



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](#)

2016년 2월  
석사학위논문

공중 초음파 탐상 기법을  
적용한 항공기 브레이크  
디스크의 내부결함 검출에  
관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

박 석 철

공중 초음파 탐상 기법을  
적용한 항공기 브레이크  
디스크의 내부결함 검출에  
관한 연구

A Research on the internal defect detection of  
aircraft brake disk applied to air-coupled  
ultrasonic testing method

2016년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

박 석 철

공중 초음파 탐상 기법을  
적용한 항공기 브레이크  
디스크의 내부결함 검출에  
관한 연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2015년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템공학과

박 석 철

## 박석철의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 경 석 (인)

위 원 조선대학교 교수 윤 성 운 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 재 열 (인)

2015년 11월

조선대학교 대학원

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	iii
LIST OF TABLES .....	v
NOMENCLATURE .....	vi
ABSTRACT .....	vii
<b>제 1 장 서 론</b> .....	<b>1</b>
제 1 절 연구배경 .....	1
제 2 절 연구필요성 및 연구 방법 .....	4
<b>제 2 장 이론적 배경</b> .....	<b>6</b>
제 1 절 비파괴검사의 종류 .....	6
제 2 절 초음파 탐상의 이론 .....	10
1. 초음파 탐상기법의 원리 .....	10
2. 초음파의 반사와 투과 .....	14
제 3 절 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT)시스템 .....	22
1. NAUT 탐상 시스템 .....	22
2. 고감도 비접촉 탐촉자 .....	26
<b>제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 실험</b> .....	<b>31</b>
제 1 절 시험편 .....	31
제 2 절 NAUT 탐상 실험 및 고찰 .....	34
1. NAUT A-Scan 수동 탐상 실험 및 고찰 .....	34
2. NAUT C-Scan 자동 탐상 실험 및 고찰 .....	38

제 4 장 결론 ..... 61

Reference ..... 62

## LIST OF FIGURES

Fig. 2-1	Classification according to the frequency band .....	11
Fig. 2-2	Principle of ultrasonic pulse reflection method .....	12
Fig. 2-3	Principle of ultrasonic transceiver and beam focused distance ...	13
Fig. 2-4	Reflection and Transmission by normal incidence on the boundary .....	14
Fig. 2-5	Reflection and refraction of oblique incidence .....	18
Fig. 2-6	Angle beam probe .....	20
Fig. 2-7	Composition of manual NAUT units for A-Scan inspection .....	22
Fig. 2-8	Auto image scanning equipment .....	24
Fig. 2-9	Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined .....	24
Fig. 2-10	Data output from NAUT21 system .....	25
Fig. 2-11	Configurations of air probe .....	26
Fig. 2-12	Air Probe .....	27
Fig. 2-13	Comparison of flat type probe and line focus type probe .....	28
Fig. 2-14	Measuring method with Hydro hon .....	28
Fig. 2-15	Distance between point focus type probe and beam diameter .....	29
Fig. 2-16	Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe .....	29
Fig. 2-17	Application of near sound field from focus type probe .....	30
Fig. 3-1	Specimens of CFRP .....	31
Fig. 3-2	Design of Cf-C brake disc specimens .....	32
Fig. 3-3	Specimens of Cf-C brake disc .....	33
Fig. 3-4	Comparison of the waveform depending on the presence of defects .....	34
Fig. 3-5	Results of Focal distance and amplitude .....	37
Fig. 3-6	Results of Focal distance and amplitude(800kHz, 400kHz) .....	37
Fig. 3-7	Color map Display of C-Scan mode by echo signal .....	39
Fig. 3-8	Auto image inspection program execution .....	40
Fig. 3-9	Results of C-Scan inspection(No defect specimens_no masking) ....	42
Fig. 3-10	Results of C-Scan inspection(Defect specimens_no masking) .....	43



Fig. 3-11 Results of C-Scan inspection(No defect specimens\_ masking\_340kHz) ..... 44

Fig. 3-12 Results of C-Scan inspection(No defect specimens\_ masking\_400kHz) ..... 45

Fig. 3-13 Results of C-Scan inspection(Defect specimens\_masking\_340kHz) ... 46

Fig. 3-14 Results of C-Scan inspection(Defect specimens\_masking\_400kHz) ... 47

Fig. 3-15 Result of C-Scan Inspection(No defect specimens) ..... 50

Fig. 3-16 Result of C-Scan Inspection(Defect specimens) ..... 54

Fig. 3-17 Comparison of C-Scan Inspection(No defect specimens) ..... 56

Fig. 3-18 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens) ..... 57

Fig. 3-19 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens) ..... 60

## LIST OF TABLES

Table 1-1 Applications of the Carbon Fiber Composites for Weight Reduction of Major Aircraft Manufacturers .....	2
Table 2-1 Application and characteristics of non-destructive testing .....	6
Table 3-1 Results of Focal distance and amplitude .....	35
Table 3-2 Results of Focal distance and amplitude(800kHz) .....	35
Table 3-3 Results of Focal distance and amplitude(400kHz) .....	36
Table 3-4 Experiment of condition(no masking specimens) .....	39
Table 3-5 Experiment of condition(masking specimens) .....	39

## NOMENCLATURE

$C$	: Sound velocity
$C_L$	: Longitudinal wave velocity
$C_S$	: Shear wave velocity
$C_R$	: Rayleigh wave velocity
$E$	: Ultrasonic energy
$G$	: Shear module
$I$	: Acoustic intensity
$K$	: Bulk modulus
$P$	: Sound pressure
$\Delta T$	: The time interval of the bottom echo
$f$	: Frequency
$\rho$	: Density
$\nu$	: Poisson's ratio
$a_0$	: Amplitude of the particle
$a_x$	: Displacement of particle
$v$	: Process speed of wave
$\lambda_m$	: Distance of medium
$r_{1 \rightarrow 2}$	: Reflection coefficient
$t_{1 \rightarrow 2}$	: Transmission coefficient

## ABSTRACT

### A Research on the internal defect detection of aircraft brake disk applied to air-coupled ultrasonic testing method

By Park Suk Chul

Advisor : Prof. Kim jae-yeol, Ph.D.

Dept. of Mechanical system engineering,

Graduate School of Chosun University

The aircraft industry is an advanced, complex technological industry that has a strong impact on other industries and, for the nation as a whole, it is a strategically important industry for strengthening international competitiveness through technological superiority. Developed countries throughout the world have been promoting the aircraft industry as an engine of continuous growth and development of advanced technology. The importance of the industry is acute in areas of maintaining superior defense technology, promoting rapid-growth industries, and improving productivity.

Cf-SiC and SiC / SiC composites have a high thermal conductivity, and excellent corrosion and wear resistance, low coefficient of thermal expansion and light weight using in the parts of the aerospace apply to aircraft thrust deflector, jet vane, combustion chamber, elevens, body flap, shingle. So, the state of the art new material of carbon fiber-reinforced

silicon carbide when using both internal and external crack detection and composite materials that may occur during the manufacturing process of the composite material, using condition and the quantitative reliability to the physical behavior characteristic is determined by the non-destructive techniques and evaluated according to the external environment study on valuation techniques is essential.

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.

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 Pulser-Receiver.

In this paper, we apply the most advanced techniques of non-contact air ultrasonic technique of ultrasonic techniques of non-destructive testing techniques to perform a study on internal defect detection identification and assessment of carbon-fiber reinforced silicon carbide composites and to perform basic research and applied research.

# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구배경

항공우주산업은 미래전략산업으로 제조업 전체 기술이 종합적으로 결합된 “제조업의 꽃”으로 일컬어지며 나라의 국방력을 결정짓는 핵심요소이기도 하다.

최근 모든 산업분야에서 기존의 소재와 비교하여 우수한기계적 특성과 기능적 특성을 요구하는 새로운 소재에 대한필요성이 점점 증가하고 있으며, 특히 연료 절감과 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)와 같은 지구온난화 가스 배출의 절감을 통한 환경보호가 요구됨에 따라 자동차 및 우주항공 산업에서는 차체 경량화에 대한 중요성이 더욱 강조되고 있다. 또한, 다양한 응용분야 개척을 위하여 우수한 기계적 물성뿐만 아니라 여러 가지 특성에 부합되는 고기능성 맞춤형 재료의 개발은 현재의 재료과학 기술의 최우선적인 목표이며, 이러한 맞춤형 재료 개발에 매우 활발한 연구가 진행되고 있는 분야가 복합재료라 할 수 있다<sup>(1,2,3)</sup>.

복합재료란 성분이나 형태가 다른 두 종류 이상의 물질이 조합되어 각각의 특성을 상호 보완하여 단일 물질과 비교하여 물성이 크게 향상된 재료를 의미한다. 일반적으로 복합재료는 섬유, 입자, 충상 물질 등과 같은 충전제(Filler)와 금속, 세라믹, 고분자 등과 같은 매트릭스(Matrix) 등으로 구성되며, 이러한 요소들로 구성된 복합재료는 섬유강화 복합재료, 입자강화 복합재료, 그리고 충상 복합재료로 분류 할 수 있다. 또한, 복합재료는 매트릭스의 종류에 따라 금속계, 세라믹계, 고분자계복합재료로 구분되며, 금속계 및 세라믹계는 특성은 뛰어나지만 가격이 비싸 선진국에서도 우주항공 분야에만 제한적으로 사용되고 있다.

여러가지 복합재료 중 섬유강화 고분자 복합재료(FRP:Fiber Reinforced Plastics Composites)는 기존의 고분자 복합재료와 비교하여 고분자 매트릭스에 섬유상의 보강재를 복합시켜, 기계적 강도와 내열성을 크게 향상시킨 복합재료를 나타낸다. 보강재로는 유리섬유, 탄소섬유 및 방향족 나일론 섬유(케블라)가 주로 사용되고 있고, 고분자 수지로는 불포화 폴리에스테르, 에폭시수지 등의 열경화성 수지가 주로 쓰이고 있다<sup>(4,5)</sup>.

탄소섬유강화 복합재료(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 경량, 높은

무게비 강도 및 강성도, 열적특성, 전기적 특성, 내부식성, 내충격성, 피로특성, 부품 일체화의 용이성 등의 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 특성을 바탕으로 탄소섬유강화 복합재료는 항공기용 부품소재의 경량화, 내부식성 및 충격, 진동 등의 성능 향상, 금형 가격의 절감 등을 위하여 구조물, 외장 부품과 같은 기구부품 및 엔진부품 등에 적용하기 시작하여, 현재 그 사용량이 급격하게 증가하고 있는 추세이다. 또한 탄소섬유강화 복합재료는 내약품성, 화학적 불활성 및 생체 친화성이 매우 우수하여 다양한 분야에서 응용이 가능하다<sup>(6,7,8)</sup>.

이러한 특성으로 인하여 탄소섬유강화 복합재료는 1980년대부터 항공기의 기체구조인 꼬리날개에 적용이 검토되어 에어버스사 A310, 300, 320, 보잉사의 B777 등에 채용된바 있다. 또한, 최근에는 탄소섬유강화 복합재료 주익이 F-2 군용기뿐이 아니고 민간기인 보잉사의 B787에 채용되었고, 이제까지 기체구조의 10~20% 중량 정도였던 탄소섬유강화 복합재료의 사용비율이 50% 중량 이상으로 확대되었고, 주요 항공기 업체의 경량화를 위한 복합재료 적용 예를 Table 1-1에 나타내었다<sup>(1)</sup>.

Table 1-1 Applications of the Carbon Fiber Composites for Weight Reduction of Major Aircraft Manufacturers

Airbus	15%      15%(A319, A320, A321), 13.4%(A330, A340)
	20%      A380(Service in Y2006) [CFRP * 42Tons/Plane]
Boeing	9%                      5%(Before B777), 9%(B777 at 1995)
	50%    B787(After Y2008)
MDC	3%    3%(MD=11)

항공기외에 우주용으로도 탄소섬유는 매우 훌륭한 특성을 나타내고 있다. 고압에 견디어야 하며 무게는 가벼워야 하는 발사체 로켓에 탄소섬유는 이상적인 재료이다. 때문에 금속재료에서 탄소섬유 복합재로 바뀌는 추세이다.

항공 우주 발사체에 사용한 탄소섬유의 한 예를 살펴보면, H - 11A 로켓의 맨 위 상단은 CFRP가 사용되었으며, 몸체 중간 위쪽 부분은 샌드위치 CFRP로 그리고 하부의 로켓 부스터의 모터 케이스는 모두 CFRP로 만들었다.

탄소섬유 복합재의 큰 비강도(specific strength)는 금속 재료에 비하여 상대적인

최적 운용압력을 증가시켜 주고 있다. 특히 분리 조각형(segment)보다는 단일 형으로 제작한 것이 효과적이다. 이러한 특성은 적당한 크기의 단일형까지는 탄소섬유 복합재의 장점이다<sup>(9)</sup>.

이러한 항공우주산업은 개발과 제작 기간에 장기간 소요되고 다양한 소재와 많은 부품이 사용되기 때문에 이에따른 신뢰성과 안전성이 요구되며 소재나 부품의 제작과정이나 운용중의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 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.



## 제 2 절 연구필요성 및 연구 방법

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<sup>(10)</sup>.

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.

항공기의 경우는 1,2차 세계대전을 겪으면서 급속도로 발달하게 되었지만 대전이 끝난 후 군수산업의 근간을 이루던 항공산업이 점차민간용으로 확대되어 가면서 안전에 대한 인식이 고조되기 시작하였다. 물론 군용 항공기에서도 안전에 대해 소홀함이 있었던 것은 아니지만 민간용 항공기는 사고가 발생하게 되면 많은 인명 피해가 따르기 때문에 보다더 철저히 안전에 완벽을 기해야 하였다.

그러나 항공기를 계속 운용하다 보면 반복적인 이착륙에 의한 하중과 마모에 의해 손상되는 부분이 많아지므로 항공기에 사용되는 부품들은 일정기간의 사용시간이 지나면 폐기시키는 소모성 부품들과 계속적으로 사용 상태를 확인하며 사용하는 부품들로 구성되어 있다. 특히 항공기의 동체와 날개를 잇는 부분은 항공기를 뜨게 하는 양력과 동체에 있는 하중이 마주치는 중요한 부위이며 또한 강력한 추력을 담당하는 엔진은 고회전, 고압력, 고열이 발생되기 때문에 마모와 손상을 받기 쉬운 부분으로 손쉽게 장탈 하여 결함유무를 확인할 수가 없는 부분이다.

그러므로 이러한 부분들에 대한 손상이나 균열 등의 상태를 알기 위해서는 비파괴 검사를 통해 안정성 및 신뢰성 평가를 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.

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<sup>(11)</sup>.

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<sup>(12)</sup>.

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 고출력의 초음파 집속이 이루어져 비접촉 초음파 탐상을 가능하게 하는 비파괴 검사 기법이다.

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.

첫째, 비접촉 공중 초음파 탐상기법의 유용성 검증을 위해 CFRP시편에 대한 수동 검사 실험 진행 하였다. 집속 시 초음파 감쇠 특성을 분석하기 위하여 CFRP 시편을 이용하여 초음파 집속 거리를 일정하게 변화시킬 때 투과파의 진폭의 관계를 분석하는 실험을 수행하였다.

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

셋째, 브레이크 디스크에 초음파 자동탐상 시스템을 적용 시 초음파의 감쇠 및 확산 손실을 최소화 시킬 수 있는 탐상 파라미터를 찾기 위해 실험을 수행 하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 제 1 절 비파괴검사의 종류<sup>(13)</sup>

비파괴검사는 대상물의 내부조직 변화나 결함에 의한 방사선, 초음파, 자기 등의 변화를 감지하여 측정하는 것으로 재료를 파괴하여 특성을 아는 것과는 많은 차이가 있으며 비파괴 검사를 이용하여 신뢰성 향상, 제조원가의 절감, 공정의 개선 등의 효과를 얻을 수 있다. 일반적인 비파괴 검사의 종류는 다음과 같으며 각 비파괴 검사의 결함검출 대상과 적용 그리고 각 검사의 특징은 Table 2-1과 같다.

