



# THEME 03

## 대형 복합재 블레이드의 결함평가 및 신뢰성

강 기 원 | 국립군산대학교 기계자동차공학부 교수 | e-mail : kwkang68@kunsan.ac.kr

이 글에서는 풍력발전시스템(wind energy conversion system)에 사용되는 대형 복합재 블레이드(composite blade)의 내부 결함 및 이를 통한 신뢰성 평가 동향에 대해 소개하고자 한다.

### 블레이드 특성

바람의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 풍력발전시스템은 로터 블레이드(rotor blade), 대형 베어링, 증속기(gearbox), 발전기(generator), 전력변환장치 및 타워 등으로 구성된다. 이러한 풍력발전시스템의 구성요소 중에서도 특히 블레이드는 바람의 운동 에너지를 기계적 회전에너지로 변환하는 부품으로서 풍력발전시스템 전체 단가의 약 20%를 차지하는 풍력발전시스템의 핵심 부품이다. 풍력발전시스템의 출력과 하중의 근원인 로터블레이드는 최근 효율 등의 원인으로 인하여 점차 대형화되고 있으며(3MW급: 길이 약 50m, 5MW급: 길이 60m 이상) 이는 풍력발전시스템의 가장 중요한 기술적 도전이 되고 있다(그림 1 참조). 예를 들면, 면밀한 기술적 검토 없이 길이 10m의 블레이드를 50m로 증가시키면 그 중량은 무려 125배로 증가하게 되며 이는 시스템의 하중 지지 능력을 넘어서게 된다. 이를 해결하기 위하여 공력설계, 구조설계 및 재료 관점에서 많은 기술적 발전을 요구하고 있다.

재료 관점에서 살펴보면, 블레이드의 경우 경량화를 위하여 유리섬유(glass fiber)와 열경화성 에폭시(epoxy) 및 폴리에스터(polyester) 수지를 사용한 복합재료가 제작되고 있다. 최근에는 저수축성 및 피로

저항성 등이 우수한 에폭시수지가 주로 사용되고 있다. 보강섬유는 유리섬유를 기반으로 하여 대형이며 구조적 성능을 유지하기 위하여 방향성을 보유한 다축 직조형 직물(multi-axial non-crimp fabric)이 다수 사용되고 있다. 최근에는 블레이드 길이가 60m를 넘어지게 되어 성능향상과 자중 및 하중 감소를 위하여 탄소섬유(carbon fiber)의 사용이 증가하고 있다. 그 외 블레이드용 소재는 접착제 및 샌드위치 재료가 있으며, 접착제의 경우 에폭시수지와 결합력이 우수한 에폭시계 접착제를, 샌드위치 재료는 발사목재(Balsa wood) 혹은 우레탄폼(urethane foam)이 사용되고 있다.

공정 측면을 살펴보면, 블레이드 제조기술은 항공



그림 1 풍력발전시스템(Repower 5.0MW)

