

파괴시험을 통한 복합재 구조물의 건전성 입증

양현덕*, 정덕영**, 이경철***, 진영권****

Destructive Test to Ensure Integrity of Composite Structure

Hyun-Deok Yang*, Duck-Young Jeong**, Kyung-Cheol Lee***, Young-Kwon Jin****

Abstract

The quality control of composite structure includes inspection, testing and monitoring in all processes from receiving inspection to part fabrication. The purpose of these activities is to ensure that the design objectives are consistently achieved. The quality factors include material, receiving inspection, storage and shelf-life control, environmental control, testing, inspection and record control. This paper presents the process verification method using destructive test and quality control method in composite structure of aircraft. And it is believed that the destructive test will be basis to obtain a reliability of non-destructive test in complex composite structure and to ensure the design requirements in composite part.

초 록

항공기용 복합재 구조물의 제작에 대한 품질관리는 자재의 입고에서부터 제품의 제작과정에 이르는 모든 단계에서의 검사, 시험 및 모니터링을 포함한다. 이러한 품질관리 활동은 설계의 목적에 적합하게 이루어졌는지 확인하기 위한 것이다. 품질에 영향을 미치는 인자들은 자재, 입고검사, 보관 및 시효관리, 작업환경의 관리, 시험, 검사 및 기록의 관리 등이 있다. 본 연구에서는 항공기 복합재 구조물에서 파괴시험을 통한 공정의 적합성 입증방법과 품질관리방법을 고찰하였으며 이를 바탕으로 복잡한 복합재 구조물에 대한 비파괴검사방법의 신뢰성을 확보하고 복합재의 설계요구조건을 확인할 수 있는 기법을 제시하였다.

키워드 : 복합재(composite), 파괴시험(destructive test), 비파괴검사의 신뢰성(reliability of NDI), 비파괴검사(non-destructive inspection), 품질관리(quality control)

1. 서 론

복합재는 두 가지 또는 그 이상의 재료로 이루어진 혼합체를 의미하며 대부분의 복합재료는 우수한 특성을 얻기 위하여 충전재 또는 강화재

* 제품보증팀/hdyang@kari.re.kr

*** 제품보증팀/kclee@kari.re.kr

** 제품보증팀/dyjeong@kari.re.kr

**** 제품보증팀/ykj@kari.re.kr

와 적절한 기지(matrix)로 구성된다. 즉, 단일재료보다 뛰어난 특성과 유용성을 갖도록 제작된 것이다. 이러한 복합재료는 비탄성율과 비강도가 보통 금속재료에 비해 현격하게 높은 특성을 갖고 있다. 기지는 크게 고분자계, 세라믹계, 금속계로 구분할 수 있고 강화재에 따라 분산강화, 입자강화, 섬유강화로 분류할 수 있다. 공업용으로 제작되는 복합재는 인공적으로 제조되고 계면을 가지고 있으며 물리적 화학적으로 뚜렷하게 또는 적당하게 배열되어 있거나 분포되어진 상들로 구성되며 분리된 상태에서 각 구성 원소들에 의해 묘사될 수 없는 특징을 가지고 있다.