Table 2-1 Application and characteristics of non-destructive testing

검사방법	검출대상 및 적용	특징
육안검사 (VT)	모든 대상물의 외관상 결함, 형상의 변화, 표면 거칠기, 표면광택 등을 식별하는데 사용	육안에 의존하므로 검사의 신뢰성 확보가 어려우며 대상물의 외면이나 내시경 등을 이용한 파이프 등의 내면 검사가 가능
방사선투과검사 (RT)	용접품, 주조품 및 복합재 구조물의 내·외부 결함검출	필름이나 디스켓을 이용한 반영구적인 기록이 가능하고 거의 모든 재료에 적용할 수 있으며 표면 및 내부의 결함 검출이 가능하나 방사선에 대한 안전관리 요구됨
초음파탐상검사 (UT)	용접품, 주조품, 압연품, 단조품, 복합재의 내부결함 검출이나 소재 및 도금의 두께 측정	균열에 대한 감도가 좋으며 표면 및 내부결함 검출가능하며 높은 투과력이 있고 자동화가 가능
침투탐상검사 (PT)	용접품, 주조품, 단조품 및 기계가공품의 표면 결함 검출	금속, 비금속 등 거의 모든 재료에 적용이 가능하며 제품의 크기나 형상에 거의 제한을 받지 않음. 제품에 코팅이나 페인트 등이 있는 경우나 표면이 거친 경우 그리고 세라믹과 같은 다공성의 제품에는 적용이 불가
누설검사 (LT)	압력 또는 저장용기 및 유압계통의 파이프 등의 누설탐지	대상물의 용량이 클 경우 미세한 누설량은 검출이 곤란하며 관통된 불연속만 탐지가 가능
음향방출시험 (AE)	금속재료, 복합재료, 압력용기 등의 재료 내부의 동적거동 파악에 의한 건전성 평가, 회전체 이상 진단, 잔여수명평가 재료특성 평가	미시균열의 성장 유무, 회전체 이상 진단 등의 모니터링화 가능, 카이저효과, 소성변형 및 전위를 위한 에너지가 필요하며 불연속의 정적거동은 탐지 불가

중성자투과검사 (NRT)	원자로 연료재료의 사용 전·후의 검사, 우주 항공기부품 등의 품질검사, 두꺼운 금속재의 용기나 구조물 내부에 존재하는 경수산화합물의 검출, 높은 원자번호를 갖는 두꺼운 재료의 검사에 이용하며 또, 핵연료봉과 같이 높은 방사성 물질의 결합검사에 사용	방사선투과 검사가 곤란한 검사 대상품에 용이(납과 같이 비중 높은 재료에 적용)
적외선검사 (IRT)	각종 재료표면 결함의 고감도 검출, 콘크리트 물의 열화 진단, 강도 측정 등 복합재료의 부결함 검출, 열탄성 효과에 의한 응력측정	표면 상태에 따라 방사율의 편차가 크기 때문에 결함검출 시 편차가 생기지 않도록 배경잡음이나 전과경로에서 흡수 산란의 영향을 제거 필요
와류탐상검사 (ET)	철강, 비철재료의 파이프, 와이어 등의 표면 또는 표면근처의 결함검출, 박막두께 측정, 전도도를 이용한 열처리 특성 및 재질 식별	비접촉탐상, 고속탐상, 자동탐상 가능, 표면결함검출능력 우수, 표면효과, 열교환기 튜브의 결함 탐지
자분탐상검사 (MT)	Fe, Co, Ni 등의 강자성체의 표면 및 표면적하의 결함 검출	강자성체에만 적용하며 장치 및 방법이 단순하고 신속한 검사 및 검사비용이 저렴

### 가. 육안검사(Visual Test)

육안에 의해 검사하는 방법으로 가장 오래되고 경제적인 방법이다. 대상물의 표면에 나타나는 결함이나 손상, 변화 등을 직접 또는 확대경을 이용하여 검사하거나 Borescope, Fiberscope 등의 기타 광학 장치를 이용하여 육안으로 접근할 수 없는 홀, 구조품 및 파이프 등의 내표면을 검사하는 방법이다.

### 나. 방사선투과검사(Radiographic Test)

전자파의 일종인 X-선 또는  $\gamma$ -선을 대상물에 조사하여 검사하는 방법이다. 방사선은 대상물을 투과하며 내·외부의 금속 및 비금속에 따라 차별적으로 흡수된다. 대상물인 모재보다 밀도가 낮은 결함부위는 X-선 또는  $\gamma$ -선을 덜 흡수하게 되며 밀도가 높은 물질은 더 많이 흡수하게 되어 기록 매체에 건전부와 다르게 나타난다. 일반적으로 기록 매체는 필름이 주로 이용되는데 방사선의 투과량에 따라 필름을 감광시키는 정도가 다르며 현상 시 명암의 차이로 나타난다. 방사선투과검사는 일반 산업계에서 많이 사용되는 검사방법중의 하나이나 미세균열과 같은 결함을 탐지하는 데는 적합하지 않은 검사방법이다.

#### 다. 초음파탐상검사(Ultrasonic Test)

탐촉자로부터 보통 1~10MHz의 초음파를 대상물의 내부에 입사시켰을 때 결함이나 조직의 변화에 의한 초음파 반사신호 또는 투과된 초음파의 양을 측정하여 결함을 검출해 내는 방법이다.

#### 라. 침투탐상검사(Penetrant Test)

대상물 표면에 침투제(Penetrant)를 적용하고 개구부 내를 제외한 다른 부위의 침투제를 제거한 후 개구부에 침투한 침투제를 흡출해내어 결함을 판별하는 방법이다.

#### 마. 누설검사(Leakage Test)

암모니아, 할로겐, 헬륨 등을 시험용기 내에 혼입하고 시험체 표면에서 검출기에 의해 누설의 존재, 누설부위 또는 누설량 등으로 결함을 검출하는 방법이다.

#### 바. 음향방출검사(Acoustic Emission Test)

고체가 소성변형 또는 파괴되는 경우 전위, 균열 등의 결함발생이나 성장에 수반하여 변형에너지의 해방과 함께 발생하는 탄성파를 검출하고 그 발생위치, 발생수, 신호 강도로부터 재료 내부의 동적거동을 평가하는 방법이다.

#### 사. 중성자투과검사(Neutron Radiographic Test)

방사선으로 중성자선을 이용하여 대상물의 재료 결함 등에 의한 밀도분포나 두께의 이상을 투과방사선량의 차로부터 결함을 검출해내는 방법이다.

## 아. 적외선검사(Infrared Test)

시험체 표층부에 존재하는 결함이나 접합이 불완전한 부분에서 방사된 적외선을 검지하고 적외선 에너지의 강도 변화량을 전기신호로 변환하여 결함부와 건전부의 온도정보의 분포패턴을 열화상으로 표시하여 결함을 탐지하는 방법이다.

## 자. 와류탐상검사(Eddy Current Test)

대상물 표층부의 결함에 의해 발생한 와전류의 변화즉, 시험 코일의 임피던스 변화를 측정하여 결함을 측정하는 방법이다.

## 차. 자분탐상검사(Magnetic Particle Test)

강자성체를 자화시키고 자분을 도포하여 누설자장에자분이 흡착되는 것을 보고 결함을 검출해 내는 방법이다.

최근 들어 비파괴검사의 중요성에 대한 인식이 점차확대 되고 있으며 새로운 재료, 부품, 구조물 및 제작기술의 발전은 보다 신속하고 정확한 첨단 비파괴검사방법을 요구하고 있다. 이에 따라 최근의 첨단 비파괴기술의 특징은 기존의 검사에 사용되는 물리적 수단을 이용한 검사방법이 종합화되어 사용되고 있으며 전기·전자 분야의 기술발전으로 첨단기술을 이용한 초정밀화가 진행되고 있고 또, 검사공정의 자동화, 검사결과의 화상화가 진행되어 가고 있다. 여러 비파괴검사 분야에서 많은 검사방법이 개발되고 있으나 본 논문에서 비파괴 검사 기술 중 초음파 탐상기법의 최첨단 기법인 비접촉 공중 초음파 탐상기법에 대해 소개하고자 한다.

## 제 2 절 초음파 탐상의 이론<sup>(14)</sup>

### 1. 초음파 탐상기법의 원리

#### 가. 초음파 탐상기법의 소개

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<sup>(20)</sup>.

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.

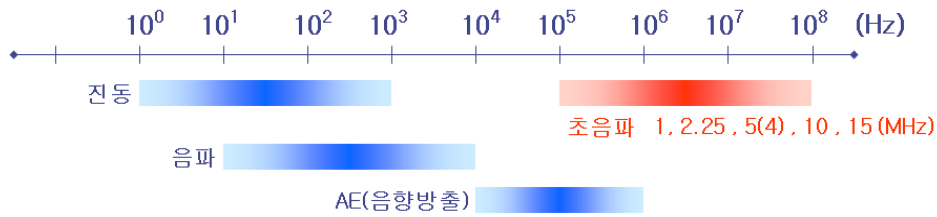


Fig.2-1 Classification according to the frequency band

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<sup>(16)</sup>. 이와 같은 방법을 보다 체계적이고 정량적으로 이용하여 초음파를 시험체에 전달하여 내부에 존재하는 불연속으로부터 반사한 초음파의 에너지량, 초음파의 진행시간 등을 분석하여 불연속의 위치 및 크기를 정확히 알아내는 방법이 초음파 탐상기법이다.

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<sup>(17)</sup>.

## 나. 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<sup>(18)</sup>.

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<sup>(19)</sup>. 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.2-2는 초음파 펄스반사법의 원리를 나타내고 있는 그림이다.

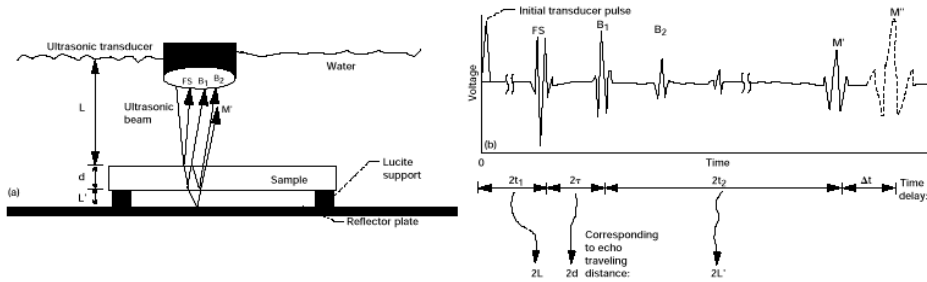


Fig.2-2 Principle of ultrasonic pulse reflection method

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  $\Delta t$ 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  $\Delta t$ 를 측정함으로써  $L$ 을 구할 수 있다. 반대로 시험체 두께  $L$ 을 알고 있을 때는  $\Delta t$ 를 측정함으로써 음속  $C$ 를 구할 수 있다. 초음파가 물체 내부를 전파할 때, 전파 과정에서 에너지가 손실되기 때문에 수신강도는 저하한다<sup>(15)</sup>.

이론적으로  $2L$ 의 전파에 대한 초음파 크기 저하는 단위 길로 나타내고, 감쇠계수(attenuation coefficient)를 측정할 수 있다. 음속이나 감쇠는 재료의 기본 물성치로서 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.

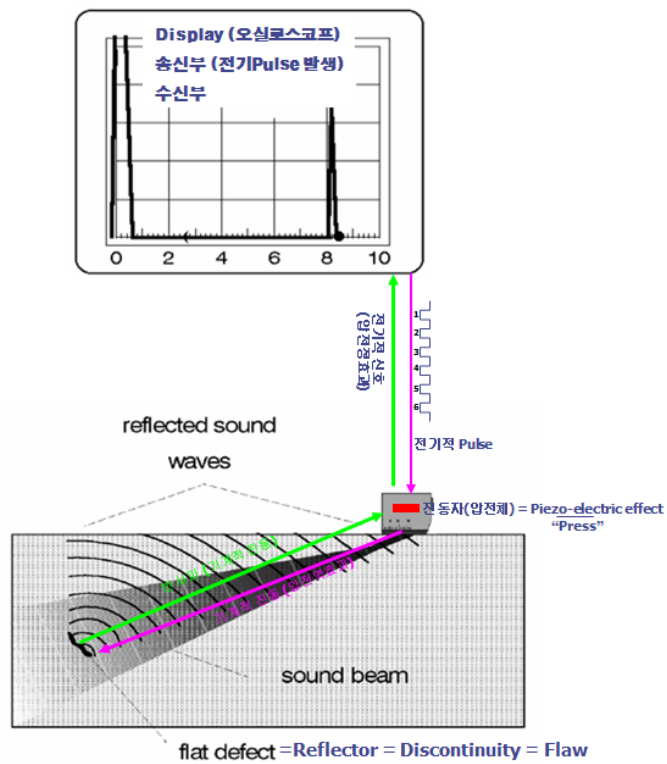


Fig.2-3 Principle of ultrasonic transceiver and beam focused distance

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<sup>(21)</sup>. 결함의 위치는 송신된 초음파가 수신될 때까지의 시간으로부터 측정되고, 결함의 크기는 수신되는 초음파의 에코높이 또는 결함 에코가 나타나는 범위로부터 측정한다.

## 2. 초음파의 반사와 투과

### 가. 수직 입사(Normal Incidence)

2개의 매질이 Fig.2-4와 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<sup>(22)</sup>. 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.

$$r_{1 \rightarrow 2} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2.1)$$

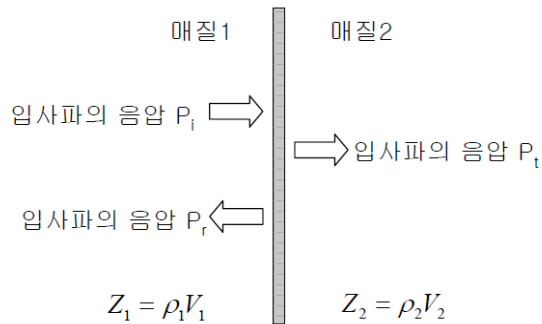


Fig.2-4 Reflection and Transmission by normal incidence on the boundary

Fig.2-4와 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 투과하여 매질 2에서 음압이  $P_t$ 가 되었다고 하자. 이때의 음압투과율(transmission coefficient)  $t_{1 \rightarrow 2}$ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$t_{1 \rightarrow 2} = \frac{P_t}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = 1 + r_{1 \rightarrow 2} \quad (2.2)$$

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

$$t_{2 \rightarrow 1} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} = 1 + r_{2 \rightarrow 1} \quad (2.3)$$

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

$$\begin{aligned} T_{1 \rightarrow 2} &= t_{1 \rightarrow 2} \times t_{2 \rightarrow 1} = \frac{P_t}{P_i} \times \frac{P'}{P_i} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \times \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} \\ &= \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} = 1 - r_{1 \rightarrow 2}^2 \end{aligned} \quad (2.4)$$

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

$$E = \frac{P^2}{Z} \quad (2.5)$$

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.

$$E_i = \frac{P_i^2}{Z_1} \quad (2.6)$$

반사파의 에너지  $E_r$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$E_r = \frac{P_r^2}{Z_1} = \frac{P_i^2 r_{12}^2}{Z_1} = E_i \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2.7)$$

투과파의 에너지  $E_t$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{aligned}
 E_t &= \frac{P_t^2}{Z_2} = \frac{P_i^2 t_{12}^2}{Z_2} = \frac{P_i^2 Z_1 t_{12}^2}{Z_1 Z_2} = E_i \frac{Z_1 (2Z_2)^2}{Z_2 (Z_1 + Z_2)^2} \\
 &= E_i \frac{4Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \\
 &= E_i \frac{(Z_1 + Z_2)^2 + 4Z_1 Z_2 - (Z_1 + Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} \\
 &= E_i \frac{(Z_1 + Z_2)^2 - (Z_2 - Z_1)^2}{(Z_1 + Z_2)^2} = E_i - E_r \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

따라서

$$E_i = E_r + E_t \quad (2.9)$$

식 (2.9)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 입사 음압의 1.936 배이다. 이것은 강의 음향임피던스가 물의 음향임피던스보다 상당히 크기 때문이다. 그러나 투과파의 에너지 식 (2.7)과 식 (2.8)로부터

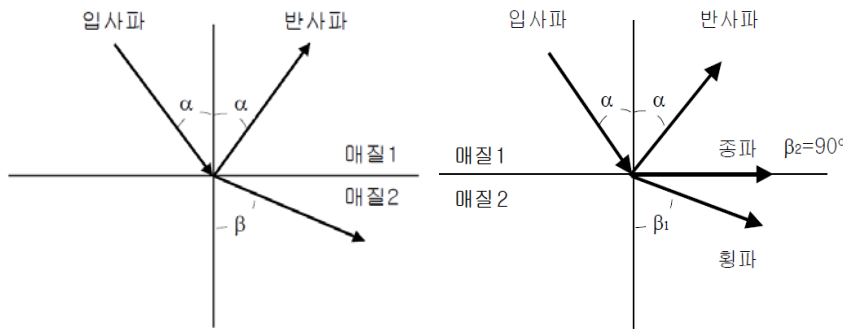
$$\frac{E_t}{E_i} = \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)t_{1 \rightarrow 2}^2 = \left(\frac{1.5}{45.4}\right)1.936^2 = 0.12412$$
 이 되고 입사파 에너지의 12.4% 만이 강중에 투과한다.

국부 수침법에 의한 강판의 탐상 시, 표면에코  $S$ 와 저면에코  $B$ 의 에코높이를 비교하면, 표면에코  $S$ 는 수중을 전파하여온 초음파가 물과 강판과의 경계면에서 반사한 비율(음압반사율  $r_{1 \rightarrow 2}$ )에 대응한다. 한편 저면에코  $B$ 는 물과 강판과의 경계면을 투과한 초음파(음압투과율  $t_{1 \rightarrow 2}$ )가 강판의 저면 다시 말해 강판과 공기와의 경계면에서 반사(100% → 음압반사율=1)하고, 다시 물과 강판과의 경계면을 투과한 초음파(음압투과율  $t_{2 \rightarrow 1}$ )의 비율(음압왕복 투과율  $T_{1 \rightarrow 2}$ )에 대응한다.

