 주로 사용한다. 직사각형 진동자의 한쪽 변의 길이를 $2a$ 라 하고 그 $2a$ 의 변에 의한 지향성만을 고려하는 것으로 한다. $2a$ 변의 지향계수 D_R 은 다음 식과 같다.

$$D_R = \frac{\sin(k a \sin\theta)}{k a \sin\theta} \quad (2.52)$$

여기서, $m = k a \sin \theta$ 라 하면 다음과 같다.

$$D_R = \frac{\sin(m)}{m} \quad (2.53)$$

$m = \pi$ 에서 $D_R = 0$ 이 되고 이것에 대응하는 각도 θ 를 지향각 θ_0 이라 하면

$$\theta_0 = \sin^{-1} \frac{\pi}{ka} = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2a} \doteq 57 \frac{\lambda}{2a} (\text{degree}) \quad (2.54)$$

원형진동자의 경우보다 지향각이 더 예리하게 된다.

다. 점 집속 탐촉자의 음장

점 집속탐촉자에는 음향렌즈 식과 구면진동자 식이 있다. 음향렌즈 식은 제작이 용이하지만 음향렌즈 내의 반사파를 피할 길이 없고 초점거리가 짧을 때에 구면 수차가 있게 된다. 구면진동자식은 음향렌즈 내의 반사나 수차가 없기 때문에 이상적이다⁽⁴⁸⁾.

음향렌즈식이 가장 잘 이용되는 곳이 수침법의 경우이다. 음향렌즈에 의한 초음파의 집속은 Fig.2-15와 같이 평오목렌즈에 의해 집속되고 렌즈의 곡률 반지름 r 과 초점거리 f_{OP} 와의 관계는 진동자로부터 초음파는 평면파로 생각해도 좋기 때문에 기하 공학에서와 같이 취급하고 다음 식으로 주어진다.

$$f_{OP} = \frac{r}{1 - \frac{C_2}{C_1}} \quad (2.55)$$

여기서, C_1 : 음향렌즈에서 음속

C_2 : 물에서의 음속

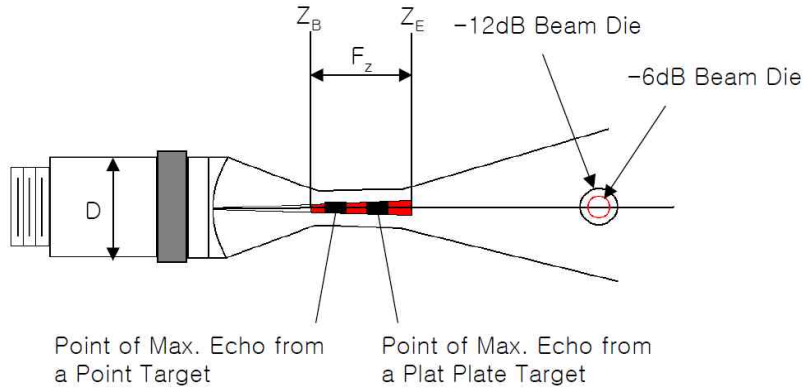


Fig.2-15 Beam diameter and focal zone

여기서, Z_B : Beginning of the focal zone

Z_E : End of the focal zone

F_Z : Focal Zone

D : Element diameter

초음파 빔의 직경 B_D 는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$B_{D(-6dB)} = 1.028 \frac{FC}{fD} \quad (2.56)$$

여기서, F : Focal length in water

C : Sound velocity of material

f : Frequency of transducer

D : Element diameter

초점 범위(Focal zone) F_Z 는 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$F_Z = NS_F^2 \left[\frac{2}{(1 + 0.5S_F)} \right] \quad (2.57)$$

여기서, $N = D^2/4\lambda$: Near field length

$S_F = F/N$: Normalized focal length

제3장 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 실험

제1절 NAUT 수동 탐상 실험

1. NAUT A-Scan 수동 탐상 장치

Fig.3-1 은 A-Scan 수동탐상 실험에 사용된 A-Scan 공중 초음파 수동 탐상기를 나타내고 있다. NAUT A-Scan 수동 탐상 장치는 공중 초음파를 고정하고 정렬하는 마이크로 스테이지, 시험편을 고정하는 시험편 클램프, 측정 베이스, 펄서리시버 유니트, Pre-amp 및 A-Scan 측정 S/W로 구성되어 비교적 실험장치가 간단하다. 이 실험에서는 평면형 공중 초음파 탐촉자(0.4K14×20N, 0.8K14×20N)를 사용하였다. 일반적으로 위치 고정타입의 수동 탐상 시에는 초음파 빔을 집속할 필요가 없으므로 평면형 공중 초음파 탐촉자를 사용하였다.

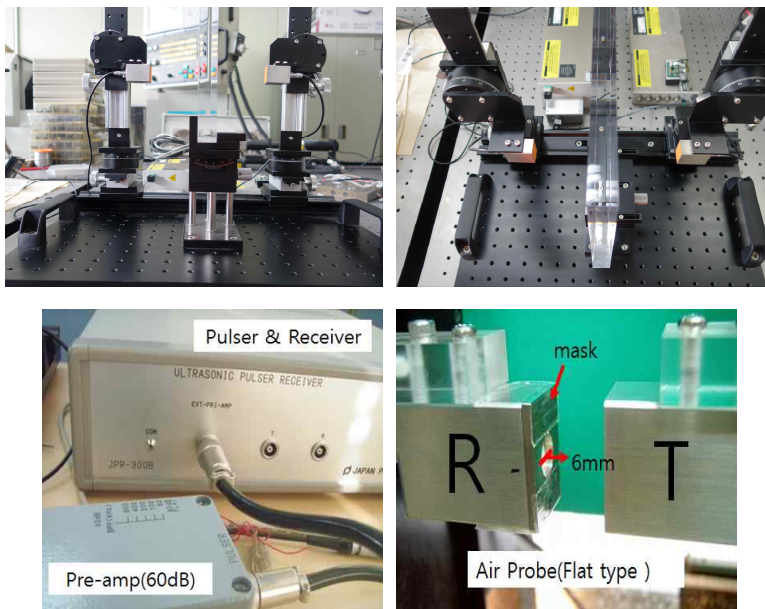


Fig.3-1 Composition of manual NAUT units for A-Scan inspection

2. 아크릴, CFRP, 알루미늄 시험편 제작

Fig.3-2는 실험에 사용된 아크릴판, CFRP, 알루미늄 정상시험편을 나타내고 있으며, Fig.3-3은 제작된 알루미늄 결함 시험편을 나타내고 있다. 알루미늄 결함 시험편은 $100 \times 300mm$ 두께 3, 4, 5, 6, 8, 10mm규격으로 제작되었으며 평판 중심부분에 건전부와 결함부 $20 \times 3mm$ 직사각형으로 형상을 가공하여 건전부는 평판에서 $1mm$ 깊이로 가공되어 있으며, 결함부는 평판을 관통하는 형상으로 제작하였다.

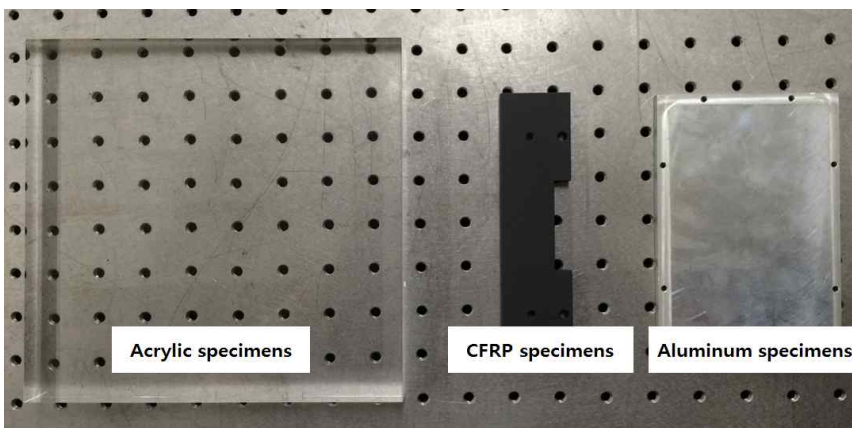


Fig.3-2 Specimens of acrylic panel and CFRP and aluminum



Fig.3-3 Specimens of aluminum(Defect and no defect)

3. NAUT A-Scan 수동 탐상 실험

가. 초음파 집속거리에 따른 투과파 진폭 측정

초음파 집속 시 초음파 감쇠특성을 분석하기 위하여 A-Scan 투과실험을 수행하였다. 시험편은 아크릴판, 알루미늄, CFRP 시험편을 이용하여 송·수신 공중 초음파 탐촉자의 집속거리 변화에 따른 투과파의 진폭관계를 분석하였다. 실험에 앞서 아크릴판 시험편을 기준으로 집속거리에 따른 투과파 진폭관계를 분석하였다. Table 3-1은 집속거리와 진폭의 관계를 분석한 결과값이다.

Table 3-1 Results of Focal distance and amplitude

L(mm)	Amplitude (dB)	L(mm)	Amplitude (dB)
10	34.553	110	33.23707
20	30.14174	120	32.86071
30	28.58522	130	31.29383
40	29.1364	140	31.13964
50	26.43151	150	33.43195
60	32.15554	160	32.00144
70	29.82622	170	33.54174
80	29.6846	180	33.62449
90	33.98117	190	33.86458
100	37.40075	200	32.3067

Table 3-2 Results of Focal distance and amplitude(800kH ζ)

L(mm)	Amplitude (dB)	L(mm)	Amplitude (dB)
10	7.8	110	10
20	7.724223	120	6.155242
30	5.152203	130	2.682629
40	2.683225	140	0.707546
50	0.246553	150	-1.13874
60	-0.43183		
70	-4.28848		
80	-9.13977		
90	-12.4003		
100	-12.6948		

Table 3-3 Results of Focal distance and amplitude(400kH ζ)

L(mm)	Amplitude (dB)	L(mm)	Amplitude (dB)
10	21.3	110	12.08826
20	20.5513	120	11.57416
30	20.07696	130	10.88553
40	19.24214	140	9.721596
50	18.53503	150	8.788215
60	18.09637		
70	17.67384		
80	16.31301		
90	16.09546		
100	15.4251		

나. 공중 초음파 탐촉자 수신면적에 따른 진폭 측정

평면형 공중 초음파 탐촉자의 수신면적에 따른 투과파 진폭관계를 분석하기 위해 다음과 같은 실험을 수행하였다. 송신 탐촉자에서 초음파를 발진하여 수신 탐촉자에서 수신하는 초음파를 송·수신 초음파에 원형 마스킹하여 집속 거리 50mm, 100mm로 설정하여 수신면적을 변화시키는 마스킹에 의한 투과파의 진폭변화를 분석하였다. 마스킹 재료는 초음파가 투과되지 않도록 고무 재질의 마스킹 테이프를 사용하여 탐촉자의 발진부에 부착하여 실험을 수행하였다. Table 3-4는 집속거리에 따른 초음파 발진 마스킹 조건과 진폭 측정 결과를 나타내고 있다

Table 3-4 Results of amplitude(focal distance : 50mm, 100mm)

Air probe : 0.4K14×20N		Air probe : 0.4K14×20N	
Focal distance : 50mm		Focal distance : 100mm	
Masking diameter (mm)	Amplitude (dB)	Masking diameter (mm)	Amplitude (dB)
10	-9.36304	10	-9.29495
6	-16.8985	6	-17.7819
5	-20.9154	5	-20.7343
4	-24.7407	4	-23.8539
3	-29.6428	3	-28.5095
2	-35.8884	2	-36.0122
1	-50.939	1	-52.811

다. 재질별 초음파 투과율 측정

초음파 가이드 파형 분석을 위하여 송·수신 공중 초음파 탐촉자 사이에 각각 아크릴판, CFRP, 알루미늄 시험편을 두고 400kHz, 800kHz의 주파수로 투과율을 비교하는 실험을 수행하였다. Table 3-5는 각 재질별 투과진폭 실험결과이며 초음파 발전부에 마스킹을 하여 투과실험을 진행하였다. 초음파 주파수는 각각 400kHz와 800kHz를 인가하여 실험을 진행하였다. 재질별 초음파 투과율 분석은 수신면적에 따라 투과진폭 신호가 달라지므로 예비실험을 통하여 마스킹 사이즈를 10mm, 5mm 선정하여 실험을 수행하였다.

Table 3-5와 Table 3-6은 초음파 주파수 400kHz, 800kHz로 주파수 인가 시 초음파 가이드 파형 높이 및 투과파 길이를 측정하고 진폭값으로 분석한 결과이다.

Table 3-5 Results of amplitude by materials(focal distance : 50mm)

Specimens	Frequency : 400kHz		Frequency : 800kHz	
	Masking diameter (mm)	Amplitude (dB)	Masking diameter (mm)	Amplitude (dB)
Acrylic panel	10	-64	10	-68.2
	5	-66.5	5	-72.2
CFRP	10	-70.9	10	-80.4
	5	-76.6	5	-83.9
Aluminum	10	-81	10	-84.8
	5	-87.3	5	-87.2

Table 3-6 Results of ultrasonic guide wave height and transmitted wave distance for amplitude(400kHz)

400kHz (Use pre-amp)	H(V)	D(mm)	G(dB)	B (G+60dB)	Amplitude (15.1-B)
Air Transmission	0.868	85.14	15.1	75.1	
Acrylic panel	0.816	76.67	19.1	79.1	-64
	0.82	53.81	21.6	81.6	-66.5
CFRP	0.81	79.95	26	86	-70.9
	0.795	42.18	31.7	91.7	-76.6
Aluminum	0.75	86.49	36.1	96.1	-81
	0.68	65.26	42.4	102.4	-87.3

여기서, $H(v)$: Ultrasonic guide wave height

$D(mm)$: Transmitted wave distance

$G(dB)$: Gain

Table 3-7 Results of ultrasonic guide wave height and transmitted wave distance for amplitude(800kHz)

800kHz (Use pre-amp)	H(V)	D(mm)	G(dB)	B (G+60dB)	Amplitude (16.3-B)
Air Transmission	0.822	82.43	16.3	76.3	
Acrylic panel	0.829	74.88	24.5	84.5	-68.2
	0.805	79.48	28.5	88.5	-72.2
CFRP	0.817	79.34	36.7	96.7	-80.4
	0.579	40.44	40.2	100.2	-83.9
Aluminum	0.575	81.04	41.1	101.1	-84.8
	0.495	64.13	43.5	103.5	-87.2

라. 시험편 경사각도와 초음파 투과파의 진폭 측정

알루미늄 판 두께 2mm와 6mm 시험편을 이용한 초음파 투과법(Transmission method) 및 반사법을 사용하여 A-Scan 모드를 이용하여 초음파 투과파의 진폭관계를 분석하였다. 시험편의 일정한 각도 변화를 주고 각도에 따른 초음파 투과파의 진폭관계를 확인해 보았다. 실험에 사용된 평면형 공중 초음파 탐촉자는 0.4K14×20N 기종을 사용하였다.

Table 3-8과 Table 3-9는 시험편 각도 조건 변화에 따른 실험결과를 나타내고 있다.

Table 3-8 Results of the angle change of specimens(Aluminum 2mm)

Angle	H(V)	D(mm)	G(dB)	
0°	0.165	69.32	29.2	
1°	0.138	69.28	29.2	
2°	0.122	69.29	29.2	
3°	0.066	70.26	29.2	
4°	0.249	69.37	29.2	
5°	0.363	69.32	29.2	
6°	0.318	69.25	29.2	
7°	0.559	69.27	29.2	
8°	0.806	69.23	29.2	Maximum
9°	0.408	69.14	29.2	
10°	0.089	69.07	29.2	

여기서, H : Transmitted wave amplitude(V)

D : Transmitted wave distance(mm)

G : Gain(dB)

Table 3-9 Results of the angle change of specimens(Aluminum 6mm)

Angle	H(V)	D(mm)	G(dB)		
0°	0.231	300.99	29.2		
1°	0.250	298.70	29.2		
2°	0.439	302.70	29.2		
3°	0.206	301.61	29.2		
4°	0.504	303.63	29.2		
5°	0.813	302.78	29.2		
6°	0.399	302.51	29.2		
7°	0.986	299.13	29.2		Maximum
8°	0.868	301.49	29.2		
9°	0.662	298.05	29.2		
10°	0.099	292.36	29.2		

마. 탐촉자 각도변화에 따른 투과파의 진폭 분석

반사법(Reflection method)을 이용하여 시험편을 수평으로 고정된 후 공중 초음파 탐촉자에 일정 각도를 주고 시험편의 두께에 따른 투과파의 진폭 변화 측정하였다. 반사법을 이용하여 가이드파를 발생시켜 의한 탐촉자 입사각에 따라 시험편에 초음파를 입사시키는 원리이다⁽⁵⁴⁾. 실험에 사용된 평면형 공중 초음파 탐촉자는 0.4K14×20N 기종을 사용하였다.

Table 3-10은 가이드파에 의한 탐촉자 입사각 두께별 투과파의 실험결과를 나타내고 있다.

Table 3-10 Results of transmitted wave by air probe incidence angle

T (mm)	IT (degree)	IR (degree)	H (V)	D (mm)	G (dB)	fd (Mhz·mm)
0.3	15.5	15	0.842	224.483	5.6	0.24
0.5	12	12	0.584	208.977	11	0.4
1.0	9	9	0.748	193.383	20.1	0.8
2.0	8	8	0.866	186.609	29.8	1.6
2.0	4	4	0.233	163.705	29.8	1.6
3.0	5	5	0.704	221.414	26.4	2.4
4.0	6.5	6.5	0.832	200.389	28.2	3.2
5.0	6.5	6.5	0.835	180.564	28.9	4
6.0	6.9	6.5	0.501	171.212	28.9	4.8
8.0	7	6.9	0.765	154.47	28.9	6.4
10	7	7	0.716	142.831	23.2	8

여기서, T : specimens thickness(mm)

IT : Transmitted angle(Degree)

IR : Received angle(Degree)

H : Transmitted wave amplitude(V)

D : Transmitted wave distance(mm)

G : Gain(dB)

fd : Frequency(MHz)×thickness(mm)

바. 알루미늄 평판 시험편의 결함 검출 실험

반사법을 이용하여 알루미늄 시험편의 건전부와 결함부에 초음파를 입사시켜 반사되는 초음파 진폭신호를 측정하여 결함 검출 유무를 확인하고자 실험을 진행하였다.

Fig.3-4는 A-Scan 초음파 탐상 검사를 위해 알루미늄 평판 시험편을 장착한 모습을 나타내고 있다. Table 3-12는 유도 초음파에 의한 공중 초음파 탐촉자의 각도와 알루미늄 평판 시험편의 두께에 관한 진폭값을 분석한 결과이다.

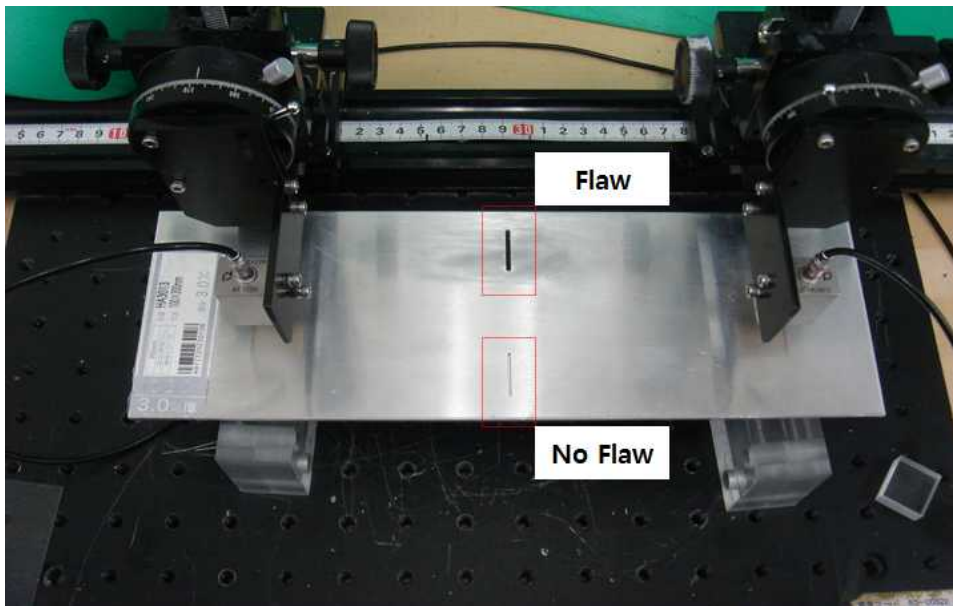


Fig.3-4 Inspect of Al specimens

Table 3-11 Results of amplitude by incident angle and specimens thickness

IT=IR=4~4.5° S0-Mode				
	No defect part		Defect part	
Specimens	H(V)	D(mm)	H(V)	D(mm)
Al(3mm)	0.479	223.468	0.375	223.386
Al(4mm)	0.468	167.308	0.396	169.799
IT=IR=6.5~7° A0-Mode				
	No defect part		Defect part	
Specimens	H(V)	D(mm)	H(V)	D(mm)
Al(3mm)	0.829	183.867	0.439	183.975
Al(4mm)	0.894	177.931	0.339	189.893

제2절 NAUT 자동 탐상 실험

1. 공중 초음파 자동 탐상 로봇

초음파 비파괴 검사 방법에는 접촉매질이 있어야 초음파 탐상이 가능한 접촉식 방법과 공기를 매질로 하여 접촉매질 없이도 초음파 탐상이 가능하도록 하는 비접촉식 방법이 있다. 초음파 비파괴 검사는 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 불연속부(결함-밀도차)를 검출하기 위해 초음파를 재료에 전달시켜 검사하는 비파괴 검사 방법 중 하나이다.

수동탐상의 경우, 결함을 파악하는데 숙련된 기술자가 요구되며, 접촉매질 없이는 초음파 탐상이 이루어지지 않는다. 또한 시험편의 표면이 거칠고 매끄럽지 못하거나 저온·고온의 물질 등 좁은 지점에서는 접촉매질(medium)의 적용이 불가능했던 기존의 접촉식 초음파 탐상 방법의 단점을 보완하기 위해 공기 중에서 초음파 탐상이 가능한 NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) 방법을 이용해야 한다.

비접촉 공중 초음파 검사에서 사용하는 구형 Burst 초음파는 기존 펄스 초음파보다 $400kHz \sim 800kHz$ 영역의 고주파수를 음압 손실을 최소화 할 수 있으며 주파수가 쉽게 변할 수 있는 최적탐상조건을 찾아내기 용이한 이점이 있어 High Power로 송수신이 필요한 NAUT에 적용하고 있다. 고체와 공기간의 음향 임피던스의 차이로 생기는 에너지 손실을 High Power 초음파 Pulser Receiver, PRE-AMP, 고감도의 탐촉자로 보완하여 공기를 매질로 하는 초음파 탐상이 가능하도록 하여 기존의 접촉식 방법을 보완한 탐상기술이다. NAUT 탐상 기술의 적용이 이루어진다면 접촉매질(medium) 없이 공기 중에서도 초음파 탐상이 가능해짐과 동시에 안정된 상태에서의 초음파의 송·수신이 가능해져 기존의 초음파 탐상의 접촉식 방법으로는 불가능했던 한계를 최소화 할 수 있다.

본 시스템은 고감도 Air Probe, High power 초음파 신호 처리용 PXI 고속 디지털이저, 카운터 보드, Pulser Receiver, 주파수 필터가 장착된 Pre-amp 등으로 구성되어 있어 고속 대용량 디지털 데이터처리가 가능하며, 구형

Burst 파를 사용하여 고감도 송신 프로브와 수신 프로브를 통해 측정된 고체와 공기 간에 음향임피던스 차이를 Labview 기반의 DLL소스가 코딩된 측정 프로그램에서 디지털 신호 처리된 초음파 투과율로 재료의 내부 결함 크기 및 위치 등을 검출 할 수 있다. 또한 3축으로 구성된 정밀스테이지를 통하여 최대 600×600mm의 평면을 0.1~20mm pitch(0.1mm step), 1~500mm/sec(1 mm/sec step, resolution ±50μm)로 스캔하고 화상화가 가능하다.

탐상면과 바닥면 사이에 결함이 있는 경우 Flaw Echo 높이에 대응하여 표시점의 휘도를 높인다. 컬러표시의 경우에는 색을 변화 시킨다. Flaw Echo를 검출하기 위한 검사범위(탐상면으로 부터의 거리)를 게이트에 의해 이동시키거나 Echo 높이 대신 Flaw Echo 까지의 시간변화를 색별로 표시하면 탐상면으로부터 일정 깊이마다 표시한 결함의 평면도(C-Scan)가 얻어진다. 본 시스템은 A-Scan으로 얻어지는 시험체의 반응신호를 수합하여 영상을 구축하는 원리를 사용하였다.

