



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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](#) 

2
0
1
5
년
2
월

2015년도 2월
석사학위 논문

석
박
사
학
위
논
문

비
접
촉
초
음
파
탐
상
방
법
에
의
한
CFRP/피복이
크
패
드의
신
뢰
성
평
가

박
인
우

비접촉 초음파 탐상 방법에 의한 CFRP/브레이크 패드의 신뢰성 평가

조 선 대 학 교 대 학 원

첨단부품소재공학과

박 인 우

2015년도 2월
석사학위 논문

비접촉 초음파 탐상 방법에 의한 CFRP/브레이크 패드의 신뢰성 평가

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 인 우

비접촉 초음파 탐상 방법에 의한 CFRP/브레이크 패드의 신뢰성 평가

Reliability of CFRP/Brake pad due to non-contact
ultrasonic method

2015년 2월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 인 우

비접촉 초음파 탐상 방법에 의한 CFRP/브레이크 패드의 신뢰성 평가

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2014년 10월 25일

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

박 인 우

박인우의 석사학위논문을 인준함.

위원장	조선대학교	교수	<u>심 재 기</u>	印
위원	조선대학교	교수	<u>윤 성 운</u>	印
위원	조선대학교	교수	<u>김 재 열</u>	印

2014년 11월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
NOMENCLATURE	vi
ABSTRACT	vii
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구배경	1
제 2 절 연구목적 및 방법	4
제 2 장 초음파 비접촉 탐촉자	6
제 1 절 초음파 탐촉자 거리 특성	6
제 2 절 초음파 탐촉자별 특성 비교	9
1. 초음파 탐촉자 간 특성 비교	9
제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상 시스템	13
제 1 절 NAUT의 화상탐상 원리	13
1. 시스템 출력 흐름도 및 데이터 처리	13
제 2 절 인공결함 시험편 분석	15
1. 박리현상 시편 분석(1)	15
2. 박리현상 시편 분석(2)	17
제4장 비접촉 공중 초음파 탐상 실험(NAUT)	19
제 1 절 실험 장비	19

제 2 절	시 험 편	.....	21
제 3 절	CFRP 실험	.....	22
	1. 결함 유무에 따른 파형 분석 비교	.....	22
	2. CFRP의 내부 결함 검출	.....	24
제 4 절	Brake pad 실험	.....	25
	1. 결함 유무에 따른 파형 분석 비교	.....	25
	2. 브레이크 패드의 내부 결함 검출	.....	26
제5장 실험결과 및 고찰			.....28
제6장 결 론			.....34
Reference			.....35

List of Figures

- Fig.2-1 Distance of frequency(1~5MHz) depending on ultrasound transmission
- Fig.2-2 Distance of frequency(200~800kHz) depending on ultrasound transmission
- Fig.2-3 Comparison between experiment and calculation value of characteristics of NAUT distance
- Fig.2-4 Inspection on the CFRP plate with 2MHz probe
- Fig.2-5 Flat type probe and Line focus type probe direction
- Fig.2-6 Comparison of falt type probe and line focus type probe
- Fig.2-7 Distance between point focus type probe beam diameter
- Fig.2-8 Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe
- Fig.2-9 Application of near sound field from focus type probe
- Fig.3-1 Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined
- Fig.3-2 Data output from NAUT system
- Fig.3-3 Comparison of image between point focus type air probe and flat type air probe
- Fig.3-4 Image of CFRP specimen having through pierce hole
- Fig.3-5 Image of CFRP specimen depending on the surface pressure of CFRP specimen
- Fig.3-6 Image of CFRP specimen damaged by torpedo attack
- Fig.4-1 Inspection equipment of NAUT
- Fig.4-2 Auto image scanning equipment
- Fig.4-3 Application on NAUT of CFRP specimen A, B
- Fig.4-4 Application on NAUT of brake pad specimen A, B
- Fig.4-5 Manual inspecting device
- Fig.4-6 Comparison of the waveform depending on the presence of defects
- Fig.4-7 Brake pad specimen A, B & inspecting equipment, air probe
- Fig.4-8 Specimen brake pad A, B & Air probe masking
- Fig.4-9 Auto image inspection system
- Fig.5-1 Amplitude change depending on the inspection location(A)
- Fig.5-2 Amplitude change depending on the inspection location(B)

Fig.5-3 Image inspection result of CFRP specimen A,B

Fig.5-4 Difference of air probe(flat, focus type)

Fig.5-5 Scanner brake pad Specimen A, B

Fig.5-6 C-scan monitor brake pad A, B

Fig.5-7 Difference of pitch(1.0mm, 0.5mm) C-scan monitor brake pad A, B

List of Table

Table.4-1 Image inspecting condition of CFRP specimen A, B

Table.4-2 Image inspecting condition of brake pad specimen A, B

NOMENCLATURE

- L : The distance between probe[mm]
 P_χ : Characteristics of distance[mm]
 P_0 : Sound pressure[$\chi = 0$]
R : Focused distance[mm]
S : Vibrator side
Z : Beam width[mm]
 Z_1 : Acoustic impedance($m \cdot g/s/cm^3$)
 Z_2 : Acoustic impedance($m \cdot g/s/cm^3$)
 α : Ultrasound damping constant
d : Beam diameter [mm]
 γ : Micro area ds, Distance of measuring location
p : Material density
t : Transmission rate
 ω : Angle frequency
 χ : Transfer distance[mm]

ABSTRACT

Reliability of CFRP/Brake pad due to non-contact ultrasonic method

Park In Woo

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

Dept. of Advanced parts and materials engineering,
Graduate School of Chosun University

The NAUT(Non-contact Air coupled Ultrasonic Testing) technique allows non-contact ultrasonic testing in air. If the NAUT technique can be applied, not only ultrasonic testing in air with no couplant would be possible, but also the stable transmission and reception of ultrasonic waves, which would thus enable ultrasonic testing of hot or cold materials, or rough surfaces of specimens that could not be tested with conventional-contact ultrasonic testing techniques. By trying NAUT for Brake lining pad specimens, the applicability of NAUT in these areas was observed, and the results from the waveforms of parts of the specimens were analyzed. For the Brake lining pad specimen, the ultrasonic transmittance was highest at the part, regardless of the thickness and location of the specimen. These findings confirmed the practicality of

NAUT.

To verify the usefulness of NAUT, first, artificially defective specimens were tested to investigate the defect detection ability of NAUT; and second, a test was conducted to select the test conditions, the ultrasonic propagation characteristics, and the mode conversion by the material thickness. Both the spot welding and CFRP specimens showed good applicability of NAUT. For the CFRP specimen, the waveforms of a defective part and a defect-free part were compared, and the existence of delamination was discovered through the increase and decrease in the amplitude. These findings confirmed the practicality of NAUT.

1장. 서 론

제1절 연구배경

초음파 비파괴 검사 방법에는 다양한 방법이 있는데 접촉식 방법과 비접촉식 방법이 있다. 접촉식 방법에는 매질 즉, 오일 등을 이용하여 초음파가 투과할 수 있도록 해주며 비접촉식 방법은 말 그대로 시편을 접촉하지 않고 물속을 이용하여 초음파를 투과하는 방법이 있다. 초음파 비파괴 검사는 재료의 표면 또는 내부에 존재하는 불연속부(결함 및 밀도차 등)를 검출하기 위해 초음파를 재료에 전달시켜 검사하는 비파괴 검사 방법 중 하나다.

수동 탐상의 경우, 결함 부분을 파악하는데 개별의 차이가 있지만 숙련된 기술이 필요해 일반적인 탐상으로는 결함이 있는지 없는지 쉽게 파악하기 힘들다. 초음파 탐상을 수행하기 위해서는 결함을 검출 할 시험편, 각 결함을 탐상할 탐촉자가 필요하며, 결함 존재 여부를 확인하는데 필요한 파형 변화를 보여줄 탐상기가 동반되어야 정확한 탐상 결과를 얻을 수 있다. 이와 같이 일반적으로 탐상기를 사용해서 실험했던 초음파 탐상은 초음파 투과율의 정도에 따라 나타나는 CRT상의 파형변화로 각 결함의 위치, 크기 등을 바탕으로 탐상을 수행하기 때문에 파형 변화가 클 경우 쉽게 결함 유무를 판단하기 어렵다.

비접촉식 방법중에 수침법이 있는데 탐상에 사용할 시험편을 물속에 넣은 상태에서 PC로 S/W 실행 명령을 주면 설정해 놓은 탐상조건에 따라 시험편의 각 부분을 스캔하면서 결함의 존재 여부를 파악하여 화상으로 보여준다. 탐상 순간부터 완전한 화상취득은 불가능하므로 먼저 예비스캔(C-SCAN)을 수행한 후, 결함이 존재할 지점을 선택하여 재스캔을 수행한다. 이후에 어느 정도 화상이 취득되었을 때, 정확한 결함상태를 파악하기 위해 파형이 나타난 부분에서 결함파열을 찾아 그 부분에 S-GATE를 걸어 다시 한번 재스캔을 수행한다. 위와 같이 정확한 결함의 위치파악이 가능해질 때까지 반복적으로 스캔을 수행함으로써 완전한 화상의 취득이 가능하게 된다. 기존의 수동탐상과는 다르게 보다 정확한 결함의 위치, 크기 및 상태의 파악이 가능하며, 육안으로는 판별이 불가능 했던 부분에 대해 한눈에 파악이 가능하다.

그 외에도 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 초음파 탐상을 수행하는 다양한 비파괴 검사방법이 있는데, 수침법도 물이라는 접촉매질을 이용하기 때문에 초음파 탐상이 가능해 시험편과 물의 접촉 영향을 최소화 한다.

이는 압축응력 하에 있는 피로균열이나 응력부식 파편의 선부는 부분적으로 접촉하여 초음파가 투과하여 에코가 얻어지는 균열 길이에 대한 평가를 수행할 경우, 닫힌 균열을 평가하는 방법이다. 큰 진폭의 버스트파가 입사하고 미소 간격의 균열은 개폐하여 강성이 변화되며, 그 재료의 비선형성에 따라 고주파가 발생되는데 이를 이용한 닫힌 균열의 평가가 가능하다. 하지만 탐촉자나 접촉매질, 물 등도 비선형성을 가지기 때문에 수신파에는 이에 따른 균열 이외에서 발생하는 고주파가 포함되어 균열로 발생하는 고주파의 정도를 평가하는 것은 불가능 하다. 따라서 접촉매질, 물 등의 다른 영향을 최소화할 수 있다면 미세 균열 선부의 검출이 가능하게 되어 균열 측정에 대한 고정도화가 가능한 비선형 초음파법을 사용한다. 그리고 중성자를 조사원화하는 비파괴 방법이 있는데 압력용기가 모델 합금에 대한 초음파의 공조 특성을 파악하는데 있어서 다음과 같은 어려움이 따른다.

조사원화의 원인은 화자조성이나 조사조건이 불일치와는 다른 개념이지만 구리를 불순물로 하여 포함시킨 RVP강이나 접촉시에 구리의 개입으로 조사에 따른 동석출물의 형성이 주요인이 되며, 이는 소성 변화가 일어날 때, 전위의 이동을 방해하기 위한 항복응력이 상승되어 원화하게 된다. 하지만 일반적으로 격자 결함의 형성은 여러 물성의 영향을 고려하기 위해 결함과 상관관계가 있는 특성을 이용하는 것으로 원화의 비파괴 평가의 필요성이 요구된다.

초음파 비파괴 검사에 대해 방사선이나 전자기 검출에 따라 접촉매질을 사용하지 않고 수행하는 비접촉 탐상은 궁극적인 목표가 되고 있다. 하지만 이전부터 실용화된 전자 초음파 탐촉자법(EMAT), 레이저 초음파법이 있기는 하지만 이 탐상 방법은 적용 대상이 한정되어 초음파 빔에 따른 지향성 제어 및 집속화가 곤란하며, 이와 같은 문제점이 있어 광범위하게 이용되는 기존의 공기 초음파 탐상법은 그런 그런 세라믹스, 플라스틱, 재료 등의 특성재료에 적용되고 있다. EMAT는 코일과 자석으로 구성되어 있어 조합된 여러 종류의 초음파의 발생이 가능하며, 전자적 작용이 아닌 비접촉 방식으로 시험편 내부에 초음파를 발생시켜 결함이 검출이 가능하도록 한다.

현재 PHASED ARRAY법은 1차원 ARRAY SENSOR에 따른 선집속 빔이 2차원 파면상에서 검출되며 ARRAY SENSOR 내부의 복수 압전소자에 지연시간을 고려하여 초음파의 위상을 제어하여 송수신하는 방법으로 임의의 위치에 빔을 집속시켜 센서가 고정되어 있어 전자 빔의 주사가 가능한 검사 기술이다.. 따라서 이와 같은 방법을 고도화 하여 2차원 ARRAY SENSOR(MATRIX ARRAY SENSOR)에 따른 점집속 빔을 3차원적으로 주사함과 동시에 표시까지 가능해진다면 주사의 신속화가 이루어지고 결함 검출성이 향상된다. 이와 같이 다양한 비파괴검사 방법들이 있지만 친환경 부품소재, 즉 CFRP(CARBON FIBER REINFORCED PLASTIC)가 있는데 층간박리에 의한 강도변화가 심하여 비파괴 신뢰성평가의 필요성이 있는 소재로 실시간 미세결함검출이 곤란하여 현장적용은 거의 불가능한 현실에 있다.

