

# 초음파검사 판정 기준이 항공기용 복합구조재의 건전성 평가에 미치는 영향에 관한 고찰

진양준\*, 한중원\*, 김국진\*, 송기경\*

## Study on effect of ultrasonic inspection criteria to soundness evaluation of honeycomb core sandwich and laminate structure used for commercial aircrafts

Y.J.Jin, J.W.Han, G.J.Kim, G.K.Song

Key Words : Ultrasonic Inspection, A/C-Scan, Pulse Echo, Through Transmission

### ABSTRACT

The soundness of honeycomb core sandwich and laminate structure used for commercial aircrafts is generally evaluated with ultrasonic inspection because the inspection is most sensitive to planar surfaces which are perpendicular to sound propagation pass and reflects sound almost 100% to equipment. And most defects inherent in composite material curing process has good reflective surfaces. With all this advantage, unexpected obstruction to product and additional cost could be occurred when inappropriate accept/reject criteria is given. In this study the importance of inspection criteria will be discussed to show how inappropriate criteria cause unexpected results leading to high production cost and how much time must be spent to correct those improper criteria with an actual case occurred in Aerospace Division, Korean Air.

### 1. 서론

비파괴 검사를 이용하여 검출되는 항공기용 복합재 부품의 결함으로는 disbond, debond, delamination, void, core movement, core crush, water absorption 등이 있으며 일부 결함을 제외하고는 대부분 제품의 내부에 공기층을 형성하는 형태의 결함들이다. 이런 형태의 결함들은 복합재 부품의 제작 특성상 제품의 표면과 수평하게 일정 면적을 가지면서 내부에 형성되므로 음파의 진행 방향과 수직인 이중 매질간의 계면에서 검사의 감도가 최상이 되는 초음파 검사가 복합재부품의 내부 결함 검출에는 가장 적합한 검사 방법이라고 할 수 있다. 하지만 제시된 기준에 의해 제작된 시편과 복합재부품에 대한 초음파 검사의 장점을 가지고 검사에 임할 지라도 초음파 검사의 적용 방법(초음파를 복합재 부품에 주사하는 방법)과 그 결과 발

생하는 결과신호를 판정하는 기준이 정확하지 않으면 피검체의 건전성 여부를 정확하게 판단할 수 없으며 더 나아가 피검체 내부에 이후 공정에서 문제를 일으킬 소지가 있는 결함을 발취하지 못하여 생산장에 및 이의 해결을 위한 추가되는 시정 조치 활동으로 인한 생산비용의 증가를 유발할 수도 있다 따라서 본 연구에서는 부정확한 결함 판정 기준에 의해서 야기되는 문제와 이의 해결을 위한 시도를 통해서 복합재부품의 설계시에 설정되어야 하는 검사 판정 기준의 중요성에 대해서 알아보고자 한다.

### 2. 복합재부품의 초음파 검사

복합재부품의 제작 후의 비파괴검사로는 초음파검사가 일반적이며 복합재부품의 검사를 이해하기 위해서는 검사의 구성과 적용 가능한 기법에 대한 이해가 필수적이다.

\* 대한항공 항공우주사업본부

## 2.1 검사의 구성

장비본체(Equipment), 탐촉자(Transducer), 시편, couplant(초음파를 탐촉자에서 검사체로 연결시켜 줄 수 있는 것. 주로 물을 사용) 등이 초음파 검사를 위한 기초적 외적 구성이라 할 수 있다..

## 2.2 검사 Type·Method·Viewing

복합재부품의 초음파 검사의 진행과 그 결과를 이해하기 위해서는 아래의 검사 Type, Method, Viewing 방법에 대한 이해가 선행되어야 한다.

### 2.2.1 검사 Type

#### 1) Contact Type

탐촉자와 피검체를 Couplant 를 이용하여 연결하고 피검체에 초음파를 주사한다

#### 2) Immersion Type

탐촉자를 couplant 인 물속에 넣어 초음파가 피검체에 주사되도록 한다.

#### 3) Squirter Type

피검체의 표면에 초음파를 물 기둥을 이용하여 주사한다. Immersion Type 의 변형이다.