점접촉탐촉자를 사용할 경우, 접촉거리를 설정하여 결함 부분에 접촉되므로 미세결함 검출과 동시에 선명한 고해상력의 화상 취득이 가능하다. 평면탐촉자를 사용할 경우, 최적입사거리 10 ~ 20mm이내로 초음파 입사거리 설정하였을 때, 금속소재 재료의 내부 결함 탐상이 가능하며, 초음파 매칭레이어 입사면적에 따라 투과율 및 음압신호가 차이가 날 수 있다.

따라서 본 논문에서는 점접촉탐촉자와 평면탐촉자를 사용한 3축(X-axes : scanning axes, Y-axes : index axes, Z-axes : ultrasonic adjustment axes) 갠트리 로봇(Gantry robot)을 설계하고 제작하였다. 또한 피 검사물을 고정시키는 베이스와 갠트리 로봇 구동 시 진동을 억제 시킬 수 있는 진동절연 메커니즘으로 비접촉 공중 초음파 탐상 시스템을 제작하였다.

Fig.3-5는 비접촉 공중 초음파 시스템의 구동회로를 나타내고 있으며, 2개의 고출력 송·수신 공중 초음파 탐촉자(air probe)를 이용하여 공기 중에 전파하는 초음파를 신호감쇠와 공기와 시험편의 음향 임피던스 차이로 인해 충분한 신호를 투과할 수 없는 단점을 보완하여 공기 중에서도 초음파를 송수신 할 수 있도록 구성하였다. 다시 정리해보면 고출력의 구형 버스트 파를 송신하는 펄서리시버와 효율적으로 공기 중에서 초음파를 송·수신할 수 있는

공중 초음파 탐측자와 필요한 초음파 신호만을 효율적으로 증폭시키는 외부 프리앰프로 시스템을 구성하여 투과신호의 송수신이 가능하도록 하였다.

Fig.3-6과 Fig.3-7은 비접촉 공중 초음파 탐상시스템의 하드웨어 구성 및 초음파 짐속거리 측정 회로를 나타내고 있다.

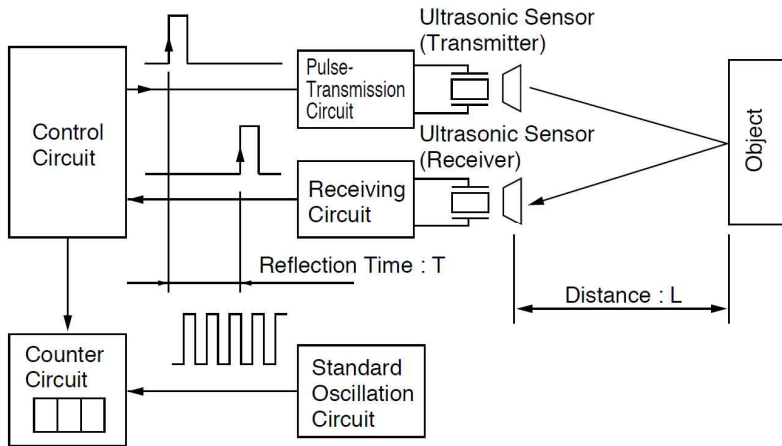


Fig.3-5 Configurations of NAUT measuring circuit

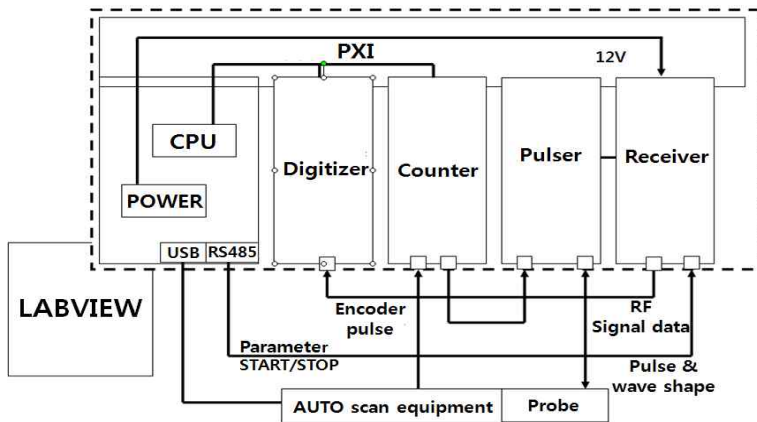


Fig.3-6 Configuration of NAUT hardware system

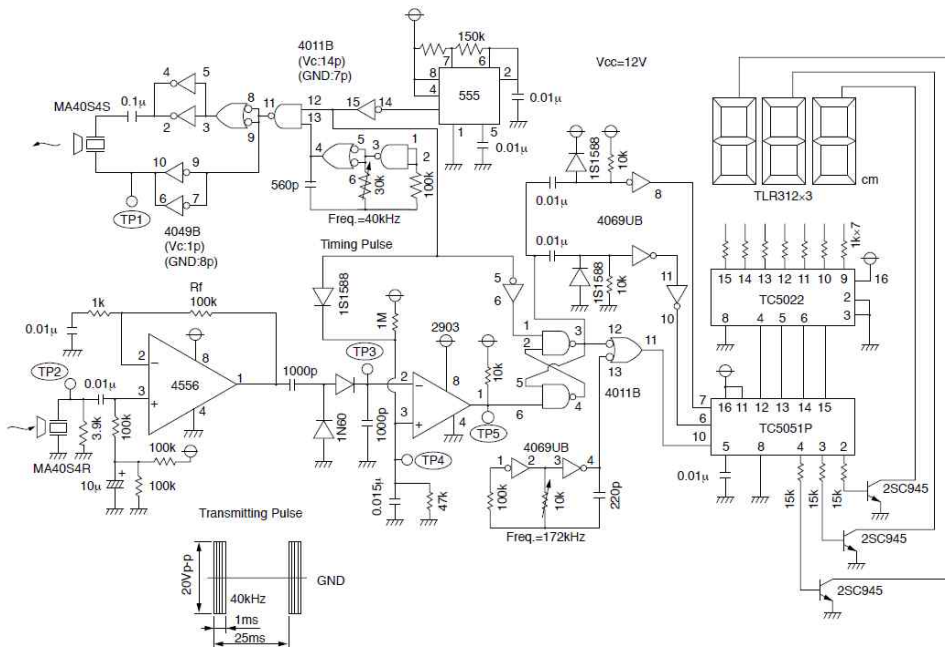


Fig.3-7 Ultrasonic focused distance measuring circuit

공중 초음파 탐촉자를 이용한 흡습 특성평가 원리는 시험편을 투과하는 초음파 신호의 투과 음압 레벨로 초음파 C-Scan 이미지를 구현하게 되는데, 이때 흡습으로 인해 기계적 특성이 변하게 되면 재료의 임피던스 또한 변하게 된다. 이에 따라 투과율에 변화가 생기게 되고 시험편을 투과하는 신호의 음압 레벨이 달라지기 때문에 흡습에 따른 변화를 초음파 C-Scan 이미지와 초음파 신호 특성 변화를 통해 확인할 수 있게 된다. Table 3-12는 본 시스템의 측정부, 제어부, 구동부의 구성을 나타내고 있다. Fig.3-8 (a)~(b)은 제작된 갠트리 로봇의 X_{1,2}, Y, Z-axes 2D 도면이다. Fig.3-9는 최적으로 설계된 비접촉 공중 초음파 3축 탐상 시스템의 3D 도면을 나타내고 있으며, Fig.3-10 (a)~(d)은 제작된 시스템의 실물사진을 나타내고 있다.

본 시스템의 C-Scan 화상탐상 절차는 다음과 같다. 비접촉 공중 초음파 탐상 시스템의 메인전원을 인가 후, NI-PXI controller 전원 및 펄서리시버 전원을 인가하고 시스템 제어용 PC와 통신상태를 확인한 후 화상S/W 실행시킨다.

Table 3-12 Composition of NAUT System

Composition	Item	Model	Specification
Measuring part	Air probe (Point focusing type)	0.4K20N R50	30D×30H
	Air probe (Flat type)	0.4K14×20N	17W×23L×30H
	Pulser & Receiver	SAT-JPR-600C-A01	Pulse voltage : 10~600V Input frequency : 30kHz~10MHz
	Pre-Amplifier	PR-60-S	60dB Flat 50,100,200,400,800 kHz
Controlling part	PXI Controller chassis	NI PXI-1033	Integrated MXIe, 5 Periph slot, 1port PCIe
	PXI Counter board (Up/down counter/timer module)	NI PXI-6602	8ch, 32bit 32 digital I/O lines(5V TTL/CMOS)
	PXI Digitizer	NI PXI-5114	250MS/s, 125MHz, 256MB/ch
	Ultrasonic S/W	Labview Code	
Precision driving part	X ₁ -axes gantry robot	RCS2-SA7R-A	Stoke : 600mm Repeatability : ±0.02mm
	X ₂ -axes gantry robot	RCS2-SA7R-A	Stoke : 600mm Repeatability : ±0.02mm
	Y-axes gantry robot	ISB-MXM-A	Stoke : 600mm Repeatability : ±0.01mm
	Z-axes gantry robot	RCS2-SA6C-A	Stoke : 250mm Repeatability : ±0.02mm
	3-axes gantry robot controller(synchronized operation)	XSEL-J-4-200A	50Hz/60Hz, 17-bit

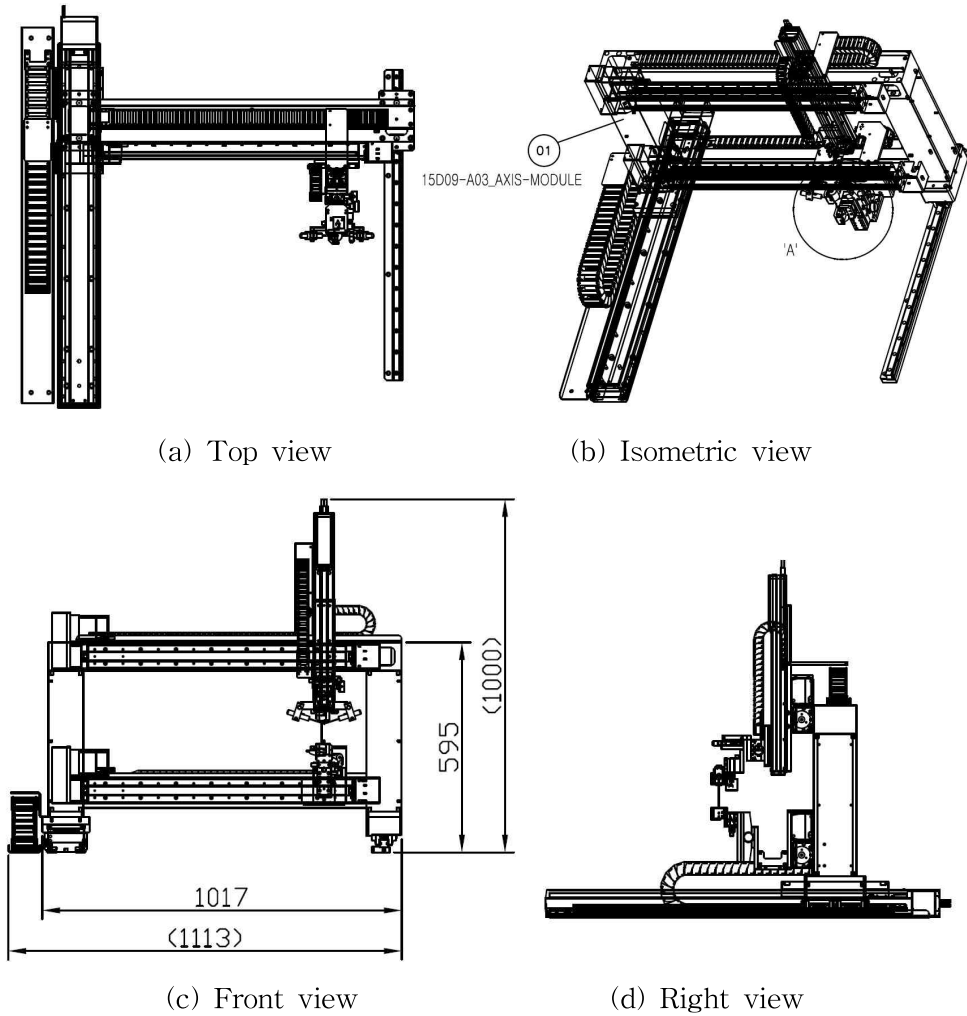


Fig.3-8 Design drawing of 3-axes gantry robot

Fig.3-11은 NAUT 시스템의 화상취득 S/W 및 기구부 제어 프로그램을 나타내고 있다. 이 S/W를 실행한 후, 갠트리 로봇을 구동하여 수직 배열되어 있는 송·수신 공중 초음파 탐촉자를 직각, 평편도, 각도 등의 정렬상태를 점검하고 z-axes 구동시켜 초음파 입사거리를 설정한다. 초음파 입사거리는 공중 초음파 탐촉자 타입에 따라 입사거리 설정을 각각 다르게 세팅한다. 초음파 입사거리는 공중 초음파 탐촉자 부분에서 다시 설명하도록 하겠다.

공중 초음파 탐촉자 정렬 및 입사거리 설정이 완료되면 갠트리 로봇을 X, Y-axes 으로 구동하여 시험체 평면상에 송·수신 초음파 탐촉자를 배치시킨 후, 구형 버스트파를 시험체 내부에 투과시켜 A-Scan 으로 투과신호 검출 여부를 확인하여 정상적으로 시험체 내부에 초음파가 투과되면 초음파 신호 특성 변화를 부분을 S/W상에서 지정하고 gain, frequency, voltage, wave number, LPF, HPF, 등의 파라미터 세팅을 한다. 비접촉 공중 초음파 탐상을 위해 측정범위 및 시험체 범위 설정을 측정 원점, 대각점(측정완료 지점), 측정 가속속도(갠트리 X-axes 가속속도), 측정 피치 등을 설정한다.

이와 같이 초음파 탐상이 시작되면 송신 전압, 주파수, 파형, 화상 수정위치, 수평시간, 투과량, gate 위치를 통해 C-Scan 화상검출 결과를 획득할 수 있다.

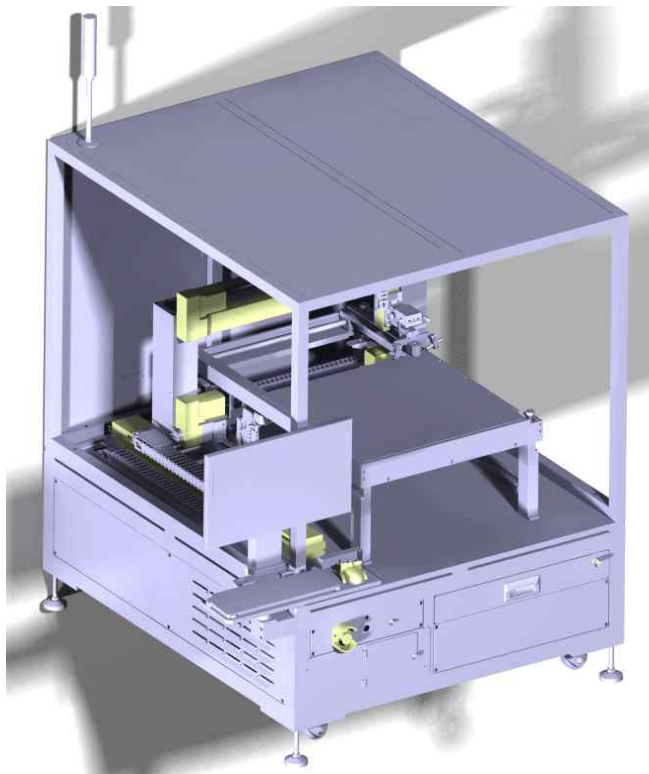
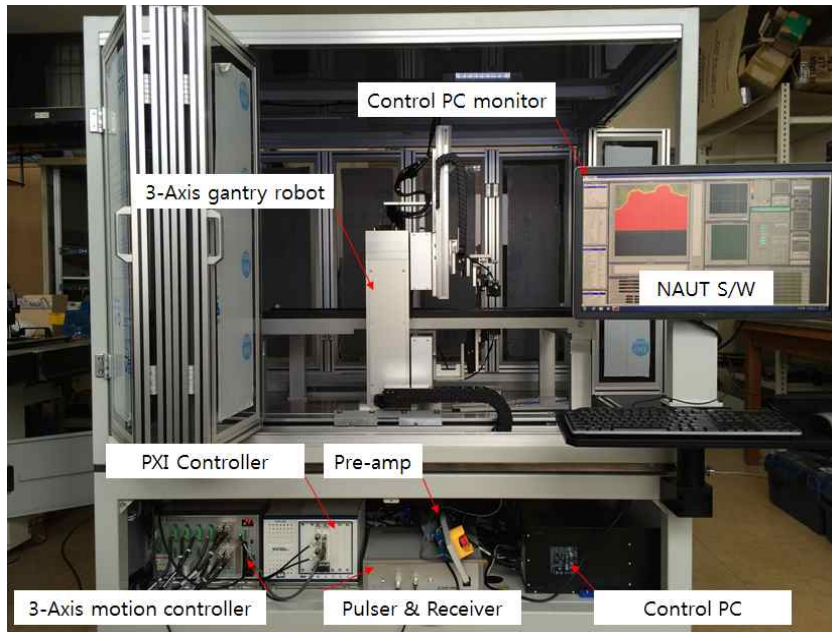
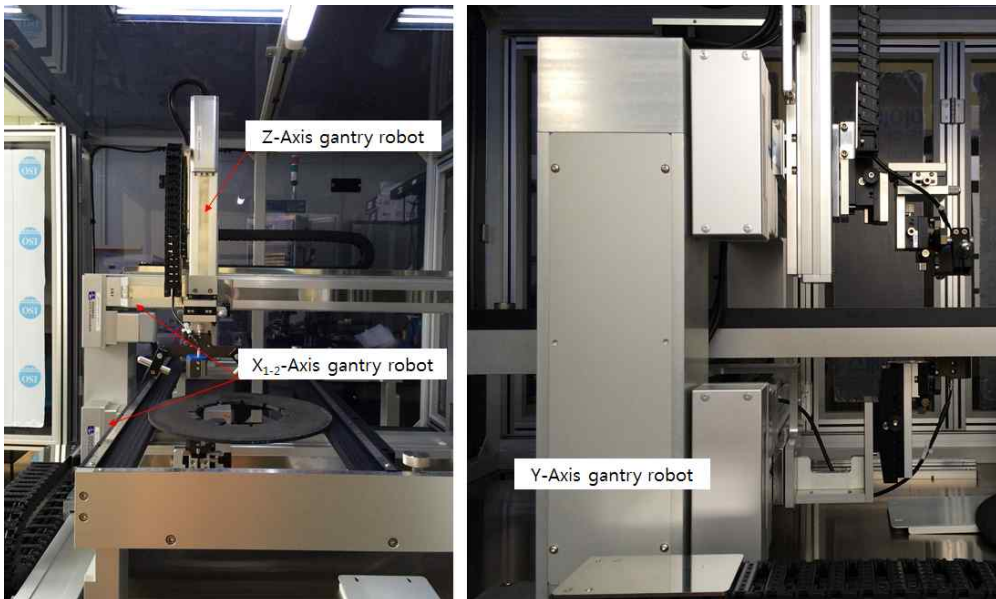


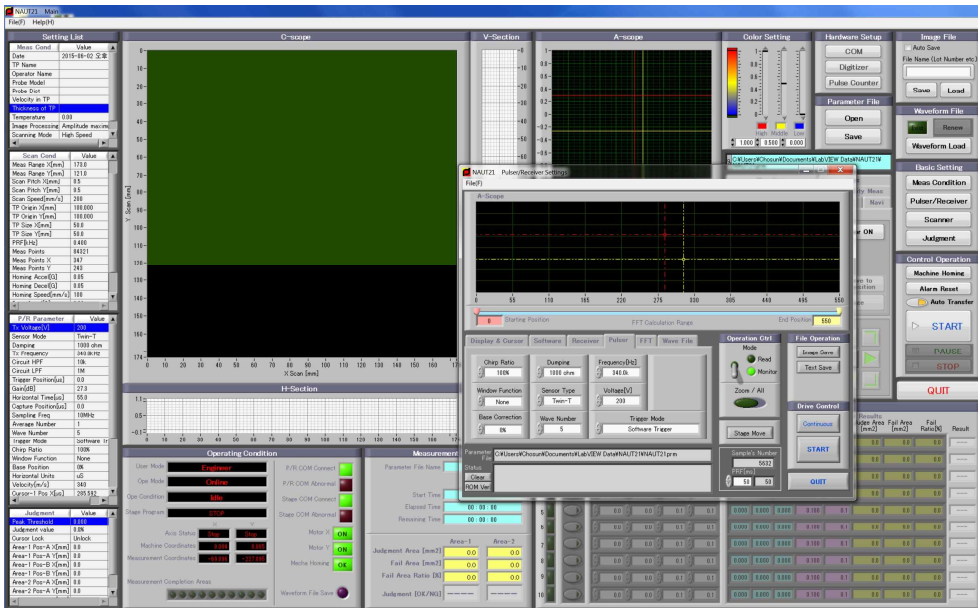
Fig.3-9 3D Design drawing of NAUT system



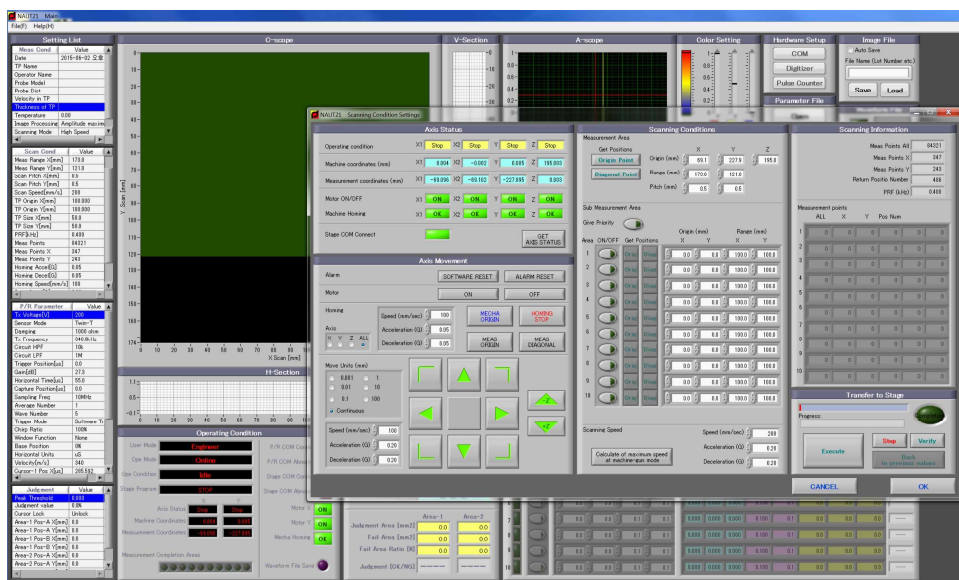
(a) NAUT main frame



(b) 3-axes gantry robot units



(b) Pulser and Receiver setting GUI



(c) 3-axes gantry robot motion and inspection setting GUI

Fig.3-11 NAUT measuring and controlling S/W

2. 공중 초음파 탐촉자(Air Probe)

Fig.3-12는 본 논문에서 사용된 공중 초음파 탐촉자의 내부 구조를 나타내고 있다. 이 탐촉자는 공기를 매질로 하여 초음파를 송·수신하는 것으로 파장이 짧고(단파장), 예리한 초음파 집속, 고도의 방위 분해능을 가지고 있어서 다양한 재료의 초음파 탐상에 적용 가능하며 특히 탄소섬유 강화 탄화규소 복합체 내부결함 검출 시 정밀도 높은 탐상이 가능하다⁽⁴⁹⁾. 또한 재료에 따른 음향 임피던스 차이를 고감도 및 공기 친화력이 강한 초음파 매칭레이어로 투과되는 음압 레벨 신호를 파형의 노이즈가 저감된 신호로 획득할 수 있기 때문에 감도 및 노이즈 증가에 따른 감쇠가 큰 재료나 고해상·고화상 C-Scan 탐상이 가능하다.

공중 초음파 탐촉자는 피에조 세라믹과 매칭레이어 접착기술이 가장 핵심이 되는 요소이다. 매칭레이어는 초음파를 공기 중으로 발진해주는 역할을 하는데 피에조 세라믹과 매칭레이어를 접착한 경우 변화될 수 있는 결과를 추출하여 제 2의 사용가능 주파수에 대한 연구를 수행하는 것도 반드시 필요하다.