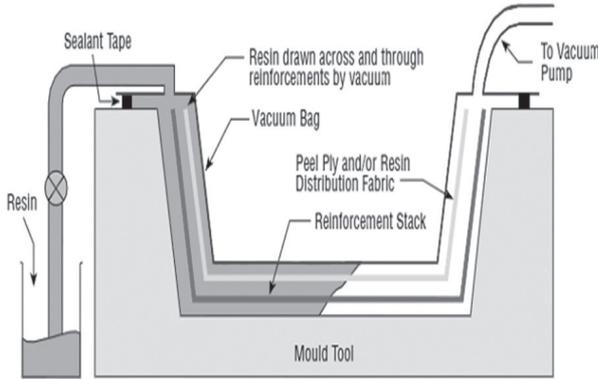


그림 2 레진 인퓨전 공법

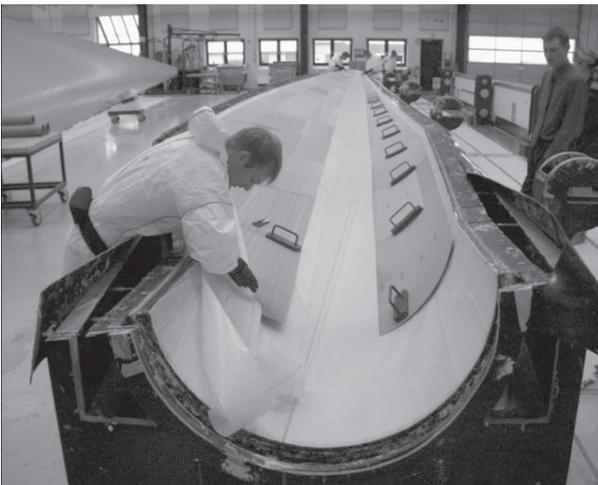


그림 3 프리프레그 방법

산업에서 파생된 복합재료 공정기술인 프리프레그 (prepreg) 기반 오토클레이브(autoclave)기술과 수지 액상주입기술(resin transfer molding 혹은 resin infusion method)이 활용되고 있다(그림 2 및 3 참조). 이중 레진 인퓨전(resin infusion) 공법은 가장 많이 사용되고 있는 기술로서 SCRIMP(Seaman Composite Resin Infusion Molding Process) 및 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 등의 다양한 형태로 변형되어 사용되고 있다. 프리프레그 공법은 세계적인 기업인 베스타스(Vestas)와 가메사(Gamesa) 및 북미의 블레이드 제조업체 들이 사용 중인 기술로서 베스타스(Vestas)는 전통적으로 프리프레그를 이용하여 블레이드를 제작하고 있다. 최근에는 제조시간 단축을 위하여 일체형 성형공법 및 실리콘 진공백 성형공법 등이 적용되고 있다.

### 블레이드 결함 검출

오토클레이브 및 수지액상기술 공법을 이용하여 제조된 복합재 블레이드는 이의 제조 공정상, 접합불량, 기공 및 층간분리(delamination) 등과 같은 다양한 형태의 결함이 존재할 가능성이 높으며 이는 블레이드의 신뢰성, 안전성 및 제품 경쟁력에 악영향을 미치고 있다. 따라서 풍력발전용 복합재 블레이드의 신뢰성을 확보하기 위해서 블레이드 결함 탐지 및 이의 평가에 대한 다양한 기술이 개발되고 있다.

복합재 블레이드의 결함은 다양한 원인 및 경로를 통하여 발생할 수 있으며 표 1은 이러한 블레이드의 결함을 특성 및 위치별로 분류한 것이며 그림 4는 이러한 기준하에서의 발생 가능한 결함의 모식도를 나타낸 것이다. 현재 ① 블레이드 루트로부터 30~35% 및 70% 지점, ② 블레이드 루트, ③ 최대 코드 및 ④ 스파의 상부 스파캡/플랜지 등이 결함의 발생 가능성이 높은 지점으로 알려져 있다.

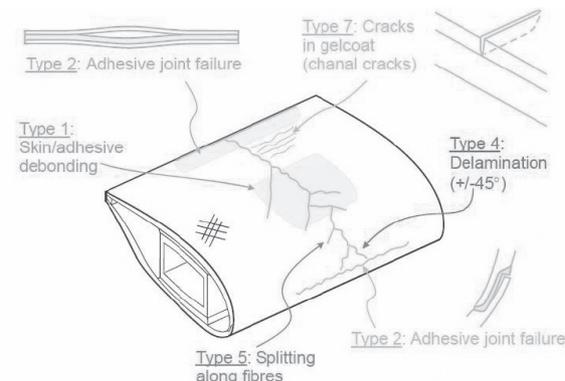


그림 4 복합재 블레이드에서 발생 가능한 결함 유형



블레이드의 결함은 일반적으로 공정상 형성된 결함 및 사용 중 발생된 결함으로 분류될 수 있으며 각각의 특성에 따라 다양한 결함 검출 및 평가 기법이 개발되고 있다. 현재 RISO DUT 및 샌디아 국립연구소 (Sandia National Lab.)

는 우수한 블레이드 결함 탐지 및 정량화 기술이 연구 개발되고 있으며 현재까지 연구되고 있는 블레이드의 결함을 체계적으로 측정하기 위한 기법으로는 열영상, 초음파, 음향 방출법 등이 사용되고 있으며, 각각 기술의 현황 및 한계는 다음과 같다.

### 음향방출 검사 기법

균열, 변형, 층간분리 및 충격 등의 현상이 탄성체에 발생하면 광범위한 주파수 영역에서 탄성체에 저장된 탄성에너지의 상태 변화가 발생한다. 음향방출 검사 기법(acoustic emission detection method)은 이러한 현상을 이용한 것으로서 그림 5와 같이 복합재 블레이드에 하중이 가해졌을 때, 블레이드 내부 손상으로 인하여 방출되는 탄성에너지와 이로 인한 탄성파를 측정하여 내 결함의 위치 및 크기 등을 결정짓는 방법이다. 이러한 음향방출 검사 기법은 신호의 크기가 작은 경우에도 적용할 수 있으며 정적 하중뿐만 아니라 피로하중이 작용할 경우에도 사용할 수 있으며 또한 미시영역까지의 다양한 형태의 결함 검출에 유망하다는 장점이 있다. 그러나 존재하는 결함의 특징을 결정하고 및 이로 인한 결함 평가를 위해서는 측정된 탄성과 신호를 구조물의 실제 물리적 현상으로 변환할 수 있는 적합한 알고리즘이 반드시 요구되는 단점이 있다.