### 2.2.2 검사 Method

초음파 검사의 기본 검사기법에는 pulse echo (펄스반사법)과 Through-Transmission (투과법)이 있고 간단한 설명은 아래와 같다.

#### 1) 투과법

검사체 내부에서 발생하는 음파의 감쇠를 이용하여 결함을 검출하는 방법으로 2개의 탐촉자를 하나는 송신용(transmitter) 나머지는 수신용(receiver)으로 사용한다.

#### 2) 펄스반사법

검사체 내부에서 반사되는 음파의 세기를 이용하여 결함 검출하는 방법으로 투과법과는 달리 하나의 탐촉자가 송·수신 역할을 한다. 두개의 탐촉자를 사용하기가 어려운 물체의 검사나 검사체의 구조 특성상 탐촉자를 하나만 사용할 수 있는 경우에 사용된다.

### 2.2.3 Viewing 방법

A-Scan 및 C-Scan Presentation 은 초음파 검사 방법을 의미하는 것이 아니고 검사한 결과를 검사자가 보는 방식의 형태를 의미한다.

#### 1) A-Scan

시간(두께)과 음파의 세기가 CRT(Cathod Ray Tube)상에 지시되며, 결함의 깊이와 대략적인 크기를 알 수 있다.

#### 2) C-Scan

검사체를 평면으로 투영하므로 결함의 윤곽이 화면(monitor)에 지시되며 결함의 크기를 알 수

있다.

## 2.3 시편

시편은 제품의 형상과 동일하게 제작되어야 하며 결함 발생이 예상되는 곳에 결함을 인위적으로 만들어 넣는다. 아래 시편은 Honeycomb core 를 이용한 복합재부품을 검사하기 위한 시편으로 주파수 1MHz 를 사용할 때 18dB 이상으로 감쇠를 일으키는 결함지시의 크기가 0.5" 이상일 때를 합부 기준으로 적용한 경우이다. tool side 및 bagside 의 Honeycomb core 와 laminate 사이에 각각 직경이 0.5" 인 구형의 결함을 직선으로, 기타 결함 형상을 나타내기 위하여 0.5X0.5" 사각형 결함을 동일 위치에 놓고 layup 한 후 경화하여 만든 것이다.

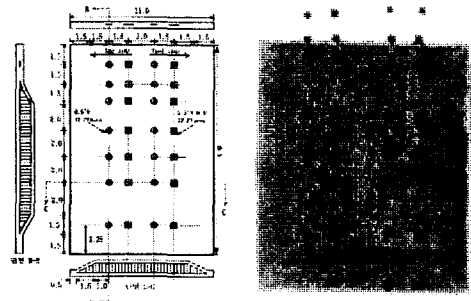


그림1 시편도면 및 C-Scan Image

그림 1 의 C-Scan Image 에서 도면과 인공결함의 개수가 다른 것은 경화시에 두 겹의 Teflon film 사이에 종이 tissue 를 삽입하여 만든 인공결함이 터져서 공기층을 형성하지 못하였기 때문으로 판단된다. 이 경우, Teflon film 과 종이 tissue 는 복합재료의 측면에서 볼 때는 FO(Foreign Object) 임에도 불구하고 C-Scan 으로는 검출되지 않고 있음을 알 수 있다. 역으로 1MHz 의 주파수를 사용할 때는 상기와 같은 결함은 발췌되지 못하고 또 설계상 인정되는 결함지시라고 생각할 수도 있다.

## 2.4 검사례

본 절에서는 실제 제작되었던 복합재부품을 예를 들어 검사시에 발생하는 문제와 신호의 해석에 대해 살펴보고자 한다. 단, 비교적 신호의 해석이 간편한 종파를 이용한 pulse echo 및 through transmission 방법에 대해 기술하고자 한다.

아래 그림2와 그림3은 MD-11 spoiler 로서 Upper 및 lower laminate skin, Honeycomb core, spar, rib 등으로 구성되며, 각각의 skin, spar, rib 등은 layup 및 cure 후 단품 단계에서 100% 검사를 한 후 경화하여 복합구조물을 만든 다음 최종 초음파 검사를 하였다.

