

工學碩士 學位論文

풍력발전기 건전성 확보를 위한 복합재
블레이드의 강도향상에 관한 연구



釜慶大學校 大學院

安全工學科

鄭 愚 烈

工學碩士 學位論文

풍력발전기 건전성 확보를 위한 복합재
블레이드의 강도향상에 관한 연구

指導教授 權 五 憲

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2011 年 8 月

釜 慶 大 學 校 大 學 院

安 全 工 學 科

鄭 愚 烈

鄭愚烈의 工學碩士 學位論文을 認准함

2011 年 8月



主 審 工學博士 張 聖 祿



委 員 工學博士 愼 晟 佑



委 員 工學博士 權 五 憲



목 차

1. 서 론	1
2. 기본 내용	4
2.1 풍력발전 블레이드	4
2.2 풍력발전 사고원인	8
2.3 탄소섬유 강화 플라스틱	11
3. 실험 및 해석 조건	14
3.1 재료 특성 평가 실험 설계	14
3.1.1 실험재료 및 시험편	14
3.1.2 실험 방법	18
3.2 복합재 블레이드 강도해석	19
3.2.1 Flap-Wise test 해석모델	19
3.2.2 Flap-Wise test 해석조건	22

4. 결과 및 고찰	24
4.1 재료 특성치 결과	24
4.2 Minimum flap-wise test 결과	26
4.3 Maximum flap-wise test 결과	33
5. 결 론	40
인 용 부 호	42
참 고 문 헌	43



**The Study of strength improvement of the composite material blade
for the health insurance of wind turbine system.**

Woo-Yeol Jeong

Department of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Recently the modern society has some problems by the exhaustion of the energy source because of using fossil energy such as the coal, oil, natural gas, and etc. Therefore the development of the renewable energy which is sustainable and is clean is obligatorily accompanied.

Our country where is surrounded by sea on 3sides has advantageous location condition for the wind turbine system. The structure of the wind turbine system is composed of the blade, nacelle, and tower. The blade is composed of much technology, it is the most exposed to the danger of accident and if the accident happens, it would be the most dangerous part because it revolves at high speed. Especially, the study on the strength

improvement of the blade is essential to the actual condition in which the external environment suddenly change due to the global warming. Therefore, the object of this study secures the safety of the wind turbine system through the strength improvement of the blade. The Flap-Wise Test condition that is the essential structural performance test of the blade is given and it tries to compare with the existing blade model after finding the material characteristic value of the CFRP through the tension experiment prior to the evaluation of an analysis. Finite element analysis for structural strength improvement of blade was carried out using the commercial ANSYS code.

The following conclusions could be drawn from this study.

- 1) The stress-strain curve resulting from the material characteristic evaluation showed the linearly steady relation until the fracture and it could confirm the superiority of the material through the obtained mechanical characteristic.

2) The stress distribution under the Flap-wise test condition is regular and low stress value by load burden of replaced CFRP layer among the internal structural materials in comparison with GFRP model. In addition, in the twisted tip part, the stress value which is lower than GFRP model was shown and the structural performance improvement could be confirmed.

3) The model replaced by plain woven CFRP confirmed that displacement was markedly decreased in comparison with GFRP model and it controls the deformation of the blade. The CFRP model which is proved the strength improvement is considered additional lightweight by reducing the thickness of section of CFRP model since performing the analysis about the model having the same thickness of section of the models.

4) The models showed the high stress value in the Hub and Neck connection part. In the case of broadening the application to connection part based on the analysis result, it is considered that the reinforcement about Hub and Neck connection part can be improved.

1. 서 론

현대사회는 최근 들어 석탄, 석유, 천연가스 등의 화석 에너지를 과용함에 따라 향후 에너지 원의 고갈에 따른 문제점을 두 가지의 측면에서 야기하고 있다¹⁾. 첫째, BRICs(brazil, russia, india and china) 등 공업국가에서 개발 속도를 너무 빠르게 진행시키는데 사용된 화석 에너지로부터 생겨나는 각종 유해 물질이 자연 환경을 오염시키면서 환경 과부하가 발생하는 문제점이다.