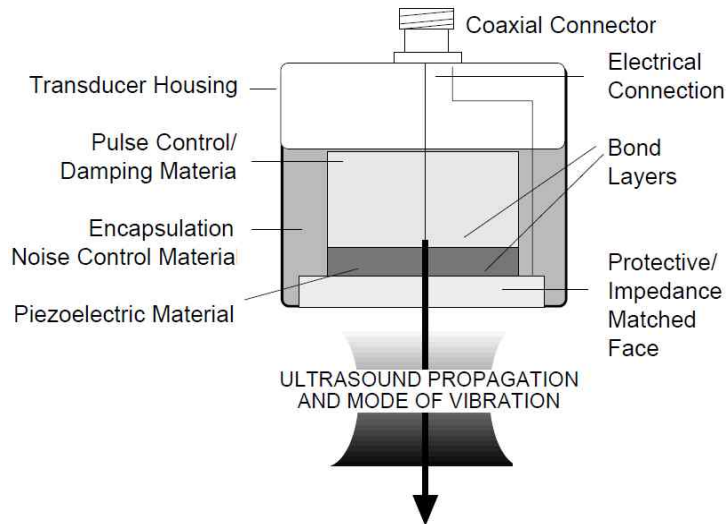


Fig.3-12 Configurations of air probe

Fig.3-13 (a), (b)은 본 논문에서 사용되는데 점집속형 공중 초음파 탐촉자 (0.4K20N S50, S22) 와 평면형 공중 초음파 탐촉자(0.4K14×20N) 실물을 나타내고 있다. 공중 초음파 탐촉자는 일본 J社에 제작되었다.



(a) Point focusing type air probe(0.4K20N S50 & S22)



(b) Flat type air probe(0.4K14×20N)

Fig.3-13 Air Probe

Fig.3-14는 공중 초음파 탐촉자의 진동수별 집속거리 따른 초음파 감쇠값을 분석한 결과이다. 그래프에서 볼 수 있는 듯이 초음파 진동수 200MHz 일 때 재료와 공기 중의 음향 임피던스 차이로 인한 초음파 감쇠는 높아지고 있음을 할 수 있다. 따라서 고감도의 공중 초음파를 사용할 때는 초음파 감쇠를 감소시키기 위해 최적의 집속거리를 선정해야 한다. 집속거리 선정은 다음의 식을 따른다⁽⁵⁰⁾.

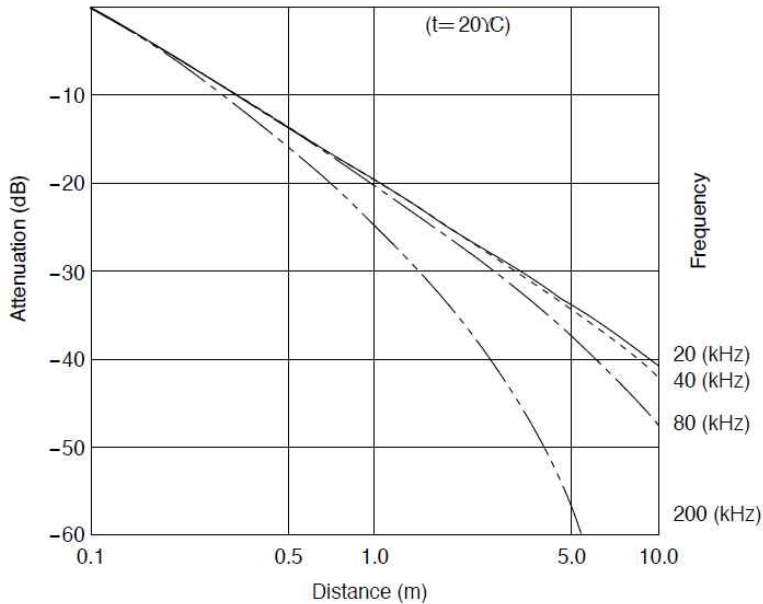


Fig.3-14 Attenuation Characteristics of sound pressure by distance

점집속형 공중 초음파 집속거리 D_p 는

$$D_p = (\text{Air probe focal distance} - 2) \times 2 \quad (3.1)$$

ex) $0.4K20NR50$ ($R50$ is focal distance)

$$D_p = (50 - 2) \times 2 = 96\text{mm}$$

평면형 공중 초음파 집속거리 D_F 는 고주파수 대역을 사용하므로 단파장 영역에서 초음파 발진 시 투과율이 높아짐으로 집속거리가 가까울수록 유리한 부분이 있다. 송신부 탐촉자는 시험편으로부터 10mm ~ 20mm의 집속거리 유지가 가장 효율적이며, 수신부 탐촉자의 경우도 이와 동일한 집속거리를 선정하는 것이 평면형 초음파 탐촉자에서는 투과효율이 가장 좋다고 볼 수 있다.

Fig.3-15와 Fig.3-16은 점집속형 공중 초음파 탐촉자(0.4K20N R50)과 평면형 공중초음파 탐촉자(0.4K12×20N)의 주파수 대역에 따른 감도 및 음압레벨을 분석한 결과이다. 40kHz 영역에서 감도와 음압레벨 효율이 최적임을 알 수 있다. 본 결과는 시험편에 투과하지 않은 상태의 감도 및 음압레벨 결과이므로 실제 시험편 투과 실험 시에는 400kHz 영역의 주파수 대역에서 초음파 탐상을 진행하므로 아래의 결과는 탐촉자의 성능인자 참고요소라 생각하면 된다.

Fig.3-17은 점집속형 공중 초음파 탐촉자(0.4K20N R50)과 평면형 공중초음파 탐촉자(0.4K12×20N)의 송신 탐촉자의 지향각에 따른 음압감쇠 결과를 나타낸 것이다. 그래프에서와 같이 진동자의 중심축 방향의 음압이 가장 강하고, 경사각이 커지게 되면 초음파 감쇠로 인한 음압은 점점 약해지게 된다. 실제로는 진동자에 송신된 초음파 에너지는 진동자의 중심축 방향을 포함한 지향각까지의 범위에 집중된다. 지향각은 진동자의 지름에 반비례하고 파장에 비례하며 지향각이 크면 지향성은 둔하고, 지향각이 작으면 지향성은 예리하다고 볼 수 있기 때문에 평면형 공중 초음파 탐촉자보다 점집속 공중 초음파 탐촉자의 지향성이 예리하다고 볼 수 있다⁽⁵¹⁾⁽⁵²⁾.

Fig.3-18은 점집속형 공중 초음파 탐촉자(0.4K20N R50)과 평면형 공중초음파 탐촉자(0.4K12×20N)의 수신 탐촉자의 지향각에 따른 음압감쇠 결과를 나타낸 것이다. 이 역시 평면형 공중 초음파 탐촉자는 지향성이 둔하여 경사각이 커져 음압이 점점 약해지는 것을 알 수 있다. 이러한 공중 초음파 탐촉자의 타입별의 지향성에 따른 음압이 차이가 있으므로 시험편의 재질에 따라 적절한 탐촉자 선정이 필요한 것이다⁽⁵³⁾.

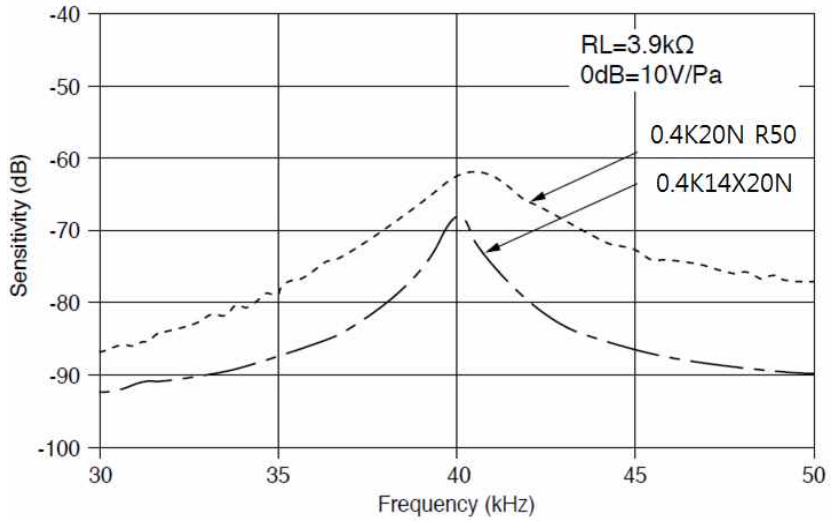


Fig.3-15 Sensitivity

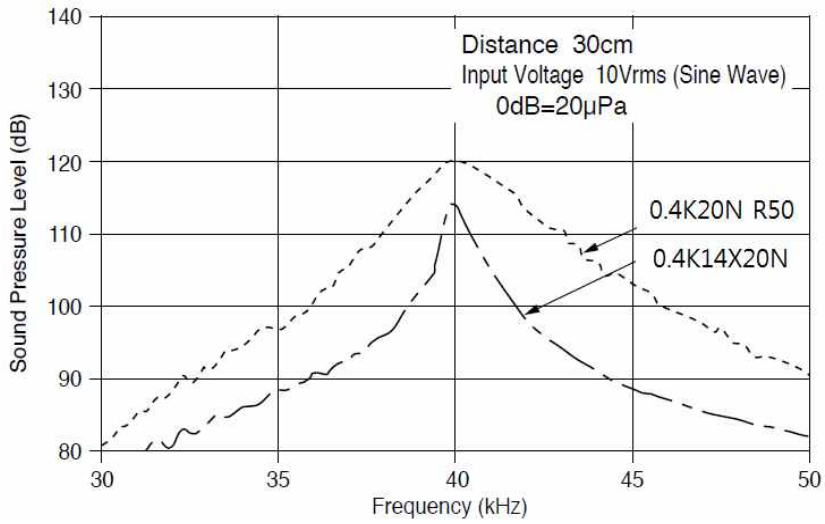


Fig.3-16 Sound pressure

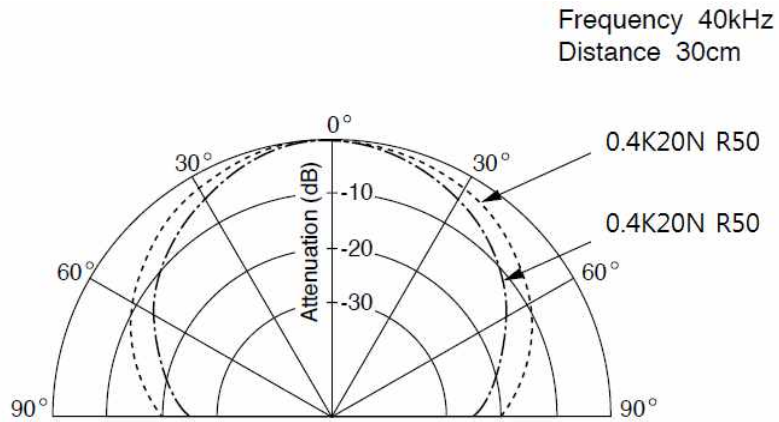


Fig.3-17 Radiation characteristics(Transmitted)

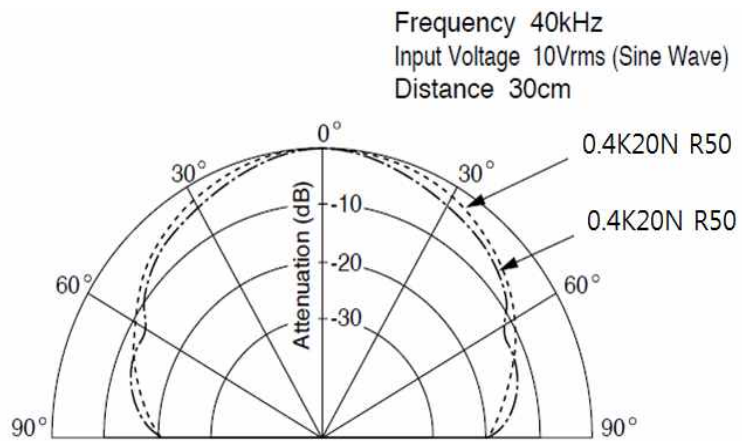


Fig.3-18 Radiation characteristics(Receiver)

3. C_f-C 브레이크 디스크, C_f-SiC 복합체 시험편 제작

비접촉 공중 초음파 탐상기법을 이용한 항공기용 C_f-C 브레이크 디스크의 C-Scan 모드 탐상을 위하여 정상시험편과 결함시험편을 제작하였다. C_f-C 브레이크 디스크 정상시험편 및 결함시험편의 제작사항은 Fig.3-19 (a),(b)에 나타내었다. Fig.3-20은 제작된 C_f-C 브레이크 디스크 정상시험편과 결함시험편의 실물을 나타내고 있으며, Fig.3-20 (a)는 마스크링 전이며, Fig.3-20 (b)는 마스크링 후의 시험편을 나타내고 있다. Fig.3-21 (a)은 제작된 C_f-SiC 복합체 정상시험편의 마스크링 작업 전·후를 나타내고 있으며, Fig.3-21 (b)은 제작된 C_f-SiC 복합체 결함시험편의 마스크링 작업 전·후를 나타내고 있다. 제작된 C_f-SiC 복합체 2개의 정상·결함시험편은 200×200mm t=20mm 제작되었으며, 결함 시험편의 인공결함은 시험편의 하부면에 원형결함(D=5mm, D=6mm)이 존재하며 이 원형결함은 수평방향으로 총 6개 존재하며 각각의 깊이는 최소 깊이 10mm, 중간깊이 12mm, 최고깊이 14mm이다. C-Scan 평면 화상은 시험편의 내부 중간부분에서 초음파 집속이 이루어져 초음파 송·수신에 의한 에코 높이 신호값으로 이미지 프로세싱하는 기법이므로 C_f-SiC 결함 시험편의 인공결함 최소깊이를 10mm로 선정한 것이다.

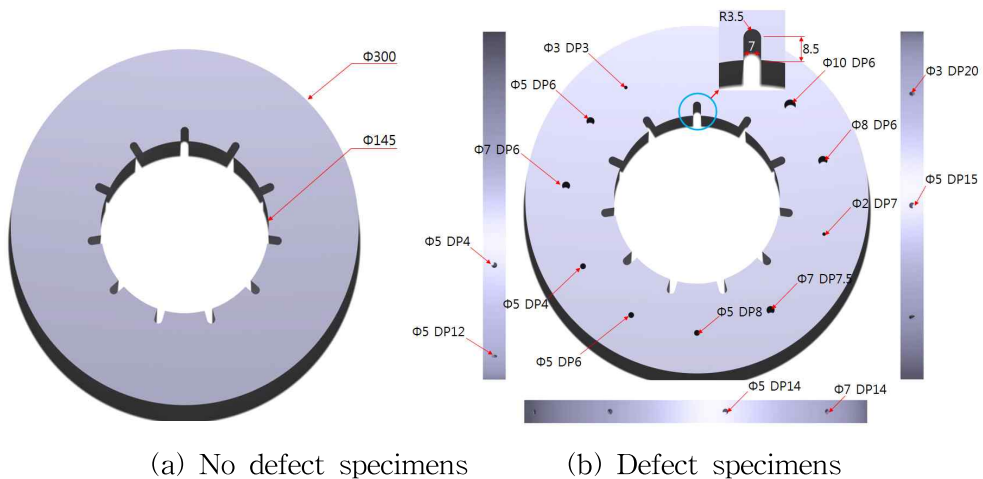
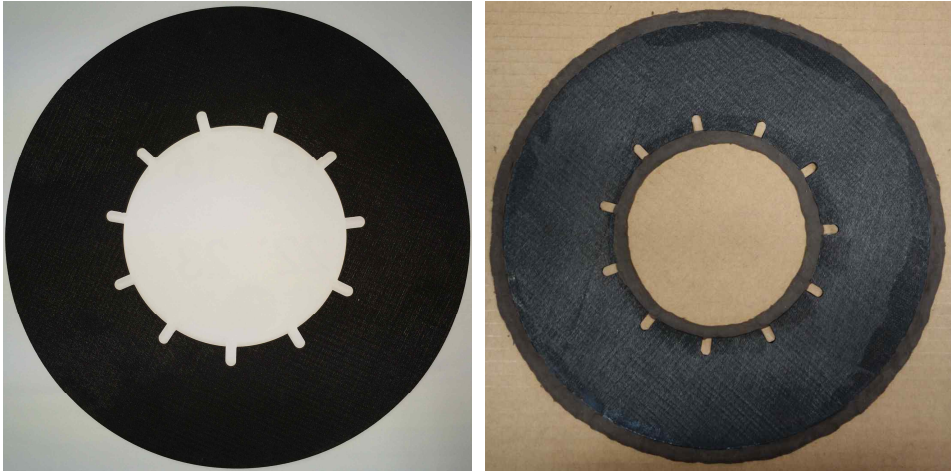
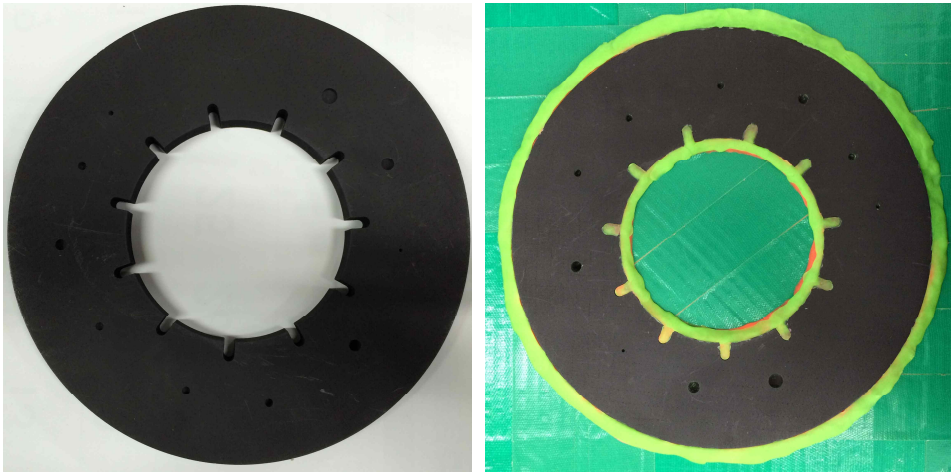


Fig.3-19 Design of C_f-C brake disc specimens



(a) No defect specimens

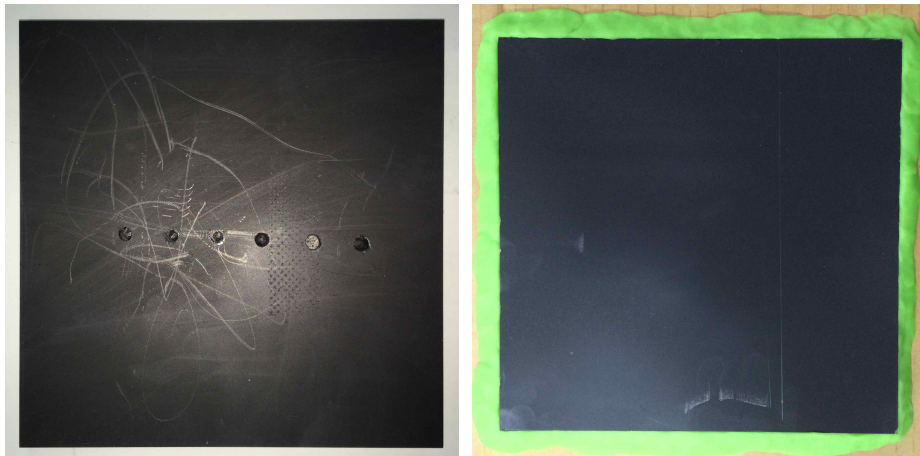


(b) Defect specimens

Fig.3-20 Specimens of C_f-C brake disc



(a) No defect specimens



(b) Defect specimens

Fig.3-21 Specimens of C_f -SiC composites specimens

4. NAUT C-Scan 자동 탐상 실험

가. 항공기용 C_f-C 브레이크 디스크 시험편 C-Scan

실험방법은 시험편에 마스킹 유무에 따른 C-Scan 모드 탐상을 수행하였으며, 마스킹을 하지 않은 정상시험편 및 결함시험편의 C-Scan 모드 탐상 검사 설정 조건은 Table 3-13에 나타내었으며, 마스킹 되어진 정상시험편 및 결함 시험편의 C-Scan 탐상 검사 설정 조건은 Table 3-14에 나타내었다. 마스킹 되어진 시험편의 탐상실험은 인가되는 초음파 주파수 대역을 340kHz, 400kHz 설정하여 측정된 C-Scan 화상결과를 비교분석하였다. C-Scan 화상 결과 추출은 에코높이 측정을 통하여 컬러맵으로 표시된다. 투과율이 최고값을 갖는 부분은 적색(red), 투과율이 중간값을 갖는 부분은 노란색(yellow), 투과율이 최소값을 갖는 부분은 청색(blue)로 표시한다. Fig.3-22는 본 NAUT 시스템에서 구현하는 C-Scan 모드의 컬러맵 표시방법을 나타낸 것이다.

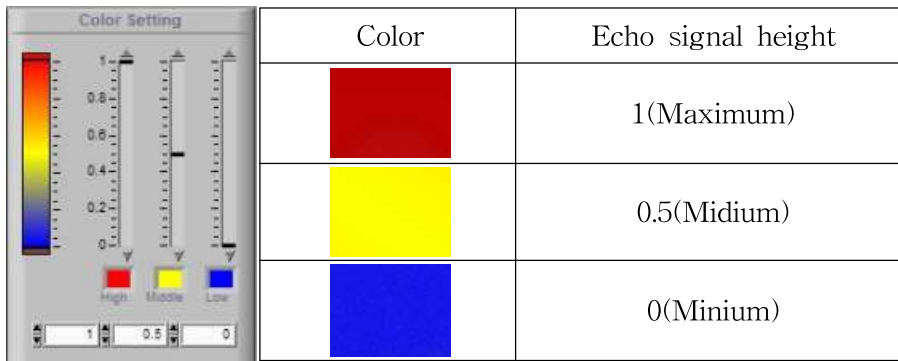


Fig.3-22 Color map Display of C-Scan mode by echo signal

Table 3-13 Experiment of condition(no masking specimens)

Condition	Specimens	
	No defect specimens	Defect specimens
Velocity in TP(m/s)	340	340
Tx voltage(V)	300	300
Tx frequency(kHz)	340	340
Gain(dB)	26.0	31.1
Sampling frequency(MHz)	10	10
Scan speed(mm/s)	50	50
Scan pitch(mm)	0.5	0.5

Table 3-14 Experiment of condition(masking specimens)

Condition	Specimens	
	No defect specimens	Defect specimens
Velocity in TP(m/s)	340	340
Tx voltage(V)	300	300
Tx frequency(kHz)	340, 400	340, 400
Gain(dB)	22.9, 30.1	31.1, 36.4
Sampling frequency(MHz)	10	10
Scan speed(mm/s)	50	50
Scan pitch(mm)	0.5	0.5

결함시험편은 후면부와 측면부에 원형 인공결함을 만들어 초음파 C-Scan 모드 탐상 실험을 진행하였다. 비접촉 공중 초음파 탐상검사 시 시험편에 초음파가 입사 되고 투과가 진행될 때 시험편의 면적 방향으로 가이드파에 의한 초음파 에너지 손실이 발생하게 된다⁽⁵⁶⁾. 이것은 투과율 손실에 영향을 미치게 되는데 다르게 말하면 초음파 방출현상이 생기는 것이다. 공기 중에 임피던스 차이가 현저하게 감소되고 초음파 투과파 감소도 이어지게 되므로 초음파 방출현상을 방지하게 위해서 시험편의 경계면 즉, 1차적으로 시험편 형상의 사이드 부분을 클레이(clay)등과 같은 재질을 이용하여 사이드 부를 마스킹하여 초음파 에너지 방출을 차단하고 2차적으로 평면접합판지 및 양면

접합판지를 이용하여 시험편 크기보다 더 크게 접합판지를 재단한 후 시험편 형상에 맞게 접합판지에 시험편 형상을 만든다.

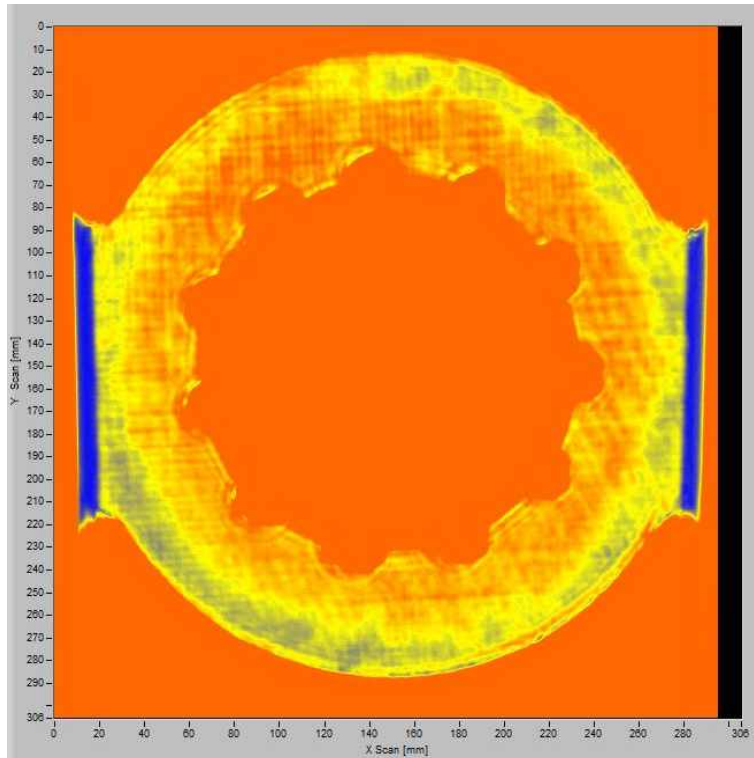
시험편을 고정할 수 있도록 한다. 평면 접합판지나 양면 접합판지를 사용하는 이유는 물결모양으로 골을 만들 골심지에 라이너지하고 하는 면이 반듯하고 두꺼운 판지를 한면 또는 양면으로 접합하여 만들어져 있기 때문에 라이너지와 골심지 사이에는 공기층이 형성되어 있어서 음향 임피던스가 현저히 감소되어 초음파 투과가 이루어지지 않으므로 C-Scan 탐상 시 정확한 시험편의 형상 탐상을 할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

본 실험에서는 마스킹 유무에 따른 정상 시험편 및 결함시험편의 C-Scan 모드 투과 탐상 결과를 도출하였으며, 마스킹을 한 정상 시험편 및 결함 시험편은 C-Scan 탐상 검사 조건에 따라 탐상 결과를 도출하였다.

