

2MW 복합재료 풍력터빈 블레이드의 구조 최적화 설계

한국과학기술정보연구원
전문연구위원 장태현
(changtae@reseat.re.kr)

1. 서론

수평축 풍력터빈(HAWT:Horizontal-Axis Wind Turbine) 블레이드(blade)의 구조 최적설계를 하기 위해 MATLAB(Matrix Laboratory)을 사용되었다. 풍력터빈은 낮은 에너지비용에 부합하고 로터크기에서 더욱 유연하고, 가볍고, 그리고 강한 블레이드 설계의 해를 제공하는 복합재료를 사용하여, 터빈의 길이는 82m, 수평축 풍력터빈이 개발되었다.

국내에서 풍력터빈 설계에 관한 연구는 약 75편정도 발표되었다. 정지훈 등(1)은 풍력터빈 블레이드용 익형의 경우 운용 조건에서 높은 양항비를 가지도록 설계되나 풍속, 풍향의 변동에 의해 운용조건에 변화가 발생할 경우 성능의 저하가 발생할 수 있어, 이러한 운용조건의 불확실성을 고려하여 풍력 터빈 블레이드용 익형의 신뢰성 기반 강건 최적 설계를 수행하였다. 공창덕(2) 등은 유한 요소 상용 코드인 MSC. PATRAN/NASTRAN을 사용하였다. 국내 기상과 같이 저 풍속 지역에 적합한 500W급 수직축 풍력 터빈에 관한 연구로서 공력 설계를 통해 저풍속에서도 고효율과 저소음을 가진 형상을 제시하였으며, 복합재료를 적용하여 블레이드의 구조 설계를 수행하였다.

최재혁 등(3)의 논문에서는 소음을 저감하고 구조적 안전도를 향상시키기 위하여 10kW급 소형 복합재 풍력터빈 블레이드를 해석 및 설계하였다. 풍력터빈 블레이드 설계의 기본 사항에 맞추어 블레이드의 스패ん 길이는 약 4m, 중량은 30kg 내외가 되도록 설정하였다. 풍력발전기용 블레이드는 경량화가 중요하므로 유리섬유복합재(glass fiber reinforce pastics), 탄소섬유복합재(carbon fiber reinforced plastics)가 사용되었다.

박광립 등(4)은 자연 섬유를 적용한 500W급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 구조 설계 연구를 수행하였고, 기존의 유리섬유 재질 적용 블레이드와 아마 섬유 재질 적용 블레이드의 구조 설계 결과를 비교하였다. 정지훈 등(5)의 다른 연구에서는 풍력터빈 블레이드의 다분야 통합 최적 설계를 위하여, 진동하는 비정상 공력하중에 의한 작동 수명을 고려한 최적화 과정을 수행하였다. 최적화 대상으로는 NREL의

1.5MW 급 풍력터빈을 베이스 라인으로 하였고, NREL의 FAST 프로그램을 이용하여 발전기의 정격 출력 및 블레이드에 작용하는 비정상 공력 하중 특성을 분석하였다.

김문오 등(6)의 연구는 설계된 블레이드의 유동해석 및 성능예측을 위하여 경제적으로 많은 지원이 필요한 대규모 풍동실험이 아닌 상용 CFD를 사용하여 보다 효율적으로 우수한 성능을 가지는 풍력 터빈을 설계하였다. 이진학(7)의 1MW급 풍력 발전 터빈 블레이드 연구에서는 풍력 터빈 블레이드의 형상 최적화를 위한 직접탐색 기반의 최적화 기법을 적용하고, 최적화 기법간의 성능을 비교하여 효과적인 방법을 제안하였다. 이를 위하여 수평축 풍력 터빈의 최적설계 코드인 HARP_Opt(Horizontal Axis Rotor Performance Optimizer)을 기반으로 연간 발전량 평가 방법을 수정하고, HARP_Opt에서 적용하고 있는 기존의 유전자 알고리즘과 함께 패턴 서치 방법을 추가 적용하였다.

김법석(8)은 복합재료 적층 모델링을 위해 ANSYS-ACP를 이용했고 유한요소해석은 ANSYS-Workbench로 수행하였다. 풍력터빈 시스템과의 상호작용이 고려된 블레이드 설계절차를 제안하였고, 저자의 다른 논문(11)에서는 2 MW 급 블레이드(KR40.1b)의 공력-구조 통합 설계결과를 제시하였다. 김기하 등(9)은 NREL FAST(Ver.7.02) 코드와 GH Bladed(Ver.4.4) 및 자체 구축한 CFD-Dynamics 연성해석 기법을 적용하여 NREL 5MW 풍력터빈에 대한 설계하중조건 해석을 수행하고 상호 비교연구를 수행하였다. 최근 중국에서 Toohid 등(12)은 2MW 복합재료의 수평축 풍력터빈의 구조 최적설계를 하기 위해 MATLAB을 사용하였다.