## 나. 경사 입사(Oblique Incidence)

### (1). 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.2-5는 이 관계를 나타내고 있다.



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

Fig.2-5 Reflection and refraction of oblique incidence

Fig.2-5 (a)에서와 같이 입사각  $\alpha_L$ ,  $\alpha_S$ 와 반사각  $\beta_L$ ,  $\beta_S$  및 굴절각  $\theta_L$ ,  $\theta_S$  사이에는 빛과 같은 관계가 성립한다. 입사축의 속도를  $C_i$ , 굴절축의 속도를  $C_L$ ,  $C_S$ 라 하면 파동방정식으로 다음의 식을 유도할 수 있다

$$\frac{C_i}{\sin\alpha_L} = \frac{C_L}{\sin\theta_L} = \frac{C_S}{\sin\theta_S} \quad (2.10)$$

이 식을 스넬의 법칙(Snell's law)이라 부르고  $\alpha$ , 반사각  $\beta$ , 굴절각  $\theta$ 와 음속의 관계는 이 식으로 나타낼 수 있다. 매질2의 음속  $C_L$ ,  $C_S$ 가 매질1의  $C_i$ 보다 클 때 입사각  $\alpha$ 를 증가해가면 굴절각  $\theta = 90^\circ$ 가 된다. 이때의  $\alpha$ 를 임계각(critical angle)이라 부르고 이 이상의 입사각에서는 굴절파는 존재하지 않고 모두 반사해 버린다. 이 현상을 전반사라 부른다<sup>(32)</sup>.

Fig.2-5 (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.2-6은 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 썬기 각도 범위를 계산하면 아크릴 수지와 강재와의 경계면 경사 입사시의 반사 및 굴절을 식 (2.10)에 적용하고, 강재중의 종파 음속  $C_L'$ 는  $5,900m/s$  , 횡파 음속  $C_S'$ 는  $3,230m/s$  , 그리고 아크릴 수지 중의 종파 음속  $C_L$ 은  $2,730m/s$  이다.

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

$$\frac{\sin\alpha_L}{\sin\theta_S} = \frac{C_i}{C_S'} \tag{2.11}$$

아크릴수지의 썬기각도  $\alpha$ 는 입사각에 상응한다. 또 강재 중에 횡파만을 전달시키기 위해서는 굴절 종파가 나오지 않도록, 다시 말해 굴절종파에 대한 임계각  $\alpha_{LC}$ (제1임계각) 이상으로, 또 굴절 횡파가 나오도록 다시 말해 굴절횡파에 대한 임계각  $\alpha_{SC}$ (제2임계각) 미만이 되도록 조정할 필요가 있다. 임계각  $\alpha_{LC}$ ,  $\alpha_{SC}$ 를 식 (2.11)에 대입하면 다음의 관계가 성립한다.

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

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

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

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

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



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

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

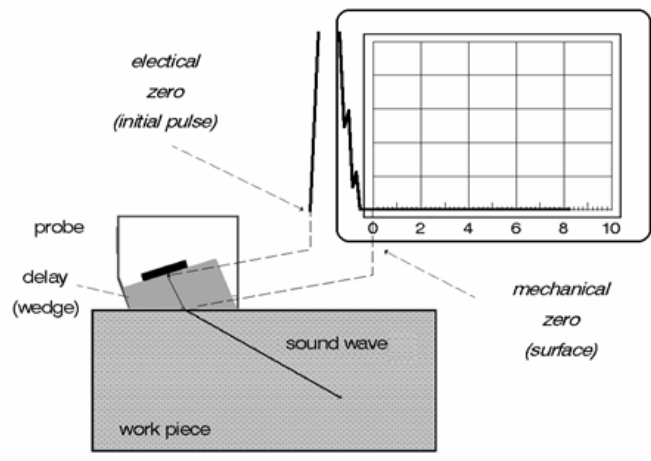


Fig.2-6 Angle beam probe

(2). 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  $70^\circ$  부근에서의 음압반사율은 최소값인 약 13%이다. 이것은 입사한 종파의 초음파의 대부분이 횡파로 모드 변환한 것

을 의미하고 종파의 대부분은 소실한 것이다. 이와 같은 현상을 모드변환 손실이라 한다<sup>(24)</sup>.

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 수직한 면에서는 입사각이 20°가 되고 반사파는 모드변환에 의해 횡파 외에 종파도 발생한다. 횡파의 반사각은 20°, 종파의 반사각은  $\beta_L$ 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 세로 구멍, 표면균열 등의 표면개구결함, 한면 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 결함 에코높이는 굴절각 70°의 탐촉자에 비해 약 절반의 높이에 해당된다. 결함 에코높이를 같게 하기 위해서는 굴절각 45°의 탐촉자에서는 굴절각 70°보다도 감도를 6dB만큼 높여줄 필요가 있다. 이 차는 탐상감도의 조정시에 발생한 세로구멍부분의 모드변환손실 영향분에 상당한다<sup>(25)</sup>.

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.

### 제 3 절 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT)시스템

#### 1. NAUT 탐상 시스템

##### 가. 수동 탐상 장치

비접촉 공중 초음파 검사에서 사용하는 구형 Burst 초음파는 기존 펄스 초음파보다  $400[kHz] \sim 800[kHz]$  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, 고감도 의 탐촉자로 보완하여 공기를 매질로 하는 초음파 탐상이 가능하도록 하여 기존의 접촉식 방법을 보완한 탐상기술이다.

Fig.2-7은 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 유닛, Pre-amp 및 A-Scan 측정 S/W로 구성되어 비교적 실험장치가 간단하다.

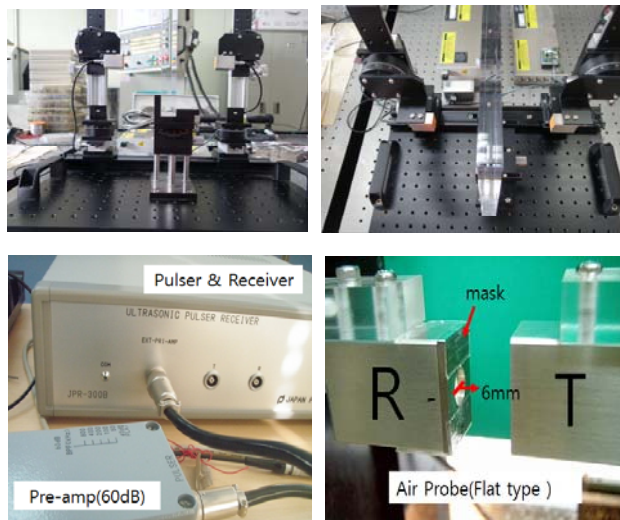


Fig.2-7 Composition of manual NAUT units for A-Scan inspection

## 나. 자동 탐상 장치

본 시스템은 고감도 Air Probe, High power 초음파 신호 처리용 PXI 고속디지털 이저, 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 공기간에 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 2축으로 구성된 정밀스테이지를 통하여 최대  $400[mm] \times 400[mm]$ 의 평면을  $0.1 \sim 20 mm$  pitch( $0.1mm$  step),  $1 \sim 300mm/sec$ ( $1mm/sec$  step)로 스캔하고 화상화가 가능하다.

탐상면에 결함이 있는 경우 결함 에코 높이에 대응하여 표시점의 휘도를 높인다. 컬러표시의 경우에는 색을 변화 시키고 결함 에코를 검출하기 위한 검사범위(탐상면으로 부터의 거리)를 게이트에 의해 이동시키거나 에코 높이 대신 결함 에코까지의 시간변화를 색별로 표시하면 탐상 면으로부터 일정 깊이마다 표시한 결함의 평면도(C-Scan)가 얻어진다. 본 시스템은 A-Scan으로 얻어지는 시험체의 반 응신호를 수합하여 영상을 구축하는 원리를 사용하였다.

점접속탐촉자를 사용할 경우, 접촉거리를 설정하여 결함 부분에 접촉되므로 미세 결함 검출과 동시에 선명한 고해상력의 화상 취득이 가능하다. 따라서 본 시스템은 기존에는 적용이 곤란했던 항공기, 자동차용 탄소섬유 복합재료의 박리 검사 등을 물 등의 접촉매질을 필요로 하지 않고 비접촉으로 검사하는 것이 가능하다. 자동 스캔 화상 장치는 Fig.2-8과 같다. Fig.2-9에서는 Pulser receiver를 이용한 NAUT시스템의 구성을 나타내고 있다.

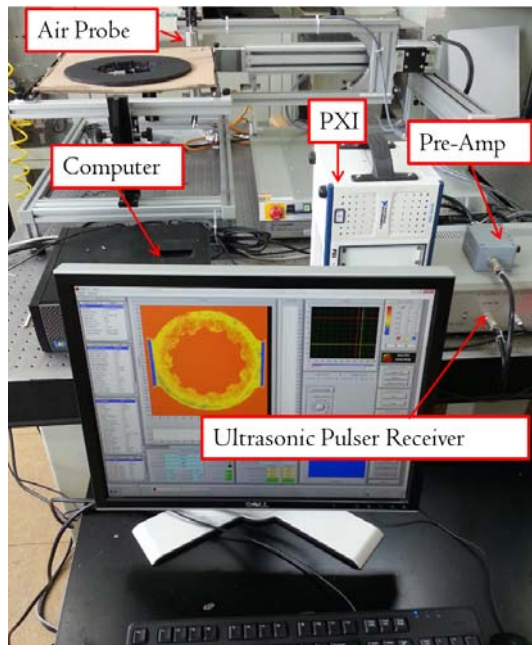


Fig.2-8 Auto image scanning equipment

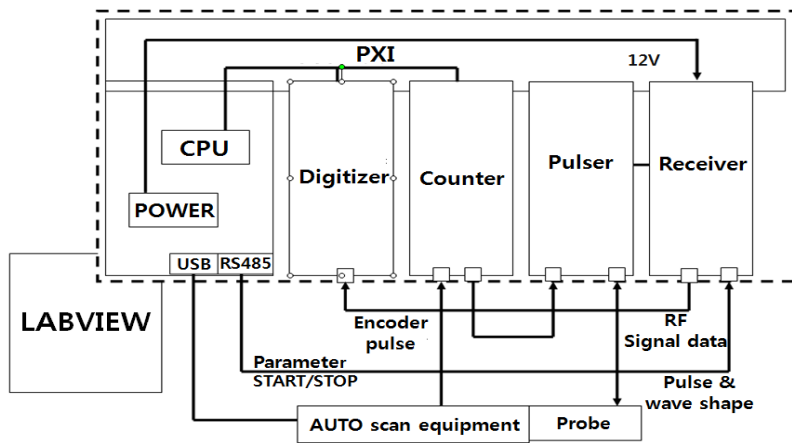


Fig.2-9 Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined

본 시스템은 PC와 Probe를 장착한 자동스캐너장치, 확장 하드웨어로 구성되어 있다. 초음파의 송신부터 triggering, 검사대상물을 고정시키는 스테이지의 X축, Y축 제어, 펄스신호의 송·수신, 해석, 데이터 출력 등 시스템의 다양한 채널화 대응이 가능하다. Fig.2-10은 NAUT21(Auto scan equipment)로부터 데이터 결과 값을 출력하기 위한 과정을 나타내고 있다<sup>(26)</sup>.

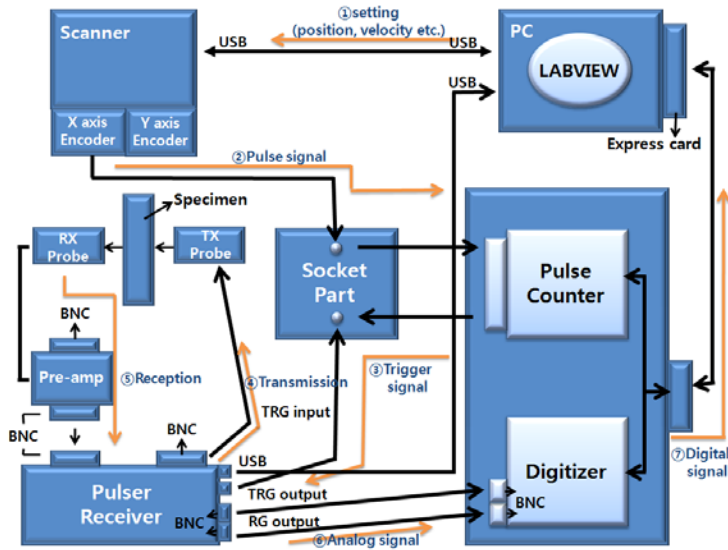


Fig.2-10 Data output from NAUT21 system

## 2. 고감도 비접촉 탐촉자

### 가. 탐촉자의 구조 및 종류

Fig.2-11은 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 재질의 초음파 탐상에 적용 가능하며 특히 탄소섬유 강화 탄화규소 복합체 내부결함 검출 시 정밀도 높은 탐상이 가능하다. 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 사용 가능 주파수에 대한 연구를 수행하는 것도 반드시 필요하다.

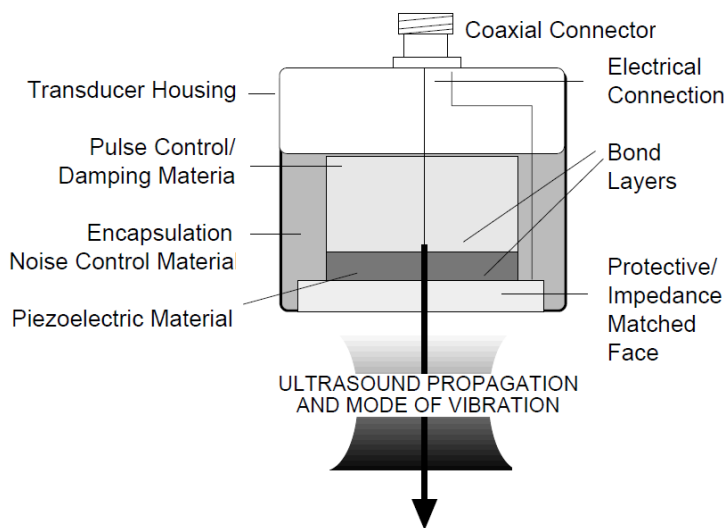


Fig.2-11 Configurations of air probe

Fig.2-12 (a), (b)는 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)



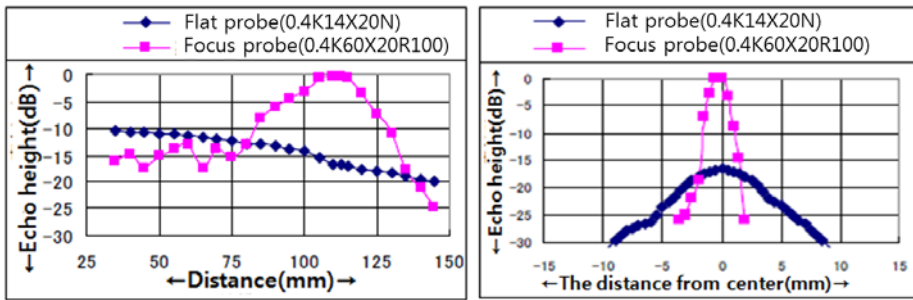
(b) Flat type air probe(0.4K14×20N)

Fig.2-12 Air Probe



## 나. 탐촉자의 특성 비교

반사원은  $\phi 6[mm]$ 의 파이프를 사용하였고 선집속탐촉자의 집점거리<sup>(24)</sup>는  $R=110[mm]$ 로 집속되고 있는데 집점 근방에서 평면탐촉자와 비교했을 때, 약  $15[dB]$ 로 감도가 높게 나타나고 있다. Fig.2-13는 평면탐촉자<sup>(25)</sup>와 선집속탐촉자<sup>(26)</sup>의 특성을 비교한 결과를 보여주고 있다<sup>(27)</sup>.



(a) Flat type probe

(b) Line focus type probe

Fig.2-13 Comparison of flat type probe and line focus type probe

집속탐촉자는 공칭주파수  $400[kHz]$ , 진동자 직경  $20[mm]$ , 집속거리  $R=38[mm]$ 의 것으로 사용하였고 거리특성 및 빔직경은 점집속탐촉자에서 방사되는 초음파를 Hydro hon으로 수신하고 측정하였다. Fig.2-14에서는 Hydro hon을 이용한 측정법을 나타내고 있다.



Fig.2-14 Measuring method with Hydro hon

Fig.2-15(a)의 거리특성은 Hydro hon과 탐촉자 사이의 거리를  $mm$ 로 설정하였는데 수신된 초음파가 최대로 설정된 집속거리와 일치하고 있다. 집속근방 빔 직경

(-6dB)은 약 2[mm]이며, 주파수 특성이 50[kHz]~800[kHz] ±2[dB] 이내의 무지향성<sup>(28)</sup>으로 사용하였으며, 다음 결과를 Fig.2-15(b)에 나타내었다.

