

풍력 블레이드 설계

■ 장 세 명 / 군산대학교 기계자동차공학부, smchang@kunsan.ac.kr

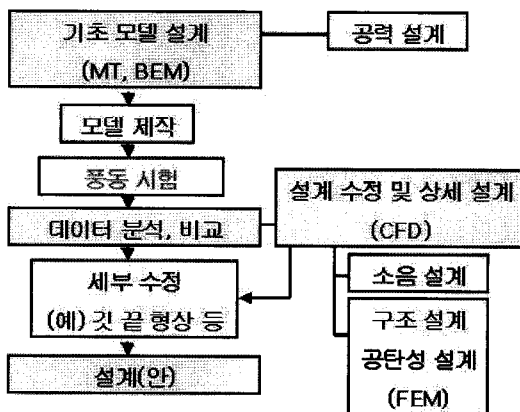
풍력 발전기의 터빈 블레이드를 설계하는 방법과 절차에 관련하여 공력, 구조, 공탄성 설계에 대해 설명한다.

풍력 에너지의 이용은 인류 문명의 지속가능한 발전을 위한 필수 과제다. 풍력 터빈은 기계 시스템 내부의 한정된 공간이 아닌 난류와 같이 매우 규모가 큰 자연 환경에 그대로 노출되기 때문에, 그 블레이드의 형상은 엔트로피가 비교적 높은 유체 유동으로부터 충분한 에너지를 뽑아 낼 수 있도록 최적화된 구조를 지녀야 한다. 현재 가장 많이 사용하고 있는 풍력 터빈의 형상은, 흔히 '덴마크식'이라고 부르는 날개 3개의 수평축 형상이다. 블레이드의 모양은 항공기의 날개처럼 공기역학적으로 최적화된 형상이다. 본 기사에는 블레이드의 공력 설계로부터 축과 연결되는 허브의 구조 설계, 그리고 바람에 대한 구조 동역학적 진동인 공탄성 해석에 이르기까지 블레이드 설계 방법에 대해 체계적으로 설명한다(그림 1 참조).

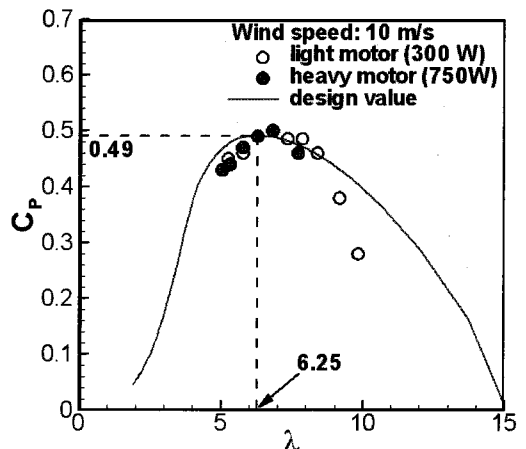
공력 설계

블레이드의 공력 설계를 제대로 이해하기 위해서는, 먼저 공기역학에 대해 알아야 한다. 날개 주변에 흐르는 공기는 양력과 항력을 만든다. 풍력 터빈의 경우에는 이 둘 모두를 회전 에너지로 변환시킬 수 있다. 예를 들어 네덜란드에서 수리나 제분을 위해 사용한 고전적인 풍차에서는 주로 항력을 이용하여 강한 토크를 발생시켜왔다. 그러나 최근 풍력 발전 시스템에서 사용하는 날개 단면은 공기역학적으로 설계되었기 때문에 양력 계수가 항력 계수의 10배가 넘는 경우가 많다. 따라서 수평축 풍력 터빈에서는 주로 양력을 사용한다.

블레이드의 성능은 성능에 대한 무차원 계수인 동력계수(C_p)로 나타나는데, 일반적으로 이 동력계수는 날개 끝단의 회전 속도와 풍속 사이의 비인 끝단속도 비(λ)의 함수로 주어진다. 그림 2는 10 kW급 소형 풍력 터빈 블레이드에 대한 끝단속도 비와 동력 계수의 관계를 나타낸 성능 곡선이다.