2. 풍력터빈 블레이드 설계

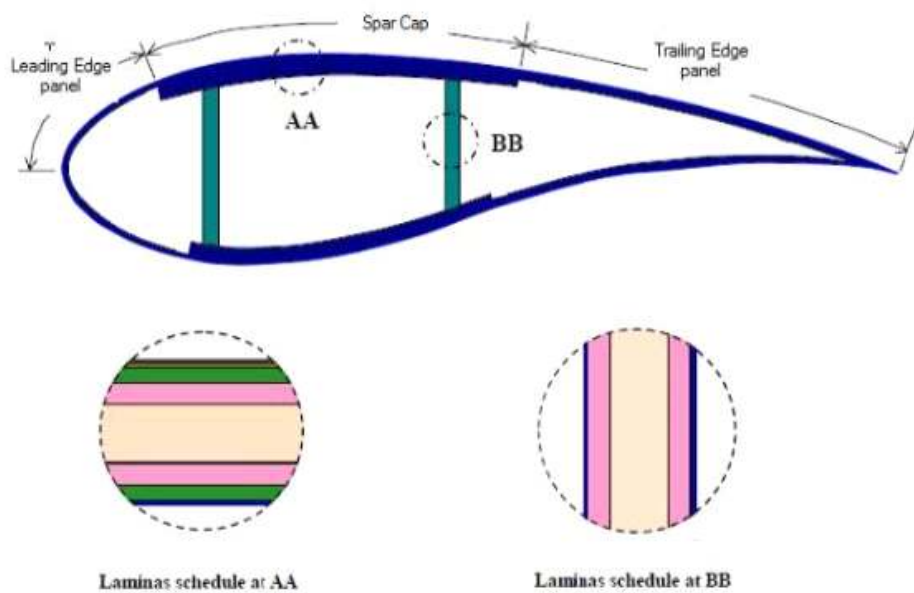
2MW의 풍력터빈에서 복합재료를 사용하는 블레이드를 설계에서 유한요소법을 이용하였다. 수정된 경계요소법 이론을 바탕으로 블레이드 표면의 압력분포는 XFOIL 소프트웨어를 사용하였다. 수학적 최적화 모델을 작성하고, 목적함수는 블레이드의 질량이다. 구조 최적화 문제를 풀기위해, 두 개의 결정론적 최적화 알고리즘(deterministic optimization algorithm)과 SPS(stochastic particle swarm)을 사용하였다. Sale(13)가 개발한 소프트웨어 Co-blade를 풍력터빈의 복합재료 블레이드의 구조계산에 이용하였다.

3. 복합재료 풍력터빈의 블레이드 설계

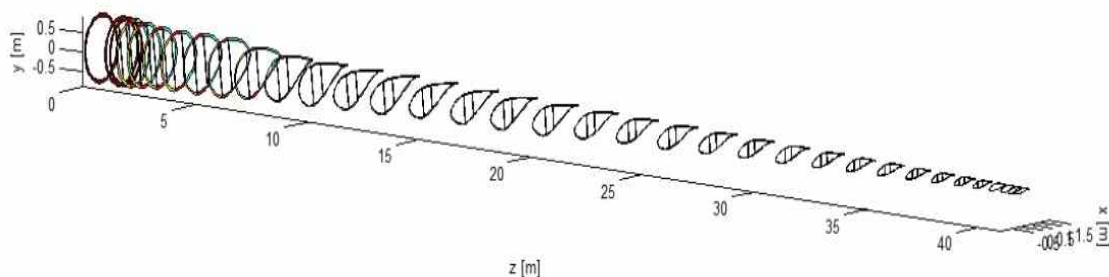
블레이드 길이 82m의 3개의 구조설계에서, 터빈의 변속과 변동 각은 HARP-Opt 터빈 최적화 코드를 사용하여 수행하였다. 이를 <그림 1>에 나타내고 블레이드 부분은 세 개로 나눈다. 왼쪽으로부터 오른쪽으로 구획이름은 LEP(leading edge panels), 익형 캡(spar cap), 그리고 TEP(trailing edge panels)이다. 두 개의 익형 캡 사이에서 아교로 접착된 웹(web)은 다른 층으로 구성한다. 익형 캡과 웹은 박스 같

은 구조를 형성한다. 이 구조는 주 빔과 같은 역할을 하여 플랩 웹(flap web) 강도를 향상시킬 수 있고, 두꺼운 바닥 부분은 두 개의 전단 웹(shear web)과 함께 주익형(spar)으로 바뀌고 블레이드 길이 전체에 미친다. 이를 <그림2>에 나타낸다.