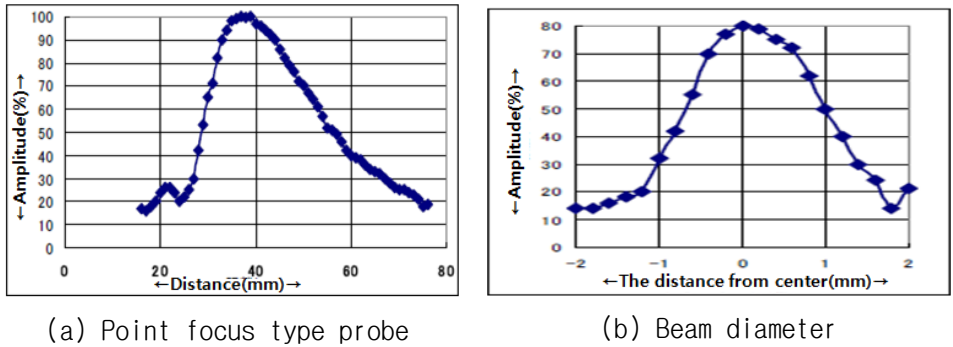


Fig.2-15 Distance between point focus type probe and beam diameter

점집속탐촉자와 평면탐촉자의 음장을 계산한 결과를 Fig.2-16과 같이 나타내었다. Fig.2-16(a)를 통해 집점 근방의 음압이 높고 빔이 잘 집속되고 있음을 알 수 있다. 점집속탐촉자는 축대칭을 위한 편축 정도를 보이고 있으며, 근거리에서는 빔 직경이 크고 집속근방에서 빔 직경은 약 2mm가 된다.

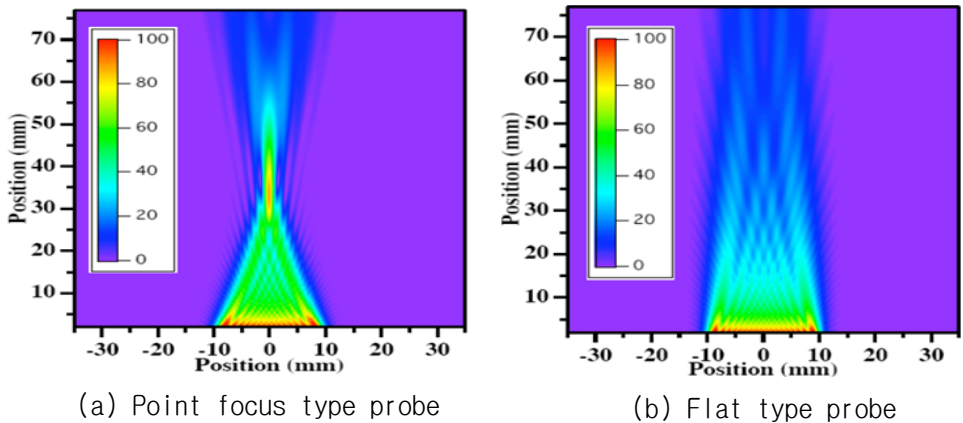


Fig.2-16 Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe

집속탐촉자의 집속점 근방 및 근거리에서의 음장 예를 Fig.2-17에 나타내었다. 빔 직경에서 계산값과 실험값(Hydro hon에 따른 측정값)이 거의 일치하고 있다. 레일리 적분에 따라 진동자의 미소요소로부터 원통파면이 출력되고 있어 음압을 모두 계산하였다<sup>(29)</sup>.

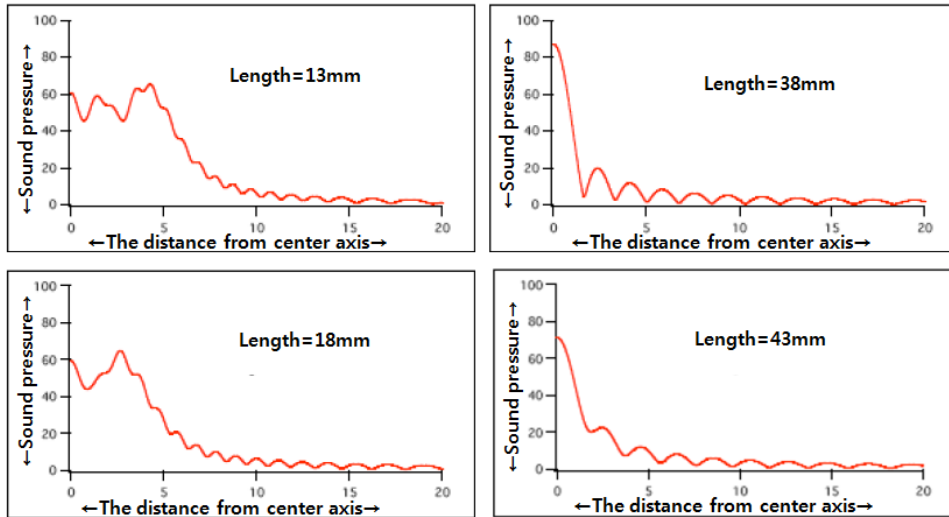


Fig.2-17 Application of near sound field from focus type probe

$$p = i\omega\rho \int_s \frac{e^{-ikr}}{r} ds \quad (2-10)$$

여기에서,  $\omega$ : 각주파수,  $\rho$ : 재료밀도, S: 진동자면,  $r$ : 미소면적  $ds$ 와 관측위치 거리이다.

## 제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상(NAUT) 실험

### 제 1 절 시험편

비접촉 공중 초음파 탐상기법의 유용성 검증을 위해 Fig.3-1과 같이 결함 있는 CFRP의 시험편을 준비 하였다. 결함 시험편은 충격 시험 후 제작 된 시험편 이다. 시험편은 100×150mm, 두께는 7mm 규격으로 제작 되었다.



Fig.3-1 Specimens of CFRP

비접촉 공중 초음파 탐상기법을 이용한 항공기용 Cf-C 브레이크 디스크의 C-Scan 모드 탐상을 위하여 정상시험편과 결함시험편을 제작하였다. Cf-C 브레이크 디스크 정상시험편 및 결함시험편의 제작사항은 Fig.3-2(a),(b)에 나타내었다. Fig.3-3은 제작된 Cf-C 브레이크 디스크 정상시험편과 결함시험편의 실물을 나타내고 있으며, Fig.3-3 (a)은 마스킹 전이며, Fig.3-3 (b)은 마스킹 후의 시험편을 나타내고 있다.

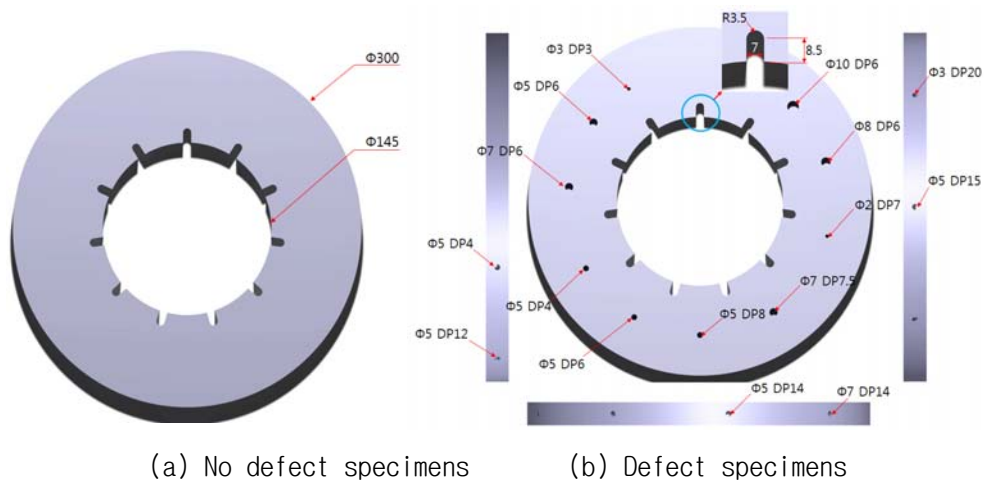
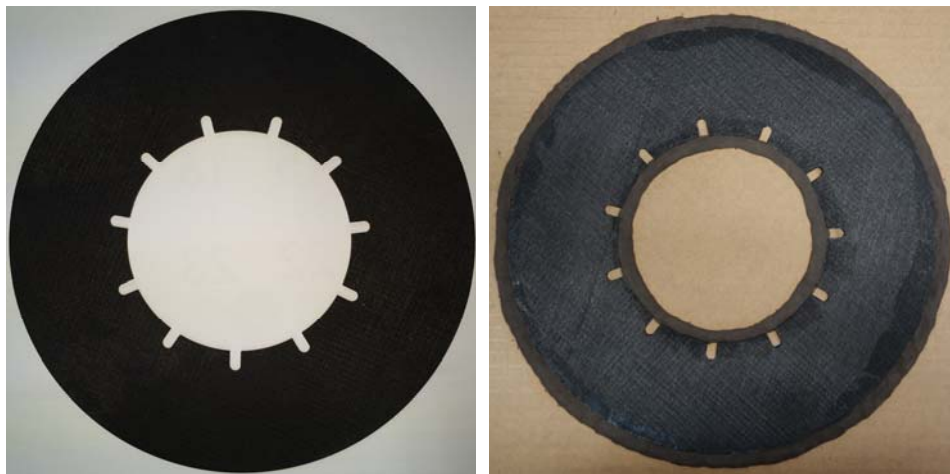
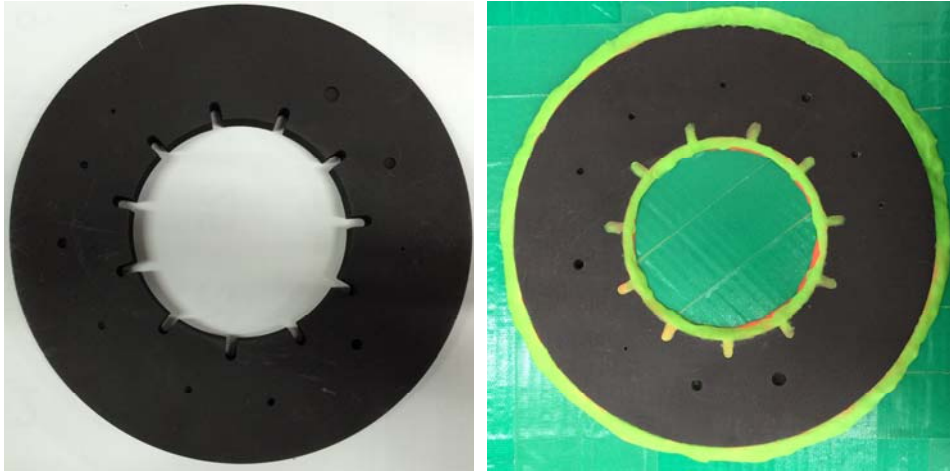


Fig.3-2 Design of Cf-C brake disc specimens



(a) No defect specimens



(b) Defect specimens

Fig.3-3 Specimens of Cf-C brake disc

## 제 2 절 NAUT 탐상 실험 및 고찰

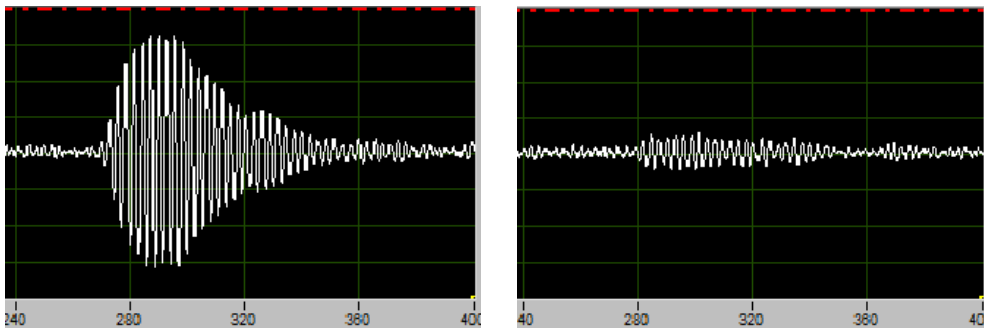
### 1. NAUT A-Scan 수동 탐상 실험 및 고찰

본 실험에서는 평면형 공중 초음파 탐촉자(0.4K14×20N, 0.8K14×20N)를 사용하였다. 일반적으로 위치 고정타입의 수동탐상 시에는 초음파 빔을 집중할 필요가 없으므로 평면형 공중 초음파 탐촉자를 사용하였다.

#### 가. 결함 유무에 따른 파형 분석 비교

Fig.3-4는 시편 결함부분과 정상부분의 초음파 투과 파형을 비교한 것이다. 시편 정상부분은 초음파 투과율이 높은 것으로 확인 되었고 결함 부분과 정상부분 비해 초음파의 투과율이 현저히 낮아지는 것을 확인 하였다. 이는 결함부분을 충격 시험 후 내부에 접합부분을 파괴하기 때문에 생성된 공기층에 초음파를 투과하지 못하는 것으로 판단된다.

즉, CFRP내부 결함 유무는 초음파의 투과 파형으로 판단이 가능하다.



(a) Non defect part

(b) Defect part

Fig.3-4 Comparison of the waveform depending on the presence of defects

## 나. 초음파 집속 거리에 따른 투과파 진폭 측정

초음파 집속 시 초음파 감쇠특성을 분석하기 위하여 A-Scan 투과실험을 수행하였다. 시험편은 CFRP A 시험편을 이용하여 송·수신 공중 초음파 탐촉자의 집속거리 변화에 따른 투과파의 진폭관계를 분석하였다. Table 3-1은 집속거리와 진폭의 관계를 분석한 결과값 이다.

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(800kHz)

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(400kHz)

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		

#### 다. 실험 분석 결과 및 고찰

Fig.3-5의 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.3-6의 그래프에서 확인 할 수 있듯이 초음파 주파수 800kHz , 400kHz 로 진폭변화를 관찰하였으며, 800kHz 의 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. 400kHz 의 경우에는 집속거리 100mm 이상부터는 진폭이 감소되는 경향은 있지만 시험편 내부의 초음파 투과는 이루어지고 있음을 알 수 있다.

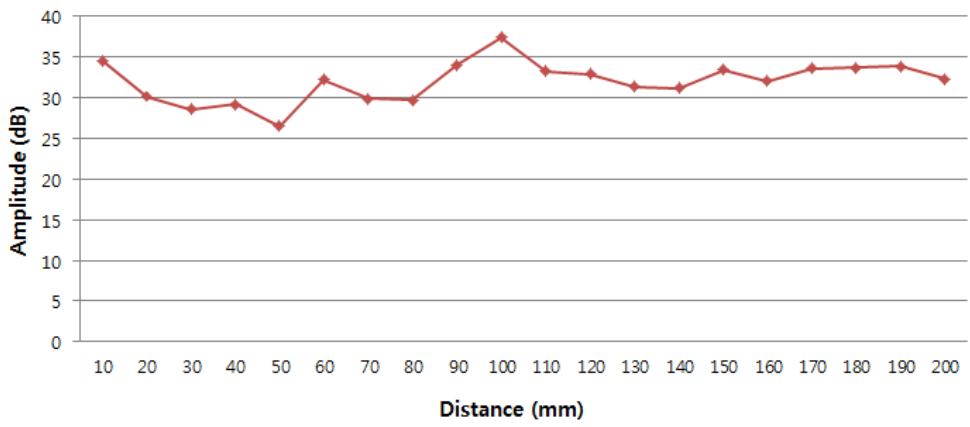


Fig.3-5 Results of Focal distance and amplitude

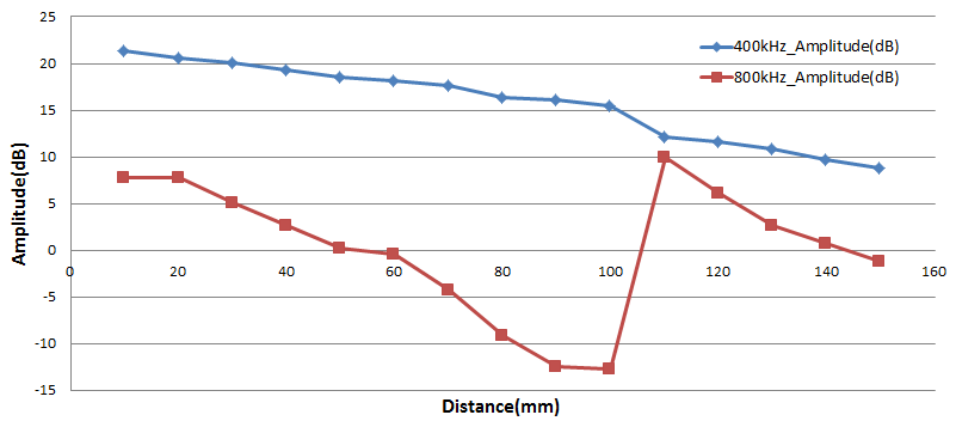


Fig.3-6 Results of Focal distance and amplitude(800kHz, 400kHz)

## 2. NAUT C-Scan 자동 탐상 실험 및 고찰

### 가. 실험 조건

결함시험편은 후면부와 측면부에 원형 인공결함을 만들어 초음파 C-Scan 모드 탐상 실험을 진행하였다. 비접촉 공중 초음파 탐상검사 시 시험편에 초음파가 입사되고 투과가 진행될 때 시험편의 면적 방향으로 가이드파에 의한 초음파 에너지 손실이 발생하게 된다<sup>(30)</sup>. 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.

