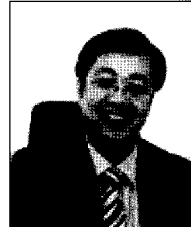


10kW급 풍력발전기 블레이드의 공탄성 해석

Aero-elastic Analyses of the Blades in 10kW-Level Wind Turbine System



장 세 명*



이 장 호*



김 두 기**

*군산대학교 기계공학부 조교수
**군산대학교 토목환경공학부 조교수

이번 호의 기획 특집은 "전산구조와 학제간 융합"을 다루고 있습니다. 현재 전산구조의 적용은 전통적인 구조해석의 영역을 넘어 의학, 물리, 전기전자, 바이오, MEMS 등 다양한 분야에서 그 적용 영역을 확대하고 있습니다. 본 기획 특집에서는 다양한 분야에서 성공적으로 활용되고 있는 전산 구조 관련 기술 사례 소개를 소개함으로써 전산구조를 통한 학제간 융합의 가능성을 보여 주고 있습니다.

1. 서 론

우리나라가 처음 풍력 발전기를 만들려는 노력은 지금으로부터 약 30여 년 전 한국과학기술연구원(KIST)에서 시작되었다. 유신 치하의 독재 정권 하에서, 그 시대의 과학기술은 중공업 진흥과 수출을 통한 경제 성장의 도구로 인식되었고, 특히 미군 철수와 냉전 시대 공산주의의 위협에 대비하여 가시적이고 빠른 결과를 내어야만 했다. 또한 당시 석유 파동으로 대표되는 에너지 위기는 신·재생에너지의 개발할 필요성에 대한 잠재적인 수요를 촉발하고 있었다. 1975년 경기도 화성군 엽섬에 설치된 2kW급 풍력 발전기가 현재까지 공식적으로 확인된 우리나라 최초의 근대적 ‘풍력 터빈(wind turbine)’이다.

학계 원로들의 증언에 의하면, 당시 태풍에 풍력 터빈의 구동축이 부러져서 블레이드가 통째로 떨어져 날아가 버리는 사고도 있었다고 한다. 국산 유도탄 개발 및 원자력 발전의 성공과 대비되어, 풍력 에너지 전문가들에게는 오늘날까지도 매우 치욕적인 사건이 아닐 수 없다 하겠다. 서구 문명에서 풍차(windmill)의 역사는 오늘날까지 무려 수백 년에 이르는 반면, 불과 수 년 만에 이를 따라잡으려고 한 선배들의 무리수는 오늘날까지도 우리에게 많은 교훈을 준다.

초창기 ‘낭만의 시대’에서부터 이제 지상의 현실에 이르기

까지, 풍력 발전 시스템이 가지고 있는 가장 심각한 문제 중 하나는 바로 ‘공탄성(aero-elasticity) 해석’과 관련된 문제이다. 바람이 가진 에너지를 발전기의 회전 에너지로 변화시키기 위해서는 날개, 즉 블레이드가 필요하다. 풍속, 즉 바람의 속도(크기와 방향)는 끊임없이 변하기 때문에, 이 블레이드는 일반적인 기계나 토목 구조물과 달리 매우 가혹한 조건에서 운전되어야 한다. 공기의 흐름은 블레이드 구조의 표면에 압력 변화를 발생시키고, 구조 동역학적 고유 진동과 끊임없이 상호작용하면서 외력으로 작용한다. 또한 구조물 표면 형상의 변화는 공기 흐름의 변화를 유발하기 때문에 이 문제는 태생부터 비선형 피드백(feedback) 문제인 것이다.

지금까지 현장에서의 풍력 발전기 설계는 대부분 정적인 하중에 대한 구조 설계를 한 후, 여기에 충분한 안전 계수를 적용하는 방법을 사용해왔다. 최근에 와서야 IEC나 ISO와 같은 국제 표준화 인증과 관련하여 동적 안정성이나, 피로 해석이나, 건전성(health) 모니터링이나 하는 분야들이 비로소 막 연구되기 시작하고 있다. 불과 오륙 년 전만 하더라도 떨어지자간 풍차 날개를 주우러 제주도 굴 밭을 헤매야 했다는 전설 같은 이야기들을 관련 연구원들로부터 심심찮게 듣다가, 이제 우리는 무서울 정도로 천지개벽된 새로운 시대에 살고 있는 셈이다.

잠시 또한 야사(野史)를 밝히면, 이 과제에의 성공 뒤에는

예전 300W급 초소형 풍력 터빈 블레이드에 대한 개발 경험이 밑바탕이 되었다. 이 블레이드는 공력 설계를 통해 회전 반경을 48 센티미터까지 낮추었지만, 정격 회전 속도가 950rpm 이상이나 되었다. 이는 소형일수록 블레이드의 끝단 속도를 최적으로 맞추기 위해 더 빨리 회전시켜야 하기 때문이다. 그러나 유리 섬유 복합재료로 만든 이 블레이드는 풍동 시험 중에 산산이 부서지고 말았다. 일반적으로 풍력 엔지니어들은 시스템의 효율을 높이기 위해 날개의 형상과 같은 공력 설계에 치중한다. 그러나 시스템의 신뢰성(reliability)은 결국 구조 동역학적 안정성과 특히 공탄성 해석에 관계됨을 그 당시 처절한 교훈으로부터 배웠다.