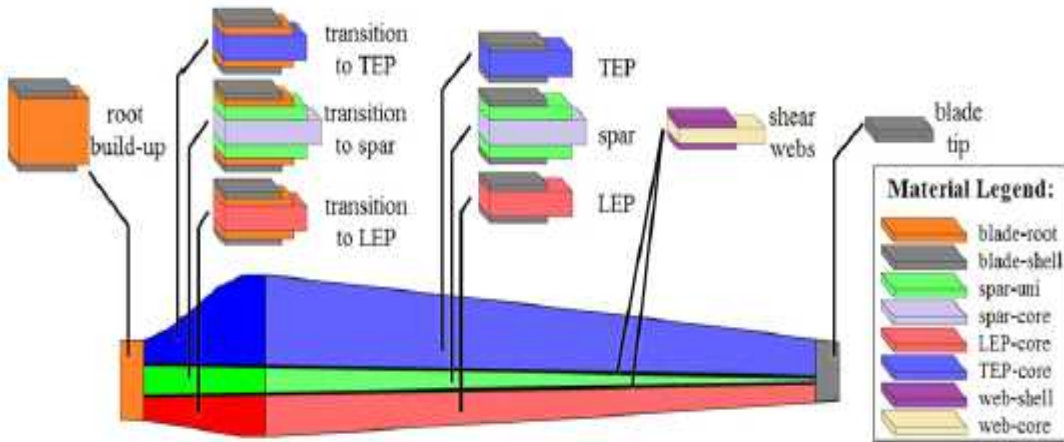
LEP와 TEP는 샌드위치 복합 박판제품이고, 블레이드의 공기역학상의 적합한 형태를 만든다. <그림3>와 <그림4>에서 나타낸바와 같이 블레이드는 총 8개의 실행 가능한 재료를 가진 9개의 독특한 박판 목록으로 구성한다. 블레이드의 길이를 따라 각 재료의 두께는 제작기준 사이에 선형적 변화가 분명하다. <그림4>는 재료별 2개의 제작기준을 나타낸다.



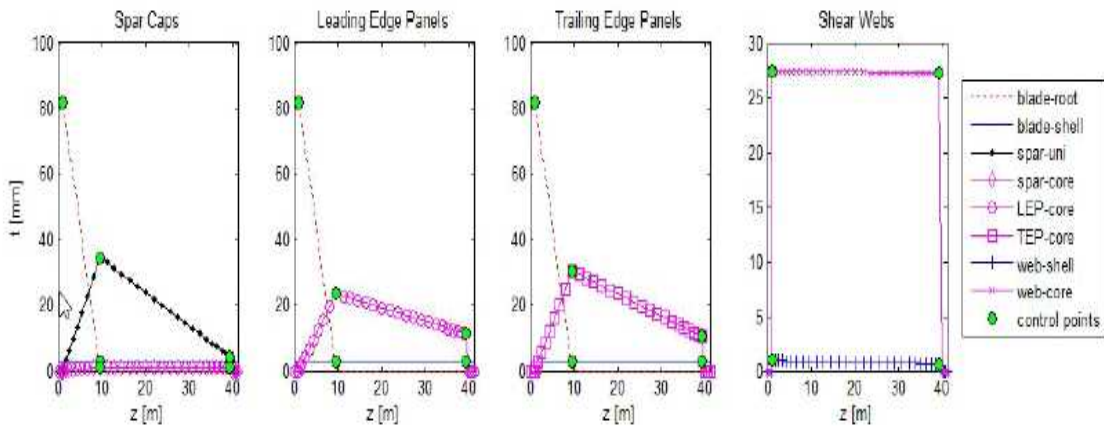
<그림1> 복합재료 블레이드의 횡단면¹²⁾



<그림2> 복합재료 블레이드 모델, 칼라는 다른 얇은 판의 겹친 순서를 나타낸다.¹²⁾



<그림3> 최적화 연구에서 터빈 블레이드의 평면도, 뿌리 건립에서 박판금속의 목록, LEP, TEP, 전단웹 그리고 블레이드 끝을 나타낸다.¹²⁾



<그림4> 재료의 두께는 블레이드 길이를 따라 제어점들 사이의 선형변화에 의해 한정된다.¹²⁾

Co-Blade에서 이론적 수행은 Euler-Bermoulli 이론과 복합 빔에 적용되는 전단유동이론과 함께 전통적 박판이론의 결합에 근거하였다. 블레이드는 flapwise와 edgewise 굽힘, 축변형, 그리고 탄성비틀림의 영향 하에서 컨틸레버(Contilever) 빔으로 묘사하였다. 빔 전단력 중심, 인장 중심, 그리고 블레이드 핏치 축으로 부터 질량 중심 사이의 치우침 때문에 부가적으로 굽힘, 연신 그리고 비틀림을 고려하였다. 빔의 횡단면은 얇은 벽으로 되고, 밀폐한 상태, 그리고 단일 혹은 멀티셀류러(mult-cellular)로 가정하였다. 횡단면의 각 빔의 외부는 평평한 복합재 박판의 연결로 이산화(discretize)되었다.

