

2011년 8월
조사항목과 부담
친환경 부품 소재의 신뢰성평가에 관한 비전문가 이해 측정과 환경영향의 적정
나 선 영

2011년도 8월

석사학위논문

친환경 부품 소재의
신뢰성평가를 위한 비접촉 공중
초음파 탐상방법의 적용

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

나 선 영

친환경 부품 소재의
신뢰성평가를 위한 비접촉 공중
초음파 탐상방법의 적용

The application on NAUT method for reliability
evaluation of eco-friendly components and
materials

2011年 8月 25日

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

나 선 영

친환경 부품 소재의
신뢰성평가를 위한 비접촉 공중
초음파 탐상방법의 적용

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위신청 논문으로 제출함

2011年 04月

조선대학교 대학원

첨단부품소재공학과

나 선 영

나선영의 석사학위논문을 인준함.

위원장 조선대학교 교수 심재기 印

위 원 조선대학교 교수 황석승 印

위 원 조선대학교 교수 김재열 印

2011年 05月

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 고감도 비접촉 탐촉자	7
제 1 절 탐촉자의 거리 특성	7
제 2 절 집속 탐촉자의 특성	10
1. 평면 탐촉자와 선집속 탐촉자의 비교	10
2. 수직입사의 투과율	13
제 3 장 비접촉 공중 초음파 탐상 시스템	15
제 1 절 NAUT 화상탐상 원리	15
1. 신호 출력 및 데이터 처리	15
제 2 절 인공결함 시험편에 대한 탐상	17
1. 상간·층간박리 소재 탐상	17
2. 박리를 가장한 IC칩 탐상	21
3. 정상·불량 여부에 따른 Brake shoe 탐상	22
제 4 장 비접촉 공중 초음파 탐상 실험	23

제 1 절	실험장치	23
제 2 절	시험편	25
제 3 절	스폿용접 실험	26
	1. 수동 탐상	26
	2. 자동 탐상	28
	3. 화상 탐상	29
제 4 절	탄소섬유강화 복합재료 실험	35
	1. 결함 유무에 따른 초음파 투과율 파악	35
	2. 내부결함 층간박리 검출	37
제 5 장 실험결과 및 고찰		38
제 6 장 결론		47
Reference		49

List of Figures

- 2-1. Distance of frequency(200~800kHz) depending on ultrasound transmission
- 2-2. Distance of frequency(1, 2, 5MHz) depending on ultrasound transmission
- 2-3. Comparison between experiment and calculation value of characteristics of NAUT distance
- 2-4. Inspection on the CFRP and SUS plates with 2MHz probe
- 2-5. Comparison of flat type probe and line focus type probe
- 2-6. Measuring method with Hydro hon
- 2-7. Distance between point focus type probe and beam diameter
- 2-8. Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe
- 2-9. Application of near sound field from focus type probe
- 2-10. Air-to-specimen-to-air transmission
- 2-11. Relationship between acoustic impedance and transmission efficiency
- 3-1. Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined
- 3-2. Data output from NAUT21 system
- 3-3. Comparison of image between point focus type probe and flat type probe
- 3-4. Image of CFRP VaRTM specimen
- 3-5. Image of CFRP specimen having through pierce hole
- 3-6. Image of CFRP specimen damaged by torpedo attack
- 3-7. Image of CFRP specimen depending on the surface pressure of CFRP specimen
- 3-8. CFRP image after tensile
- 3-9. Comparison of image between normal IC chip and poor condition of IC chip
- 3-10. Comparison of image between normal and poor condition of brake shoe
- 4-1. Inspection equipment of NAUT
- 4-2. Auto image scanning equipment
- 4-3. Application on NAUT of spot welding specimen
- 4-4. CFRP specimen A,B,C
- 4-5. Spot welding specimen A,B,C & inspecting equipment, probe
- 4-6. Manual inspecting on the spot welding specimen

- 4-7. Auto inspecting equipment
- 4-8. Spot welding specimen A,B,C,D
- 4-9. Auto image inspection system
- 4-10. Auto image inspection program execution
- 4-11. Manual inspecting device
- 4-12. Comparison of the waveform depending on the presence of defects
- 5-1. Comparison of waveform depending on each part of specimen
- 5-2. Comparison of waveform depending on each part of specimen
(padding cardboard around the specimen for calibration)
- 5-3. Comparison of transmission rate depending on each part of spot welding specimen(-15~15mm)
- 5-4. Comparison of transmission rate depending on each part of spot welding specimen(-30~30mm)
- 5-5. Amplitude difference depending on each part of spot welding specimen
- 5-6. Comparison of FFT waveform depending on each part of specimen
(Left : Ultrasonic signal, Right : FFT signal)
- 5-7. Image inspection result of spot weld specimen A,B,C,D
- 5-8. Image acquisition depending on PRF cycle
- 5-9. Amplitude change depending on the inspection location(CFRP A)
- 5-10. Amplitude change depending on the inspection location(CFRP B)
- 5-11. Amplitude change depending on the inspection location(CFRP C)
- 5-12. Image inspection result of CFRP specimen A,B
- 5-13. Image inspection result of CFRP specimen C

List of Tables

Table 4-1. Image inspection condition of spot weld specimen A,B,C,D

Table 4-2. Condition of CFRP specimen

Table 4-3. Image inspection condition of CFRP specimen A,B,C

NOMENCLATURE

- L : The distance between probe[mm]
 P_x : Characteristics of distance[mm]
 P_0 : Sound pressure($x=0$)
 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
 ρ : Material density
 t : Transmission rate
 ω : Angle frequency
 x : Transfer distance[mm]

ABSTRACT

The application on NAUT method for reliability evaluation of eco-friendly components and materials

SunYoung Na

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

Dept. of Advanced materials and parts engineering

Graduate School of Chosun University

NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) is an inspection technique to remedy the existing contact inspection by supplementing energy loss created by differences of acoustic impedance between the solid and the air with high power ultrasonic Pulser Receiver, PRE-AMP, and high sensitivity probe, and enabling the ultrasonic inspection which uses the air as a medium. In order to overcome weaknesses of the existing contact ultrasonic inspection that is not possible to apply couplant to a specimen with a rough surface or a narrow spot containing materials of the low and high temperature, NAUT that enables the non contact ultrasonic inspection in the air is applied. Applying NAUT, it is possible to inspect ultrasonic waves in the air without couplant and even in materials of the low and high temperature, or in a specimen with a rough surface, compared to the existing contact ultrasonic inspection, because it can transmit and receive them in a

stable condition. Application of NAUT may save the time and expenses, because it can detect faults in real time.

As explained above, this thesis observe how well NAUT is applied, by inspecting ultrasonic waves in spot welding part, to CFRP using its advantages. As the non destructive inspection is not yet employed in the manufacturing stage of environment-friendly cars, the establishment of this technique will enable us to produce environment-friendly vehicles with the excellent safety and quality.

In this thesis, NAUT's manual, automatical, and image inspection are carried out targeting spot welding part and CFRP for verifying its utility. First of all, using a spot welding specimen, an experiment to select inspection conditions(transmission and reception angle, interval and output, etc.) considering transmission characteristics of ultrasonic waves depending on each location[(thick part(0.4mm), overlap part(0.3mm), spot welding part(0.3mm), thin part(0.1mm)], and mode conversion is carried out. For automatic inspection, after setting up the inspection distances(-10mm~10mm, -30mm~-15mm and 15mm~30mm), we perform scanning ultrasonic waves at an interval of 0.5mm pitch to observe penetration ratio of ultrasonic waves and difference of amplitude changes in a broader scope. Secondly, another experiment is implemented to examine the existence of delamination with inner defects using CFRP test pieces. After classifying each test piece into A, B and C, measuring conditions[A(X and Y axis scanning: -20mm~20mm, 2mm pitch), B(X and Y axis scanning: -40mm~40mm, 2mm pitch) and C(X and Y axis scanning: -30mm~30mm, 5mm pitch)] are set and then, the existence of delamination is observed through. After setting up image inspection conditions(Averaging count, Gain, Scanning pitch, Scanning speed and Probe) to find an accurate location of delamination, we verify the performance of proposed techniques using results and images. From above results, we observe that the NAUT is not only applicable to all the cases, but it also may be commercialized.

1장 서론

제1절 연구배경

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

수동탐상의 경우, 결함을 파악하는데 숙련된 기술자가 요구되며, 접촉매질 없이는 초음파 탐상이 이루어지지 않는다. 초음파 탐상을 수행하기 위해서는 결함을 검출할 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 탐상했던 초음파 탐상은 초음파 투과율의 정도에 따라 나타나는 CRT상의 파형변화로 각 결함의 위치, 크기 등을 바탕으로 탐상을 수행하지만 C-SCAN 화상화 탐상 방법⁽¹⁴⁾의 경우, 접촉매질을 물로 하는 수침법을 이용하여 초음파 탐상을 수행한다.

탐상에 사용할 시험편을 물속에 넣은 상태에서 PC로 S/W실행 명령을 주면 설정해 놓은 탐상조건에 따라 시험편의 각 부분을 스캔하면서 내부결함의 존재여부를 파악하여 화상으로 보여준다. 탐상순간부터 완전한 화상취득은 불가능하므로 먼저 예비 스캔(S-SCAN)을 수행한 후, 결함이 존재할 지점을 선택하여 재스캔을 수행한다. 이후에 어느 정도 화상이 취득되었을 때, 정확한 결함상태를 파악하기 위해 파형이 나타난 부분에서 결함파형을 찾아 그 부분에 S-gate를 걸어 다시 한번 재스캔을 수행한다. 위와 같이 정확한 결함의 위치파악이 가능해질 때까지 계속적으로 스캔을 수행함으로써 완전한 화상의 취득이 가능하게 된다. 기존의 수동탐상과는 다르게 보다 정확한 결함의 위치, 크기 및 상태의 파악이 가능하며, 육안으로는 판별이 불가능했던 부분에 대해 한눈에 파악이 가능하다.

그 외에도 접촉식 방법과 비접촉식 방법으로 초음파 탐상을 수행하는 다양한 비파괴 검사방법이 있다. 물과 같은 접촉매질이 있어야 초음파 탐상이 가능한 기존의 수침법에 따른 시험편과 물의 접촉상황의 영향을 최소화한다.⁽⁵⁾

이는 압축응력 하에 있는 피로균열이나 응력부식 파편의 선부는 부분적으로 접촉하여 초음파가 투과하여 에코가 얻어지는 균열 길이⁽¹⁷⁾에 대한 평가를 수행할 경우, 닫힌 균열⁽¹⁾을 평가하는 방법이다. 큰 진폭의 Burst파가 입사하고 미소 간격의 균열은 개폐하여 강성이 변화되며, 그 재료의 비선형성에 따라 고주파가 발생되는데 이를 이용한 닫힌 균열의 평가가 가능하다. 하지만 탐촉자나 접촉매질, 물 등도 비선형성⁽¹⁸⁾을 가지기 때문에 수신파에는 이에 따른 균열 이외에서 발생하는 고주파가 포함되어 균열로 발생하는 고주파의 정도를 평가하는 것은 불가능하다. 따라서 접촉매질 물 등의 다른 영향을 최소화할 수 있다면 미세 균열 선부의 검출이 가능하게 되어 균열 측정에 대한 고정도화가 가능한 비선형 초음파법⁽³⁾을 사용한다. 그리고 중성자를 조사 원화하는 비파괴 방법이 있는데 압력용기강·모델 합금에 대한 초음파의 공조 특성을 파악하는데 있어서 다음과 같은 어려움이 따른다. 조사원화⁽⁶⁾의 원인은 화자조성이나 조사조건의 불일치와는 다른 개념이지만 구리를 불순물로 하여 포함시킨 RPV강이나 접촉시에 구리의 개입으로 조사에 따른 동석출물의 형성이 주요인이 되며, 이는 소성 변화가 일어날 때, 전위의 이동을 방해하기 위한 항복응력⁽¹⁹⁾이 상승되어 원화하게 된다. 하지만 일반적으로 격자 결함의 형성⁽²⁰⁾은 여러 물성의 영향을 고려하기 위해 결함과 상관관계가 있는 특성을 이용하는 것으로 원화의 비파괴평가의 필요성이 요구된다.

초음파 비파괴검사에 대해 방사선이나 전자기 검출에 따라 접촉매질을 사용하지 않고 수행하는 비접촉 탐상은 궁극적인 목표가 되고 있다. 하지만 이전부터 실용화된 전자 초음파 탐촉자(EMAT)법⁽⁴⁾, 레이저 초음파법⁽¹¹⁾이 있기는 하지만 이 방법은 적용 대상이 한정되어 초음파 빔에 따른 지향성 제어·집속화가 곤란하며, 이와 같은 문제점이 있어 광범위하게 이용되는 기존의 공기 초음파 탐상법⁽⁷⁾은 그린 세라믹스, 플라스틱, 재료 등의 특성재료에 적용되고 있다. EMAT는 코일과 자석으로 구성되어 있어 조합된 여러 종류의 초음파의 발생이 가능하며, 전자적 작용이 아닌 비접촉 방식⁽¹²⁾으로 시험편 내부에 초음파를 발생시켜 결함의 검출이 가능하도록 한다.

다음으로 Phased Array법⁽²¹⁾이 있는데 Array Sensor 내부의 복수의 압전소자에 지연시간을 고려하여 초음파의 위상을 제어하여 송·수신하는 방법으로 임의의 위치에 빔을 집속시켜 센서가 고정되어 있어 전자 빔의 주사가 가능한 검사기술이다. 현재 Phased Array법은 1차원 Array Sensor에 따른 선집속 빔이 2차원 파면상에서 검출된다. 따라서 이와 같은 방법을 고도화하여 2차원 Array Sensor(Matrix Array Sensor)⁽²²⁾에 따른 점집속 빔을 3차원⁽²⁾적으로 주사함과 동시에 표시까지 가능해진다면 주사의 신속화가 이루어지고 결함 검출성이 향상된다. 이와 같이 다양한 비파괴검사 방법들이 있지만 친환경 부품소재인 차체조립공정의 기본이 되는 스폿용접부와 층간박리에 의한 강도변화가 심해 비파괴 신뢰성평가의 필요성이 있는 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic)에 대한 실시간으로 미세결함검출이 곤란하여 현장적용은 거의 불가능한 실정에 놓여있다.

제 2절 연구목적 및 방법

시험편의 표면이 거칠고 매끄럽지 못하거나 저온·고온의 물질 등 좁은 지점에서는 couplant(접촉매질)의 적용이 불가능했던 기존의 접촉식 초음파 탐상 방법의 단점을 보완하기 위해 공기중에서 비접촉식으로도 초음파 탐상이 가능한 NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) 방법을 이에 적용하였다.