복합재의 가장 큰 장점은 무게에 비해 강도가 높다는 것이다. 항공기 설계에 있어 중요하게 고려하는 인자 중의 하나가 무게이다. 무게를 줄일 수 있다면 그만큼의 화물, 연료 등을 운반하거나 또는 승객들을 탑승시킬 수 있기 때문이다. 복합재료를 이용하여 무게를 감소시키면서 금속재만큼의 강도를 가지게 할 수도 있다. 항공기에 주로 사용되는 알루미늄 소재를 복합재로 대체할 경우에는 약 20% 정도의 무게를 감소시키는 효과를 얻을 수 있으며 이러한 무게의 감소효과 이외에도 금속재 시트를 이용하여 제작이 어려운 공기역학적인 외형을 용이하게 제작할 수 있다. 또한 복합재를 사용함으로써 부품이나 패스너의 사용을 줄일 수 있어 제조를 용이하게 할 수 있고 제작비용을 낮출 수 있다. 어떤 경우에는 대형 구조물을 리벳이나 조립공정 없이 하나의 부품으로 일체화가 가능하다. 복합재료와 제조기술이 성숙됨에 따라 복합재는 점차적으로 비용효과가 높아지고 있다. 복합재는 유연성 있게 제작할 수 있어 진동에 대한 저항을 가질 수 있으며 이로 인해 피로에 대한 저항특성을 가지고 치수에 대한 안정성을 갖는다. 또한 복합재는 금속과 같은 부식되지 않는 특성과 마모에 강한 장점을 가지고 있다. 이와는 반대로 복합재는 충격에 대해 민감하며 온도와 습도에 대한 제한적인 환경안정성을 가지며 수리작업에 대한 불확실성 등의 단점을 가지고 있다.

이러한 복합재를 이용하여 구조물을 제작하는 과정은 일반 금속재료를 이용한 제작공정보다 복

잡하고 관리해야 할 변수들이 많다. 복합재의 품질관리에 있어서의 주안점은 고객에게 불량품이 납품되는 것을 방지하기 위한 최종검사보다는 공정과정에서 결함이나 부적합 사항이 발생하지 않도록 하는데 있으며 이러한 예방차원의 접근이 필요한 이유는 여러 개의 제조공정이 지속적으로 이루어져 이에 따라 지속적인 모니터링이 필요하며 부적합품의 수리가 어렵거나 불가능하고 이로 인하여 고가의 제품을 폐기하는 것을 방지하기 위해서다. 제조기술이 발전함에 따라 점점 더 많은 작업들이 자동화되고 있으며 이로 인하여 품질보증에 있어서도 새로운 기법을 필요로 하고 있다. 일반적으로 자동화된 공정에서 변수들이 올바르게 관리되면 일정한 수준의 결과를 얻을 수 있게 된다. 따라서 품질보증도 이러한 변수들이 올바르게 관리되고 있는지에 중점을 두게 된다. 다른 한편으로 자동화되지 않은 공정들은 작업자의 기술이나 경험에 영향을 받게 되며 이때의 품질관리는 공정 전후에서 공정이 올바르게 수행되었는지 확인하는데 중점을 두게 된다. 제작공정이 자동화되었더라도 실제적으로 대부분의 경우에는 공정이 올바르게 수행되었는지와 결과로 나온 제품이 만족스러운가를 동시에 확인하게 된다.

설계 요구조건을 만족하기 위해서는 모든 제작과정 즉, 공급원, 원자재에 대한 검사, 자재의 보관 및 시효기간 관리, 작업환경의 관리, 제조관리, 시험, 제품의 검사, 기록 등 전반에 대한 관리가 수행되어야 한다. 여기서는 항공기에 적용하는 복합재 구조물에 대한 개략적 품질보증 방법과 파괴시험을 통해 비파괴검사의 신뢰성을 확보하는 기법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 복합재 구조물의 품질보증

복합재료는 항공기 제작에 점점 더 많이 사용되고 있다. 주요 복합재 형태에는 탄소섬유강화프라스틱(CFRP), 유리섬유강화프라스틱(GFRP)과 금속라미네이트가 있다. 항공기의 조종면(control

surface)이나 이차구조물에 국한되어 사용되던 것이 현재는 주요 항공기의 주요 구조물까지 복합재로 대체되고 있다. A380과 같은 항공기의 복합재 중량비는 25% 정도 차지하고 Boeing 787은 50% 정도를 차지하며 이러한 비율은 점점 더 증가될 것이다.