구조해석과 최적화 과정 동안, 9개의 독특한 박재 목록은 총 8개의 가능한 재료로 형성되었다. 이들 재료의 특성은 SNL(Sandia National Labs)의 Sandia 100m 블레이드로부터 얻었고, 유리섬유 적층판(glass fabric)과 에폭시 수지 재료를 선택하였다. 유리섬유 적층판과 에폭시의 복합재료의 세가지는 단방향 라미네이트(laminate), 양축(Sanertex[±45]₄)

그리고 3축 라미네이트이다. <표 1>에서 터빈 블레이드의 구조 설계에 이용된 기계적 특성을 나타낸다.

<표 1> 복합재료 블레이드의 기계적 성질¹²⁾

E11(Pa)	E22 (Pa)	G12(Pa)	v	ρ(Kg/m3)	Material name	Material usage
2.77E+ 10	1.36E+ 10	7.20E+ 09	0.4	1850	SNL Triax	blade root
2.77E+ 10	1.36E+ 10	7.2E+ 09	0.4	1850	SNL Triax	blade shell
4.18E+ 10	1.4E+ 10	3.00E+ 09	0.28	1920	E-LT-55 00[O]2	spar-uni
2.56E+ 08	2.6E+ 08	2.2E+ 07	0.3	200	Foam cover	spar-core
2.56E+ 08	2.6E+ 08	2.2E+ 07	0.3	200	Foam cover	LEP-core
2.56E+ 08	2.6E+ 08	2.2E+ 07	0.3	200	Foam cover	TEP-core
1.36E+ 10	1.33E+ 10	1.20E+ 10	0.5	1780	Saertex [±45]4	web-shell
2.5E+ 08	2.6E+ 08	2.00E+ 07	0.3	200	Foam core	web-core

4. 최적화 모델

4-1. 목적함수

블레이드 재료의 비용은 블레이드의 제작비용을 고려하지 않으면, 블레이드의 질량에 따라 저하될 것이다. 블레이드의 요구 강도와 강성에 대한 피로 수명(fatigue life)을 향상시키기 위해 가벼운 질량은 유리하다. 구조 목적함수(structural objective function) 식(1)은 부가적 페널티 함수(penalty function)로 형성되었고, 구속(constraint)은 페널티 함수 pi에 의해 고려되었다. 이 함수는 최대 강성, 버클링(buckling), 날개 끝 부분 휨 그리고 블레이드의 회전주파수로부터 고유 진동수(natural frequency)의 이탈을 충족시킬 동안 블레이드의 질량을 최소화 하도록 설정되었다. 구조 목적함수 $f(\bar{x})$ 는 블레이드의 질량이 극히 작을 때 최소화된다. 모든 페널티 함수 p1- p8는 1보다 작다. 수학적으로 이 최적화 문제는 다음식과 같이 나타낸다.

$$\text{최소화: } f(\bar{x}) = \text{블레이드 질량} \times \prod_{n=1}^8 \max\{1, p_n\}^2$$

$$\begin{aligned}
 p1 &= \frac{\sigma_{11, \max}}{\sigma_{11, fT}} \\
 p2 &= \frac{\sigma_{11, \min}}{\sigma_{11, fc}} \\
 p3 &= \frac{\sigma_{22, \min}}{\sigma_{22, yY}} \\
 p4 &= \frac{\sigma_{22, \min}}{\sigma_{22, yc}} \\
 p5 &= \frac{|\tau_{12}|_{\max}}{\tau_{12, y}} \\
 p6 &= \left(\frac{\sigma}{\sigma_{buckle}}\right)^a + \left(\frac{\tau}{\tau_{buckle}}\right)^\beta \\
 p7 &= \frac{tip \text{ 휨}}{Max \text{ tip } \text{휨}} \\
 p8 &= \max\left\{ \frac{MINFREQ_SEP}{\omega_m - \omega_{rotor}}, m = 1, \dots, M_{modes} \right. \\
 &\quad \left. \begin{array}{l} \text{종속: } \underline{x} \leq x \leq \overline{x_{UB}} \\ Ax \leq \overline{b} \end{array} \right. \quad (1)^*
 \end{aligned}$$

식(1)의 각 과정은 참고문헌(13)에서 복합재료 블레이드의 구조해석 소프트웨어의 사용자 안내서에 따른 계산식 들이다.

4-2. 설계 변수

설계변수들은 블레이드의 내부와 외부에서 spar-cap의 chord wise width, 날개 근원(blade root)의 재료두께, LEP, TEP, spar cap 내의 얇은 박판의 두께 그리고 블레이드 길이를 따라 shear webs 등이다. 블레이드의 외부표면은 복잡한 형상의 날개를 만들기 위해 사용되는 표면이다. 풍력터빈 블레이드의 초기 구조설계에 따르면, 설계변수의 제한은 <표 2>에서 C, CP1, CP2는 블레이드 부분의 익현 길이(chord length)이다.

* D. C. Sale, “Software for Structural Analysis of Composite Blades,” 2012.