최근 풍력 시장은 매우 빠른 속도로 성장하고 있다. 풍력 에너지는 지금 현재까지 사실상 “현실적으로 이윤을 내고 있는 유일한 대체 에너지원”이다. 그래서 덴마크의 Vestas와 같은 거대 기업들이 본격적으로 사업을 벌이고 있다. 현재까지 상용화된 제품들은 발전 용량이 3~5MW급에 이르고, 블레이드 길이를 기준으로 하면 48~50m나 된다(개당 무게는 약 8.5~9톤 정도). 소형 풍력은 이러한 시장 상황에서 우리와 같은 기술 후발국이 노려볼 수 있는 틈새시장(niche market) 정도가 될 것이다. 지금까지의 설치 용량이 가장 큰 영역은 10~30kW급이고, 전력 계통 공사가 어려운 알래스카나 몽고, 또는 우리나라 벽지 도서 등에서 독립 전원 혹은 기존의 디젤 발전기와의 복합(hybrid) 방식의 발전이 경제적으로 현실성을 가지고 있다는 연구 결과들이 속속 등장하고 있다.

이러한 기술적 문제점과 시장 환경으로부터 풍력 블레이드, 특히 수 kW급의 소형 풍력 블레이드의 공탄성 해석은 매우 중요한 이슈가 아닐 수 없다. 풍력 터빈에 대한 제 관련 분야는 너무나도 광범위하다. 이러한 분야는 대체로 규모면에서 거대하면서도 매우 섬세한 기술들을 요구하고 있다. 본 저자들이 좁쌀만큼 아는 지식으로 이 모든 분야를 말하는 것은 사실상 불가능하므로, 본 기사에서는 오직 저자들이 지난 2년 남짓 수행했던 산업자원부의 “10kW급 한국 표준형 블레이드 설계 및 개발”과제에 관련한 범위 내에서 겪어야 했던 과정(procedure)과 어려움 등에 대한 기술로 한정할 예정이다(발전기 제원은 표 1 참조).

2. 블레이드의 공력 설계 및 시험

블레이드의 공력 설계를 제대로 이해하려면, 먼저 공기의 흐름에 대해 알아야 한다. 날개 주변에 흐르는 공기는 양력(lift)과 항력(drag)을 만든다. 풍력 터빈의 경우에는

표 1 10kW급 풍력발전기 블레이드의 제원

구분	사양	구분	사양
모델명	KAJ-01-2005	속도 제어	실속 제어 (stall control)
정격 출력	10 kW (풍속 10 m/s)	정격 회전수	173 rpm (풍속 10 m/s)
최대 출력	12.5 kW (풍속 12.5 m/s)	날개 직경	7.08 m (2R)
기동 풍속	3.2 m/s	날개 수	3매
최대 풍속	50 m/s		

이 둘 모두를 회전 에너지로 이용할 수 있다. 예를 들어 네덜란드에서 수리나 제분을 위해 사용한 고전적인 풍차에서는 주로 항력을 이용하여 강한 토크를 발생시켜왔다. 그러나 공기역학적으로 설계된 대부분의 에어포일들은 양력 계수가 항력 계수의 10배 이상에 해당하므로, 수평축 풍력 터빈에서는 주로 양력을 이용하는 방식이다.

잠시 교과서적인 차원 해석을 하면 다음과 같은 식들을 얻을 수 있다.

$$\langle \text{토크} \rangle T = \frac{1}{2} \rho U^2 (\pi R^2) R C_T \tag{1}$$

$$\langle \text{동력} \rangle P = \frac{1}{2} \rho U^2 (\pi R^2) U C_P \tag{2}$$

여기서 ρ 는 공기의 밀도, U 는 풍속, R 은 블레이드의 유효 회전 반경, 그리고 C_T 와 C_P 는 각각 토크 계수와 동력 계수(power coefficient)를 의미한다. 이 터빈의 회전 각속도를 Ω 라고 하면,

$$P = T \Omega \tag{3}$$

이므로, 식 (3)에 식 (1)~(2)를 각각 대입하여 정리하면,

$$C_P = \frac{R \Omega}{U} C_T \tag{4}$$

와 같이 된다.

따라서 다음과 같은 파라미터를 하나 정의한다면,

$$\langle \text{끝단 속도비} \rangle \lambda = \frac{R \Omega}{U} \tag{5}$$

식 (4)에서 토크 계수는 동력 계수와 끝단 속도비의 함수에 불과하게 된다.