항공기 구조용 재료는 설계 요구조건과 합치하여야 하는데 이것은 여러 가지 응력이나 환경의 효과를 고려하여 적합성과 안전성이 확인되어야 한다는 것을 의미한다. 구조설계의 기능적인 요구조건을 만족하여야 하는 특성으로서는 높은 비강도, 사용온도, 환경에 대한 저항성 및 내구성이 있다.

항공산업 분야에서는 일반적으로 사용되는 원자재인 레진, 접착제, 프리프레그의 제작자와 기타 복합재 공급원들에 대해서는 승인을 통해 관리하며 이러한 공급원들은 구매요구서에 명시된 규격의 기술적 요구조건 및 품질보증 요구조건을 만족시켜야 한다. 그리고 이러한 공급원으로부터 제공된 자재는 제작자, 배치/로트 또는 일련번호 등에 대한 추적성이 확보되어야 한다. 복합재료의 제작사는 각 로트 또는 배치에 대한 시험을 실시해야 하고 시험 항목은 중요한 자재특성들을 평가할 수 있도록 선정해야 한다. 자재 규격에서의 요구조건은 사용자에 따라 변할 수 있으나 이러한 시험들은 기술적 요구조건을 충족할 수 있어야 하며 이러한 시험결과를 자재와 함께 공급해야 한다.

공급원에서 납품된 자재는 입고검사 단계에서 로트단위 또는 샘플을 선정하여 시험이 수행된다. 입고검사는 제공된 자재의 품질을 확인하는 것 뿐만 아니라 자재 성질의 추이를 확인해야 한다. 또한 자재의 손상이나 수분의 유입 등을 포함한 포장상태나 자재의 추적성 등에 대해서도 확인이 필요하다. 추적성은 자재의 식별표시와 성적서 또는 제품보증서 등과 비교하여 확인할 수 있으며 입고검사 단계에서의 시험은 공급원의 신뢰성이나 사용되는 자재의 중요성에 따라 달리 할 수도 있다. 이러한 시험에는 육안검사, 경화전후 자재에 대한 물리·화학적 시험이 포함될 수 있다. 일부 자재의 경우는 상온에서 노출할

수 있는 시간이 정해져 있으므로 시편 채취로 인한 시간이 허용한도를 초과하지 않도록 하며 나머지 자재는 해당 보관조건에 맞도록 보관해야 한다.

원자재에 대한 시험은 자재규격이나 공정규격에 따라 다르나 일반적으로 사용되는 대표적인 원자재 종류별 주요 시험 항목은 표 1과 같다.

표 1. 원자재 종류별 주요시험 항목

원자재 종류	주요 시험항목
프리프레그	레진함량
	휘발성분 함량
	인장강도
	압축강도
	굽힘강도
	유리 천이온도
	겔 시간
	레진 흐름
	수분함량
	접착성(Tack)
라이네이트	섬유중량
	밀도
	섬유체적
	레진부피
	기공함량
	플라이 두께
	±45°인장
90°/0° 인장/압축강도 & 강성	
접착제	전단시험
	박리시험(Peel Test)
	굽힘시험
실런트류	인장시험
	레진 흐름
	겔 시간(Gel Time)
	인화점

요구조건을 만족한 자재와 치공구를 이용하여 온·습도조건, 양압 및 청정도 조건이 만족되는 환경에서 작업을 수행하게 된다. 공정 중 확인을 통해 제작된 제품은 외관검사, 치수검사, 제품의 요구조건에 대한 물리시험, 그리고 결함이나 손상에 대한 비파괴검사와 표면처리 등을 통해 사용된다. 복합재에 널리 사용되는 비파괴검사 방법으로는 육안검사, 초음파 및 방사선투과검사가

있으며 이외에 적외선, 음향방출, 레이저를 이용한 비파괴검사법 등 다양한 검사방법이 적용된다. 복합재는 금속재와는 다른 성질을 갖기 때문에 비파괴검사방법도 다른 특성을 갖게 된다. 섬유강화 복합재는 특히 이방성으로 인해 낮은 열전도 특성을 가지며 음향에 대한 높은 감쇄현상과 낮은 전기전도도를 나타낸다. 비파괴검사는 제품에 손상을 주지 않고 검사할 수 있는 중요한 기술로 복합재에서 결함별 검출할 수 있는 비파괴검사 방법은 표 2와 같다.

