

2. 특집기사

첨단복합재 구조물에 대한 비파괴 검사

Non-destructive Test for Advanced Composite Structures



진양준*
Y-J Jin



한중원**
J-W Han



김윤해***
Y-H Kim

* 대한항공 연구개발팀 AST 레벨수리

** 대한항공 연구개발팀

*** 한국해양대학교 기계소재공학부

복합재부품의 제작 후 검사로 적용될 수 있는 방법은 방사선투과검사와 초음파검사가 있으며, 전자는 특정 검사시에 국한되어 사용되며 그외의 검사에는 후자가 적용되는 것이 일반적이다. 복합재부품의 검사를 원활하게 수행하기 위해서는 초음파검사의 기본이론과 적용가능한 기법에 대한 이해가 필수적이다. 따라서 아래에서 초음파검사의 기본원리에 대해 간략하게 설명하고 그 실제 제작되고 있는 복합재부품에 대한 검사예를 살펴보고자 한다.

1. 초음파 검사

여러 가지 비파괴 검사 방법중 복합재부품 내에 흔히 존재하는 결함, 즉 공기층을 형성하는 delamination, disbond, debond 등은 초음파 검사를 통하여 검출하기가 용이하다. 그 이유는 초음파가 매질내를 진행할 때, 초음파의 진행 방향과 수직인 결함에서 음파의 반사가 가장 잘 일어나며

그 결과 검사의 감도도 최상이 되기 때문이다.

한편, 모든 비파괴 검사는 상태를 이미 알고 있는 시편과 실제 검사 결과와의 비교 시험이며 특히 초음파 검사는 검사하고자 하는 제품의 형상과 완벽하게 일치하는 시편을 제작하여 장비를 표준화하고 검사 중에 장비의 정상작동 유무를 확인해야 한다.

1. 검사 장비의 구성

장비본체

탐촉자(Transducer)

couplant(초음파를 탐촉자에서 검사체로 연결시켜 줄 수 있는 것. 주로 물을 사용)

2. 검사 Type · Method · Viewing

복합재부품의 초음파 검사의 진행과 그 결과를 이해하기 위해서는 아래의 검사 Type, Method, Viewing 방법에 대한 이해가 선행되어야 하므로 간략하게 먼저 언급한다.

(1) 검사 Type

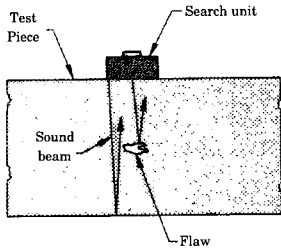


그림1.1 Contact Type

탐촉자 (Transducer)를 물을 couplant로 하여 검사표면에 직접 접촉하여 초음파를 검사하고자 하는 제품에 주사한다.

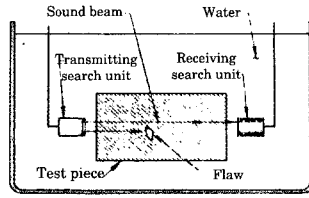


그림1.2 Immersion Type

탐촉자를 couplant인 물속에 넣어 초음파가 제품에 주사되도록 한다.

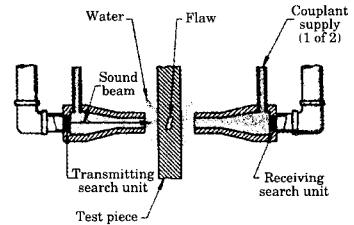


그림1.3 Squirter Type

검사표면에 초음파를 물 기둥을 이용하여 주사한다. Immersion Type의 변형이다.

(2) 검사 Method 반사법)과 Through-Transmission (투과법)의 특
초음파 검사의 기본 검사기법인 pulse echo(펄스 에코)는 아래 표와 같다.

