

特輯

항공기용 복합재 구조물의 결함에 대한 비파괴 검사법과 적용사례

진양준, 한중원
(주) 대한항공, 항공우주사업본부

1. 서론

최근 항공기 기본 구조재로서 복합재료의 적용이 급격히 증가되는 있는 추세이며 이는 높은 비강도 및 비강성의 특성과 내식성 등이 장점으로 부각되어 이들에 대한 관심과 활용이 증대되고 있으나 내구성 혹은 제작 시 예상되는 각종 결함들에 대한 평가와 신뢰에 대한 이해의 폭은 넓지 못한 것이 사실이다. 따라서 이 분야에 대한 이해를 돕고자 당사에서 제작중인 부품과 공정을 중심으로 약술하고자 한다. 복합재 부품의 건전성 또는 신뢰성을 평가할 수 있는 비파괴 검사법으로 방사선투과검사와 초음파 검사를 꼽을 수 있으며, 전자는 특정 조건을 요하는 검사 시에 국한되어 사용되며 그 외의 경우에는 후자가 적용되는 것이 일반적이다. 복합재 부품을 초음파 검사한 결과를 평가하고 이를 유용한 자료로 채택하기 위해서는 초음파검사의 기본 이론과 적용 가능한 기법에 대한 이해가 필수적이다. 따라서 우선 초음파검사의 기본원리와 간략한 예로서 설명하고자 한다.

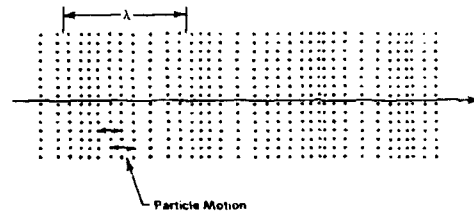
2. 초음파 검사 이론

소리는 공기의 진동으로서 파의 일종이며 귀는 이 진동을 감지하여 높은 소리, 낮은 소리, 큰 소리, 작은 소리 등의 음색으로 느끼게 된다. 음의 높낮이는 1초당 진동횟수 즉 주파수에 의해 결정되는데 높은 소리는 주파수가 큰 음파이다. 귀에 들리는 음파의 주파수(가청음파)는 20~20,000Hz 이고 초음파는 주파수가 20kHz 이상인 음파로서 귀에 들리지 않는 음파이다. 초음파에는 종파, 횡파, 표면파, 판파의 4종류가 있으며, 종파가 가장 기본이 되는 파이며 나머지 파는 종파에서 생성된다. 복합재 부품의 검사에 있어서는 거의 대부분 종파를 사용하고 있다.

2.1 종파(Longitudinal Wave)

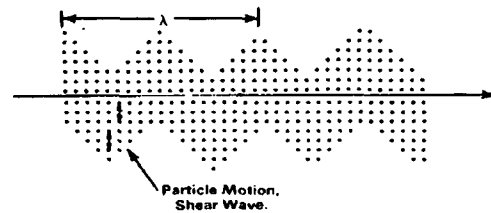
종파는 공기중의 음파처럼 수축된 부분과 신장된 부분

이 상호 반복하여 전달해 가는 파이다. 입자간격의 팽창수축 방향 즉, 입자의 진동방향이 진동의 진행방향과 일치한다. 종파의 속도는 다른 파형들 중 가장 빠르며 고체, 액체, 기체 모든 물질 중에서 진행될 수 있다. 종파는 L파, 소밀파, 세로파, 압축파라고도 한다.



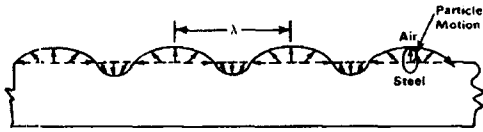
2.2 횡파(Shear Wave)

횡파는 고체에서만 존재하는 파로 입자의 이동방향 즉, 입자의 진동방향이 진동의 진행방향과 직각이 된다. 횡파의 속도는 동일 매질에서 종파속도의 약 1/2이다. 속도가 작으므로 동일 주파수에서 종파의 파장보다 짧게 때문에 작은 결함에 대해 더 민감하게 작용한다. 횡파는 S파, 가로파, 수직파, 전단파라고도 한다.