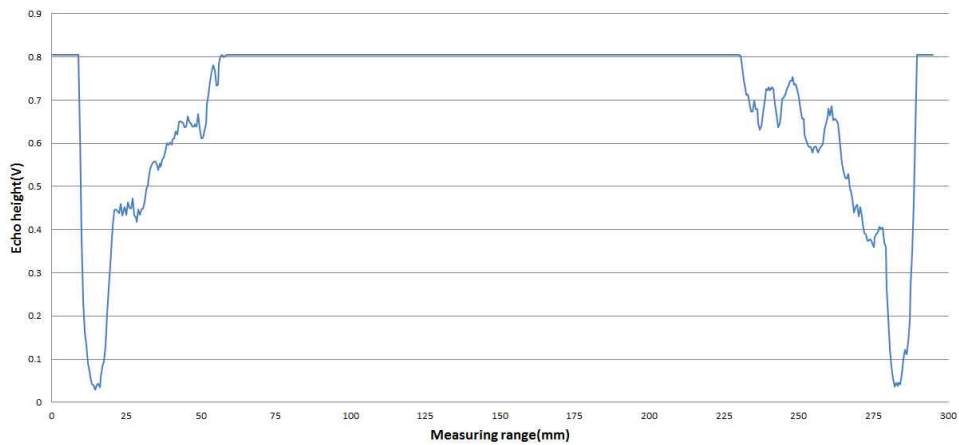
Fig.3-23 (a)은 마스킹을 하지 않은 정상시험편의 C-Scan 화상결과를 나타내고 있으며, Fig.3-23 (b)은 가이드파에 의한 x축(Scanning axes) 에코높이 측정결과를 나타내고 있다. Fig.3-24 (a)는 마스킹을 하지 않은 결함시험편의 C-Scan 화상결과를 나타내고 있으며, Fig.3-24 (b)는 가이드 파에 의한 x축(Scanning axes) 에코높이 측정결과를 나타내고 있다.

Fig.3-25 (a), (b)는 초음파 송신 주파수 $340kHz$ 일 때, 마스킹된 정상시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다. Fig.3-26 (a),(b)은 정상시험편의 초음파 송신 주파수 $400kHz$ 일 때, C-Scan 결과 및 에코높이 신호 분석 결과이다.

Fig.3-27 (a),(b)은 초음파 송신 주파수 $340kHz$ 일 때, 마스킹된 결함시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다. Fig.3-28 (a), (b)은 초음파 송신 주파수 $400kHz$ 일 때, 마스킹된 결함시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다.

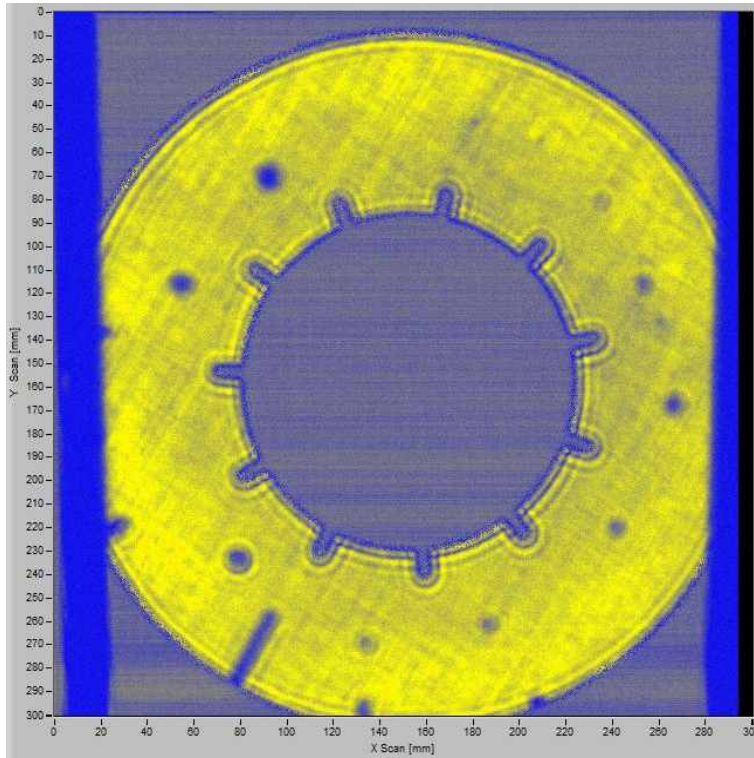


(a) Image of C-Scan mode

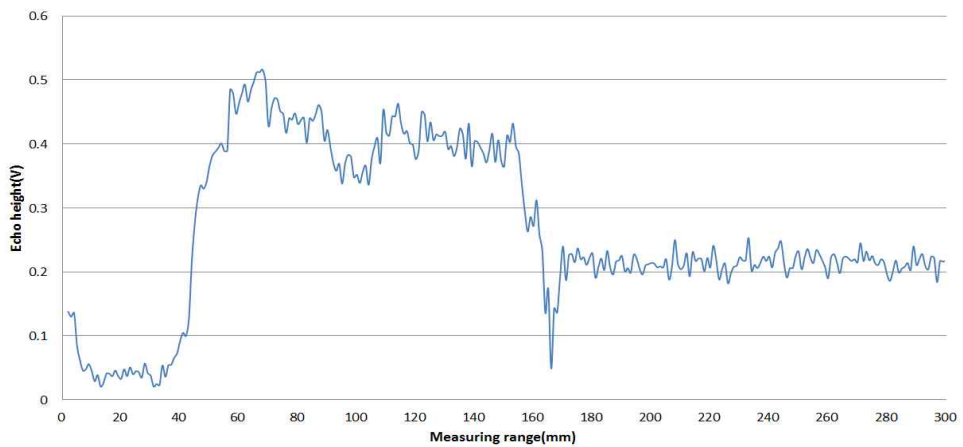


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-23 Results of C-Scan inspection(No defect specimens_no masking)

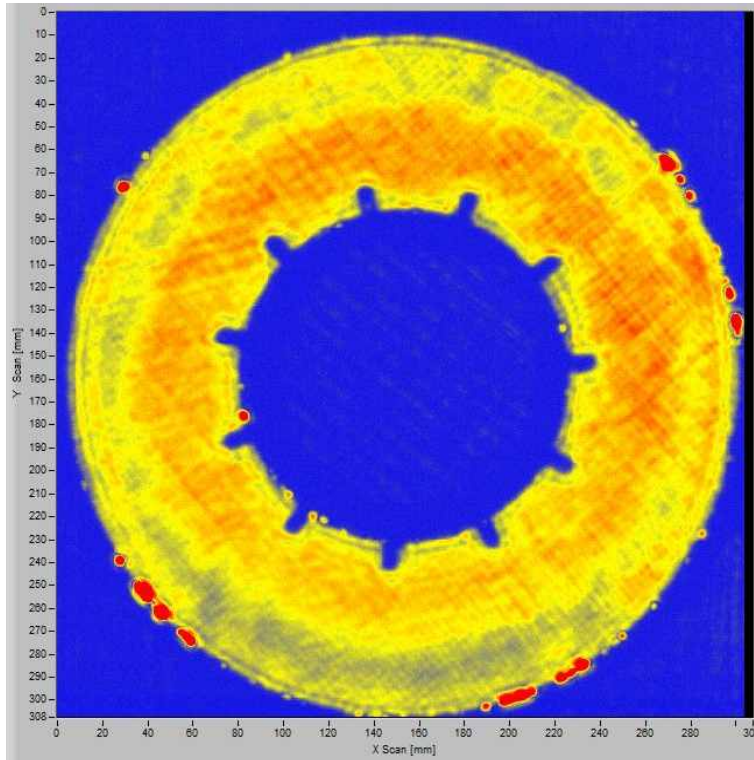


(a) Image of C-Scan mode

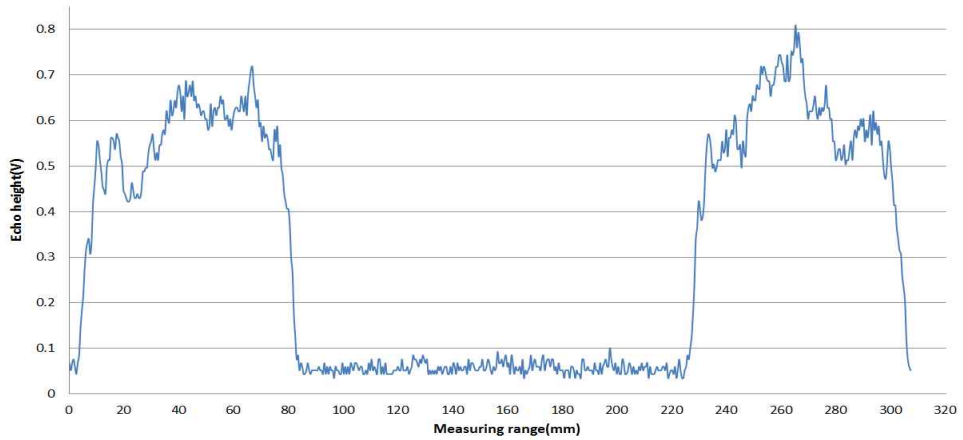


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-24 Results of C-Scan inspection(Defect specimens_no masking)

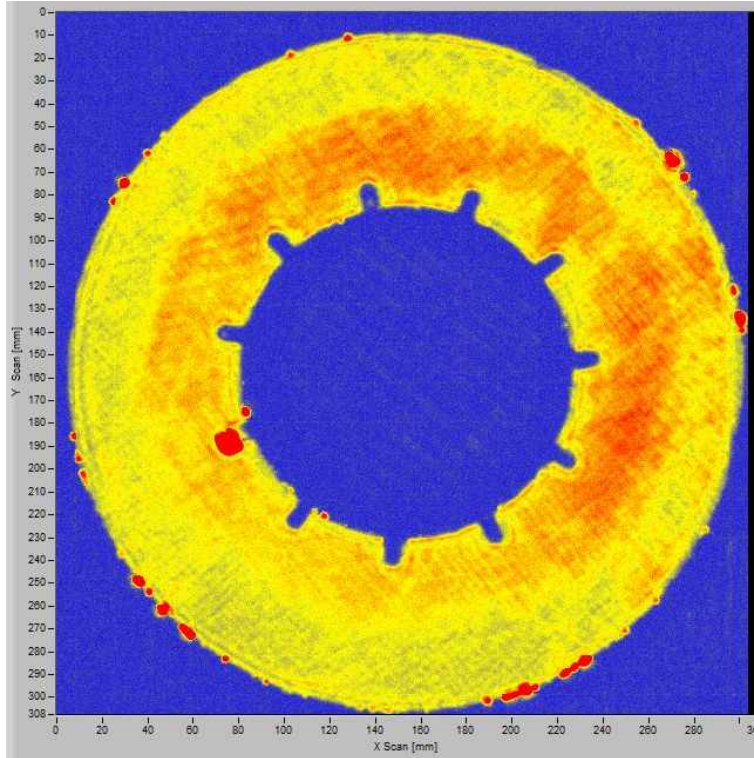


(a) Image of C-Scan mode

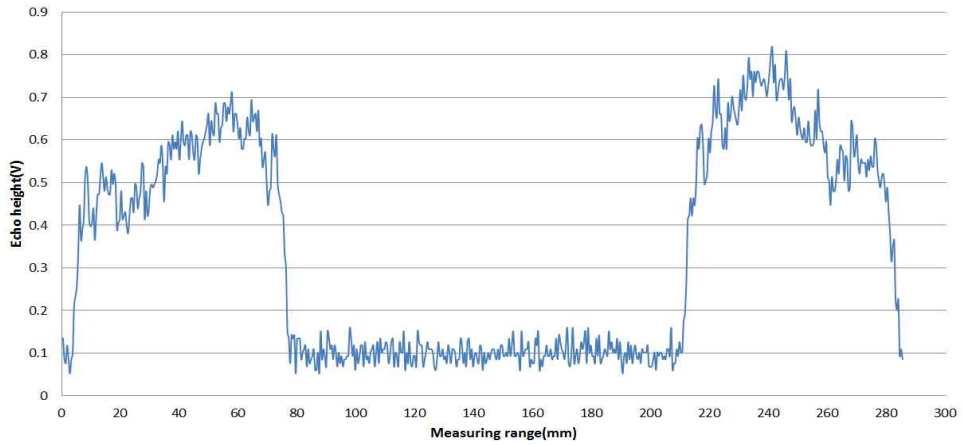


(b) Echo height in x-axes (scanning axes)

Fig.3-25 Results of C-Scan inspection
 (No defect specimens_masking_340kHz)

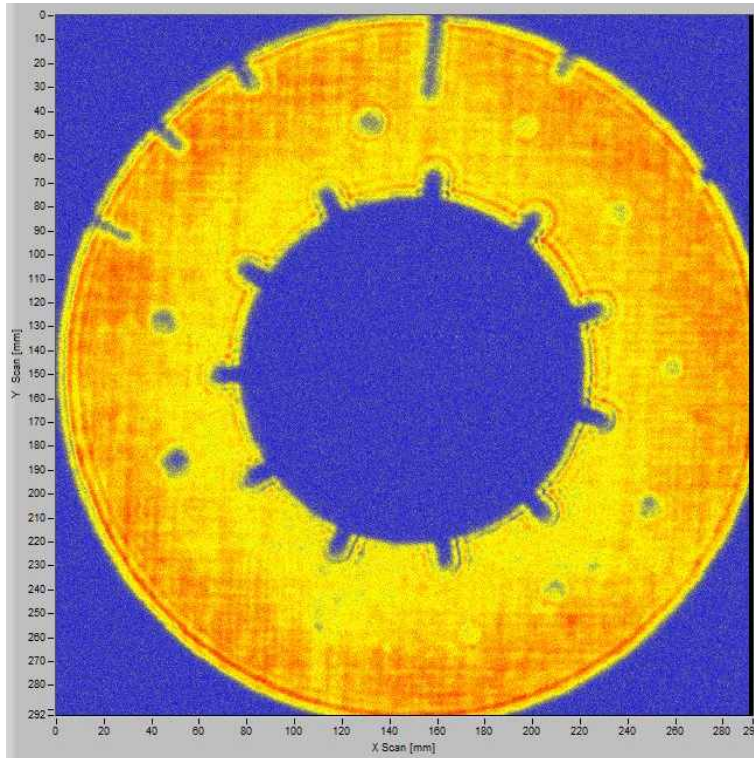


(a) Image of C-Scan mode

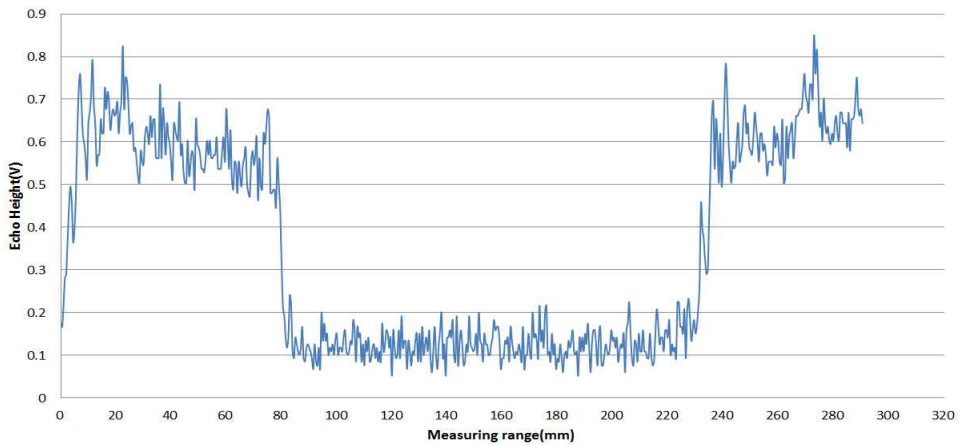


(b) Echo height in x-axes (scanning axes)

Fig.3-26 Results of C-Scan inspection
 (No defect specimens_masking_400kHz)

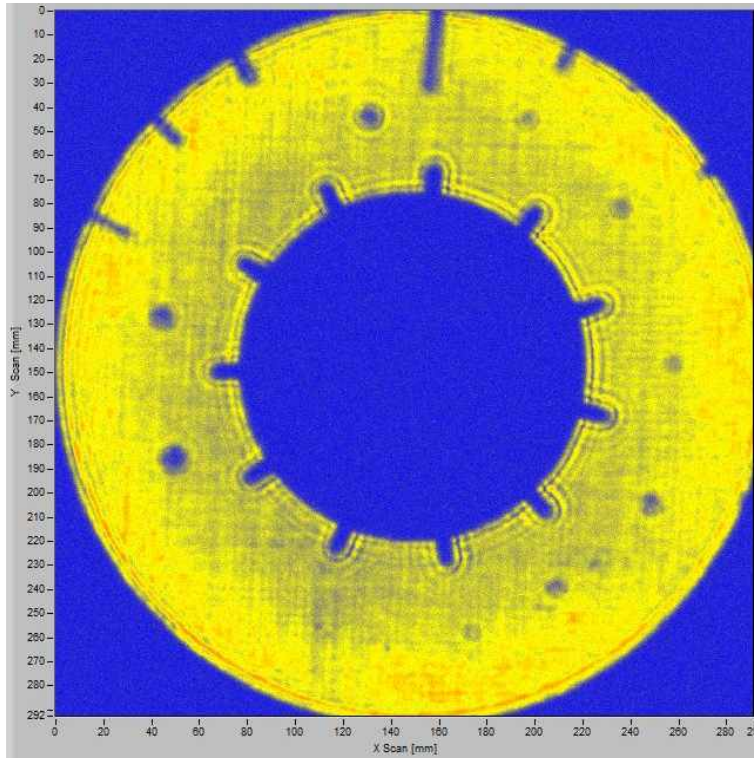


(a) Image of C-Scan mode

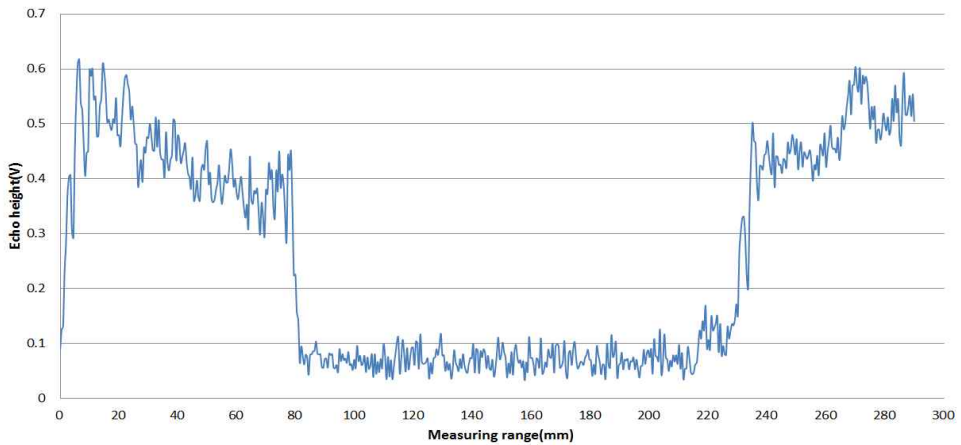


(b) Echo height in x-axes (scanning axes)

Fig.3-27 Results of C-Scan inspection
 (Defect specimens_masking_340kHz)



(a) Image of C-Scan mode



(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-28 Results of C-Scan inspection
 (Defect specimens_masking_400kHz)

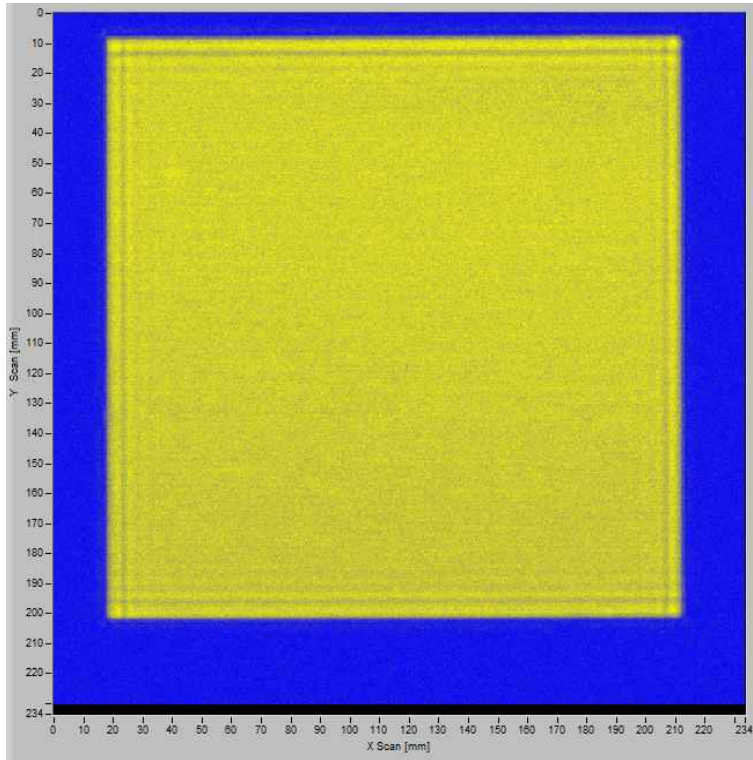
나. C_f-SiC 복합체 시험편 C-Scan

Table 3-15는 C_f-SiC 복합체 시험편 C-Scan 모드 탐상 실험을 하는 조건을 나타내고 있다. 앞에서 C_f-C 브레이크 디스크의 C-Scan 탐상을 통하여 송신 주파수 최적값이 340kHz 이므로 C_f-SiC 복합체 정상시험편과 결함시험편의 C-Scan 탐상에서도 동일하게 적용하여 실험을 진행하였다.

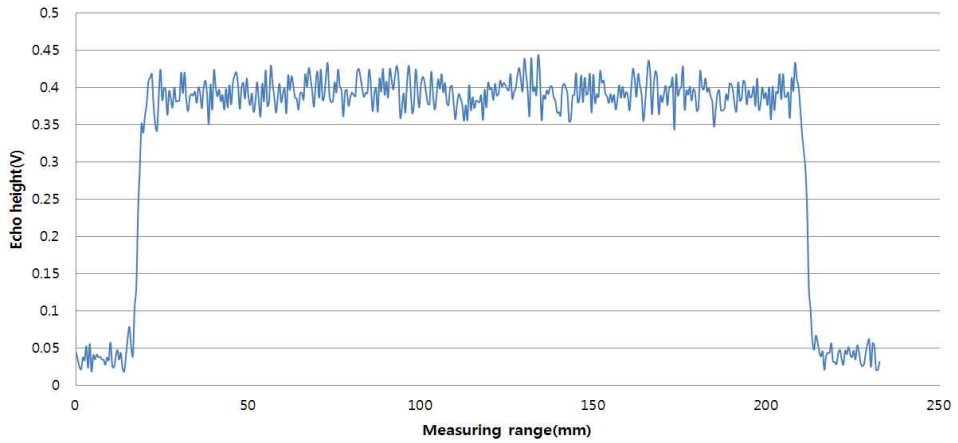
Table 3-15 Experiment of condition(C_f-SiC composite specimens)

Condition	Specimens	
	No defect specimens	Defect specimens
Velocity in TP(m/s)	340	340
Tx voltage(V)	300	300
Tx frequency(kHz)	340	340
Gain(dB)	26.0	31.1
Sampling frequency(MHz)	10	10
Scan speed(mm/s)	50	50
Scan pitch(mm)	0.5	0.5

Fig.3-29 (a), (b)는 초음파 주파수 340kHz 일 때 마스킹 처리된 정상시험편의 C-Scan 및 에코높이 신호 분석 결과이다. C-Scan 화상 및 에코 높이 신호 그래프에서 볼 수 있듯이 정상적인 초음파 투과 탐상을 보이고 있다. 그리고 Fig.3-30 (a), (b)는 초음파 주파수 340kHz 일 때 마스킹 처리된 결함시험편의 C-Scan 및 에코높이 신호 분석 결과이며 결함 위치 및 크기를 검출하였다. Fig.3-29 (b)와 Fig.3-30 (b)의 그래프를 비교해보면 동일한 송신 주파수 340kHz 를 사용하기 때문에 초음파 감쇠가 발생하지 않았으며 확산손실에 의한 에코 높이 감소도 발생하지 않았다. 초음파 빔이 확산되지 않고 집중될 수 있는 투과조건이 형성되어 있다고 판단할 수 있다.