표 1 TTU& Pulse-Echo

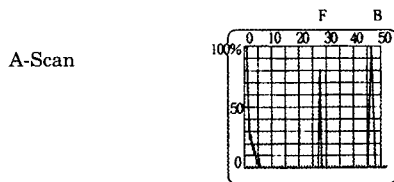
	Through-Transmission	Pulse-Echo
사용예		
탐촉자	2개	1개
결합검출	검사체 내부에서 음파의 감쇄를 이용하여 결함 검출	검사체 내부에서 반사되는 음파의 세기를 이용하여 결함 검출
탐촉자 위치 및 기능	두개의 탐촉자를 검사하고자 하는 부위의 양편에 일직선상에 놓고 하나의 탐촉자는 음파를 송신하고 (Transmitter) 반대편의 나머지 탐촉자는 수신한다. (Receiver)	하나의 탐촉자가 송·수신 역할을 한다. 두개의 탐촉자를 사용하기가 어려운 물체(sandwich 구조물)의 검사나 검사체의 구조 특성상 탐촉자를 하나만 사용할 수 있는 경우.

(3) Viewing 방법 을 의미하는 것이 아니고 검사한 결과를 검사자가
A- / C-Scan Presentation 은 초음파 검사 방법 보는 방식의 형태를 의미한다.

표2 A-Scan & C-Scan

- * 시간(검사체의 두께)과 음파의 세기가 CRT(Cathod Ray Tube)상에 지시된다.
- * 결함의 깊이와 대략적인 크기를 알 수 있다.

- * 검사체를 평면으로 투영하므로 결함의 윤곽이 화면(monitor)에 지시된다.
- * 결함의 크기를 알 수 있다.



(4) 시편

시편은 제품의 형상과 동일하게 제작되어야 하며 결함 발생이 예상되는 곳에 결함을 인위적으로 만들어 넣는다. 아래 시편은 Honeycomb core를 이용한 복합재품을 검사하기 위한 시편이고 합부 판정 기준이 직경이 0.5" 일때 사용할 수 있으며, tool side 및 bagside 에 각각 직경이 0.5" 인 구형의 결함을 직선으로 Honeycomb core 와 laminate 사이에 심었고 기타 결함 형상을 나타내기 위하여 0.5"X0.5" 사각형 결함을 동일 위치에 놓고 시편을 제작하였다.

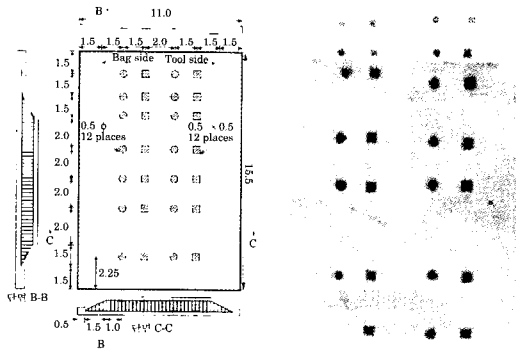


그림 2 시편 도면 및 C-Scan Image

(5) 결함의 종류

1) Core Crush

core의 두께가 외부의 힘에 의해 찌그러지거나 줄어든 현상, 즉 core 원래의 두께와 면접의 두께의 합이 도면의 요건에 미달되는 경우를 말한다.

2) Core Depression

core 가 외압으로 길이방향이나 폭방향으로 밀림으로써 부분적으로 움푹 들어가거나 도려낸 듯한 형상.

3) Core Movement

core cell 이 뒤틀렸거나 core 의 크기라 공차내에 들지 않을 경우 등의 이유로 발생하는 core 의 이동현상

4) Debond

하나의 laminate 내의 prepreg plies 간에 분리현상, 또는 접착된 접촉면(joint or interface) 사이의 분리현상.

5) Delamination

경화중 또는 경화후 하나의 laminate 내의 prepreg plies ES 사이에 발생된 분리현상.

6) Disbond

경화중 또는 경화후 laminate 와 core 사이 또는 접착된 laminates 간에 발생하는 분리현상 즉, 접착된 접촉면의 adhesive bond line 을 따라 나타난 분리현상.

7) Porosity

적층 구조물 내부에 빈공간이 내재된 상태.

(A condition of voids, or trapped pockets of gas, air or vacuum within solid material; an internal condition of composite structure which consists of small interlaminar voids.)

8) Void

laminate plies 사이의 빈공간

(Air or gas that has been trapped and cured into a laminate; an empty space within the resin fiber system)

II. 검사에

어떤 복합재부품을 검사하기 위한 검사 Type, Method, Viewing 의 선정은 검사자나 검사장소의 상황에 따른다. 즉, 특별히 지정되어 있는 경우를 제외하고는 장비의 보유 상황, 제품의 형상, 장비의 조작 숙련도에 따라 가장 적합한 것을 선택하면 된다.