비접촉 공중 초음파 검사에서 사용하는 구형 Burst 초음파는 펄스 초음파에 비교해서 강력한 power가 나오고 주파수나 파수가 쉽게 변할 수 있는 최적탐상조건을 찾아내기 용이한 이점이 있어 High Power로 송수신이 필요한 NAUT에 적용하고 있다. 대표적으로 구형 Burst파를 사용하는 NAUT에 관한 원리, 적정 주파수, 파수, 입사각 및 탐촉자의 선정방법 및 박판의 결함 검출, IC칩 등의 응용 사례가 있다.

고체와 공기간의 음향 임피던스의 차이로 생기는 에너지 손실을 High Power 초음파 Pulser Receiver, PRE-AMP, 고감도의 탐촉자로 보완하여 공기를 매질로 하는 초음파 탐상이 가능하도록 하여 기존의 접촉식 방법을 보완한 탐상기술이다. NAUT 탐상 기술의 적용이 이루어진다면 couplant(접촉매질) 없이 공기중에서도 초음파 탐상이 가능해짐과 동시에 안정된 상태에서의 초음파의 송·수신이 가능해져 기존의 초음파 탐상의 접촉식 방법으로는 불가능했던 한계를 최소화 할 수 있다.

NAUT 탐상기술의 실현이 이루어질 경우, 실시간으로 결함의 존재 여부에 대한 파악이 가능하여 시간과 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다. 따라서 NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing)의 이점을 부각시켜 스폿 용접부, CFRP 시험편에 비접촉 초음파 탐상을 시도함으로써 NAUT가 이 부분에도 잘 적용되는지 그 여부를 관찰하였다.

스폿 용접부의 비접촉 공중 초음파 탐상이 이루어진다면 고능률의 스폿 용접부⁽¹⁵⁾에 대한 정확한 탐상이 이루어질 수 있으며, 품질과 사용 원료제품의 득률 및 능률의 향상에 따른 조기 탐상의 실현이 가능해지기 때문에 친환경 자동차에도 적용이 가능하게 된다.

아직까지는 자동차의 스폿 용접부의 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 높아 친환경자동차의 부품소재로 주목 받고 있다. 자동차에 적용할 경우, 연비를 향상시키고 탄산가스(CO_2)의 배출량을 감소시켜 지구온난화 방지에 기여할 수 있다.

CFRP와 같은 섬유강화 고분자 복합재료는 층간 박리 결함에 따라서 강도가 크게 변화하는 소재이기 때문에 비파괴 평가의 필요성이 높다. 현재 친환경 자동차의 생산단계에서는 비파괴 검사방법이 실용화되지 않고 있다. 이와 같은 기술을 확립함으로써 안정성은 물론 우수한 품질로 친환경 자동차 제조가 가능해진다.

따라서 NAUT의 유용성 검증을 위해 비파괴검사의 필요성으로 주목받고 있는 스폿 용접부와 CFRP, Brake pad에 대한 NAUT 수동, 자동, 화상 탐상을 수행하였다.

첫째, 스폿 용접 시험편의 각 위치(두꺼운 부분(0.4mm), 두 겹으로 된 부분(0.3mm), 스폿 용접부(0.3mm), 얇은 부분(0.1mm))와 두께에 따른 초음파의 전파 특성과 Mode Conversion을 고려한 탐상조건 선정(송수신 각, 간격, 출력, etc.) 실험을 하였다. 탐상거리를 -10mm~10mm, -30mm~-15mm, 15mm~30mm로 설정하여 0.5mm pitch 간격으로 초음파를 주사하면서 탐상을 수행하여 광범위에서 초음파의 투과율과 진폭변화의 차이를 파악하였다.

화상탐상 수행의 경우, 화상탐상조건[(측정범위 설정: 측정원점, 측정대각점, 측정 pitch, 측정 속도), (화상 파악: 송신 전압, 송신 주파수, Gain, gate 위치)]을 설정하여 자동 화상 탐상을 수행하여 그에 따른 취득 화상을 통해 스폿용접부의 정확한 위치 파악이 가능하였다.

두 번째로 CFRP 시험편의 내부 결함 층간박리⁽¹⁶⁾의 존재 여부를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 각 시험편을 A,B,C로 나누어 [A(X,Y축 방향주사 : -20mm~20mm, 2mm pitch), B(X,Y축 방향주사 : -40mm~40mm, 2mm pitch), C(X,Y축 방향주사 : -30mm~30mm, 5mm pitch)]와 같은 조건을 설정하여 탐상을 수행하고 층간박리의 존재 여부를 확인하였다.

층간박리의 정확한 위치 파악을 위해 화상탐상조건(Averaging count, Gain, Scanning pitch, Scanning speed, Probe)을 설정하고 탐상을 수행하여 그 결과를 확인하였으며, 그에 따른 화상을 취득하였다.

제2장 고감도 비접촉 탐촉자

제1절 탐촉자의 거리 특성

일반적으로 비접촉식 방식으로 초음파 탐상을 수행하는데 있어서 탐상주파수를 200KHz~800KHz⁽²³⁾로 설정한다. 하지만 NAUT에서는 설정된 고주파수로 인해 공기중에서 그 감쇠가 커지게 된다. 따라서 주파수를 400KHz 전후로 설정하고 탐촉자의 감도를 향상시켜 탐상주파수 2MHz로도 금속이나 CFRP의 탐상이 가능하도록 한다. Fig.2-1은 기존 주파수(200KHz~800KHz)의 탐촉자의 거리특성과 고주파수(1~5MHz)의 거리특성⁽⁸⁾을 Fig.2-1과 Fig.2-2에 나타내었다.

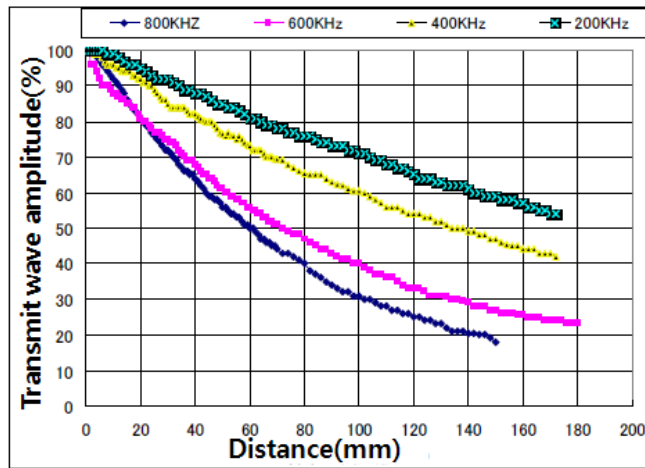


Fig.2-1 Distance of frequency(200~800kHz) depending on ultrasound transmission

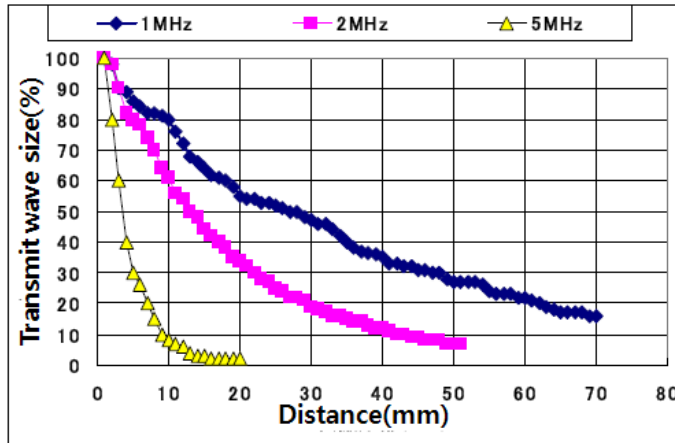


Fig.2-2 Distance of frequency(1, 2, 5MHz) depending on ultrasound transmission

Fig.2-1~Fig.2-2의 거리특성 P_x 는 식(1)과 같다. 단, α : 초음파 감쇠상수, x : 전달거리, P_0 는 $x=0$ 에 있어서 음압이다.

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

Fig.2-1의 거리특성⁽²⁴⁾을 식(2-1)에 적용시켜 계산한 후 실험값과 비교하였으며, Fig.2-3에 그 예를 나타내고 있다. 실험값과 계산값은 거의 일치하였으며, 주파수를 400KHz로 설정하였을 때, 감쇠상수 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = 0.0052 \text{dB/mm}, 800 \text{KHz}$$

$$\alpha = 0.0115 \text{dB/mm}, 1 \text{MHz}$$

$$\alpha = 0.026 \text{dB/mm}, 2 \text{MHz}$$

$$\alpha = 0.0535 \text{dB/mm}, 5 \text{MHz}$$

$$\alpha = 0.18 \text{dB/mm}$$

Fig.2-2의 거리특성 이외에 투과율과 전달거리 30mm 전후를 고려하고 설정된 탐상 주파수 2MHz의 경우, 실시간으로 검사가 가능하다.

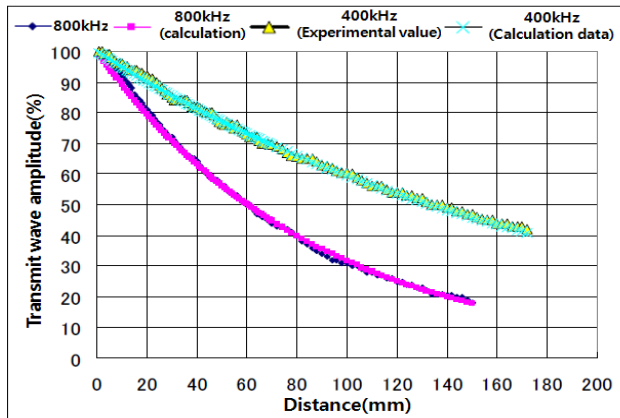
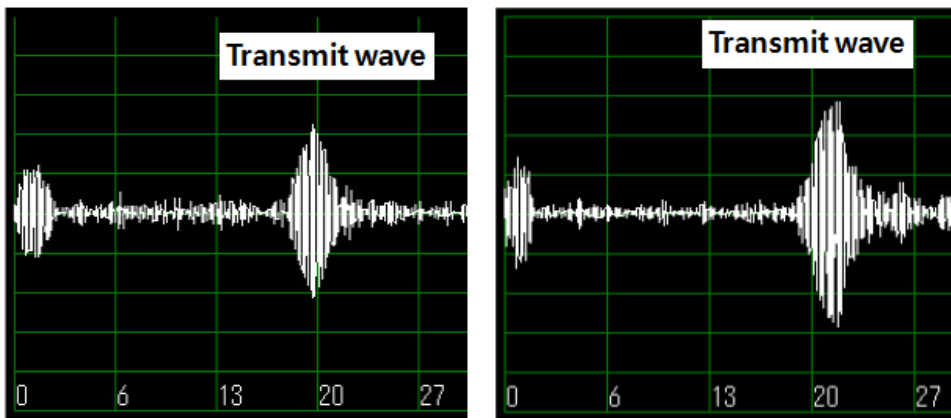


Fig.2-3 Comparison between experiment and calculation value of characteristics of NAUT distance

탐촉자간 거리를 20mm로 설정하고 공칭주파수 2MHz의 평면탐촉자(2K10N)를 사용해 탐상을 수행한 결과(CFRP 및 SUS판재의 투과파형 변화)⁽²⁵⁾를 보이고 있다. Fig.2-4와 같이 CFRP의 VaRTM(Vacuum assisted Resin Transfer Molding)재와 SUS판재에 따른 초음파의 투과상태는 양호하였다.



(a) CFRP

(b)SUS board

Fig.2-4 Inspection on the CFRP and SUS plates with 2MHz probe

제2절 집속탐촉자의 특성

1. 평면탐촉자와 선집속탐촉자의 비교

반사원⁽²⁶⁾은 $\phi 6\text{mm}$ 의 파이프를 사용하였고 선집속탐촉자의 집점거리⁽²⁷⁾는 $R=110\text{mm}$ 로 집속되고 있는데 집점 근방에서 평면탐촉자와 비교했을 때, 약 15dB로 감도가 높게 나타나고 있다. Fig.2-5는 평면탐촉자⁽²⁸⁾와 선집속탐촉자⁽²⁹⁾의 특성을 비교한 것이다.

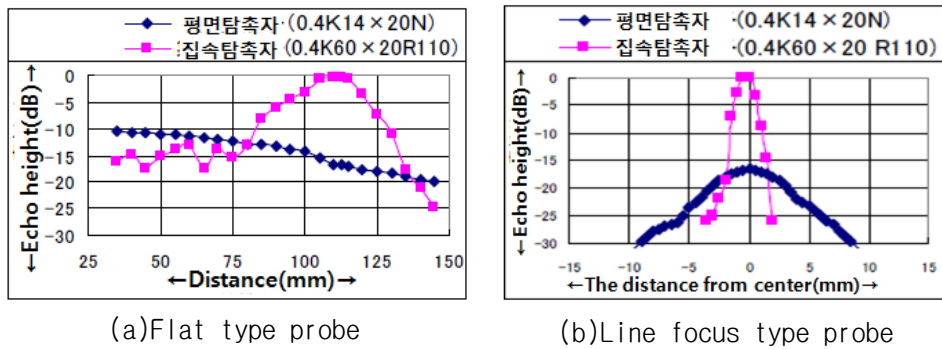


Fig.2-5 Comparison of flat type probe and line focus type probe

집속탐촉자는 공칭주파수 400KHz, 진동자 직경 20mm, 집속거리 $R=38\text{mm}$ 의 것으로 사용하였고 거리특성 및 빔직경은 점집속탐촉자에서 방사되는 초음파를 Hydro hon으로 수신해 측정하였다. Fig.2-6에서는 Hydro hon을 이용한 측정법을 나타내고 있다.



Fig.2-6 Measuring method with Hydro hon

Fig.2-7(a)의 거리특성은 Hydro hon과 탐촉자 사이의 거리를 37~39mm로 설정하였는데 수신된 초음파가 최대로 설정된 집속거리와 일치하고 있다. 집속근방 빔 직경(-6dB)은 약 2mm이며, 주파수 특성이 50KHz~800KHz±2dB이내의 무지향성⁽³⁰⁾의 것으로 사용하였으며, 다음 결과를 Fig.2-7(b)에 나타내었다.