<표 2>설계변수의 결과¹²⁾

Design variables	initial			GS			PS			PSO		
	blade station	CP I	CP 2	blade station	CP 1	CP 2	blade station	CP 1	CP 2	blade station	CP 1	CP 2
Width of spar cap(x/c) at INB-STN	0.40			0.386			0.399			0.315		
Width of spar cap (x/c) at INB-STN	0.25			0.230			0.248			0.246		
Thickness of blade-root at the INB_STN (mm)	82			81.9			81.9			81.9		
Thickness of blade-shell (mm)		4	4		2.3	2.5		2.6	2.6		2.8	2.7
Thickness of the spawuni (mm)		37	5		31.2	4.6		29.2	3.2		34.4	4.28
Thickness of the spawcore (mm)		2	2		2	2		0.9	0.9		1.2	1.2
Thickness of the LEP-core (mm)		30	10		28.8	9.24		5	1		23.6	11.2
Thickness of the TEP-core (mm)		50	10		37	8.94		10	2		30.5	10.5
Thickness of the web-shell (mm)		2	2		1.7	1.7		1.92	1.92		1	0.7
Thickness of the web-core (mm)		30	30		28.6	22.8		28.1	28.1		27.2	27.2

4-3. 제한 조건

블레이드의 최적화 설계의 과정에서, 구조강도의 요구를 만족시킬 뿐만 아니라, 블레이드의 끝과 타워 사이의 부식도 방지해야 한다. 블레이드는 복합재로 만들어지고, 이것은 이방성을 나타내고 그리고 최대응력의 강도 제한이 타당하지 않기 때문이다. Tasi-Wu 파손기준이 파손입증을 수행하기 위하여 선택되었다. 블레이드의 끝과 타워 사이의 간격은 약 4.1m이다. 날개 끝 휨은 이 수치를 초과하지 않는다.

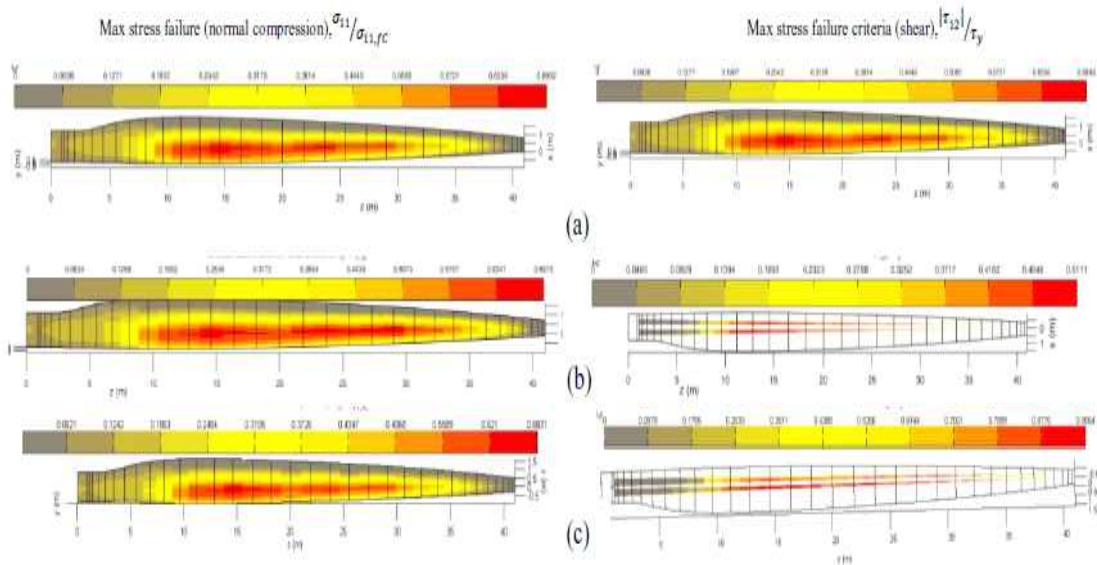
Tasi-Wu 파손기준:

$$F1\sigma_1+F2\sigma_2+F11\sigma_1^2+F22\sigma_2^2+F66\sigma_6^2+2F12\sigma_1\sigma_2\leq 1 \quad (2)$$

여기서 σ_1 , σ_2 그리고 σ_6 는 국소 직교 이방성의 두께에서 세 개의 면내응력 (in-plane stress) 성분이다. F1, F2, F11, F22 그리고 F66은 복합재료의 강도 변수이다.