제2절. 연구목적 및 방법

본 연구에 사용한 기기는 NAUT(NON CONTACT AIR COUPLED ULTRASONIC TESTING) 탐상기법을 사용하였는데 보통 시험편의 표면이 거칠고 매끄럽지 못하거나 고온, 저온의 물질 등 접촉매질의 적용이 어려웠던 기존의 접촉식 초음파 탐상 방법의 단점을 보완하기 위해 공기 중에서 비접촉식으로 초음파 탐상이 가능한 방법이다. 대표적으로 구형 버스트 파를 사용하는 NAUT에 관한 원리, 적정 주파수, 파수, 입사각 및 탐촉자의 선정방법 및 박판의 결함 검출 등의 응용 사례가 있다.

시험편과 공기간의 음향 임피던스의 차이로 생기는 에너지 손실을 높은 출력 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 COUPLANT(접촉매질) 없이 공기중에서도 초음파 탐상이 가능해짐과 동시에 안정된 상태에서의 초음파 탐상이 송수신이 가능해져 기존의 초음파 탐상의 접촉식 방법으로는 불가능했던 한계를 폭넓게 사용 할 수 있다.

공중 비접촉 초음파 탐상기술의 큰 장점은 실시간으로 결함의 존재여부에 대한 파악이 가능하여 정확한 결과와 시간의 절감 효과를 기대할 수 있다. 따라서 NAUT(NON CONTACT AIR COUPLED ULTRASONIC TESTING)의 이점을 부각시켜 친환경 소재 CFRP 시험편 및 BRAKE PAD에 비접촉 초음파 탐상을 시도함으로써 NAUT가 이 부분에서도 작 적용되는지 그 여부를 관찰하였다.

BRAKE PAD의 경우, 부착 상태에 따른 마모율에 따라 부품의 품질 및 불량 사전 검출이 가능해지며, 안전성 보증 및 품질향상에 큰 효과를 볼 수 있다고 기대한다. 또한 적용 시 친환경 자동차 부품소재에도 적용이 가능하리라 생각한다.

아직까지는 자동차의 친환경 소재나 BRAKE PAD 등 탐상이 가능한 비파괴 검사방법이 적용된 사례가 없어 이를 가능하게 한다면 큰 경제적 손실과 자원 손실을 방지할 수 있다. CFRP는 금속보다도 약 50%정도 가벼운데도 불구하고 강도가 금속만큼 높아 친환경자동차의 부품소재로 각광받고 있다. 자동차에 적용할 경우, 중량감소에 따른 연비를 향상시키고, 탄산가스(CO₂)의 배출량을 감소시켜 지구온난화 방지에도 기여할 수 있다.

탄소강화 복합소재와 같은 섬유강화 고분자 복합재료는 취약한 부분이 있는데 바로 층간 박리 현상에 따라서 강도가 크게 변화하는 소재이기 때문에 비파괴 평가의 필요성이 높다. 현재 친환경 자동차의 생산단계에서는 비파괴 검사방법이 실용화 되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 이와 같은 기술을 확립함으로써 안정성은 물론 우수한 품질로 친환경 자동차 제조가 가능해진다. 그러므로 NAUT의 유용성 검증을 위해 비파괴검사의 필요성으로 주목받고 있는 CFRP, BRAKE PAD에 대한 NAUT 수동, 자동, 화상 탐상을 수행하였으며 BRAKE PAD의 결함 부분을 확인, 동일한 시험조건을 가지고 탐상을 수행하였다. 박리 및 들뜸의 정확한 위치 파악을 위해 화상탐상조건(AVERAGING COUNT, GAIN, SCANNING PITCH, SCANNING SPEED, PROBE)을 설정하고 탐상을 수행하여 그 결과를 확인하였으며, 그에 따른 화상정보를 취득, 결함평가 하는 것이 연구의 목적이다.

제2장 초음파 비접촉 탐촉자(Air Probe)

제1절 초음파 탐촉자 거리 특성

NAUT는 비접촉식 방법으로 주파수가 높게 되어 공중의 감쇠가 크게 됨을 보아 탐상주파수는 200kHz~800kHz로, 일반적으로는 주파수400kHz 전후가 좋게 사용될 수 있었다. 최근에는 탐촉자의 감도향상으로 탐상주파수 2MHz정도라도 금속이나 CFRP의 탐상에 사용이 가능하다는 것을 알 수 있다. Fig.2-1은 보다 높은 주파수(1~5MHz)의 탐촉자의 거리특성을 표시한 것이고, Fig.2-2는 종래의 주파수(200kHz~800kHz)의 거리특성을 나타낸 것이다.

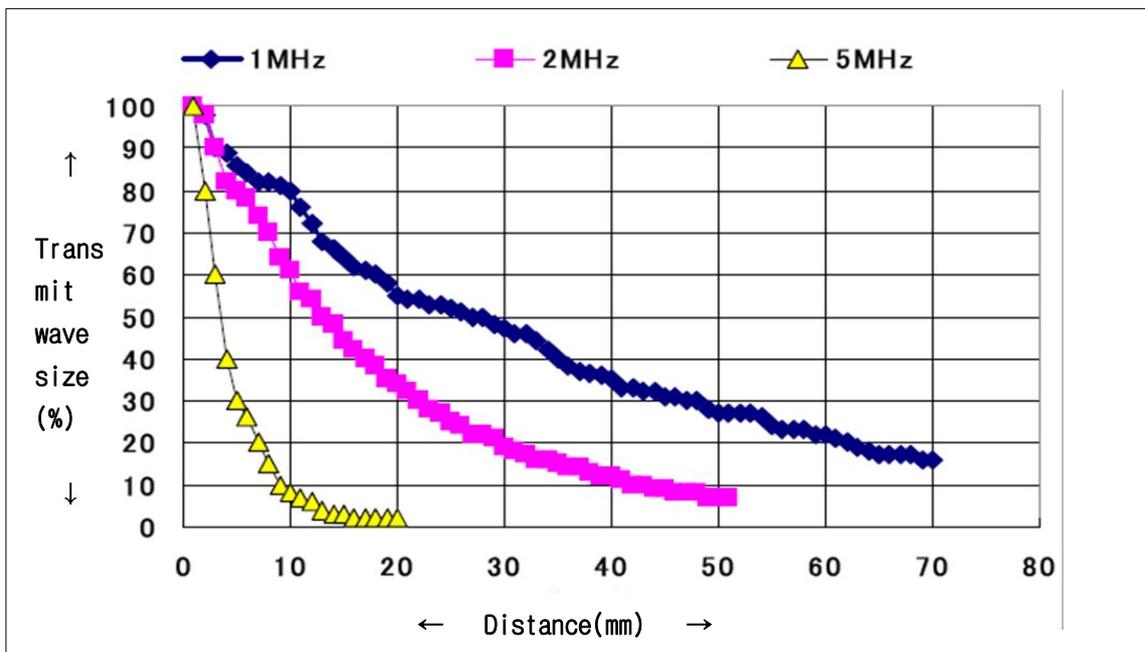


Fig.2-1 Distance of frequency(1~5MHz) depending on ultrasound transmission

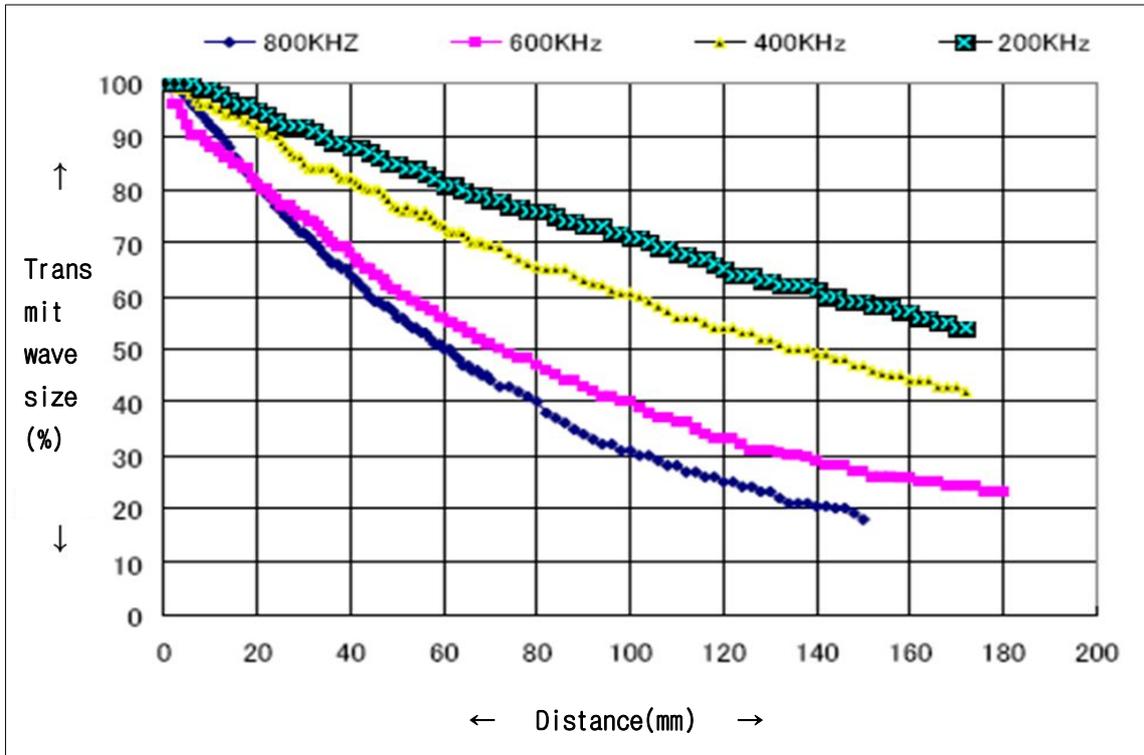


Fig.2-2 Distance of frequency(200~800kHz) depending on ultrasound transmission

Fig.2-1 ~ Fig.2-2의 거리특성 P_x 는 아래와 같다. 단, α :초음파 감쇠상수, χ :전달거리, P_0 는 $\chi=0$ 에 있어서 음압이다.

$$P_x = P_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (2-1)$$

Fig.2-2의 거리특성을 식(2-1)에 적용시켜 계산한 후 실험값과 비교하였으며, Fig.2-3에 그 예를 나타내고 있다. 실험값과 계산값은 일치함을 보여주고 있으며, 주파수 400kHz로 설정하였을 때 감쇠상수 α 는 아래와 같다.

- $\alpha = 0.0052\text{dB/mm}$, 800KHz
- $\alpha = 0.0115\text{dB/mm}$, 1Mhz
- $\alpha = 0.026\text{dB/mm}$, 2MHz
- $\alpha = 0.0535\text{dB/mm}$, 5MHz
- $\alpha = 0.18\text{dB/mm}$

거리특성 이외의 투과율과 전달거리 30mm 전후를 고려하고 설정된 탐상주파수 2MHz의 경우, 실시간으로 검사가 가능하다.

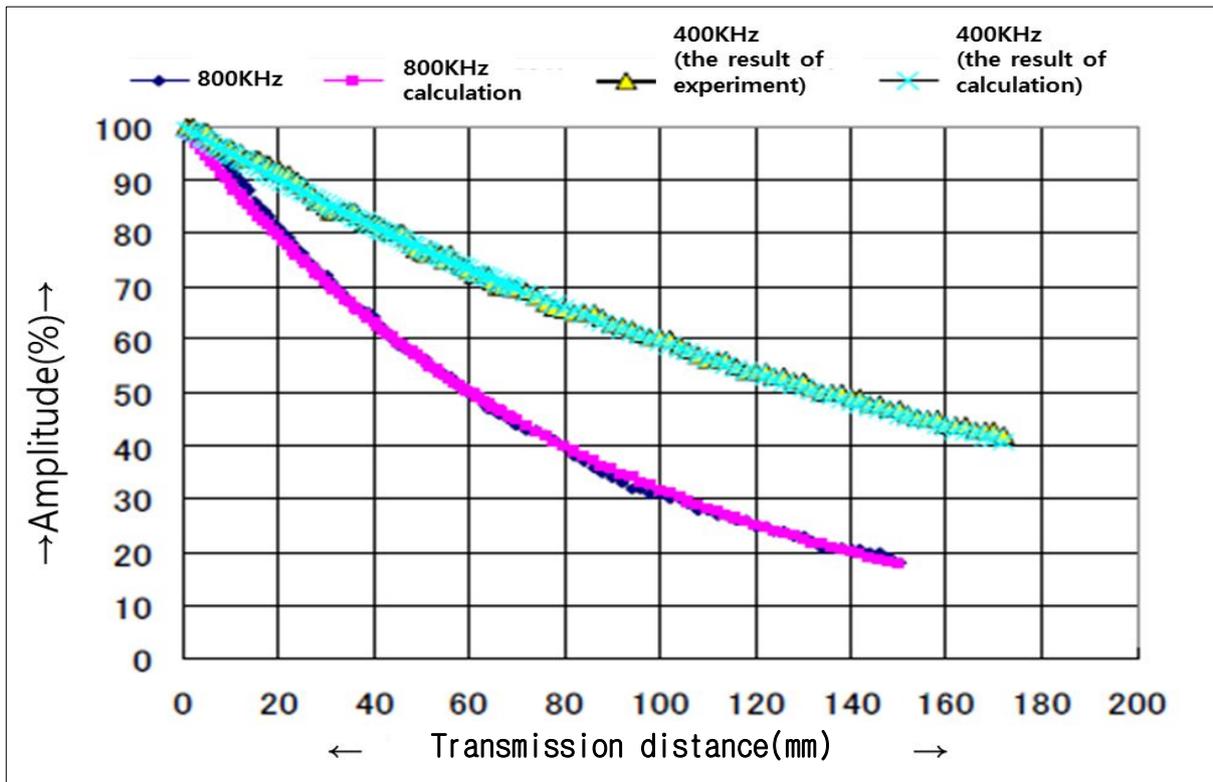


Fig.2-3 Comparison between experiment and calculation value of characteristics of NAUT distance

거리특성에 있어서 투과법에 따른 검사를 고려하고 전달거리 30mm 전후를 생각해 탐상주파수는 2MHz로도 검사에 적용이 가능하다. 공칭주파수 2MHz의 평면 탐촉자(2K10N)로 CFRP 시편의 투과법형 예를 표시한다. 탐촉자간 거리는 20mm이다.