그럼 1은 이러한 두 무차원 파라미터들의 관계를 나타

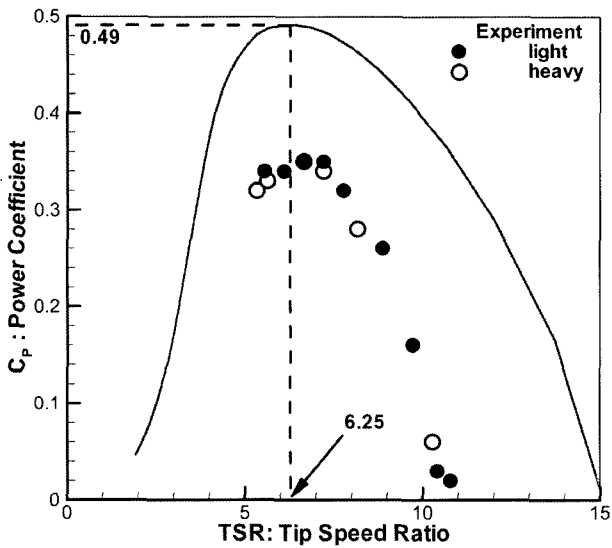


그림 1 전형적인 끝단속도 비와 동력 계수의 관계

낸다. 이 그림은 저자들이 설계한 한국형 10kW 풍력 터빈의 원시 설계 데이터이다. 대부분의 풍력 터빈에서는 블레이드의 크기와 상관없이 대체로 끝단 속도비가 6~7 정도에서 최대 출력이 발생한다. 운동량 보존법칙(베르누이 방정식)을 적용하여 보면, 동력 계수는 다음과 같은 '베츠의 한계치(Betz's limit)'라고 하는 한계 값을 갖는다는 사실을 이론적으로 증명할 수 있다.

$$C_{P,max} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (6)$$

식 (6)과 같은 한계 값은 우리가 기술적으로 도달할 수 있는 터빈 효율의 최대 값이라고 할 수 있다. 풍력 쪽의 일을 하다보면, 많은 '거리의 과학자'들과 교분이 생기게 된다. 기발한 아이디어로 새로운 풍력 시스템을 설계했다고 주장하는 분들에게, 이러한 베츠 해석을 시켜 보면 그 시스템의 효율을 대략 예측할 수 있다. 만일 식 (6)보다 더 큰 동력 계수 값을 얻었다면, 100% 거짓말이니 더 이상 귀담아 들을 필요가 없을 것이다.

2.1 공력 설계

모든 다른 종류의 설계와 마찬가지로 풍력 블레이드의 설계 또한 두 가지 방식이 있을 수 있다. 한 가지는 '정 방향 설계'라고 하는 것으로, 주어진 블레이드 형상과 유동 조건에 대해 양력 분포나 유도 속도와 같은 블레이드 성능 지수들을 계산해 내는 방법이다. 반대로 '역방향 설계'는 원하는 성능 지수를 주고, 반대로 스펠 위치에 따른 코드 길이나 비틀림 각 분포와 같은 블레이드 형상을 얻어내는 방법이다. 이러한 두 방법의 차이를 비교하는 개념도가 그림 2에 제시되어 있다.