아래에서 검사 기준 또는 제작 요구사항의 변동에 따른 검사 Type, Method, Viewing 방법의 변경이 어떤 과정을 걸쳐 일어나는지 살펴보고자 한다.

1. 검사 제품의 형상

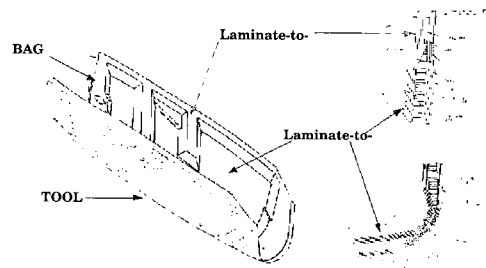


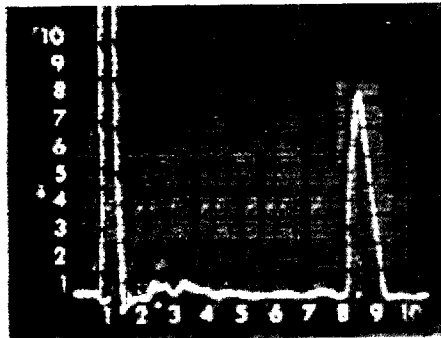
그림 3 제품의 형상

2. 검사 기준과 기준에 따른 초음파 검사의 선택

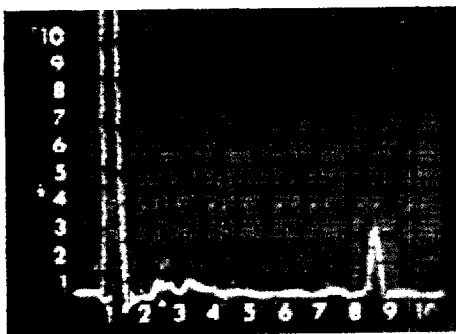
(1) 검사 기준

투과법으로 1MHz를 사용할 때, 시편의 건전부 대비 결함부에서의 dB차이가 18dB이상되는 지시에 한하여 결함으로 판정한다. [When using 1MHz through transmission, indications have an attenuation level greater than or equal to 18dB over a good area of the applicable standard.]

따라서 건전부에서의 투과 신호를 CRT 화면상의 높이(amplitude) 80% 정도에 맞추어 장비를 표준화한 후 결함부에서 투과 신호가 18dB 차이나는 높이인 1에 기준을 설정하여 결함을 검출하게 된다. 아래 그림에서는 이해를 돕기 위해 결함부의 신호를 과장되게 나타내었다.



건전부



결함부

그림 4 건전부와 결함부의 신호비교(A-Scan)

(2) 검사 방법 : Squirter Type, TTU, A-Scan
아래 그림에서 보는 바와 같이 Yoke Scanner 를 이용한 TTU 검사 technique 은 Squirter type의 일종이며 수동으로 조작된다.

표3 Hand Held TTU 의 탐촉자 사양

PULSER	MOZZLE Dia	MHz	Tr Dia(IN)	P/N	S/N
TRAMST	0.25 "	1.0	0.5	AE 10203	12551 12249
RECEIV ER	0.375 "	1.0	0.5	AE 10203	02357 02358
VENDOR	NDT SYSTEM				
REMARK	HH-TTU				

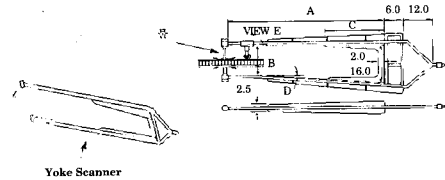


그림5 Hand Held Yoke Scanner 를 이용한 part 의 TTU 검사

(3) 검사 결과

1) 결과

(1)의 합부기준을 적용하여 검사 결과(또는 신호, 그림4 참조)를 관독할 경우에는 결함으로 판정 내릴 정도의 신호를 검출할 수 없어 거의 모든 제품이 합격처리 된다.

2) 문제점

하지만 완제품을 만들기 위하여 금속 구조재를 검사가 끝난 복합재부품에 riveting하여 장착하게 되는 데 이때 riveting 작업으로 인한 진동으로 특정 부위에 ply간 박리현상(delamination)현상이 발생하게 된다.