실험 시 시험편에 마스킹 유무에 따른 C-Scan 모드 탐상을 수행하였으며, 마스킹을 하지 않은 정상시험편 및 결함시험편의 C-Scan 모드 탐상 검사 설정 조건은 Table 3-4에 나타내었으며, 마스킹 되어진 정상시험편 및 결함시험편의 C-Scan 탐상 검사 설정 조건은 Table 3-5에 나타내었다. 마스킹 되어진 시험편의 탐상실험은 인가되는 초음파 주파수 대역을  $340kHz$ ,  $400kHz$  설정하여 측정된 C-Scan 화상 결과를 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.3-7은 본 NAUT 시스템에서 구현하는 C-Scan 모드의 컬러맵 표시방법을 나타낸 것이다.

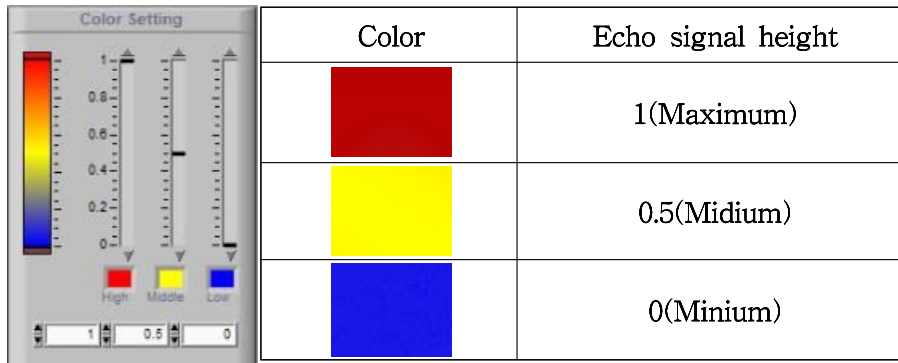


Fig.3-7 Color map Display of C-Scan mode by echo signal

Table 3-4 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 3-5 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

## 나. 실험 방법

실험 시, 비접촉 공중 자동 결함 scan 시스템을 이용한 결함 화상화 방법은 NI Controller 장치의 전원을 켜고 화상 S/W를 실행시킨 후 정밀스태이지 통신상태 설정, 디지털타이저 세팅, Pulse Counter 세팅, 측정 조건 설정값을 입력한다. 실행 프로그램을 통해 원점복귀, 기준위치 이동 등을 수행하여 결함 화상 탐상 이전의 조건과 일치시킨다. Pulser Receiver 설정 화면에서는 구형Burst 투과 신호를 A-Scope 로 검출하기 위해서 Gain Frequency, Voltage, Wave Number, LPF, HPF, 등을 조정하고 측정 범위 설정 화면에서 측정 원점, 대각점, pitch, 속도 등을 설정하고 위와 같은 조건이 충족되었을 때 화상 스캔을 수행하였다. 이와 같이 scan 이 시작되면 송신 전압, 주파수, 파수, 화상 수정위치, 수평시간, gate 위치를 통해 화상결과를 파악한 후 최종 화상을 취득하고 Fig.3-8에 화상탐상 수행 과정을 나타내었다<sup>(31)</sup>.

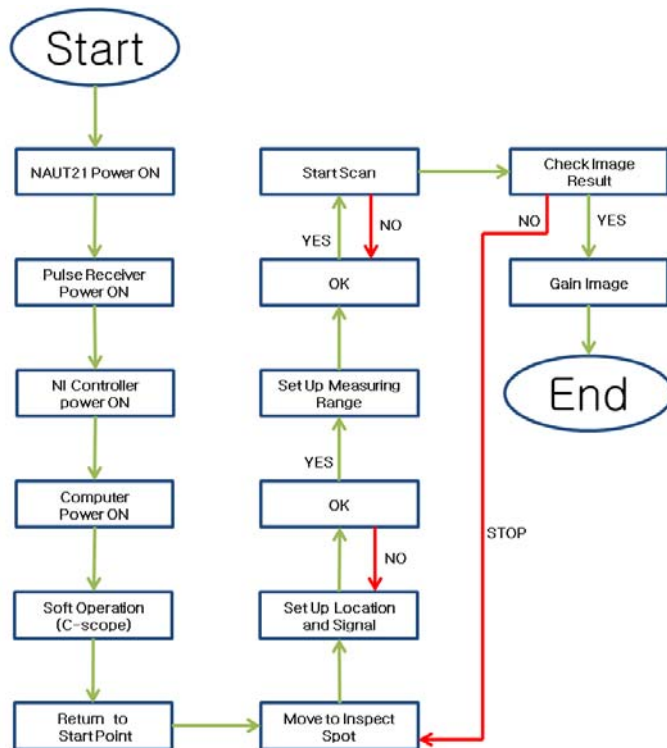


Fig.3-8 Auto image inspection program execution

또한 측정 범위 설정 시 Measuring Start Point, Measuring Opposite angle point, Measuring Pitch, Measuring Velocity로 설정 하였으며 탐상 이미지 결과 확인 시 Transmission Voltage, Transmission Frequency, Transmission Wave Count, Gain, Image Revising Location, Horizontal Time, Gate Location 로 확인 하였다.

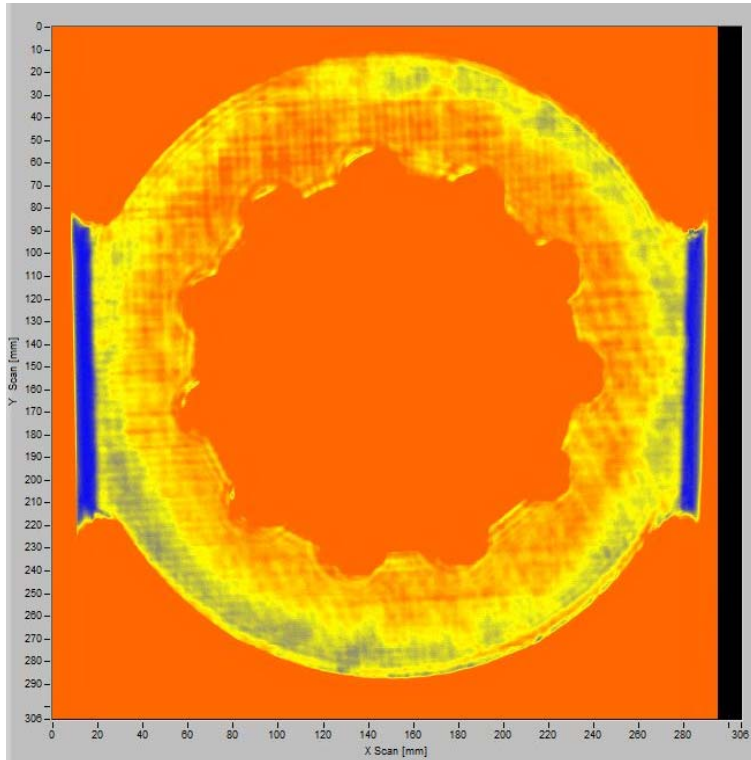
#### 다. 실험 분석 및 고찰

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.

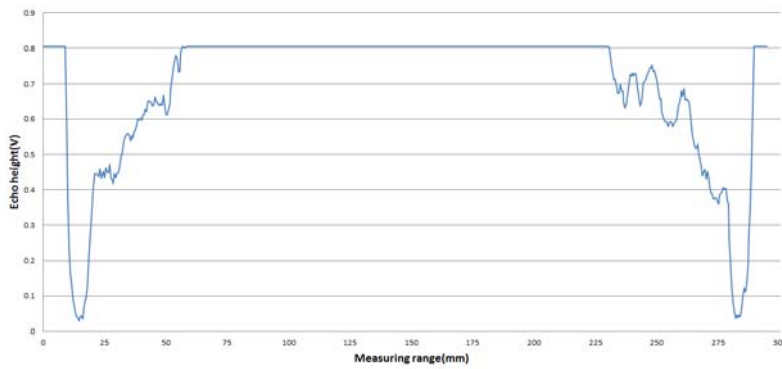
Fig.3-9 (a)는 마스킹을 하지 않은 정상시험편의 C-Scan 화상결과를 나타내고 있으며, Fig.3-9 (b)는 가이드파에 의한 x축(Scanning axes) 에코높이 측정결과를 나타내고 있다. Fig.3-10 (a)은 마스킹을 하지 않은 결함시험편의 C-Scan 화상결과를 나타내고 있으며, Fig.3-10 (b)은 가이드 파에 의한 x축(Scanning axes) 에코높이 측정결과를 나타내고 있다.

Fig.3-11 (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.3-12 (a),(b)은 정상시험편의 초음파 송신 주파수  $400kHz$  일 때, C-Scan 결과 및 에코높이 신호 분석 결과이다.

Fig.3-13 (a),(b)는 초음파 송신 주파수  $340kHz$  일 때, 마스킹된 결함시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다. Fig.3-14 (a), (b)은 초음파 송신 주파수  $400kHz$  일 때, 마스킹된 결함시험편의 C-Scan 결과 및 스캐닝 축인 x축에 대한 에코높이 신호를 측정하여 분석한 결과이다.



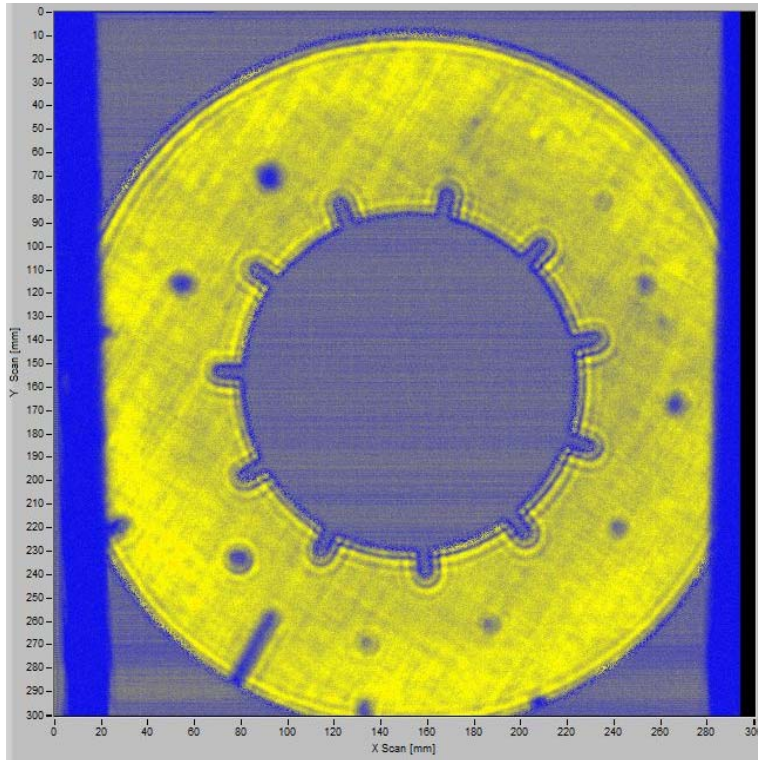
(a) Image of C-Scan mode



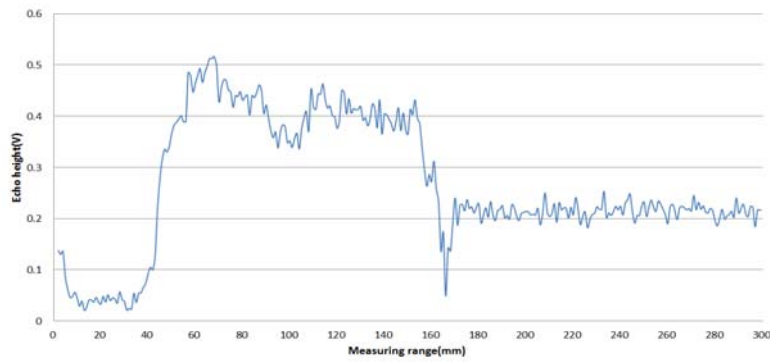
(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-9 Results of C-Scan inspection

(No defect specimens\_no masking)



(a) Image of C-Scan mode

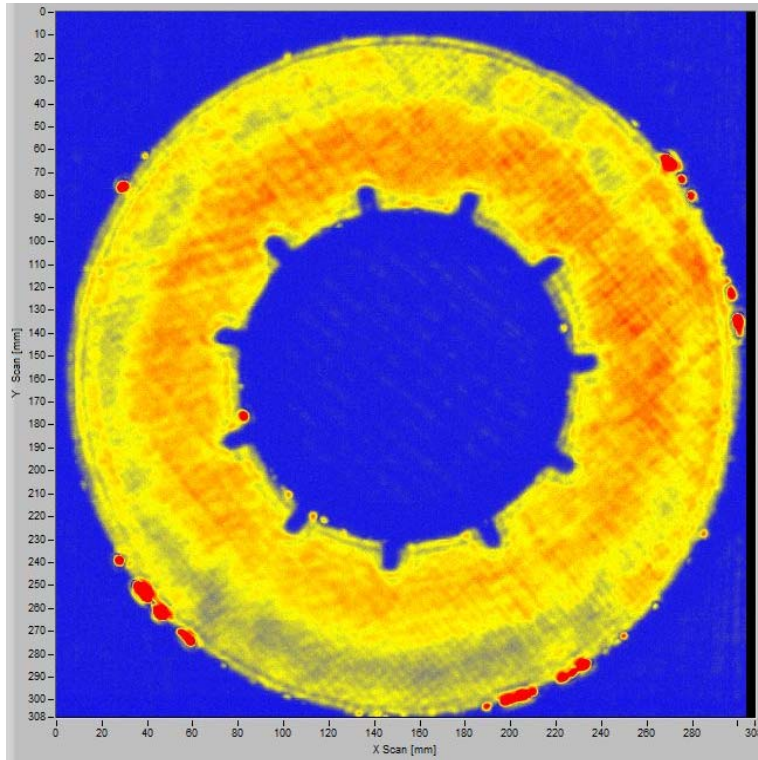


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

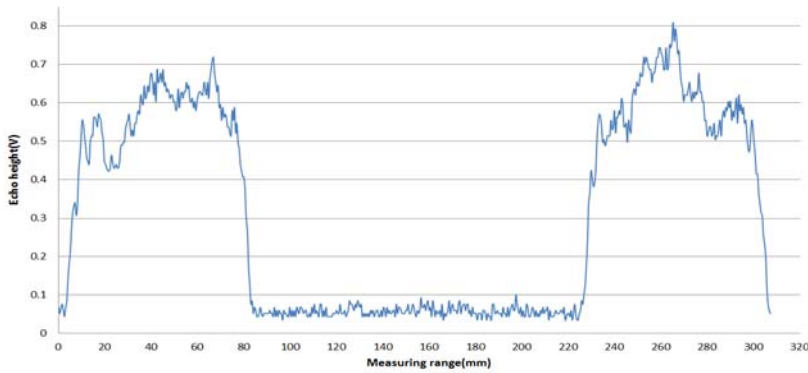
Fig.3-10 Results of C-Scan inspection

(Defect specimens\_no masking)



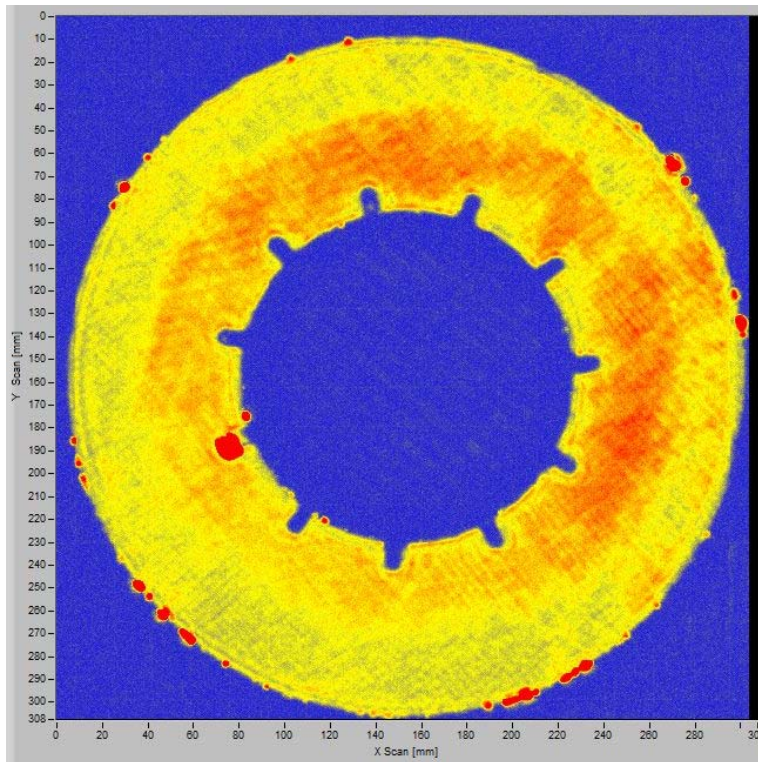


(a) Image of C-Scan mode

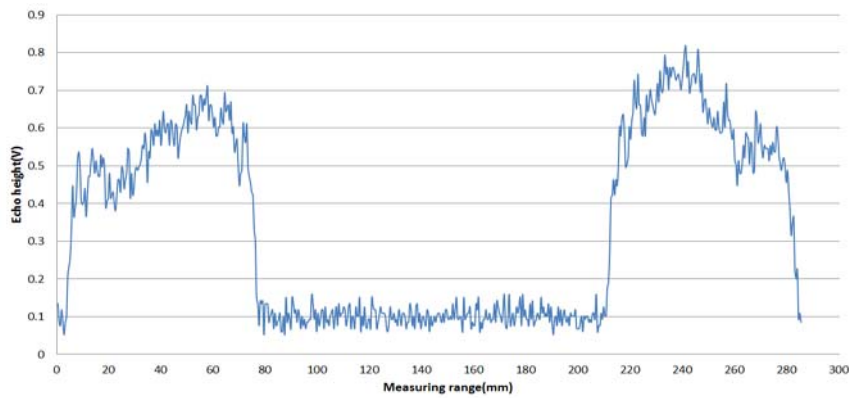


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-11 Results of C-Scan inspection  
(No defect specimens\_masking\_340kHz)