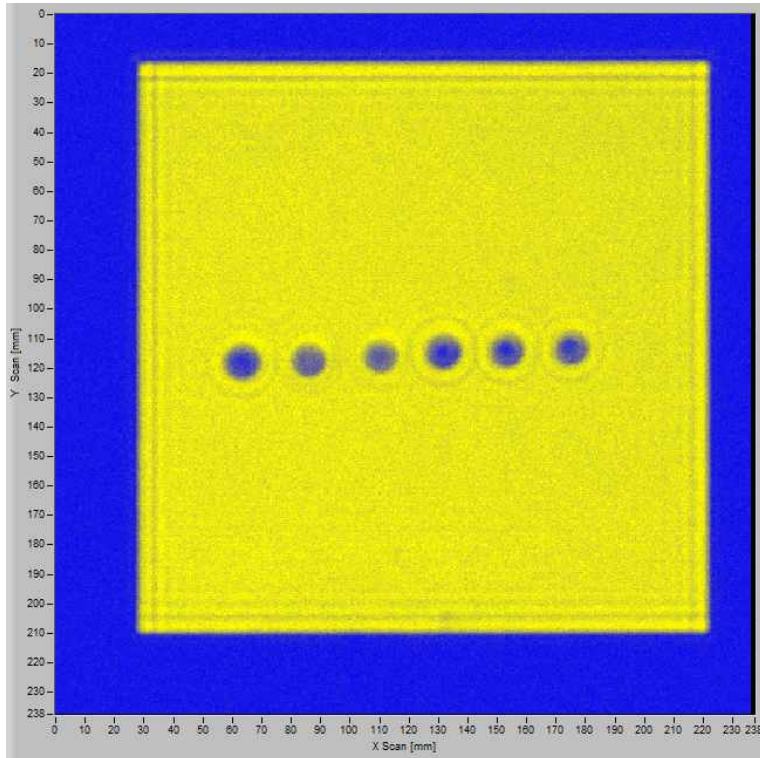


(a) Image of C-Scan mode

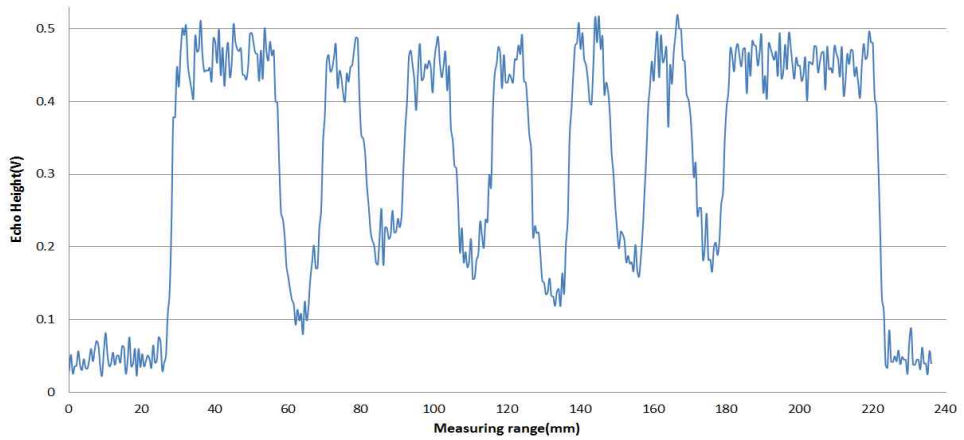


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-29 Results of C-Scan inspection
 (No defect specimens_masking_340kHz)



(a) Image of C-Scan mode



(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-30 Results of C-Scan inspection
 (Defect specimens_masking_340kHz)

제4장 결과 및 고찰

제1절 NAUT A-Scan 수동 탐상 결과 및 고찰

1. 초음파 집속거리에 따른 진폭 분석

Fig.4-1의 그래프에서 볼 수 있듯이 100 ~ 200mm 집속거리에서는 진폭변화가 감소되고 있음을 알 수 있으므로, 주기적인 진폭변화를 보이는 100mm 이내에서 초음파 집속을 수행해야함을 알 수 있다.

Fig.4-2의 그래프에서 확인 할 수 있듯이 초음파 주파수 800kHz, 400kHz 로 진폭변화를 관찰하였으며, 800kHz의 경우에는 집속거리가 50mm 일 때, 진폭이 현저하게 감소되고 있으며, 초음파 탐상 시 집속 거리 50mm 이상일 때 시험편 내부로의 초음파 투과가 이루어지지 않음을 알 수 있다. 400kHz의 경우에는 집속거리 100mm 이상부터는 진폭이 감소되는 경향은 있지만 시험편 내부의 초음파 투과는 이루어지고 있음을 알 수 있다.

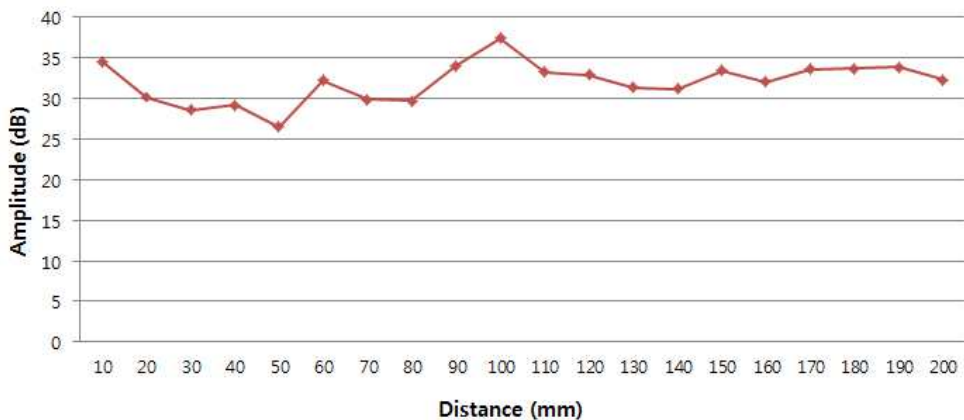


Fig.4-1 Results of Focal distance and amplitude

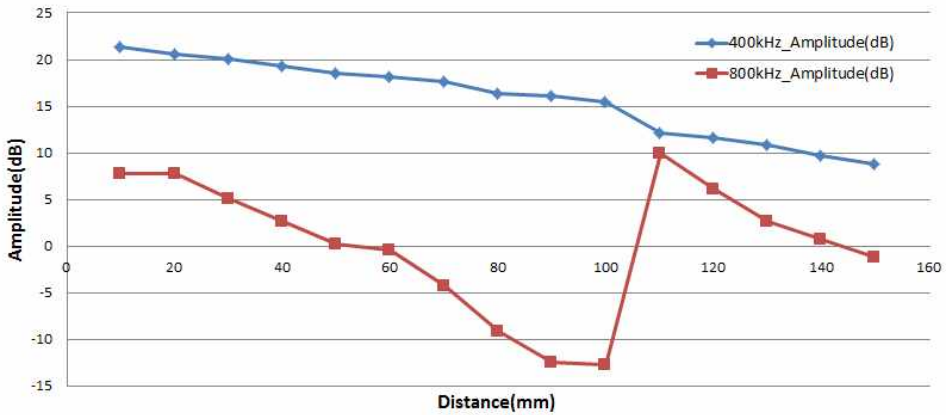


Fig.4-2 Results of Focal distance and amplitude(800kHz,400kHz)

2. 공중 초음파 탐촉자 수신면적에 따른 진폭 분석

Fig.4-3의 그래프에서와 같이 초음파 집속거리 50mm인 경우에는 최고 진폭 값이 마스킹 사이즈 $D=1mm$ 일 때, $-50.939dB$ 측정되었으며, 마스킹 사이즈 동일조건에서 초음파 집속거리 100mm일 때의 최고 진폭 값은 $-52.811dB$ 측정되었다. 이 결과는 초음파 발진부에 마스킹하여 초음파 빔을 집속형태의 빔으로 발진시켜 초음파 감쇠 및 산란 등의 노이즈 발생을 억제할 수 있었던 것으로 판단되어 진다.

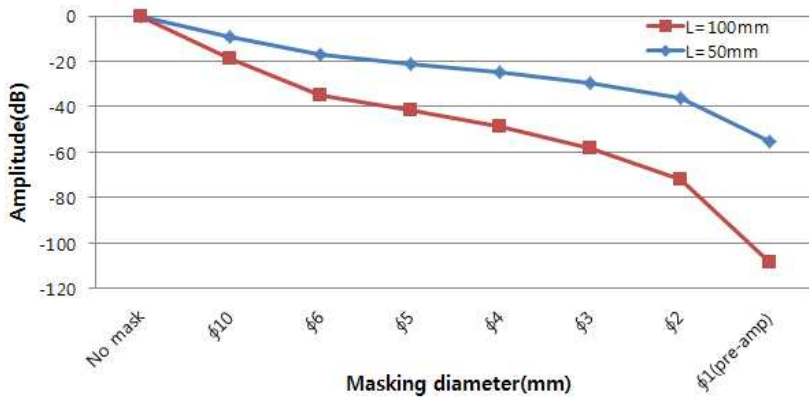


Fig.4-3 Results of masking diameter and amplitude(50mm,100mm)

3. 재질별 초음파 투과율 분석

Fig.4-4의 결과에서 확인할 수 있듯이 집속거리 50mm 설정 후 측정된 진폭은 마스킹 사이즈 및 주파수 대역에 따라 진폭변화가 발생함을 알 수 있으며, 이는 평면형 공중 초음파 발진부의 수신면적에 따라 빔의 직진성 및 지향성이 향상됨에 따라 초음파 투과율이 변화될 수 있는 부분이라 판단된다.

Fig.4-5와 Fig.4-6의 결과에서와 같이 C-Scan 영상 추출을 위한 초음파 가이드 파형 높이, 즉 수신되는 에코신호는 400kHz의 공중 초음파 탐촉자를 사용했을 때 각 재질별에 따른 초음파 투과신호가 800kHz보다 진폭 값이 안정적임을 알 수 있었으며, 투과파 길이는 아크필 판에 마스킹 사이즈 5mm 설정하였을 때, 400kHz, 800kHz 탐촉자에 따라 투과파 길이 변화가 있는 것으로 확인되었다.

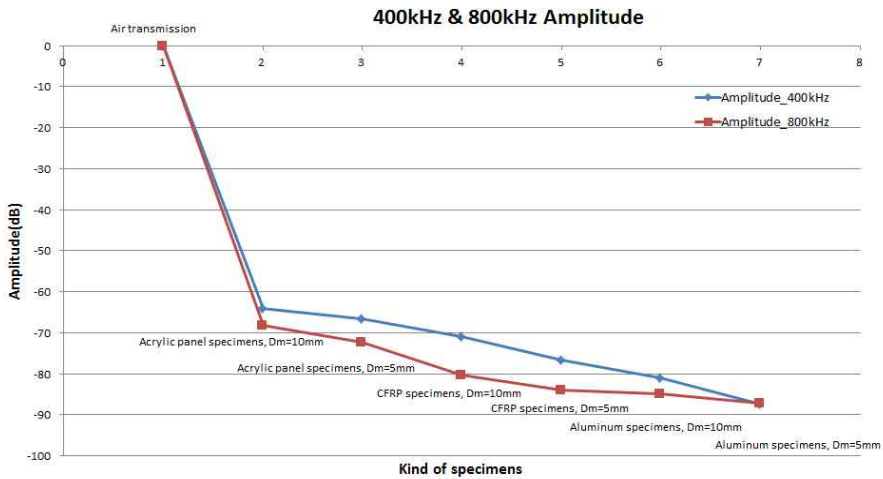


Fig.4-4 Results of amplitude by specimens(400kHz, 800kHz)

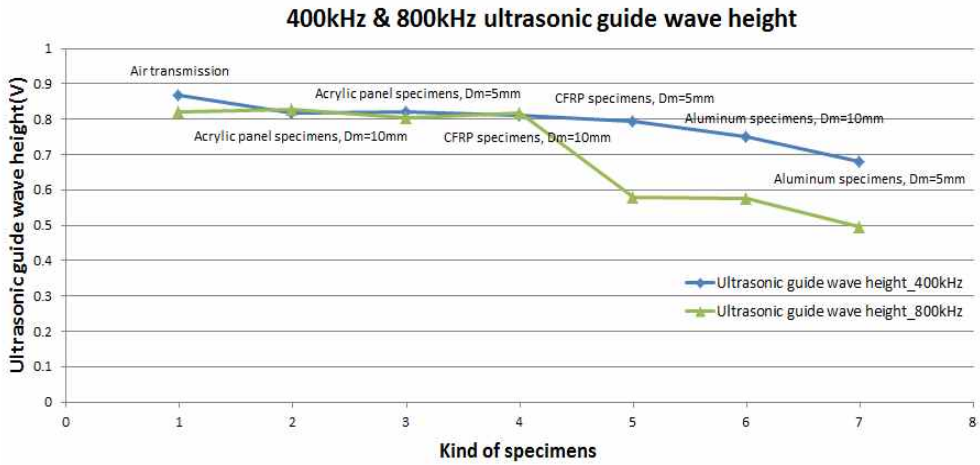


Fig.4-5 Results of ultrasonic guide wave height(400kHz & 800kHz)

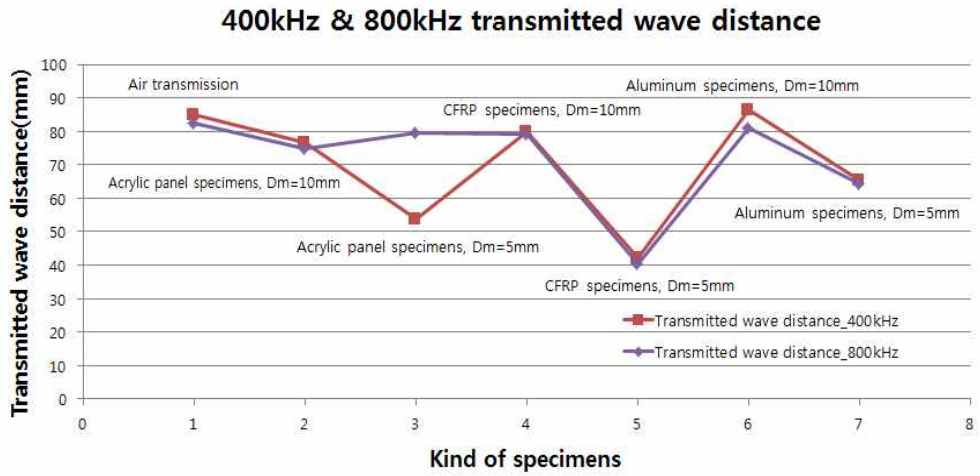


Fig.4-6 Results of transmitted wave distance(400kHz & 800kHz)

4. 시험편 경사각도와 초음파 투과파의 진폭 분석

Fig.4-7의 그래프에서 볼 수 있듯이 알루미늄 판 두께 2mm일 때 투과파 진폭의 최대값은 0.806 V로 이 때의 시험편 각도는 8°로 확인할 수 있었고, 알루미늄 판 두께 6mm일 때 투과파 진폭의 최대값은 0.986 V이며 이 때의 시험편 각도는 7°임을 확인하였다. 따라서 초음파 투과법을 적용하여 결함 탐상을 수행할 시에는 시험편의 각도에 따라 초음파 투과율 변화에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

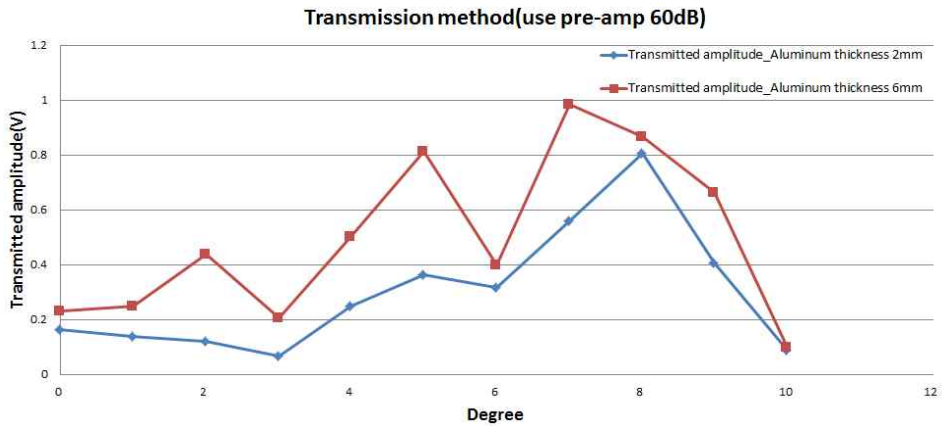


Fig.4-7 Results of transmitted amplitude by angle change

5. 탐촉자 각도변화에 따른 투과파의 진폭 분석

Fig.4-8에서 알 수 있듯이 본 실험에서 사용된 알루미늄 판의 경우는 주로 판파를 적용하기 때문에 판파의 비대칭 모드(A-Mode), 대칭모드(S-Mode)에 대한 유도 초음파 고찰이 필요하다.

판파의 진동양식의 특성은 밀도, 금속의 탄성특성과 구조, 금속시편의 두께 및 주파수에 영향을 받기 때문에 반드시 고려야 되는 요인이 되는 것이다⁽⁵⁵⁾.

각 모드는 해당 $f \cdot d$ 범위에 따라 차이는 있으나 일반적으로 위상속도가 주파수에 따라 변화하는 분산성을 갖고 있으며, 그 분산적 특성이 주파수나 구조물의 두께에 대해 매우 민감하게 변화하게 되는 것을 확인할 수 있었다.

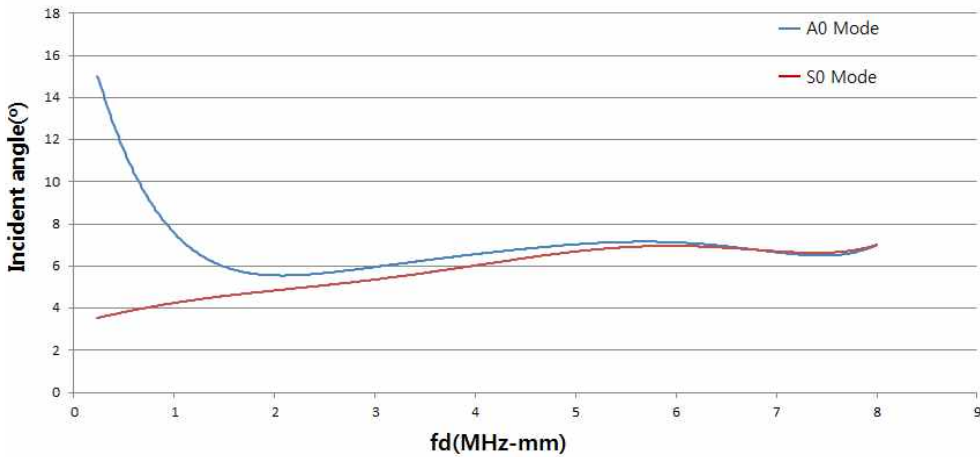


Fig.4-8 Results of A0-mode and S0-Mode by guided ultrasonic wave

6. 알루미늄 평판 시험편의 결함 검출 결과 분석

Fig.4-9에서 볼 수 있듯이 초음파 입사각에 따라 결함부의 투과파의 진폭값은 건전부에서의 진폭값보다 감소되는 것을 알 수 있다. 이는 결함부에 존재하는 공기층에 의해 음향 임피던스 차이가 발생하고 초음파 감쇠가 발생하여 투과율이 감소되는 것이다. 또한 A0-mode에서 S0-mode보다 단파장의 고주파수 대역이 형성되어 시험편 내부로의 초음파 전달이 용이한 것으로 판단된다.

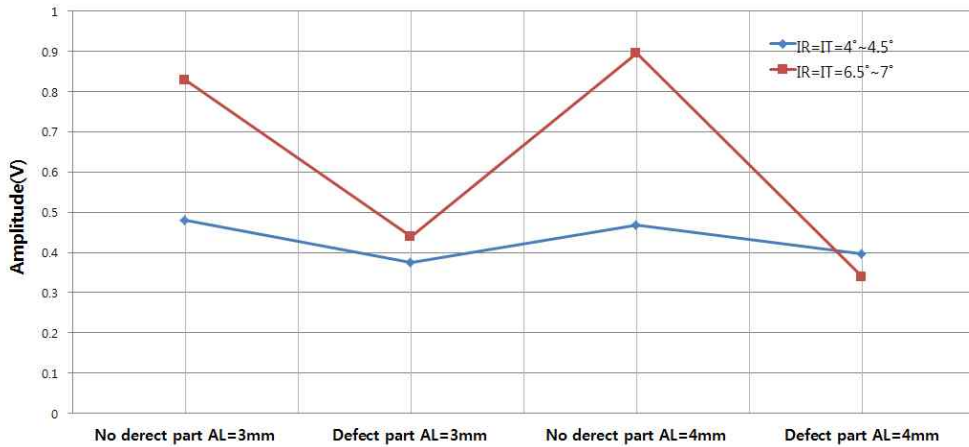


Fig.4-9 Results of S0-mode and A0-mode by incident angle

제2절 NAUT C-Scan 자동 탐상 결과 및 고찰

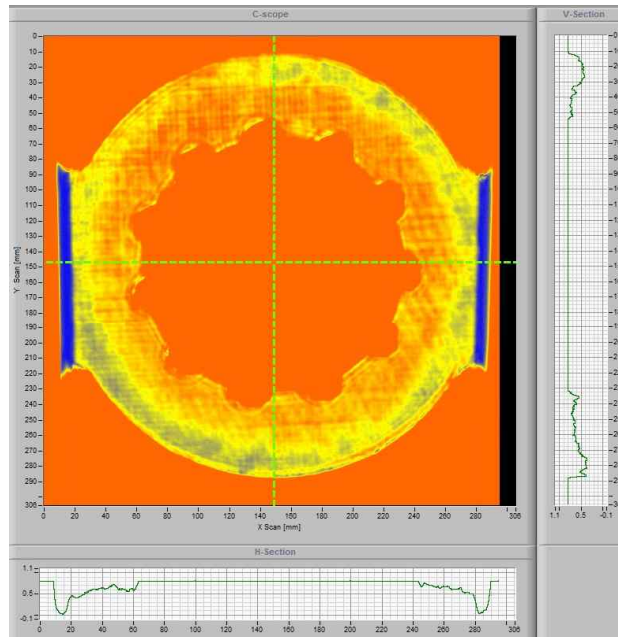
1. C_f-C 브레이크 디스크 시험편 C-Scan

가. 정상·결합 시험편의 마스크링 여부에 따른 C-Scan 결과 분석

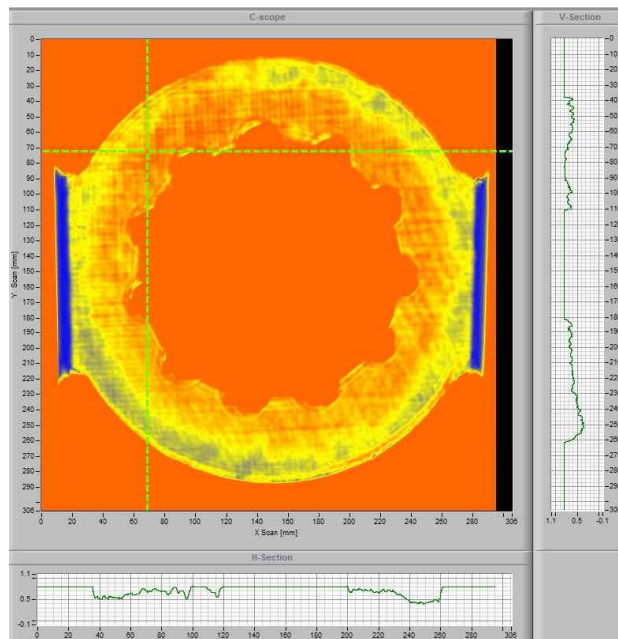
Fig.4-10 (a)에서 확인 할 수 있듯이 정상시험편 마스크링을 하지 않는 경우는 초음파 에너지 손실로 투과파가 정상적으로 시험편 내부를 투과하지 못하게 되고 초음파 감쇠에 의해 시험편의 형상이 명확하지 못하게 탐상이 되고 있음을 알 수 있다. 또한 C-Scan 화상결과에서 y축 양측방향으로 청색으로 표시되는 직사각형 부분은 시험편을 거치하는 탭부분이며, 이 부분은 초음파가 투과되지 못하므로 청색으로 표시되는 것이다. Fig.3-23 (b)의 그래프에서와 같이 시험편에 마스크링을 하지 않았으므로 공기 중에 초음파가 투과되고 있으며 초음파 에너지가 경계면으로 방출되고 있음을 C-Scan 화상결과로 유추할 수 있다.