최종 조립전 단품단계에서 해결해야 하는 문제들, 즉 (1) 복합재품의 layup 및 curing 공정상의 완전하지 못한 setup 또는 (2) 원자재의 불량 가능성 (3) layup 작업의 미숙련도 등에 의한 결함들이 완제품 단계에서 발체됨으로 인해 이를 수정하는데 더 많은 시간과 비용이 소모되어 공정의 효율성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 된다.

3) 따라서, (1) 합부기준은 그림3과 같은 형상의 복합재부품의 검사에는 부적절하며 새 검사기준을 설정해야만 한다.

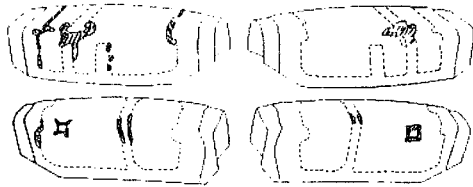


그림 6.1 결함 발생 다발 부위

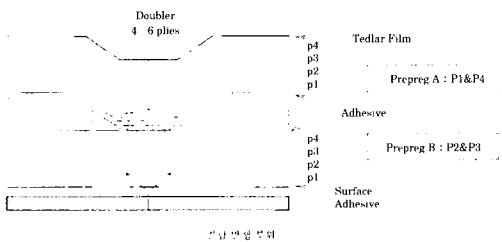


그림 6.2 제품의 단면도와 결함 발생 부위

3. 새로운 검사 기준의 적용

(1) 2가지 검사 Method 의 적용

1) 전면 검사(1차 검사) : Squirter Type, Through-Transmission, A-scan

그림 4와 2(1)의 내용에 따라 복합재료품의 전면을 검사한다.

2) 결함 다발부위와 전면 검사시의 의심부위 검사 : Contact Type, Pulse-Echo, A-scan

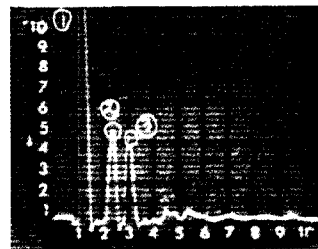
① 검사기준인 18dB 이상의 차이는 (2 검사기준 참고) 송신부를 떠난 음파의 에너지가 제품을 지나 수신부에 도달했을 때 최초 음파 에너지의 12.5%이하가 됨을 의미하므로

② 1MHz의 사용은 음파의 감쇄가 심한 sandwich 구조물에는 적당하나, 상대적으로 음파의 감쇄가 덜한 laminate 부위와 laminate와 core 경계면에서는 음파 에너지가 너무 강하여 설정된 검사 기준으로는 탐지할 수 없는 작은(층간 박리의 정도가 덜한) 결함이 있다는 가정하에 사용주파수를 5MHz로 선정하여 pulse-echo A-Scan 하기로 결정했다.

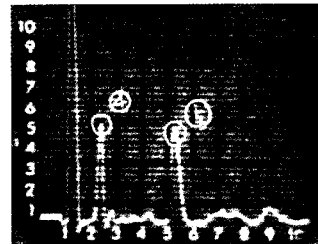
Pulse-Echo 법은 반사되어 되돌아 오는 음파의

표4 Pulse-Echo의 탐촉자 사양

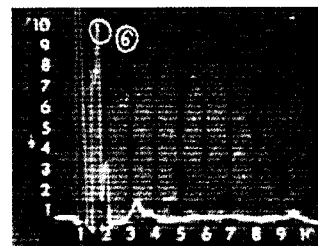
Pulser	MHz	TR dia(in)	P/N	S/N	Vendor	Remark
Transmitter & Receiver	5.0	0.25	PDG052	12868	NDT System	A-Scan
			GD0504	92D052	Staveley	



Laminate-to-Honeycomb core



Laminate-to-Laminate



△ Bad Area

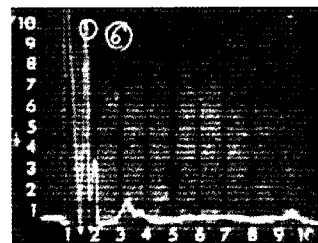


그림 7.1 부위별 건전부와 결함부의 시 신호비교

신호를 분석하여 결함을 검출하는 방법이며, 음파가 반사되는 곳은 상기 그림에서 보듯이 이종 매질간의 계면이나 제품과 공기간의 계면이다. 일반적으로 laminate 와 honeycomb core 계면에서 반사파의 신호를 검출하기란 어려우나 건전부와 결합부에 대한 Pulse-Echo 법 적용과 이해를 돕기위해 순간적으로 지시되는 신호를 검출하여 표시한 것이며, 그림 7.1에 표시된 신호 ① ~ ⑥ 을 해석해보면 아래와 같다.