그림2는 Upper skin 의 C-scan 결과로서 porosity 와 delamination 이 존재하고 있는 상태이다. 그림에서 나타낸 dB 값은 송신 탐촉자에서 주사된 음파와 수신 탐촉자에 의해 수신된 음파와의 차이를 표시한 것으로서 결함이 없는 정상 상태는 6.5dB 정도의 차이가 나지만 porosity 나 delamination 이 있는 부위에서는 각각 9.0dB, 32dB 까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. dB 차이가 클수록 결함의 정도가 크며 화면상에서 검게 나타난다. 그림3은 그림2의 part 를 적합한 절차에 따라 수리 작업하여 재경화된 후의 C-scan image 이다. Doubler 부위의 delamination 은 잘 수리되었으나 doubler 주위에서(화살표)는 수리작업으로 인한 delamination 이 추가로 발생한 상태를 보여주고 있다.

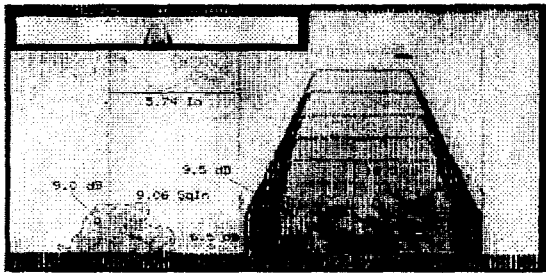


그림2 C-scan image of MD-11 Spoiler Upper Skin: Rejected by Porosity & Delamination

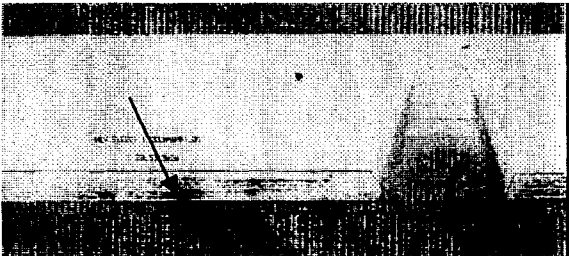


그림3 C-scan image of Repaired MD-11 Spoiler Upper Skin: Rejected by Delamination

### 3. 초음파 검사 방법의 설정

세부 비파괴검사의 방법 선정은 제시된 검사방법과 사용 주파수 및 판정기준에 따라 결정된다.

#### 3.1 설정된 검사 기준과 기준에 따른 초음파 검사방법의 의 선택

##### 3.1.1 검사 기준

투과법으로 1MHz 를 사용할 때, 시편의 건전부 대비 결함부에서의 dB 차이가 18dB 이상되는

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) 8 정도에 맞추어 장비를 표준화한 후 결함부에서 투과 신호가 18dB 차이나는 높이인 1에 기준을 설정하여 결함을 검출하게 된다. 아래 그림4 에서는 이해를 돕기위해 결함부의 신호를 과장되게 나타내었다

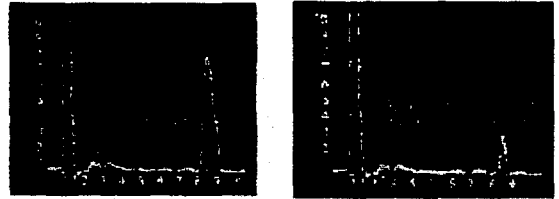


그림4 건전부 및 결함부의 A-Scan Image

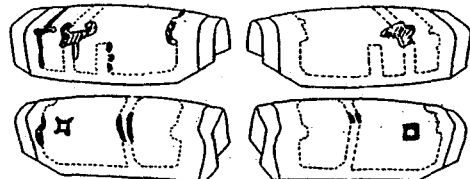
3.1.2 검사 방법 : Squirter Type, TTU, A-Scan Yoke Scanner 를 이용한 TTU 검사 technique 은 Squirter type 의 일종이며 수동으로 조작된다

#### 3.1.3 검사 결과

3.1.1 의 합부기준을 적용하여 검사 결과(또는 신호)를 판독할 경우에는 결함으로 판정내릴 정도의 신호를 검출할 수 없어 거의 모든 제품이 합격처리 된다.