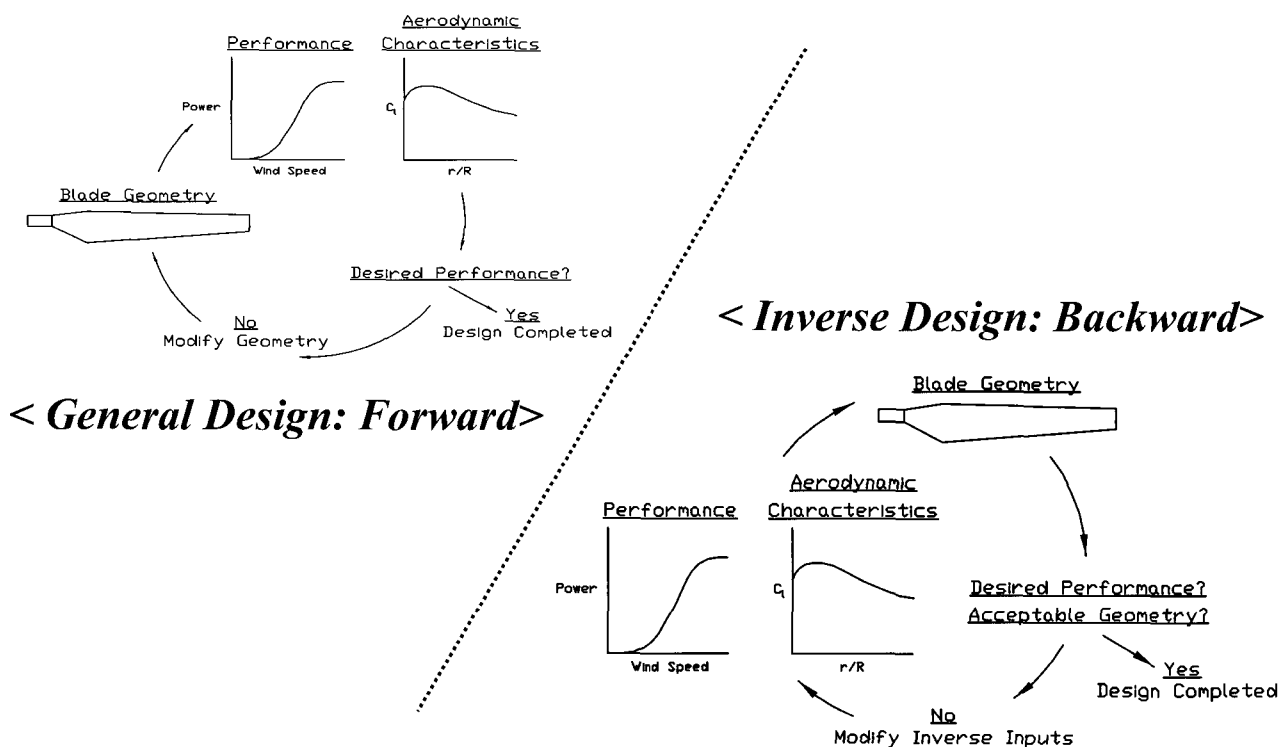


그림 2 정방향 설계와 역방향 설계의 차이점

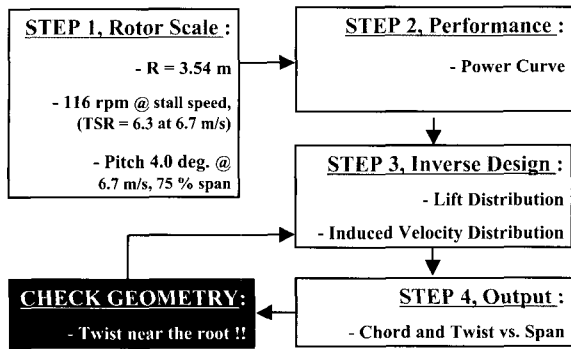
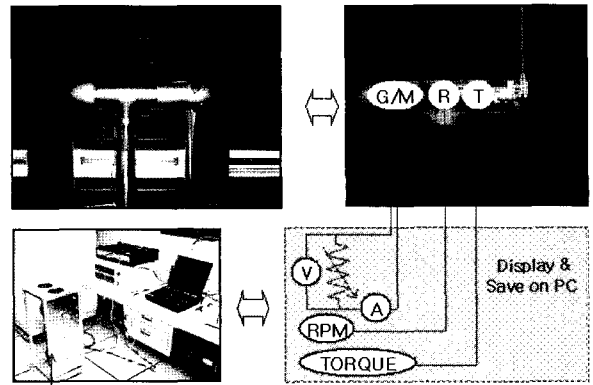


그림 3 역설계 방법에 의한 10kW급 풍력 블레이드 설계

본 저자들은 연구에서 역방향 설계 방법을 사용하였는데, 이 방법은 초기 기본 형상이 없는 상태에서 문제를 더 빠르고 쉽게 풀 수 있다는 장점이 있기 때문에 종종 최적 설계 방법으로 많이 사용되고 있다. 공력 해석 방법은 블레이드 요소법(blade element method)이라고 하는 방법으로, 블레이드를 20여 개의 작은 요소들로 분할한 다음 각각의 요소에 작용하는 평균 공력 힘과 모멘트를 계산하여 이들을 더하여 최종 결과를 얻는다. 이 방법은 일반적인 전산 해석법에 비해 계산이 빠르다는 장점이 있지만, 동적 실속(dynamic stall)에 의한 실속 지연(stall delay) 모델을 사용해야 한다는 약점도 있다.

역설계 방법에 의한 공력 설계의 예를 그림 3에 나타냈다. 먼저 주어진 유동 조건을 결정한다 (STEP 1). 예를 들어 유효 반경 3.54m, 정격 회전수 116 rpm의 새로운 형상의 블레이드를 설계하려고 한다. 이 데이터들은 앞에서와 같이 운동량 이론을 이용하여 차원 해석을 해 보면 원하는 동력(최대 12.5kW)에 대한 데이터를 얻을 수 있다. 여기서 25%의 안전율을 적용하였다. 다음 단계는 원하는 동력



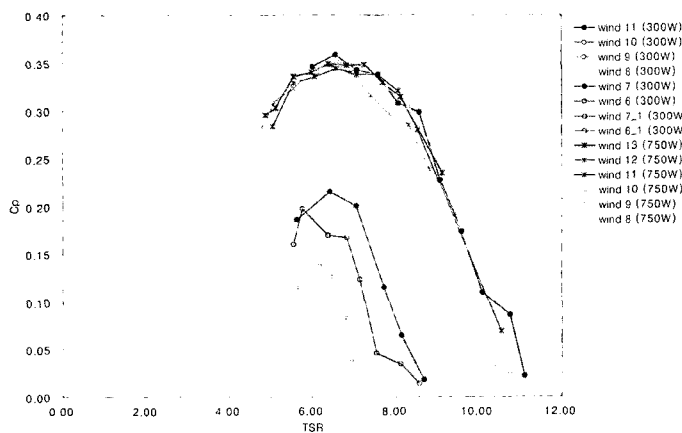
가변저항

그림 4 풍동 시험 방법(공군사관학교 대형 풍동, 2005. 4.)

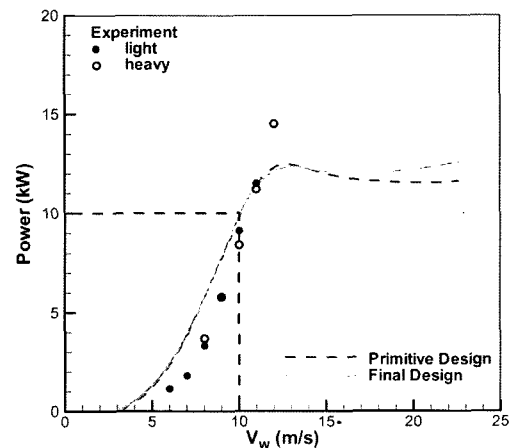
곡선이 얻어지는지 확인한 다음(STEP 2), 이러한 조건 하에서 날개의 양력 분포와 유도 속도 분포를 주고(STEP 3), 코드 길이와 비틀림 각 분포를 얻어내면(STEP 4), 블레이드의 기하학적 형상을 얻을 수 있다. 그러나 이 방법은 가끔 특히 블레이드의 깃뿌리 부분에서 물리적으로 타당하지 않은 해로 수렴할 수 있다. 따라서 이 부분은 수동으로 설계자가 개입하여 매끄러운 형상을 가지도록 적절한 조치를 취해야 한다.