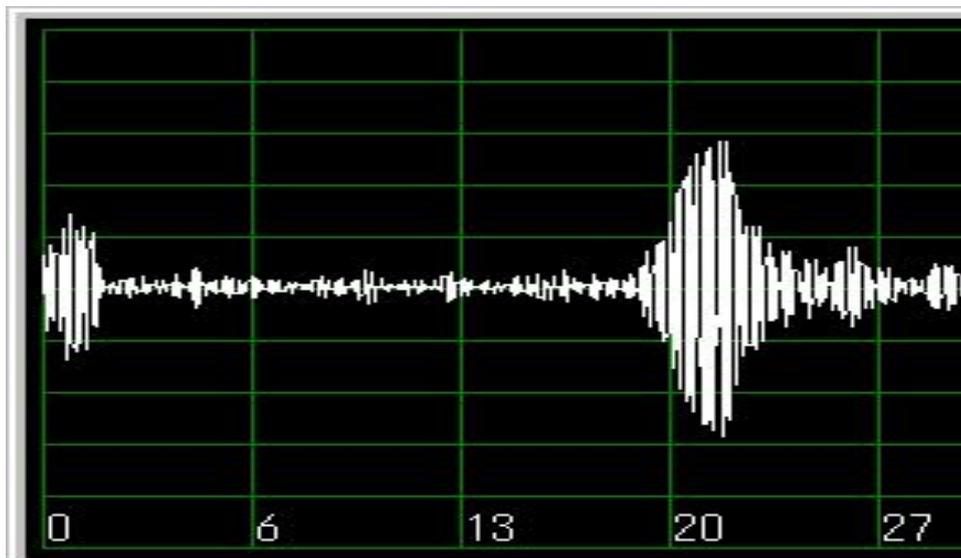


Fig.2-4 Inspection on the CFRP plate with 2MHz probe

제2절 초음파 탐촉자별 특성 비교

1. 초음파 탐촉자 간 특성 비교

Fig.2-5는 평면탐촉자(Flat Air Probe)와 선집속탐촉자(Focus air probe)의 특성을 비교한 것이다.

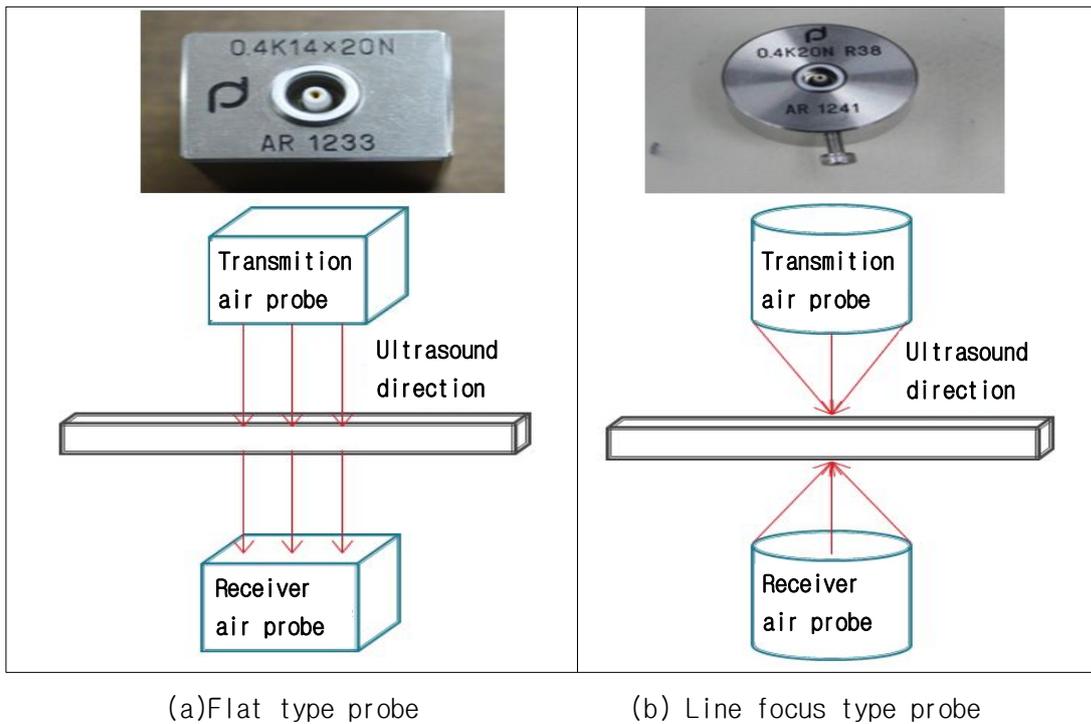
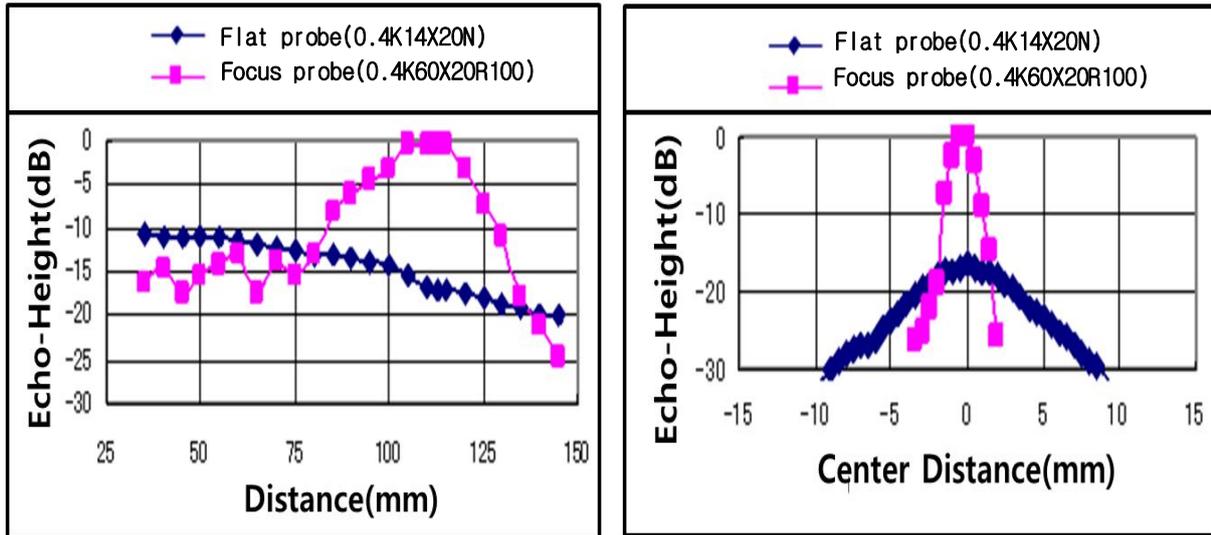


Fig.2-5 Flat type probe and Line focus type probe direction

반사원은 $\Phi 6\text{mm}$ 의 마스크를 씌워 사용하였고 선집속탐촉자의 집점거리는 $R=110\text{mm}$ 로 집속되고 있는데 집점 근방에서 평면탐촉자와 비교했을 때, 약 15dB로 감도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig.2-6은 평면 탐촉자와 선집속 탐촉자의 특성을 표로 나타낸 것이다.



(a) Flat type probe

(b) Line focus type probe

Fig.2-6 Comparison of flat type probe and line focus type probe

점집속 탐촉자의 특성 예를 표시한다. 집속 탐촉자는 공칭주파수 400KHz, 진동자 직경 20mm, 집속거리 R = 38mm이다. 거리특성 및 빔 직경은 점집속 탐촉자보다 방사된 초음파를 하이드로 혼으로 수신해 측정했다.

탐촉자의 거리특성은 하이드로 혼과 탐촉자의 거리가 37~39mm로 수신 초음파가 최대로 된 설계 집속거리와 일치하고 있다. 집속근방의 빔 직경(-6dB)은 약 2mm이다. 하이드로 혼은 istech TC4038형으로, 주파수특성은 50KH+800KHz±2dB 이내의 무지향성의 것으로 사용했다. 다음 결과를 Fig.2-7에 나타내었다.

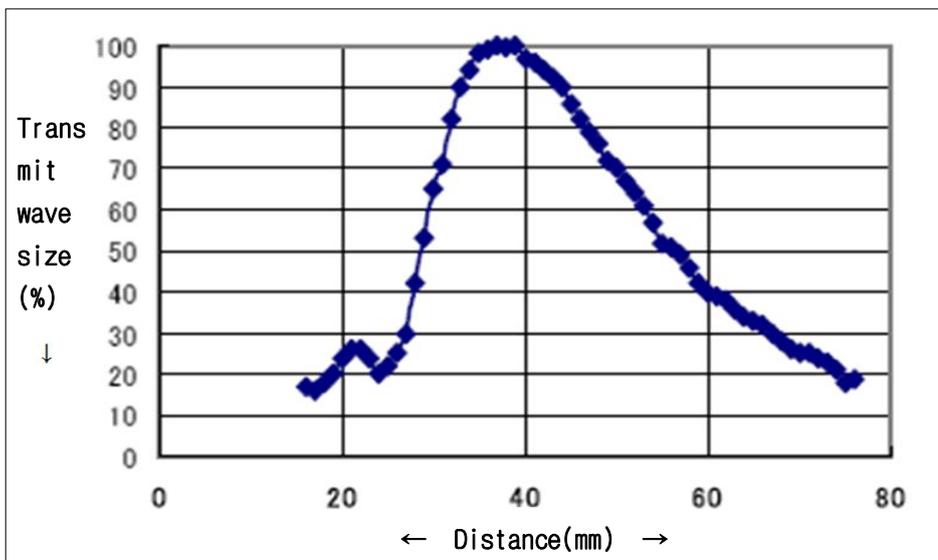
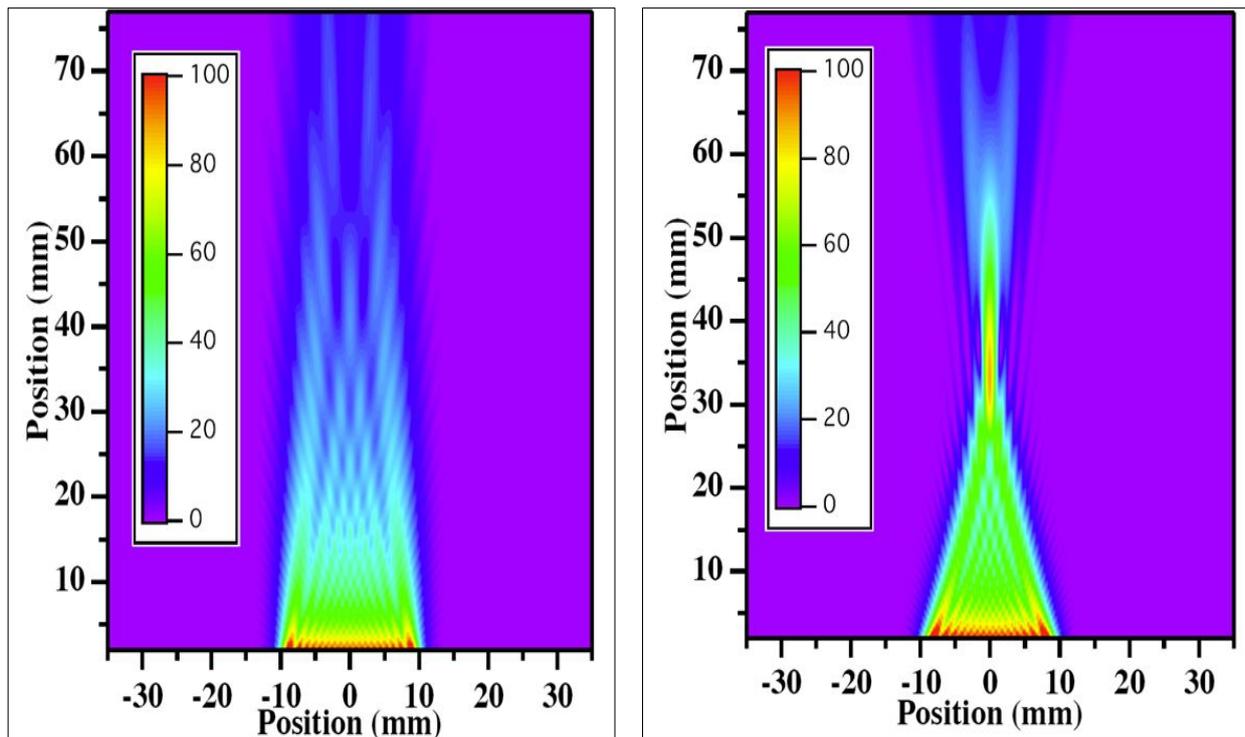


Fig.2-7 Distance between point focus type probe beam diameter

아래의 그림은 접집속 탐촉자와 평면 탐촉자의 음장을 계산한 결과를 Fig.2-8에 표시하였다. 그림을 통해 집속근방의 음압은 높게, 동시에 빔은 잘 집속되고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 7(a)의 집속 탐촉자의 집속점 근방 및 근거리로의 음장 예를 그림8에 표시하였으며, 접집속 탐촉자의 가로축은 조사각 음압, 세로축은 거리(mm)이다. 근거리에서는 빔 직경은 크게, 집속근방에서는 빔 직경은 약 2mm이다.