[그림 1] 블레이드 설계의 기본 절차



[그림 2] 끝단속도 비와 동력 계수의 상관관계

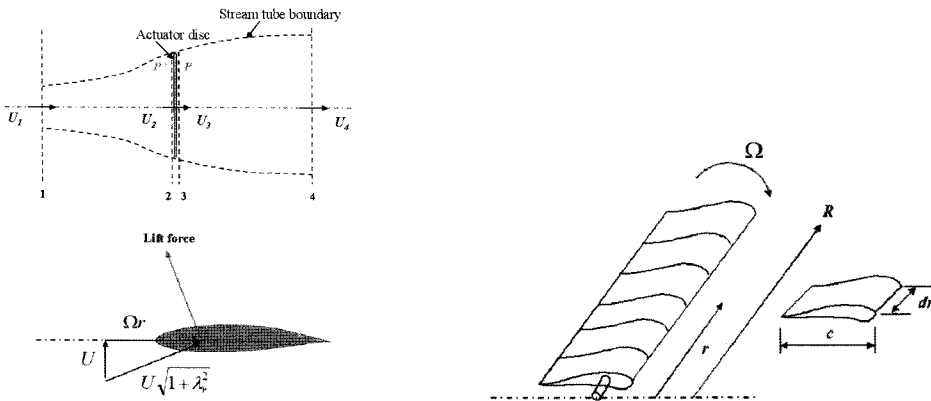


대부분의 풍력 터빈에서는 블레이드의 크기와 별로 상관없이 대체로 끝단 속도가 6 ~ 7 정도에서 최적의 출력을 얻을 수 있다. 풍력 블레이드 구동면 전후에 운동량 이론(베르누이 방정식)을 적용하여 보면, 동력 계수는 이상적인 조건에서 '베르누이의 한계치' 라고 부르는 값으로 수렴한다. 이 값은 약 0.593인데, 수평축 풍력 터빈의 이론적인 최대 효율이 된다. 현재 상용 블레이드는 대략 0.4에서 0.5 정도의 동력 계수 값을 갖는다.

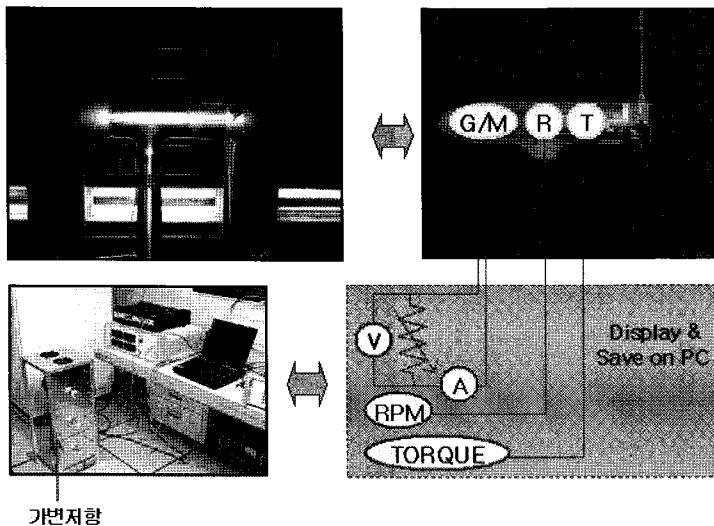
그림 3에서는 풍력 블레이드 공력 설계 방법에

대해 개념적으로 설명하고 있다. 블레이드의 공력 설계에 사용하는 이론적인 방법으로는 '운동량 이론' 과 함께 '블레이드 요소법' 이라는 기법이 있으며, 블레이드를 반경 방향으로 10 ~ 20개 정도의 작은 요소로 분할한 다음 각각의 요소에 작용하는 평균 힘과 모멘트를 계산한다. 이 방법은 계산이 빠르고 간편하지만, 날개 주위의 유동이 비선형인 영역에서는 동적 실속 또는 실속 지연 모델 등을 사용해야 한다.

