

# 풍력 발전기용 블레이드의 설계에서 제작까지

■ 김명진 / (주)케이엠 연구소, jins@km-c.co.kr

## 서론

1997년 12월 이산화탄소 배출량을 제한하는 교토의정서가 채택되어 온실가스의 배출규제에 대한 구체적인 안이 마련되었다. 이에 대응하기 위해서 세계의 각 나라들은 풍력, 태양열, 수소, 연료전지 등 신재생에너지 기술개발에 많은 노력을 기울이고 있다. 특히, 풍력 발전은 가장 먼저 사용화에 성공한 신재생에너지로 각광을 받고 있으며 독일, 덴마크, 미국, 스페인, 인도 등을 선두로 1999년부터 2008년까지 10년 동안 약 20배의 성장률로 가파르게 성장하고 있다.

선진국과 비교하여 국내 풍력 시장의 규모는 매우 작지만 정부의 신재생에너지 지원 정책에 힘입어 2001년 750 kw를 시작으로 2004년 2 MW, 2007년 3 MW 개발 사업을 통하여 지속적으로 성장하고 있다.

풍력 발전은 바람에 포함된 에너지를 로터 블레이드를 통하여 운동에너지로 변환시키고 발전기를 통하여 전기 에너지를 생산하는 발전 시스템을 말한다. 로터 블레이드는 일종의 에너지 변환기로서 풍력 발전 시스템의 전체 성능 및 하중을 결정

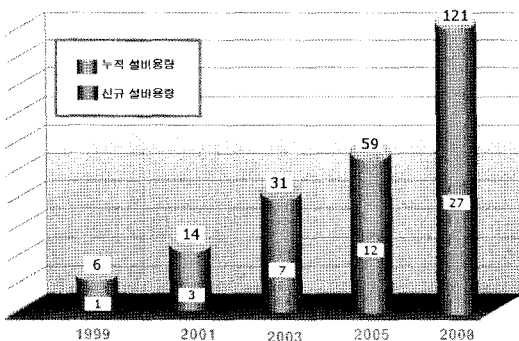
하는 핵심 부품이다. 현대의 풍력발전 시스템은 대형화로 급속하게 발전하고 있으며 선진국의 경우 5 MW급 블레이드 개발을 완료하여 상용화하고 있다. 블레이드의 대형화 추세에 맞추어 국내에서도 750 kW ~ 3 MW급 블레이드를 개발완료 하였으며 5 MW는 개발 중에 있다.

본 투고에서는 수평축 풍력 발전기용 블레이드의 설계에서부터 제작, 인증에 이르는 개발 전반에 대한 내용을 소개한다.

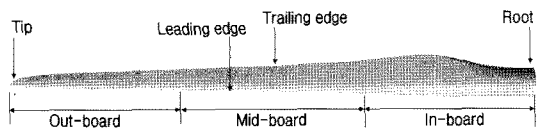
## 블레이드 소개

### 블레이드의 구성

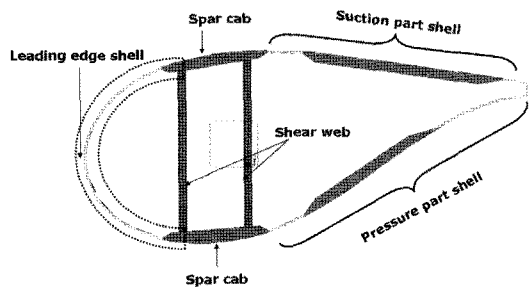
일반적으로 블레이드는 외부형상에 따라 straight type과 pre-bend type으로 구별된다. straight type은 익형을 배열하는 기준 축에 변곡점이 없는 곧은 형상을 갖는 가장 일반적인 형상이다. Pre-bend type은 배열 기준 축에 변곡점이 있어 직선이 아닌



[그림 1] 세계 연간 풍력발전 설비용량 추이(Gw)



a) 외부 명칭



b) 내부 명칭

[그림 2] 블레이드 각부 명칭

굽어진 형상으로 익형이 배열되어 일반적으로 가벼운 블레이드의 제작이 가능하나 straight type에 비하여 제작성과 유지 관리가 어려운 단점이 있다.