5. 최적화 결과

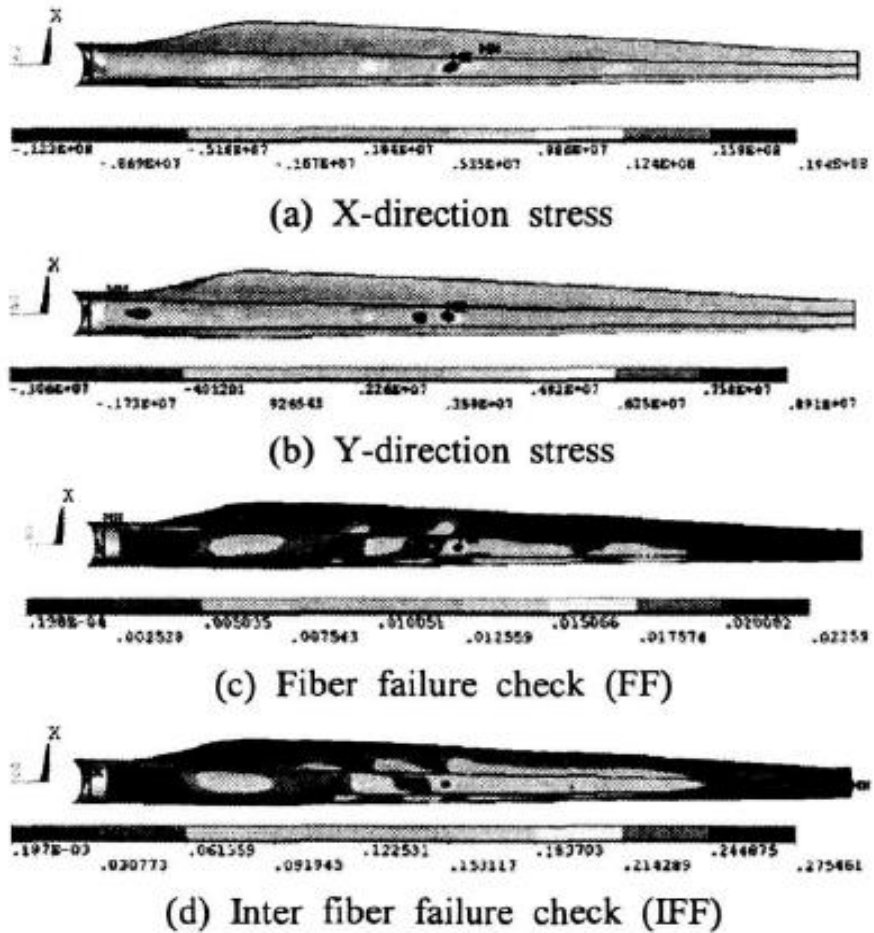
구조최적화 문제를 해결하기 위해, 몇가지 알고리즘을 비교하였고, 최초의 질량은 7.721톤이었다. 이것은 대표적인 2MW 풍력터빈 블레이드의 질량(대표적인 질량 약 7.575톤)에 접근한다. 결정론적 그리고 확률적인 최적화 방법의 효율차를 비교하기 위하여, 피팅 값에 대한 수렴기록은 <그림5>에 나타낸다.



<그림 5> 구배탐색, 모형탐색, a, b, 그리고 c에서 입자군집 알고리즘에 의해 발견한 최적화된 블레이드, 블레이드 셸에서 최대응력파손이론을 나타낸다.¹²⁾

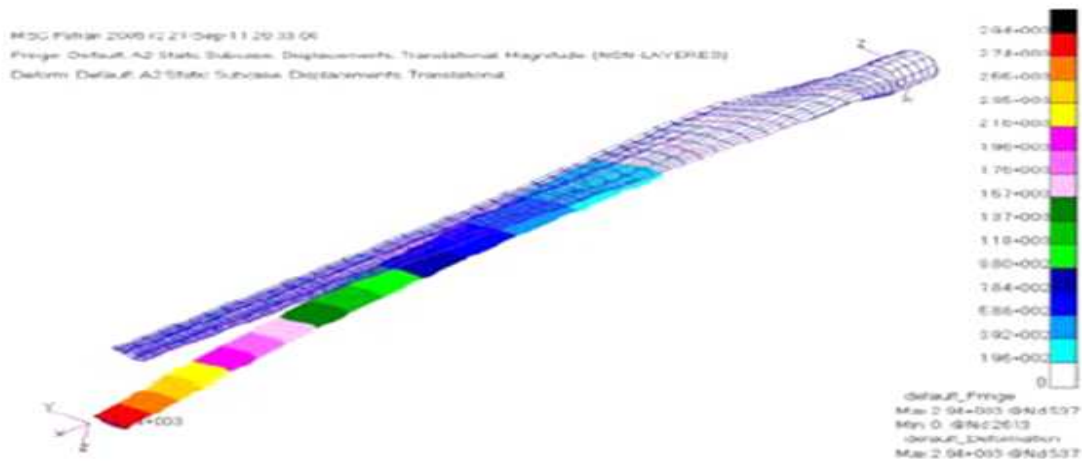
구배탐색, 모형탐색 그리고 입자군집 알고리즘(particle swarm algorithms)에 의해 초기에

블레이드의 질량은 8.556e+3kg으로부터 시작하여, 7.521e+3kg으로 줄었다.