- ① part 표면 : Surface Adhesive
- ② P4-Adhesive : Prepreg A 와 Adhesive 간의 계면
- ③ Adhesive-Honeycomb Core 계면 : Adhesive 와 Honeycomb Core 간의 계면
- ④ P4-Filler 계면 : Prepreg A 와 Filler (Prepreg B)간의 계면
- ⑤ Tedlar Film-대(공)기 계면 : Tedlar Film 과 제품 외부(대기)간의 계면
- ⑥ 결합 지사 : 신호의 CRT 화면상에서의 발생 위치를 볼 때 P1 Prepreg A와 P2 Prepreg B 사이에서 결합 지시가 발생되는 것으로 추정.

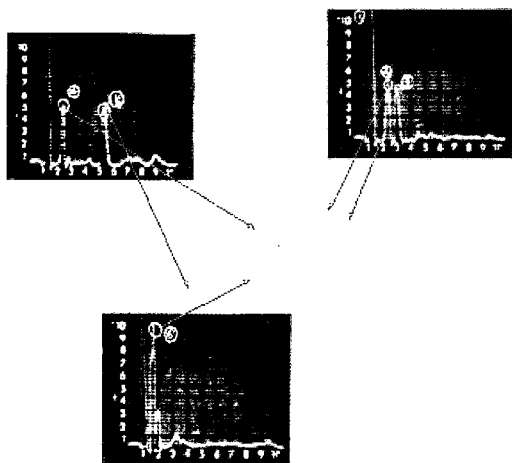


그림 7.2 part 의 단면에 나타난 건전부 및 결합부의 신호

(2) 파괴 시험을 통한 새 검사 기준의 유효성 검증
 새로 적용한 검사 기준이 적합한지 또는 필요 이상으로 너무 가혹(tight)한지를 검증하기 위해 검사한 복합재부품을 절단하고 그 절단부를 다시 squirter type TT C-scan 및 contact type Pulse Echo A-scan 검사하여 그림 8의 결과를 얻었다

1) A-Scan 및 C-Scan 결과

아래 그림8에서 볼 수 있듯이 라미네이트 및 라미네이트와 honeycomb core 경계면에 명백한 결함이 있음에도 불구하고 TT로 검사했을 때는 C-Scan image에 결함으로 지시되는 곳은 일부이나 Pulse Echo 로 검사했을 때는 명백히 결함으로 나타나고 있어 기존의 검사기준은 honeycomb core sandwich 같은 복합구조제품에는 적합하지 않으므로 새 검사 기준의 적용이 적절한 것으로 판명되었다.