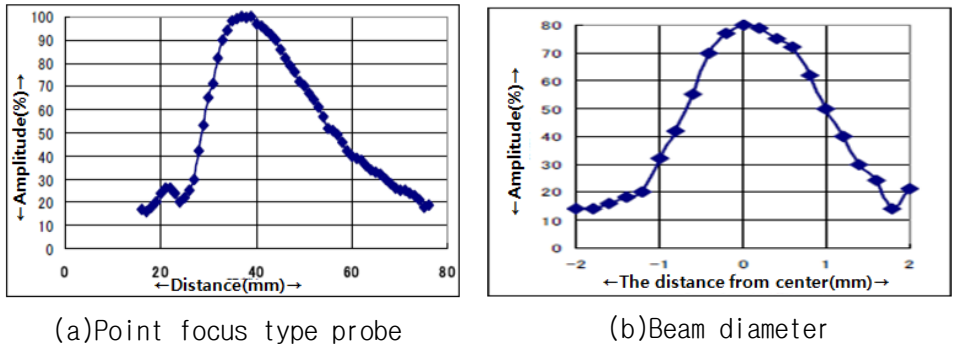


Fig.2-7 Distance between point focus type probe and beam diameter

점집속탐촉자와 평면탐촉자의 음장을 계산한 결과를 Fig.2-8에 나타내었다. Fig.2-8(a)를 통해 집점 근방의 음압이 높고 빔이 잘 집속되고 있음을 알 수 있다. 점집속탐촉자는 축대칭을 위한 편축의 정도를 보이고 있으며, 근거리에서는 빔 직경이 크고 집속근방에서는 빔 직경은 약 2mm가 된다.

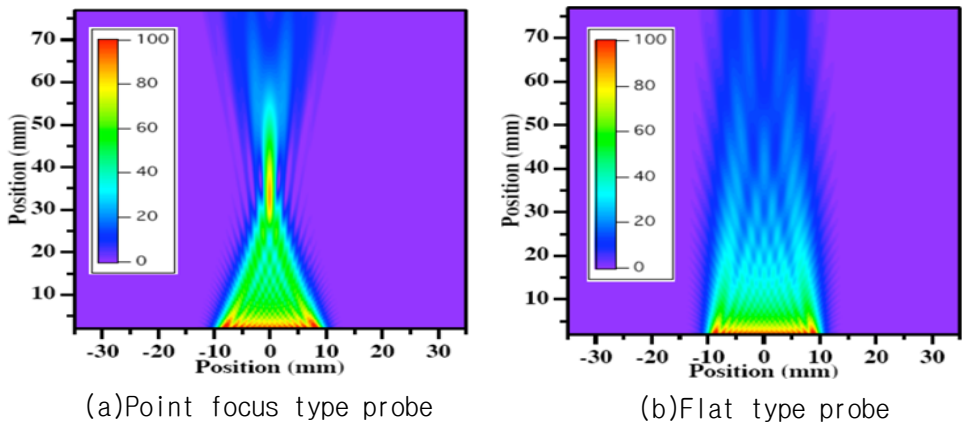


Fig.2-8 Comparison of sound field between point focus type probe and flat type probe

집속탐촉자의 집속점 근방 및 근거리에서의 음장 예⁽³²⁾를 Fig.2-9에 나타내었다. 빔 직경에서 계산값과 실험값(Hydro hon에 따른 측정값)이 거의 일치하고 있다. 레일리 적분에 따라 진동자의 미소요소로부터 원통파면⁽³³⁾이 출력되고 있어 음압을 모두 계산하였다.

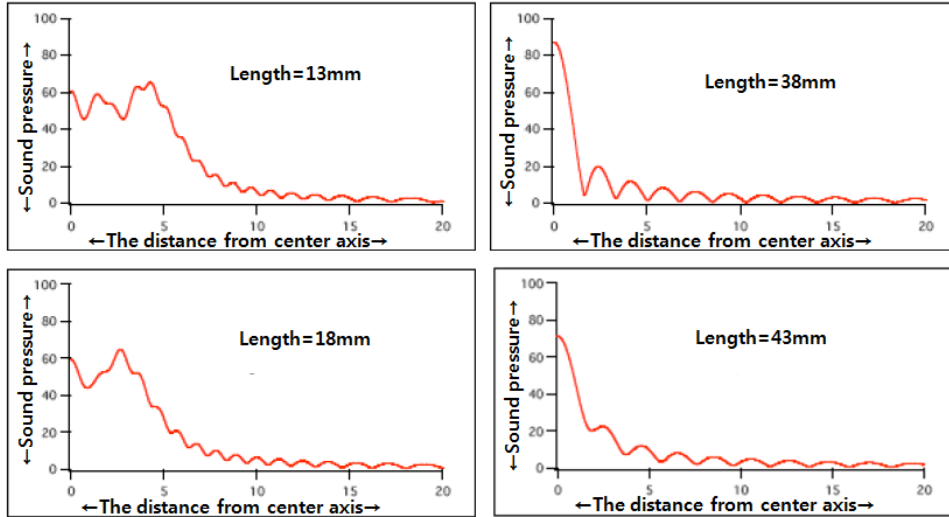


Fig.2-9 Application of near sound field from focus type probe

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

여기에서, ω : 각주파수, ρ : 재료밀도, S : 진동자면, r : 미소면적 ds 와 관측위치 거리이다.

2. 수직입사의 투과율

Fig.2-10과 같이 탐촉자 → 공기 → 시험편 → 공기 → 탐촉자의 경로를 고려하여 공기와 시험편의 음향 임피던스⁽³⁴⁾를 Z_1, Z_2 로 하였다. 초음파가 공기를 전반하여 A면에서 시험편을 투과하고 다시 B면에서 공기중으로 투과하는 투과율 t_{1-2-1} 은 초음파가 공기 → 시험편에 투과하는 투과율 t_{1-2} 와 B면에서 다시 시험편 → 공기에 투과하는 투과율 t_{2-1} 의 면에서 나타나고 있다.

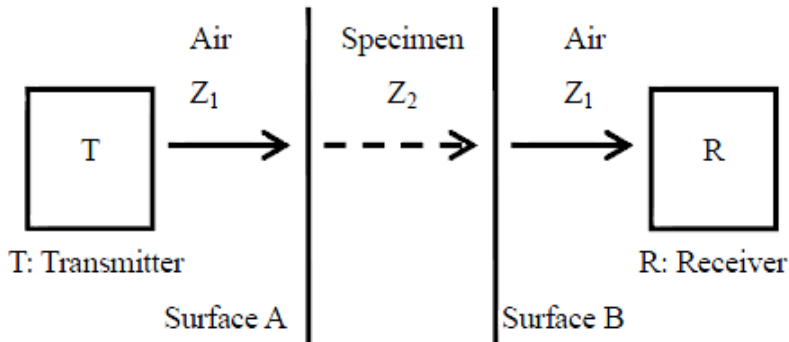


Fig.2-10 Air-to-specimen-to-air transmission

투과율 t_{1-2} 와 t_{2-1} 은 식(2-3)을, 공기 → 시험편 → 공기의 투과율 t_{1-2-1} 은 식(2-4)⁽³⁵⁾를 고려하였다.

$$t_{1-2} = \frac{2Z_2}{(Z_1 + Z_2)} \quad t_{2-1} = \frac{2Z_1}{(Z_1 + Z_2)} \quad (2-3)$$

$$t_{1-2-1} = t_{1-2} \cdot t_{2-1} = \frac{2Z_2 \cdot 2Z_1}{(Z_1 + Z_2)(Z_1 + Z_2)} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2-4)$$

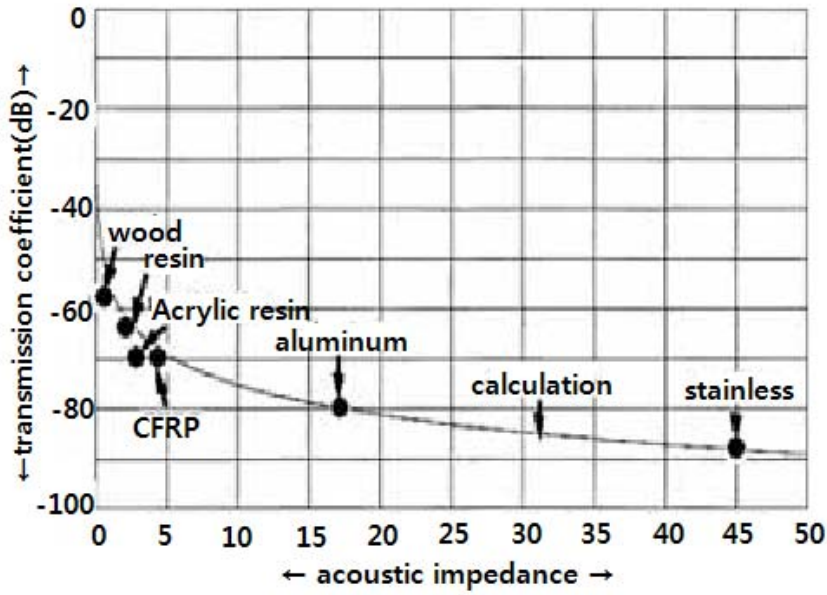


Fig.2-11 Relationship between acoustic impedance and transmission efficiency

공기와 철강의 경우를 볼 때, $Z_1=340\text{m/s}\times 0.0013\text{g/cm}^3=0.442\text{m}\cdot\text{g/s/cm}^3$, $Z_2=5900\text{m/s}\times 7.8\text{cm}^3=46020\text{m}\cdot\text{g/s/cm}^3$ 가 된다.

따라서 식(2-4)의 투과율은 0.0000399(-88dB)이고 CFRP에서 $Z_2=4483\text{m}\cdot\text{g/s/cm}^3$ 가 되어 그 투과율 t_{1-2-1} 은 0.000394(-68.1dB)가 된다. 철강이 -90.2dB, CFRP는 -71.3dB의 실험값을 가지는데 Fig.2-11과 같이 계산값과 일치하였다.⁽³⁶⁾ 따라서 이와 같은 손실을 최소화하기 위해서는 High power로 송·수신이 가능한 구형 burst파를 사용하는 Pulser Receiver와 고감도의 NAUT용 탐촉자, 최대진폭을 60dB까지 올려주는 Pre-amp를 필요로 한다.

3장 비접촉 공중 초음파 탐상 시스템

제1절 NAUT 화상탐상 원리

1. 신호 출력 및 데이터 처리

일반적으로 접촉매질이 있어야 매체에 초음파를 투과시켜 초음파 탐상을 수행했던 기존의 방식으로는 시험편과 탐촉자 사이의 접촉상황의 영향을 받기 쉽지만 NAUT(Non contact Air coupled Ultrasonic Testing) 기술을 적용시킬 경우, 이에 따른 제약을 거의 받지 않는다. 기존에는 적용이 곤란했던 고온 및 저온재료의 부식이나 결함 검출, 곡면이 존재하는 항공기, 자동차용 탄소섬유 복합재료⁽⁸⁾의 층간 박리 등을 물 등의 접촉매질을 사용하지 않고도 공기중에서 비접촉 방식으로 검사하는 부분이 가능한 시스템이다. 고감도의 Air Probe, Ultra high power 초음파 Pulser Receiver, Pre-amp 및 고속디지털라이저 등으로 구성되어 있어 고속 대용량의 디지털 데이터 처리가 가능하기 때문에 100mm 사방을 0.2mm pitch 간격으로 400초로 스캔하는 화상화⁽³⁷⁾가 가능하다. Fig.3-1에서는 Pulser receiver를 이용한 NAUT시스템의 구성을 나타내고 있다.

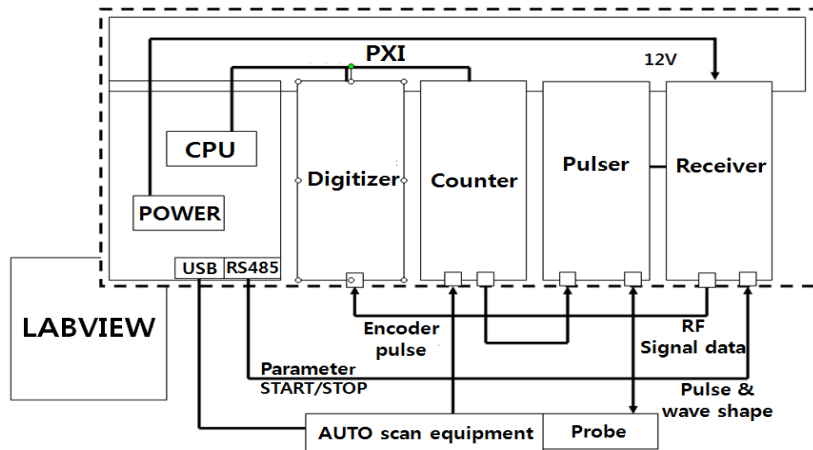


Fig.3-1 Configuration of NAUT system using pulser receiver with PXI chassis combined

본 시스템은 LABVIEW를 설치한 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 채널화의 대응이 가능하다. Fig.3-2는 NAUT21(Auto scan equipment)⁽⁴⁰⁾로부터 데이터 결과값이 출력되기 위한 과정을 나타내고 있다.

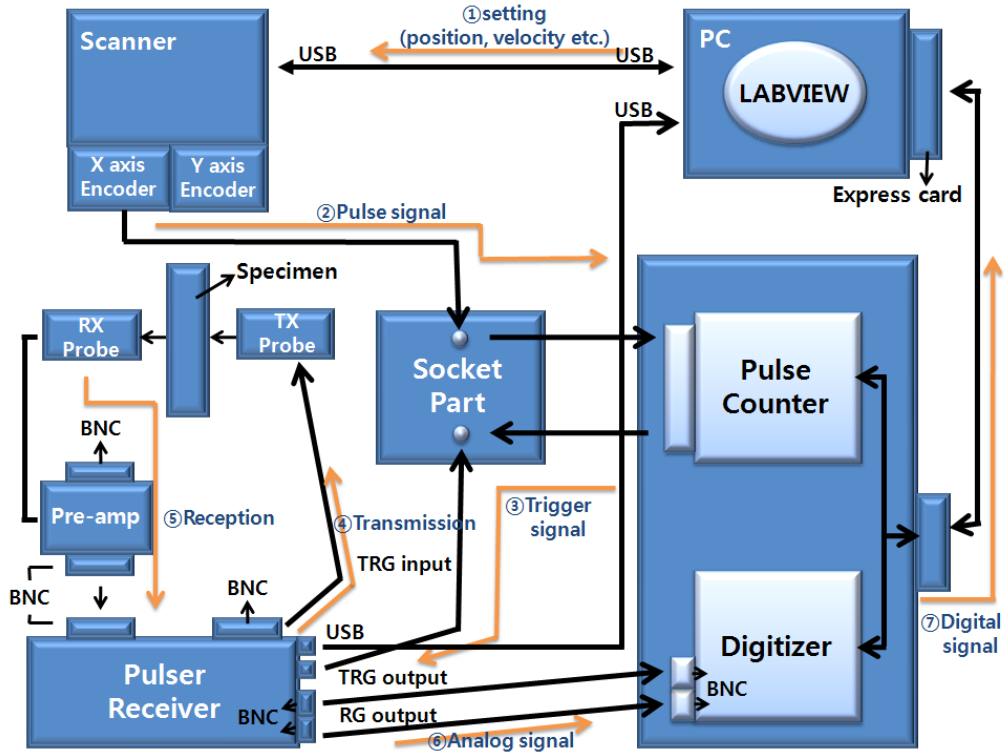


Fig.3-2 Data output from NAUT21 system

제2절 인공결함 시험편 탐상

1. 상간·층간박리 소재 탐상

초음파 탐상을 수행하는데 있어서 투과법에 따라 점집속탐촉자⁽⁹⁾를 이용한 탐상의 경우, 각 탐촉자 사이의 거리를 $L=72\sim76\text{mm}$ 로 설정하여 송수신 탐촉자에 따른 거리 특성을 구한 후, 이에 대한 최대 투과파⁽³⁸⁾를 얻을 수 있다. Fig.3-3에 투과법으로 점집속탐촉자와 평면탐촉자를 사용했을 때의 화상 탐상결과를 비교하고 있다. 사용된 탐촉자는 점집속탐촉자(0.4K20NR38)와 평면 탐촉자(0.4K7×10N)로 평면탐촉자는 진동자면적과 다른 것을 사용하였다. CFRP와 수신탐촉자의 거리는 3~4mm로 설정하고 송·수신 탐촉자 사이의 거리는 76mm로 하였다. 여기에서 사용된 CFRP는 중앙부에 충격에 따른 층간박리가 존재하는 시험편으로 화상에 따른 분해능의 확인을 위해 원반과 성형수지⁽³⁹⁾를 시험편의 표면 위에 올려놓은 상태에서 화상스캔을 수행하였다.