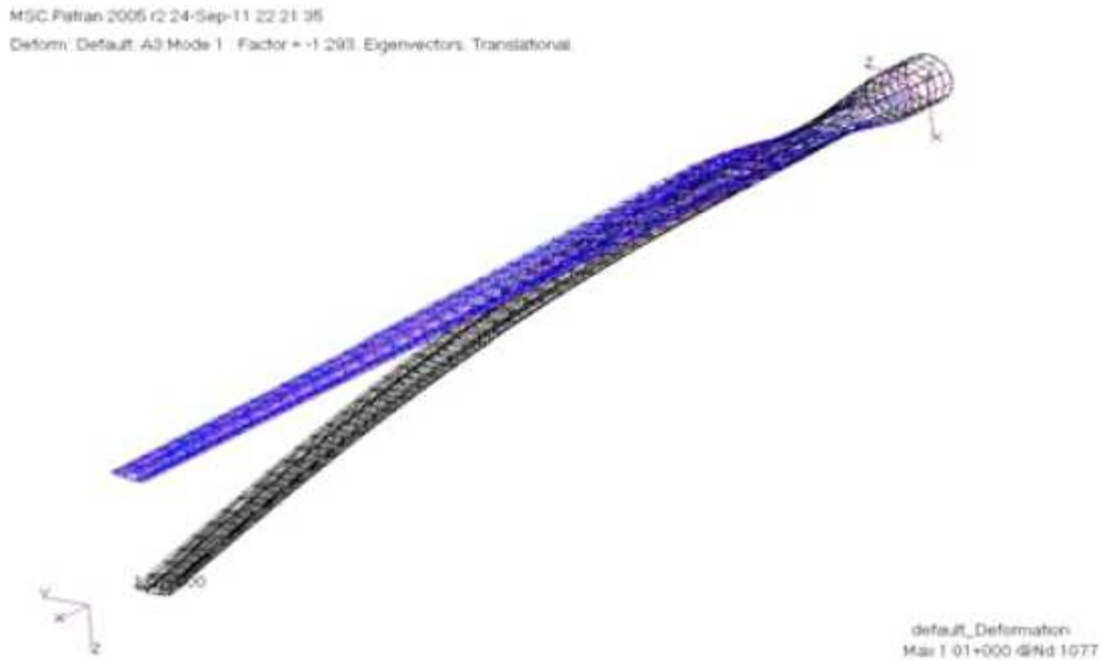


<그림6> 블레이드(TSR=16.6)에서 해석결과¹¹⁾

김범석 등(11)이 2MW 급 풍력터빈 블레이드 설계에 대한 연구결과를 <그림6>에서 TSR(tip speed ratio)가 16.6인 경우의 블레이드의 해석결과를 대표적으로 나타낸다. 요소의 X방향, Y방향 응력과 파손평가 결과를 각각 나타내고 있다. 파손여부의 판단은 결과 값이 1이면 파손이 발생한다고 평가되어진다. 파손판단을 위한 최대 값은 섬유파손(FF)일 경우 0.023, 모재파손(IFF)은 0.27으로 확인되었다. 섬유의 경우 최대 값이 루트부분에서 발생하였고, 모재파손인 경우는 블레이드의 가운데 부분에서 발생하였다고 한다.

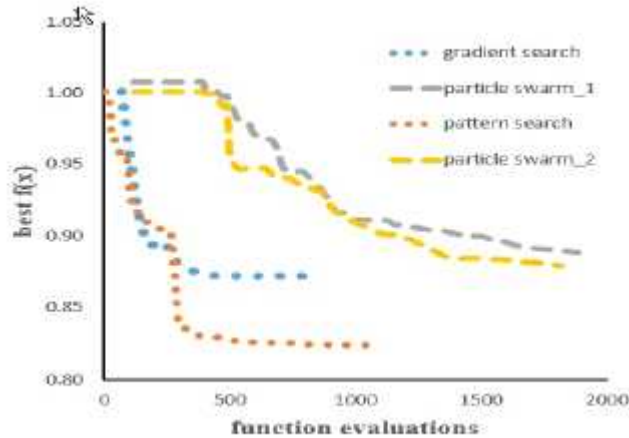


<그림7> 블레이드의 변위¹⁰⁾



<그림8> 첫 좌굴 모드 모양과 부하율¹⁰⁾

<그림 7>과 <그림8>은 공창덕 등(10)이 1 MW급 수평축 고효율 풍력터빈 복합재 블레이드의 구조 설계에 관한 연구 결과이다. <그림 7>은 블레이드의 변형율을 보여 주고, <그림8>은 좌굴 모드를 보여주고 있다.



<그림 9> 구배탐색, 모형탐색 그리고 입자군집 알고리즘을 위한 구조 최적화 동안 수렴비교 ¹²⁾

<그림 9>에 3개의 알고리즘에 의해서 얻은 블레이드의 다른 복합층 내의 응력을 가시화 한다.