Fig.4-11 (a)에서 볼 수 있듯이 결합시험편에 마스크링을 하지 않아 시험편 단면형상 탐상의 화상 왜곡현상이 발생하였다. 결합부위는 검출 가능하지만 부분적으로 결합검출이 되지 않은 부분들이 있었으며, 시험편 단면형상의 명확한 화상 결과를 얻기에는 화상 왜곡이 심하였다. Fig.3-24 (b)의 그래프에서는 마스크링을 하지 않았음에도 공기 중에서 초음파 투과가 이루어지지 않았으며, 이에 따라 초음파 빔은 근거리 음장 한계거리를 넘어 확산하고 거리가 증가함에 따라 에코높이는 낮아지는 확산손실이 발생한 것으로 판단된다⁽⁵⁷⁾.

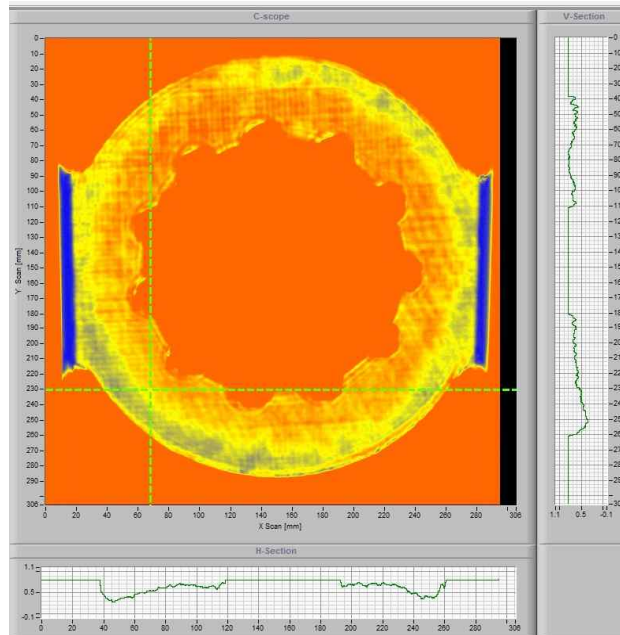
또한 시험편의 평면 내부에 존재하는 인공결합 형태, 위치, 크기는 검출되었지만 인공결합 $\phi 3mm$ 인 경우에는 명확한 검출이 되지 않았으며, 시험편의 측면부의 인공결합도 명확한 검출이 되지 않음을 알 수 있었다.



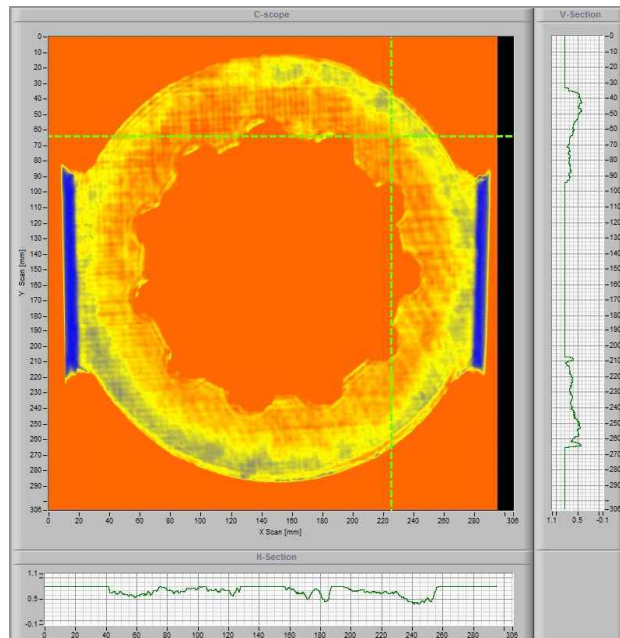
(a) Image of C-Scan(Center line)



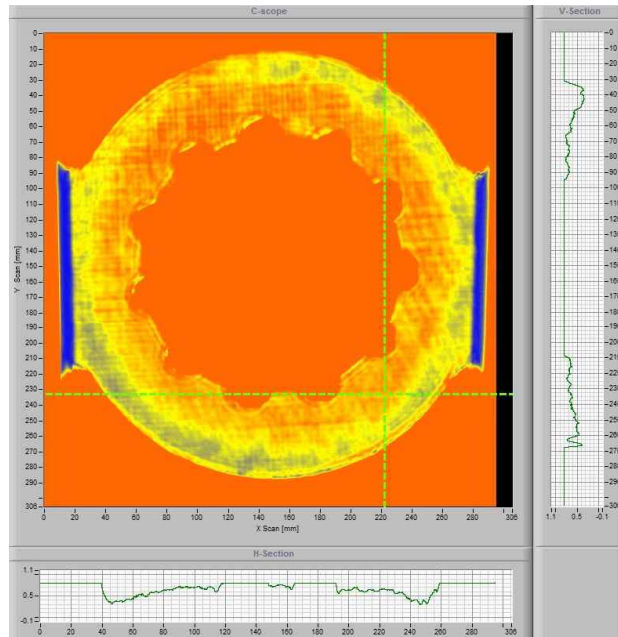
(b) Image of C-Scan(Left top line)



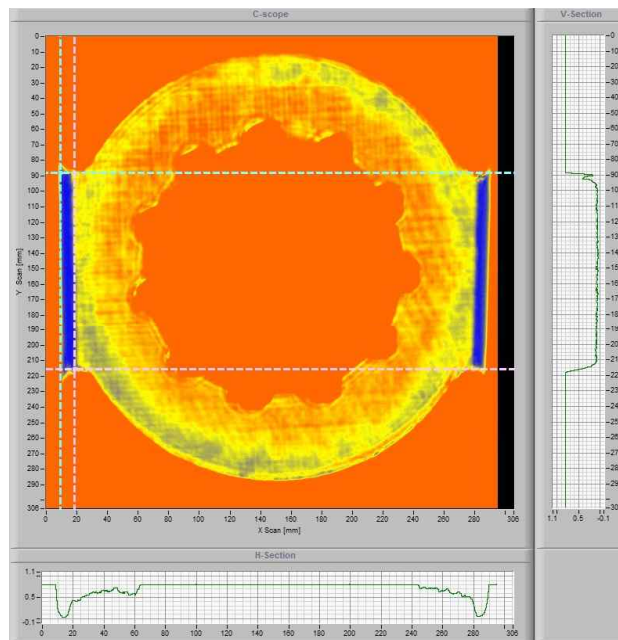
(c) Image of C-Scan(Left bottom line)



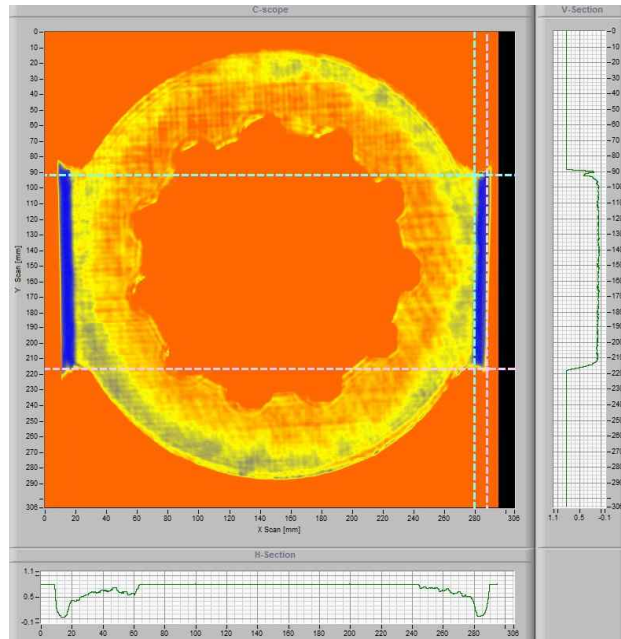
(d) Image of C-Scan(Right top line)



(e) Image of C-Scan(Right bottom line)

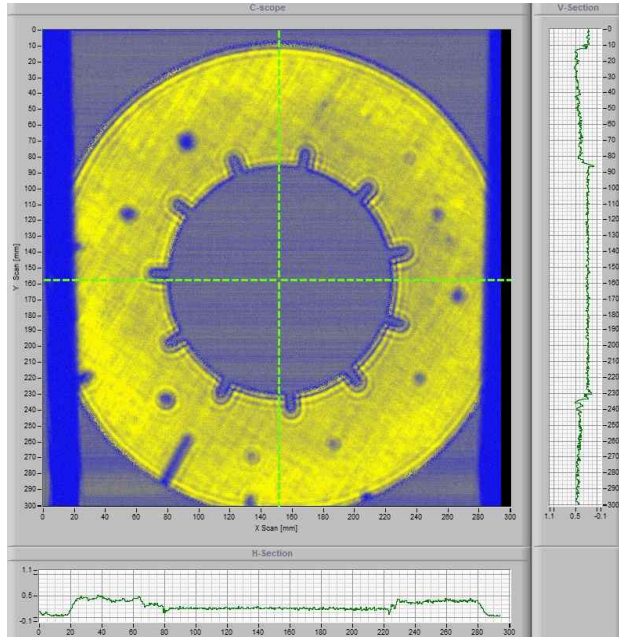


(f) Image of C-Scan(Left tap)

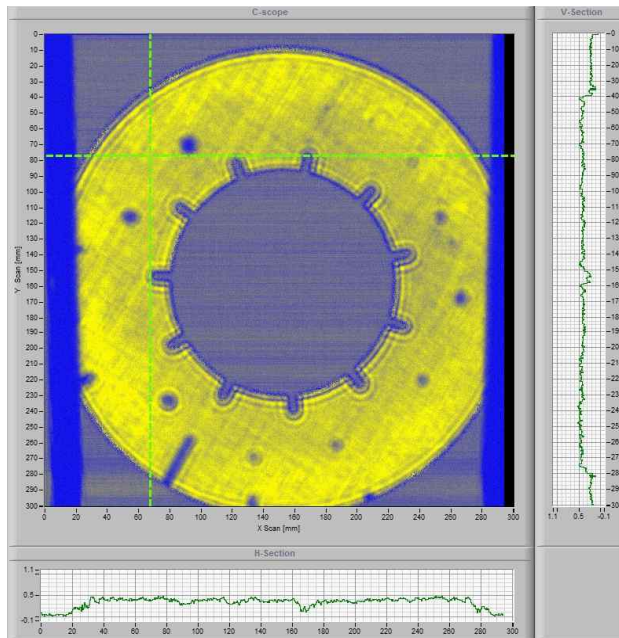


(g) Image of C-Scan(Left tap)

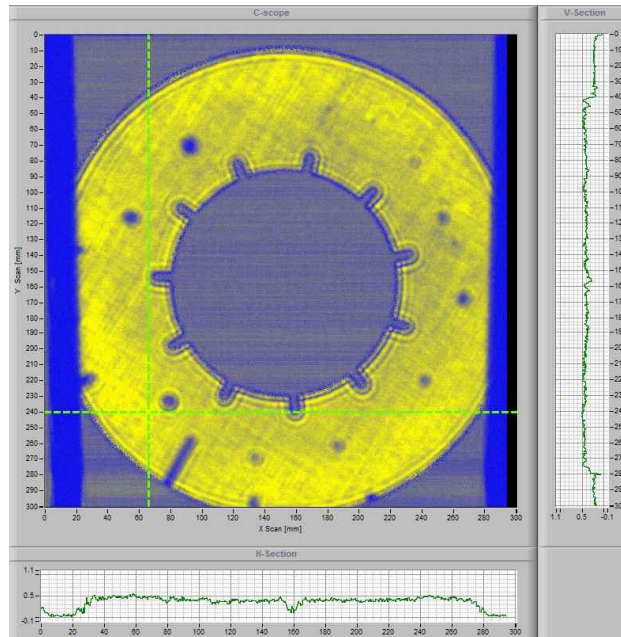
Fig.4-10 Result of C-Scan Inspection(No defect specimens)



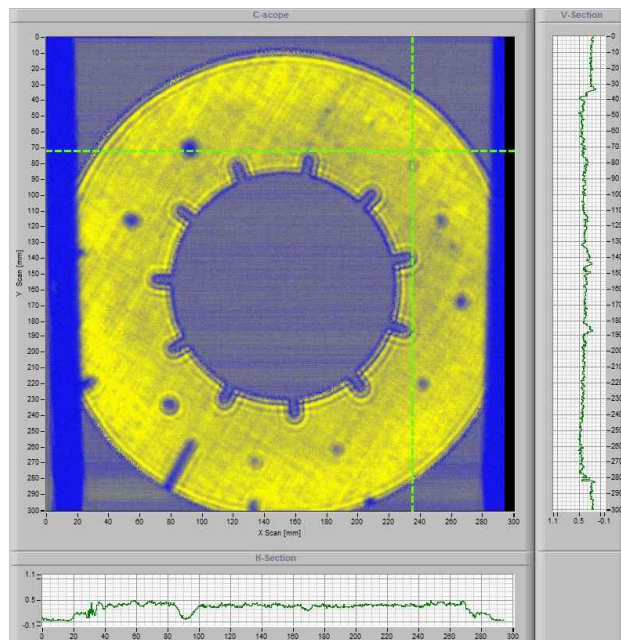
(a) Image of C-Scan(Center line)



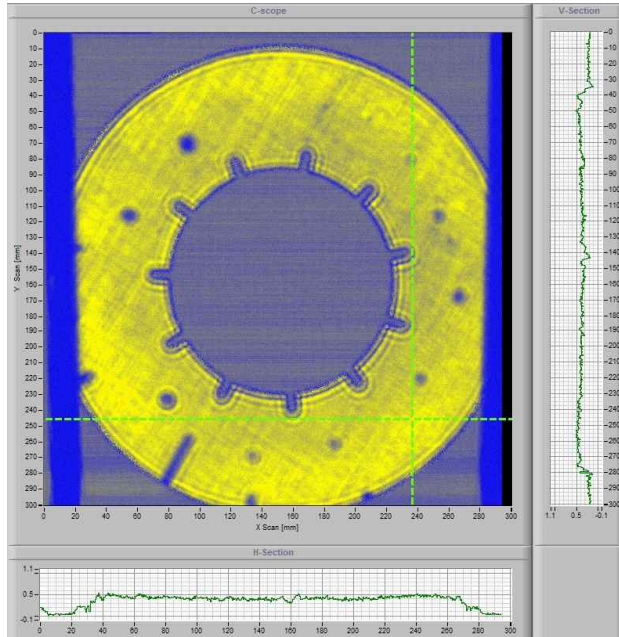
(b) Image of C-Scan(Left top line)



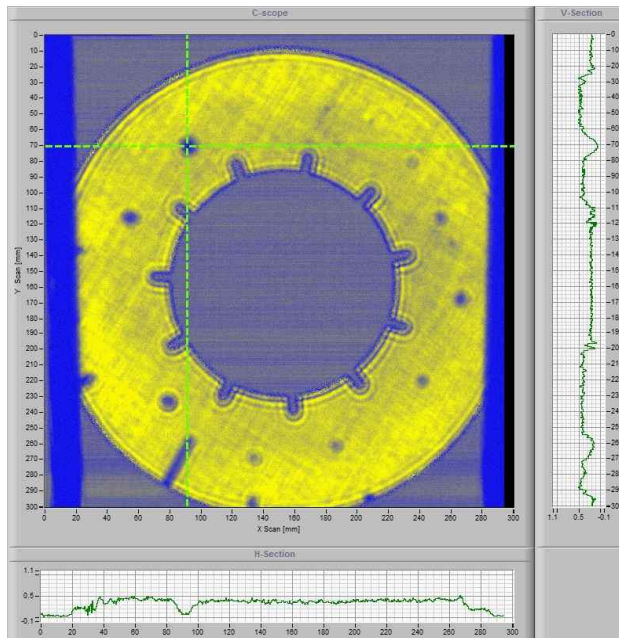
(c) Image of C-Scan(Left bottom line)



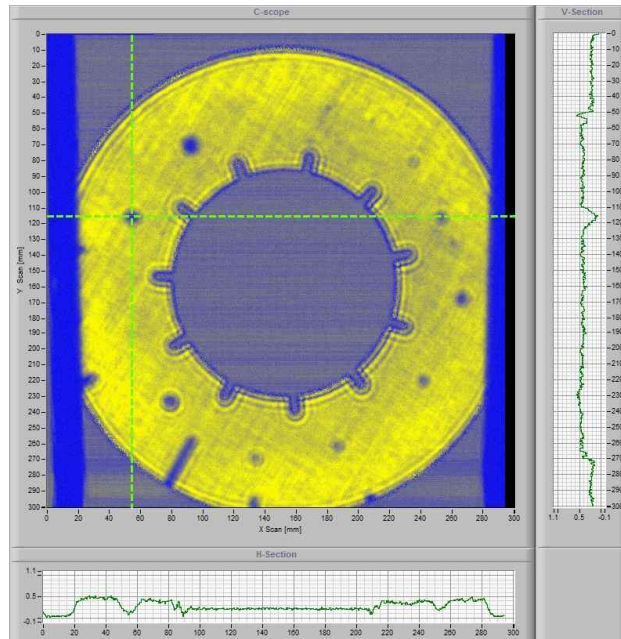
(d) Image of C-Scan(Right top line)



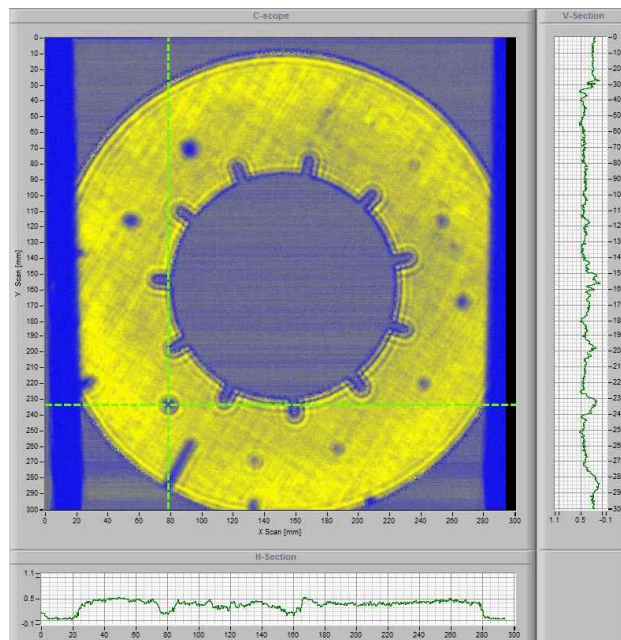
(e) Image of C-Scan(Right bottom line)



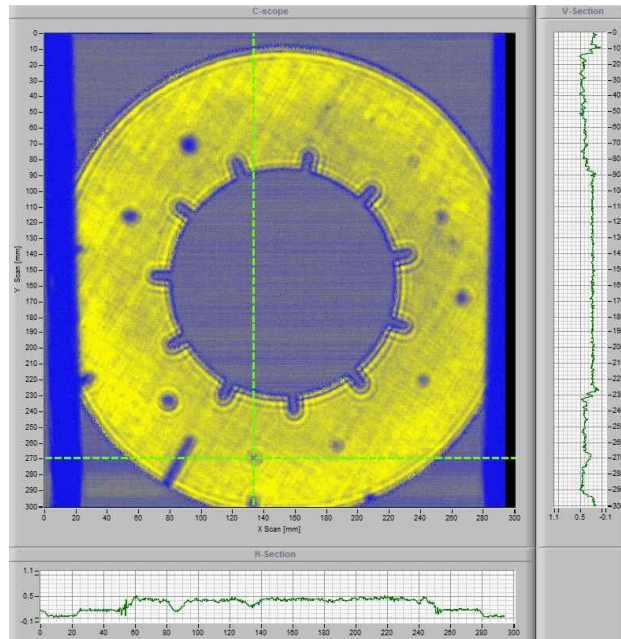
(f) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 10mm$)



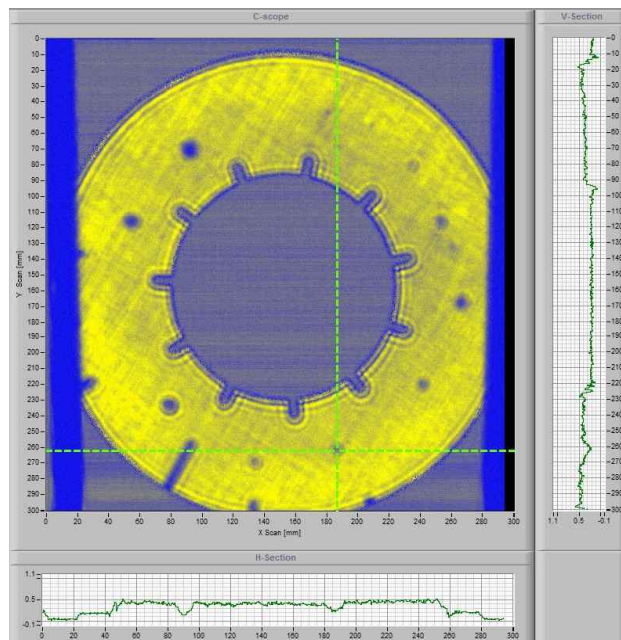
(g) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 10mm$)



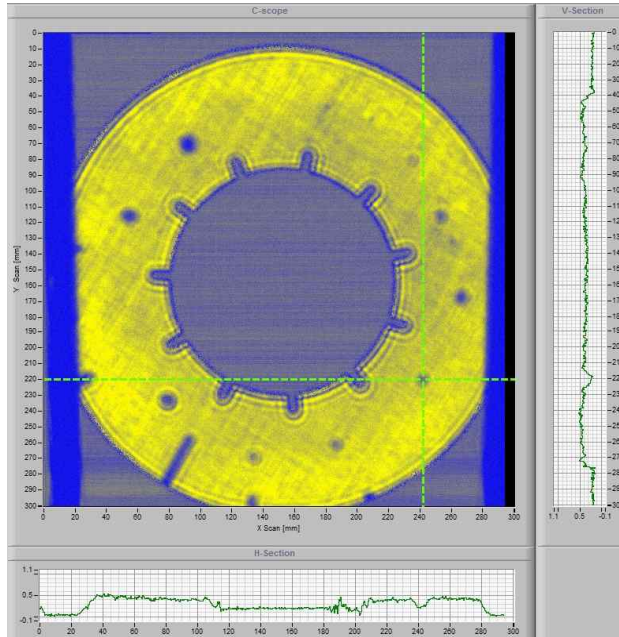
(h) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 8mm$)



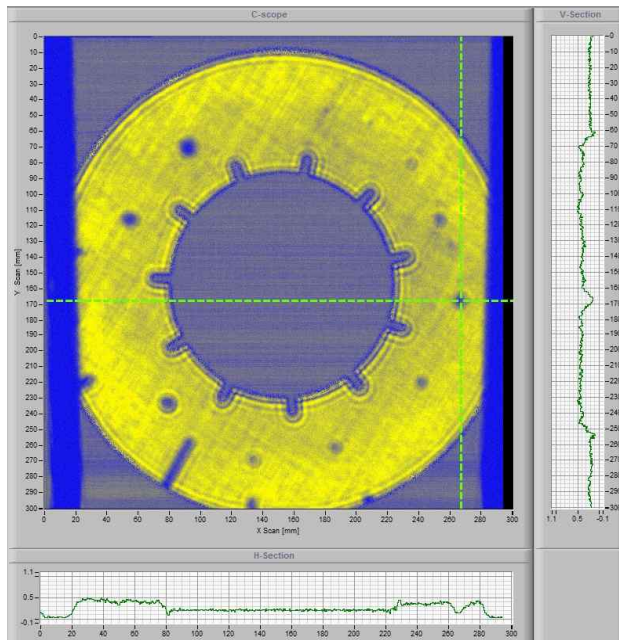
(i) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 7mm$)



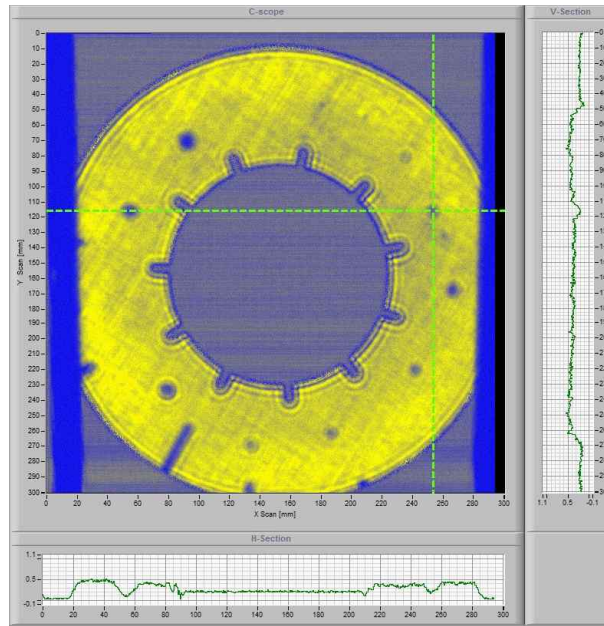
(j) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 5mm$)