#### 3.2 설정된 검사 기준에 따른 문제점

하지만 완제품을 만들기 위하여 금속 구조재를 검사가 끝난 복합재부품에 riveting 하여 장착하게 되는데 이때 riveting 작업으로 인한 진동으로 아래 그림5와 같이 특정 부위에 ply 간 박리현상(delamination)현상 발생했다. 최종 조립된 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 발췌됨으로 인해 이를 수정하는데 더 많은 시간과 비용이 소모되어 공정의 효율성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 3.1.1.의 검사기준은 형상이 복잡한 복합재부품의 검사에는 부적절하며 새 검사기준을 설정해야 유효한 검사를 할 수 있음을 알 수 있다.



## 그림5 결함 발생 다발 부위

### 4. 새로운 검사 기준의 적용과 검증

기존의 검사기준 또는 제작 요구 사항으로는 발생하는 결함을 검출할 수 없었으므로 결함 발생 부위별로 주파수와 검사 방법을 다르게 적용하기로 결정했다.

#### 4.1 검사 Method 의 변경

##### 4.1.1 2가지 검사 Method 의 적용

###### 1) 전면 검사(1차 검사)

Squitter Type, Through-Transmission, A-scan 을 적용하여 그림 4와 3.1.1 의 내용에 따라 복합재료품의 전면을 검사한다.

- ###### 2) 결함 다발부위와 전면 검사시의 의심부위 검사
- Contact Type, Pulse-Echo, A-scan 을 적용한다. 검사기준인 18dB 이상의 차이는 송신부를 떠난 음파의 에너지가 제품을 지나 수신부에 도달했을 때 최초 음파 에너지의 12.5%이하가 됨을 의미하므로 1MHz 의 사용은 음파의 감쇄가 심한 sandwich 구조물에는 적당하나, 상대적으로 음파의 감쇄가 덜한 laminate 부위와 laminate 와 core 경계면에서는 음파 에너지가 너무 강하여 설정된 검사 기준으로는 탐지할 수 없는 작은(층간 박리의 정도가 덜한) 결함이 있다는 가정하에 사용주파수를 5MHz 로 선정하여 pulse-echo A-Scan 하기로 결정했다.

#### 4.2 변경된 검사 Method 에 의한 신호분석

Pulse-Echo 법은 반사되어 되돌아 오는 음파의 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 결함부에 대한 Pulse-Echo 법 적용과 이해를 돕기위해 순간적으로 지시되는 신호를 검출하여 표시한 것이며, 그림 6에 표시된 신호 ① ~ ⑥ 을 해석해 보면 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(공기) 계면 : Tedlar Film 과 제품 외부(대기)간의 계면
- ⑥ 결함 지시 : 신호의 CRT 화면상에서의 발생 위치를 볼 때 P1 Prepreg A 와 P2 Prepreg B 사이에서 결함 지시가 발생하는 것으로 추정