빔 직경은 계산값과 실험값(하이드로폰에 따른 측정치)가 거의 일치함을 보여주고 있으며, 음압계산은 레일리 적분에 따라 진동자의 미소요소이기 때문에 원통파면이 나오도록 해서 그것을 통합해 더해서 계산을 했다. 집속음장에서는 센서의 형태에 합해서 위상 정도를 높여 위로, 레일리 적분을 계산했다. 음압 p 의 계산식은 식(2-2)에 따랐다.



(a) Flat type probe

(b) Point focus type probe

Fig.2-8 Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe

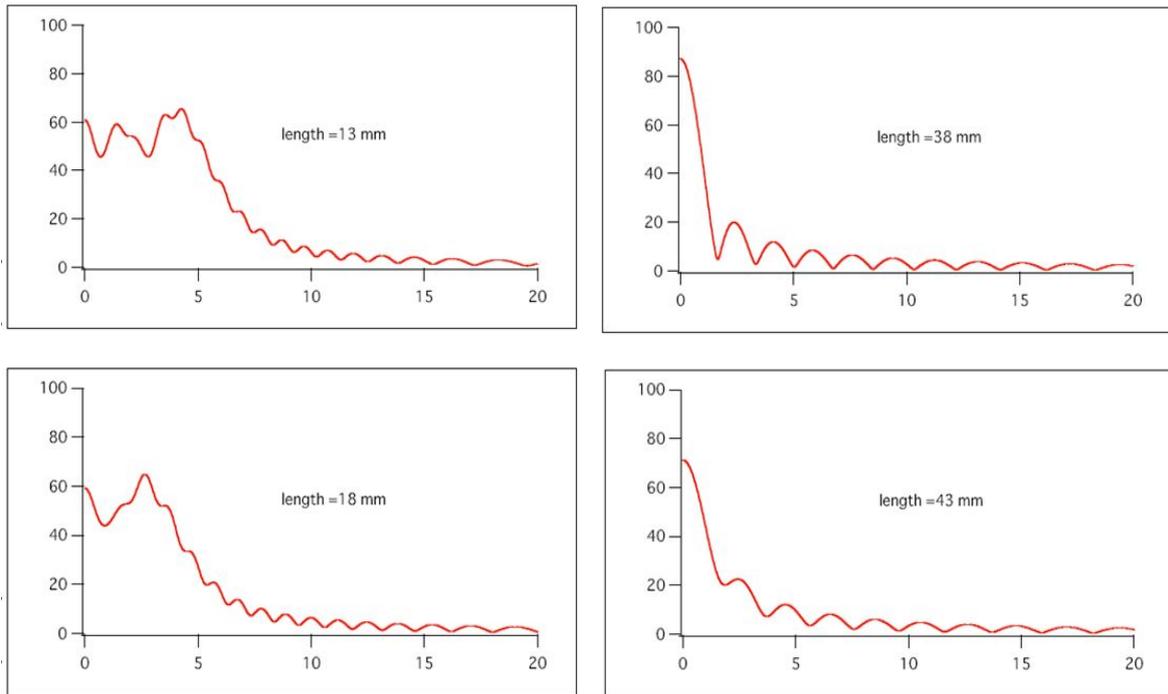


Fig.2-9 Application of near sound field from focus type probe

$$p = iw\rho \int_s \frac{e^{-ikr}}{r} ds \dots \dots \dots (2)$$

여기에서 w : 각주파수, ρ , 재료밀도, S : 진동자면, r : 미소면적 ds 와 관측위치의 거리이다.

이번에 개발한 시스템은 LabVIEW(일본 international instrument 제작)를 설치한 컴퓨터와 probe를 설치한 자동스캐너 장치, 확장 하드웨어로 구성된 자동스캐너의 제작 시스템과 data 수집 시스템으로 구성되고 있다. 초음파의 송신으로 인해 triggering, 검사대상물을 올려 놓은 지그 판에 X축/Y축 이동, 펄스신호의 수신, 해석, data의 출력까지 가능하다. 또한, 시스템의 다양한 채널화에도 대응이 가능하며, 개발 된 비접촉 공중 초음파 검사 시스템을 NAUT21 이라고 하는데 Fig.3-2와 같이 NAUT21(Auto scan equipment)로부터 데이터 결과값이 출력되기 위한 과정은 나타내고 있다.

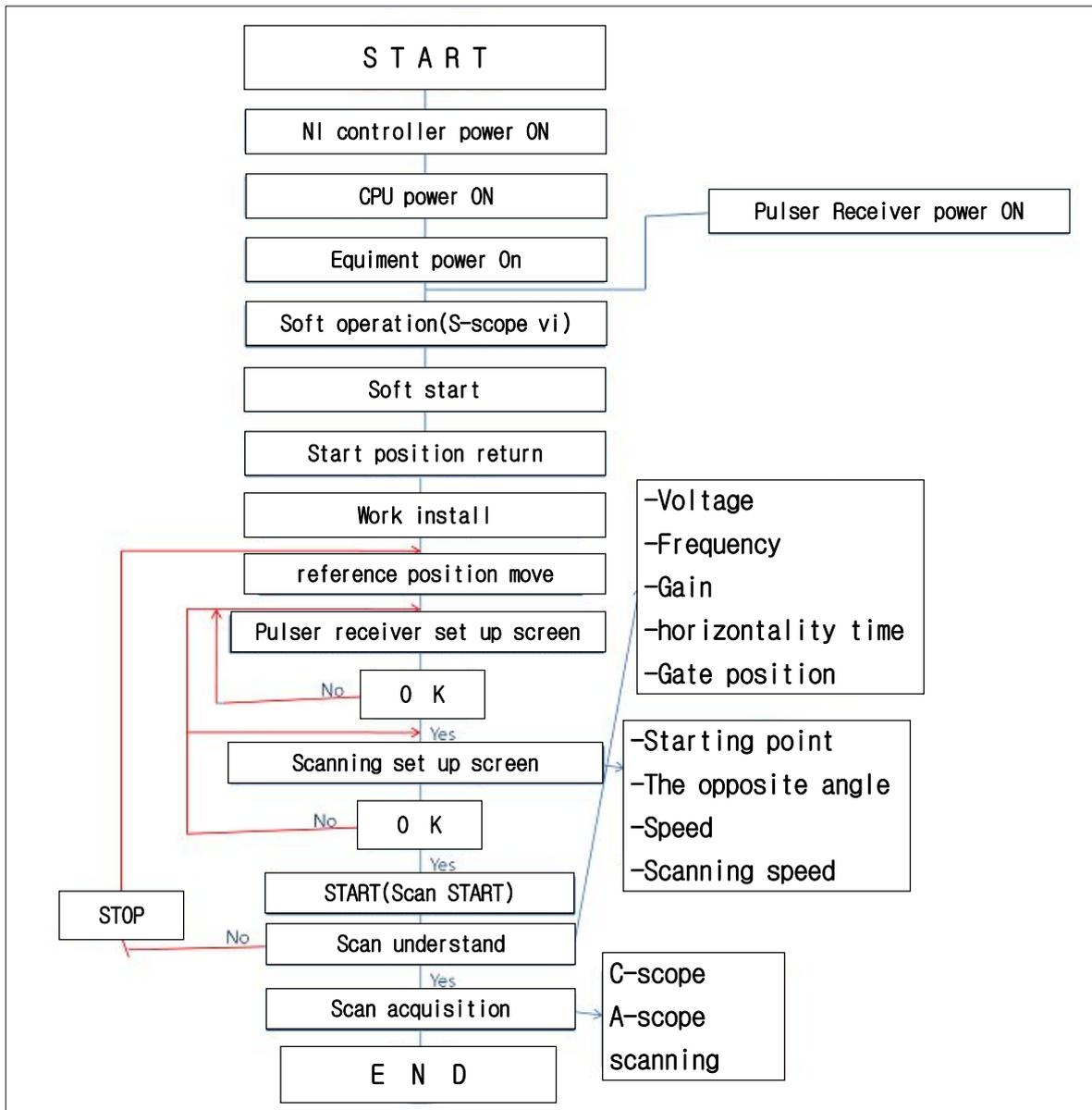


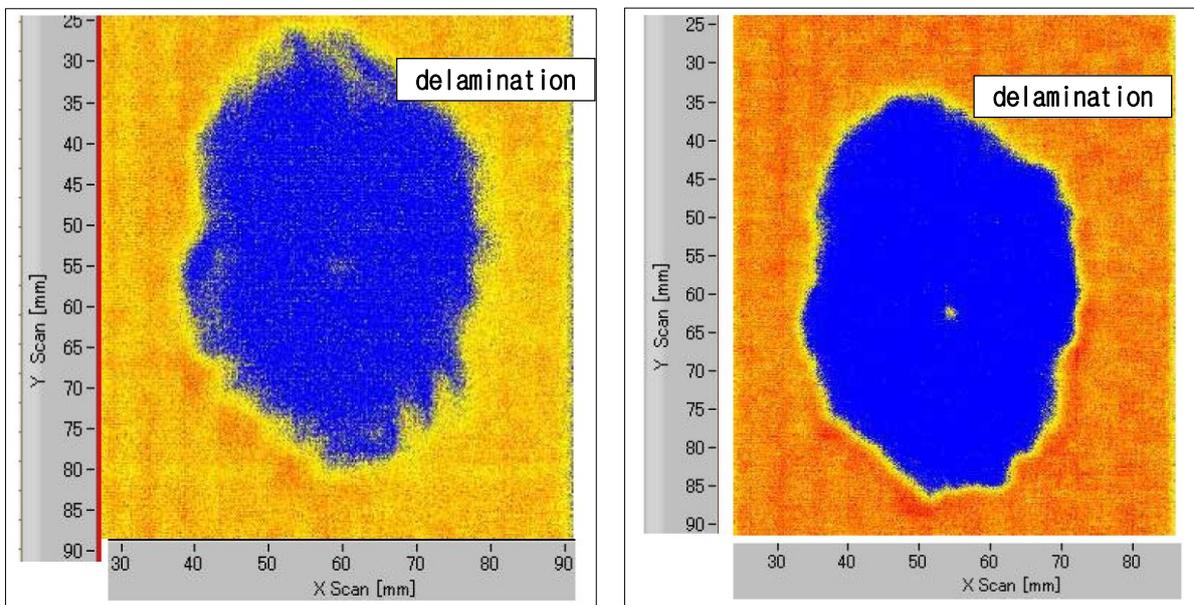
Fig.3-2 Data output from NAUT system

제2절 인공결함 시험편 분석

1. 박리현상 시편 분석(1)

인공결함 시험편의 분석을 위해서 초음파 투과법으로 점집속 탐촉자를 사용하여 탐상을 한 경우, 송수신 탐촉자의 거리특성을 구한 탐촉자간 거리 $L = 72\sim 76\text{mm}$ 로 최대 투과파가 얻어질 수 있다. 투과법으로 평면탐촉자와 점집속탐촉자의 예를 보인다.

Fig.3-3에 CFRP의 평면 탐촉자와 점집속 탐촉자에 따른 화상비교 예를 보인다. Fig.3-3의 평면 탐촉자(수신값은 $\phi 6\text{mm}$ 의 면적이 초음파를 수신하는 마스크)에서는 층간박리부의 경계면에 들뜸이 있어 선명하지 않지만 그것에 반하여 점집속 탐촉자에서는 초점 근방의 빔 직경이 2mm 정도로써 경계면도 명확한 것을 볼 수 있다.



(a) Flat type probe

(b) focus type probe

Fig.3-3 Comparison of image between point focus type air probe and flat type air probe

비접촉공중초음파 검사법(NAUT)에 사용된 probe의 특성에 관하여 실험 및 시뮬레이션을 행하여 검사했다. 위의 탐상으로 인해 얻을 수 있는 결과로는

(1) 기존에는 주파수가 $200\sim 800\text{kHz}$ 가 주류로 있었지만 이번에는 주파수 2MHz 정도로 탐상이 가능한 탐촉자를 개발했다.

- (2) NAUT에서는 공기중의 음속은 철강에 비해 심하여 빠르게 파장이 짧게 날카롭게 빔을 만들어 쉽게 탐촉자의 설계, 제작이 용이하다.
- (3) 점집속 탐촉자의 특성은 실험과 시뮬레이션이 거의 일치했다.
- (4) 점집속 탐촉자를 사용하고 있는 빔이 집속된 선명한 고해상력의 화상이 얻어질 수 있다는 것을 알았다.

2. 박리현상 시편 분석(2)

박리현상 분석을 위해서 CFRP에 1mm의 철공구를 고속관통 된 경우의 관통 주변의 박리 현상을 확인한 화상으로, 관통 주변에서 넓은 범위의 박리현상 관찰이 가능했다. 이에 따른 탐상 결과를 Fig.3-4에 나타내었다.