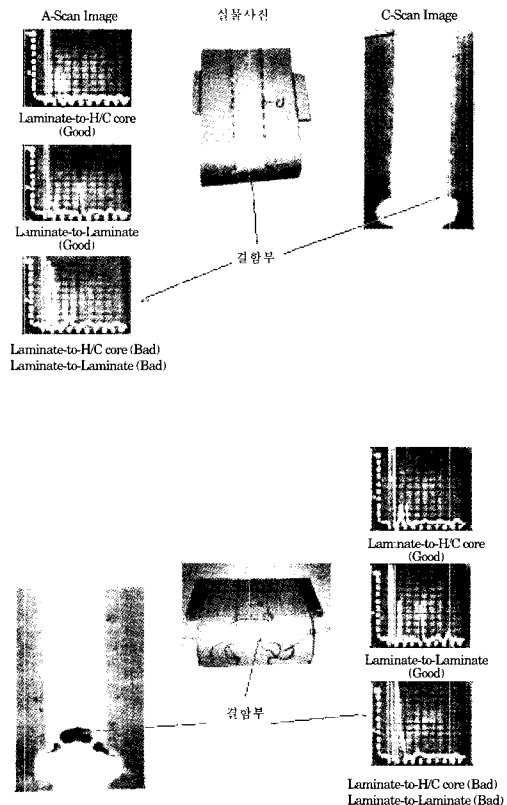


그림 8 건전부 및 결합부의 A-Scan 및 C-San

(3) 결함 종류 확인

결함의 종류와 발생원인을 밝혀내고 보다 정확한 검사 기준을 확립하기 위하여 위의 검사 부위를 더 작게 절단하여 이의 단면을 방사선촬영하여 정밀조사한 결과 Pulse Echo A-Scan에 의해 검출된 결함은 그림9~그림19에서 볼 수 있듯이 거의 대부분이 2nd 와 3rd layer사이에서 porosity들이 집중적으로 발생하였음을 밝혀냈고 이 결함의 명칭을 String of Porosity 로 하였다. 하지만 이들 결함이 왜 특정 layer사이에서 집중적으로 발생하는 지에 대해서는 원인을 규명하지 못하였으므로

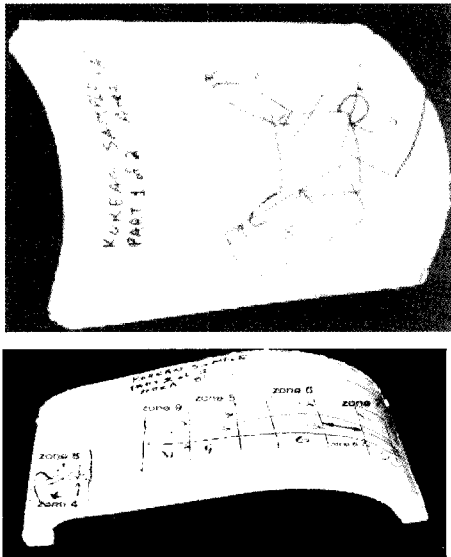


그림9 절단전의 Part 및 Zone 구분

향후 연구과제로 삼기로 하였다

그림10~ 그림19은 상단에 각 Zone 의 단면부를, 하단에 각 Zone 의 특징 부위를 확대하여 나타내었다. 확대한 그림에서 전반적으로 특정부위 (2nd 와 3rd layer) 결함이 나타나고 있음을 잘 보여주고 있다. 개개의 결함은 앞에서 기술한 대로 porosity 이지만 이 porosity 들이 줄을 이루거나 면적을 형성할 때는 delamination 과 동일한 지시를 장비에 나타내게 됨을 쉽게 알 수 있다.