그림 5 블레이드 실규모시험 및 음향방출 기법을 통한 결함 평가

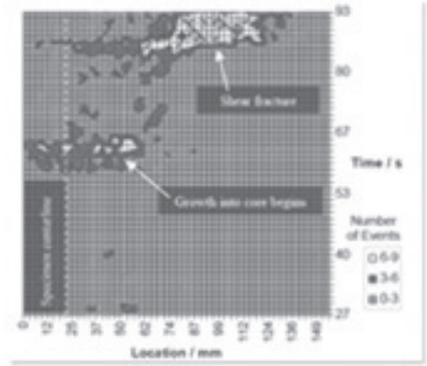


표 1 풍력발전용 복합재 블레이드의 결함 분류

Type	Description
Type 1	Damage formation and growth in the adhesive layer joining skin and main spar flanges
Type 2	Damage formation and growth in the adhesive layer joining the up-and downwind skins along leading and/or trailing edges
Type 3	Damage formation and growth at the interface between face and core in sandwich panels in skins and main spar web.
Type 4	Internal damage formation and growth in laminates in skin and/or main spar flanges
Type 5	Splitting and fracture of separate fibers in laminates of the skin and main spars
Type 6	Buckling of the skin due to damage formation and growth in the bond between skin and main spar
Type 7	Formation and growth of cracks in the gel-coat; debonding of the gel-coat from the skin

### 열화상기법

열화상기법(thermal imaging method)은 적외선 센서 또는 카메라를 이용하여 복합재 블레이드와 같이 대상 표면을 관찰하고 관찰된 온도 차이를 이용하여 표면 바로 아래 부위(subsurface)의 결함을 검출하는 방법이다. 손상이 발생한 영역(damaged region)과 손상이 발생하지 않은 건전 영역(undamaged region) 사

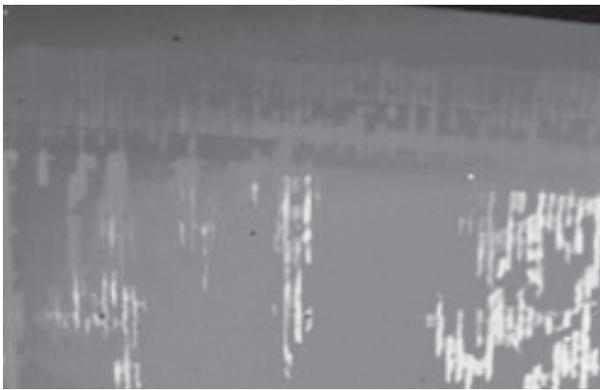


그림 6 열화상기법을 이용한 블레이드 결함 평가

이의 온도 차이는 열확산성(thermal diffusivity)의 차이 때문에 발생하고 따라서 이는 재료의 불연속성 또는 손상을 의미한다. 열화상기법은 열 야기 방법(thermal excitation) 방법에 따라 수동(passive) 및 능동(active) 열화상 기법으로 분류될 수 있다. 수동 열화상 기법은 보통 상온 이상의 온도 하에서 사용되는 기법이어서 복합재 블레이드에 대한 적용 기술이 성숙된 단계는 아니다. 능동 열화상기법은 측정 대상에 외부에서 열을 가하여 측정 대상의 열 대비(thermal contrast)를 평가하는 기법이다. 이러한 열화상 기법은 대형 복합재 블레이드와 같이 넓은 영역에 대한 측정이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 열화상기법은 건전 및 손상 영역의 온도 차이를 확인하기 위하여 필요한 열 야기 방법의 유효성에 제한이 있다.

#### 초음파기법(ultrasonic method)

탄성체 내에 발진된 초음파는 이의 내부를 통과할 때 내부에 결함이 존재하면 초음파는 반사 및/또는 모드가 변하게 된다. 초음파검사기법은 이러한 원리를 이용한 기법으로서 초음파 발진기로 초음파를 발생시켜 리시버에서 이를 수신하는데 경로 중에 손상 등이 존재할 경우 발생하는 초음파의 간섭현상을 이용한 내부 결함 산출 방법으로서 복합재료의 손상 검출에 광범위하게 사용되고 있다. 또한 손상 가시화 및 유연성 등으로 인하여 복합재 블레이드의 결함 검출에 상당히 유망한 기법으로 평가받고 있다. 그러나 측정 대상 블레이드의 구조적 복잡성, 내부 구조의 변화 및 센서의 위치에 따른 측정정확도의 민감성 등에 대한 문제가 존재하는 것도 사실이다.