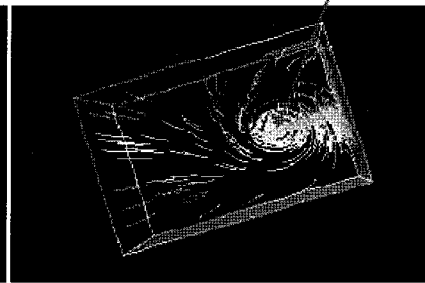
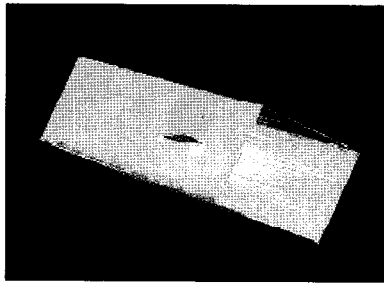
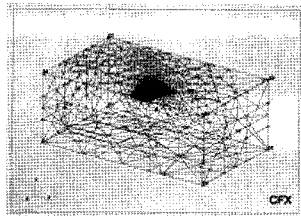
이론적인 계산을 통하여 설계된 풍력 블레이드의



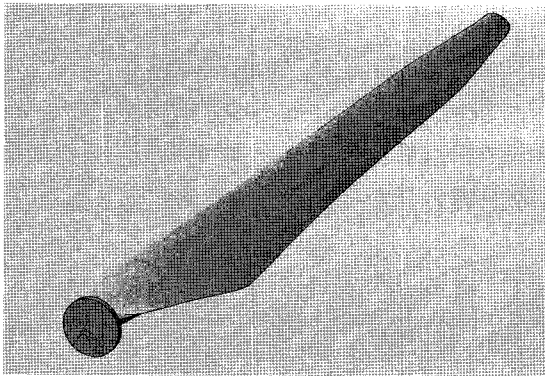
[그림 3] 풍력 블레이드의 공력 설계 방법



[그림 4] 풍력 블레이드의 풍동 시험 방법



[그림 5] 전산유체 해석에 의한 끝단 와류 해석



[그림 6] 완성된 공력 설계 시안

성능은 실험을 통하여 검증될 수 있다. 그런데 축소 시제에 의한 풍동 시험에서는 항상 현실적인 어려움이 있다. 실물과 모형에 대하여, 동력 계수와 끝단속도 비 뿐 아니라 레이놀즈수와 같은 유동 유사성도 만족시켜야 하기 때문이다. 그런데 풍동에서는 벽면 효과 등으로 인하여 모델의 크기와 회전 속도를 제한하고 있으므로 이상적인 축소 실험은 거의 불가능에 가깝다. 따라서 실험 데이터는 유동 영역에 따라 제한적으로 적용해야 한다.

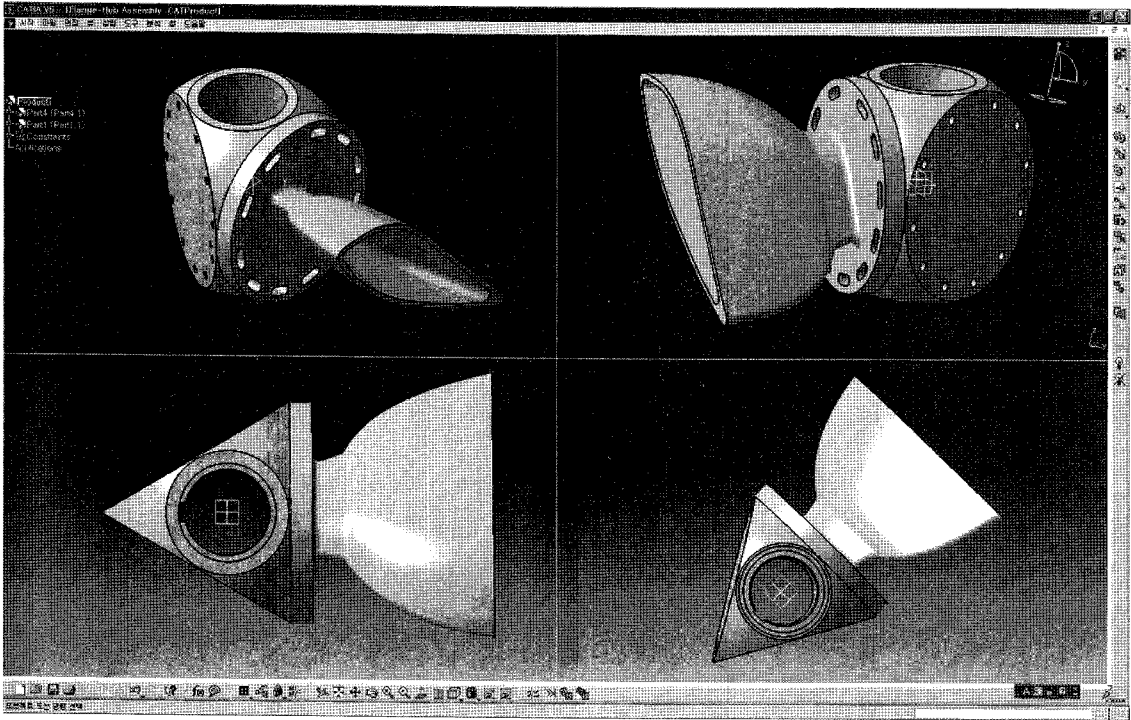
그림 4는 이러한 풍동 시험의 절차에 대해 보여 준다. 모델을 일정한 풍속에서 모터를 사용하여 충