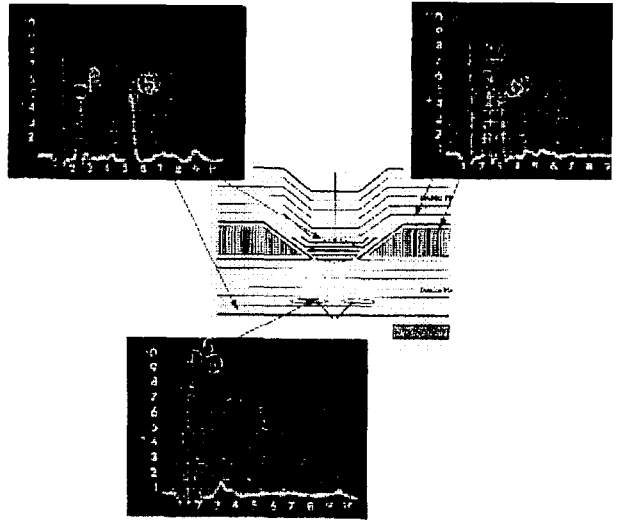


그림6 건전부 및 결함부의 신호

#### 4.3 새로운 검사 기준의 검증

##### 4.3.1 초음파 검사를 통한 검증

새로 적용한 검사 기준이 적합한지 또는 필요 이상으로 너무 가혹(tight)한지를 검증하기 위해 검사한 복합재부품을 절단하고 새 검사 기준이 결함을 판정함에 있어 유효한지 검증하기 위하여 그 절단부를 다시 squitter type TT C-scan 및 contact type Pulse Echo A-scan 검사하여 그림 7의 결과를 얻었다 그림7 (A)에서 볼 수 있듯이 육안으로도 보이고 pulse echo A-scan 으로도 완벽하게 결함으로 판정될 수 있는 결함이 투과법 C-scan 으로는 결함을 검출해 낼 수 있는 부분이 극히 일부분에 불과함을 알 수 있다. (B)는 사진상으로는 결함품의 상황을 정확하게 관찰하기 힘들으나 실제로는 층간박리 현상이 굉장히 심하게 발생한 상태로 어느 방법으로 하던지 결함은 거의 100% 검출되고 있음을 보여주고 있다

##### 4.3.2 파괴 및 방사선투과검사를 통한 검증

결함의 종류와 발생원인을 밝혀내고 보다 정확한 검사 기준을 확립하기 위하여 위의 검사 부위를 더 작게 절단하여 이의 단면을 방사선촬영하여 정밀조사한 결과 Pulse Echo A-Scan 에 의해 검출된 결함은 그림8 ~ 그림12 에서 볼 수 있듯이 거의 대부분이 2<sup>nd</sup> 와 3<sup>rd</sup> layer 사이에서 porosity 들이 집중적으로 발생하였음을 밝혀냈고 이 결함의 명칭을 String of Porosity 로 하였다. 하지만 이들 결함이 왜 특정 layer 사이에서 집중적으로 발생하는 지에 대해서는 원인을 규명하지 못하였으므로 향후 연구과제로 삼기로 하였다

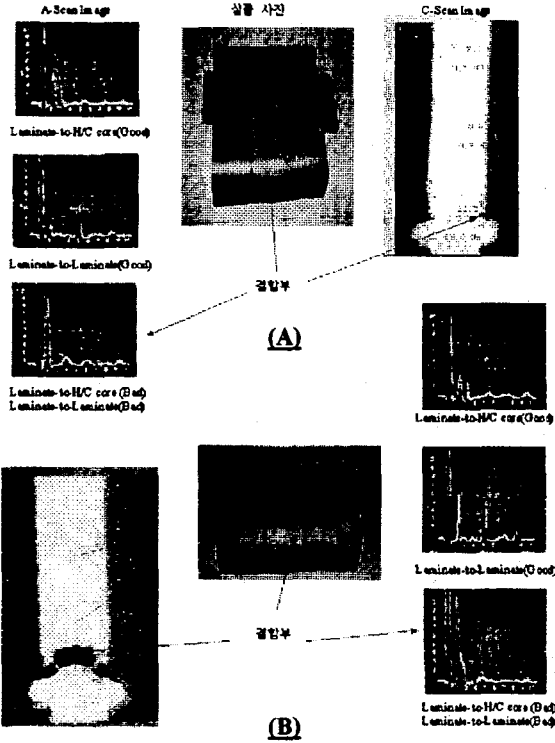


그림 7 건전부 및 결합부의 A-Scan 및 C-Scan

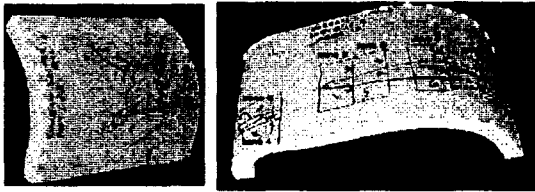


그림 8 절단전의 Part 및 Zone 구분

그림 8 ~ 그림 12 는 각 Zone 의 단면부 중에서 특정 부위를 확대하여 나타낸 것이다. 확대한 그림에서 전반적으로 특정부위(2<sup>nd</sup> 와 3<sup>rd</sup> layer) 결합이 나타나고 있음을 알 수 있다. 개개의 결합은 앞에서 기술한 대로 porosity 이지만 이 porosity 들이 줄을 이루거나 면적을 형성할 때는 delamination 과 동일한 지시를 장비에 나타내게 됨을 쉽게 알 수 있다.