#### 광섬유방법(fiber-optics method)

광섬유를 블레이드에 배열하고 손상에 따른 광 간섭 효과 등을 이용하여 블레이드 내부의 손상을 검출하는 방법으로서 복합재 블레이드 내부에 설치 가능하므로 사용 중 발생하는 손상 및 결함의 검출 기법으로 유망하다. 그러나 블레이드의 경우 20년 이상의 사용 수명을 가져야 하므로 이에 삽입되는 광섬유 역시 이에 상응하는 수명을 요구받고 있다. 따라서 현재까지는 이러한 광섬유 자체의 신뢰성 및 비용상 한계가 존재한다.

#### 스트레인기법(strain-based method)

블레이드 표면 및/또는 내부에 스트레인 게이지나 PVDF(polyvinylidene fluoride) 필름 등을 부착하여 외부 하중이 작용할 때 변형률의 이상 거동을 이용하여 결함을 검출하는 방법으로서 블레이드 초기 결함 뿐만 아니라 사용 중 결함 검출 기법으로서의 가능성이 있는 기법이다. 그러나 센서 부착 위치별 변형률 거동의 변화 특성 및 손상/결함에 따른 이상 거동의



변화 특성 평가가 필요하다.

기타

- 레이저 도플러 바이브로미터 기법(laser doppler vibrometer method)
- 변형 기억 합금 방법(strain memory alloy method)
- X-선 기법(X-radiography method)
- 와전류 기법(eddy current method)

블레이드 결함 판정

블레이드에 존재하는 결함을 정량화하고 블레이드의 건전성 평가를 위해서는 위에서 언급한 각종 비파괴적 결함 검출 방법의 적용만으로는 곤란하다. 즉, 비파괴적 결함 검출 기법을 통하여 검출된 결함 데이터를 해석하고, 결함 모델로 사용할 수 있는 수준까지 결함을 정량화하는 결함 특성화기술과 규정화된 결함의 손상 증가와 잔류 강도(residual strength)의 특성화 기술이 개발되어야 한다.

이를 위하여 샌디아(Sandia) 연구소, 미국신재생에

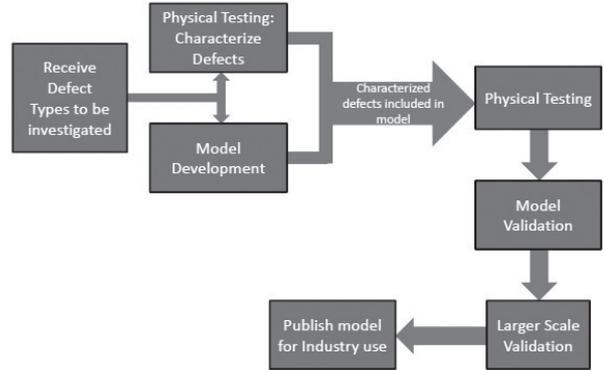


그림 7 데미지 평가 플로차트(damage evaluation flowchart)

너지연구소(NREL), 몬타나(Montana) 주립대학 및 기업이 블레이드의 신뢰성을 향상시키기 위한 프로그램인 BRC(Blade Reliability Collaborative)을 수행하고 있다. BRC에서는 ① 손상 저항성 및 잔류강도 평가 등을 통한 결함의 영향을 고려한 구조설계 능력 향상, ② 온도 변화 등의 환경 영향, ③ 제작공정, 감지 능력 및 수리 방안 및 ④ 파괴모드 등에 대한 연구를 통하여 체계적인 신뢰성 평가 프로그램(그림 7 참조)을 개발하고 있다.



기계용어해설

고주파 경화(담금질)(Induction Hardening)

고주파전류로 전자유도 전류를 발생시켜 피가열체의 표면부만을 급속히 가열한 후 분사냉각 등으로 담금질하는 방법.

공업용 로봇(Industrial Robot)

자유도가 5~6 정도로 사람의 손과 비슷한 작업을 자동화할 수 있고, 특정한 일을 행하도록 프로그램 가능한 제어장치를 갖춘 기계장치.

이너트 가스 아크 용접(Inert-gas Shield Arc Welding)

불활성 가스의 분위기 속에서 피용접물과 피복하지 않은 텅스텐 막대 또는 금속전극선 사이에 아크를 발생시켜 용접하는 방법.

입력 오프셋 전압(Input Off-set Voltage)

차동증폭기에서 압력측의 2개 단자 사이에 가하여 출력을 0으로 하는 전압, 또는 입력측에 접속한 저항에 흐르는 전류차로 나타낸 것.