둘째, 향후 20~30 여년 후의 에너지 고갈로부터 생겨날 문명 파괴의 가능성이다. 특히 화석 에너지의 지속적인 사용은 에너지 변환단계가 많을수록 에너지 효율은 떨어지고, 에너지를 사용하는 과정에서 CO₂, NO₂ 및 유해 물질의 필연적인 증대로 인하여 지구 온난화 및 대기의 오염속도는 더욱 가속화될 것이다²⁾. 이와 같은 큰 위기에 직면할 경우 인류는 자연 에너지인 태양, 해수 그리고 풍력과 같은 지속 가능하고 청정에너지인 녹색재생에너지의 개발이 필수적으로 수반된다. 3면이 바다로 둘러싸여 있는 우리나라에서 무한 청정에너지자원을 이용하는 풍력발전은 향후 신 성장 동력산업분야에서 큰 비중을 차지 할 것임은 자명한 사실이다.

풍력발전기는 바람이 갖고 있는 에너지를 유용하게 사용할 수 있는 전기에너지로 변화시켜 주는 장치이다. 풍력발전의 구조는 바람이 가진 에너지를 회전력으로 변환시켜주는 블레이드(blade)와 풍력발전기의 심장부에 해당되는

부분으로 로터(rotor)에 의해 얻어진 회전력을 전기 에너지로 변화시키기 위한 모든 장치들로 구성되어 있는 너셀(nacelle)부 그리고 타워(tower)로 이뤄져 있다. 이중 타워부분의 현재 국내 기술력은 세계적으로 인정을 받아 해외 메이저기업으로 수출을 하고 있는 실정이다. 또한 너셀 내부의 발전 터빈 시스템 구축 능력은 유럽이나 미국 등과 같은 풍력발전 선도국에 비해서는 기술수준이 떨어지는 실정이지만 1990년대부터 지속적인 투자와 수많은 연구가 진행 중에 있어 기술력 향상속도 또한 빠르다는 평가를 받고 있다. 하지만 풍력발전기 구성요소 중 발전 성능에 큰 부분을 차지하는 블레이드는 풍력발전 분야의 선진국에 비해 설계 및 생산능력은 초보적인 단계라 할 수 있다. 유럽에서는 발전설비 주요부분에 대해 순수 자국기술력으로 7MW급의 대형풍력 발전시스템을 개발하여 시험 중에 있는 반면에 국내 기술력으로는 3MW급을 개발하여 시험 중에 있는 실정이다^{3,4)}. 또한 풍력발전시스템 전체에 자국기술력 보유에 박차를 가하고 있는 인근의 중국에 비해 국내의 기술력에 대한 투자는 발전기주요부분에 고르게 이루어지지 않는 실정이다. 국내 블레이드 제작업체는 외국선도 기업에서 구조해석 및 형상설계에 대한 검증이 완료된 모델을 제시받은 도면 및 제작순서에 따라 외주제작을 하는 형태가 대부분이며, 자체설계를 통해 생산하는 업체의 경우 제품의 강도 및 성능측면에서 현저히 떨어지기 때문에 블레이드의 국내 기술력 확보에 관한 연구가 필요하다. 여러 기술의 복합체인 블레이드는 고속 회전을 하는 회전체이므로 사고의 위험이 가장 많이 노출되어 있고 사고가 발생하더라도 가장 위험한 부분이다. 블레이

드의 파손원인을 살펴보면 가장 큰 부분을 차지하는 요인이 환경적 요인에 따른 블레이드 손상과 구조적 손상이다⁵⁾. 특히 지구 온난화로 인해 태풍의 규모가 커지고 빈도수가 잦아지는 등 외부환경이 급변하고 있는 실정에 블레이드의 강도향상에 관한 연구는 필수적이다⁶⁻⁸⁾.

따라서 본 연구의 목적은 풍력발전 설비의 대형화 추세와 외부환경의 급속한 변화에 수반하여 대형화되는 블레이드의 강도적 측면에서 풍력 발전 설비의 안전성과 건전성을 확보하는데 있다. 블레이드의 강도향상을 위하여 제조 비용 등의 경제성을 고려해 블레이드 내부구조 중 하중을 주로 부담하는 boxspar부분의 내부 일부 층을 우수한 기계적 성능이 입증된 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastic, 이하 CFRP라 한다.)으로 대체하여 강도해석을 한다. 해석평가에 앞서 우선 인장 실험에 의해 CFRP의 재료 특성치를 구한 후 풍력발전 블레이드의 필수적인 성능평가 구조시험인 Flap-Wise test조건을 부여하여 기존의 블레이드 모델과 비교 · 평가 하고자 한다.