2.3 표면파(Surface Wave)

표면파는 재료의 표면층을 진행하는 파이다. 표면에서 1파장 깊이의 상당히 얇은 층에 에너지 대부분이 집중하며 입자는 종파와 횡파가 혼합된 형태로 타원형의 진동을 한다. 표면파의 음속은 횡파의 음속의 90% 정도이며 Surface Wave 또는 Rayleigh wave 라고도 한다.



$$C = \lambda \times f$$

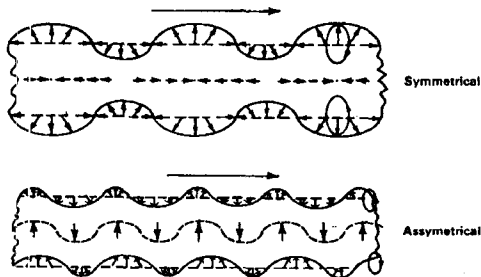
즉, 입자가 매초 f 회 진동한다고 하면 파는 1초에 파장 λ 의 f 배만큼 진행하게 된다. 또 이식을 다음과 같이 변형하면 파장은

2.4 판파(Plate Wave)

판파는 박판을 진행하는 파로서 박판의 라미네이션 결합을 검출할 목적으로 사용한다. 속도는 주파수 및 판 두께에 따라 달라지므로 주의를 요한다. 판파는 두께 중심에 대한 양쪽의 입자운동방향에 따라 대칭형과 비대칭형으로 구분되며 Plate wave 또는 Lam wave라고도 한다.

$$\lambda = C / f$$

으로 표현될 수 있으며 이 식에서 주파수가 일정하면 음속이 빠를수록 파장이 길어지고 음속이 일정하면 주파수가 높을수록 파장은 짧아진다. 주파수는 단위 시간당 진동수(1파장 또는 1진동)를 의미하고 다음과 같이 표현할 수 있다



$$f = C / \lambda$$

즉, 1초에 2×10^6 번의 진동을 한다면 주파수는 2kHz 이고 5×10^6 번의 진동을 한다면 5kHz를 의미한다. 음파가 이동한 시간을 1초라 가정하면 이동거리 C 를 초당 진동수 f 로 나눈 값이 λ 가 된다.

아래 표 1은 대표적인 음속과 주파수가 5kHz 일 때의 파장을 나타낸 것이다.

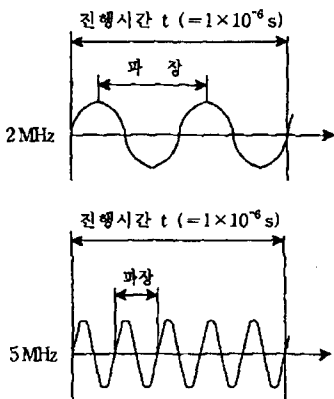
2.5 주파수

파장이라 함은 종파에서는 입자가 조밀한 부분 사이 또는 입자가 희박한 부분간의 간격(거리)을 말하며 횡파에서는 산과 산 또는 골짜기와 골짜기의 간격이다. 즉 파장은 입자가 동일한 상태에 있는 두 지점 사이의 거리라고 말할 수 있다.

표 1 주파수가 5MHz일 때 재료의 파장

Material	Longitude Wave		Share Wave	
	C_L	λ	C_L	λ
Steel	5900	1.20	3230	0.65
Acrylic Resin	2730	0.55	1430	0.29
Glycerin	1900	0.38	None in Liquid or Gas	
Water	1480	0.30		
Hydraulic	1400	0.28		
Air	340	0.07		

* C_L : m/s, λ : mm



파장은 음속과 주파수에 의해 결정되고 초음파의 음속을 C , 파장을 λ , 주파수를 f 라 하면 다음의 관계가 생긴다.

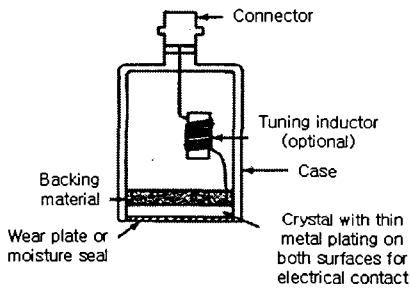
초음파 검사에 사용되는 파장은 가청 음파에 비해 상당히 짧으므로 검사의 정밀도가 높아지고 미세한 결함까지 발견할 수 있게 된다. 일반적으로 측정 가능한 결함의 최대 치수(결함 검출한계 치수)는 파장의 1/2~1/10 정도이다. 특정 part를 초음파 검사하는 경우, part의 재질이 결정됨에 따라 이에 따르는 음속도 결정되므로 주파수의 변화에 따른 파장의 변화가 주요 관심 사항이 되는데 그 이유는 작은 결함 검출을 위한 초음파 검사의 감도는 파장에 영향을 받기 때문이다. 만약 호수에 큰 파장이 호수면을 이동하고 있다고 가정한다면 이 파장의 크기보다 작은 종이배는 이

파장의 진행에 어떤 영향도 주지 못할 것이다. 즉 어떤 반사도 일으키지 못할 것이다. 하지만 이 배가 큰 요트라면 반사가 분명히 발생할 것이다. 이 반사는 요트의 크기(반사체의 크기)에 비례한다는 사실을 기억해야 한다. 특히 이 점은 반사체가 파장의 3배 이상이 될 때 정확하게 적용된다. 반사체의 크기와 파장의 비에 따른 파의 반사형태는 비가 작아질수록 파는 여러 방향으로 산란 된다. 분명한 점은 파장이 짧을수록 더 작은 결함이 검출될 수 있다는 것이다.