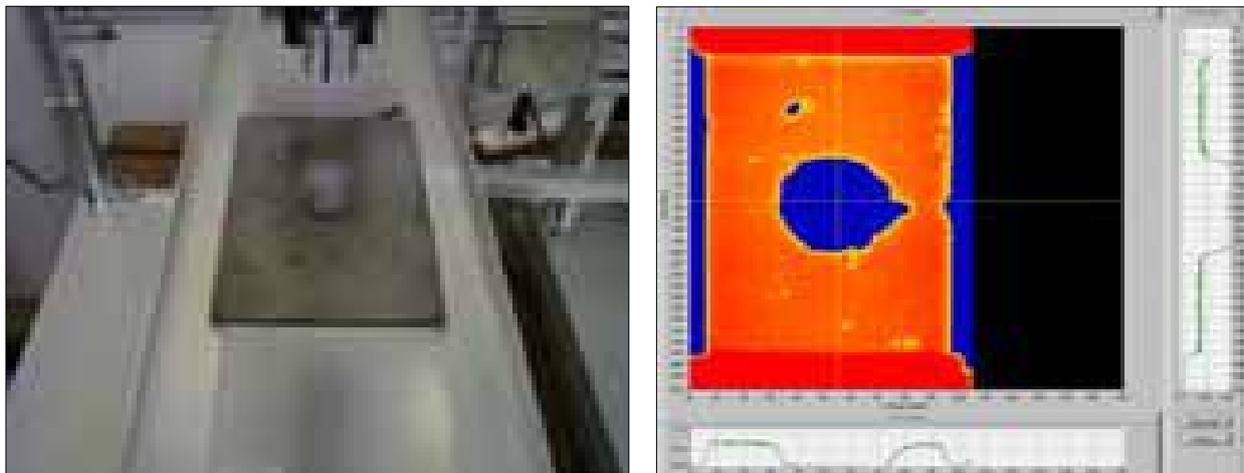


(a)CFRP specimen

(b)Image picture

Fig.3-4 Image of CFRP specimen having through pierce hole

Fig.3-5에는 외부 손상을 덜어주기 위한 표면에 아연도금을 가공한 CFRP의 화상을 보인다. 외견상으로는 손상이 경감되고 있는 것으로 보이지만 CFRP의 내부 중앙에는 박리현상이 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a)CFRP specimen

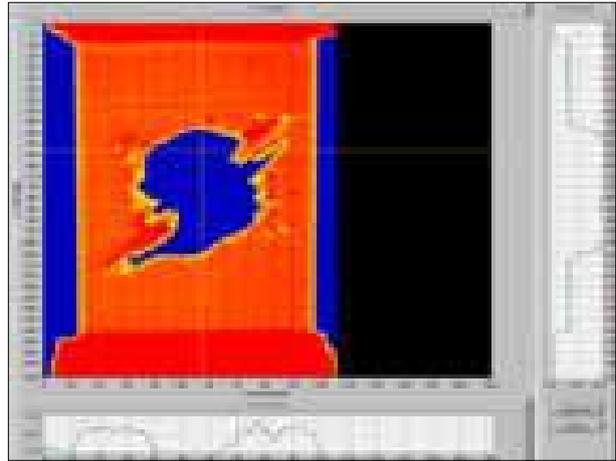
(b)Image picture

Fig.3-5 Image of CFRP specimen depending on the surface pressure of CFRP specimen

Fig.3-6에서는 뇌격에 따른 CFRP의 손상여부를 확인할 수 있는데 NAUT에 따른 화상에서는 내부까지 손상이 상당히 넓게 퍼져있는 것을 알 수 있다.



(a)CFRP specimen



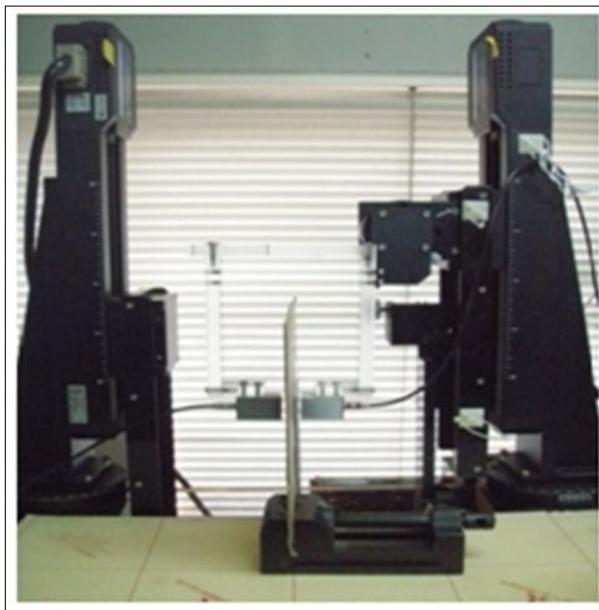
(b)Image picture

Fig.3-6 Image of CFRP specimen damaged by torpedo attack

제4장 비접촉 공중 초음파 탐상 실험(NAUT)

제1절 실험 장비

Fig.4-1은 high power 구형 burst파를 사용한 비접촉공중초음파검사법(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing : NAUT)을 수행하는 검사기기를 나타낸 것이다. 구형 burst 초음파는 펄스 초음파에 비교해서 강력한 power가 나오는데 주파수나 파수가 쉽게 변할 수 있는 상황에서 쉽게 최적의 탐상조건을 찾아내기 쉬운 이점이 있어 high power로 송수신이 필요한 NAUT에 적용하고 있다. 구형 burst파를 사용한 NAUT에 관한 원리, 적정 주파수, 파수, 입사각 및 탐촉자의 선정방법 및 박판의 결함 검출, brake pad 들뜸, spot 용접부의 탐상, CFRP의 층간 박리 및 IC칩 등의 응용 예에 대해 말하고 있다.



(a)Manual inspecting equipment



(b)Auto inspecting equipment

Fig.4-1 Inspection equipment of NAUT

Ultra high power 구형 burst파를 사용한 NAUT에 따른 자동화상장치를 개발, 본 시스템의 구성으로는 Ultra high power 초음파 Pulser receiver와 Pre-amp 및 고감도의 탐촉자 등으로 이루어져 있다. LabVIEW의 탐상용으로, 고속 디지털타이저, 카운터, 확장 하드웨어 등의 많은 채널화의 대응이 가능하다. 따라서 고감도 점접속 탐촉자를 사용하는 것으로 CFRP등 미세결함 결출 및 선명한 고해상도의 화상 취득이 가능하다. 물 등의 접촉매질을 사용하지 않고 비접촉으로 검사가 가능하기 때문에 기존에 적용이 어려웠던 항공기·자동차 등의 복합재료의 박리검사를 기준으로 하여 전자부품 등의 응용이 기대된다. 아래의 Fig.4-2는 자동화 스캔 화상장치의 구성을 보여준다.

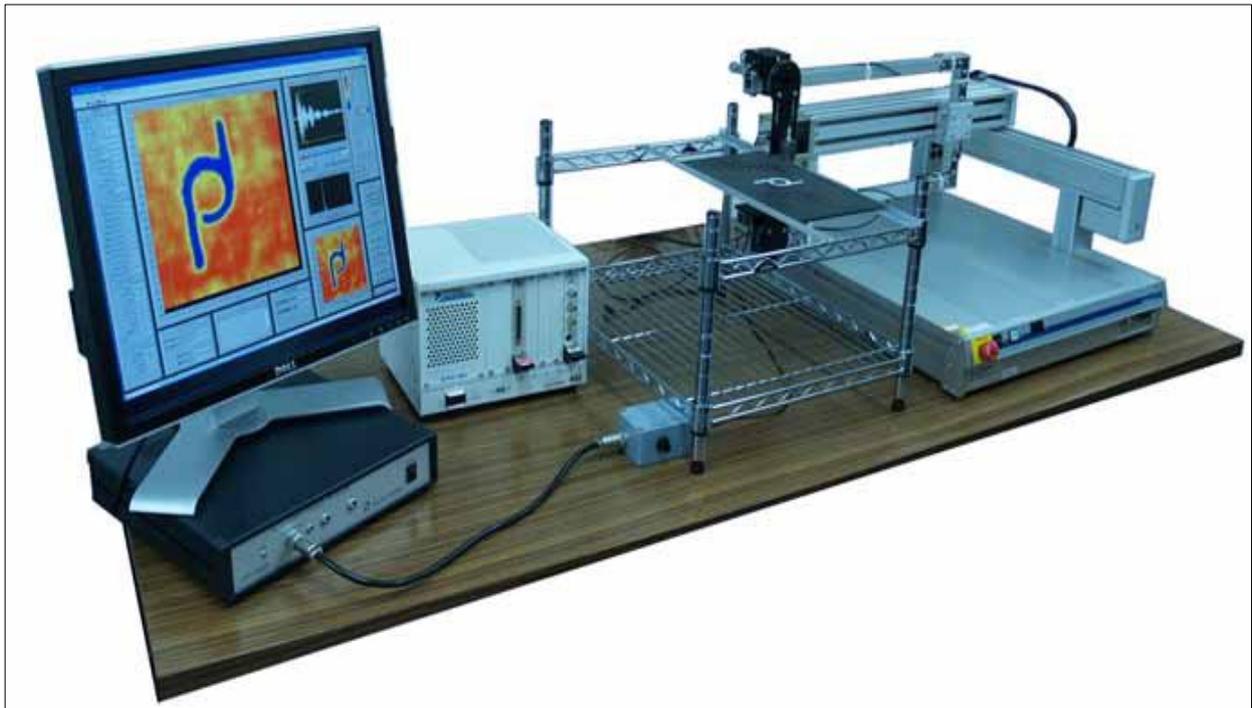


Fig.4-2 Auto image scanning equipment

제2절 시 험 편

CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)는 복합재료의 한 종류로 탄소섬유를 Epoxy와 같은 고분자 수지 내부에 보충되어 강도를 향상시킨 섬유강화 플라스틱으로 시험편은 Fig.4-4와 같다. CFRP는 금속류보다 약 50%정도 가볍고 강도 또한 높아서 현재 친환경자동차의 부품소재로 주목 받고 있어 자동차의 외장부품 및 차체에 부분 적용하면 무게가 절감됨으로써 연비를 향상, 탄산가스(CO2) 배출량을 감소시켜 지구온난화 방지에 기여할 수 있다. 하지만 CFRP 같은 섬유강화 고분자 복합재료는 층간 박리 결함의 존재 여부에 따라 강도가 크게 변화하기 때문에 초음파와 같은 비파괴검사의 필요성이 아주 높다.



Fig.4-3 Application on NAUT of CFRP specimen A, B

Brake Pad는 자동차 휠과 함께 회전하는 원판형의 디스크에 패드에서 마찰을 일으켜 제동력을 발생, 자동차의 속도를 감속시키는(제동역할)아주 중요한 역할을 한다. 이러한 Brake Pad에서 라이닝부분과 뒤판의 압착이 제대로 되어있지 않다면 제동시에 제품의 마모 및 내구성이 떨어져 제동이 잘 이루어지지 않아 급제동시 제동력이 잘 되질 않아 사고가 일어날 수 가능성이 있기 때문에 조기의 결함검출이 필요하다. 이러한 검사를 실용화 하기 위해 brake pad 시험편에 NAUT 탐상을 적용해 보았다.



Fig.4-4 Application on NAUT of brake pad specimen A, B

제3절 CFRP 실험

1. 결함 유무에 따른 파형 분석 비교

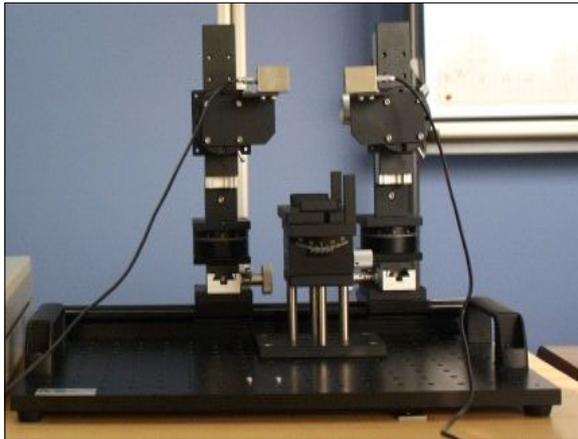
본 연구에 사용된 시험편은 CFRP 시험편으로 결함 유무 파악하기 위해 NAUT 탐상기법을 적용해 보았다. NAUT 탐상에 두께가 다른 2개의 CFRP 시험편을 적용, 실험을 실시하였다.

시험편A: Width-100mm, Length-150mm, Thick-3mm

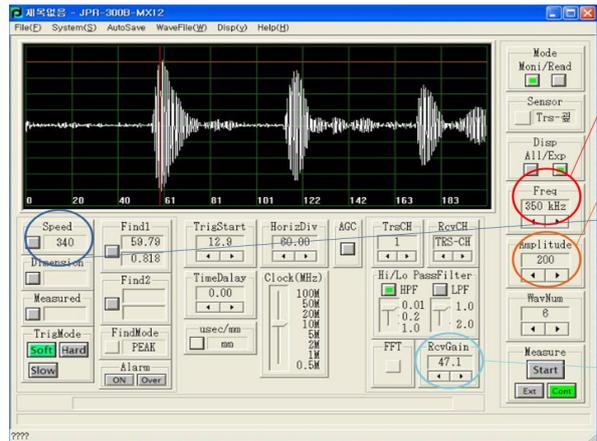
시험편B: Width-100mm, Length-150mm, Thick-4mm

CFRP 시험편 2개를 A, B로 지정하여 각 시험편에 실험을 진행한 결과 시험편 A는 중앙부에 결함이 있다는 것을 알 수 있었으며, 시험편 B는 같은 중앙부분에 결함이 있지만 A보다 더 넓고 크게 결함이 있다는 것을 알 수 있었다.

CFRP 시험편 A, B를 Fig.4-5에 있는 NAUT 수동 탐상 지그에 고정시키고 UT Pulser receiver (JPR-300B)에 고감도 Air probe(0.4K14X20N) 연결시켜 탐상 프로그램 S/W를 실행시킨 후 실험을 실시하였다. 각 시험편을 x, y축으로 이동하면서 결함 여부를 파악하고 결함에 따른 파형 결과를 비교하였다.