그림 2는 블레이드의 내외부 명칭에 대하여 설명하였다.

블레이드의 내부 구조는 spar cap과 shear web의 유무와 수량에 따라 분류된다. 그림 2에 블레이드 단면 구조는 가장 일반적인 형태인 spar & shear web의 구조이며 별도의 spar cap이 없이 shell 전체가 구조적인 강성을 갖는 thickened shell 구조를 이루기도 한다. 이 밖에 shear web의 형상에 따라 C-type, Q-type, I-type, box-type shear web으로 분류된다.

### 블레이드의 소재

과거 블레이드의 소재는 나무와 철을 사용하였으며 kw급 이상의 대형화 추세에 따라 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Plastics)를 사용하게 되었으며 유리섬유와 폴리에스터, 비닐에스터, 에폭시 수지, core 소재로는 balsa나무, 우레탄폼, PVC 폼 등이 일반적이다. 최근 MW급 이상으로 대형화 추세에 따라 구조적인 강성과 경량화를 위해 블레이드의 일부분에 유리섬유와 카본섬유를 혼합하여 사용하는 경우도 있다.

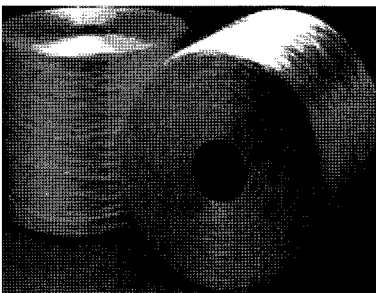
### 블레이드의 제작 공법

블레이드의 제작 공법에는 Hand lay up,

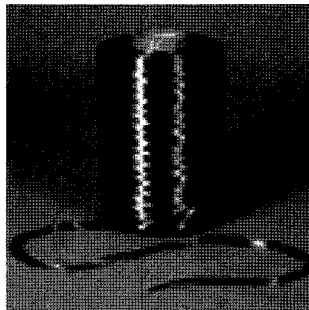
a) Pre-bend type blade

b) Straight type

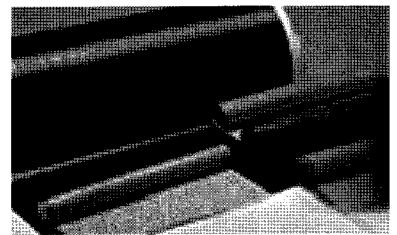
[그림 3] straight type vs pre-bend type



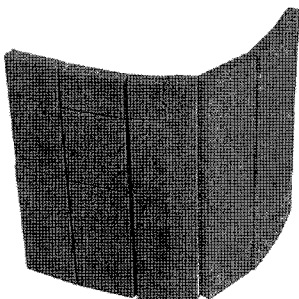
a) Glass fiber



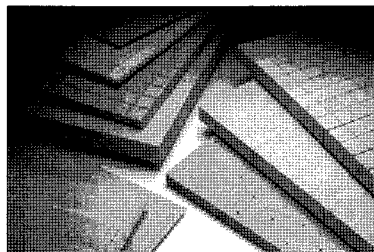
b) Carbon fiber



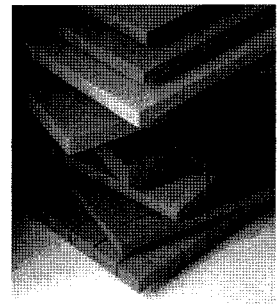
c) Prepreg



d) Balsa



e) 우레탄폼



f) PVC폼

[그림 4] 블레이드 제작용 소재



Prepreg, RIM(Resin Infusion Molding)이 대표적이다. 과거에는 hand lay up이 주를 이루었지만 MW급 이상의 대형화됨에 따라서 prepreg와 infusion이 주를 이루고 있으며 RIM을 발전시킨 일체형 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)이 있다. 각 공법의 장단점은 표 1에 나타내었다.