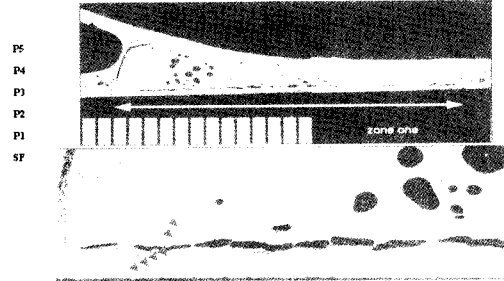


그림10 Zone 1의 단면과 결함

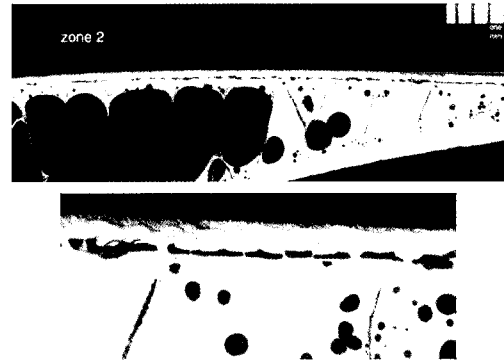


그림11 Zone 2의 단면과 결함

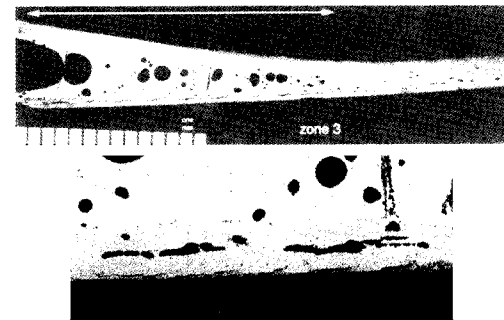


그림12 Zone 3의 단면과 결함

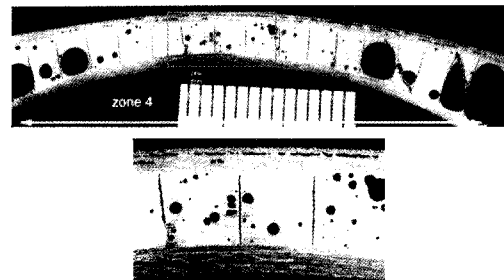


그림13 Zone 4의 단면과 결함

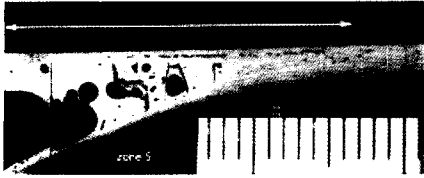


그림14 Zone 5의 단면과 결함

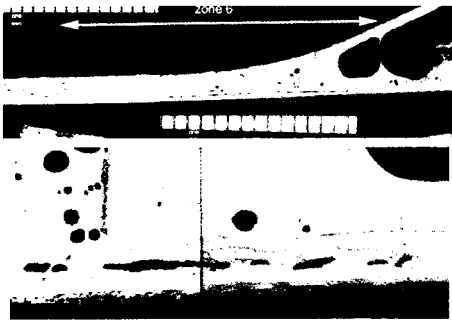


그림15 Zone 6의 단면과 결함



그림16 Zone 6-7의 단면과 결함

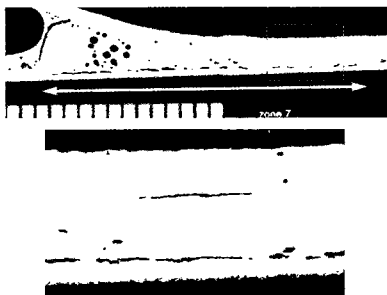


그림17 Zone 7의 단면과 결함

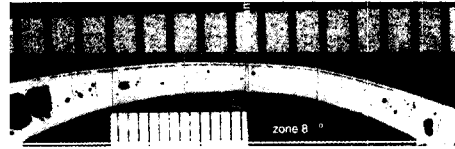


그림18 Zone 8의 단면과 결함

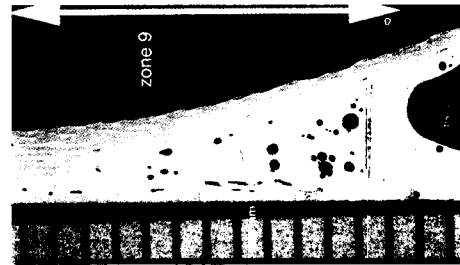


그림19 Zone 9의 단면과 결함

4. 검사 기준의 최종 선정

새로운 검사 기준으로 기존의 검사 기준으로는 발견하지 못하였던 결함을 검출하였고 또 이 결함의 존재와 형태를 파괴시험을 통하여 확인하였으므로 아래와 같이 검사 기준을 최종 확정하였다.

(1) Sandwich 구조 부위

1MHz 주파수로 TTU를 적용하여 sandwich 구조 부위에 1차 검사를 실시하고

(2) Laminate 부위 및 경계부

5MHz 주파수로 Pulse-Echo 를 적용하여 1차 검사시에 발견된 지시의 검증 및 laminate 부위 검사를 실시하여 검사를 종료한다.

III. 결 론

복합소재품의 신뢰도 평가는 초음파 검사를 이용하는 것이 가장 타당한 검사 방법이지만 설계자가 설정한 검사 기준에 따라 검사의 방법이 달라지고 검사의 결과도 합격에서 불합격으로 불합격에서 합격으로 달라질 수 있다.

따라서 어떤 복합소재품을 제작하여 그 신뢰성을 평가 또는 검사하고자 할 때는 그 제품의 구조적 또는 제작상의 취약점을 발췌하여 검사 부분으로 지적하는 것도 중요하지만 초음파 검사 원리와 적용상의 특성을 잘 이해하여 기 발췌된 취약 부분에서 결함을 검출할 수 있는 최적의 검사 기준을 설정하는 것이 중요한 요소 중의 하나이므로 복합소재품의 설계시에 반드시 반영되어야 할 것으로 사료된다.