표 2. 복합재 결함유형 별 비파괴검사법

검사법	X-Ray	Ultrasonic	Computer Tomography	Alcohol Wipe	Thermography	Eddy Current
Delaminations	○	○	○	○	○	
Density Variations	○		○			
Resin Rich/Resin Poor	○		○			
Voids	○	○	○			
Crazing		○		○		
Wrinkles		○				○
Conductive Materials						○

2.2 파괴시험의 적용

파괴시험은 복합재의 품질보증 및 설계조건을 확인하기 위한 공정 중 시험과 최종제품에 대한 절개시험을 포함하는 것으로 제품에 대한 건전성을 비파괴검사 방법만으로 보증할 수 없는 경우에 일반적으로 사용된다. 이 시험은 내부의 복잡한 구조를 조사하기 위한 제품의 절개와 제품의 제작공정과 동일한 조건에서 작업된 시편 또는 제품의 잉여 부위를 절단하여 얻은 시편에 대한 물성시험을 포함하며 그림 1과 같이 일반적으로 적용한다.

파괴시험은 설계, 치공구 및 제작공정의 적합성, 비파괴검사의 신뢰성을 검증하기 위해 초도품에 대해 실시하며 공정이 변경되거나 치공구가 수정된 경우에도 실시한다. 또한 주기적으로 일

정한 계획에 따라 제작된 부품에 대해 실시하며 비파괴 검사의 신뢰성을 보증하기 위해서 공정중에 비파괴 검사가 있는 경우에는 파괴시험 전에 비파괴검사를 실시하고 그 결과를 파괴시험을 통해 검증하여야 한다. 항공기 제작과정 중 초도품에 대한 검사 시에는 모든 설계특성들이 검증되어야 하며 설계특성을 최종제품에서 확인할 수 없는 경우는 제조공정중이나 파괴시험을 통해 검증을 해야 한다.

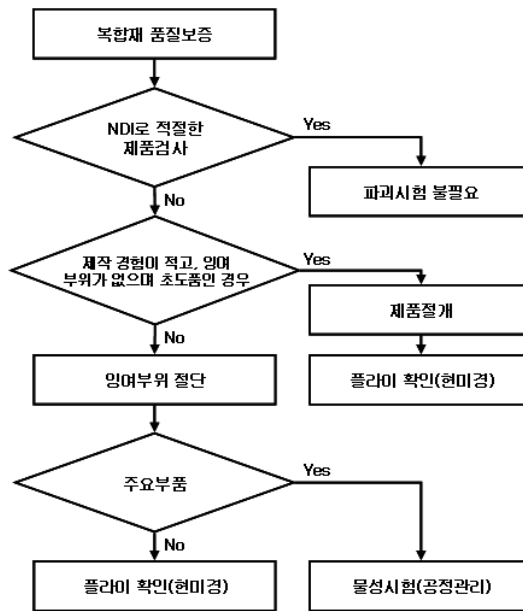


그림 1. 파괴시험의 적용성 판단

파괴시험은 크게 제품을 절개하는 방법과 공정 중 시편을 제작 또는 제품의 잉여부위를 이용하여 시험하는 방법으로 나눌 수 있다. 제품 전체를 절개하는 방법은 신규 치공구를 이용하여 제작된 초도품에 대해 적용하며 제품전체를 확인할 수 있는 장점이 있으나 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서 별도의 공정용 시편을 제작하거나 잉여부위를 이용한 시험방법이 보다 비용적인 측면에서 바람직한 방법이다. 공정 중 제작된 시편을 이용하거나 잉여부위를 이용한 시험방법은 제품을 사용할 수 있으며 제품의 상태를 간접

적으로 확인할 수 있다.