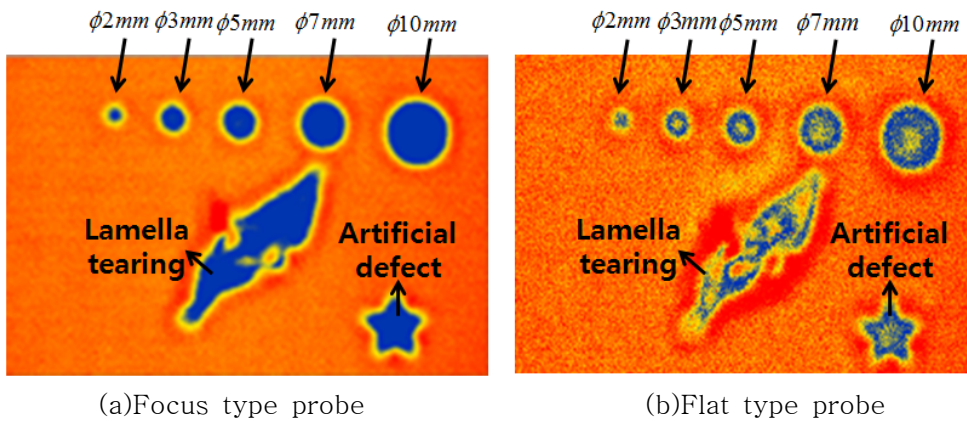


Fig.3-3 Comparison of image between point focus type probe and flat type probe

Fig.3-4에서는 두께 10mm의 CFRP의 VaRTM재에 존재하는 결함 층간박리 부분에 초음파를 투과시켜 화상탐상을 수행한 결과로 초음파 투과율의 정도가 양호하여 층간박리부의 선명한 화상이 취득되었다.

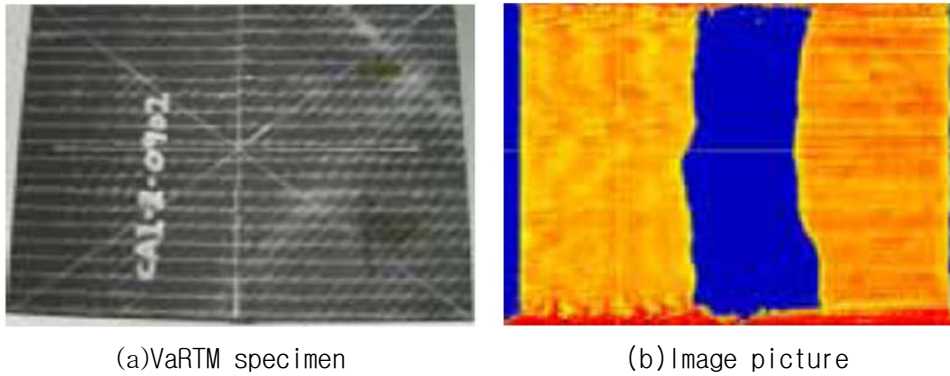


Fig.3-4 Image of CFRP VaRTM specimen

CFRP 시험편에 1mm의 철이 고속으로 관통하는 경우에 관통철 주변의 박판의 거동 여부를 확인하기 위해 넓은 범위에서 화상탐상을 수행한 결과로 층간박리의 존재 여부를 관찰이 가능하였다. 이에 따른 결과를 Fig.3-5에 나타내었다.

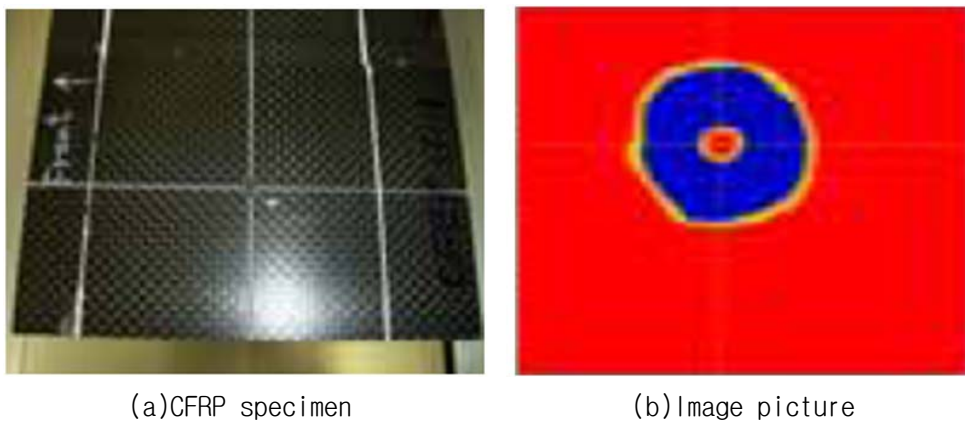
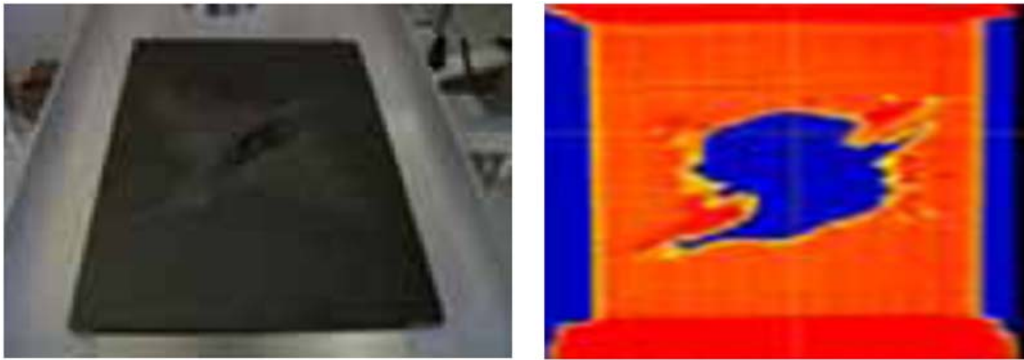


Fig.3-5 Image of CFRP specimen having through pierce hole

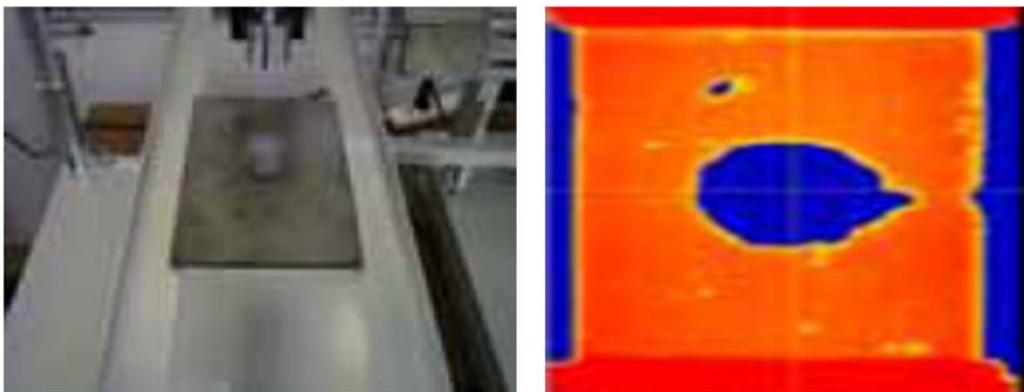
뇌격에 따른 CFRP의 화상 탐상결과를 보이고 있는데 Fig.3-6과 같이 시험편 내부에서 넓은 영역이 손상되었음을 알 수 있다.



(a)CFRP specimen (b) Image picture

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

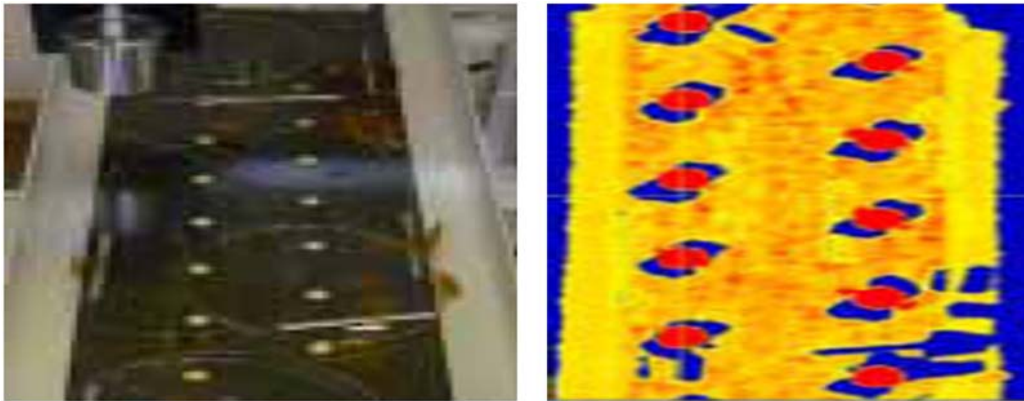
Fig.3-7의 시험편에 따른 뇌격의 손상을 경감시키기 위해 시험편의 표면에 금속파막을 가공한 경우의 화상결과를 나타내고 있다. 외관상으로는 손상된 영역이 줄어든 것처럼 보이지만 시험편 내부에는 상간박리가 생성되었음을 알 수 있다.



(a)CFRP specimen (b)Image picture

Fig.3-7 Image of CFRP specimen depending on the surface pressure of CFRP specimen

Fig.3-8은 CFRP 시험편에 압력을 가했을 때의 손상부의 진전과 거동을 나타낸 것으로 시험편의 혈 근방에서부터 점점 손상이 진전되고 있음을 알 수 있다.



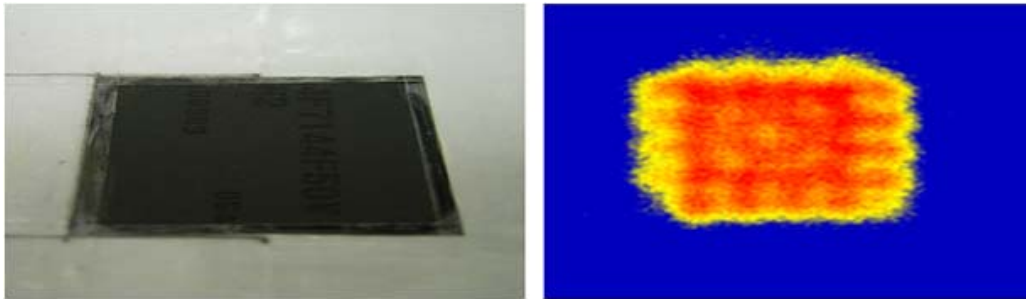
(a)CFRP specimen

(b)Image picture

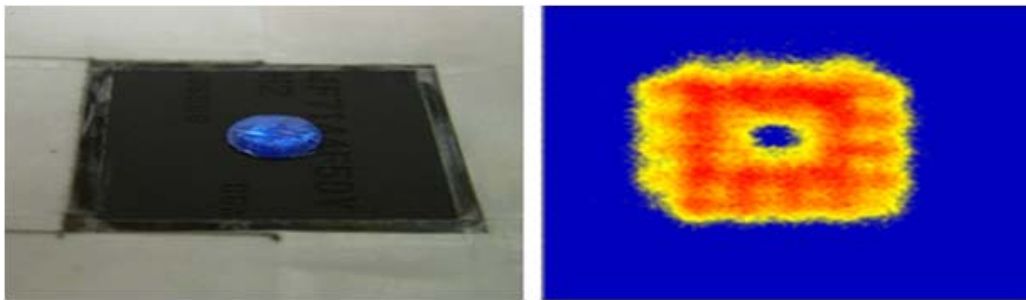
Fig.3-8 CFRP image after tensile

2. 박리를 가장한 IC Chip 탐상

Fig.3-9(a)는 양품에 대한 IC칩 화상으로 초음파의 투과 정도는 양호함을 알 수 있다. Fig.3-9(b)는 박리를 가장하여 IC칩 위에 3mm의 원판상 수지를 둔 경우의 취득 화상을 나타내고 있는데 박리를 가장한 부분의 투과율이 낮아 청색 화상이 취득되었다.