분한 회전 속도까지 가속한 다음, 발전기 모드로 바꾸어서 주어진 풍속의 자유 흐름에 대해 회전 속도와 토크를 측정한다. 이 값들로부터 무차원화와 풍동의 장애물 효과와 베어링의 마찰 계수 등의 보정을 거쳐 최종적으로 그림 2의 실험 데이터를 얻는다. 이 값과의 비교를 통하여 설계 데이터를 검증한다.

블레이드 끝단의 경우, 끝단 와류가 발생하여 성능이나 소음에 많은 영향을 미친다. 끝단의 최적 형상을 구하기 위하여 그림 5와 같은 전산유체 해석을 통하여 끝단 와류의 강도와 공력 소음의 정도를 추정한다. 이러한 수정을 통하여 최종적으로 그림 6과 같이 공력 설계 시안을 도출할 수 있다. 이 시안은 추후 블레이드의 도면을 그리는 데 기초가 된다.

구조 설계

그러나 그림 6과 같은 설계 시안은 아직 많은 설계 수정을 거쳐야 실제 블레이드 도면을 그릴 수 있다. 풍력 블레이드와 회전축을 연결하는 허브 형상은 많은 시행착오를 거치면서 깃뿌리 쪽의 플랜지와 일체가 되어야 한다. 그림 7은 이러한 허브와 플랜지의 조립 형상을 도면으로 보여주고 있다.