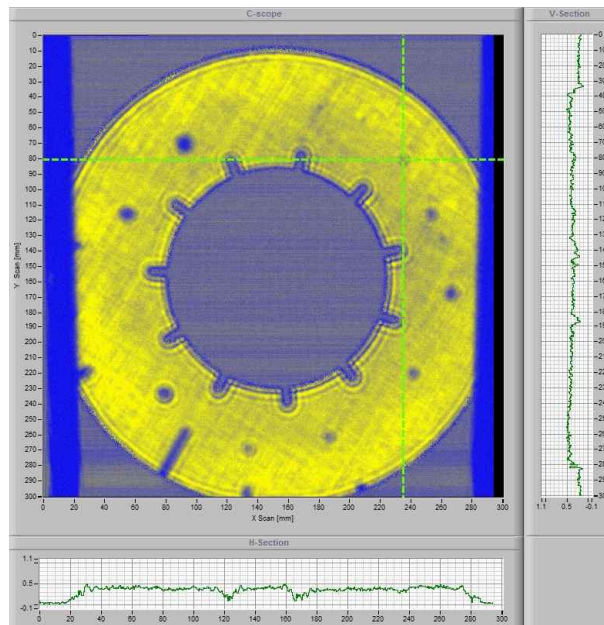
(k) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 5mm$)



(l) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 7mm$)



(m) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 5mm$)



(n) Image of C-Scan(Defect size : $\phi 3mm$)

Fig.4-11 Result of C-Scan Inspection(Defect specimens)

나. 정상·결합 시험편의 송신 주파수에 따른 C-Scan 결과 분석

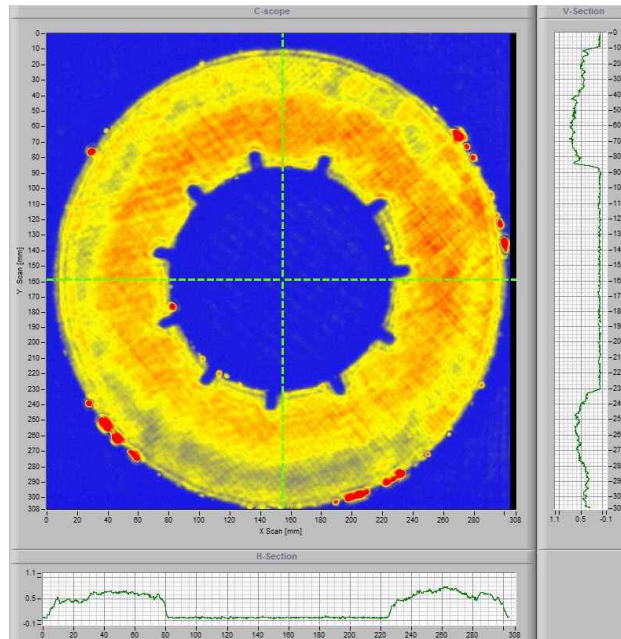
정상시험편과 결합시험편에 각각 $340kHz$ 와 $400kHz$ 를 인가하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

Fig.4-12 (a)는 정상시험편의 초음파 송신 주파수 $340kHz$ 로 인가했을 때 C-Scan 화상결과이며, Fig.4-12 (b) 정상시험편의 초음파 송신 주파수 $400kHz$ 로 인가했을 때 C-Scan 화상결과이다. 마스킹 작업을 통하여 초음파 에너지 방출을 억제시켜 마스킹 재료로 쓰인 접합판지부는 초음파 투과가 거의 이루어지지 않음을 알 수 있다. 따라서 정상시험편의 내·외측 단면형상이 명확하게 탐상되었다. 하지만 클레이와 정상시험편 경계면 사이의 마스킹 접착불량으로 인해 공기층이 형성되어 초음파 투과율이 최고값을 가지게 되어 정상시험편의 외측과 내측부분에 적색부분이 검출되었다. 다시 설명하면, C-Scan의 화상처리를 위한 에코높이 신호를 측정하였을 때, 정상시험편의 경계면과 접합판지 사이에 기공부를 제거해주는 클레이가 정상시험편 경계면 부근에 완벽한 접착이 되지 않아 제거되지 않은 기공부의 음향임피던스 차이가 크지 않으므로 높은 투과진폭이 형성된 것이다. 또한 정상시험편의 밀도 차이에 의해서 에코높이 신호가 달라짐을 알 수 있다. 정상시험편의 외측부분의 경우는 에코높이 신호가 중간값에 분포하는 노란색을 나타내고, 내측부분의 경우에는 초음파 투과율이 높아 에코높이 신호가 최고값을 나타내므로 적색 분포를 보이고 있다. 이는 정상적인 초음파 투과가 진행되고 있음을 알 수 있다.

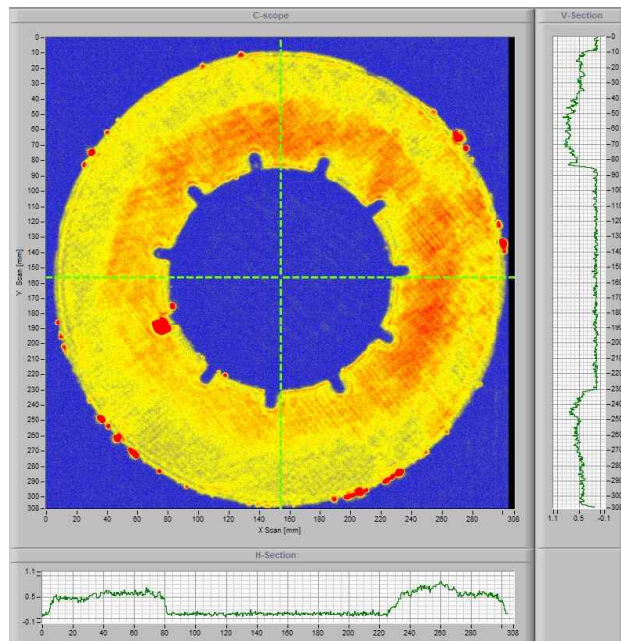
정상시험편의 경우, 초음파 송신 주파수 $340kHz$ 의 결과와 큰 차이점은 없지만 $400kHz$ 를 인가 시 초음파 빔이 단파장 성질이 강해지므로 초음파 빔 거리가 짧아지게 되어 수신부 탐촉자의 이득값(gain)값을 증가시켜야 하므로 노이즈 발생이 커지고 송신부 진폭값이 불안정해지므로 HPF, LPF 등의 사용하여 진폭과 초음파 빔을 안정시켜야 하는 단점이 있다⁽⁵⁸⁾.

Fig.4-14의 결합시험편 C-Scan탐상결과에서 확인할 수 있듯이 초음파 주파수 $340kHz$, $400kHz$ 를 인가하였을 때 결합시험편의 인공결합부는 정상적으로 검출되었다. Fig.4-14 (d)에서 확인할 수 있듯이 마스킹을 하지 않았을 때의

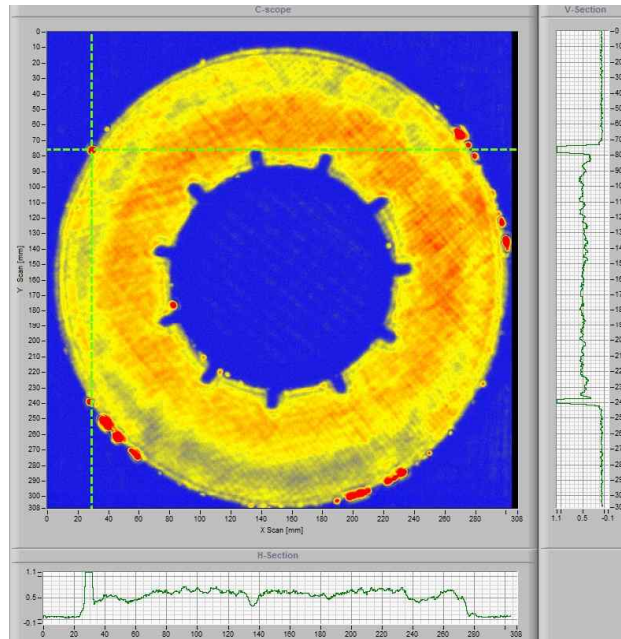
검출되지 않았던 결함시험편의 $\phi 2mm$ 인공결함도 결함위치를 검출할 수 있었다. 여기서 초음파 주파수에 의한 C-Scan 화상차이는 인가는 송신 주파수에 따라 근거리 음장한계 영역 내에 초음파 빔이 발진하고 있지만 초음파 빔의 확산손실에 의한 에코 높이 신호의 감소차이가 발생되어 진다. Fig.3-25 (b), Fig.3-26 (b), Fig.3-27 (b), Fig.3-28(b)에서 볼 수 있듯이 340kHz 인가할 때보다 400kHz 로 송신 주파수 인가 시, 수신되는 에코 높이 신호가 감소되고 있다. 따라서 탄소복합체의 Air-coupled transducer 타입을 이용한 초음파 탐상 시에는 340kHz 대역내의 송신 주파수를 사용 하는 것이 초음파 감쇠 및 확산손실을 최소화 할 수 있으며 에코 높이 신호의 감소를 최소화 시킬 수 있다고 판단된다.



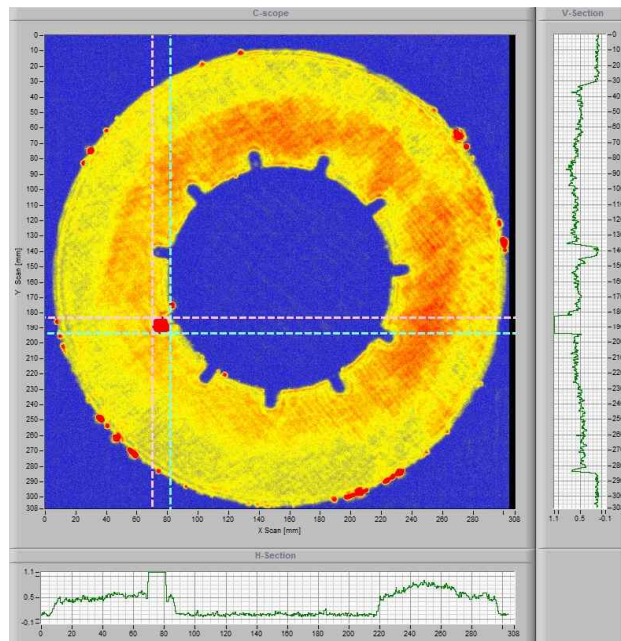
(a) Image of C-Scan(Center line_340kHz)



(b) Image of C-Scan(Center line_400kHz)

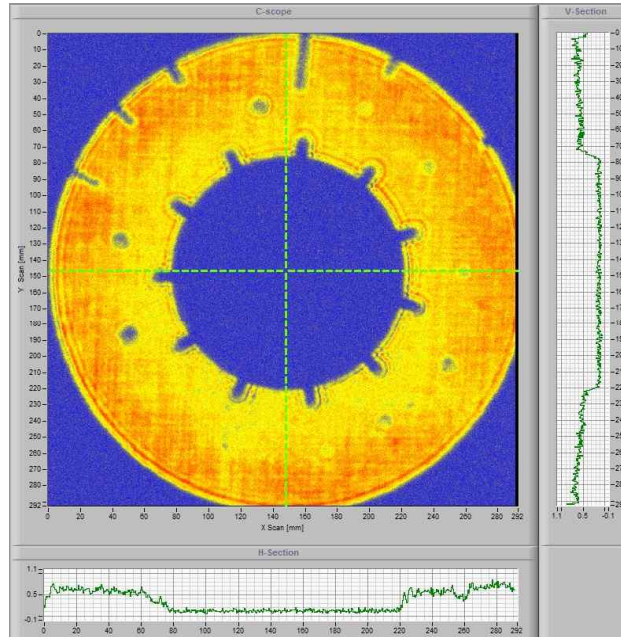


(c) Image of C-Scan(Max. transmitted amplitude-340kHz)

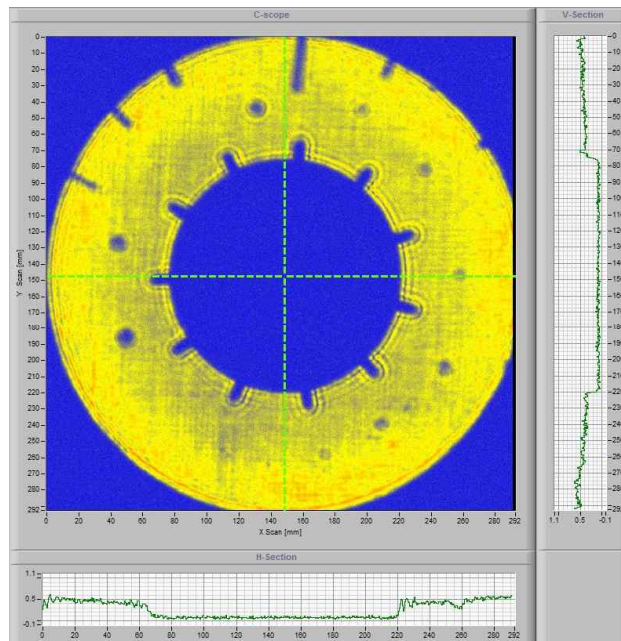


(d) Image of C-Scan(Max. transmitted amplitude-400kHz)

Fig.4-12 Comparison of C-Scan Inspection(No defect specimens)

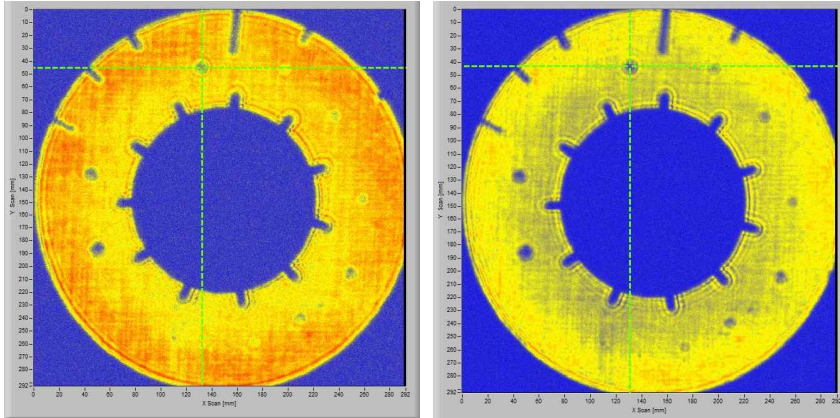


(a) Image of C-Scan(Center line_340kHz)

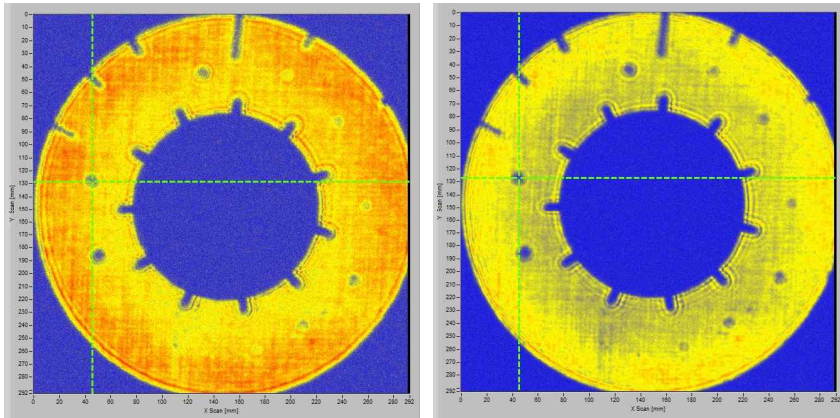


(a) Image of C-Scan(Center line_400kHz)

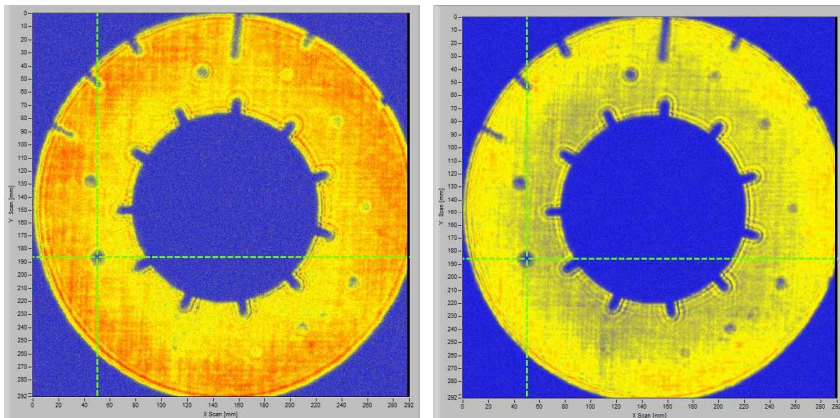
Fig.4-13 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens)



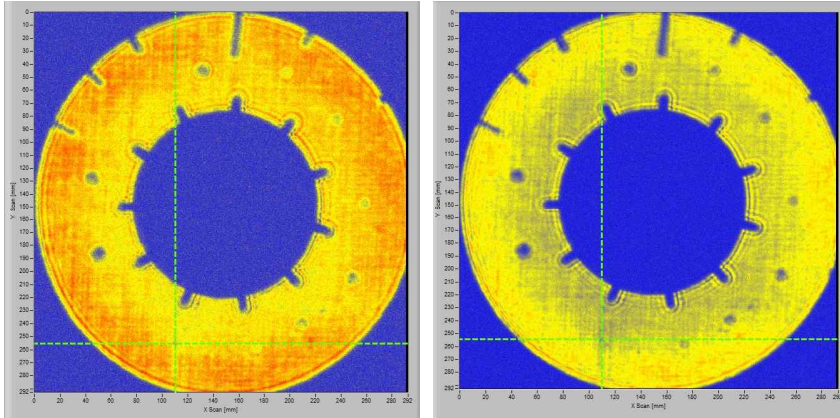
(a) Defect size 8mm(340kHz & 400kHz)



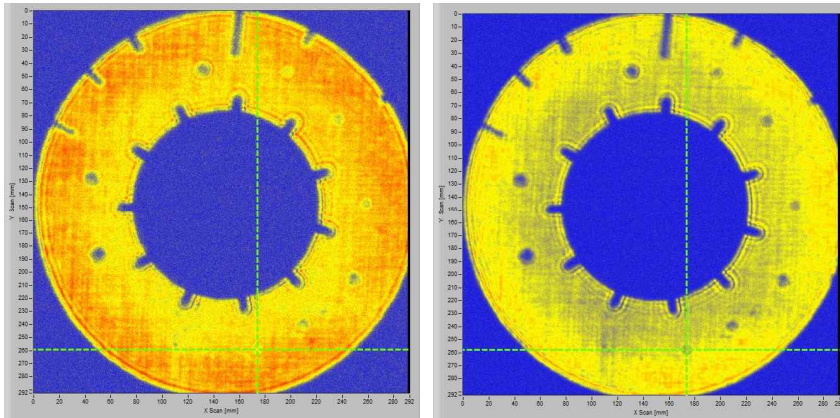
(b) Defect size 10mm(340kHz & 400kHz)



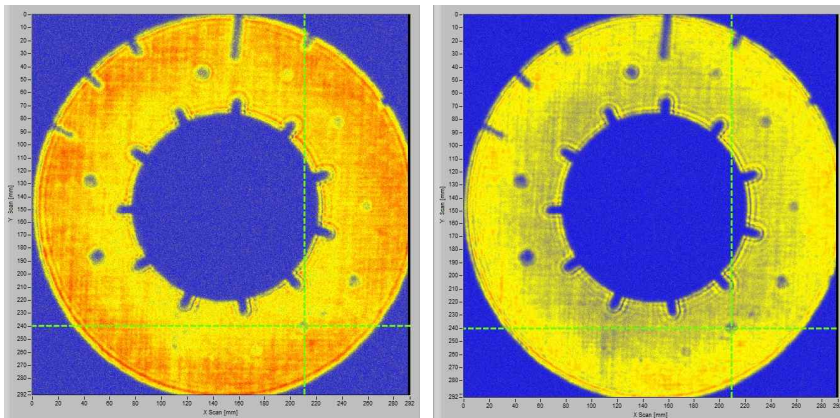
(c) Defect size 10mm(340kHz & 400kHz)



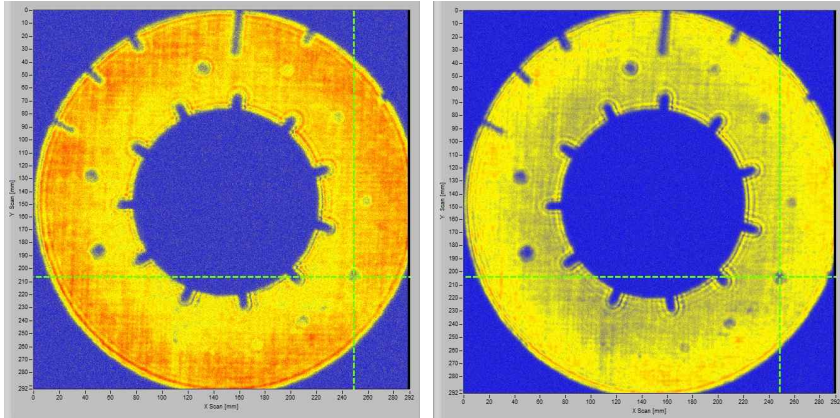
(d) Defect size $2mm(340kHz \ \& \ 400kHz)$



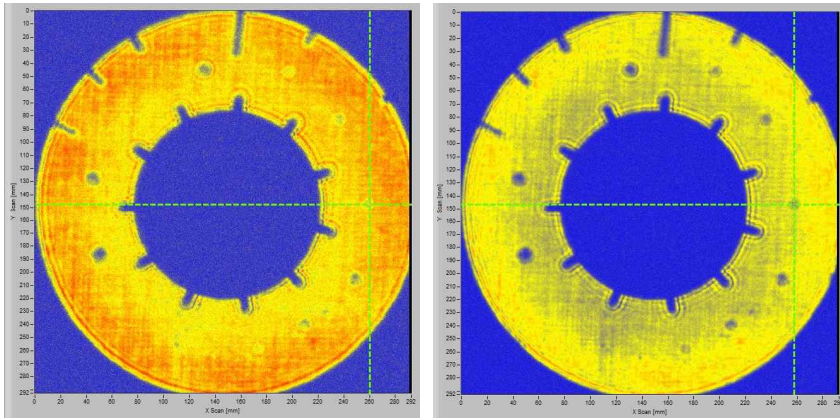
(e) Defect size $3mm(340kHz \ \& \ 400kHz)$



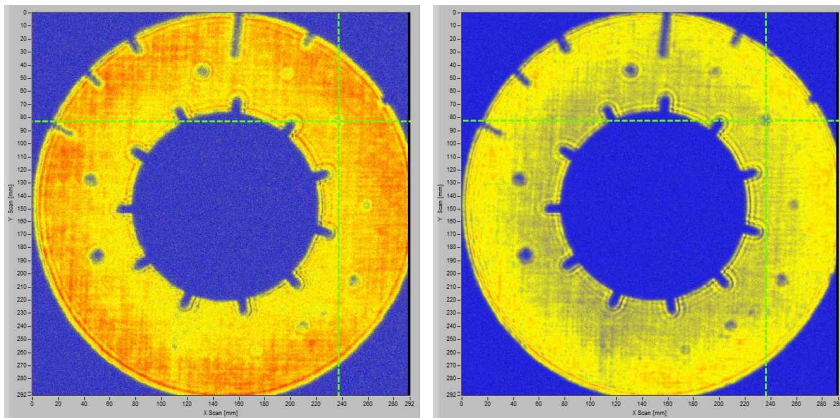
(f) Defect size $5mm(340kHz \ \& \ 400kHz)$



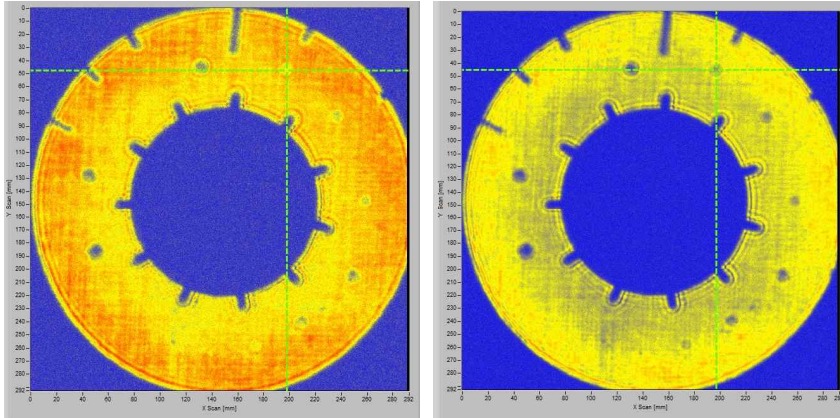
(g) Defect size 7mm(340kHz & 400kHz)



(h) Defect size 5mm(340kHz & 400kHz)



(i) Defect size 5mm(340kHz & 400kHz)