(a)Normal IC chip

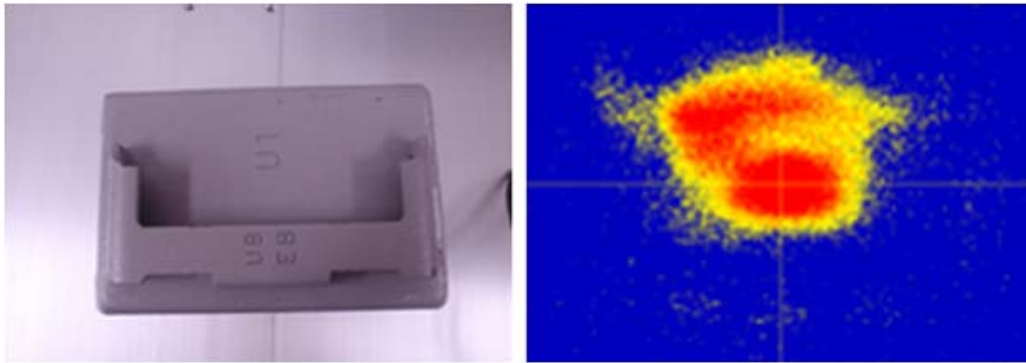


(b)Poor condition of IC chip

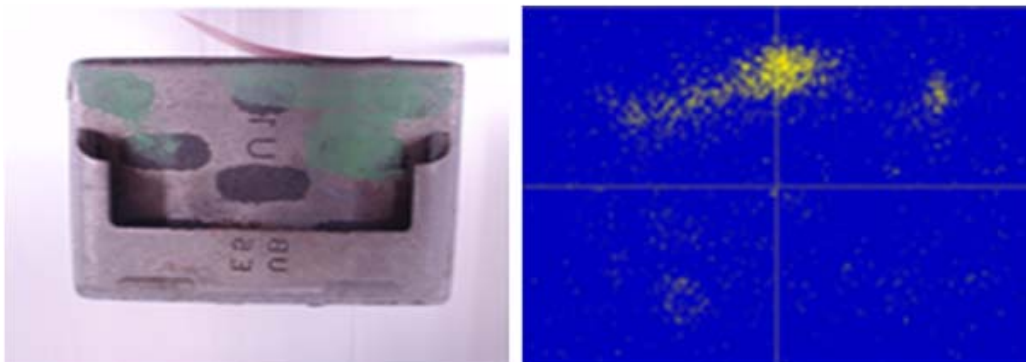
Fig.3-9 Comparison of image between normal IC chip and poor condition of IC chip

3. 정상·불량 여부에 따른 Brake shoe 탐상

Fig.3-10은 브레이크슈의 취득 화상을 나타낸 것으로 양품과 불량품에 따른 초음파의 투과 상태에 따른 화상 탐상결과를 나타내고 있다. 취득 화상의 각 컬러 상태에 따른 초음파 투과율의 정도 파악이 가능하였다.



(a)Normal brake shoe



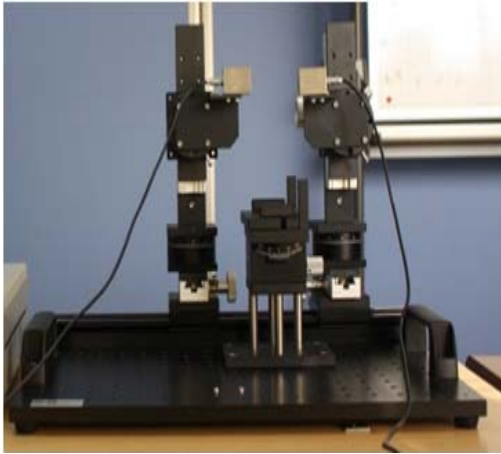
(b)Poor condition of brake shoe

Fig.3-10 Comparison of image between normal and poor condition of brake shoe

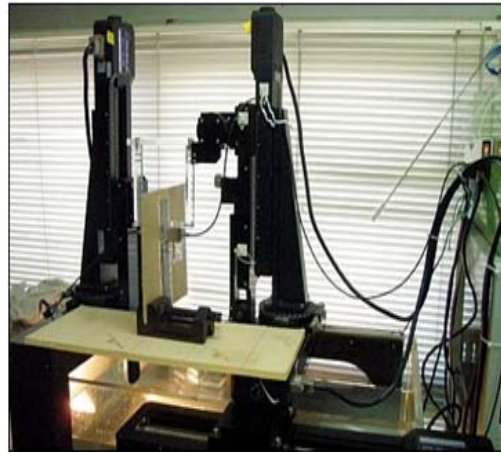
4장 비접촉 공중 초음파 탐상 실험

제1절 실험 장치

Fig.4-1은 High power 구형 burst파를 이용한 비접촉공중초음파탐상법을 적용시켜 탐상을 수행하는 장비로 구형 burst 초음파는 펄스 초음파에 비교해 강력한 power가 나오고 주파수나 파수가 용이하게 변하는 것이 가능한 최적탐상조건을 보이는 것이 용이한 이점이 있어 high power로 송수신이 필요한 NAUT 탐상방법을 적용시킨다. 구형 burst파를 이용한 NAUT에 대한 원리, 적정주파수, 파수, 입사각 및 탐촉자의 선정 등과 같은 탐상조건 설정을 바탕으로 박판 결함검출, 스폿용접부, CFRP의 층간박리 및 정상·불량 여부에 따른 IC칩 등에 대한 탐상이 가능하다.



(a)Manual inspecting equipment



(b)Auto inspecting equipment

Fig.4-1 Inspection equipment of NAUT

고감도 Air Probe, Ultra high power 초음파 PXI chassis 조합형 Pulser Receiver, 주파수 필터가 장착된 Pre-amp 및 고속 디지털라이저 등으로 구성되어 있어 고속 대용량의 디지털 데이터처리가 가능하며, 100mm 사방을 0.2mm pitch, 400 초로 스캔하는 화상화가 가능하다. 점집속탐촉자를 사용할 경우, 집속거리를 설정하여 결함 부분에 집속되므로 미세결함 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 화상장치는 Fig.4-2와 같다.



Fig.4-2 Auto image scanning equipment

제2절 시험편

Fig.4-3과 같이 용접하는 물체에 전류를 통해 용접부에 발생된 전기저항열로 용융 상태를 만들고 외력을 가해 두 개의 전극 사이에 2,3장 이상의 금속판을 겹쳐놓고 가압하면서 용접한 시험편으로 자동차 생산라인에서 가장 기본이 되는 접합공정이며, 자동차 부품은 물론 차체까지 모든 판재의 접합은 스폿용접으로 이루어지고 있다. 따라서 아직까지는 차체의 스폿용접부에 대한 탐상이 가능한 비파괴검사 방법이 적용된 사례가 없어 이를 가능하게 한다면 큰 경제적 손실과 자원손실을 방지할 수 있으므로 NAUT의 실용화를 확인하기 위한 스폿용접 시험편에 NAUT 탐상을 시도하였다.



Fig.4-3 Application on NAUT of Spot welding specimen

CFRP는 복합재료의 한 종류로 탄소섬유를 Epoxy와 같은 고분자 수지 내부에 보충하여 강도를 향상시킨 Fig.4-4에 나타난 섬유강화 플라스틱 시험편으로 금속보다도 약 50%정도로 경량화 소재이지만 고강도로 친환경 부품소재로 주목받고 있다. 자동차에 적용할 경우, 연비를 향상시킴으로써 탄산가스 배출량을 감소시켜 지구 온난화 방지에 기여할 수 있다. 그리고 층간박리 결함에 따라 강도 크게 변화하는 소재이기 때문에 비파괴 평가의 필요성이 높기 때문에 이 시험편에도 NAUT 탐상방법을 적용시켰다.

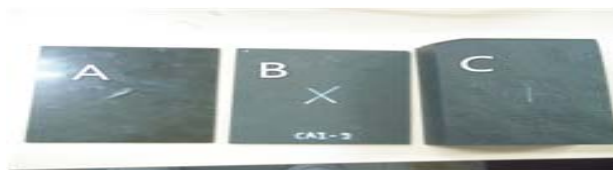


Fig.4-4 Application on NAUT of CFRP specimen A,B,C

제3절 스폿용접 실험

1. 수동 탐상

본 실험 수행에 앞서서 탐상에 사용할 시험편을 스폿 용접 시험편 A,B,C로 선정한 후, UT Pulsar Receiver(JPR-300B)와 Pre-amp(PR-60A5)를 사용하여 스폿 용접부에 대한 수동탐상을 시도하였다. 탐촉자는 고감도 Air probe(0.4K14X20N)로 수신 탐촉자는 수신 면적이 6mm가 되는 마스크를 부착하여 사용하였다.

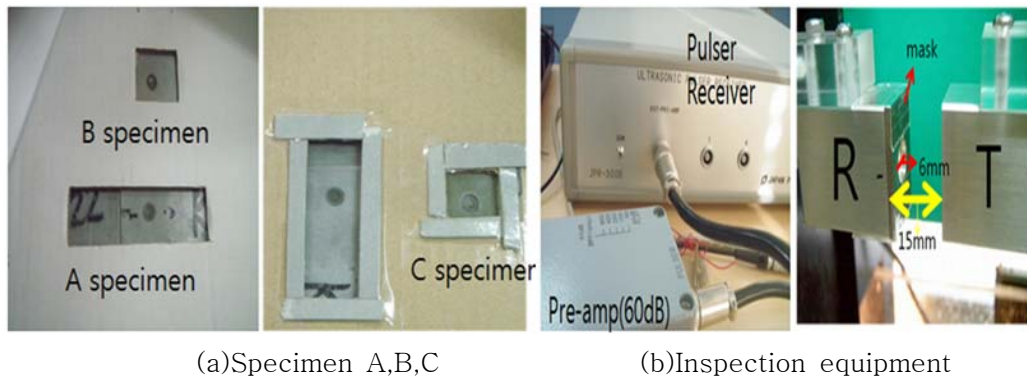


Fig.4-5 Spot welding specimen A,B,C & inspecting equipment, probe

스폿 용접 시험편의 각 부분에 따른 초음파 투과율의 정도를 파악하기 위한 첫번째 수동탐상을 시도하였다. 시험편은 Fig.4-5(a)와 같이 골판지에 스폿 용접 시험편을 부착한 보정용 시험편 A,B,C를 사용하였다. 수신 탐촉자에 6mm 마스크를 부착한 상태에서 Probe 사이의 거리를 15mm로 설정한 후, 보정용 시험편을 움직이면서 각 부분(얇은 부분, 두 겹인 부분, 스폿 용접부, 두꺼운 부분)의 파형 변화를 보면서 각 파형에 따른 결과값을 분석하였다. A시험편의 A1(얇은 부분), A2(두 겹인 부분), A3(스폿 용접부), A4(두꺼운 부분)에 따라 생성된 파형과 B시험편의 B1(스폿 용접부의 주변부), B2(스폿 용접부)의 파형변화를 비교하였다.

C시험편은 A, B 시험편과 동일한 시험편에 시험편과 골판지의 경계부분을 다시 한번 보강한 시험편으로 C1(두꺼운 부분), C2(두 겹인 부분), C3(스폿 용접부), C4(얇은 부분)와 C1-1, C2-1, C3-1, C4-1(시험편 주위를 골판지로 부착)부분에 대한

초음파 탐상을 수행하였다.

두 번째 수동탐상에서는 Fig.4-6과 같이 앞에서 조건과 동일하게 하되 간격을 0.5mm pitch로 설정하여 -10mm ~ 10mm, -30mm ~ -15mm, 15mm ~ 30mm까지의 수동탐상을 시도하였다. 먼저 보정용(시험편 주위에 골판지 부착) 스폿 용접 시험편을 고정시킨 후 시험편의 중앙을 0점으로 맞추고 파형 신호가 가장 높은 부분을 찾는다. 0점부터 천천히 0.5mm pitch 간격으로 측정하면서 앞에서 제시한 조건에 따른 각각의 파형 변화를 기록한다.

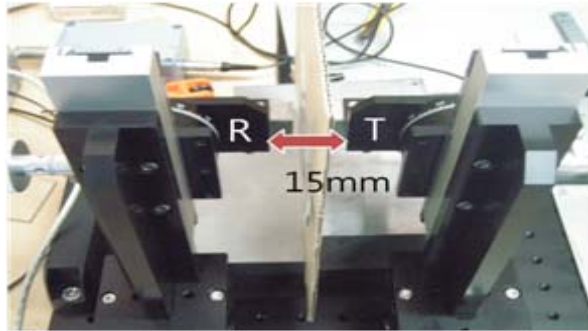
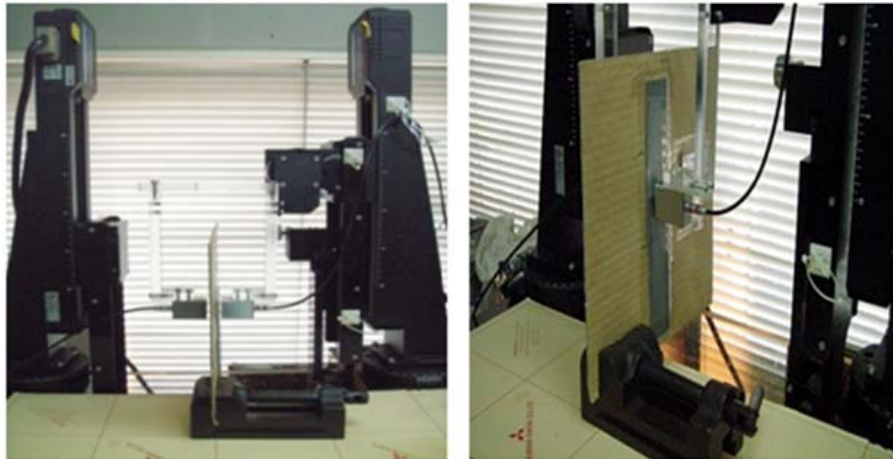


Fig.4-6 Manual testing on the spot welding specimen

2. 자동 탐상

더 자세하고 정확한 결과의 파악을 위해 수동탐상이 아닌 자동탐상을 수행하였다. 탐상 조건으로는 탐촉자 사이의 거리는 수동탐상 때와 동일하게 15mm로 설정하여 Gain값은 Pre-amp를 이용하여 40.5+60dB로 설정하고 damping resistance는 500Ω으로 정하였다. 사용된 시험편과 탐촉자는 동일하며, 먼저 자동 탐상 장치를 setting하고 Pulse Receiver(JPR-300B)와 탐상 program(JPR-10BV24eng)을 실행시킨다. 실험용 스폿 용접 시험편을 probe 사이에 고정시킨 후에 탐상 프로그램에서 주사 pitch를 0.1mm로 설정하여 시험편의 두꺼운 부분, 두 겹인 부분, 스폿 용접부, 얇은 부분의 초음파 투과율의 정도를 파악하기 위한 탐상을 수행한다. 그리고 스폿 용접부의 투과 파형이 나타나는 부분에 게이트를 설정한 후에 가장 높게 출력되는 신호를 찾는다. 다음으로 자동탐상 수행상태를 Fig.4-7에 나타내었다.



(a)Front view

(b)Side view

Fig.4-7 Auto inspecting equipment

3. 화상 탐상

수동탐상과 자동탐상때의 파형 변화 결과만으로는 단순한 초음파 투과율 정도의 파악이 가능하였다. 마지막으로 화상탐상 수행을 통해 파형변화가 아닌 각 화상에 따라 나오는 컬러를 바탕으로 더 정확한 결과의 비교가 가능하였다. NAUT 화상탐상에서는 Fig.4-8과 같이 스폿 용접시험편 A,B,C,D를 사용하였다. 각 스폿 용접 시험편을 용접부를 중심으로 두꺼운 부분, 두 겹인 부분, 스폿 용접부, 얇은 부분으로 나누어 각 부분에 대한 탐상을 수행하기위해 조건에 맞추어 골판지에 부착하였다.