제품 전체를 절개하는 방법은 일반적으로 도면이나 관련 규격서에 파괴시험이 명시된 경우에 적용한다. 이 방법은 제품을 사용할 수 없게 하므로 다음과 같은 기준에 적합할 때 적용하게 된다. 첫째 제품의 형상이 복잡하여 비파괴검사 방법으로 정확하게 검사할 수 없는 경우 둘째, 제품의 형상이 복잡하며 제조공정에 대한 경험이 적은 경우 셋째, 관심부위에 대한 검사를 시편이나 제품의 잉여부위를 통해 확인할 수 없는 경우 등에 적용한다.

잉여부위를 이용한 파괴시험은 비용을 줄이는 반면 품질보증 효과도 얻을 수 있는 장점이 있다. 잉여부위는 의도적으로 절단부위 이상으로 여유를 갖게 제작하거나 제품의 내부에서 얻은 것을 이용할 수도 있다. 절개된 부위에 대한 이상 유무를 확인할 수 있으며 이를 이용하여 시편을 가공하고 제조공정의 품질과 제품의 구조적 건전성을 확인할 수도 있다.

2.3 주기시험 및 건전성 확인

파괴시험 주기는 제품의 형태와 경험에 따라 달리 운용할 수 있다. 복합재 제조사가 충분한 제조경험을 가졌다면 초도품에 대해서만 파괴시험을 실시하고 이후는 주기검사를 실시하지 않을 수도 있다. 그러나 복잡한 제품에 대한 제작경험이 적은 제조사의 경우는 점진적으로 간격을 늘리면서 시험을 하는 것이 타당하며 주요한 제품에 대해서는 파괴시험을 고려해야 한다. 잉여부위를 이용한 검사 및 시험은 제품을 절개하여 검사하는 것보다 적은 비용으로 빈번하게 수행할 수 있으며 이러한 시험을 통해 제품의 건전성을 확보할 수 있게 된다.

온도검사(heat survey), 비파괴시험, 누설시험 및 오버레이시험 등과 같이 파괴시험 후 수행이 확인이 불가능한 요구사항들은 파괴시험 전에 완료되어야 한다. 파괴시험의 기본 개념은 본딩된 제품을 절개하여 본딩 자체나 단품의 맞춤상태와 외관을 확인하는 하는 것으로 다른 검사공정에서 확인이 불가능한 사항들을 확인할 수 있는 장점을

갖고 있다. 파괴시험 전에는 육안검사나 비파괴검사 결과에 대한 검증을 실시하고 발견된 결함의 위치와 절단부위를 제품에 표시하여 파괴시험이나 시험 보고서 작성 시 용이하도록 해야 한다. 또한 도면이나 관련 규격서에서 요구하는 시험을 실시하기 위한 시험방법, 시편의 크기, 절취 방향을 평면도 등을 이용하여 작성하고 시편을 절단, 가공하여 시험을 수행한다.

주기적인 파괴시험은 제품의 품질을 보증하기 위한 제조공정을 확인할 수 있도록 하고 파괴시험을 통해 문제가 발생한 경우에는 해당되는 제품을 주기검사에 포함시켜야 한다. 제품이 유사한 형상과 복잡성을 갖는다면 샘플링목적으로 이러한 제품을 하나의 로트로 분류할 수 있다. 또한 동일한 형상으로부터 파생되어 제작된 치공구를 이용하여 제작된 제품도 동일한 로트로 간주할 수 있다.