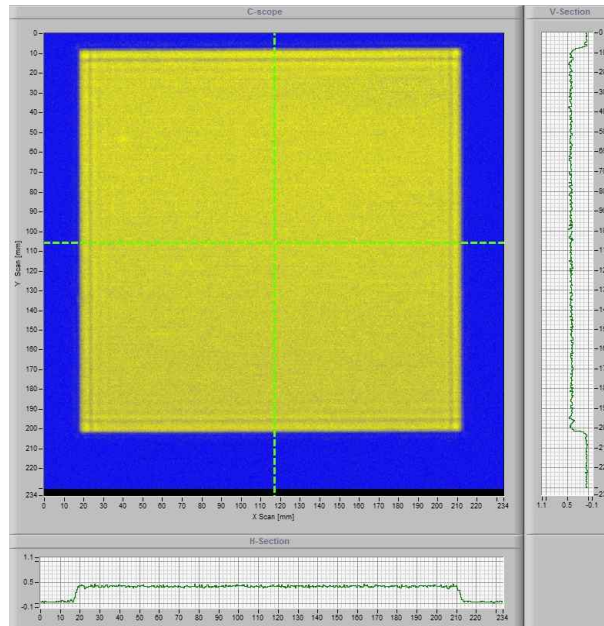
(j) Defect size $7mm(340kHz \ \& \ 400kHz)$

Fig.4-14 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens)

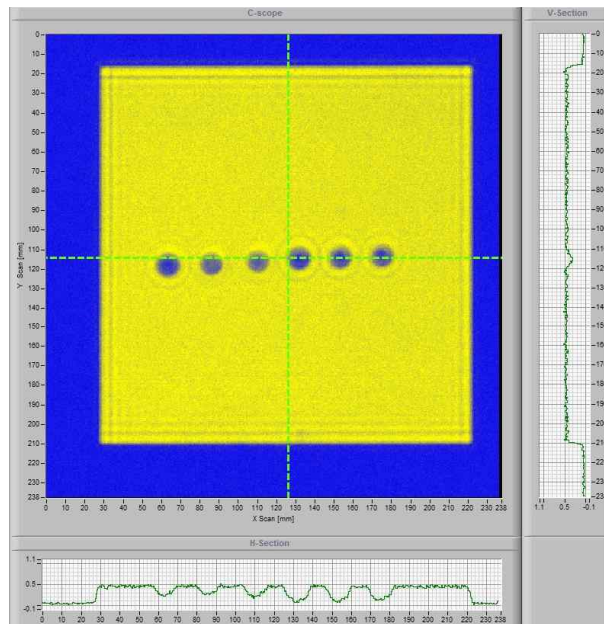
2. C_f-SiC 복합체 시험편 C-Scan

가. 정상·결합 시험편의 C-Scan 비교분석

정상·결합 시험편에 초음파 송신 주파수 340kHz로 탐상 실험을 한 결과는 다음과 같다. 정상시험편의 경우에는 C-Scan 화상 및 에코 높이 신호 그래프에서 볼 수 있듯이 정상적인 초음파 투과 탐상을 보이고 있다. 결합시험편의 경우, C-Scan 및 에코높이 신호 분석 결과에서 볼 수 있듯이 결합시험편 내부의 결합 위치 및 크기를 검출할 수 있었다. Fig.3-29 (b)와 Fig.3-30 (b)의 그래프를 비교해보면 동일한 송신 주파수 340kHz를 사용하기 때문에 초음파 감쇠가 발생하지 않았으며 확산손실에 의한 에코 높이 감소도 발생하지 않았다. 초음파 빔이 확산되지 않고 초음파 감쇠를 최소화 시켜 초음파 빔이 집중될 수 있는 최적의 투과조건이 형성되어 있다고 판단할 수 있다. Fig.4-15는 340kHz 초음파 송신 주파수를 인가했을 때 정상시험편과 결합시험편의 평면 화상 결과이다. 정상시험편과 결합시험편의 초음파 투과율은 C_f-C 브레이크 디스크 시험편 보다 약 42.793% 감소하였지만 시험편의 평면탐상을 가능하였다. C-Scan 결과에서 볼 수 있듯이 정상시험편은 내부의 결합이 존재하지 않음을 알 수 있으며, 결합시험편의 경우는 인공결합 크기 φ10mm가 3개, φ12mm가 3개로 존재하고 있음을 확인할 수 있었다. Fig.4-16은 결합시험편의 내부에 존재하는 인공결합의 위치 및 크기를 분석한 결과이다. 결과에서 확인할 수 있듯이 인공결합 크기 φ10mm, φ12mm의 결합형태, 크기, 위치를 검출할 수 있었다. 결합의 형태는 원형결합이며, 결합크기의 검출능은 Inspection pitch 값 설정에 따라 보다 정밀해 질 수 있지만, 본 실험에서는 0.5pitch로 설정하여 실험을 수행한 결과, 인공결합 φ10mm는 결합크기 $\phi 10mm^{\pm 0.5} = 10.3mm$ 로 검출되었으며, 결합위치는 x축 112mm, y축 58mm 지점에서 첫 번째 인공결합 위치를 확인할 수 있었다. 인공결합 φ12mm는 결합크기 $\phi 12mm^{\pm 0.5} = 12.3mm$ 로 검출되었으며, 결합위치는 x축 109mm, y축 125mm 지점에서 첫 번째 인공결합 위치를 확인할 수 있었다.

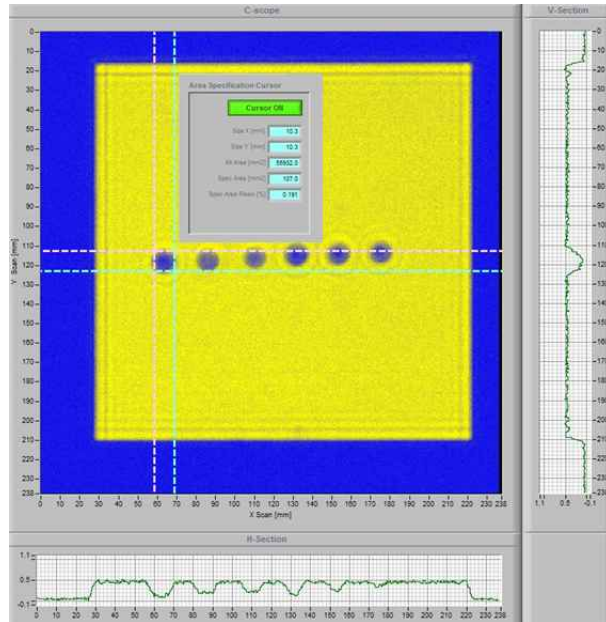


(a) No defect specimens($340kHz$)

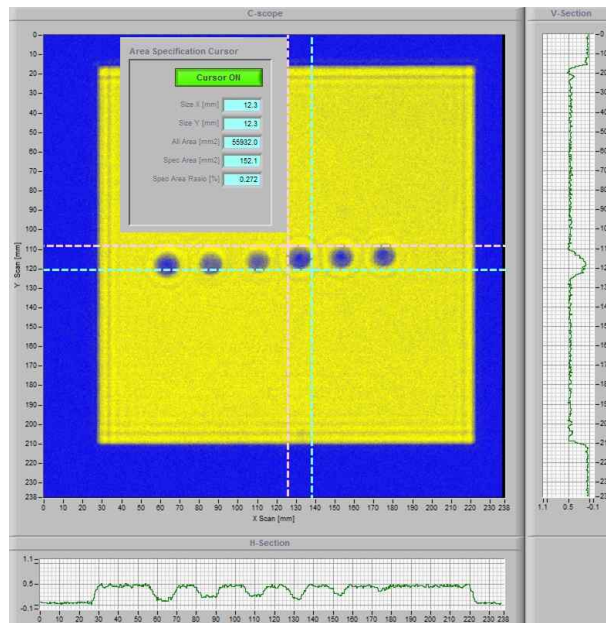


(b) Defect specimens($340kHz$)

Fig.4-15 Comparison of C-Scan Inspection



(a) Defect size 10mm(340kH ζ)



(a) Defect size 12mm(340kH ζ)

Fig.4-16 Results of C-Scan Inspection(Defect specimens)

제5장 결론

본 논문에서 제작된 비접촉 공중 초음파 탐상기법을 이용한 3축 자동 비접촉식 초음파 탐상 스캐너는 최대측정거리 $600 \times 600 \text{mm}$ (X-Y axes), 집속거리 250mm (Z-axes) Inspection pitch $0.1 \sim 20 \text{mm}$ (0.1mm step), 공중 초음파 탐촉자 이송속도 $1 \sim 500 \text{mm/sec}$ (1mm/sec step, resolution $\pm 50 \mu\text{m}$) 의 스캐닝 성능을 가지도록 설계되었으며, 수동 비접촉식 초음파 탐상기를 이용한 A-Scan 모드 초음파 탐상실험을 진행하여 비접촉 공중 초음파 탐상 기법의 특성과 Raw data를 분석하였다. 3축 자동 비접촉식 초음파 탐상 스캐너를 이용하여 탄소섬유강화 탄화규소 복합체의 내부결함 탐상을 여부를 확인하고 C-Scan 모드를 통한 탄소복합체의 내부결함 검출성능에 대한 연구를 수행하여 비접촉 공중 초음파 탐상기법의 유용성에 대해 고찰한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- (1) 각 재질별(아크릴, 알루미늄, CFRP 시험편) 초음파 집속 거리별 초음파 감쇠특성 및 초음파 투과파의 진폭관계를 분석한 결과, 초음파 집속거리는 100mm 이내에서 초음파 투과진폭값은 37.40075V 로 최대값을 가지며 재질 내부로의 초음파 투과가 잘 이루어짐을 알 수 있으며 초음파 투과율이 가장 높은 시험편은 알루미늄(-87.3dB)이고, 투과율이 낮은 시험편은 아크릴 시험편(-66.5dB)으로 확인되었다. CFRP 시험편의 경우, 알루미늄과 아크릴 시험편(-76.6dB)의 중간 투과율 범위내에서 초음파 투과가 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 평면 탐촉자 초음파 발진부 마스킹 사이즈에 따라 (10mm , 5mm) 수신면적 변화에 따라 초음파 빔의 확산손실이 감소되고 지향성이 향상됨에 따라 초음파 투과율이 증가되고 있음을 확인할 수 있었다.
- (2) 초음파 가이드 파형 분석을 위하여 송수신 초음파 탐촉자 사이에 각각 다른 재질의 시험편을 두고 400kHz , 800kHz 의 송신 주파수로 각각 인가하여 초음파 탐상실험을 하여 음압차이로 비교한 결과, 아크릴 시험편은

-4.2dB, CFRP시험편은 -9.5dB, 알루미늄 시험편은 -3.8dB로 측정되었으며 400kHz, 800kHz 400kHz 탐촉자를 사용했을 때, 800kHz 탐촉자보다 진폭 변화가 안정적임을 확인할 수 있었다.

(3)알루미늄 평판 시험편의 건전부와 결합부의 투과파 관계를 분석하기 위해 반사법(reflection method)을 이용하여 투과파의 진폭관계를 분석한 결과, 시험편 두께 2mm일 때 투과파의 진폭 최대값은 0.806 V이며 이 때의 시험편 각도는 8°임을 확인하였으며, 시험편 두께 6mm일 때 투과파의 진폭 최대값은 0.986 V이며 이 때의 시험편 각도는 7°임을 확인할 수 있었다. 따라서 초음파 시험편의 각도에 따라 초음파 투과율 변화에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

(4)C-Scan 모드(평면화상) 비접촉 공중 초음파 탐상 실험을 통하여 C_f-C 브레이크 디스크, C_f-SiC 복합체의 단면탐상 실험을 수행한 결과, C_f-C 브레이크 디스크의 인공 평면부 결합 $\phi 10mm$ 2개, $\phi 8mm$ 1개, $\phi 7mm$ 2개, $\phi 5mm$ 3개, $\phi 3mm$ 1개, $\phi 2mm$ 1개를 검출 할 수 있었으며, 인공 측면부 결합 $\phi 5mm DP4$ 1개, $\phi 5mm DP12$ 1개, $\phi 5mm DP14$ 1개, $\phi 7mm DP14$ 1개, $\phi 5mm DP15$ 1개, $\phi 3mm DP20$ 1개를 검출 할 수 있었다. 또한, C_f-SiC 결합시험편의 인공결합 $\phi 10mm$ 3개, $\phi 12mm$ 3개를 검출하였으며, 인공 결합 $\phi 10mm$ 는 결합크기 $\phi 10mm^{\pm 0.5} = 10.3mm$ 로 검출되었으며, 결합위치는 x축 112mm, y축 58mm 지점에서 첫 번째 인공결합 위치를 확인할 수 있었다. 인공결합 $\phi 12mm$ 는 결합크기 $\phi 12mm^{\pm 0.5} = 12.3mm$ 로 검출되었으며, 결합위치는 x축 109mm, y축 125mm 지점에서 첫 번째 인공결합 위치를 확인할 수 있었다.

Reference

1. I.S. Han, “우주발사체용 탄소섬유 강화 탄소규소 복합소재”, 미래성장 산업용 차세대 탄화규소 소재기술 특집호, Vol.13, No.6, pp.55-67, 2010.
2. H. Lee, “위상배열 초음파 검사기술”, Machinery Industry, pp.71-77, 2008.
3. H.U. Oichi, “초고분해능 공기 중 비접촉 초음파 계측 시스템”, 월간 자동화 기술, pp.73-80, 2000.
4. MG. Bader, “6.01 The Composites Market” in Comprehensive Composite Handbook, Vol. 6 Design and Application, Ed. by A. Kelly and C. Zweben, published by Elsevier Science, 2000.
5. H. H. Moeller, W. G. Long, A. J. Caputo, and R. A. Lowden, “Fiber - Reinforced Ceramic Composites”, Ceram. Eng. Sci. Proc., Vol.8, No.7, pp. 977-84, 1987.
6. D.W. Freitag and D.W. Richerson, “Opportunities for Advanced Ceramics, to Meet the Needs of the Industries of the Future,” DOE/ORO 2076, 1998.
7. <http://www.ms.ornl.gov/cfcc>
8. P. Spriet and G. Habarou, “Applications of CMCs to Turbojet Engines: Overview of the SEP Experience,” Key Eng. Mater., pp.127-131, 1997.
9. Y. Seki, “Overview of the Japanese Fusion Reactor Studies Programme,” Fus. Eng. Des., Vol.48, pp.247-54, 2000.

10. Roger R. Naslain, "SiC-Matrix Composites: Nonbrittle Ceramics for Thermo-Structural Application," *Int.J.Appl. Ceram. Technol.*, Vol.2, No.2, pp. 75-84, 2005.
11. Y. Katoh, L.L. Snead, C.H. Henager Jr., A. Hasegawa, A. Kohyama, B. Riccardi, and H. Hegeman, "Current status and Critical Issues for Development of SiC Composites for Fusion Applications," *J. Nucl. Mater.*, Vol.367, No.70, pp.659-710, 2007.
12. K-Y Lim, D-H Jang, Y-W Kim, J.Y. Park, and D-S Park, "Fabrication of Dense 2D SiC Fiber-SiC Matrix Composites by Slurry Infiltration and a Stacking Process," *Metal and Materials Int.*, Vol.14, No.5, pp.589-916, 2008.
13. M. Sugimoto, Y. Morita, T. Seguchi, and K. Okamura, "Development of SiC Fiber Reinforced SiC Composites by Radiation Cured Pre-ceramic Polymer", *Key Eng.Mater.*, Vol.11, No.14, pp.164-165, 1999.
14. 박지연, 김원주, 정충환, 우창현, 류우석, "방사선을 이용한 SiC 복합체 제조 공정 연구," *KAERI/RR-2631/2005*, 2006.
15. T.Kameda, S.Suyama, Y.Itoh, and Y.Goto, "Development of Continuous SiC Fiber-reinforced Reaction Sintered SiC Matrix Composite," *J. Ceram. Soc. Jpn*, Vol.107, No.4, pp.327-349, 1999.
16. T. M. Besmann, B. W. Shelton, R. A. Lowden, and D. P. Stinton, "Vapor-Phase Fabrication and Properties of Continuous-Filament Ceramic Composites," *Science*, Vol.253, pp.1104-1107, 1991.
17. A. J. Caputo and W. J. Lackey, "Fabrication of Fiber-Reinforced Ceramic Composites by Chemical Vapor Infiltration", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol.5, No.7, pp.654-657, 1984.

18. D. P. Stinton, A. J. Caputo, and R. A. Lowden, "Synthesis of Fiber-Reinforced SiC Composites by Chemical Vapor Infiltration," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, Vol.65, No.2, pp.347-350, 1986.

19. T.Masakazu, T.Osamu, H.Hidekazu, O.Yukio, N.Hideo, K.Koichiro, "Characteristics of Probes for Non Contact Air coupled Ultrasonic Testing," *Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.6, No.3, pp.81-86, 2010.

20. K.So, K.Naoyuki, B.Atsushi, A.Yuji, O.Mitsuru, "A 3-Dimensional Phased Array Ultrasonic Technique," *Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.1, No.1, pp.1-4, 2010.

21. MHirohisa, K.Naoyuki, N.Junichiro, KMashiro, "Development of Three-Dimensional Ultrasonic Angle Beam Technique with Circular Array Sensor," *Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.1, No.2, pp.5-6, 2010.

22. F.Takashi, K.Ichiro, "Visualization of ultrasonic focused beam generated by phased arrays," *Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.1, No.3, pp.7-12, 2010.

23. M.Akihiko, O.Naoto, I.Toshihiro, "Removal of water effect for visualization of nonlinear ultrasonic's images in immersion method," *Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection*, Vol.4, No.1, pp.51-52, 2010.

24. K.Yasuhiro, O.Toshihiro, N.Nobutomoto, O.Hriotsugu, W.Hideo, K.Hiroaki, K.Satoru "Ultrasound Resonant Characteristics of Neutron-Embrittled RPV Steels and Model Alloys," *Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection*,

Vol.5, No.1, pp.57-60, 2010.

25. K.Koichiro, I.Ryusuke, "Non-contact Materials Characterization and Defect Detection by Air-Coupled Transducers," Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection, Vol.6, No.1, pp.71-76, 2010.

26. T.Masakazu, N.Masaaki, K.Keiji, B.Hiroshi, O.Hideo, O.Yukio, "Development of Imaging Equipment by Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing," Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection, Vol.6, No.2, pp.77-79, 2010.

27. S. Y. Na, J. Y. Kim, "The Research on NAUT Characteristics Evaluation by Defection Image" J.KSTLE, Vol.26, No.6, pp.341-345, 2010.

28. J. Y. Kim, S. Y. Na, "NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) inspection of CFRP Specimen, KSME, pp.5-8, 2010.

29. S. W. Choi, J. H. Lee, Y. H. Cho, "Application of Laser - based Ultrasonic Technique for Evaluation of Corrosion and Defects in Pipeline" J.KSNT, Vol.25, No.2, pp.95-102, 2005.

30. Y. G. Kim, B. Y. Ahn, S. S. Lee, "Automatic Non contact Ultrasonic Inspection Technique" J.KSNT, Vol.13, No.4, pp.25-31, 1994.

31. S. Y. Na, J. Y. Kim, K. S. Song, "The Inspection Analysis of NAUT from Spot Welding Part and CFRP Specimen", Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Application, pp.186, 2012.

32. J. H. Lee, S. W. Choi, J. H. Byun, "A Study on Non-contacting Ultrasonic Testing for Inspecting Delamination in CFRP, J.KSPE, Vol.24, No.3, pp.23-30, 2007.

33. J. Y. Kim, S. Y. Na, S. K. Song, "The application of NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) to Spot Welding Part, KSNT, pp.347-352, 2012.
34. S. Y. Na, J. Y. Kim, "The application of NAUT to detect Lamella Tearing, KSTLE, pp.105-106, 2012
35. J. H. Lee, S. J. Lim, I. K. Park, D. H. Kim, "Development of Automated Ultrasonic Testing system for Partial Joint-Weld of Heat Exchanger's Header to Tube in Power Plant", J.KSNT, Vol.30, No.4, pp.367-372, 2010.
36. T. H. Lee, J. S. Kim, K. Y. Jang, "Lamb Wave Technique for Ultrasonic Nonlinear Characterization in Elastic Plates", J.KSNT, Vol.30, No.5, pp.458-463, 2010.
37. Y. H. Cho, D. Y. Kim, H. S. Choi, J. H. Lee, "Evaluation of Composite Laminates for Aircraft-Primary-Structure Applications Using Non-Linear Parameter of Ultrasonic Guided Wave", J.KSNT, Vol.30, No.2, pp.126-131, 2010.
38. Y. J. Kang, J. S. Kim, S. G. Park, S. H. Baik, N. J. Choi, "Development of Laser-Based Resonant Ultrasound Spectroscopy(Laser-RUS) System for the Detection of Micro Crack in Materials", J.KSPE, Vol.27, No.1, pp.41-48, 2010.
39. I. K. Park, T. S. Park, "Nondestructive Evaluation of Nanostructured Thin Film System Using Scanning Acoustic Microscopy", J.KSNT, Vol.30, No.5, pp.437-443, 2010.
40. K. M. Joo, S. H. Jin, Y. S. Moon, "Assessment of Pipe Wall Loss Using Guided Wave Testing", Vol.30, No.4, pp.295-301, 2010.

41. J. H. Cho, Y. J. Cho, S. P. Yoo, I. S. Jang, S. S. Do, "Consideration of Sensors for Real-Time Quality Evaluation of Resistance Spot Welds in Automotive Industry", KWJS, pp.50 ,2010
42. S. H. Baek, T. H. Lee, J. S. Kim, K. Y. Jang, "Ultrasonic Nonlinearity Measurement in Heat Treated SA508 Alloy: Influences of Grains and Precipitates", J.KSNT, Vol.30, No.5, pp.451-457, 2010.
43. Y. M. Cheong, "Experimental Evidence and Analysis of a Mode Conversion of Guided Wave Using Magnetostrictive Strip Transducer", J.KSNT, Vol.29, No.2, pp.93-97, 2009.
44. H. J. Lee, C. H. Cho, H. J. Cho, "Development of a Multi-Channel Ultrasonic Testing System for Automated Ultrasonic Pipe Inspection of Nuclear Power Plant", J.KSNT, Vol.29, No.2, pp.145-152, 2009.
45. K. W. Nam, K. C. Lee, K. Akira, "A Feasibility Study on the Application of Ultrasonic Method for Surface Crack Detection of SiC/SiC Composite Ceramics", J.KSNT, Vol.29, No.5, pp.479-484, 2009.
46. M. Y. Choi, S. S. Lee, J. H. Park, W. T. Kim, K. S. Kang, "Analysis of Heat Generation Mechanism in Ultrasound Infrared Thermography", J.KSNT, Vol.29, No.1, pp.10-14, 2009.
47. M. S. Kim, G. S. Kim, H. M. Jung, K. B. Kim, "Nondestructive Quality Measurement System of Fruits Using Ultrasonic", J.KSPE, Vol.25, No.2, pp.7-14, 2008.
48. Y. S. Shin, Y. H. Yoon, Y. H. Kim, "Measurement of Longitudinal and Transverse Wave Speed in Solid Materials Using Immersion Ultrasonic Testing", J.KSNT, Vol.28, No.1, pp.40-45, 2008.

49. S. N. Choi, H. N. Kim, H. J. Yoo, H. J. Cho, W. G. Hwang, "Development of Ultrasonic Testing System for Piping Welds", J.KSNT, Vol.28, No.4, pp.331-338, 2008.
50. J. H. Lee, S. J. Lee, J. H. Byun, "Evaluation of Internal Defect of Composite Laminates Using A Novel Hybrid Laser Generation/Air-Coupled Detection Ultrasonic System" J.KSNT, Vol.28, No.1, pp.46-53, 2008.
51. I. H. Choi, J. I. Lee, G. D. Kwon, K. Y. Jang, "Effect of System Dependent Harmonics in the Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter by Using Contact Transducers", J.KSNT, Vol.28, No.4, pp.358-363, 2008.
52. J. H. Park, M. W. Nam, Y. S. Lee, "Development of Image Processing Software for Ultrasonic NDE", IEEK, pp.459-460, 2007.
53. J. W. Cho, Y. S. Choi, S. H. Jung, H. G. Jung, "A Brazing Defect Detection Using an Ultrasonic Infrared Imaging Inspection", J.KSNT, Vol.27, No.5, pp.426-431, 2009.
54. J. H. Lee, S. J. Lee, S. W. Choi, J. H. Byun, "Quantitative Evaluation of Delamination in CFRP Using Laser-Based Ultrasound", J.KSPE, Vol.24, No.11, pp.29-36, 2007.
55. S. N. Choi, H. J. Yoo, H. N. Kim, "Development of Automated Ultrasonic Testing Signal Acquisition Program for Welding", KSNT, pp.319-324, 2006.
56. J. W. Cho, Y. C. Seo, S. H. Jung, H. G. Jung, S. H. Kim, "A Study on Real-Time Defect Detection Using Ultrasound Excited Thermography", J.KSNT, Vol.26, No.4, pp.211-219, 2006.

57. D. C. Seo, J. H. Kwon, B. Y. Ahn, Y. S. Lee, "Study on a Particle Separator using Immersion Ultrasonic Transducer", KSNT, pp.148-151, 2006.