(a) Manual NAUT



(b) monitor system



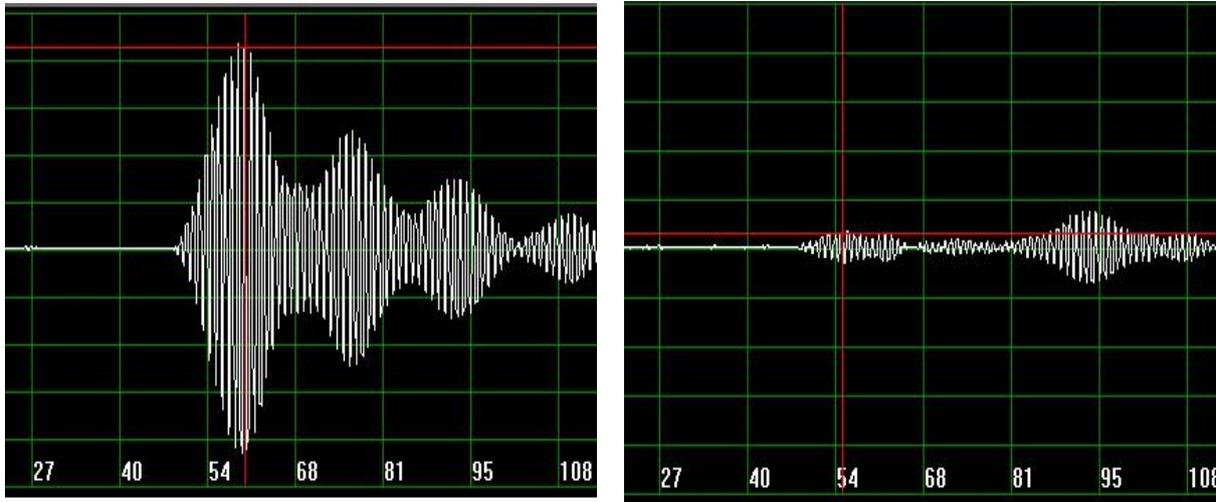
(c) UT Pulser receive



(d) PRE-AMP

Fig.4-5 Manual inspecting device

Fig.4-6은 결함이 있는 부분과 없는 부분의 파형 결과를 비교 분석한 결과 이다. 보통 박리 및 들뜸으로 인해 생성된 공기층에 초음파를 투과시킬 경우 초음파 투과율이 떨어져 파형이 낮게 형성되는데 이것을 보고 결함유무를 파악할수 있다.



(a)Non defect part

(b)defect part

Fig.4-6 Comparison of the waveform depending on the presence of defects

2. CFRP의 내부결함 검출

CFRP 화상탐상 수행에 앞서서 시험조건 또한 매우 중요하다. Averaging count, Gain, Trigger mode, Speed, Freq등등과 같은 화상탐상 조건을 설정하였으며 이는 Table4-1과 같다.

Table4-1 Image inspecting condition of CFRP specimen A, B

Specimen	A	B
Inspection condition		
Averaging count	10	
Gain(dB)	29.2	24.3
Tx freq(kHz)	370	360
Scanning pitch	1.0mm	
Scanning speed	100 mm/sec	
Probe	Focus type 0.4K20NR38 Flat type 0.4K14X20N	

장치의 전원을 ON시키고 화상 S/W를 실행하여 air probe를 기준위치로 이동시킨 후, 초기 시작점을 기준으로 지정한다. 이후 Pulser receiver 설정화면에서 송신 전압, 주파수, 파수, gain값, 스피드등 값을 조정하고 측정범위를 설정한다. 그리고 스캔을 수행한 후 취득한 화상을 통해 그 결과를 파악한다. 화상에서 나타나는 컬러는 투과율에 따라 다르게 나타나는데 투과율이 높을수록 적색계열, 투과율이 보통일 경우 황색계열, 낮은 부분은 청색계열로 나타난다.(보통 결함의 경계부분이 황색계열로 나타남)

기준점을 정하여 스캔을 진행하지만 시편을 벗어난 부분은 공기중의 상태이므로 투과율이 높아 적색계열로 보이게 된다. 이와 같이 얻게된 화상결과를 통해 보이지 않는 박리 및 들뜸의 결함 유무를 파악하고, 모양, 크기를 분석, 파악이 가능하다.

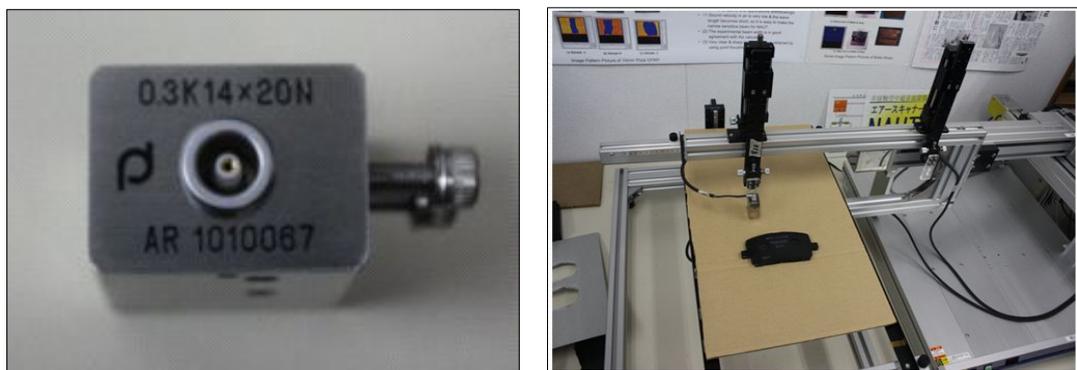
제4절 Brake pad 실험

1. 결함 유무에 따른 파형 분석 비교

본 연구에 앞서서 사용할 시험편 Brake pad A, B로 UT Pulser Receiver(JPR-300B)와 RRE-AMP를 사용하여 Brake pad 전체 면적에 대하여 탐상을 진행하였다. air probe(0.3K14X20N)로 검사 진행하였으며 Gain값은 PRE-AMP를 이용하여 35+60dB로 설정하고 damping resistance는 500.Ω으로 정하였다. Fig.4-7에 보이는 자동화 탐상 지그에 시험편을 셋팅하고 S/W JPR-10BV24eng를 실행시킨다. Brake pad 시험편을 air probe 사이에 고정시킨 후에 탐상프로그램에서 주사 pitch를 2.0mm로 설정 후 전체 부위에 초음파 투과율의 정도를 파악하기 위한 탐상을 수행한다. 정상적인 투과파형 즉, 가장 높게 출력되는 신호를 찾아 그 지점을 시작점으로 하여 탐상을 진행한다.



(a) Specimen brake pad A, B

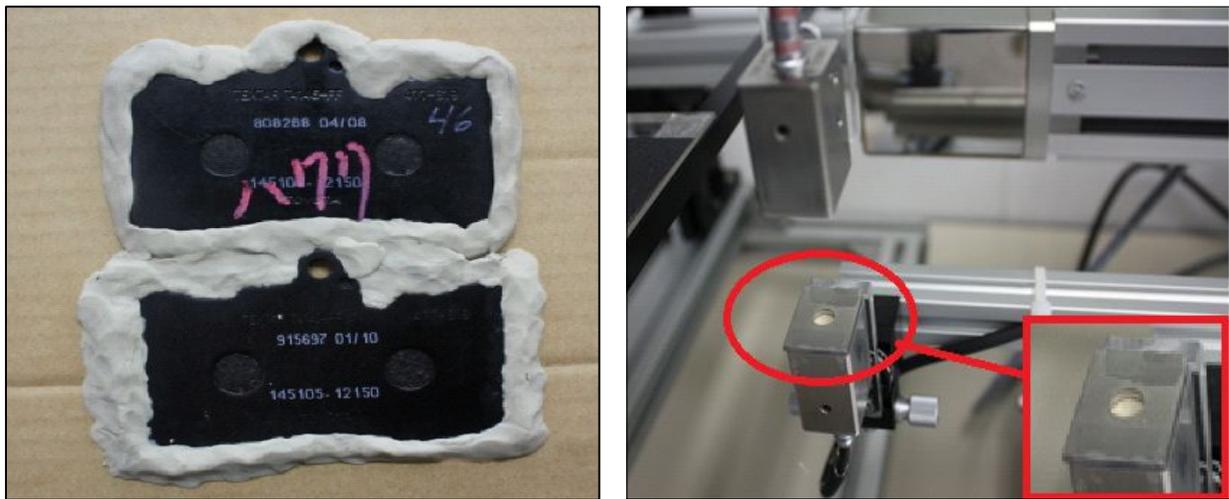


(b) Inspection Equipment(air probe)

Fig.4-7 Brake pad specimen A, B & inspecting equipment, air probe

2. 브레이크 패드의 내부결함 검출

파형 비교 분석 결과로는 단순한 초음파 투과율 저도로 파악이 가능하였다. 즉, 투과율이 낮은 부분에 들뜸이 있다고 판단이 되나 더 정확한 결과를 얻기 위해 화상탐상 시험을 진행하여 파형변화 뿐만 아니라 화상에 출력되는 색상을 바탕으로 비교분석을 진행하였다. 수동탐상과 동일한 brake pad A, B로 실험을 진행하였으며 초음파가 새어나감을 방지하기 위하여 골판지에 찰흙을 부착, 보정형 시편을 제작하여 시험을 진행하였다. 또한 정밀한 결과를 얻기 위해 수신 air probe에는 지름 6mm 마스크를 부착하여 실험을 진행하였다. 시편은 Fig.4-7와 같다.



(a)Compensated specimen brake pad A, B

(b)Air probe masking

Fig.4-8 Specimen brake pad A, B & Air probe masking

A, B Brake pad의 경우 라이닝과 뒷판이 부착형태로 되어 있어 일상 방법으로는 탐상이 어렵다. 또한 라이닝과 뒷판의 크기가 달라 초음파가 시편의 경계선 부근에서 새어나갈 수 있기 때문에 위와같이 찰흙으로 보정을 해주면 좀 더 정확한 시험결과를 얻을 수 있다. Fig.4-8은 자동 스캔 화상 스캐너 장비와 프로그램을 나타내고 있다.

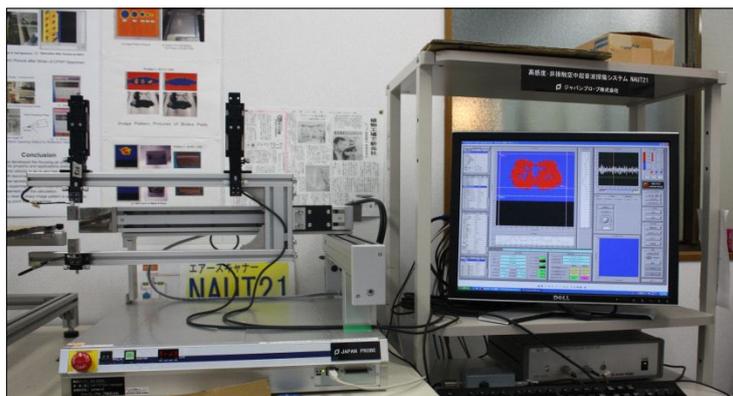


Fig.4-9 Auto image inspection system

brake pad 화상탐상 수행에 앞서서 시험조건 또한 매우 중요하다. Averaging count, Gain, Trigger mode, Speed, Freq등과 같은 화상탐상 조건을 설정하였으며 이는 Table.4-2과 같다.

Table.4-2 Image inspecting condition of brake pad specimen A, B

Specimen	A	B
Inspection condition		
Averaging count	10	
Gain(dB)	35.5	
Tx freq(kHz)	240	
Scanning pitch	2.0mm	
Scanning speed	100 mm/sec	
Probe	Flat type 0.3K14X20N	

제5장 실험결과 및 고찰

화상 탐상 수행의 경우, 화상탐상조건[(측정범위 설정: 측정원점, 측정대각점, 측정 PITCH, 측정속도), (화상파악: 송신 전압, 송신 주파수, GAIN, GATE 위치)]을 설정하여 자동 화상 탐상을 수행하여 그에 따른 취득 화상을 통해 시편의 결함 위치파악이 가능하였다.

첫 번째로 CFRP 시험편의 내부 결함 층간박리의 존재 여부를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 각 시편을 A, B로 나누어 [A(X,Y축 방향주사 : -25mm~25mm, 1mm PITCH), B(X,Y축 방향주사 : -35mm~35mm, 1mm PITCH)]와 같은 조건을 설정하여 탐상을 수행하고 결함의 존재여부를 확인하였다. 또한 Flat type 탐촉자와 Focus type 탐촉자 비교 분석, 사용 탐촉자에 따라 유용한 탐촉자가 무엇인지 확인해 보았다.

NAUT 지그에 시편을 올려 놓고 Pulser Receiver와 PRE-AMP, Air Probe 연결, NAUT21 S/W를 작동 후 실험을 시작한다. 각 탐촉자 사이의 거리와 면적, 감도등을 실험 조건에 따라 조정하여 화면에 파형이 나타나도록 하여 시험편의 중심을 영점으로 잡아 X축, Y축 방향으로 2mm pitch 간격으로 일정하게 탐촉자를 이동(수동 이동)시키면서 파형이 나타나는대로 결과를 분석한다.