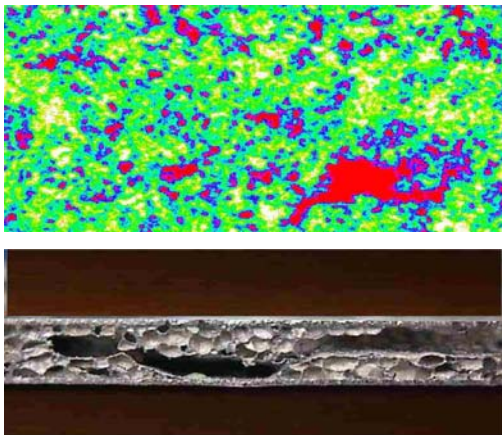
전형적인 샘플링 방법은 최초 제작품에 대해 절개하고 주기적으로 공정 중 시편제작이나 잉여부위를 절개하여 확인할 수 있으며 주기시험의 간격은 파괴시험의 결과에 따라 조정한다. 파괴시험 결과가 연속적으로 성공하였다면 시험의 간격을 늘릴 수 있으며 시험결과 부적합사항이 발생한 경우에는 시험의 간격을 줄여 적용할 수 있다. 운용 중에 문제가 발생한 경우에는 동일한 제조과정중의 제품을 절개하여 이러한 문제가 독립된 문제인지 확인해야 한다. 잉여부위 또는 공정용 시편을 이용한 주기시험은 비용이 적게 들기 때문에 간격을 작게 하여 수행할 수 있으며 주요한 제품의 경우는 특히 시험의 주기를 작게 하여 제품의 건전성을 간접적으로 확인해야 한다.

파괴시험의 대상이 되는 초도품은 초기에 제작된 제품 중에서 하나를 선정하여 시험할 수 있다. 이는 최초로 생산되는 초도품의 경우 초도품이라는 인식으로 특별히 주의를 기울이고 또 공정 중의 문제나 불량 발생 제품의 경우 보다 많은 정보를 제공할 수 있기 때문이다. 파괴시험에서 포함해야 할 잠재적인 부위나 항목은 다음과 같다.

- (1) 비파괴검사에서 지시를 나타낸 부위

- (2) 제품 내에서 주하중이 전달되는 경로
- (3) 다중경화(co-cure)된 곳의 치구표시 부위
- (4) 경사진 부위에서 플라이가 떨어진 부위
- (5) 플라이 주름
- (6) 레진이 과다하거나 적은 부위
- (7) 코너부위 및 다중경화 부위
- (8) 코어와 적층면의 모서리 부위
- (9) 경사진 코어부위

파괴시험과정에서 부품을 분리 가능한 범위 내에서는 모두 절단하여 부품의 내부를 볼 수 있도록 한다. 부품 내부결함 검사의 가장 큰 목적은 비파괴검사의 검증이다. 즉, 비파괴검사를 통해 발견된 결함들의 진위 및 구체적인 형상과 크기, 위치, 특성 등을 명확하게 규명하여 비교 평가함으로써 차후 비파괴검사 결과로 품질보증을 실시할 수 있도록 하는데 목적이 있다. 그림 2는 초음파 C-Scan을 이용한 비파괴검사 결과를 파괴시험을 통해 해당 결함부위의 단면을 나타낸 것으로 이를 통해 비파괴 시험의 결과를 검증할 수 있다.



상부; 샌드위치 폼 구조물의 초음파 C-Scan 결과
하부; 샌드위치 폼 구조물의 단면

그림 2. 파괴시험의 단면도

그러나 비파괴검사와는 별도로 부품을 분해 가능한 부위는 모두 확인을 통해 부품의 내부 결함뿐만 아니라 비파괴검사를 통해서 나타나지 않

는 결함 등을 상세히 검증할 수 있어 제작공정 전체를 분석하는데 도움이 된다.

제품 및 잉여부위에 대한 파괴시험은 단품에 대한 검사를 포함하며 단품에 대한 기계가공 후 현미경 사진을 이용하여 미세구조를 확인할 수도 있다. 작은 시편을 이용하여 플라이를 떼어내거나 연마하여 적층순서나 적층방향을 확인할 수 있으며 기계적으로 적층작업이 이루어지는 경우에는 초기 확인만 필요하다. 플라이 적층, 잠재적인 플라이 주름, 기공 등을 확인하기 위해서는 체결 홀 부위에서 얻은 시편을 이용하여 현미경 사진을 통해 확인할 수 있다. 잉여부위에서 얻은 기계가공된 시편을 이용하여 제품의 치명적인 고장모드에 대해 검사할 수 있으며 이러한 전형적인 시험에는 압축시험, 라미네이트에 대한 인장 및 전단시험 등이 있다.