3. 초음파의 전달방법

3.1 발생과 수신

초음파를 시험체 속으로 송출 시키는 역할로 탐촉자가 사용된다. 수직 탐촉자를 예로 탐촉자의 구조는 아래와 같다.



진동자는 초음파를 발생하고 수신하는 역할을 갖는 부분으로 전기적 에너지를 기계적 에너지로 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킬 수 있는 성질을 갖는 티탄산 바륨과 수정과 같은 압전 재료(piezoelectric material)가 주로 이용되고 있다.

3.2 초음파의 발생(송신)

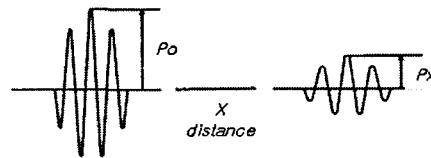
진동자의 양면에 전극을 붙이고 양극간에 고주파전압을 가하면 진동자는 두께방향으로 팽창 수축한다. 이 결과 전기진동이 기계진동으로 변환되며 이 상태에서 진동자에 물이나 기름을 바르고 시험체면에 놓으면 이 진동이 시험체에 전달되어 내부로 진행해 간다. 이 과정을 초음파의 송신이라 하며 전기 진동이 기계 진동으로 또는 기계 진동이 전기 진동으로 변환되는 것을 위에서 설명한 것과 같이 진동자의 압전 효과라 한다.

3.3 초음파의 수신

초음파 펄스가 시험체의 결함이나 저면에서 반사하여 탐촉자로 돌아올 때 탐촉자는 초음파에 의해 진동되고 그 결과 송신의 경우와는 반대로 진동자의 양극간에 초음파 펄스의 강도에 비례한 고주파전압이 생긴다. 즉 기계진동이 전기진동으로 변환하게 된다. 이 과정을 초음파의 수신이라 하고 초음파 탐상기에서는 이 수신신호를 입력시키고 전압을 증폭시킨 후 브라운관으로 출력시킨다.

3.4 초음파의 감쇠

초음파가 재료 내를 진행할 때 그 파면의 퍼짐에 따라 확산감쇠(확산손실)외에 결정립계 등의 산란인자에 의한 산란감쇠에 의해 음파의 손실이 일어난다.

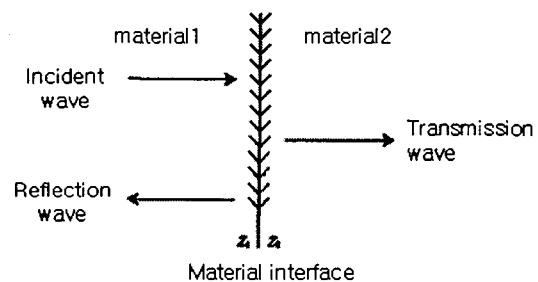


(a) Original sound signal (b) X distance propagated sound signal

3.5 음파의 반사 및 통과와 굴절 및 변환

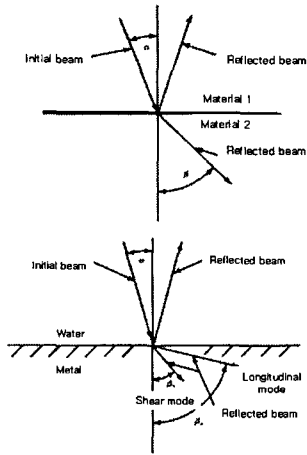
3.5.1 음파의 반사 및 통과

음파가 전파되는 매개물질을 매질이라 하는데 음파가 두 매질간의 경계면(계면)을 지나갈 때 음파의 반사 및 통과가 일어난다. 이때 반사 및 통과되는 정도는 음향임피던스 Z에 영향을 받으며 음향임피던스는 매질의 밀도 ρ와 음속 C의 곱 ρC로 나타낸다.

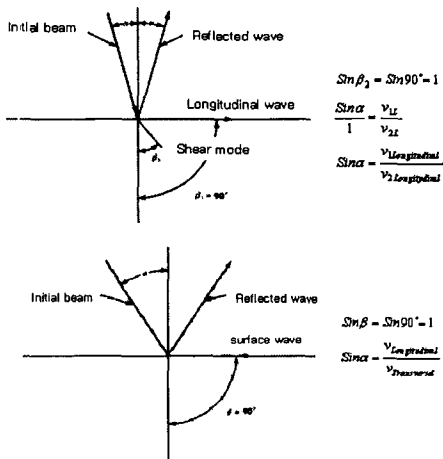


3.5.2 음파의 굴절 및 변환

음파가 두 매질간의 경계면에 비스듬하게 입사되면 일부는 반사되고 나머지는 매질을 통과하면서 음파의 진행 방향이 바뀌게 된다. 즉 통과파는 굴절하게 된다. 이것은 빛이 물에 비스듬히 입사될 때 관찰되는 현상과 유사하다. 통과파의 굴절각은 (1) 두 매질간의 음파 속도와 (2) 입사각에 따라 달라지며 Snell's Law에 의해서 계산될 수 있다.