2. 기본 내용

2.1 풍력발전 블레이드

풍력발전 시스템이란 다양한 형태의 풍차를 이용하여 바람에너지를 기계적 에너지로 변환하고 이 기계적 에너지로 발전기를 구동하여 전력을 얻어내는 시스템을 말한다. 이러한 풍력발전 시스템은 무한정의 청정에너지인 바람을 동력원으로 하므로 기존의 화석연료나 우라늄 등을 이용한 발전방식과 달리 발열에 의한 열공해나 대기오염 그리고 방사능 누출등과 같은 문제가 없는 무공해 발전방식이다⁹⁾. 이중 풍력발전 시스템의 가장 핵심적인 구성요소인 블레이드는 바람의 에너지를 기계적 에너지로 바꾸는 역할을 하며, 다른 발전시스템과 구분되는 풍력발전기의 특징적인 요소라고 할 수 있다. Fig. 1은 풍력발전시스템의 전체 모습을 나타내고 있다. 블레이드는 바람의 힘을 회전력으로 전환시키는 공기 역학적 구조물로 최근 블레이드가 대형화됨에 따라 블레이드 재료의 비강성 및 비중량이 더욱 중요한 요소로 부각되고 있다. 통상적으로 블레이드의 길이가 증가하면 중량은 치수의 제곱에 비례하여 증가하므로, 자중 및 관성력에 의한 블레이드 하중이 크게 증가하게 된다. 또한 블레이드의 수명은 약 20년의 수명을 보장 하는 것이 일반적이었으나 최근 들어 30년의 보장 수명이 보편화 되고 있다¹⁰⁾. 이에 블레이드의 재료 선정에 있어

서 구조적 하중 특성, 재료 성능, 블레이드 설계 및 수명을 고려한 재료의 선정이 중요하다. 과거에는 나무, 섬유 등을 활용하였으나 블레이드가 대형화됨에 따라 최근에는 복합재료를 많이 사용한다¹¹⁾. 특히 유리섬유 강화 폴리에스터(glass fiber reinforced polyester)나 유리섬유 강화 에폭시(glass reinforced epoxy)를 주로 사용하고 있으며 최근 들어 블레이드의 대형화에 따라 더 경량화 되고 저수축 및 우수한 노화특성 그리고 고강도의 블레이드가 요구됨에 따라 탄소섬유계열 복합재료를 적용시킨 블레이드의 연구가 활발히 진행 중이다¹²⁾.

블레이드가 회전 중에는 원심력 및 공력이 작용하므로 풍속에 따른 지속적인 하중이 작용한다¹³⁾. 이러한 하중을 견디기 위해 블레이드의 단면은 스파 캡(spar cap), 전단 웹(shear web), 스킨(skin), 앞·뒷진 섬유 적층부로 구성되어 있다. Fig. 2는 블레이드 단면 구조를 나타내고 있다. 스파 캡과 전단 웹이 박스 빔을 구성하여 대부분의 굽힘 하중과 전단하중을 지탱하는 역할을 하며, 샌드위치 셀 구조의 스킨과 앞·뒷진 섬유 적층부가 공력과 구조 하중을 함께 지탱하는 역할을 한다. 스파 캡은 스킨의 중심부에 단방향 섬유를 0° 방향으로 적층한 부분을 의미하는데 이는 블레이드의 플랩방향 굽힘 강성을 가지도록 하며 블레이드에서 가장 중요한 부분이다¹⁴⁾. 전단 웹은 일반적으로 아래위 스파 캡이 위치하는 부분에 연결되어 스킨과 함께 비틀림에 대한 강성을 가지도록 하는 구조물이다. 스킨은 일반적으로 $\pm 45^\circ$ 직조 섬유와 코어로 구성되어 있다. 직조섬유는 비틀림에 대한 강성을 가지도록 하며 코어는 좌굴에 의

한 안정성을 가지도록 한다¹¹⁾.