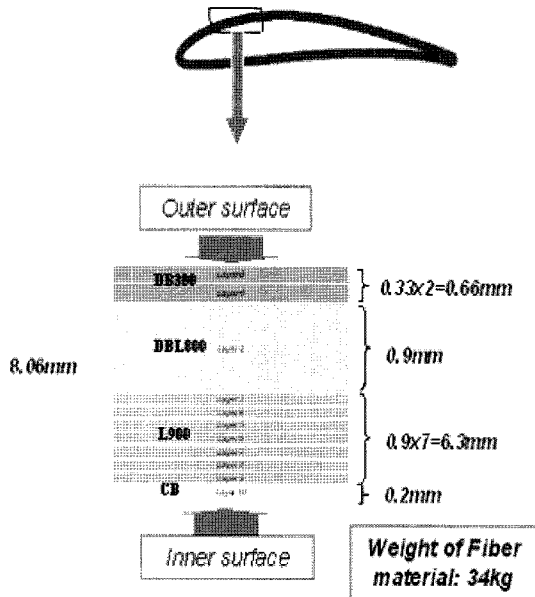


[그림 7] 허브와 플렌지의 설계도면

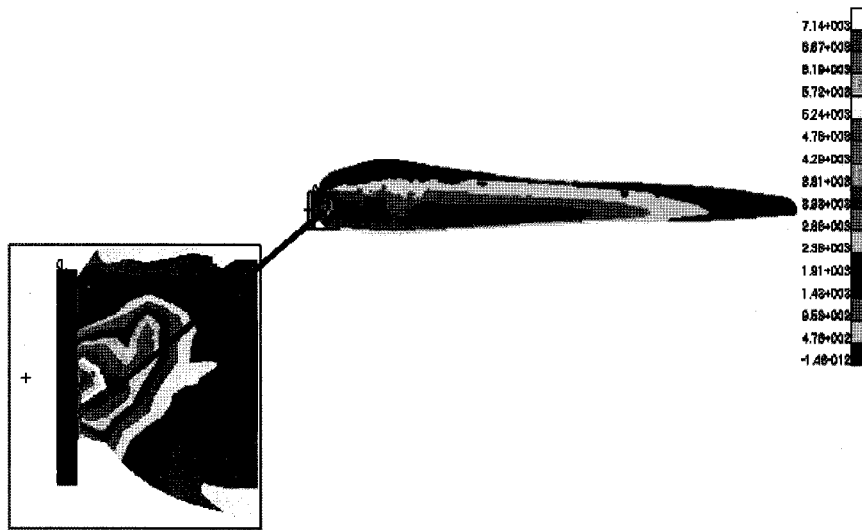
이 과정에서 블레이드의 뿌리 부분 형상은 구조 해석과 함께 축차적으로 변경되어야 한다. 일반적으로 플렌지는 힘을 받는 부분이므로 주물 제작하고, 허브는 하중 조건의 만족 및 정확도를 위해 알루미늄 합금의 절삭 과정을 통해 제작된다.

블레이드의 재료는 유리섬유 등의 복합재료를 사용한다. 복합재료의 적층 방법은 재료의 구조 공학적 물성 값들을 결정하는 중요한 파라미터다. 따라서 경험적으로 유효한 몇 가지 방법 중에서 그림 8 과 같이 적당한 적층 방법을 제시한다. 적층 시에 주로 검토할 사항은 강도, 무게, 두께, 방향성 등이다.

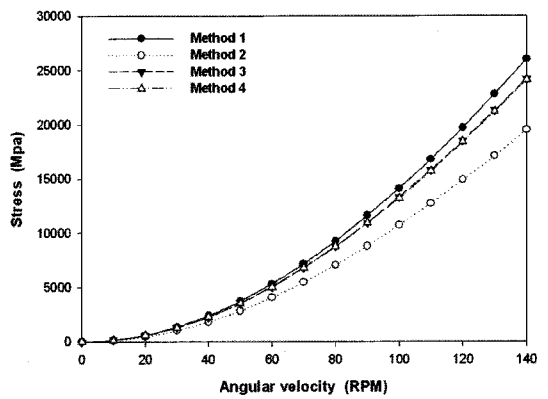
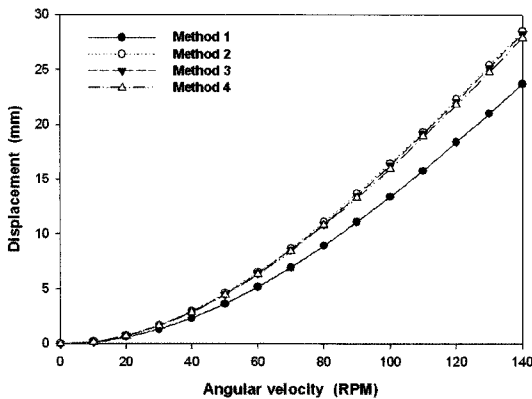
이렇게 설계된 블레이드는 유한요소법에 의한 구조해석을 거쳐 구조적인 안전성을 검증한다. 물론 이 과정에서 실험 시편 또는 시험용 블레이드를 따로 만들어서 하중 및 피로 시험을 시행하기도 한다. 그림 9는 이러한 블레이드 모델을 전산 상으로 정적 해석한 결과이다. 일단 공력 설계 데이터로부터 얻어진 하중 분포를 경계 조건으로 하여 응력



[그림 8] 복합 재료의 적층 방법 설계



a) 응력분포



b) 최대 변위와 최대 응력

[그림 9] 블레이드의 정적 구조 해석

분포를 해석하고, 만일 구조적인 취약점이 발생할 경우 이 부분을 보강하고서 하중에 대한 강도를 만족시킬 때까지 반복적으로 시행한다. 다음 블레이드가 일정한 속도로 강체 회전하고 있다고 가정하고, 날개에 작용하는 원심력을 외력으로 입력하여 회전 속도에 대한 최대 변위와 최대 응력을 구한다. 이 과정에서 실현 가능한 최대 회전수일 때 모든 지점의 변위와 응력은 안전 계수(대략 20 정도를 잡음)를 고려하여 설계된 복합 재료 강도에 대한 허용치 안으로 들어와야 한다.