종파는 매질 내에서 단순히 굴절되는 것이 아니고 입사각에 따라서 부분적으로 또는 완전히 다른 음파로 변환된다. 즉 횡파, 표면파, 판파로 파형 변환을 일으킨다. 어떤 경우든지 간에 이들 변환된 파들은 속도가 다르므로 굴절각 또한 다르다. 따라서 한 매질 내에 두개의 서로 다른 파형을 동시에 존재할 수가 있다 매질 내에서 특정 파형으로의 파형 변환을 위한 굴절각을 결정하기 위해서는 Snell's Law에서 파형의 속도를 선택해야 한다. 만약 매질 내에 속도와 굴절각이 다른 두개의 음파가 존재한다면 어느 음파가 결함으로부터 반사되어 왔는지 알아낼 수가 없으므로 결함 검출을 하기란 거의 불가능하다. 따라서 검사 전에 매질 내에 1개의 음파만 존재하도록 하도록 조치를 취해야 하며 이것은 종파의 전반사가 일어나는 입사각을 찾아내면 이루어 진다. 이때의 입사각을 제1임계각이라 한다.



입사각을 점점 증가시켜서 종파에서 발생된 횡파의 굴

절각이 90°가 되면 매질 내에서 횡파는 사라지고 표면파가 존재하게 되는데 이때의 입사각을 제2임계각이라고 한다.

4. 초음파 검사의 실제

여러 가지 비파괴 검사 방법 중 복합재 부품 내에 흔히 존재하는 결함, 즉 공기층을 형성하는 딜레미네이션(Delamination), 디스본드(Disbond), 디본드(Debond) 등은 초음파 검사를 통하여 검출하기가 용이하다. 그 이유는 초음파가 매질 내를 진행할 때, 초음파의 진행 방향 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 비교시험이며 특히 초음파 검사는 검사하고자 하는 제품의 형상과 일치하는 시편을 제작하여 장비를 표준화 하고 검사 중에 장비의 정상작동 유무를 확인해야 한다. 초음파 검사는 장비본체, 탐촉자(Transducer)와 Couplant(초음파를 탐촉자에서 검사체로 연결시켜 줄 수 있는 것. 주로 물을 사용)로 구성된다. 복합재 부품의 초음파 검사의 진행과 그 결과를 이해하기 위해 검사 형태(Type), 방법(Method) 및 관측(Viewing) 방법을 알아본다

4.1 검사 형태(Inspection type)

아래 그림 1에 검사 형태를 나타내었다. Contact type(a)은 탐촉자(transducer)를 물을 couplant로 하여 검사표면에 직접 접촉하여 초음파를 검사하고자 하는 제품에 주사한다. Immersion type(b)은 탐촉자를 물속에 넣어 초음파가 주사 되도록 하며, Squitter type(c)은 검사표면에 초음파를 물기둥을 이용하여 주사하는 형태인데 immersion type의 변형이라 볼 수 있다.

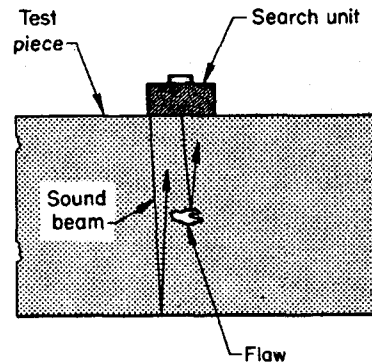


그림 1 (a) Contact Type.

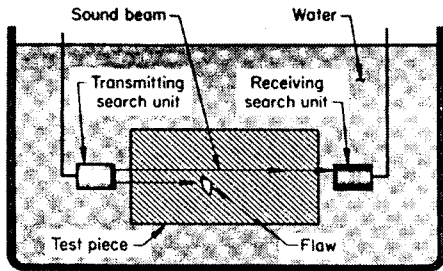


그림 1 (b) Immersion Type.

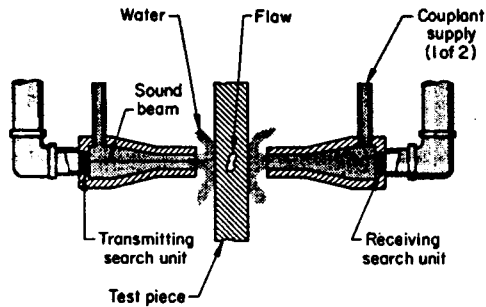
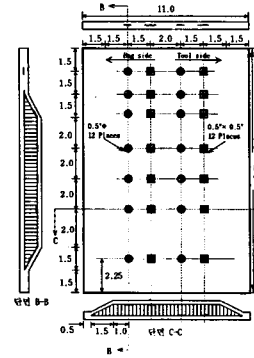


그림 1 (c) Squirter Type.