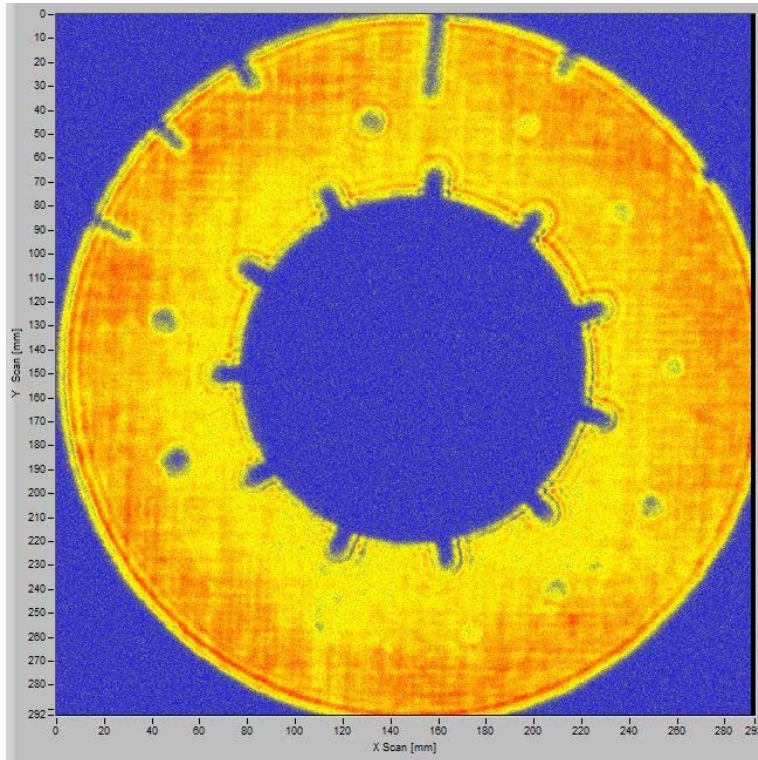


(a) Image of C-Scan mode

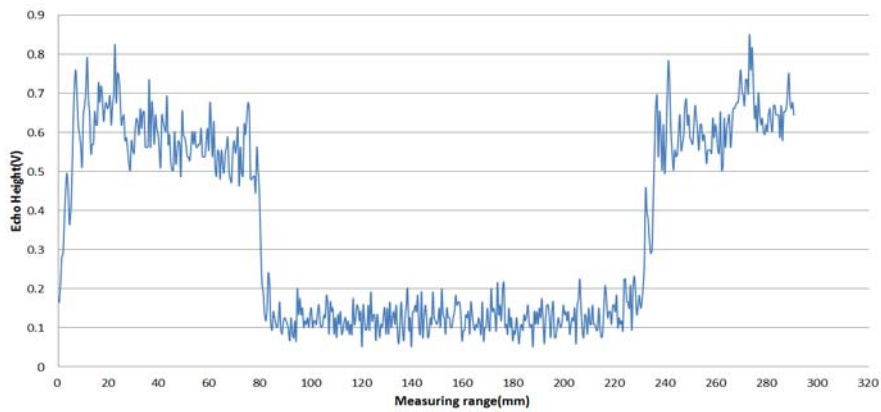


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-12 Results of C-Scan inspection  
(No defect specimens\_masking\_400kHz)

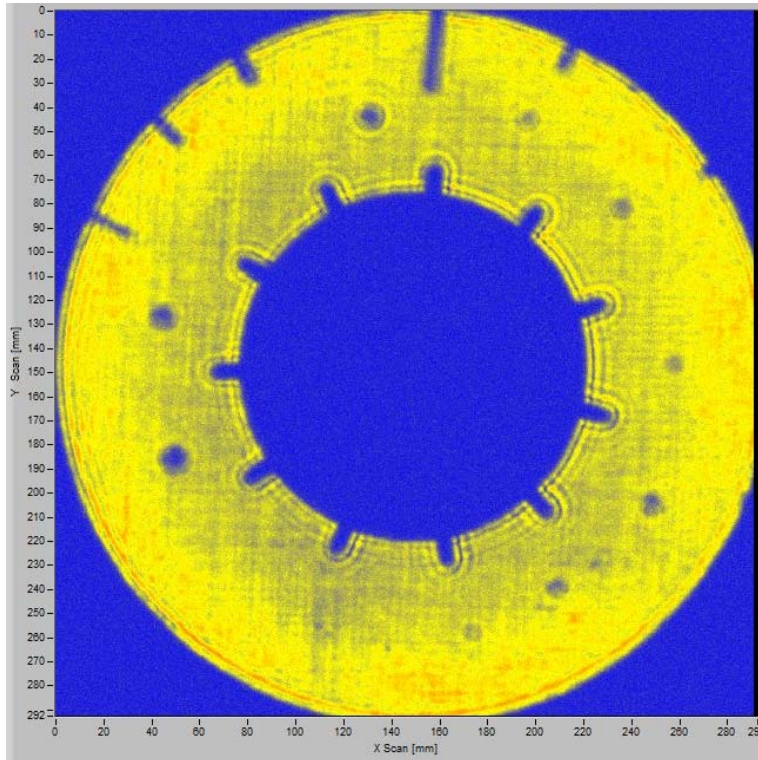


(a) Image of C-Scan mode

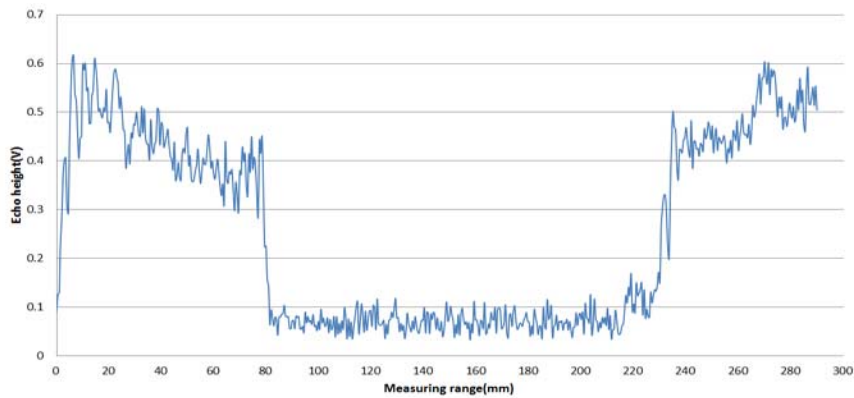


(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-13 Results of C-Scan inspection  
(Defect specimens\_masking\_340kHz)



(a) Image of C-Scan mode



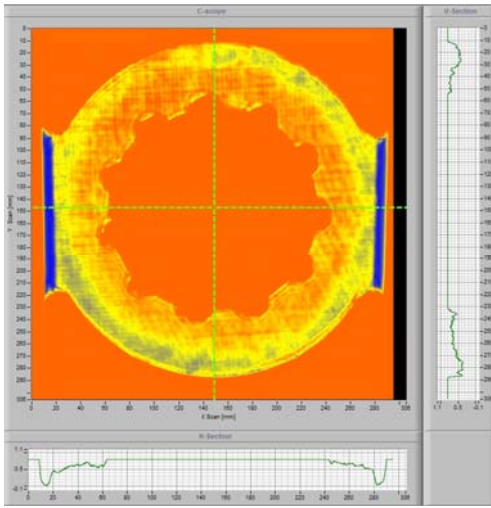
(b) Echo height in x-axes(scanning axes)

Fig.3-14 Results of C-Scan inspection  
(Defect specimens\_masking\_400kHz)

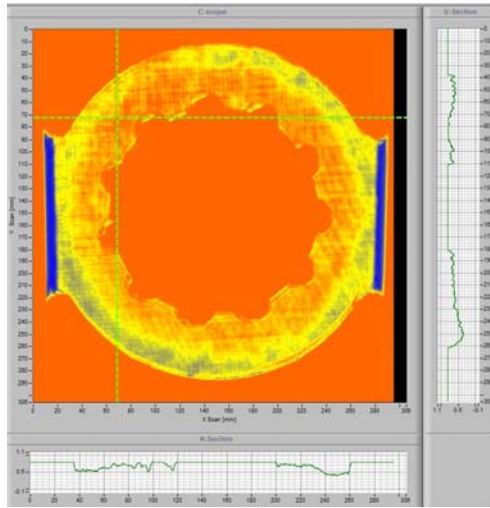
Fig.3-15 (a)에서 확인 할 수 있듯이 정상시험편 마스크를 하지 않는 경우는 초음파 에너지 손실로 투과파가 정상적으로 시험편 내부를 투과하지 못하게 되고 초음파 감쇠에 의해 시험편의 형상이 명확하지 못하게 탐상이 되고 있음을 알 수 있다. 또한 C-Scan 화상결과에서 y축 양측방향으로 청색으로 표시되는 직사각형 부분은 시험편을 거치하는 탐부분이며, 이 부분은 초음파가 투과되지 못하므로 청색으로 표시되는 것이다. Fig.3-9 (b)의 그래프에서와 같이 시험편에 마스크를 하지 않았으므로 공기 중에 초음파가 투과되고 있으며 초음파 에너지가 경계면으로 방출되고 있음을 C-Scan 화상결과로 유추할 수 있다.

Fig.3-16 (a)에서 볼 수 있듯이 결함시험편에 마스크를 하지 않아 시험편 단면형상 탐상의 화상 왜곡현상이 발생하였다. 결함부위는 검출 가능하지만 부분적으로 결함검출이 되지 않은 부분들이 있었으며, 시험편 단면형상의 명확한 화상 결과를 얻기에는 화상 왜곡이 심하였다. Fig.3-10 (b)의 그래프에서는 마스크를 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<sup>(23)</sup>.

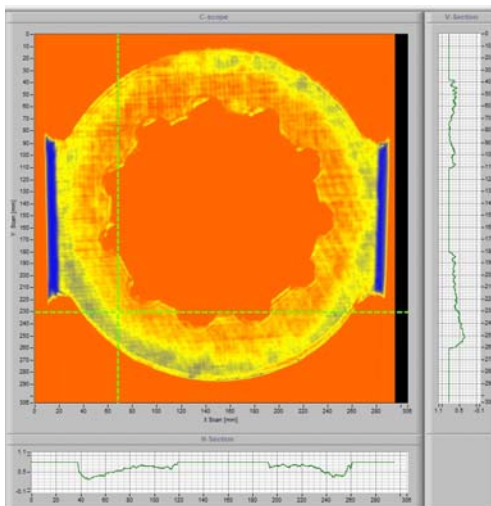
또한 시험편의 평면 내부에 존재하는 인공결함 형태, 위치, 크기는 검출되었지만 인공결함  $\phi 3mm$ 인 경우에는 명확한 검출이 되지 않았으며, 시험편의 측면부의 인공결함도 명확한 검출이 되지 않음을 알 수 있었다.



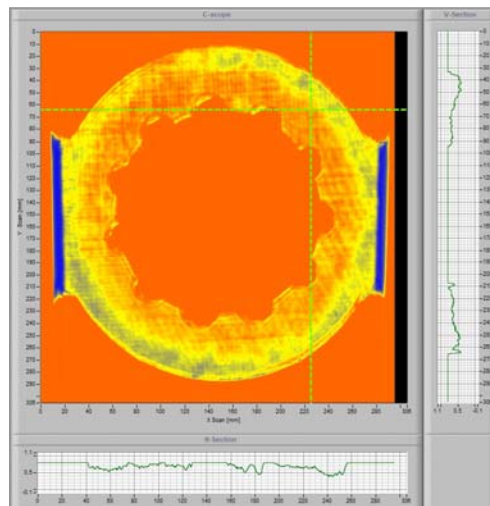
(a) Image of C-Scan(Center line)



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



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



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

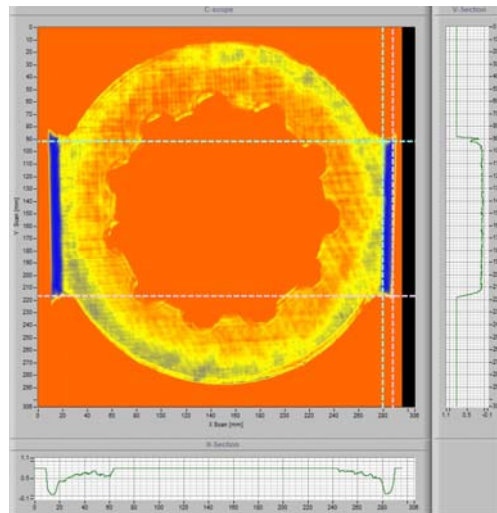
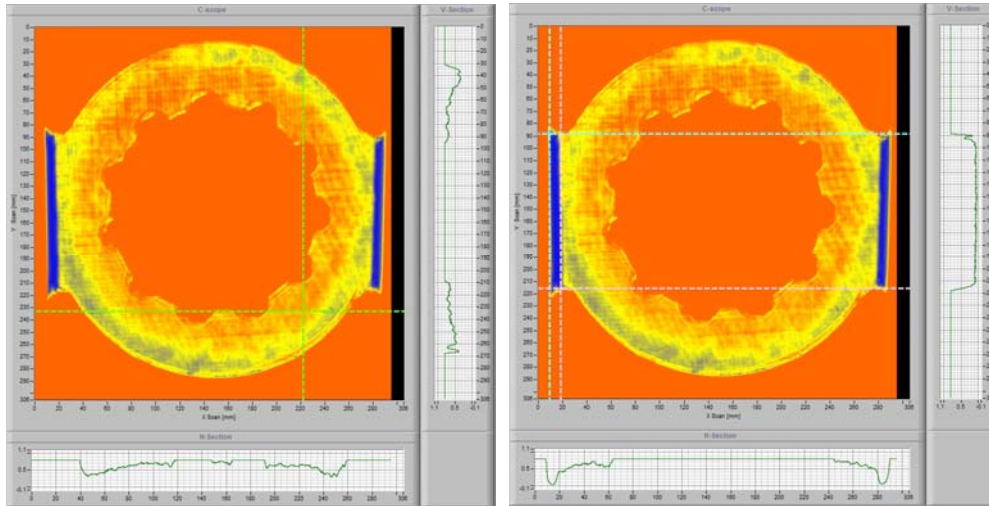
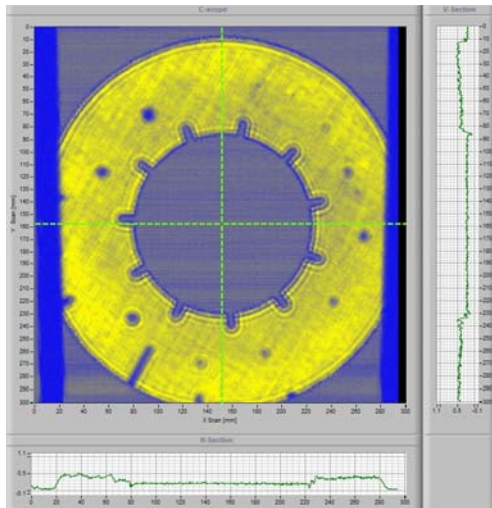
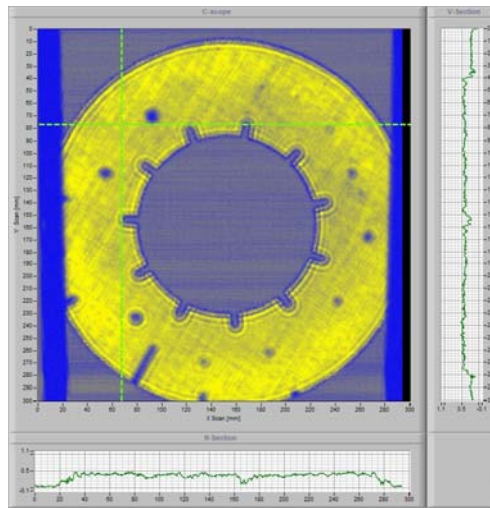