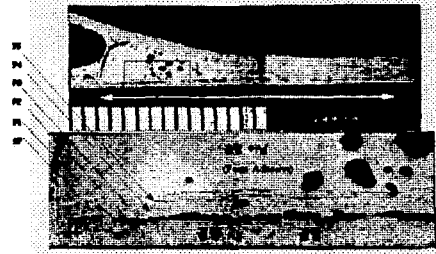


그림 9 Zone 1 의 단면과 결합

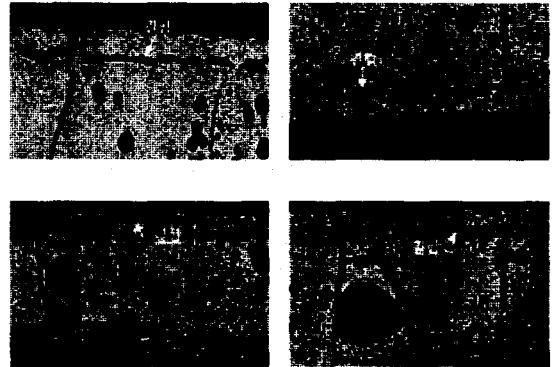


그림 10 좌상에서 시계방향으로 Zone 2~Zone 4

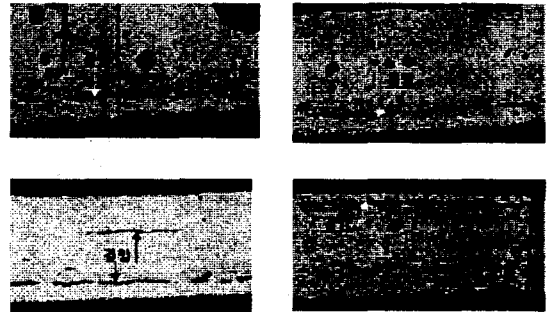


그림 11 좌상에서 시계방향으로 Zone 5~Zone 8



그림 12 Zone 9

#### 4.4 검증을 통한 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

##### 4.4.1 Sandwich 구조 부위

1MHz 주파수로 TTU 를 적용하여 sandwich 구조 부위에 1차 검사를 실시하고

#### 4.4.2 Laminate 부위 및 경계부

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

## 5. 결 론

비강도·비강성이 요구되는 상용기 복합재료와 honeycomb core 를 구조적으로 결합시킨 sandwich structure 의 기체 부품으로의 활용이 날로 증가하고 있는 추세이며, 복합소재품의 신뢰도 평가는 초음파 검사를 이용하는 것이 가장 타당한 검사 방법이지만 설계자가 설정한 검사 기준에 따라서 검사의 방법이 달라지고 검사의 결과도 합격에서 불합격으로 불합격에서 합격으로 달라질 수 있다.

따라서 어떤 복합재료품을 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 복합재료품의 설계시에 반드시 반영되어야 하는 부분이다.

## 참고문헌

- (1) ASM Metals Handbook 9<sup>th</sup> edition Volume 17, Nondestructive Evaluation & Quality Control, P256~P261
- (2) Ultrasonic Testing Standard Drawing WBE\_STD\_4336(대한항공) & C-Scan Image from AUSS(Automated Ultrasonic Scanning System)-V manufactured by Mcdonnell Douglas
- (3) BAC5980 Nondestructive Inspection of composite parts and structures, P8~P10
- (4) Ultrasonic Testing Technical Data Sheet, RWT\_U\_3151(대한항공)
- (5) 진양준/한중원, 항공기용 복합구조재의 초음파 검사, P54~P72