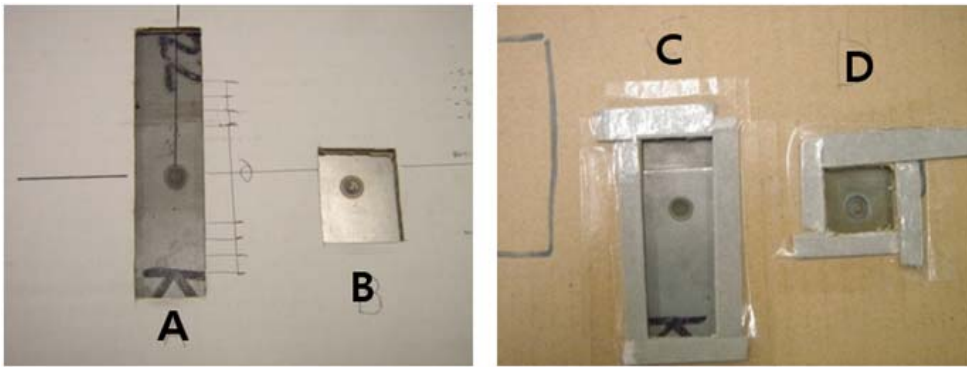


Fig.4-8 Spot welding specimen A,B,C,D

A시험편은 위에서 설정한 부분 모두를 탐상할 수 있도록 골판지에 부착한 것이며, B시험편은 스폿용접부의 주변부와 spot 용접부를 탐상하는 조건에 맞추어 골판지에 부착한 것이다. C시험편은 A시험편의 주위와 경계부분을 보강하였고 D시험편은 B시험편의 주위와 경계부분을 보강한 것이다. Fig.4-9에서는 자동 스캔 화상탐상 장비와 화상취득을 위한 시험편을 스캔하고 있는 상황을 나타내고 있다.

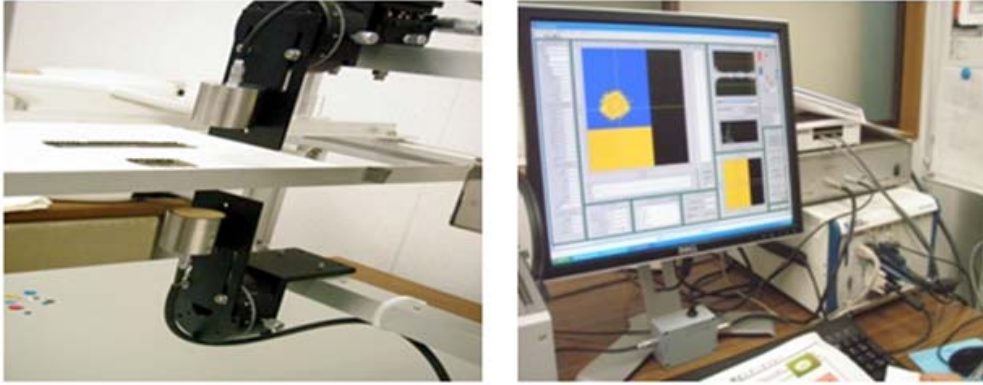


Fig.4-9 Auto image inspection system

먼저 NI Controller와 장치의 전원을 켜고 화상 S/W를 실행시킨 후 실행 프로그램을 통해 원점복귀, 기준위치 이동 등을 수행하여 결함 화상 탐상 이전의 조건과 일치시킨다. Pulsar Receiver 설정 화면에서 신호를 조정하고 측정 범위 설정 화면에서 측정 원점, 대각점, pitch, 속도 등을 설정한다. 위와 같은 조건이 충족되었을 때 화상 스캔을 수행한다. 이와 같이 scan이 시작되면 송신 전압, 주파수, 파수, 화상 수정위치, 수평시간, gate 위치를 통해 화상결과를 파악한 후 최종 화상을 취득한다. 다음으로 Fig.4-10에 화상탐상 수행 과정을 나타내었다.

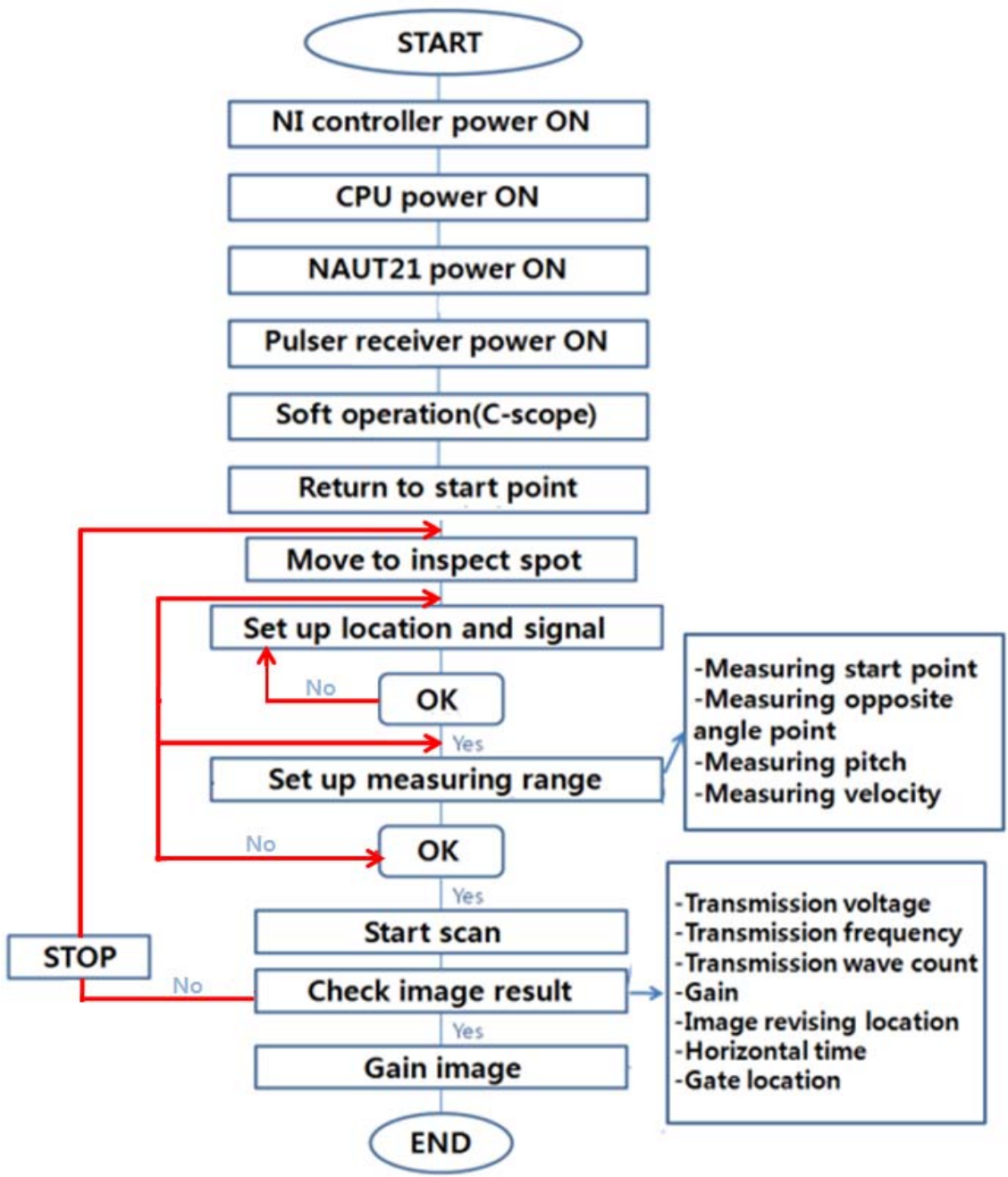


Fig.4-10 Auto image inspection program execution

스폿용접부의 화상탐상 수행에 앞서서 Averaging count, Gain, Trigger mode 등과 같은 화상탐상조건⁽⁹⁾을 정하였으며, 이를 Table 4-1에 제시하였다.

Table 4-1 Image inspection condition of spot weld specimen A,B,C,D

Specimen	A	B	C	D
Inspection condition				
Averaging count	35	8	8	10
Gain(dB)	45.5	45.5	49.9	49.9
Trigger mode	Ext 1-Trig 32-Pulse 1kHz			
Tx freq(kHz)	350.0			
Scanning pitch	0.2 mm			
Scanning speed	5 mm/sec			

제4절 탄소섬유강화 복합재료 실험

1. 결함 유무에 따른 초음파 투과율 파악

이번 탐상에 사용된 시험편은 CFRP 시험편으로 이 시험편에도 NAUT 탐상기술의 적용이 잘 이루어지는지에 대한 그 여부를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. NAUT 탐상에 각 두께가 다른 3개의 CFRP 시험편을 적용시켰으며, 그에 따른 조건은 Table 4-2에 제시하였다. CFRP 시험편 3개를 A, B, C로 지정하여 각 시험편에 대한 탐상을 시도하였다. A는 시험편의 중앙부에 결함 층간박리가 존재하며, B시험편은 A시험편에 비해 더 넓은 영역의 결함이 분포되어 있다. 그리고 C시험편은 내부에 불균일한 상태의 결함이 존재한다.

Table 4-2 Condition of CFRP specimen

Specimen \ Size(mm)	Width	Length	Thick
A	100	150	3
B	100	150	4
C	90	165	48

CFRP 시험편 A,B,C를 Fig.4-11에 제시된 스테이지에 고정시키고 UT Pulser Receiver(JPR-300B)에 고감도 Air probe(0.4K14X20N) 케이블을 연결시켜 탐상 S/W를 실행시킨 후 탐상을 시작하였다. 각 시험편을 이동시키면서 결함 층간박리 부분의 위치에 따른 파형 결과를 파악하였다.

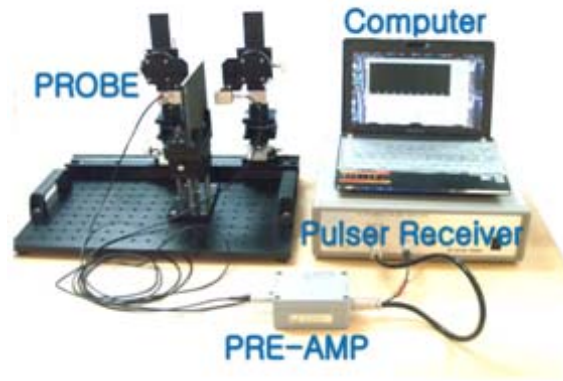


Fig.4-11 Manual inspecting device

Fig.4-12는 결함이 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분의 파형결과를 비교한 것이다. 결함 층간박리로 인해 생성된 공기층에 초음파를 투과시키면 결함이 존재하지 않는 부분에 비해 초음파의 투과율이 현저히 낮아지기 때문에 이를 이용한 결함 검출이 가능하다.

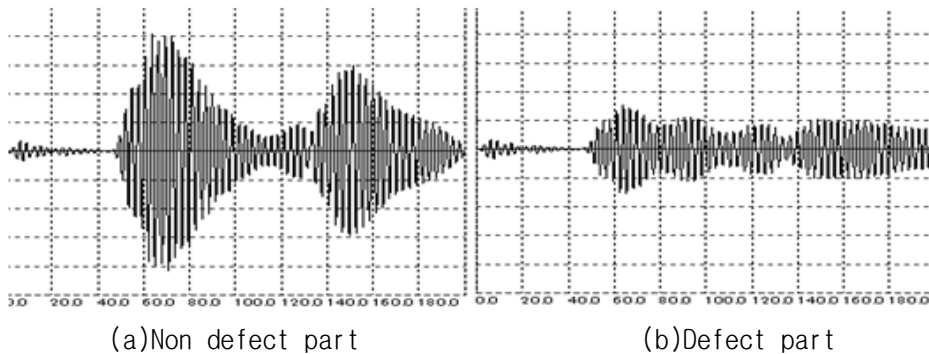


Fig.4-12 Comparison of the waveform depending on the presence of defects

2. 내부결함 층간박리 검출

CFRP 시험편의 화상탐상 수행에 앞서서 Averaging count, Gain, Trigger mode 등과 같은 화상탐상조건을 정하였으며, 이를 Table.4-3에 제시하였다.

Table 4-3 Image inspecting condition of CFRP specimen A,B,C

specimen Inspection condition	A	B	C
Averaging count	10		
Gain(dB)	27.9	23.2	21.6
Tx freq(kHz)	360.0	360.0	400.0
Scanning pitch	0.2 mm		
Scanning speed	100 mm/sec		
Probe	Focus type 0.4K20NR38		0.4K14X20N

장치의 전원을 ON시키고 화상 S/W를 실행하여 탐촉자를 기준위치로 이동시킨 후, Pulser Receiver 설정 화면에서 송신 전압, 주파수, 파수, Gain값 등을 조정하고 측정 범위를 설정한다. 그리고 scan을 수행한 후 취득된 화상을 통해 그 결과를 파악한다. 화상에서 나타나는 컬러는 투과율에 따라 다르게 나타나는데 투과율이 높은 부분은 적색, 낮은 부분은 청색으로 보인다. 화상 좌우의 청색 부분은 시험편과 지지판이 겹쳐진 사이에 공기층이 생겨 초음파의 투과율이 낮아진 부분이다. 그리고 시험편을 벗어난 부분은 공기중의 상태이므로 초음파 투과율이 높아지므로 적색으로 보이며, CFRP시험편의 층간 박리 부분의 경계면은 황색으로 보인다. 결함 부분은 초음파 투과율이 낮아지므로 청색으로 보인다. 이와 같이 취득된 화상을 통해 시험편 내부에 존재하는 결함의 모양, 크기 및 위치의 파악이 가능하다.

5장 실험결과 및 고찰

Fig.5-1의 각 파형(A1, A2, A3, A4, B1, B2)들의 결과를 통해 A,B 시험편 모두 각 시험편의 두께가 두꺼워질수록 신호의 투과율이 감소하였다. 하지만 스폿 용접부는 두께가 두꺼운 부분임에도 불구하고 신호가 감소하지 않고 오히려 투과율이 더 높아진다는 것을 알 수 있었다. Fig.5-2는 C시험편의 탐상결과를 나타내고 있으며, 시험편의 경계부분에 골판지를 보강한 후에 스폿 용접부를 탐상할 경우, 파형 변화가 뚜렷하게 나타나 각 부분의 결과 비교가 더 용이하였다.