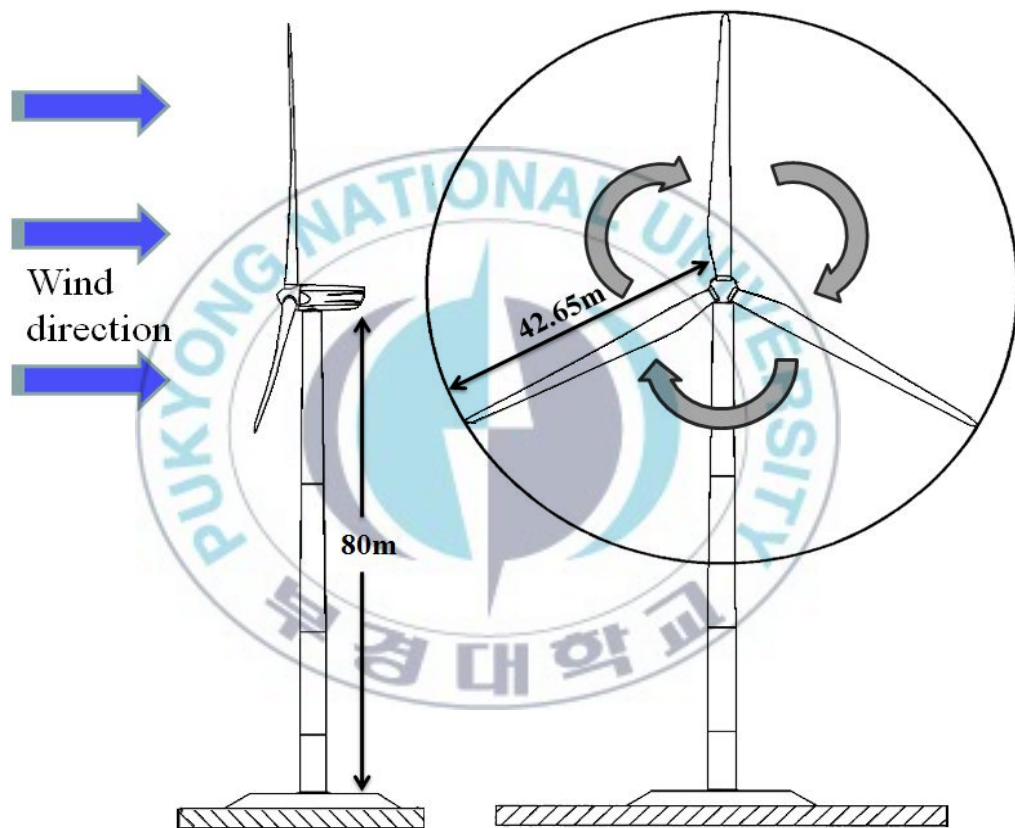


Fig. 1 Wind Turbine System (3MW)

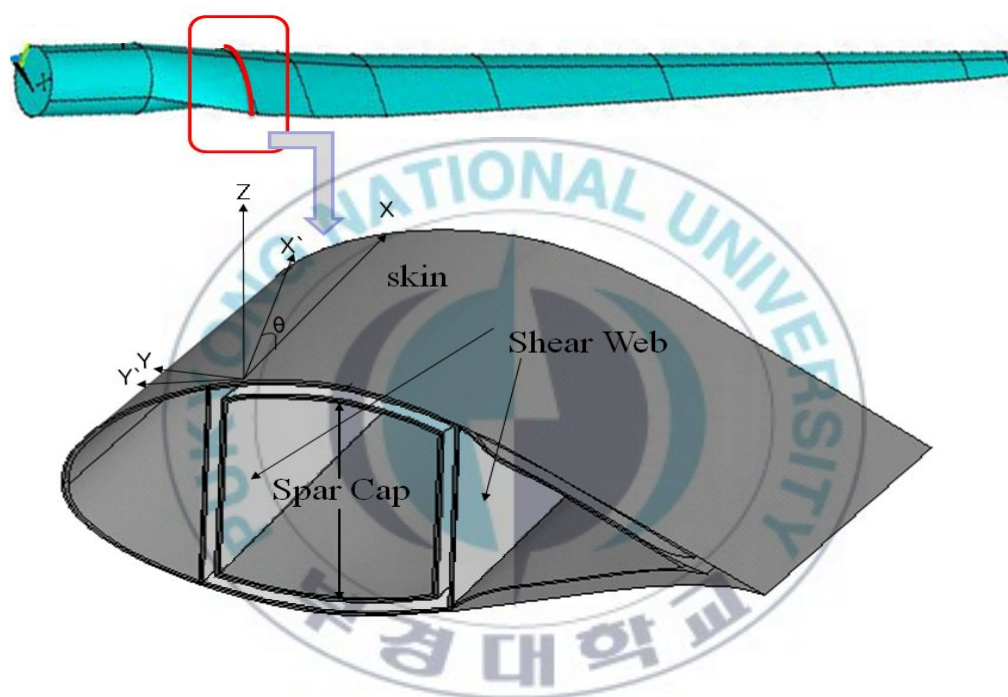


Fig. 2 The cross-section structure of rotor blade.