- ① Hand lay up 공법
  - 섬유를 수지에 함침시킨 후 적층하는 공법으로 FRP 성형법 중 가장 기초적인 공법
- ② Prepreg 공법
  - 수지에 섬유가 함침되어있는 반 고형상태인 prepreg를 적층하여 성형하는 공법
- ③ RIM 공법
  - VARTM 공법의 한 부류이며 간단히 infusion 공법으로 지칭하며 섬유를 적층한 후 진공백을 이용하여 적층된 영역을 진공상태를 만들어 대기압력으로 수지를 함침시키는 공법

## 블레이드의 설계

### 블레이드의 공력설계

블레이드의 설계는 크게 공력설계와 구조설계로 분류할 수 있다.

블레이드의 공력설계는 일반적으로 5 ~ 6개의 익형(airfoil)을 사용하여 블레이드의 전체적인 형상과 효율을 결정짓는 중요한 단계이다. 풍력발전시스템의 이론적인 최대 효율은 Betz limit로  $C_p=0.593$ 이며 현재 상용화된 블레이드의 일반적인 효율은  $C_p=0.49 \sim 0.5$  정도이다.

공력설계의 첫 번째 단계는 익형의 선택과 배열이다. 과거 블레이드의 설계에 사용된 익형은 항공기에 사용하던 익형을 사용하였으나 현재는 풍력발전기용 블레이드에 맞도록 최적화된 높은 효율을 갖는 익형이 많이 개발되고 있다. 최근에는 미 항공우주국에서 개발한 NACA series 중 상대두께가 20% 이하인 익형은 tip부에 주로 사용되며 그

<표 1> 블레이드 제작 공법

<p>Hand lay up</p>		<p>특징 : 다양한 수지적용 가능                      장점 : 공정이 단순함                      단점 : 기계적 물성 저하                      적용업체 : EUROS(일부)</p>
<p>Prepreg</p>		<p>특징 : 적층 방법                      장점 : 기계적 물성이 높음                      단점 : 생산성 떨어짐                      적용업체 : Vestas</p>
<p>RIM</p>		<p>특징 : one side 진공 몰드                      장점 : 생산성 우수, 대형구조물에 적합                      단점 : 공정 중 수리 불가                      적용업체 : LM</p>

외의 영역에는 풍력 블레이드 전용으로 네덜란드의 TU-Delft에서 개발한 DU series airfoil이 주로 사용되고 있으며 이러한 익형을 선택하는 경우 아래와 같은 사항을 고려해야한다.

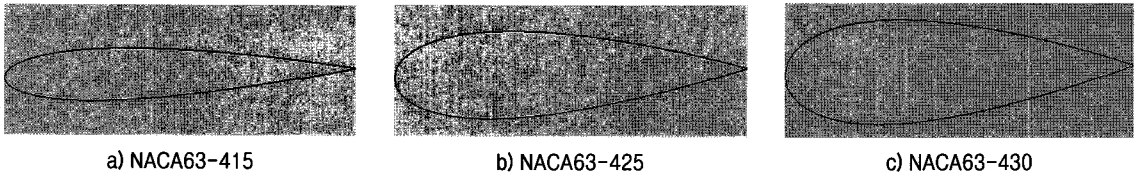
- ① 비슷한 형상을 갖는 두께별 익형 선택
- ② 높은 양항비( $C_l / C_d$ )
- ③ 높은 양력계수
- ④ 급격한 성능변화가 없을 것
- ⑤ 표면 조도의 둔감성을 갖을 것
- ⑥ 소음을 줄일 수 있는 tip형상