공탄성 설계

실제 블레이드는 때때로 강풍이 몰아치는 가혹 환경에서 고속으로 회전해야 한다. 따라서 지금까지와 같은 정적인 구조 설계만으로는 충분한 안전을 확보할 수 없다. 즉, 공기역학적 환경에 의해 회전수가 변하는 조건으로 동적 해석을 통하여 구조 동역학적 안정성을 검증해야 한다. 보통 그림 10과 같이 고유 진동수, 진동 모드와 같은 고유치들을 해석한다. 특히 블레이드의 굽힘 방향 떨림 고



유 진동수가 유동과 공진을 일으키지 않도록, 그리고 구조적으로 취약한 부분에 비정상적 진동 모드가 나타나지 않도록 설계해야 한다. 최근에는 많은 상용 코드들이 유동-구조 간섭과 같은 현상을 해석할 수 있는 모듈을 제공하기 때문에 이러한 공탄성 현상의 수학적 모델링에 대한 부담을 많이 덜어주

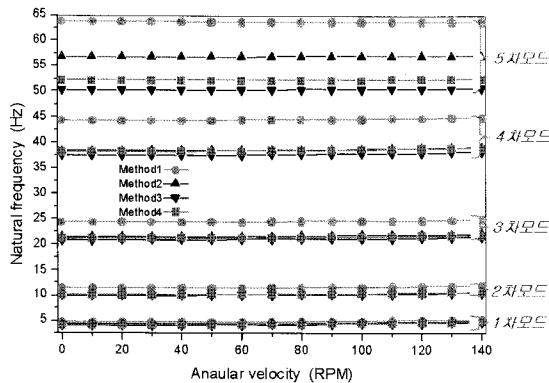
고 있는 현실이다.

대형 시스템의 설계

지금까지 풍력 블레이드의 일반적인 설계 방법에 대해 서술하였다. 현재까지 국내 대학 또는 연구소

모드	주파수(Hz)	주파수(Hz)	주파수(Hz)	주파수(Hz)	모드형상	
	Method1	Method2	Method3	Method4		
1차모드	4.656	4.2775	4.0278	4.0983		
2차모드	11.401	10.099	9.9804	10.094		
3차모드	24.377	21.49	20.902	21.251		
4차모드	44.277	38.32	37.441	38.198		
5차모드	63.744	56.839	50.261	52.204		

a) 적응 방법에 대한 고유 진동수와 진동 모드



b) 회전 속도에 따른 고유 진동수

[그림 10] 블레이드의 동적 구조 해석

<표 1> 풍력 발전기 용량에 따른 풍력 블레이드 제원

발전 용량 (MW)	날개 길이 (m)	무게 (ton)
0.75	~ 25	2.4 ~ 2.8
2	~ 45	6.5 ~ 7
3	48 ~ 50	8.5 ~ 9

에서 용량 100 kW 이내의 소형 풍력 발전기의 터빈 블레이드를 설계하는 방법은 비교적 잘 정립되어 있다. 그러나 세부적으로는 아직도 해결해야 할 기술적 난제들이 많이 남아 있다.

최근 10여 년 동안 풍력 발전 시스템의 용량이 비약적으로 커져 왔고(표 1), 현재 대부분의 설계 원천 기술은 해외 전문 엔지니어링 회사로부터 막대

한 기술 로열티를 지불하고 전면 수입하고 있는 실정이다. 이제 풍력 에너지 시장이 열림에 따라 관련 산업에서 설계 기술이 가지는 비중이 높아지고, 앞으로 상용 대형 시스템의 고효율, 저풍속, 저소음 블레이드에 대한 설계는 풍력 부품 소재의 국산화를 위하여 우리가 시급히 해결해야 할 중요 과제가 되어가고 있다. ③