2.2 풍력발전 사고원인

풍력발전기에서 발생하는 사고의 원인은 크게 기술적 요인과 환경적 요인으로 나눌 수 있다. 기술적 취약점은 계속 보완되어져 오고 있으나 발전설비의 규모가 대형화되어지고, 환경적인 요인의 악재가 가속화되어짐에 따라 풍력발전설비의 구조적 안전성을 확보하는 것이 시급하다¹⁵⁾ Fig. 3은 블레이드의 사고사례를 나타낸 사진이다. 1975~2005년간 발생한 풍력발전기의 사고 내역을 Table 1에 나타낸다^{5,16)}. 풍력발전기의 사고 중 가장 큰 부분을 차지하는 요소가 구조적 손상과 블레이드 손상이다. 구조적 손상으로 인한 사고 내역을 Table 2에 나타낸다^{5,16)}. 이 중 블레이드의 구조적 손상으로 인한 사고가 가장 높은 비율을 차지한다. 이는 여러 기술의 복합체인 풍력발전기의 요소 중에서도 블레이드는 고속 회전을 하는 회전체이다. 따라서 사고의 위험에 가장 많이 노출되어 있고, 사고가 발생하더라도 가장 위험한 부분이기도 하다. Table 3은 블레이드 고장 및 파손 사고에 대한 통계이다. 블레이드의 고장 및 파손의 사고건수 및 발생빈도 중에서 폭풍과 강풍, 낙뢰, 폭한은 환경적 요인으로 전체 발생빈도의 55.3%를 차지한다¹⁶⁾. 지구 온난화 및 환경오염으로 인한 태풍, 돌풍 등의 예측할 수 없는 천재지변의 규모가 커지고 빈도도 잦아지는 실정에 외부환경에 직접적으로 노출되어 있는 블레이드의 기술력 확보가 시급한 실정이다.



Fig. 3 The accident example of wind turbine system

Table 1. The accident cause of wind turbine system (CWIF,2005)

원 인	사 고 수 (건)	빈 도 (%)
블레이드 손상	85	32.5
구조적 손상	45	17.2
화재	37	14.1
인명 사고	36	13.7
Ice로 인한 손상	23	8.8
구성요소 결함	9	3.4
도로에서 사고	7	2.7
환경오염	6	2.3
기계 결함	4	1.5
기 타	10	3.8
계	262	100

Table 2. The accident caused by structural damage (CWIF,2005)

원 인	사 고 수 (건)	빈 도(%)
로터 블레이드	14	31.1
타 위	12	26.7
기계손상	7	15.6
화 재	4	8.9
전기 장치	3	6.7
유압 장치	1	2.1
기 타	4	8.9
계	45	100

Table 3. The rotor blade breakdown and damaged accident (CWIF,2005)

원 인	사 고 수 (건)	빈 도(%)
폭풍, 강풍	25	29.4
낙뢰	21	24.7
기계 결함	3	3.5
혹한	1	1.2
타워 충돌	1	1.2
원인 불명	34	40.0
계	85	100

2.3 탄소섬유 강화 플라스틱 (CFRP)

탄소섬유 강화 복합재료는 1950년대에 연구가 시작되어 1980년대부터 구조용 재료로서 널리 응용되고 있다. 탄소섬유는 탄소 및 섬유로서의 성질을 겸비한 다양한 특징을 나타내며 비탄성률, 비강도, 내열성, 내식성, 전도성 및 마모 특성 등이 우수한 재료이다¹⁷⁾. 또한 섬유직경이 7 μ m 정도로 미세하므로 유연성이 있으며, 섬유로서의 직물 등의 여러 가지 가공성이 있고 섬유 축방향과 직각 방향의 이방성을 나타내는 것도 있다¹⁸⁾. 탄소섬유는 우수한 성능을 가지고는 있지만 그 자체로는 구조물의 형상을 유지 할 수 없기 때문에 일반적으로 단독으로 사용되지 않고 에폭시 등의 기지재료와 함께 탄소섬유 복합재료인 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP) 형태로 사용되는데 CFRP란 탄소섬유를 강화재(Reinforce)로 하고 매트릭 수지(Matrix Resin)를 플라스틱으로 하여 결합한 복합재료로서 탄소섬유 복합재료는 기존의 금속재료에 비하여 높은 탄성계수, 낮은 열변형률, 높은 피로강도 등을 가지고 있다. 특히 탄소섬유 강화 플라스틱기 복합재료는 항공·우주용 재료로서 각광받고 있다¹⁹⁾. 현재까지 거의 모든 항공기 복합재료 구조물은 상대적으로 얇은 섬유 층에 수지를 함침 시켜 테이프 형태의 중간물질인 프리프레그 (prepreg)를 만든 후 설계에 따라 프리프레그를 일정한 방향에 따라 적층하여 고온·고압 조건 하에서 오토 클레이브 (autoclave)를 사용하여 압축하는 공정을 사용한다. 이러한 프리프레그는 수지와 섬유가 최종제품에서 요구하는 비율로 이미 함침 되어 있으며 부수적인 화학처리가 불필요하고, 복잡한 구조물 형상을 쉽게 제작할 수 있는 장점