블레이드에 사용되는 익형은 일반적으로 5 ~ 8개의 상대 두께가 100% ~ 18%인 익형을 블레이

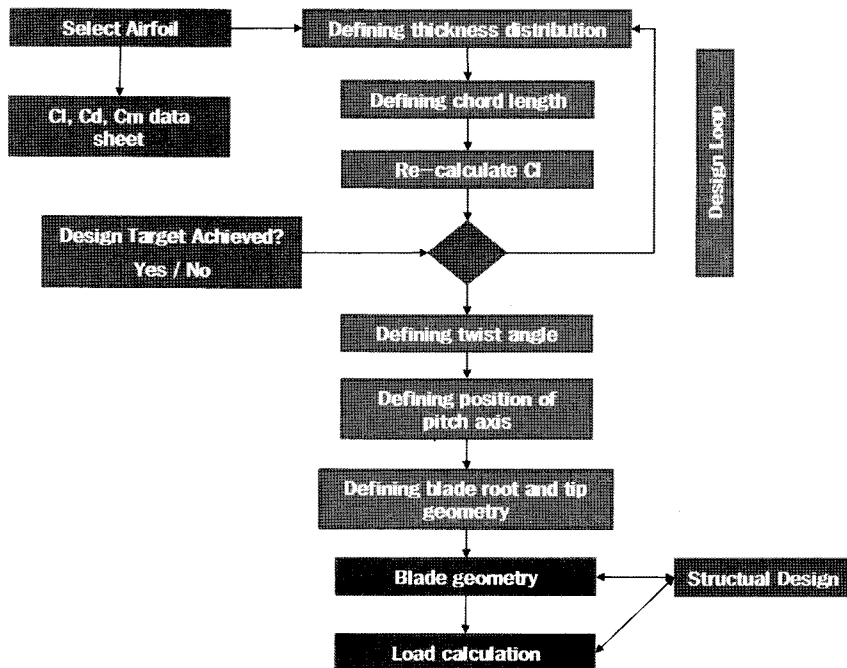
드 축에 간격과 비틀림 각도를 조절하여 길이 방향으로 배열하고 기준 익형이 없는 부분은 선형보간법을 사용하여 형상을 결정한다. 블레이드 공력설계의 일반적인 절차는 그림 6과 같다.

그림 6과 같은 절차에 따라 결정된 형상에 블레이드 길이에 따른 임의의 강성을 적용하여 풍하중(Load calculation) 해석을 실시한다.

풍하중 해석은 서로 다른 내/외부 조건 즉, 바람의 조건과 시스템의 상태조건 등에 따른 하중을 해석하는 것으로 DLC(Design Load Case)라고 한다. 일반적으로 DLC는 약 1000가지 이상의 경우에 대하여 풍력 시스템에 작용하는 하중을 계산한다.