2.2 풍동 시험

이론적인 계산을 통하여 설계된 풍력 블레이드는 반드시 실험을 통하여 검증하여야 한다. 그런데 축소 시제에 의한 풍동 시험에는 현실적인 어려움이 있다. 바로 실물과 모형에 대하여, 동력 계수와 끝단 속도비 뿐 아니라 레이놀즈 수(Reynolds number)와 같은 유체 파라미터도 일치



(가) 동력 계수 vs. 끝단 속도비



(나) 예측된 동력 곡선과의 비교

그림 5 풍동 시험 데이터

를 시켜줘야 원래의 시스템에서와 동일한 유동 현상을 관찰할 수 있다는 것이다.

$$Re = \frac{U(2R)}{\nu} \quad (7)$$

여기서 공기의 물성치인 동점성 계수(ν)를 동일하게 둔다고 하더라도, 1/7로 축소된 모형에서 풍동의 유속을 7배로 늘려야 한다. 게다가 식 (5)의 끝단 속도비를 맞추어 주려면 회전 속도는 무려 49 배로 증가시켜야 한다. 이러한 조작은 실제 풍동에서 거의 불가능에 가깝다. 따라서 본 연구에서는 식 (7)의 레이놀즈 수에 대한 상사성을 일치시키는 대신 나머지 두 개 파라미터(동력 계수, 끝단 속도비)의 관계를 구현하는데 치중하였다. 실제로 실속 영역 이외 일반적인 비점성 유동 구간에서는 이러한 방법이 유효하다.

공군사관학교에서 2005년 4월 20일부터 한 달 동안 있었던 풍동 시험은 다음과 같은 방법으로 실시되었다(그림 4). 일단 모터를 이용하여 블레이드 모형을 원하는 회전수로 가동시킨다. 이 때, 가변 저항을 이용하면 회전수를 조절할 수 있다. 그 다음 주어진 풍속에서 축의 토크를 측정한다. 이 순간 모터는 발전기 모드로 전환되어 실제 발생하는 전기의 전압과 전류를 구하여 축이 발생시키는 동력을 동시에 측정할 수 있다.

그림 5에서는 이러한 방법으로 측정된 데이터들을 제시하였다. 실제 실험 장치의 축 베어링 등에서 실물보다 큰 마찰 손실이 발생하는 점과 측정 장치의 오차를 감안하고라도, 대체로 실속 이전에 원하는 설계 값에 근접하는 동력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

2.3 전산 해석을 통한 설계 수정

블레이드 끝단의 경우, 3차원 전산유체역학(CFD) 유동 해석을 통해 끝단 와동(tip vortex)의 영향을 고려하여, 동력 손실과 공력 소음이 적은 형상으로 설계한다. 이러한 과정을 그림 6에 나타냈으며, 해석 결과 가장 목적에 부합하는 형상을 고를 수 있었다. 공력 해석을 완전히 마친 설계 초안은 그림 7과 같다.

3. 블레이드의 설계 및 제작

풍력블레이드의 제작 방법은 발전 용량에 따라 다르다. 일반적으로 경제적인 이유 때문에 풍력발전기가 대형화되고 있는 추세이지만, 틈새시장을 겨냥한 소형 발전기로

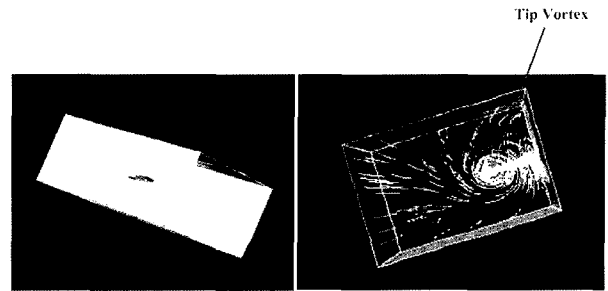


그림 6 전산 유체 해석에 의한 끝단 와류의 형상 해석

꾸준히 제작되고 있다. 표 2는 풍력발전기의 대형화 추세에 따른 날개 길이와 무게를 나타내고 있다.

표 2 풍력발전기의 용량에 따른 풍력 블레이드의 변화

발전 용량	날개 길이	무게
750kW	약 25m	2.4~2.8 ton
2MW	약 45m	6.5~7ton
3MW	48~50m	8.5~9ton

이러한 대형 구조물인 로터(rotor)블레이드는 태풍 등의 열악한 환경에서 견딜 수 있는 안전 구조물이어야 한다. 이러한 이유로, 풍력 발전이용 로터 블레이드를 제작하는 소재는 국제적으로 인증된 소재를 사용하고 있으며, 대부분 glass fabric fiber와 epoxy resin 등과 같은 것을 사용하고 있다. 로터 블레이드 원자재의 경우, 설계 및 테스트

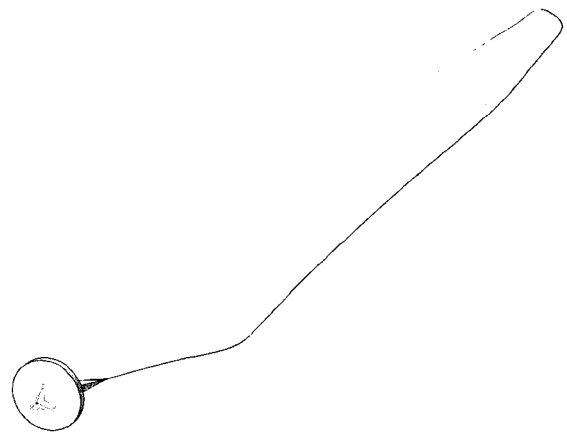


그림 7 완성된 공력 설계 시안

인증과는 달리 제품의 현장 시험(field test)를 거쳐 실제 가동 환경에서 이상이 없음을 증명하여야 하기 때문에 현장 시험 인증 기간이 약 10년 정도 걸리는 것으로 알려져 있다.