을 가지고 있다. 프리프레그에 사용되는 섬유 보강재는 종류에 따라 일방향형 섬유와 직물형 섬유 두 가지 종류가 있다. 직물형 프리프레그는 섬유의 짜인 형태에 따라 Plain, Satin, Twill - Weave 등으로 분류된다^{20,21)}.

일방향 섬유보다 그 이상이 요구되는 적용에 대해서는 0° 와 90° 섬유방향으로 섬유의 다발이 한 번씩 교차하고 있는 직물구조 복합재료가 유용하다. 특히 직물구조는 규칙적인 패턴이나 얽힌 모양에서 가로축 0° 의 씨실 또는 경사섬유 (warp) 와 세로축 90° 의 날실 또는 위사섬유 (weft) 가 서로 엇갈려 제작된다. 직물보전은 섬유의 기계적 연결로 유지된다. 직물의 덮는 것과 표면 평탄함, 안정성은 우선 섬유가 짜여진 모양으로서 조절된다. 본 논문에서 적용한 평직의 형태는 각각의 경사 섬유가 각 위사섬유의 위아래로 번갈아 통과며 직물은 우수한 안정성과 적당한 다공성 (porosity) 을 가지며 좌우 대칭적이다. 따라서 직물을 짜는 다른 형태와 비교하여 직물을 엮어 짜기가 가장 어렵고, 섬유 주름의 높은 부분은 기계적 특성을 상대적으로 낮게 전달한다. 또한, 섬유의 변형이 심하여 표면을 매끈하게 형성되기 어렵다. 특히 굵은 섬유들로서 이런 직물구조를 형성하면 과도한 주름을 잡게 되고 이 때문에 매우 두꺼운 직물로 되어 사용할 수 없는 경우가 생긴다. 치밀한 조직으로 인해 공극이 적고 조직 내에 수지가 침투하기 어려워 수지와 함침성 (saturation, drape) 은 떨어진다.



Fig. 4 Texture of plain woven CFRP laminate composite

3. 실험 및 해석 조건

3.1 재료특성평가 실험 설계

3.1.1 실험재료 및 시험편

Flap-Wise test 강도 해석에 사용될 블레이드 CFRP에 대한 재료특성평가를 위해 국내 한국카본(주)에서 생산되는 CF 3327 EPC (두께 : 0.27 mm)인 평직 탄소섬유 강화 프리프레그 (plain woven carbon prepreg)를 이용하였다. 프리프레그의 섬유와 수지의 함유량은 Table 4에 나타내었다. 프리프레그는 폭 1 m의 원단으로 생산·시판되기 때문에 가로·세로 각각 250×250 mm로 절단하였다. 평직 CFRP 복합재료의 기계적 특성치를 평가하기 위해 사용되는 인장 시험편은 6플라이로 적층하였다. 적층된 프리프레그는 열 성형기에서 초기 온도를 135℃까지 상승시킨 이후 대략 2분 간격으로 1℃씩 상승시켜 최종 성형온도를 140℃로 하였다. 또한, 압력은 열 성형기의 게이지압력 5.7 MPa로 하여 60분간 압력을 유지하면서 1차 성형하였다. 1차 성형된 적층판은 잔류응력 완화와 변형 및 뒤틀림 방지를 위해 설정 압력을 유지하면서 대기 중에 최소 2시간 이상 자연 냉각시켜 최종 두께가 1 ± 0.1 mm가 되게 제작하였다. Fig. 5는 평직 CFRP 적층판을 구성하는 프리프레그의 구조를 나타내며 성형온도 사이클을 Fig. 6에 나타낸다.