Fig.5-1은 CFRP 시험편A의 탐상위치에 따른 진폭변화를 그래프로 나타낸 것으로 측정거리는 -25mm~25mm로 설정하고 X축, Y축 방향으로 2mm pitch 간격으로 주사하여 그 파형을 나타낸 것이다. 시험편 A의 경우 중앙 부분에서 초음파의 진폭이 크게 감소하는 것으로 보아 그 부분에 결함, 즉 박리현상이 있다는 것을 알 수 있다.

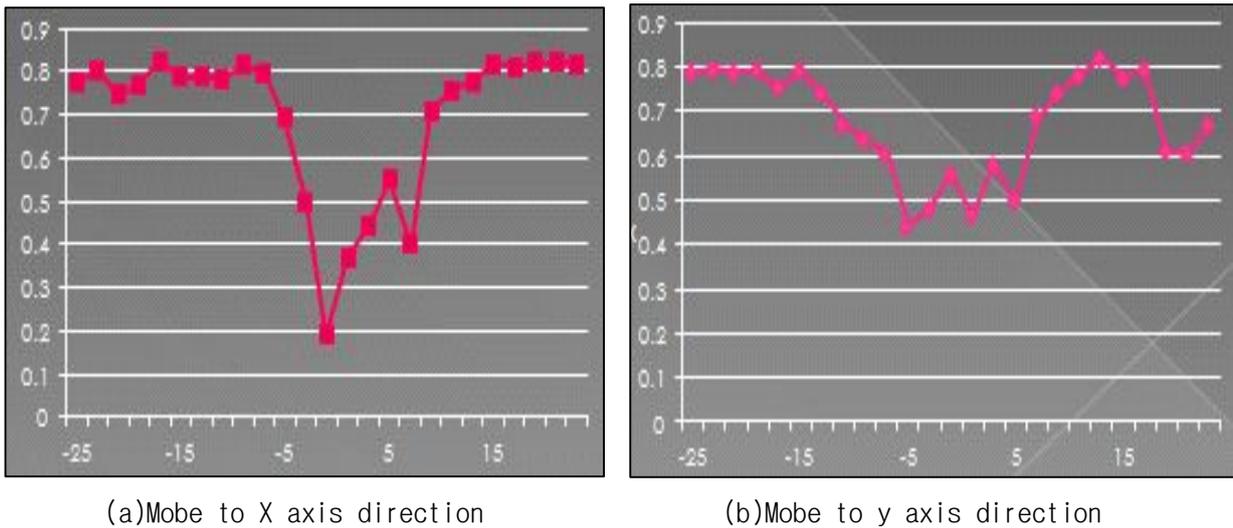
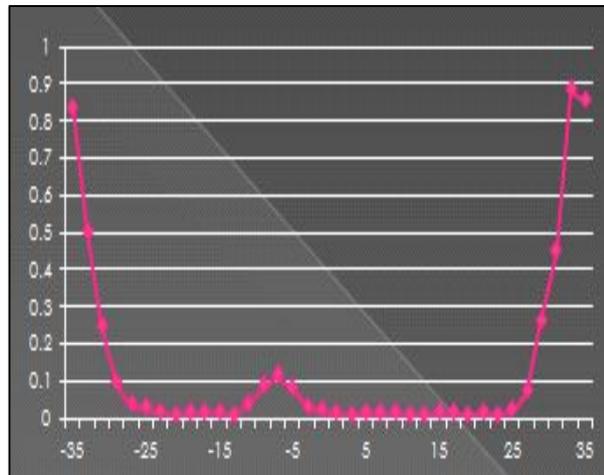
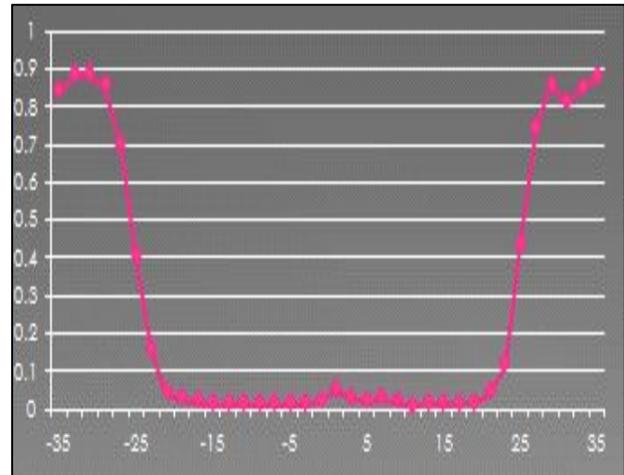


Fig.5.1 Amplitude change depending on the inspection location(CFRP A)

Fig.5-2는 CFRP 시험편 B의 탐상위치에 따른 파형 진폭 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 측정 거리는 좀 더 넓게 범위를 잡아 -35mm~35mm로 설정하여 X축, Y축 방향으로 2mm pitch 간격으로 주사하여 수동으로 이동, 그 진폭결과를 나타낸 것이다. 시험편 B의 경우 시험편 A에 비해 더 넓은 영역에서 결함이 있다는 것을 알 수 있다.



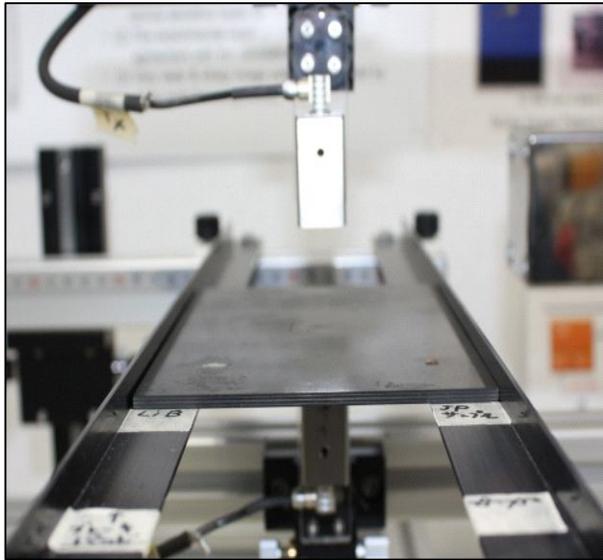
(a)Mobe to X axis direction



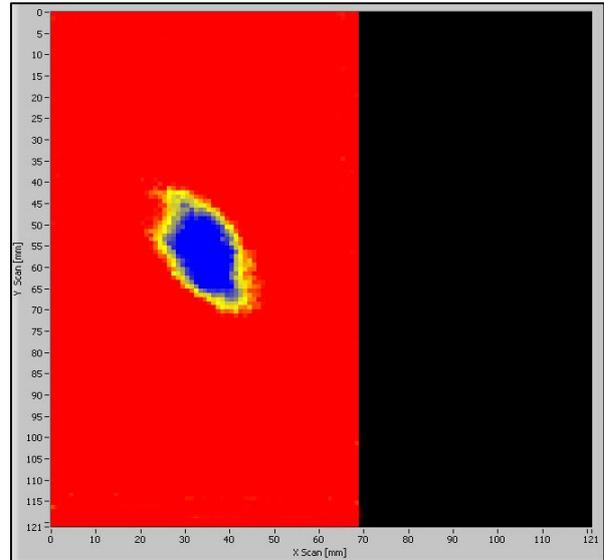
(b)Mobe to y axis direction

Fig.5.2 Amplitude change depending on the inspection location(CFRP B)

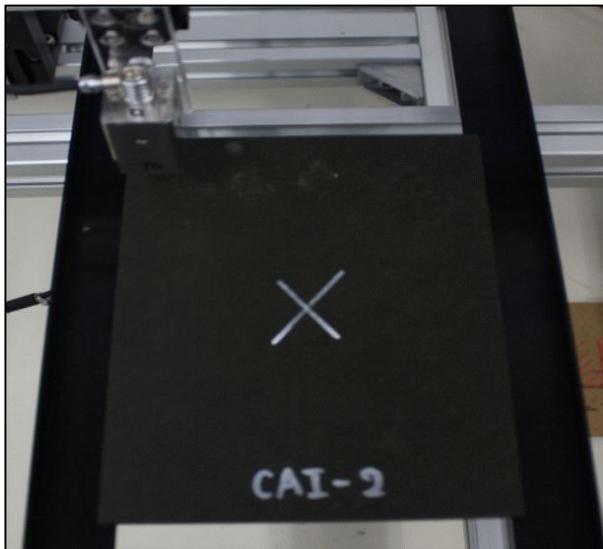
Fig.5-3은 자동화 스캔 장치를 이용하여 취득한 CFRP A, B의 화상 탐상 결과를 나타낸 것이다. 보이는 것처럼 투과율이 높은 부분은 적색, 투과율이 낮은 부분은 청색으로 나타나게 된다. 수동탐상에서 보였던 것처럼, 시험편 A의 경우 중앙부분에 결함이 있다는 것을 알 수 있으며 시험편 B의 경우 A에 비해 더 넓은 영역에서 박리현상이 보임을 알 수 있다.



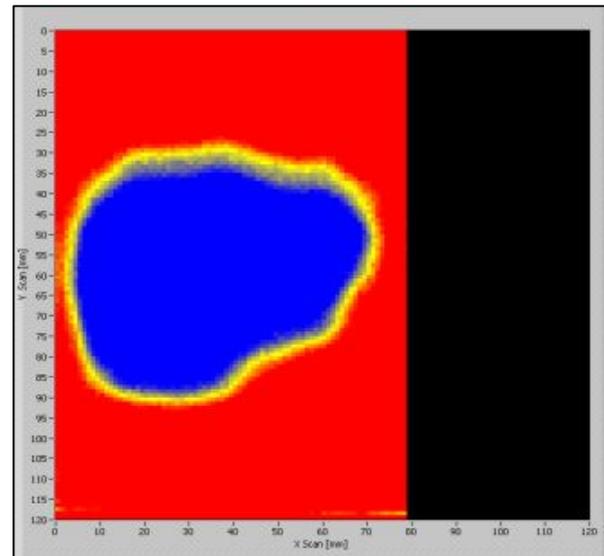
(a)Specimen A



(b)Scan monitor specimen A



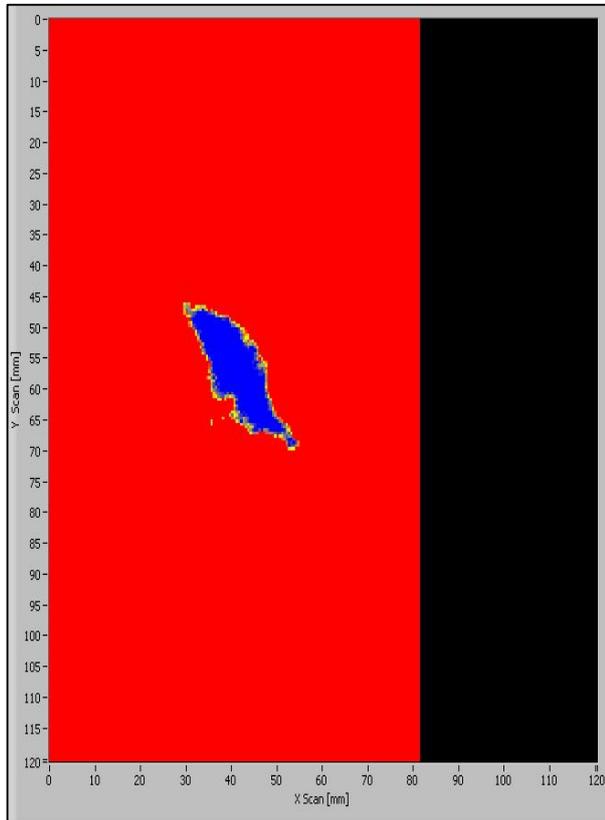
(c)Specimen B



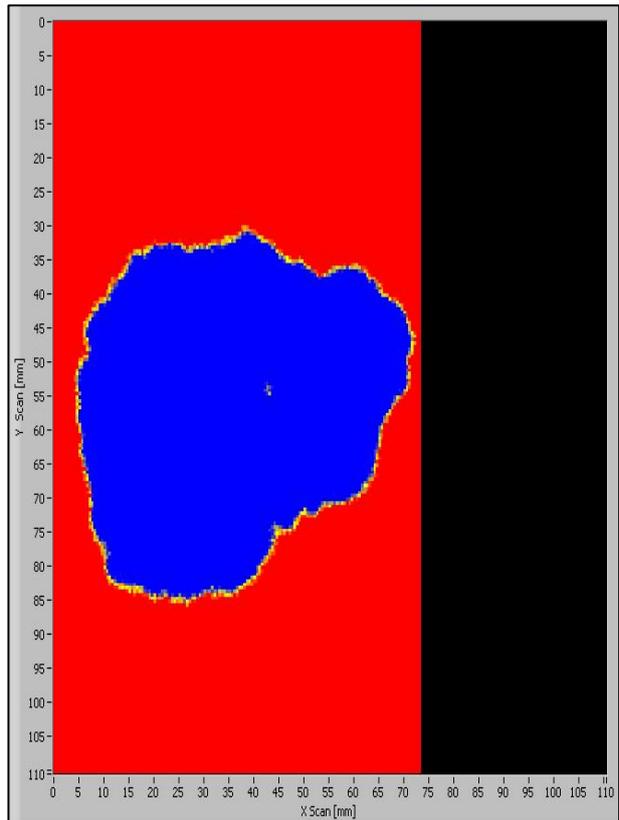
(d)Scan monitor specimen B

Fig.5-3 Image inspection result of CFRP specimen A, B

Fig.5-4는 정밀한 결과를 얻어내기 위해 탐촉자를 비교 분석한 결과인데 아래의 화상결과는 집중 탐촉자(0.4K20NR38)로 탐사를 수행하여 얻어낸 결과 화면이다. 평면탐촉자보다 집중탐촉자가 경계면이 뚜렷한 것을 확인할 수 있다. 평면 탐촉자를 사용하였을 때보다 출력된 결과가 정확한 것을 보아 분해능이 우수한 것은 집중 탐촉자라는 것을 알 수 있다.