검사한 결과를 검사자가 보는 방식의 형태로는 A-Scan presentation 과 C-Scan presentation 두가지가 있다. A-Scan presentation은 시간(검사체의 두께)과 음파의 세기가 CRT (Cathod ray tube)상에 지시되며, 결함의 깊이와 대략적인 크기를 알 수 있다. C-Scan presentation은 검사체를 평면으로 투영하며 결함의 윤곽을 화면(monitor)에 지시하며 결함의 크기를 알 수 있다. 표 3에 관측방법을 나타내었다.

4.4 표준 시편제작

표준시편은 제품의 형상과 동일하게 제작되어야 하며 결함 발생이 예상되는 곳에 결함을 인위적으로 만들어 넣는다. 아래 그림 2는 하니컴 코어를 이용한 복합재품을 검사하기 위한 시편이고 합부 판정 기준은 직경이 0.5" 일 때 사용할 수 있다. Tool side 및 bag side에 각각 직경이 0.5"인 구형의 결함을 직선으로 하니컴코어와 라미네이트 사이에 심었고 기타 결함형상을 나타내기 위하여 0.5"×0.5" 사각형 결함을 동일 위치에 놓고 시편을 제작하였다.

4.2. 검사 방법(Method)

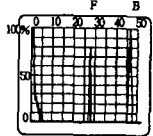
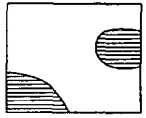
기본적인 초음파 검사기법으로 펄스반사법(puls echo)과 투과법(through-transmission)이 있으며 표 2에 두 방법에 대한 특징을 나타내었다.

4.3 관측(Viewing) 방법

표 2 펄스반사법과 투과법의 특징비교

	Through-Transmission	Pulse-Echo
사용례		
탐촉자	2개	1개
결함검출	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.

표 3 A-Scan & C-Scan

A-Scan	C-Scan
<ul style="list-style-type: none"> ■ 시간(검사체의 두께)과 음파의 세기가 CRT(Cathod Ray Tube)상에 지시된다. ■ 결함의 깊이와 대략적 크리를 알 수 있다. 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 검사체를 평면으로 투영하므로 결함의 윤곽이 화면(monitor)에 지시된다. ■ 결함의 크기를 알 수 있다. 

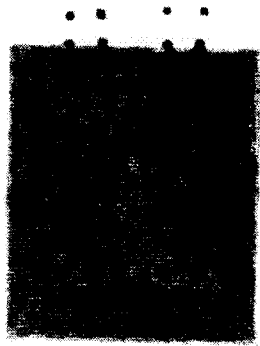


그림 2 시편 도면 및 C-Scan Image.

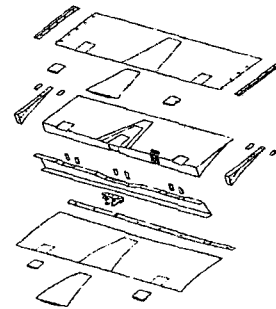


그림 3 MD-11 Composite Spoiler.

5. 복합재 부품 검사에 초음파 검사 적용

앞에서 간략하게나마 초음파 검사와 관련되는 문제를 고찰하기 위한 초음파 이론과 실제를 살펴보았고 이제부터는 실제 제작되었고 지금도 제작 중에 있는 항공부품의 예를 들어 검사 시에 발생하는 문제와 신호의 해석에 대해 살펴보고자 한다. 단, 비교적 해석이 간편한 종파를 이용한 pulse echo 및 through transmission 방법에 대해 기술하고자 한다.

5.1 MD-11 Spoiler

1개의 spoiler를 자세히 살펴보면 upper 및 lower laminate skin, Honeycomb core, spar, rib 등으로 구성된다. 각각의 skin, spar, rib 등은 lay-up 및 cure 후 단품 단계에서 100% 검사를 한 후 서로 결합하여 복합구조물을 만든 다음 최종 초음파 검사를 하였다. Upper skin의 C-scan 결과는 porosity와 delamination이 존재하고 있음을 보여주고 있다.

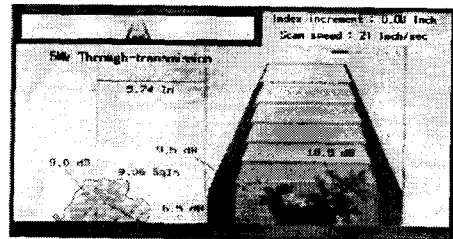


그림 4 C-scan image of MD-11 Spoiler Upper Skin: Rejected by Porosity & Delamination.