Table 4. Composition of the fiber and resin in prepreg

Material	Fiber Wt(gr/m ²)	Resin Wt(gr/m ²)	Resin Content (%)	Total Wt(gr/m ²)	t (mm)
CF 3327 EPC	205	148	42±2	353	0.27

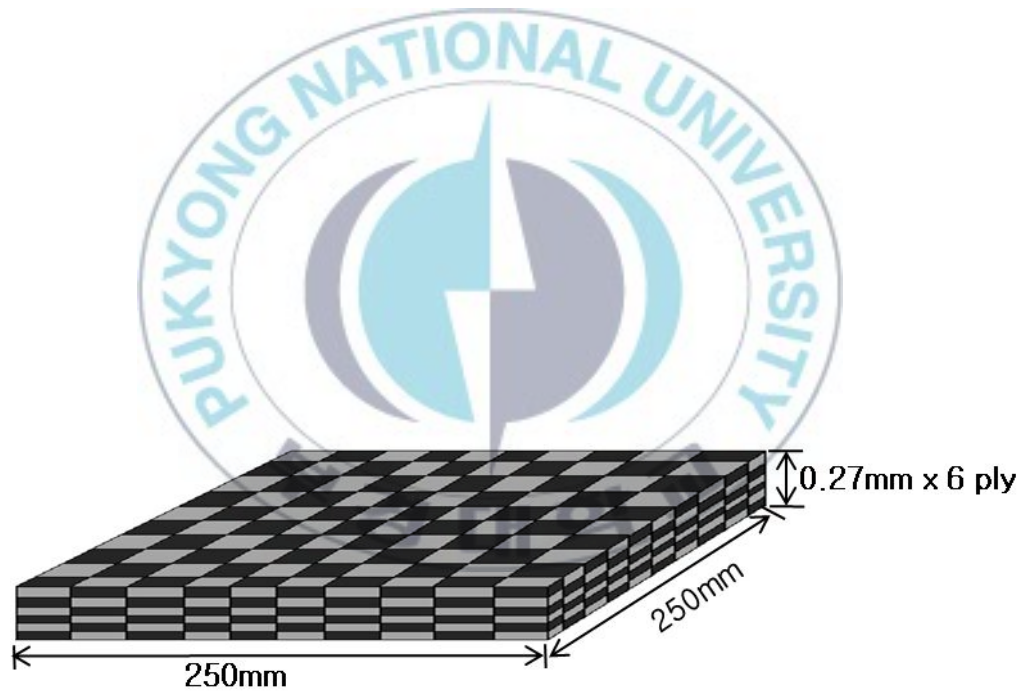


Fig. 5 Construction of plain woven CFRP prepreg

또한, 인장시험 시 시험기의 그림으로부터 손상을 방지하기 위하여 시험편 양 끝단에 에폭시 수지인 아랄다이트(araldite)로서 주재료인 폴리폴리머와 무수프탈산계인 경화제를 1:1의 중량비로 혼합하여 알루미늄 탭(두께 : 2.0 mm)을 부착하였다. 인장시험을 할 경우에 탭 부위는 응력집중에 의한 파손 및 박리가 발생하기 쉽기 때문에 이것을 방지하기 위해 탭에 30°의 테이퍼 각을 주었다. 시험편은 알루미늄 탭을 부착한 후 전기로(국내 K사, HY-8000S)에서 100 ℃로 30 분간 열처리를 수행하여 탭의 접합강도를 강화시켜 시험편의 슬립을 최소화하였다. 제작된 시험편의 형상은 Fig. 7에 나타내었다²²⁾.