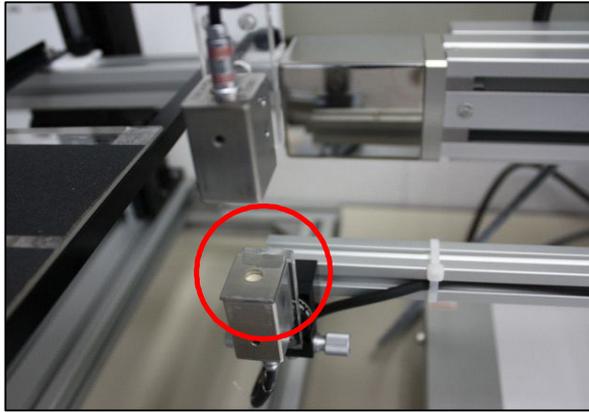
(a)Focus type probe specimen A



(d)Focus type probe specimen B

Fig.5-4 Difference of air probe(focus type)

Brake pad의 경우 라이닝과 뒷판이 부착되어 있는데, 라이닝과 뒷판의 크기가 달라 일반적인 탐상방법으로는 결과를 도출하기 어렵다. 그래서 골판지나 찰흙(점토)을 이용하여 주위에 공기가 들어가지 않게끔 보정형 시편을 만들어 주는데 중요하다. 브레이크 패드 두께 또한 두꺼워 Focus type의 탐촉자는 탐상이 어렵기 때문에 Fig5-5처럼 평면 탐촉자를 사용하여 탐상하였으며, 수신면에 mask를 부착하여 실험을 실시하였다.



(a)Masking probe(0.3K14X20N)



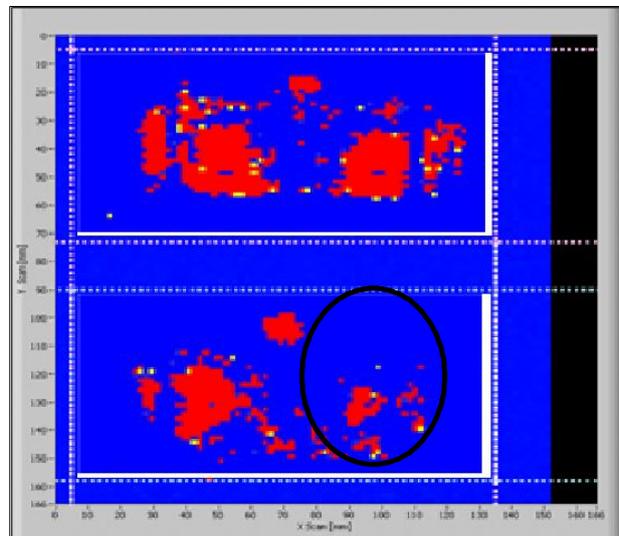
(b)Specimen brake pad A,B

Fig.5-5 Scanner brake pad Specimen A, B

Fig.5-6의 그림은 Brake pad 탐상 후 결과를 나타내는 그림이다. 좌측 brake pad는 점토를 이용하여 탐상 시 공기가 새어 나감을 방지하기 위해 만든 보정형 시편이며, (위의 brake pad가 양품, 아래 brake pad는 불량) 우측 그림은 탐상결과를 화면으로 출력된 결과이다. 출력된 결과를 보고 분석한다면 양품 brake pad의 경우 전체적으로 투과율이 높아 일정하게 붉은색을 띄지만 불량 brake pad의 경우 표시해 놓은 것처럼 좌측 부분이 라이닝과 뒷판의 부착상태가 양호하지 않아 투과율이 높지 않음을 볼 수 있다. 즉 라이닝과 뒷판이 들떠 있어 부분적으로 불량임을 알 수 있다.



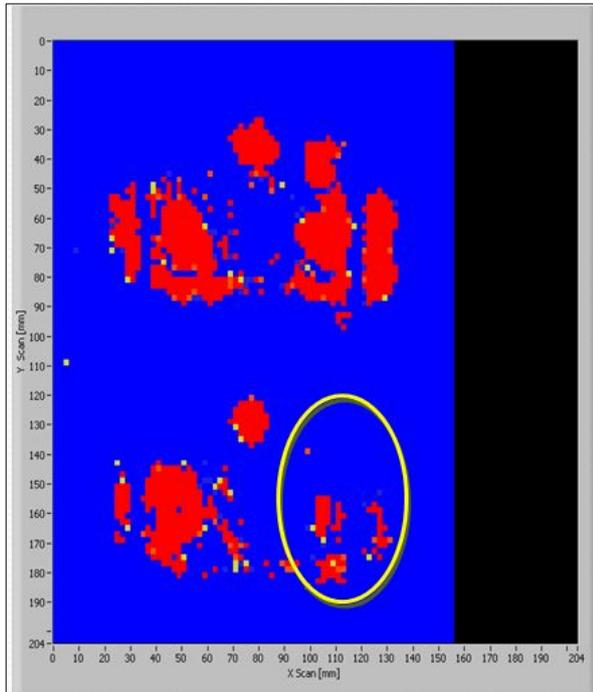
(a)Compensated specimen brake pad A, B



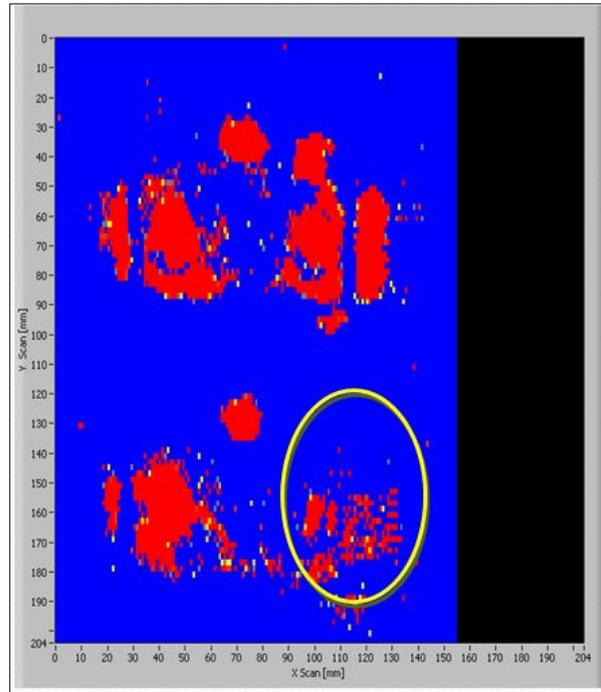
(b)C-scan monitor brake pad

Fig.5-6 C-scan monitor brake pad A, B

Fig.5-7의 그림은 같은 시편 Brake pad를 pitch값을 조정하여 측정한 것이다. 좌측(a)은 pitch 1.0mm로 탐상을 수행하였고 우측(b)는 pitch 0.5mm로 설정하여 탐상을 수행한 결과를 화상으로 나타낸 결과이다. pitch 값이 낮아질수록 더 정확한 결과를 알 수 있었으며, 아래 탐상 결과에서 보이는 것처럼 아래 Brake pad의 경우 우측부분이 투과율이 낮아서 청색을 나타내는 것을 보아 그 부분에 들뜸이나 박리 현상이 있다는 것을 확인 할 수 있다.



(a)Pitch 1.0mm C-scan monitor brake pad



(b)Pitch 0.5mm C-scan monitor brake pad

Fig.5-7 Difference of pitch(1.0mm, 0.5mm) C-scan monitor brake pad A, B

제6장 결 론

자동차 부품소재로 주목받고 있는 CFRP 복합 소재 시편과 사람의 생명과 직결되는 부품인 Brake pad를 가지고 비접촉 공중 초음파 탐상을 통해 육안에 보이지 않는 결함, 즉 박리 현상, 들뜸현상의 존재 유무를 확인해 보았다.

1. 수동 탐상으로 실험 진행 시 파형발생으로 인한 결함유무를 파악하여 어려움이 있었다면, 자동 탐상을 진행하였을 때 파형 뿐만 아니라 화면으로 출력이 되어 좀 더 쉽고 정확한 결함의 위치 및 크기 분석하기가 더 용이하였다.
2. 평면 탐촉자보다 점접속 탐촉자를 사용하여 CFRP 시편을 탐상결과 좀더 정확한 결함의 크기 및 경계부를 알게 되었다. 하지만 Brake pad의 경우 라이닝과 뒷판이 접촉형태로 붙어 있어 두께가 두꺼워져 일반 점접속 탐촉자로 측정이 어려웠다. 그래서 평면탐촉자에 지름 6mm 마스크를 씌워 자동 탐상을 수행한 결과 들뜸 부위를 좀 더 쉽게 찾아낼 수 있었다.
3. 수동탐상을 통해 파형 분석비교를 해볼수 있었다면, 자동 탐상을 통해 제품의 투과율에 따른 결과 스캔 출력이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 또한 육안상 보이지 않는 층간 박리 및 들뜸 현상에 대해 알 수 있었으며 결함의 유무, 위치, 크기를 파악하는데 자동 탐상이 용이하였다.
4. 결론적으로 NAUT 자동화 탐상법이 개발된지 얼마 되지 않아 자동차 제조공정 등 적용된 사례가 없어 적용여부를 선불리 판단할 수 없으나 자동차 양산성에 검증이 된다면 제품의 품질향상에 높게 기여할 수 있다고 생각한다. 또한 비파괴로 진행되는 검사이기에 적용할 수 있는 범위가 넓어 자동차 뿐만 아니라 광범위한 검사에 적용 될 수 있다고 판단한다.

Reference

1. 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, 6-3, pp.81-86(2010)
2. K.so, K.Naouuki, B.Atsushi, A.yuji, O.Mitsuru, "A 3-Diminsional Phased Array Ultrasonic Technique, "Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 1-1, pp.1-4(2010)
3. M.Hirohisa, K.Naoyuki, N.Junichiro, K.Mashro, "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, 1-2, pp.5-6(2010)
4. 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 1-3, pp.7-12(2010)
5. M.Akihiko, O.Naoto, I.Toshiiro, "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 4-1, pp.51-52(2010)
6. K.Yasuhiro, O.Toshihiro, 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 5-1, pp.57-60(2010)
7. K.Koichiro, I.Ryusuke, "Non-contact Materials Characterization and Defect detection by air-Coupled Trasducers," Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection 6-1, pp.71-76(2010)
8. T.Masakazu, N.Masaaki, K.Keiji, B.Hiroshi, O.Hideo, O.Yukio, "development of Imaging

Equipment by Non Contact Air Coupled Ultrasonic Testing," 7th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 6-2, pp 77-79(2010)

9. 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)

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

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

12. 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)

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

14. 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, pp23-30(2007)

15. J. Y. Kim, S. Y. Na, S. K. Song, "The applicatio of NAUT(Non contact Air coupled ultrasonic Testing) to Spot Welding Part, KSNT, pp.347-352

16. S. Y. Na, J. Y. Kim, "The application of NAUT to detect Lamella Tearing, KSTLE, pp.105-106

17. 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, pp.367-372(2010)

18. 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)

19. 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)
20. 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)
21. 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)
22. 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)
23. 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)
24. 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

감사의 글

석사 학위 과정을 마무리한다고 하니 정말 힘들고 그만둘까 했었던 그 모든 일들이 주마등처럼 지나갑니다. 항상 조연과 훈계를 잊지 않으셨던, 당근과 채찍을 주셨던 교수님의 가르침 덕에 제가 이 힘든 과정을 잘 이겨내고 성장할 수 있었다고 생각합니다. 마지막까지 포기하지 않고 학위논문을 완성하는데 큰 도움을 주신 김재열 교수님께 다시 한번 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 미흡하여 부족한 논문을 이끌어주신 심재기 교수님과 기계공학과 윤성운 교수님께도 감사의 말 전합니다. 또한 부지런히, 성실히, 열심히 생활하라는 좋은 조언도 해주신 유영태 교수님, 오울권 교수님, 이동기 교수님께도 감사드립니다.

실험실 생활을 하면서 막내로 생활하며 정말 힘들고 지칠 때가 많았지만 그때마다 고민을 들어주고 상담해준 승현이형, 일함에 있어 조언을 해준 남수형, 대광이형, 같은 파트로 배우고 일하면서 도움을 많이 준 선영이에게도 감사의 말 전합니다.

항상 저의 곁에 있어서 삶에 원동력이자 활력이 되어주고 응원해준 부모님, 내 하나뿐인 동생이자 보물, 항상 내편인 내동생 인표에게도 너무 너무 고맙고 사랑한다는 말 전해주고 싶습니다.

대학원 생활 이전에 내 대학교 동기 05학번. 내가 운동하면서 학교생활 제대로 못할 때 적응 잘하도록 도와준 대우, 영창, 영도, 익균, 슬기에게도 항상 고맙고 감사하다는 말 전하고 싶습니다.

또한 일하면서 지치고 힘들고 어려울 때, 항상 옆에서 있어주고 힘이 되어준, 버팀목이 되어준 내반쪽 윤나연에게도 너무 고맙고 사랑한다는 말 전하고 싶습니다.

마지막으로 제가 잘 할 수 있도록, 잘 버틸 수 있도록, 포기하지 않도록 도와주고 격려를 아끼지 않았던 많은 분들께도 진심으로 감사드립니다.

2014년 12월 박 인 우 올림