그림 4에서 나타난 dB 값은 송신 탐촉자에서 주사된 음파와 수신 탐촉자에 의해 수신된 음파와의 차이를 표시한 것으로서 결함이 없는 정상 상태는 6.5dB 정도의 차이가 나지만 porosity나 delamination이 있는 부위에서는 각각 9.0dB, 32dB 까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. dB 차이가 클수록 결함의 정도가 크며 화면상에서 검게 나타난다. 그림 5는 그림 4의 part를 적합한 절차에 따라 수리 작업한 후의 C-scan image이다. Doubler 부위의 delamination은 잘 수리되었으나 doubler 주위에서는 수리작업으로 인한 delamination이 추가로 발생한 상태를 보여주고 있다.

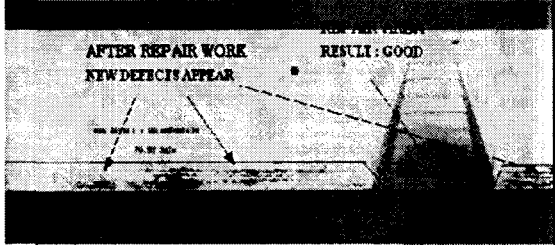


그림 5 C-scan image of MD-11 Spoiler Upper Skin: Rejected by Rework Delamination.

5.2 B737 Flap Support Fairing

5.2.1 검사 기준과 선택

어떤 복합재 부품을 검사하기 위한 검사 형태, 방법 및 관측방식의 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. 이 장에서는 검사 기준 또는 제작 요구사항의 변동에 따른 검사 방법 등의 변경이 어떤 과정을 걸쳐 일어나는지 살펴보고자 한다.

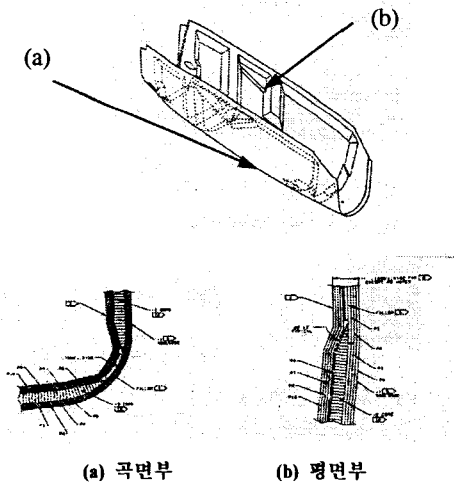
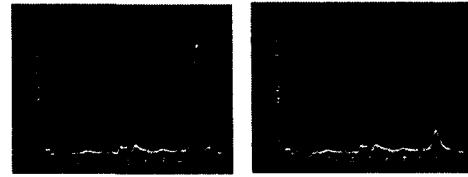


그림 6 제품 형상: B737 FSF(Flap Support Fairing).

5.2.2 검사기준

투과법으로 1MHz를 사용할 때, 시편의 건전부 대비 결함부에서의 dB차이가 18dB이상 되는 지시에 한하여 결함으로 판정한다. 따라서 건전부에서의 투과 신호를 CRT 화면상의 높이(amplitude) 80% 정도에 맞추어 장비를 표준화한 후 결함부에서 투과 신호가 18dB 차이 나는 높이인 1에 기준을 설정하여 결함을 검출하게 된다. 그림 7에서는 이해를 돕기 위해 결함부의 신호를 과장되게 나타내었다.



(a) 건전부 (b) 결합부

그림 7 건전부와 결합부의 신호비교(A-Scan).

5.2.3 검사 방법

검사 형태는 Squirter Type, 방법은 투과법(TTU)을 이용하였으며 관측방식(Viewing)은 A-Scan을 사용하였다. 그림 8은 Yoke Scanner 를 이용한 투과법(TTU) 검사 방법을 나타낸 것으로 Squirter type의 일종이며 수동으로 조작된다.

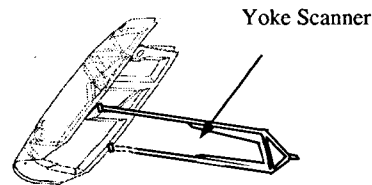


그림 8 Hand Held Yoke Scanner 를 이용한 part 의 TTU 검사.

5.2.4 검사 결과

검사 기준을 적용하여 검사 결과(또는 신호)를 판독할 경우에는 결함으로 판정 내릴 정도의 신호를 검출할 수 없어 거의 모든 제품이 합격처리 된다. 하지만 완제품을 만들기 위하여 금속 구조재를 검사가 끝난 복합재 부품에 리벳팅(riveting)하여 장착하게 되는데 이때 리벳 작업으로 인한 진동으로 특정 부위에 ply간 박리현상(delamination)현상이 발생하게 된다. 최종 조립 전 단품 단계에서 해결해야 하는 문제들, 즉 (1) 복합제품의 lay-up 및 curing 공정상의 완전하지 못한 setup 또는 (2) 원자재의 불량 가능성 (3) lay-up 작업의 미 숙련도 등에 의한 결함들이 완제품 단계에서 발췌됨으로 인해 이를 수정하는데 더 많은 시간과 비용이 소모되어 공정의 효율성을 떨어뜨리는 요인으로 작용하게 된다. 따라서 위에서 언급된 검사기준은 아래 그림과 같은 형상의 복합재 부품의 검사에는 부적절하며 새 검사 기준을 설정해야 유효한 검사를 할 수 있음을 알 수 있다.