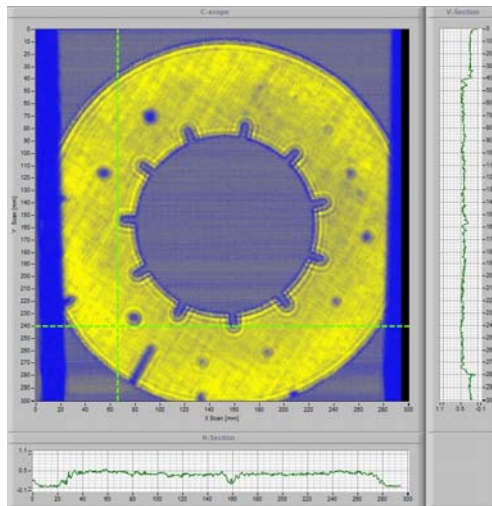
Fig.3-15 Result of C-Scan Inspection(No defect specimens)



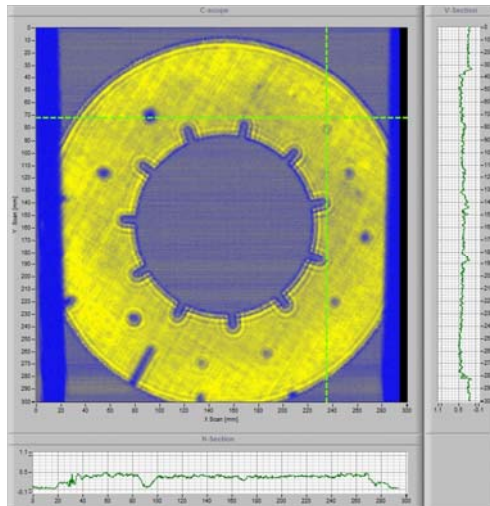
(a) Image of C-Scan(Center line)



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

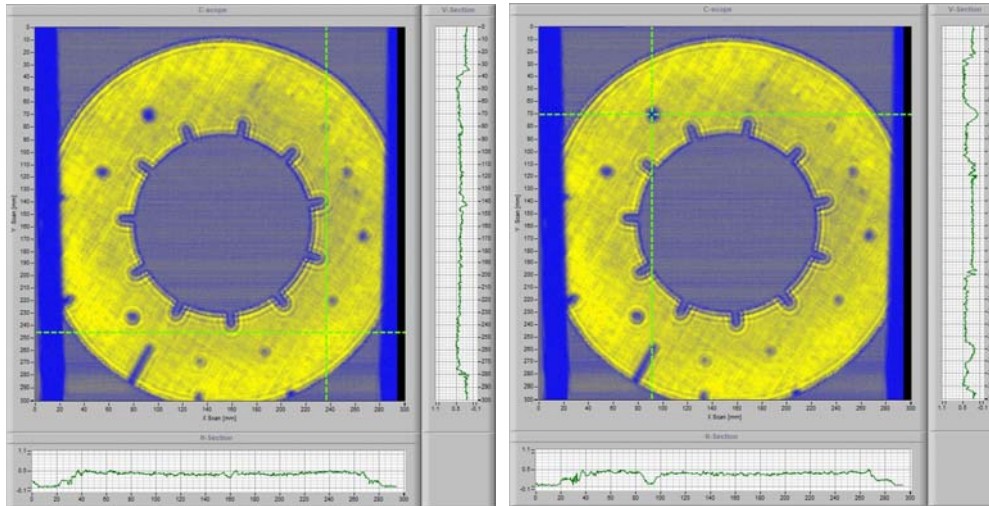


(c) Image of C-Scan(Left bottom line)

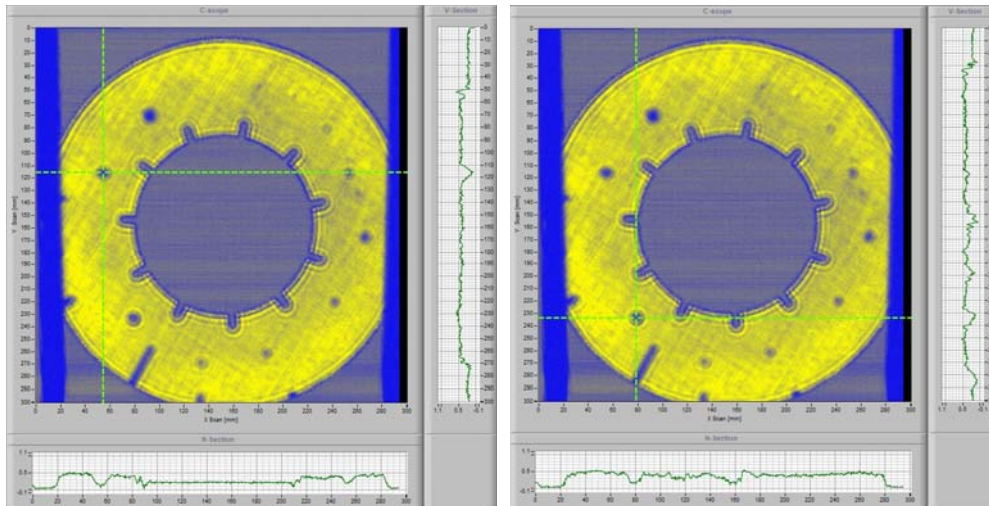


(d) Image of C-Scan(Right top line)

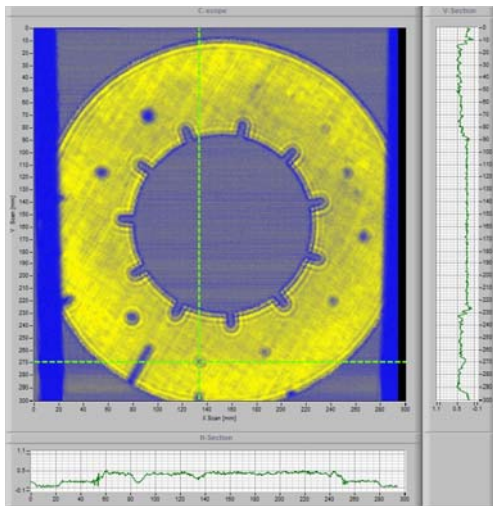




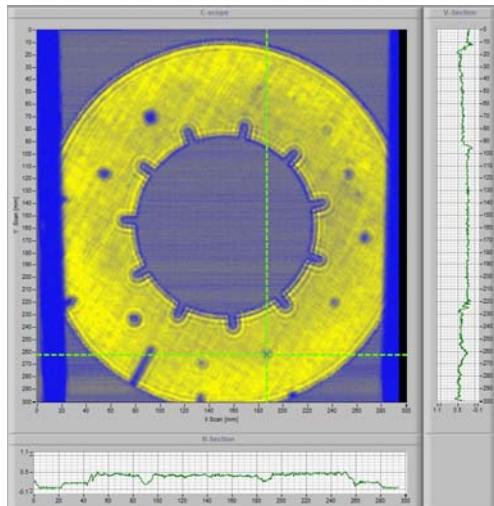
(e) Image of C-Scan(Right bottom line) (f) Image of C-Scan(Defect size :  $\phi 10mm$ )



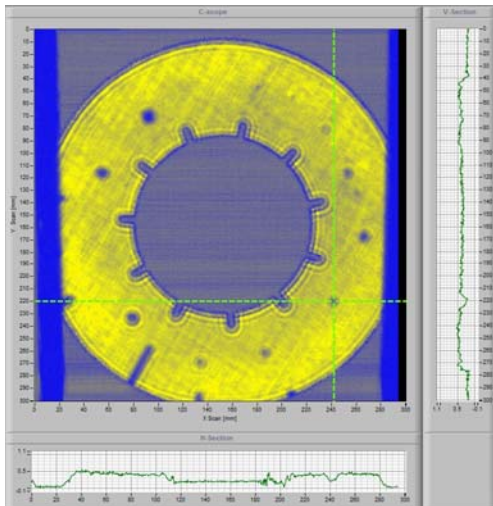
(g) Image of C-Scan(Defect size :  $\phi 10mm$ ) (h) Image of C-Scan(Defect size :  $\phi 8mm$ )



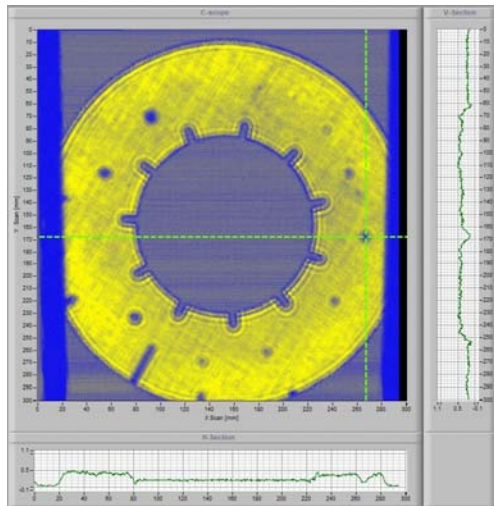
(i) Image of C-Scan(Defect size :  $\phi 7mm$ )



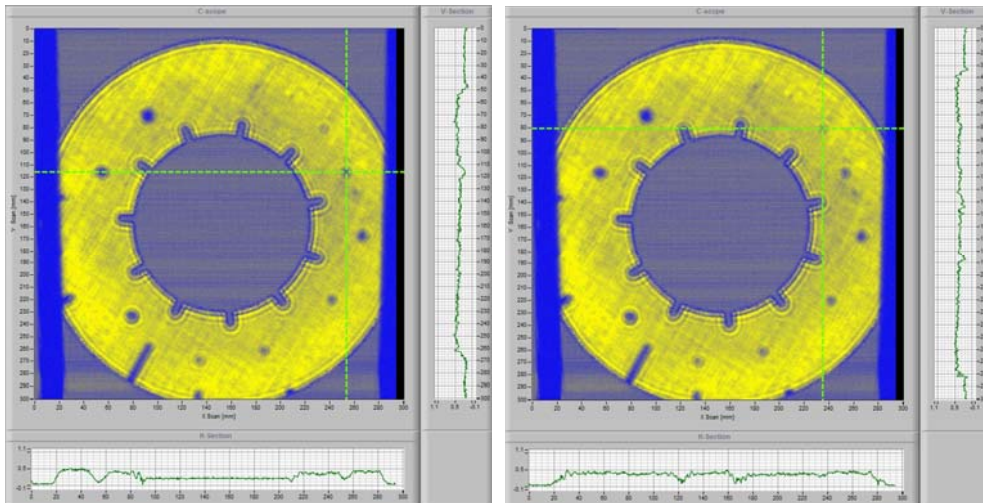
(j) Image of C-Scan(Defect size :  $\phi 5mm$ )



(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.3-16 Result of C-Scan Inspection(Defect specimens)

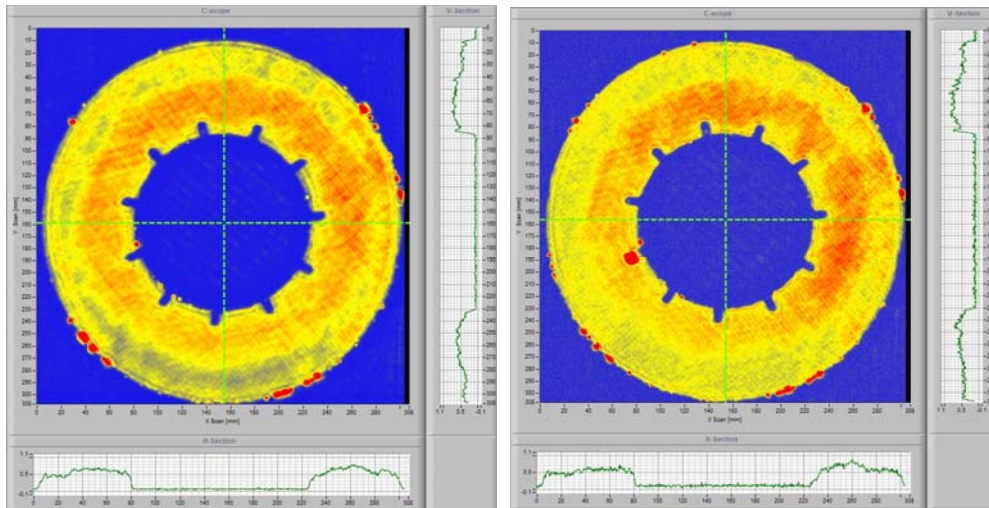
정상시험편과 결함시험편에 각각  $340kHz$  와  $400kHz$  를 인가하여 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

Fig.3-17 (a)은 정상시험편의 초음파 송신 주파수  $340kHz$  로 인가했을 때 C-Scan 화상결과이며, Fig.3-17 (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 밀도차이에 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.

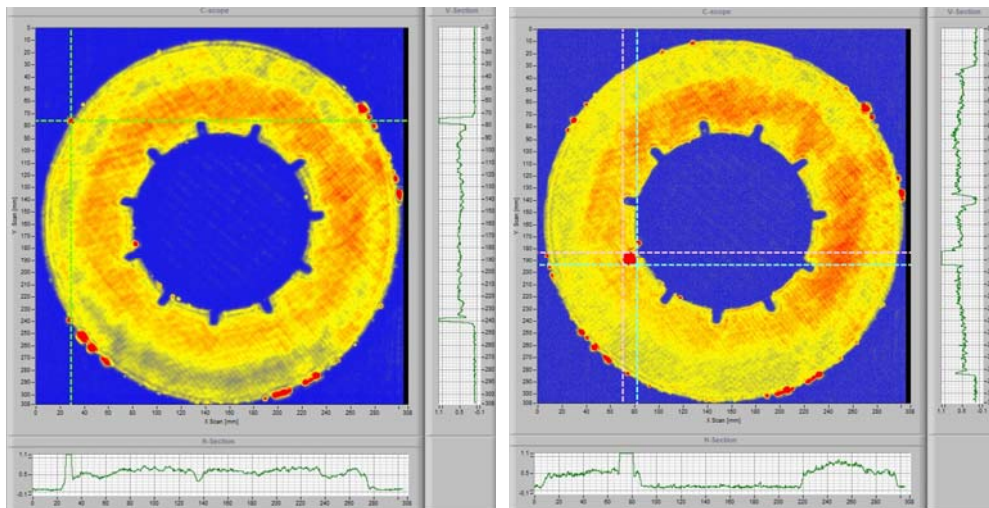
정상시험편의 경우, 초음파 송신 주파수  $340kHz$ 의 결과와 큰 차이점은 없지만  $400kHz$ 를 인가 시 초음파 빔이 단파장 성질이 강해지므로 초음파 빔 거리가 짧아지게 되어 수신부 탐촉자의 이득값(gain)값을 증가시켜야 하므로 노이즈 발생이 커지고 송신부 진폭값이 불안정해지므로 HPF, LPF 등의 사용하여 진폭과 초음파 빔을 안정시켜야 하는 단점이 있다.