2.4 파괴시험 결과의 반영

파괴시험을 통해 얻은 각종 시험결과를 문서화하고 관련 도면이나 규격의 요구조건을 만족하는 지를 확인하여야 한다. 시험결과가 요구조건을 만족하지 못한 경우에는 자재, 치공구나 공정 등을 검토하여 원인을 파악하고 시정조치를 실시하며 필요에 따라 시정조치 후 파괴시험을 재수행해야 한다. 또 파괴시험 전에 실시한 비파괴검사 결과와 비교하여 비파괴검사에서 발견하지 못한 결함이나 지시 또는 크기에 대해 검증하고 비파괴검사의 각종 검사 변수들을 조정하거나 다른 비파괴검사 방법을 이용해야 한다. 이렇게 함으로써 제작과정 중의 문제점을 개선하고 비파괴검사의 신뢰도를 확보하여 항공기 복합재 구조물에 대한 건전성을 확보할 수 있게 된다.

3. 결 론

항공기는 특성상 고도의 안전성과 신뢰성을 요구하므로 항공기 구조설계의 요구조건을 만족하는지 평가되어야 한다. 항공기 구조용 복합재는 제작 후 품질을 확인하고 확인한 결과에 따라

수정하는 작업이 어렵기 때문에 원자재에서부터 제조공정 전반에 대한 관리가 필요하며 각종 검사나 시험이 수반되어야 한다. 파괴시험은 설계 조건, 치공구와 공정의 적합성 및 사용자재 등에 대해 보증하고 파괴시험 전에 수행된 비파괴검사 방법에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 수행되어야 한다. 파괴시험의 주기는 제품의 형태나 제작사의 경험에 따라 다르게 운용할 수 있으나 일반적으로 초도품에 대해서는 제품에 대한 파괴시험을 수행하고 시험결과가 도면 및 규격 요구조건을 만족하였다면 이후에는 공정용 시편이나 제품의 잉여부위를 통해 제품을 확인할 수 있다. 제품의 제작에 사용되는 치공구가 수정된 경우나 주요 제조공정이 변경된 경우에도 파괴시험을 실시해야 한다.

본 연구를 통해 항공기 복합재 구조물의 건전성확보를 위한 품질관리 방법, 최종 제품에서 측정할 수 없는 제품의 설계특성을 파괴시험을 통해 확인하는 방법 및 비파괴검사의 신뢰성 확보 기법을 제시하였으며 이를 바탕으로 향후 개발되는 항공기 복합재 구조물에 대한 신뢰성과 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이지환, 문창권, 박상보, "복합재료", 원창출판사, 1995, pp.1-4.
2. MIL-HDBK-17-3F "Composite Materials Handbook, Volume 3 Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis", 2002.
3. George Lubin "Handbook of Composites", 1982, pp. 1-6.
4. Donald H. Middleton "Composite Materials in Aircraft Structures", 1990, pp.190-206.
5. NASA Practice No. PD-ED-1217 "Structural Laminate Composites for Space Applications", 1999.
6. Joseph F. Rakow, Alfred M. Pettinger "Failure Analysis of Composite Structures in Aircraft Accidents", 2006, pp.2.
7. Ulf Schnars, Rudolf Henrich "Applications of NDT Methods on composite Structures in Aerospace Industry", 2006, pp.1.
8. SAE AS9102 "Aerospace First Article Inspection Requirement", 2004, pp.8.
9. Cindy Foreman "Advanced Composites", 1990, pp.1-14.