6. 결론

Toohid 등(12)의 연구에서 블레이드의 구조해석, 복합 최적화 방법, 평가할 수 있는 도구와 복합층의 설계 그리고 효과 연구 등을 다루었다. 코드는 Co-blade를 사용하였고, 정적과피를 특성화하는 부가적인 비선형 제한과 함께 목적함수로서 블레이드의 질량을 나타내는 이점이 있다. 피로과피 기준을 나타내기 위해 많은 가정이 주어졌다. 이 연구는 구조 최적화와 공기역학적 해결 사이의 연결을 소개해주고, 블레이드의 성능 최적화에 유용할 것이다.

외국논문집에서 풍력터빈의 설계에 관한 논문은 드물게 발표되었다. 이 보고서에서 Toohid 등이 연구한 2MW 복합재료 풍력터빈 블레이드의 설계과정을 고찰하였고, 국내 연구자들의 결과로 공청덕(10)과 김범석(11)의 연구 결과를 수록하였다. 설계 데이터나 결과 그래픽 자료가 없는 관계로 그림만 첨부하였고, 비교 평가가 불가능하였다.

<참고문헌>

1. 정지훈, 박경현, 전상욱, 강형민, 이동호, 운용조건에 따른 불확실성을 고려한 풍력터빈 블레이드용 익형의 신뢰성 기반 강건 최적 설계, 한국신재생에너지학회 2009년도 춘계학술대회 논문집.
2. 공창덕, 이하승, 김인권, 복합재가 적용된 고효율 소형 수직축 풍력터빈 블레이드의 공력 설계 및 구조 설계에 관한 연구, 韓國航空宇宙學會誌 v.39 no.8, 2011년, pp.758 - 765
3. 최재혁, 이재환, 신상준, 정적 하중을 고려한 풍력 터빈 복합재 블레이드의 구조 해석과 안전도 설계, 한국신재생에너지학회 2011년도 춘계학술대회 초록집,
4. 박광림, 공창덕, 이하승, 박현범, 친환경 소재를 적용한 500W급 고효율 수평축 풍력터빈 블레이드 설계에 관한 연구,
5. 정지훈, 박경현, 전상욱, 조준호, 최선, 이동호, 작동 수명을 고려한 NREL 1.5MW 급 수평축 풍력터빈 블레이드의 최적설계, 한국신재생에너지학회 2011년도 춘계학술대회 초록집.
6. 김문오, 김범석, 모장오, 이영호, 5kW급 수평축 풍력 터빈 로터블레이드의 공력 설계 및 성능예측, 한국신재생에너지학회 2010년도 춘계학술대회 초록집 2010 June 17, 2010년, pp.182.1 - 182.1
7. 이진학, 유전자 알고리즘 및 패턴 서치 방법을 이용한 풍력 터빈 블레이드의 형상 최적화, 大韓土木學會論文集, 구조공학, 원자력공학, 콘크리트공학 v.32 no.6A, pp. 369 - 378, 2012, 1015-6348.
8. 김범석, Multi-MW급 풍력발전용 블레이드 설계에 관한 연구, 대한기계학회 논문집 B권 38(4), 2014.4, 289-309 (21 pages).
9. 김기하, 김동현, 광영섭, 김수현, FAST, GH Bladed 및 CFD기법을 이용한 5MW 해상풍력터빈 시스템 설계하중조건 해석 및 비교, 한국유체기계학회 논문집 18(2), 2015.04, 14-21 (8 pages).
10. 공창덕, 김민용, 박현범, 1 MW급 수평축 고효율 풍력터빈 복합재 블레이드의 공력 및 구조 설계에 관한 연구, 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 2011.11, 769-773 (5 pages)
11. 김범석, 이동화, 정중현, 이강수, 김만웅, 2MW 급 풍력터빈 블레이드 설계 및 단방향 유체-구조연성해석, 대한기계학회 춘추학술대회, 2009.5, 94-99 (6 pages)
12. Toohid Bagherpoora*, Li Xueminb, Structural Optimization Design of 2MW Composite wind turbine blade, The 8th International Conference on Applied Energy - ICAE2016
13. D. C. Sale, "Software for Structural Analysis of Composite Blades," 2012.
14. J. M. Jonkman and M. L. B. Jr, "FAST User 's Guide," 2005.
15. D. Sale, "NWTC Computer-Aided Engineering Tools (HARP_Opt: An Optimization Code for the Design of Wind and Hydrokinetic Turbines)," 2010.

16. A. Chehouri, R. Y. Lebanese, A. Ilinca, and J. Perron, "Optimal Design for a Composite Wind Turbine Blade with Fatigue and Failure Constraints," Trans. Can. Soc. Mech. Eng., 2015.
17. D. Sale, A. Aliseda, M. Motley, and Y. Li, "Structural Optimization of Composite Blades for Wind and Hydrokinetic Turbines," in 1st Marine Energy Technology Symposium, 2013, no. October.
18. C. L. Bottasso, A. Croce, L. Sartori, and F. Grasso, "Free-form design of rotor blades," in In Proceedings of The Science Of Making Torque From Wind, 2014.



이 분석물은 과학기술정보통신부 과학기술진흥기금, 복권기금의 지원을 받아 작성하였습니다.