[그림 5] NACA63-xxx series airfoil



[그림 6] 블레이드 공력설계 절차

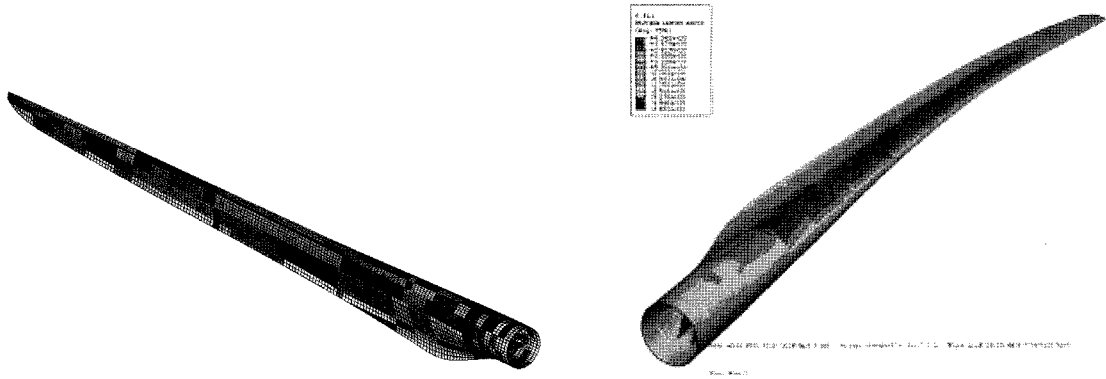


### 블레이드의 구조설계

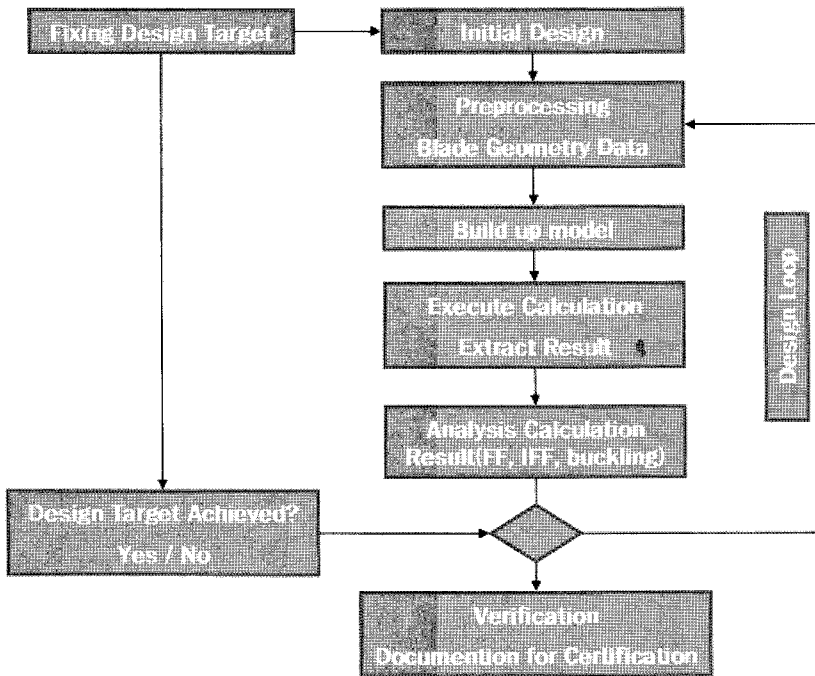
구조설계는 공력설계 단계에서 가정한 강성을 기준으로 DLC에서 부여된 외력에 대하여 구조적 안전성을 부여하기 위하여 블레이드의 형상에 적층 패턴을 설계하는 단계이다.

블레이드의 구조설계 단계에서는 Static analysis,

Dynamic analysis, Stability analysis를 실시하여 섬유의 파괴를 검증하는 FF(Fiber Failure), 수지의 파괴를 검증하는 IFF(Inter Fiber Failure), 피로 강도, 접착제 강도, 좌굴에 대한 구조적인 안전성을 검증해야한다. 그림 8은 블레이드 구조설계의 일반적인 절차를 설명한다.



[그림 7] 블레이드 FEM model 및 해석결과



[그림 8] 블레이드 구조설계 절차

블레이드 구조설계 단계에서는 앞에서 설명한 구조적인 안전성과 더불어 생산성을 고려한 적층패턴의 설계와 내부구조의 설계가 병행하여 수행되어야 하고 무게와 무게중심점, 고유진동수, 최대변위 등과 같은 제한조건을 만족시킬 수 있는 최적화설계가 반드시 수행되어야 한다.

### 블레이드의 제작 및 인증

#### 몰드 제작 공정

블레이드는 일반적으로 Suction part와 Pressure part를 별도로 성형하여 접착제를 이용 결합하여 성형한다. 블레이드의 형상은 공력효율을 결정하는 매우 중요한 변수이기 때문에 형상의 본을 떠내는 몰드의 제작이 매우 중요하다. 그림 9는 몰드의 제작공정에 대한 설명이며 몰드제작에 있어 고려할 사항을 아래에 나열하였다.