본 기고에서는 10kW급 풍력 블레이드를 기준으로 제작방법에 대해 살펴본다. 3차원 CAD를 활용하여 설계된 풍력 블레이드는 풀렌지, 모형제작, 주형제작, 합체 등의 순서로

제작된다. 여러 개의 풍력블레이드가 장착되어 회전하게 되는 허브에 연결되는 되는 플렌지는 블레이드와 일체로 연결되지 때문에 제작할 때는 블레이드와 한 몸체로 취급한다.

아래 그림 8은 제작하기 전 설계단계에서 허브와 플렌지의 조립성을 검토하는 그림이다. 그림과 같은 방법으로 검토된 조립성에 문제가 없다고 판단되면 가공을 하는데 플렌지는 주물제작, 허브는 알루미늄합금의 절삭과정을 통해 제작된다.

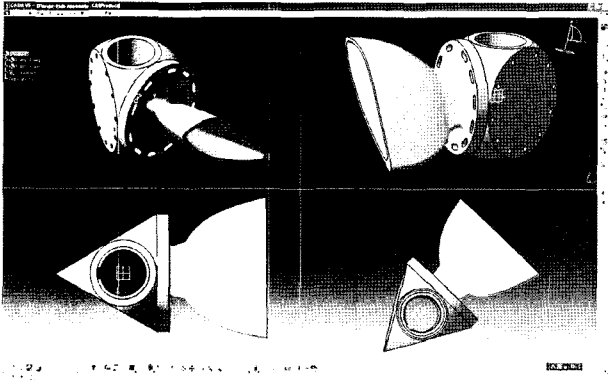


그림 8 허브와 플렌지

설계된 블레이드만 수치 가공기를 사용하여 목형으로 가공된다. 가공된 목형을 이용하여 그림 9와 같은 주형을 제작할 수 있다. 그림 9는 상하로 제작된 주형위에 복합소재가 채단되어 올려있는 모습이다. 이와 같이 상하로 제작된 주형위에 복합소재와 접합제를 차례로 적층하고 플렌지를 넣고 합체하면 블레이드가 완성된다.

그림 10은 풍력블레이드의 적층방법의 예를 보인 것인데 적층 시 검토할 사항은 강도, 무게, 두께, 방향성 등이다. 대부분 상향 적층 후 접합하는 방식을 사용하는 현재 기술수준에서는 날개의 두께가 얇게 설계되는 부분에서 상하 분리에 제작