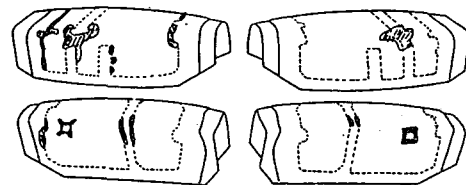


그림 9 결함다발 부위.

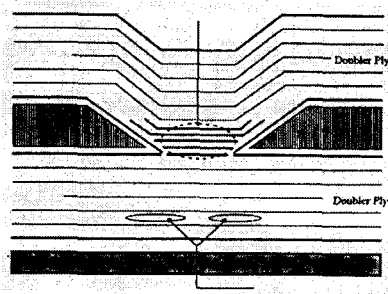


그림 10 제품의 단면도와 Delamination 결합.

5.2.5 새로운 검사 기준의 적용

1차적으로 복합재 구조물을 Squirter Type, Through-Transmission, A-scan 방식으로 전면 검사를 실시한다. 2차적으로 결합 다발부위와 전면 검사시의 의심부위를 Contact Type, Pulse-Echo, A-scan 방식으로 검사한다.

검사 기준인 18dB 이상의 차이는 송신부를 떠난 음파의 에너지가 제품을 지나 수신부에 도달했을 때 최초 음파 에너지의 12.5%이하가 됨을 의미하고 1MHz의 사용은 음파의 감쇄가 심한 샌드위치 구조물에는 적당하나, 상대적으로 음파의 감쇄가 덜한 라미네이트 부위와 라미네이트와 코아 경계면에서는 음파 에너지가 너무 강하여 설정된 검사 기준으로는 탐지할 수 없는 작은(충간 박리의 정도가 덜한) 결합이 있다는 가정 하에 사용주파수를 5MHz로 선정하여 pulse-echo A-Scan 하기로 결정했다.

Pulse-Echo 법은 반사되어 되돌아 오는 음파의 신호를 분석하여 결함을 검출하는 방법이며, 음파가 반사되는 곳은 그림에서 보듯이 이중 매질간의 계면이나 제품과 공기간의 계면이다. 일반적으로 라미네이트와 하니컴 코아 계면에서 반사파의 신호를 검출하기란 어려우나 건전부와 결합부에 대한 Pulse-Echo 법 적용과 이해를 돕기 위해 순간적으로 지시되는 신호를 검출하여 표시한 것이며, 그림 11에 표시된 신호 ①~⑥을 해석해 보면 다음과 같다.

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

5.2.6 파괴 시험을 통한 새검사 기준의 유효성 검증

5.2.6.1 A-Scan 및 C-Scan 결과 비교

새로 적용한 검사 기준이 적합한지 또는 필요 이상으로 너무 가혹(tight)한지를 검증하기 위해 검사한 복합재 부품을 절단하고 그 절단부를 다시 squirter type TT C-scan 및 contact type Pulse Echo A-scan 검사하여 그림 12와 같은 결과를 얻었다.

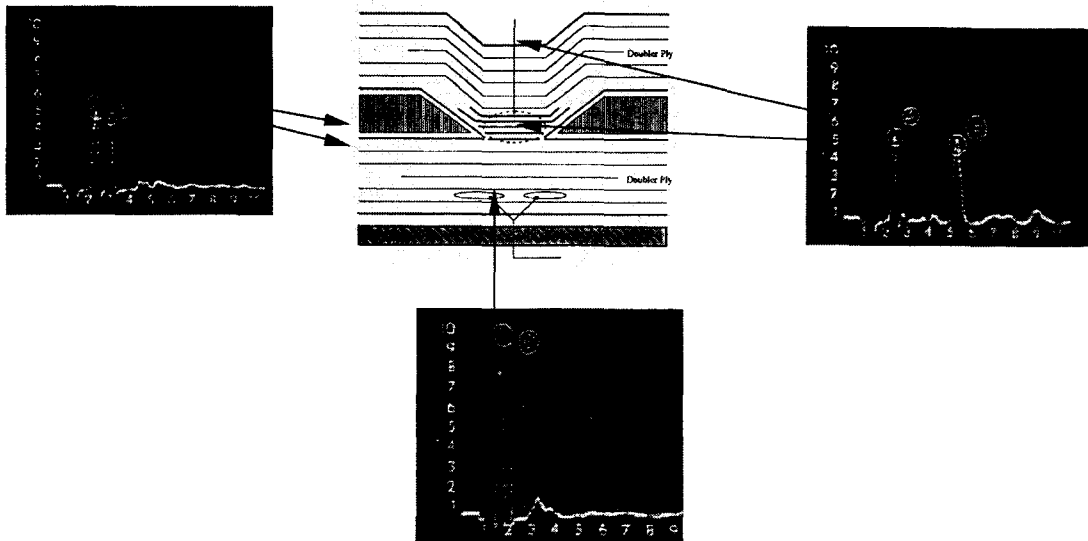


그림 11 part의 단면에 나타난 건전부 및 결합부의 신호.