- ① 탈형성을 고려한 parting line 설계
- ② 이형성을 고려한 목형표면의 조도 및 이형제 선택
- ③ 경화 후 형상변경을 최소화하는 준등방성 적

#### 층패턴 적용

- ④ Back up structure의 경량화 설계
- ⑤ 히팅 방법에 따른 설계
- ⑥ Turn over 방법을 고려한 설계

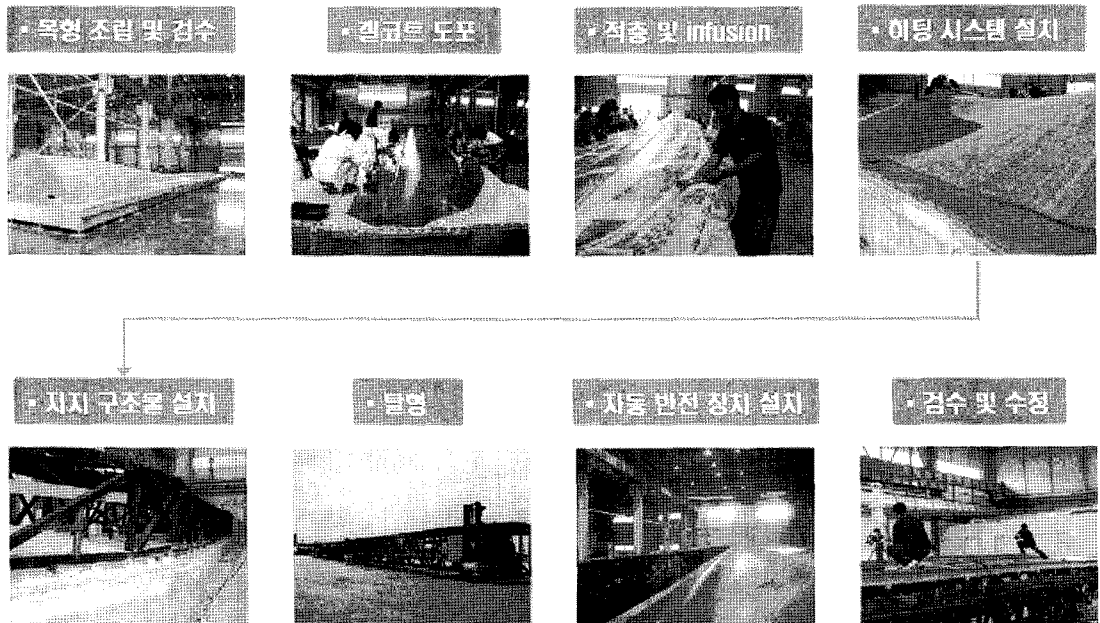
#### 블레이드 제작 공정

블레이드의 제작은 제작 공법에 따라 다소 상이하기 때문에 일반적인 제작공법인 RIM공법을 기준으로 설명한다. RIM공법의 경우 root부와 spar cap과 같은 적층된 소재가 두꺼운 부분은 수지의 미합침 경우가 발생하기 때문에 미리 성형하여 적층하는 방법을 사용한다.