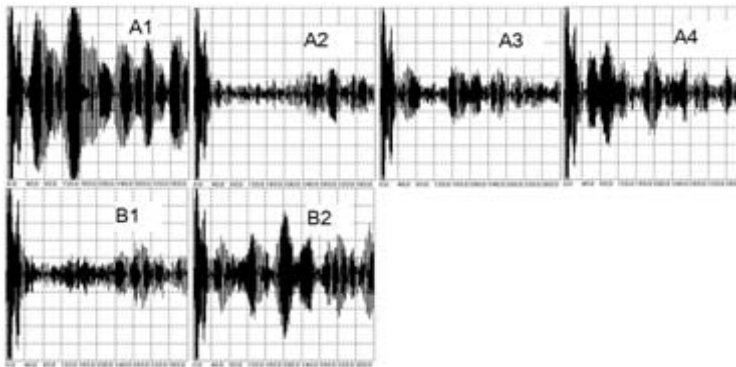


Fig.5-1 Comparison of waveform depending on each part of specimen

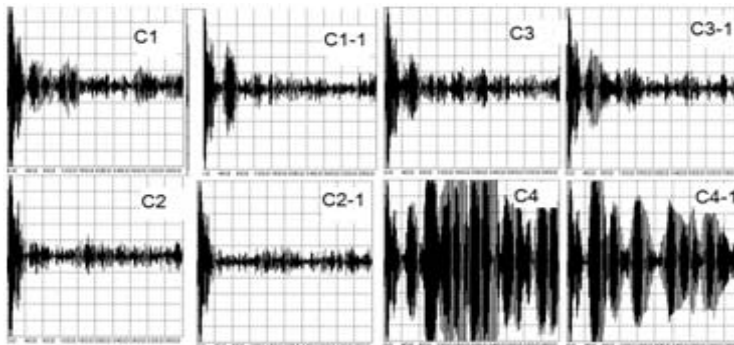


Fig.5-2 Comparison of waveform depending on each part of specimen
(padding cardboard around the specimen for calibration)

Fig.5-3은 스폿 용접부를 0.5mm pitch 간격으로 탐상한 결과를 나타내고 있으며, 스폿 용접부의 중앙에서 초음파의 투과율이 가장 높음을 알 수 있다.

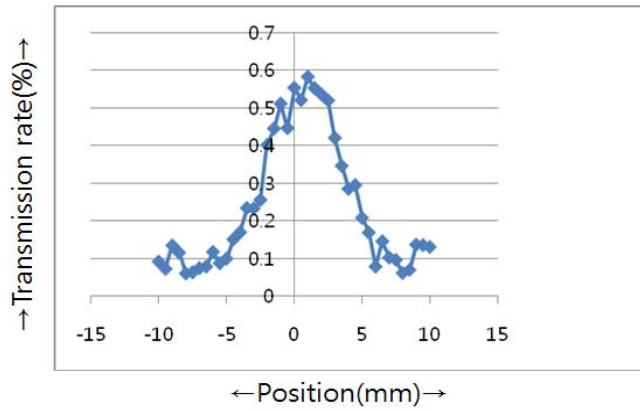


Fig.5-3 Comparison of transmission rate depending on each part of spot welding specimen(-15~15mm)

넓은 범위에서 측정된 결과, Fig.5-4를 통해 두께가 얇을수록 투과율이 더욱 높아지며, 각 투과율을 통해 시험편의 두께와 위치에 따른 파형변화의 파악이 가능하므로 스폿 용접부의 위치 또한 파악이 가능하다.

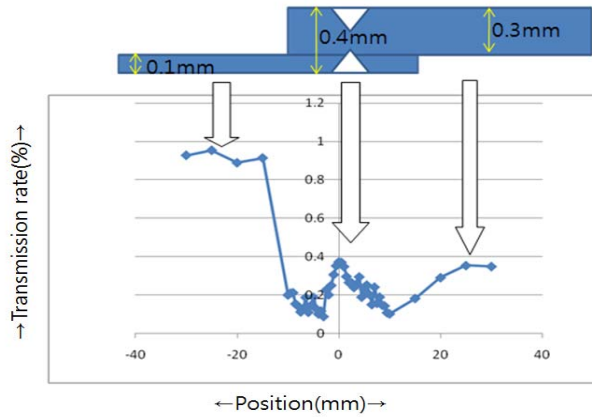


Fig.5-4 Comparison of transmission rate depending on each part of spot welding specimen(-30~30mm)

수동 탐상때의 실험 결과와 동일하였으며, 시험편의 두께가 두꺼울수록 진폭은 감소하고 두께와 관계없이 진폭이 증가하는 것을 보아 스폿 용접부임을 알 수 있다. 따라서 자동 탐상 장치를 사용하여 탐상을 수행한 결과, Fig.5-5와 같이 수동탐상에 비해 더 정확하고 자세한 변화의 결과 비교가 가능하였다.

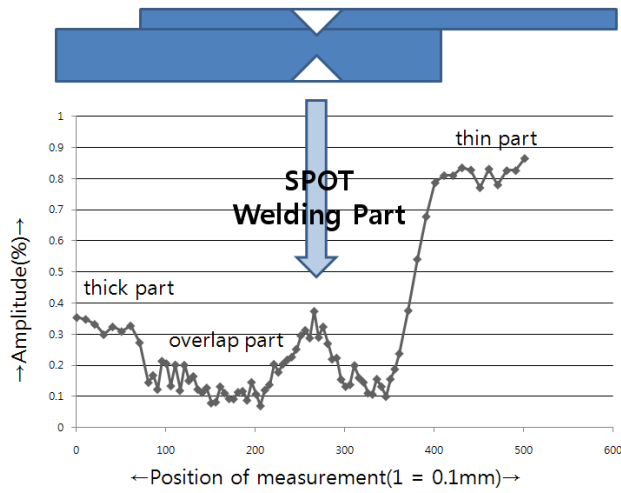


Fig.5-5 Amplitude difference depending on each part of spot welding specimen

시험편의 각 위치의 파형 변화에 따른 FFT 분석을 수행한 결과를 Fig.5-6에 나타내었다. 두께가 두꺼운 부분과 얇은 부분과 스폿 용접부의 투과율의 진폭변화와는 다르게 두 겹으로 겹쳐진 부분에서는 주파수 성분이 다르게 나옴을 알 수 있었다.

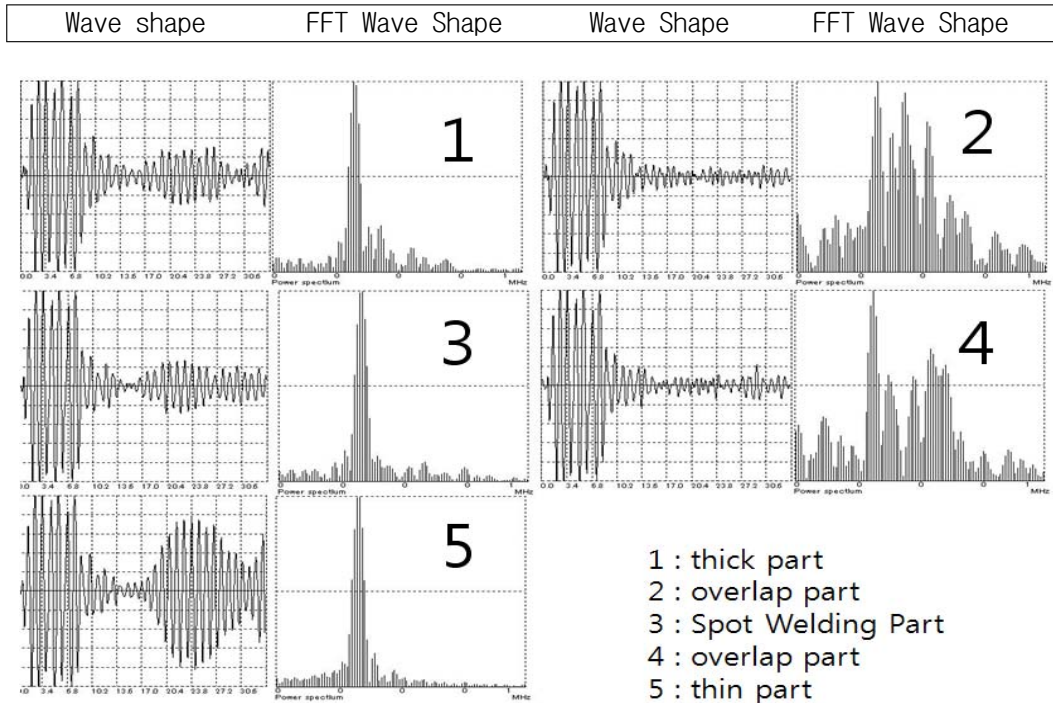


Fig.5-6 Comparison of FFT waveform depending on each part of specimen
 (Left : Ultrasonic signal, Right : FFT signal)

각 투과율은 취득화상에 따른 컬러를 통해 더 빠르고 정확한 결과의 비교가 가능하다. Fig.5-7을 통해 초음파의 투과율이 높을수록 적색, 투과율이 낮을수록 청색 화상이 취득되는데 이에 따라 시험편의 얇고 한 겹인 부분의 투과율이 높아 적색으로, 두 겹으로 된 부분은 투과율이 낮아 청색으로 화상이 취득되었음을 알 수 있다. 하지만 두께가 두꺼움에도 불구하고 투과율이 높아 적색과 황색 화상이 취득되는 것으로 보아 쉽게 스폿 용접부의 파악이 가능하였다. 이와 같이 각 화상의 취득을 통해 투과지점의 위치 파악이 가능하다.

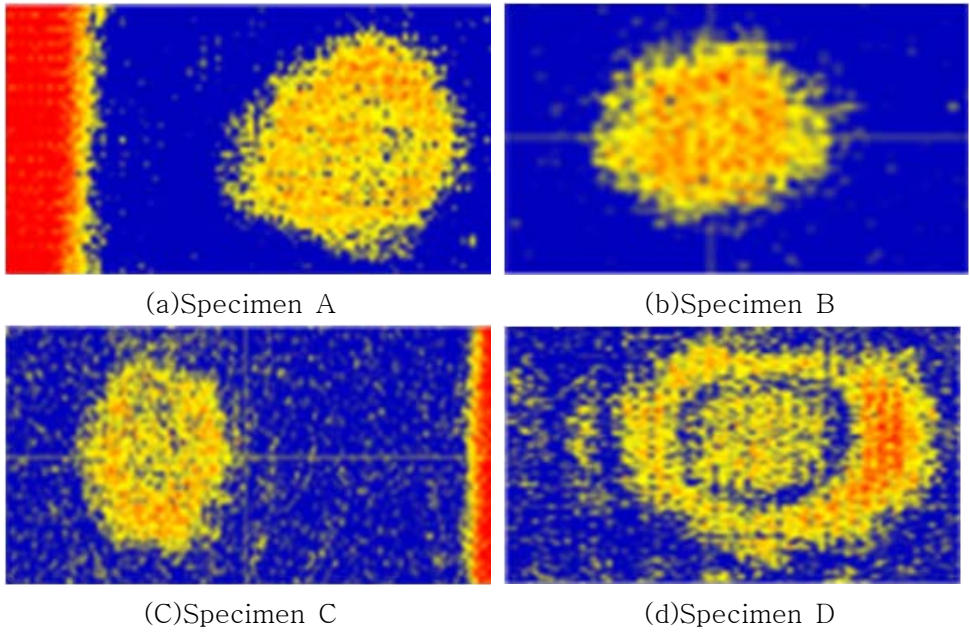


Fig.5-7 Image inspection result of spot welding specimen A,B,C,D

Fig.5-8에서는 스캔 속도를 결정하는데 영향을 미치는 PRF(Pulse Repeation Frequency, 송신펄스주기)에 따른 스폿 용접시험편 A,B,C,D의 화상탐상 수행 결과를 나타내고 있다. Fig.5-8(a)는 PRF가 짧아지기 때문에 송신펄스와 투과펄스가 겹쳐서 거친 화상이 취득되는 반면에 PRF가 길어져 송신펄스와 투과펄스가 겹치지 않아 Fig.5-8(b)와 같이 더 부드러운 화상의 취득이 가능하였다.

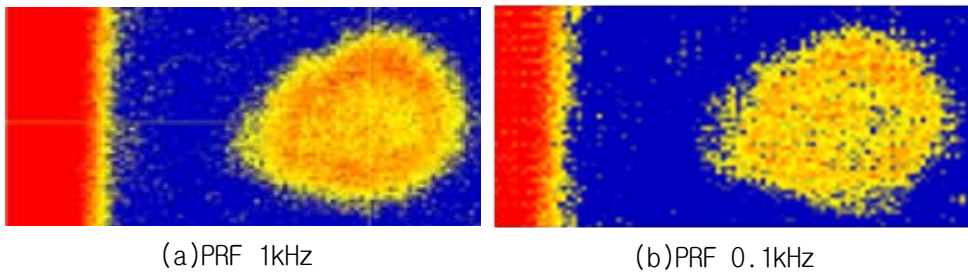
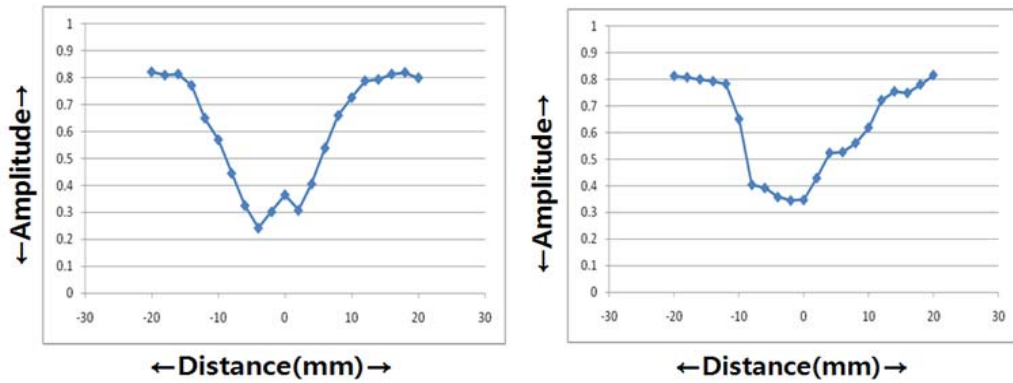


Fig.5-8 Image acquisition depending on PRF cycle

Pulser Receiver에 Pre-amp와 Air Probe를 연결시킨 후에 탐상 S/W를 실행시킨다. 각 탐촉자 사이의 거리와 각도, 감도 등을 조정하여 화면에 파형이 잘 나타나도록 하며, 탐촉자 사이에 시험편을 두고 시험편의 중심을 0점으로 하여 X축, Y축 방향으로 일정 pitch를 주어 탐촉자를 이동시키면서 탐상을 수행하고 그 결과를 분석한다. Fig.5-9는 CFRP 시험편A의 탐상위치에 따른 진폭변화⁽¹⁰⁾를 그래프로 나타낸 것으로 측정거리는 -20~20mm로 설정하고 X축 방향으로 2mm pitch 간격으로 주사하였다. 시험편A의 경우는 중앙 부분에서 초음파의 진폭이 크게 감소하는 것으로 보아 그 범위 내에 층간박리가 존재함을 알 수 있다.