Fig.3-19의 결함시험편 C-Scan탐상결과에서 확인할 수 있듯이 초음파 주파수  $340kHz$ ,  $400kHz$ 를 인가하였을 때 결함시험편의 인공결함부는 정상적으로 검출되었다. Fig.3-19 (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.3-11 (b), Fig.3-12 (b), Fig.3-13 (b), Fig.3-14(b)에서 볼 수 있듯이  $340kHz$  인가 할 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)

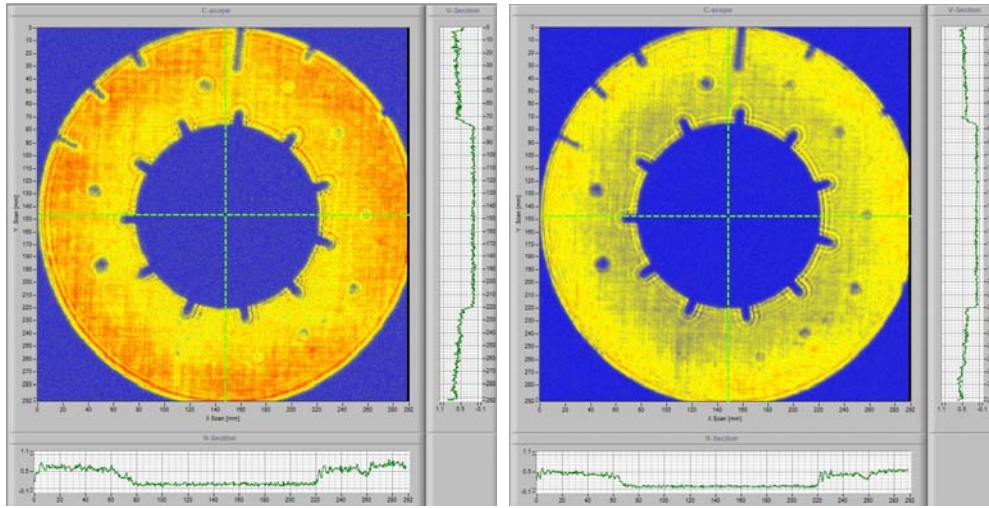
(b) Image of C-Scan (Centerline\_400kHz)



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

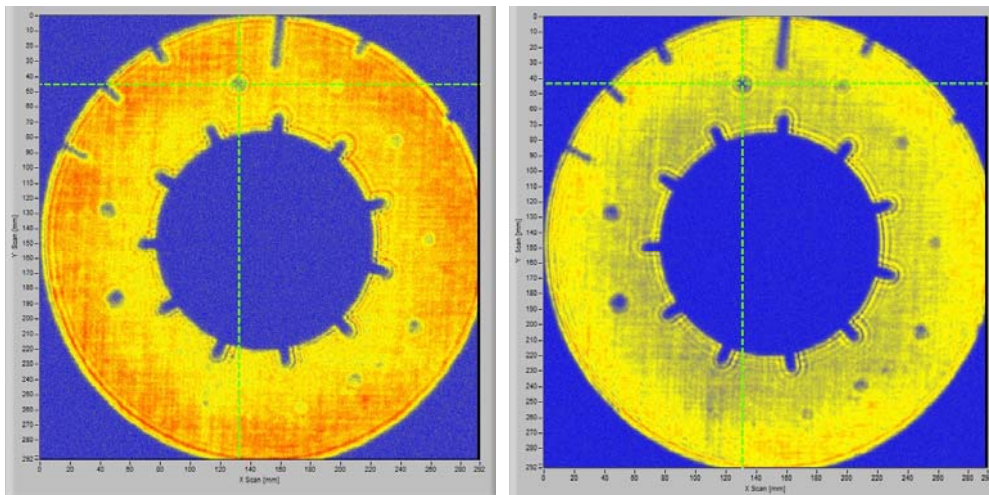
(d) Image of C-Scan(Max. transmitted amplitude-400kHz)

Fig.3-17 Comparison of C-Scan Inspection(No defect specimens)

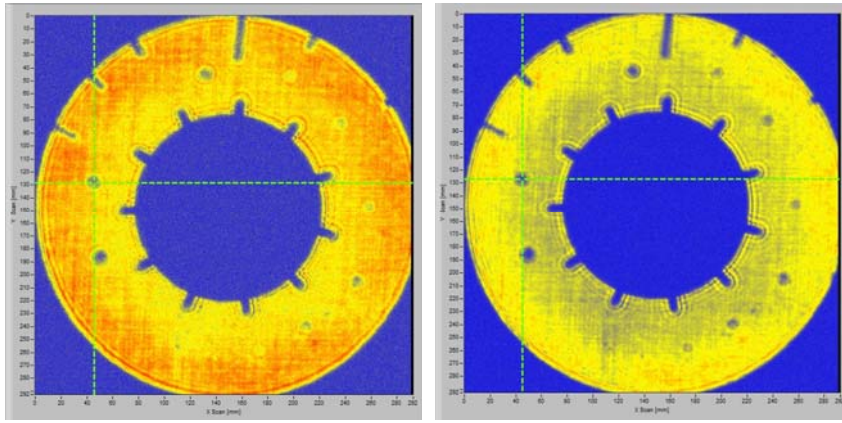


(a) Image of C-Scan(Center line\_340kHz)  
 (b) Image of C-Scan(Center line\_400kHz)

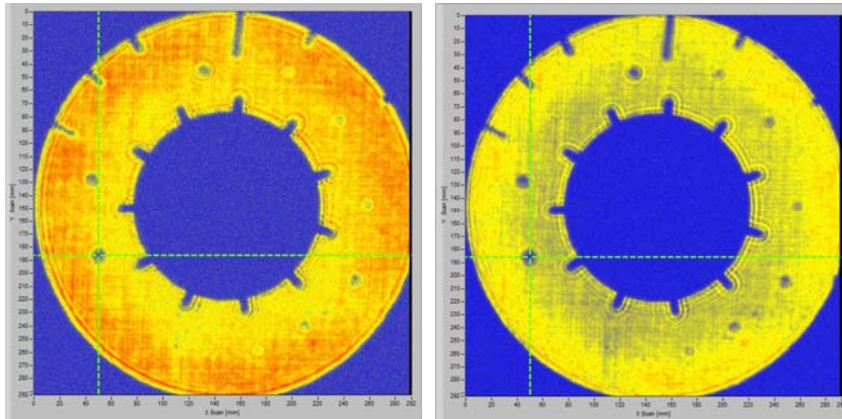
Fig.3-18 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens)



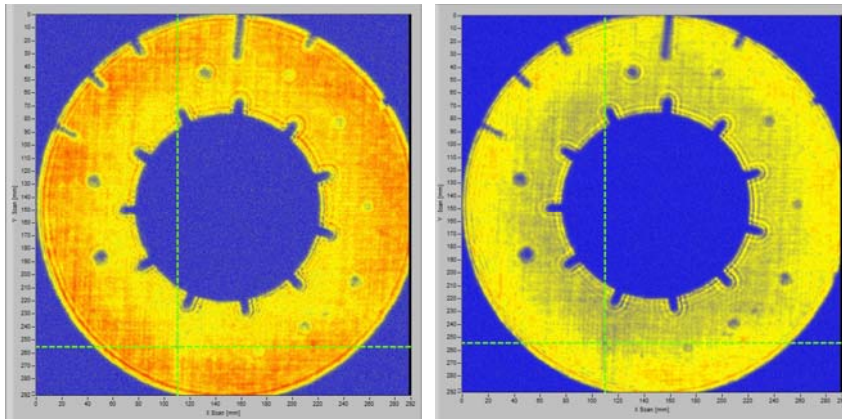
(a) Defect size 8mm(340kHz & 400kHz)



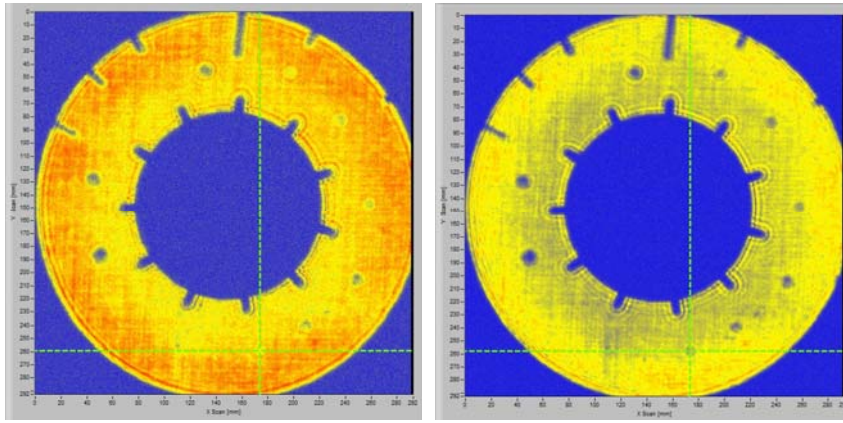
(b) Defect size 10mm (340kHz & 400kHz)



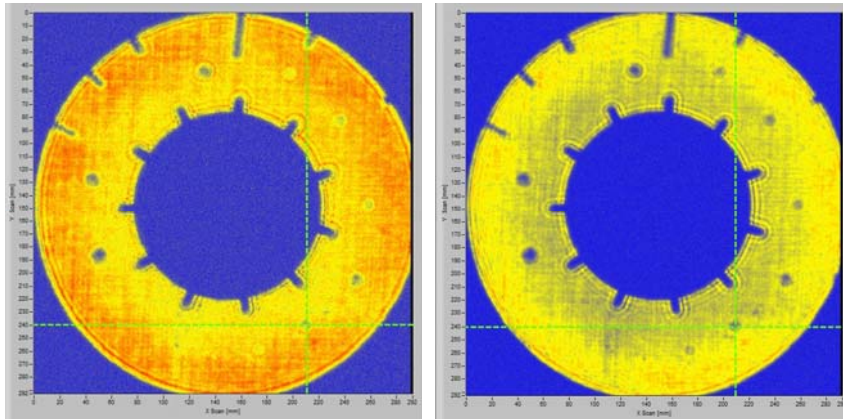
(c) Defect size 10mm (340kHz & 400kHz)



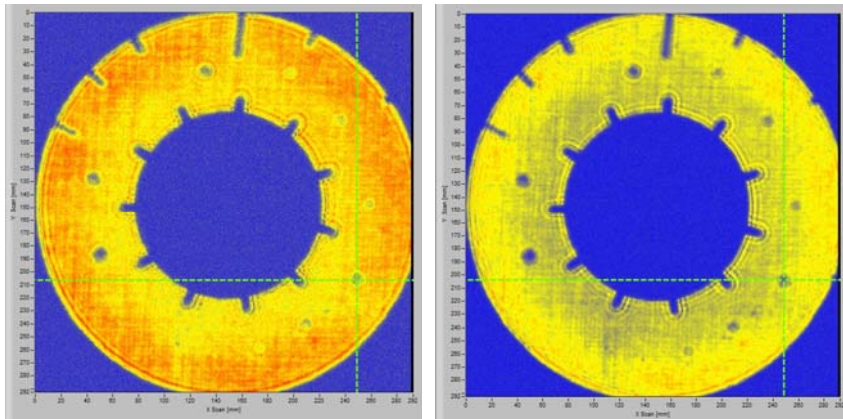
(d) Defect size 2mm (340kHz & 400kHz)



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

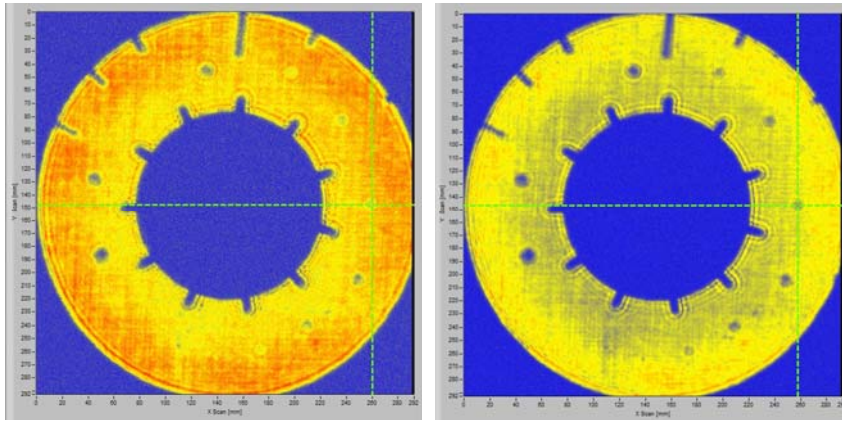


(f) Defect size 5mm (340kHz & 400kHz)

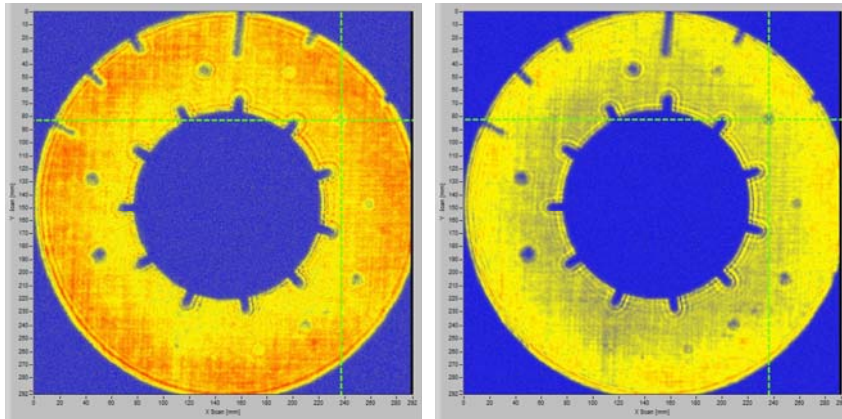


(g) Defect size 7mm (340kHz & 400kHz)

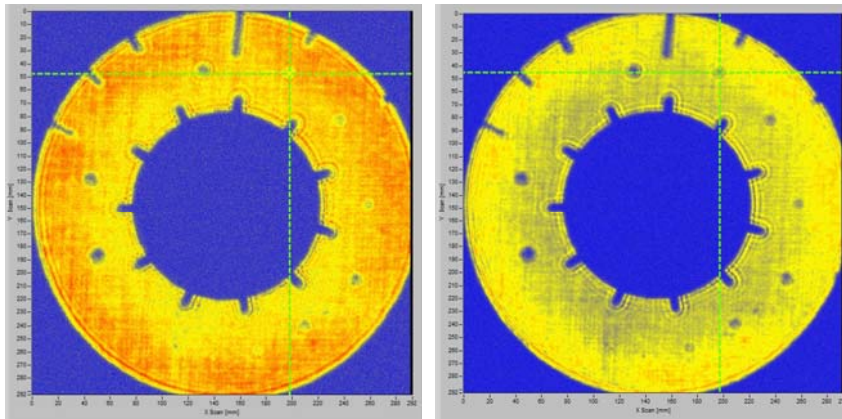




(h) Defect size  $5mm$  ( $340kHz$  &  $400kHz$ )



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



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

Fig.3-19 Comparison of C-Scan Inspection(Defect specimens)

## 제 4 장 결론

본 논문에서는 비접촉 공중 탐상 (NAUT)를 이용하여 Cf-C브레이크 디스크의 내부 결함 탐상을 여부를 확인하고 C-Scan 모드를 통한 내부결함 검출성능에 대한 연구를 수행 하여 비접촉 공중 초음파 탐상기법의 유용성에 대한 고찰한 결론 다음과 같이 정리 하였다.

1. 수동 탐상 시 결함부분과 결함 없는 부분에 따라 초음파 투과율 파악이 가능 하였다. 초음파 집속 거리별 초음파 감쇠특성 및 초음파 투과파의 진폭관계를 분석한 결과, 초음파 집속거리는 100mm 이내에서 초음파 투과진폭값은 37.40075로 최대값을 가지며 재질 내부로의 초음파 투과가 잘 이루어짐을 알 수 있다.

2.C-Scan 모드(평면화상) 비접촉 공중 초음파 탐상 실험을 통하여 Cf-C 브레이크 디스크의 단면탐상 실험을 수행한 결과, Cf-C 브레이크 디스크의 인공 평면부 결함  $\phi 10mm$  2개,  $\phi 8mm$  1개,  $\phi 7mm$  2개,  $\phi 5mm$  3개,  $\phi 3mm$  1개,  $\phi 2mm$  1개를 검출 할 수 있었으며, 인공 측면부 결함  $\phi 5mm DP4$  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.

3.탐상 시 340kHz 인가 할 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.

4.결론적으로 우주항공산업 신소재 CFRP의 사용비중이 크게 되어 있다는 현실이며 NAUT의 가치는 높아질 것이라고 생각된다. 취득된 화상결과를 통해 내부의 모양 및 상태, 크기, 위치 등의 파악이 가능하였으며 NAUT탐상법의 적용과 화상화가 동시에 이루어짐을 확인 하였다.

## Reference

1. K. S. KIM, S. J. PARK “Technique Status of Carbon Fibers-reinforced Composites for Aircrafts” , *Elastomers and Composites*, Vol.46, No.2, pp.118~124, 2011.
2. D. H. Middleton, “Composite materials in aircraft structures” , John Wiley, New York, 1990.
3. G. Savage, I. Bomphray, and M. Oxley, “Exploiting the fracture properties of carbon fibre composites to design lightweight energy absorbing structures” , *Eng. Failur Anal.*, pp.677, 2004.
4. K. S. Kim, Y. S. Shim, B. J. Kim, L. Y. Meng, S. Y. Lee, and S. J. Park, “Present status and applications of carbon fibers-reinforced composites for aircrafts” , *Carbon Lett.*, 2010.
5. X. Zhang, X. Pei, and Q. Wang, “Friction and wear properties of combined surface modified carbon fabric reinforced phenolic composites” , *Eur. Polym. J.*, pp.2551, 2008.
6. C. A. Mahieux, “Cost effective manufacturing process of thermoplastic matrix composites for the traditional industry: the example of carbon-fiber reinforced thermoplastic flywheel” , *Compos. Structure*, pp.517, 2001.
7. M. S. Ha, O. Y. Kwon, and H. S. Choi, “Improved electrical conductivity of CFRP by conductive nano-particles coating for lightning strike protection” , *J. Korean Soc. Compos. Mater.*, pp.31,2010.
8. J. B. Donnet and R. C. Bansal, “Carbon Fibers” , Marcel Dekker, New

York, 1990.

9. T. H. LEE, "Applications of Carbon Fiber to the Aerospace", KSPE Fall Conference, pp.511~514, 2011.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 이경철, 이강이, 진영권, "항공우주산업의 비파괴검사 기술동향", 항공우주 산업기술동향 3권 2호, pp. 101~108, 2005.

14. N. S. KWAK, "A Study on the Manufacture and Evaluation of 3-axes Automatic Non-contact Air-coupled Ultrasonic Testing(NAUT) Scanner" 2015.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

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

19. 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.

20. K.Koichiro, I.Ryusuke, "Non-contact Materials Charicterization 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.

21. 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.

22. J. H. Cho, Y. J. Cho, S. P. Yoo, I. S. Jang, S. S. Do, "Consideration of Sensors for Real-Time Quality Evaluation of Resisitance Spot Welds in Automotive Industry", KWJS, pp.50 ,2010

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. J. CH. GAO, "Reliability Evaluation of Thermoelectric Module By Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing Method" , 2015.

27. 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, 2009, pp.145-152.

28. 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, 2008, pp.40-45

29. 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, 2008, pp.358-363

30. 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.

31. 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.