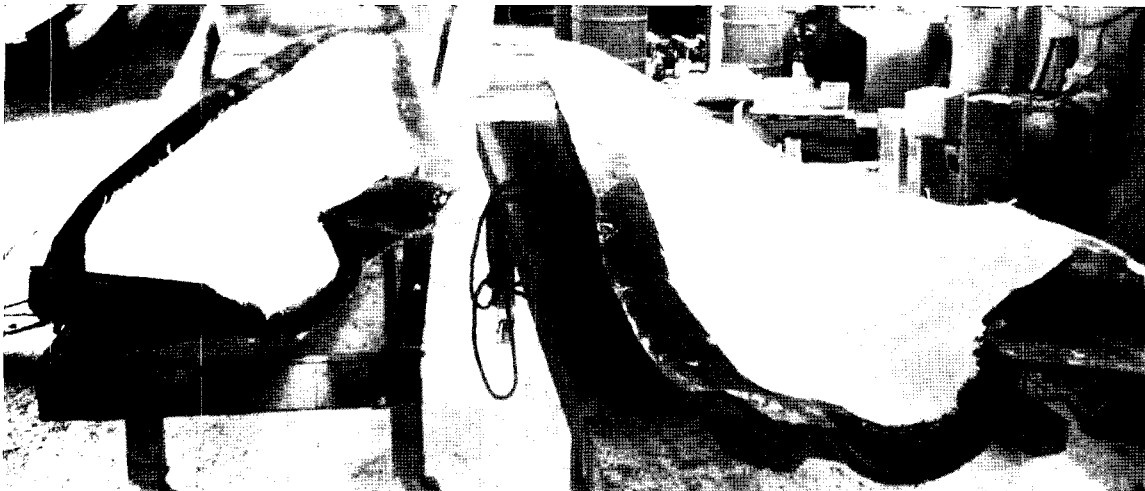


그림 9 주형과 적층

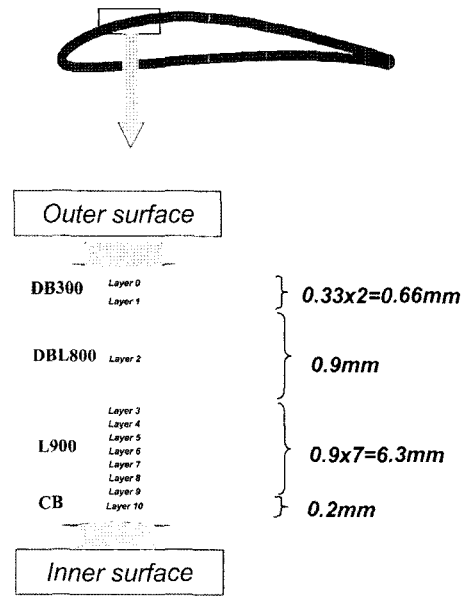


그림 10 풍력블레이드의 복합재료의 적층 예

충분한 적층두께가 확보되지 않아 제작 후 강도가 확보되지 않을 수 있으므로 이에 대해 충분한 검토가 필요하다.

4. 블레이드의 공탄성 해석

블레이드는 중량을 줄이기 위해, 복합 재료를 사용하여 제작한다. 전 절에서 결정한 블레이드 형상에 대해 최적의 복합재료 적층 방법을 선정하기 위해, 3~4가지의 적층 방안에 대해 정적 및 동적 해석을 통해 가장 좋은 성능을 보이는 방안을 선택하였다. 여기서 정적 해석에서는 회전속도에 따른 원심력을 외력으로 작용시켜 블레이드에 발생하는 최대 변위와 응력분포를 검토하였다. 참고로 동적 운영 조건에서 가장 많은 하중을 받는 부분은 허브 연결부이며, 운영

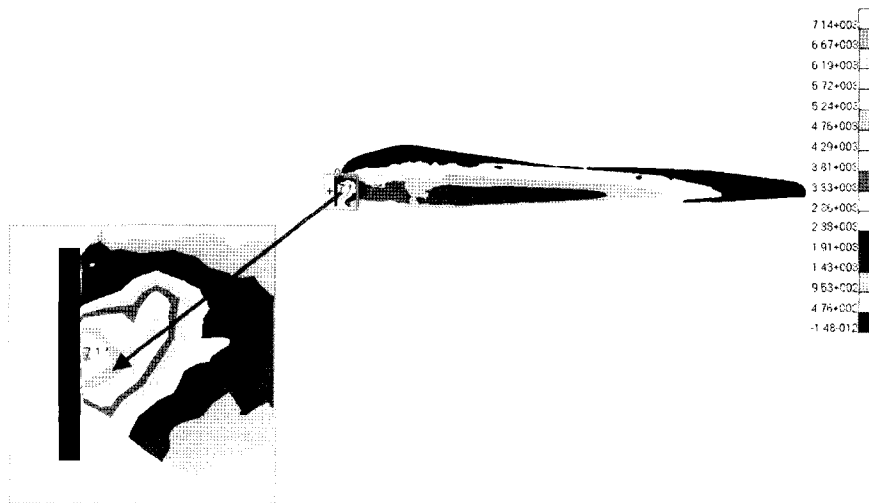
중에 응력이 집중되는 부분에서 피로 파손(fatigue failure)이 일어나지 않도록 구조적 보강조치를 하도록 하였다. 동적 해석에서는 자유진동해석을 통해 고유진동수와 고유진동모드를 검토하였다. 본 해석은 공탄성 해석이 가능한 상용 코드인 ADINA를 사용하여 수행하였으며, 유체와 구조물의 상호작용을 고려한 공탄성 해석은 현재 두 가지 관점에서 연구를 수행하고 있다. 첫째, 블레이드가 정지되어 있는 상태에서 풍속을 변화해 가면서(그림 11), 둘째, 풍속이 일정한 상태에서 블레이드의 방향을 변화시켜가면서 구조물의 동특성을 고찰하고 있다(그림 12).

이러한 공탄성 해석에 대한 실험 및 검증은 추후 한국 표준과학 연구원과의 상호 협조를 통하여 별도 과제로 진행할 예정이며, 현재 실험에 대한 세부 일정과 방법을 협의 중에 있다.

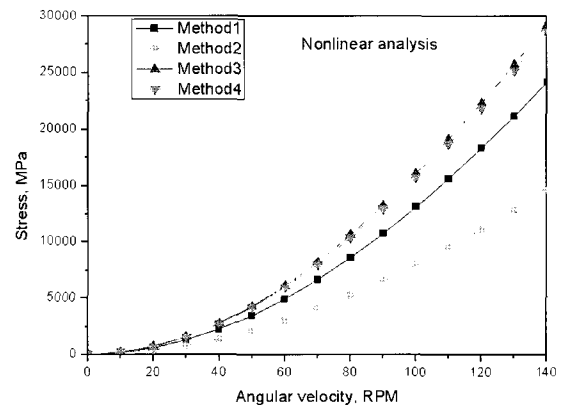
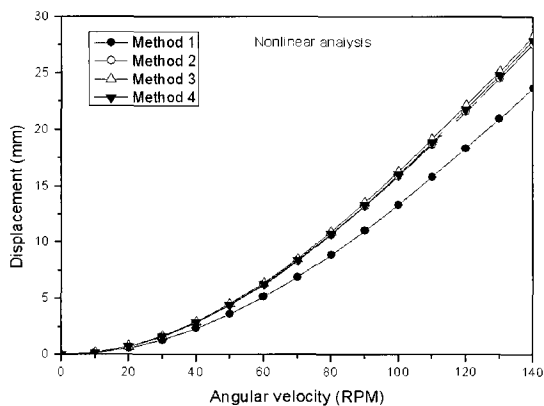
5. 소 결