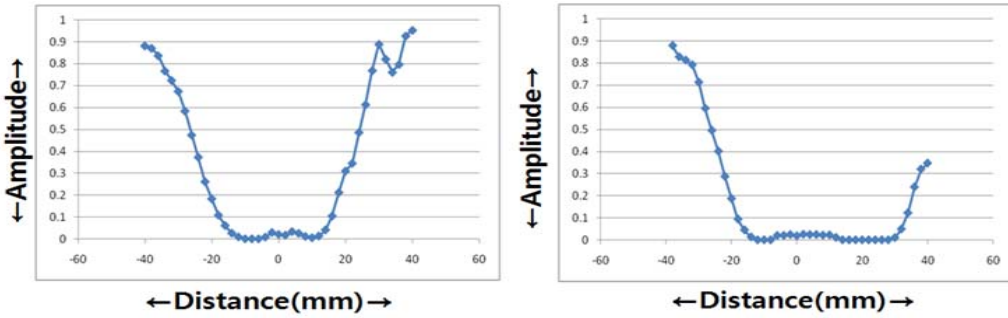


(a)Move to X axis direction

(b)Move to Y axis direction

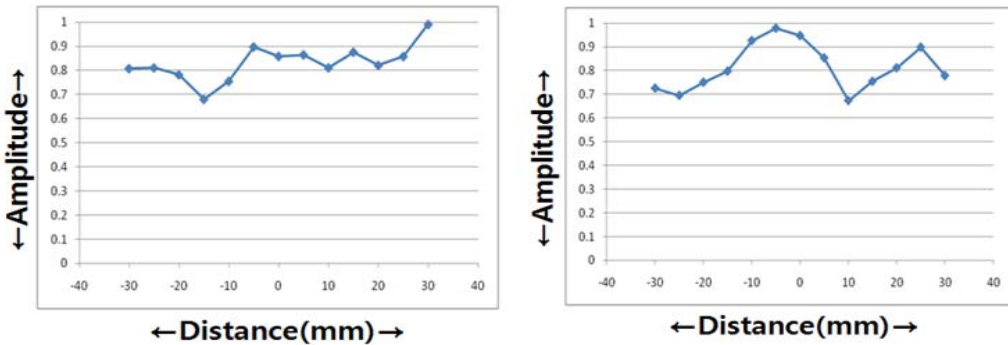
Fig.5-9 Amplitude change depending on the inspection location(CFRP A)

Fig.5-10은 CFRP 시험편B의 탐상위치에 따른 진폭변화를 그래프로 나타낸 것으로 측정거리는 -40~40mm로 설정하고 X축 방향으로 2mm pitch 간격으로 주사하였다. 시험편B의 경우에서 볼 때, 시험편A보다 넓은 부분에서 진폭이 감소하고 있다. 따라서 시험편B에서 시험편A에 비해 더 넓은 영역의 결함이 존재한다는 것을 알 수 있다.



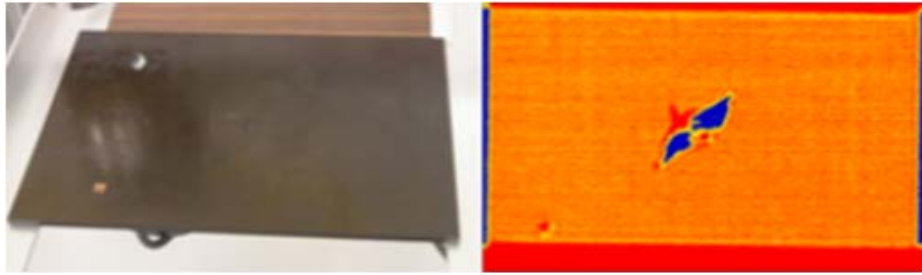
(a)Move to X axis direction (b)Move to Y axis direction
Fig.5-10 Amplitude change depending on the inspection location(CFRP B)

Fig.5-11은 CFRP 시험편C의 탐상 위치에 따른 진폭변화를 그래프로 나타낸 것으로 측정거리는 -30~30mm로 설정하고 X축 방향으로 5mm pitch 간격으로 주사하였다. 시험편C에서는 탐상 위치에 따라 진폭의 변화가 보였지만 시험편 A,B의 결과와 같이 자세한 결과를 얻지 못해 내부 결함의 상태의 정확한 파악이 불가능하였다.

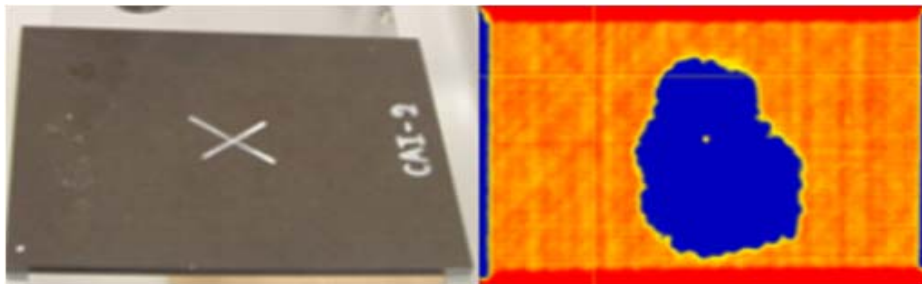


(a)Move to X axis direction (b)Move to Y axis direction
Fig.5-11 Amplitude change depending on the inspection location(CFRP C)

Fig.5-12는 자동 스캔 장치를 사용하여 취득한 CFRP 시험편A,B의 화상탐상 결과를 나타낸 것이다. A시험편의 각 부분에 따른 컬러의 상태로 보아 투과율이 낮아 취득된 청색 화상을 통해 그 부분에 결함이 존재한다는 것을 알 수 있으며, 그 경계면이 황색 화상으로 취득된 것으로 보아 내부에 층간박리 결함이 존재한다는 것을 알 수 있었다. B시험편 역시 중앙의 결함 부분이 두드러지게 청색으로 나타난 것으로 보아 A시험편에 비해 더 크고 넓은 영역의 결함의 존재여부에 대한 파악이 가능하였다.



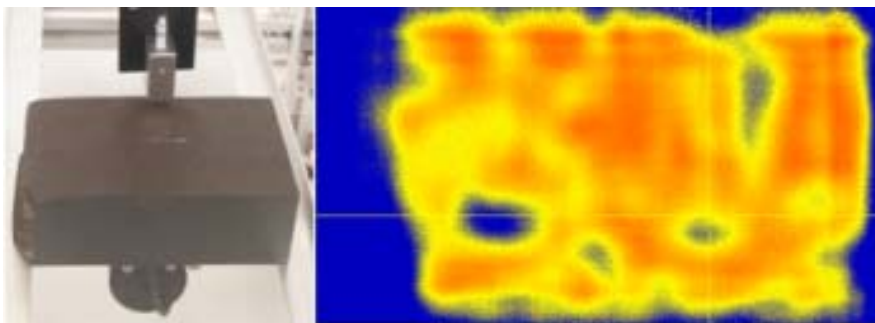
(a)Specimen A



(b)Specimen B

Fig.5-12 Image inspection result of CFRP specimen A,B

Fig.5-13은 자동 스캔 장치를 사용하여 취득한 CFRP 시험편C의 화상탐상 결과를 나타낸 것으로 A,B 시험편과는 다르게 두께가 48mm로 매우 두껍기 때문에 탐상할 때 사용하였던 점집속탐촉자를 평면 탐촉자로 교체하고 감도를 상향조정 한 후 탐상을 수행하였다. A,B 시험편의 화상결과와는 다르게 평면 탐촉자를 사용한 결과 거친 화상이 취득되었으며, 이를 통해 점집속탐촉자가 평면 탐촉자보다 분해능이 높다는 것을 알 수 있었다. 화상의 상하좌우에 청색으로 나타나는 부분은 시험편이 매우 두껍기 때문에 가장자리에서 초음파의 경로가 휘어져 속도가 늦어지고 게이트의 범위로부터 벗어나기 때문에 청색 화상이 취득⁽¹⁰⁾되었다. 시험편이 얇을 경우에는 초음파의 투과율이 높아지므로 적색 화상이 취득되기 때문에 이와 같은 현상은 나타나지 않는다.



(C)Specimen C

Fig.5-13 Image inspection result of CFRP specimen C

6장 결 론

친환경 부품소재로 주목받고 있어 비파괴검사의 필요성이 높게 요구되고 있는 스폿용접 시험편과 CFRP 시험편에 비접촉 공중 초음파 탐상을 시도하여 현장 적용이 가능해질 경우, 이에 따른 실용화 가능 여부를 확인하였다.

1. 탐촉자(Receiver)에 6mm의 마스크를 부착시킨 후 수동탐상을 한 결과, 시험편의 두께와 위치에 따라 초음파 투과율 파악이 가능하였다. 스폿 용접부는 두께와 관계없이 투과율이 양호하였으며, 앞에서의 조건과 동일하게 자세한 측정을 한 결과, 스폿 용접부의 중앙에서의 투과율이 가장 높게 나왔으며, 두께에 따른 투과율 차이를 보였다. 따라서 스폿 용접 시험편과 초음파 투과율의 관계 파악이 가능하였다.

2. 수동탐상보다 더 자세하고 정확한 결과값을 도출하기 위해 자동탐상을 수행하여 수동탐상 때의 결과와 비교하였다. 수동탐상 때와 동일하게 시험편의 두께와 위치에 따른 진폭변화의 파악이 가능하였고 수동탐상에 비해 자동탐상을 통한 결과값으로 더 신뢰성 있는 결과 확인이 가능하였다.

3. 수동탐상과 자동탐상으로는 단순한 파형변화를 보고 그에 따른 결과를 분석해야 했는데 화상 탐상을 통해 초음파의 투과율과 용접부의 위치와 육안으로는 판별이 불가능한 스폿 용접 시험편 내부의 상태와 크기의 파악이 가능하였다. CFRP 시험편 또한 내부에 존재하는 결함 층간박리의 검출을 통해 결함의 위치와 크기의 파악이 용이하였다.

4. NAUT는 수침법에 비해 자동화 공정에 적용하는 것이 용이하므로 자동차의 제조 공정에 적용할 경우, 비용절감과 품질향상에 기여하며, 적용한다면 비용절감과 품질향상이 가능하다. 친환경자동차 부품소재 CFRP의 사용비중이 크게 되어 이것을 고려한다면 NAUT의 가치는 높아질 것이라고 생각된다. 취득된 각 화상의 결과를 통해 내부 결함의 모양 및 상태, 크기, 위치 등의 파악이 단시간에 가능하였으며, NAUT탐상 방법의 적용과 화상화가 동시에 이루어짐을 확인하였다.

결론적으로 아직까지 비파괴 탐상 방법이 적용된 사례가 없어 NAUT의 실현이 가능해질 경우, 비파괴검사 및 평가의 신뢰성이 높게 요구되는 스폿 용접부와 층간박리 소재에 따라 강도 변화의 차이로 인해 비파괴 검사에 유용하게 쓰일 CFRP 시험편 모두 NAUT 탐상기술의 적용이 잘 이루어졌으며, 이에 따른 NAUT 방법의 실용화를 확인하였다.

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.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, 1-1, pp.1-4(2010)

3.M.Hirohisa, K.Naoyuki, N.Junichiro, K.Mashiro, "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.Toshihiro, "Removal of water effect for visualization of nonlinear ultrasonic's images in immersion method," Proceedings of the 17th Symposium on Ultrasonic Testing of Japanese Society for Non-Destructive Inspection, 4-1, pp.51-52(2010)

6.K.Yasuhiro, O.Toshihiro, N.Nobutomo, 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 Transducers," 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," Proceedings of the 17th 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, "Application of Laser - based Ultrasonic Technique for Evaluation 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 from Spot Welding Part and CFRP Specimen", Proceedings of the 10th Asia-Pacific Conference on Engineering Plasticity and Its Application, 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,

pp.23-30(2007)

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

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, No.4, 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.451-457(2010)
25. 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)
26. 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)
27. K. W. Nam, K. C. Lee, K. Akira, "A Feasibility Study on the Application of Ultrasonic Method for Surface Crack Detection of SiC/SiC Composite Ceramics", J.KSNT, Vol.29, No.5, pp.479-484(2009)
28. M. Y. Choi, S. S. Lee, J. H. Park, W. T. Kim, K. S. Kang, "Analysis of Heat Generation Mechanism in Ultrasound Infrared Thermography", J.KSNT, Vol.29, No.1, pp.10-14(2009)
29. M. S. Kim, G. S. Kim, H. M. Jung, K. B. Kim, "Nondestructive Quality Measurement System of Fruits Using Ultrasonic", J.KSPE, Vol.25, No.2, pp.7-14(2008)
30. Y. S. Shin, Y. H. Yoon, Y. H. Kim, "Measurement of Longitudinal and Transverse Wave Speed in Solid Materials Using Immersion Ultrasonic Testing", J.KSNT, Vol.28, No.1, pp.40-45(2008)

31. S. N. Choi, H. N. Kim, H. J. Yoo, H. J. Cho, W. G. Hwang, "Development of Ultrasonic Testing System for Piping Welds", J.KSNT, Vol.28, No.4, pp.331-338(2008)
32. J. H. Lee, S. J. Lee, J. H. Byun, "Evaluation of Internal Defect of Composite Laminates Using A Novel Hybrid Laser Generation/Air-Coupled Detection Ultrasonic System" J.KSNT, Vol.28, No.1, pp.46-53(2008)
33. I. H. Choi, J. I. Lee, G. D. Kwon, K. Y. Jang, "Effect of System Dependent Harmonics in the Measurement of Ultrasonic Nonlinear Parameter by Using Contact Transducers", J.KSNT, Vol.28, No.4, pp.358-363(2008)
34. J. H. Park, M. W. Nam, Y. S. Lee, "Development of Image Processing Software for Ultrasonic NDE", IEEK, pp.459-460(2007)
35. J. W. Cho, Y. S. Choi, S. H. Jung, H. G. Jung, "A Brazing Defect Detection Using an Ultrasonic Infrared Imaging Inspection", J.KSNT, Vol.27, No.5, pp.426-431
36. J. H. Lee, S. J. Lee, S. W. Choi, J. H. Byun, "Quantitative Evaluation of Delamination in CFRP Using Laser-Based Ultrasound", J.KSPE, Vol.24, No.11, pp.29-36(2007)
37. S. N. Choi, H. J. Yoo, H. N. Kim, "Development of Automated Ultrasonic Testing Signal Acquisition Program for Welding", KSNT, pp.319-324(2006)
38. 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)
39. 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)

40. J. Y. Kim, K. S. Song, D. J. Yang, "Laser-Ultrasonics Application for Non-Contact and Non-destructive Evaluation of Structure", J.KSMTE, Vol.14, No.4, pp.49-54(2005)