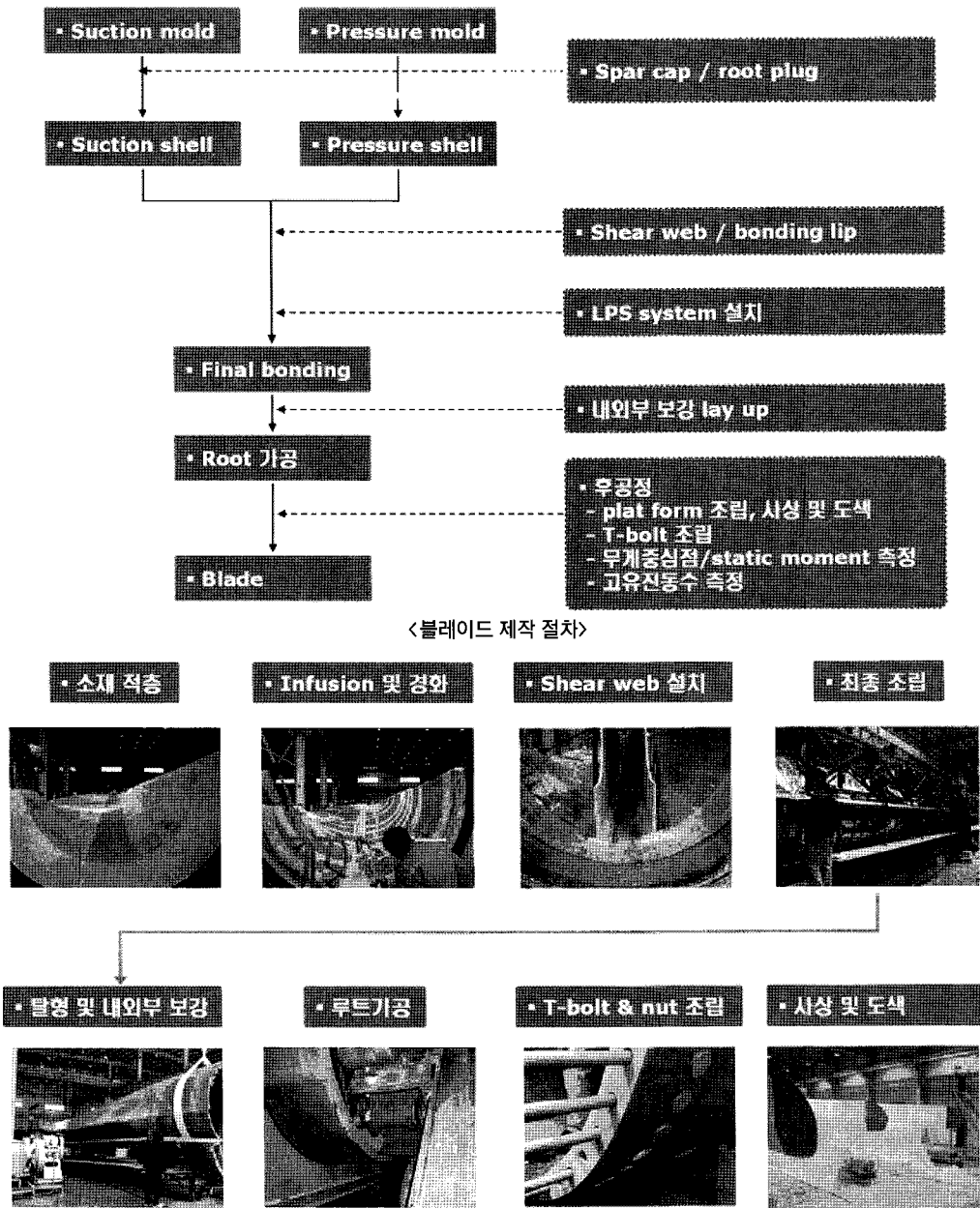
블레이드의 제작 공정 및 절차는 그림 10에 설명하였다.

#### 블레이드 인증 절차

로터 블레이드는 에너지원인 바람의 운동에너지를 직접적으로 받는 부품으로 일반적으로 20년 이상의 동작수명을 요구하고 회전하면서 공력과 원심력 및 순간적인 바람의 변화에 의한 하중 등 다양한 동적하중을 견뎌야한다. 때문에 로터 블레이