본 기고에서는 저자들의 제한된 지식으로 10 kW급 풍

력발전기 블레이드 제작을 위해 지난 2년 남짓 수행했던 산업자원부의 “10kW급 한국 표준형 블레이드 설계 및 개발”과제에 관련한 범위 내에서 겪어야 했던 과정과 어려움 등에 대한 기술을 서술하였다. 풍력 블레이드는 공기역학적으로 최적화된 형태를 가져야 하기 때문에 표면이 형상이 매우 복잡하다. 또한 구조적 측면에서는 깃 부분 허브 연결 부위는 강구조로, 그리고 블레이드는 복합재료로 제작해야하기 때문에 해석이 쉽지 않다. 소형 블레이드일수록 회전 속도가 빠르기 때문에 공탄성 및 동적 피로 파손 문제가 중요해지고, 공기와 구조의 상호작용에 대한 충분한 고려가 있어야 비로소 설계 안전성을 인정받을 수 있다. 소형 풍력 발전 시스템의 원천 기술 개발을 위하여 각 부품들에 대한 기초 기반 기술의 확보는 매우 중요하다. 풍력 블레이드는 이러한 핵심 기술들 중 가장 중요한 요소 기술 중에 하나에 해당하며, 본 기고를 통해 독자들의 관심유도와 풍력발전 관련 기술의 발전에 미력하나마 도움이 될 수 있기를 소원하는 바이다.



(가) 응력분포

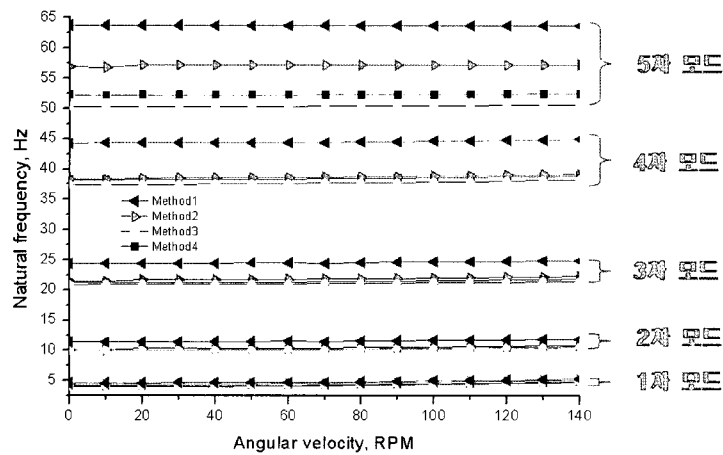


(나) 최대변위와 최대응력

그림 11 블레이드의 정적 해석

모드	주파수 (Hz)	주파수 (Hz)	주파수 (Hz)	주파수 (Hz)	모드 형상	
	Method1	Method2	Method3	Method4		
1차 모드	4,6571	4,2786	4,0278	4,0922		
2차 모드	11,412	10,106	9,9804	10,092		
3차 모드	24,402	21,506	20,902	21,243		
4차 모드	44,281	38,323	37,441	38,202		
5차 모드	63,782	56,877	50,261	52,229		

(가) 적층방법에 따른 고유진동수와 진동모드



(나) 회전속도에 따른 고유진동수

그림 12 블레이드의 고유치 해석

감사의 글

본 기고는 “10 kW급 소형 풍력발전기 표준형 블레이드의 설계 및 개발(2004-N-WD12-P-02-3-010-2004, 2005-N-WD12-P-02-3-010-2005)” 과제의 일부분으로서 산업자원부의 재정 지원으로 수행되었습니다. 저자들은 이러한 학술 지원에 감사드립니다.

참고문헌

김두기, 구조동역학, 구미서관, 2005.
 서현수, “서해안 도서 지역의 재생 에너지 복합 전원 시스템의 경제성 및 환경 영향 평가,” 2007, 군산대학교 석사학위논문.
 이수갑, 신형기 외, “750 kW급 고유모델 (한국형) 풍력 블

레이드의 최적설계 및 풍동실험”, 2001, 산업자원부.
 이수갑, 최기영, 장세명, 헬리콥터 공학 (원제: S. Newman, The Foundation of Helicopter Flight) 중 “풍차”, 인터비전, 2003, pp.325~334.
 이장호, 장세명 외, “10 kW급 소형 풍력 발전기 표준형 블레이드의 설계 및 개발”, 2006, 산업자원부.
 장세명, 서현수 외, “수평축 및 사보너우스 풍력 터빈 블레이드의 전산 설계”, 2004, 한국에너지기술연구원.
 이인, “전산유체역학기법을 이용한 비행체에 대한 고성능 공탄성 해석 및 응용,” 한국전산유체공학회 추계학술대회 초청강연, 2007, pp.1~2.
 M.S. Selig et al., Summary of Low-speed Airfoil Data, Vol 1., Soar Tach Pub., 1995.
 S.M. Chang, “Effect of Tip Shape to the Noise in the Small Wind Turbines”, NOVEM 2005, Saint Raphael, France, April 2005. [7]