그림 12에서 볼 수 있듯이 라미네이트 및 라미네이트와 하니컴 코어 경계면에 명백한 결함이 있음에도 불구하고 TT로 검사했을 때는 C-Scan image에 결함으로 지시되는 곳은 일부 이나 Pulse Echo로 검사했을 때는 명백히 결함으로 나타나고 있어 기존의 검사기준은 하니컴 코어 샌드위치와 같은 복합구조품에는 적합하지 않으므로 새 검사기준의 적용이 적절한 것으로 판명되었다.

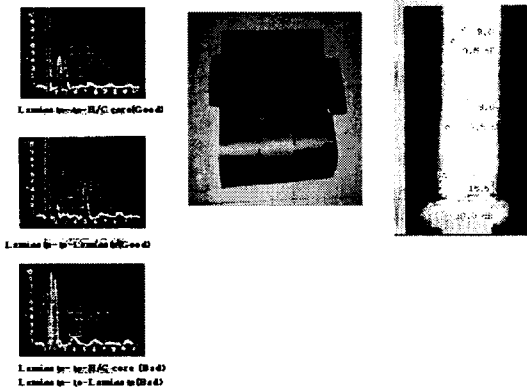


그림 12 건전부 및 결함부의 A-/C-Scan 결과.

5.2.6.2 결함 종류 확인

결함의 종류와 발생원인을 밝혀내고 보다 정확한 검사 기준을 확립하기 위하여 위의 검사 부위를 더 작게 절단하여 이의 단면을 방사선 촬영하여 정밀 조사한 결과 Pulse Echo A-Scan에 의해 검출된 결함은 다음 그림 14에서 볼 수 있듯이 거의 대부분이 2nd 와 3rd layer사이에서 porosity들이 집중적으로 발생하였음을 밝혀냈고 이 결함의 명칭을 String of Porosity로 하였다. 하지만 이들 결함이 왜 특정 layer사이에서 집중적으로 발생하는 지에 대해서는 원인을 규명하지 못하였으므로 향후 연구과제로 삼기로 하였다

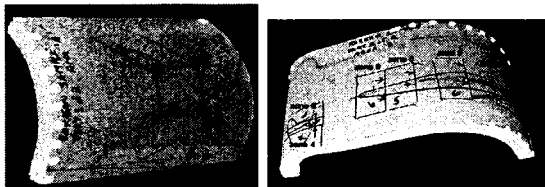


그림 13 절단면의 Part 및 Zone 구분.

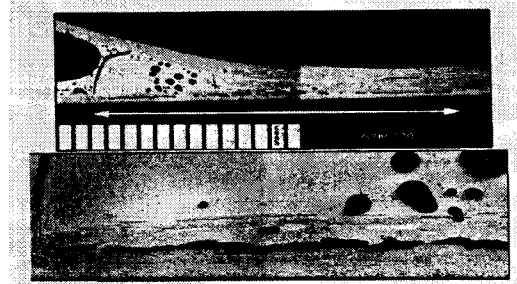


그림 14 Zone 1의 단면과 결합.

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.

5.2.6.3 검사 기준의 최종 선정

새로운 검사 기준으로 기존의 검사 기준으로는 발취하지 못하였던 결함을 검출하였고 또 이 결함의 존재와 형태를 파괴시험을 통하여 확인하였으므로 아래와 같이 검사 기준을 최종 확정하였다. Sandwich 구조 부위는 1MHz 주파수로 TT를 적용하여 sandwich 구조 부위에 1차 검사를 실시하고 Laminate 부위 및 경계부는 5MHz 주파수로 Pulse-Echo 를 적용하여 1차 검사시에 발견된 지시의 검증 및 laminate 부위 검사를 실시하여 검사를 종료한다.

6. 결론

복합재 부품의 건전성 또는 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 복합재 부품을 제작하여 그 신뢰성을 평가 또는 검사하고자 할 때는 그 제품의 구조적 또는 제작상의 취약점을 발취하여 검사 부분으로 지적하는 것도 중요하지만 초음파 검사 원리와 적용상의 특성을 잘 이해하여 기 발취된 취약 부분에서 결함을 검출할 수 있는 최적의 검사 기준을 설정하는 것 또한 중요한 요소 중의 하나이므로 복합소재품의 설계 시에 반드시 반영되어야 하는 부분이다.