[그림 9] 몰드 제작 공정



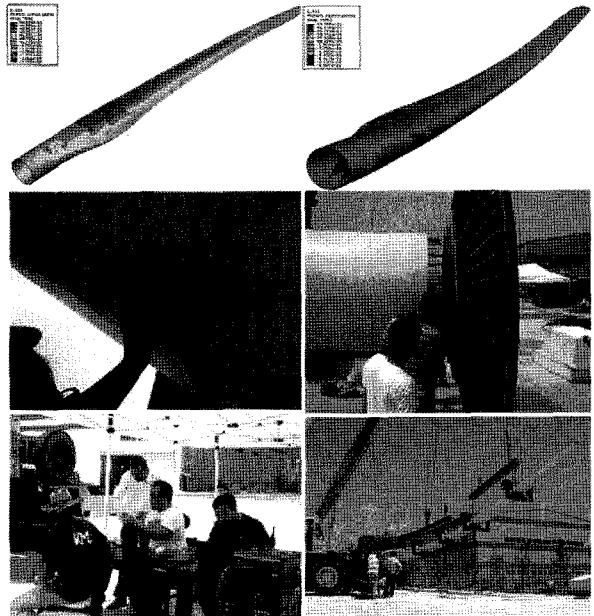
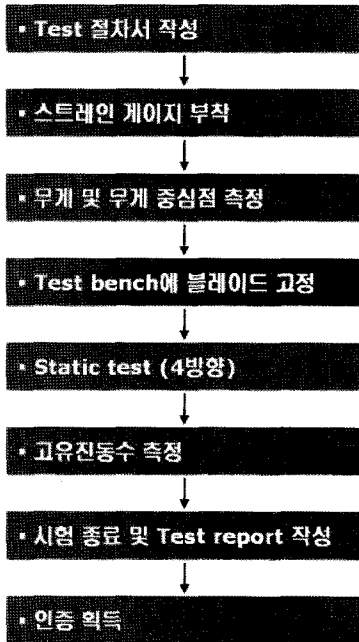
<블레이드 제작 절차>

[그림 10] 블레이드 제작 절차 및 공정

드의 설계에 대한 검증은 반드시 수행되어야 한다. 로터 블레이드의 전반적인 설계에 대한 해외 인증 기관은 GL, DEWI-OCC, DNV, UL등이 대표적이며 최근 국내에는 한국선급(KR)이 인증기관으로

역할을 수행하고 있다.

블레이드의 인증시험은 chordwise 방향과 flapwise 방향에 대한 굽힘 하중 테스트와 고유진동수 테스트를 진행하며 인증시험에 적용되는 하



[그림 11] 블레이드 인증 시험 절차

중은 DLC에서 추출한 하중들 중 블레이드의 각 station에 작용하는 최대하중을 병합하여 만든 것으로 계산결과와 실제 테스트에서 측정된 결과를 비교한다. 테스트를 통하여 측정된 결과는 고유진동수, 변형률, 변위이며 고유진동수의 경우  $\pm 5\%$ , 변형률의 경우  $\pm 10\%$ , 변위의 경우  $\pm 7\%$  허용오차 범위를 갖는다. 인증시험의 절차는 그림 11과 같다.

### 결론

블레이드 사업은 대체에너지, 환경문제에 대처할 수 있는 첨단 산업임과 동시에 노동집약적인 산업으로 많은 일자리를 창출하여 실업문제를 해결할 수 있는 매우 매력적인 사업영역임에 틀림없다.

약 10년의 짧은 개발 역사를 갖고 있는 우리나라는 현재 세계풍력시장에 차지하는 비율은 매우 미미한 실정이 사실이다. 그러나 750 kW를 시작으로 3 MW 블레이드의 개발이 정부의 지원아래 완료되었으며 현재 5 MW 블레이드 개발을 진행하고 있으며 기 개발된 블레이드의 사업화가 진행되고 있다. 또한, 순수 국내 기술로 블레이드의 제작 및 구조설계 기술을 보유하게 되었으며 향후 3년 내 공력설계를 포함한 블레이드의 설계 및 제작에 대한 국산화 개발이 가능할 것으로 예상된다. 아울러 국내 유수의 중공업 업체들이 풍력 발전 시스템 시장에 진입하고 있으며 정부 주도아래 국내 풍력발전 단지 조성 계획을 발표하면서 블레이드 사업에 성장은 가속화될 전망이다. (4)