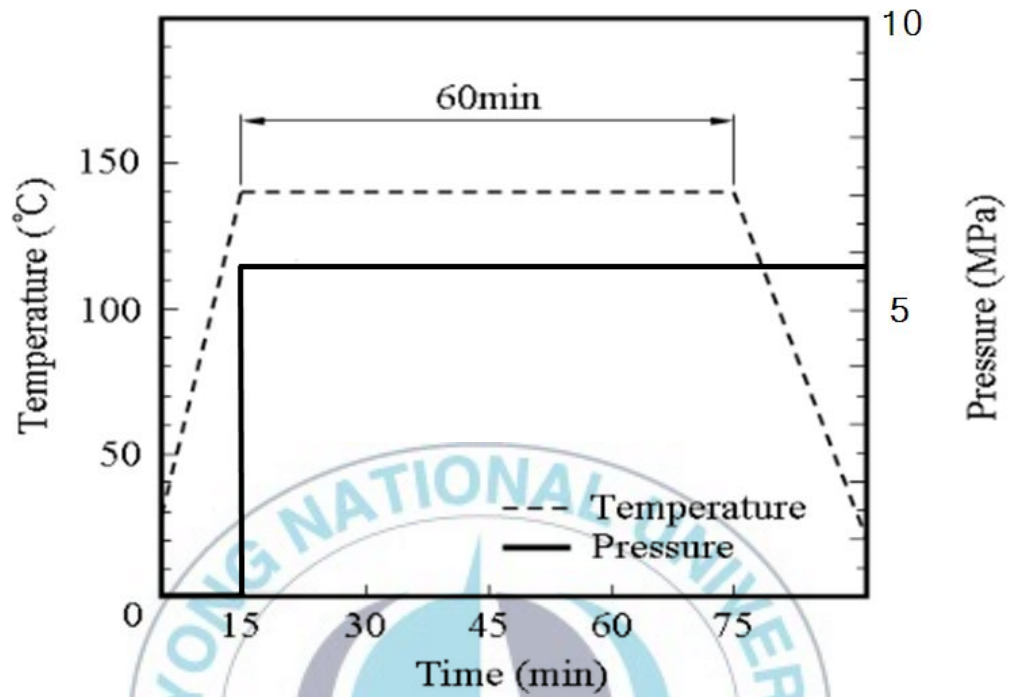


Fig. 6 The curing temperature and pressure cycle

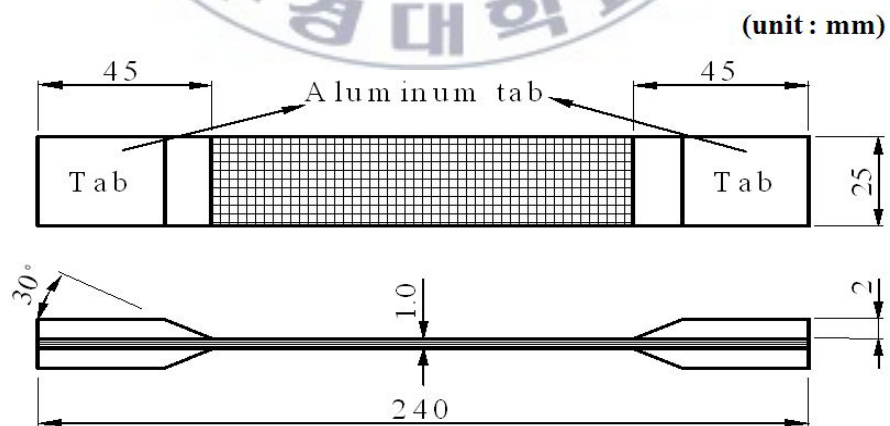


Fig.7 Tensile specimen configurations

3.1.2 실험방법

평직 CFRP 복합재료의 탄성계수, 프아송비 및 인장강도 등 기본적인 기계적 재료 물성치 측정은 종횡 2 방향 변형률 게이지를 부착한 인장 시험편으로 상온에서 만능동적 시험기(H사, 50kN)를 사용하여 구하였으며 ASTM D 3039²²⁾를 참고하여 0.2 mm/min 의 변위제어로 수행하였다. 스트레인 게이지를 이용한 변형률 측정을 위해 Model 5100B Scanner(V사)를 이용하였다. 이 때 얻어진 신호는 PC에 입력되고, 전용 데이터 처리 프로그램을 사용하여 신호를 분석하고 획득하였다.



3.2 복합재 블레이드 강도해석

3.2.1 Flap-Wise test 해석모델

해석대상인 블레이드는 3MW급 대형 풍력발전기에 사용되는 모델의 규모를 대상으로 하였다^{23,24)} 블레이드의 전장길이는 42.65m이며 최장폭이 3.456m인 넥(neck)지점에서부터 셸(shell)부분을 거쳐 블레이드의 끝부분으로 가면서 트위스트(twist)각을 주었다. Fig. 8에 해석모델의 형상과 블레이드의 단면구조를 나타내었다. 현재 국내 소수 기업에서 생산 중에 있는 블레이드에 사용되는 재료는 장섬유(Unidirectional fiber)를 이용한 유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic, 이하 GFRP라 한다.)을 주재료로 사용하고 있다. 세부적인 적층 순서는 외부 표면에서부터 skin-lining-Unidirectional fiber-balsa core-Unidirectional fiber-skin의 순서로 적층된다.

본 연구에서 제시한 모델은 내부 일부 층을 평직CFRP로 변경한 모델로서 적층 순서는 외부 표면에서부터 skin-lining-Unidirectional fiber-balsa core-평직CFRP-skin의 순서로 적층된다. Fig. 9에 기존의 블레이드와 내부 구조재료의 일부 층이 변경된 블레이드에 사용되는 재료의 적층순서를 설명하였다. Table 5에 해석에 사용된 재료의 물성치를 나타내었다.

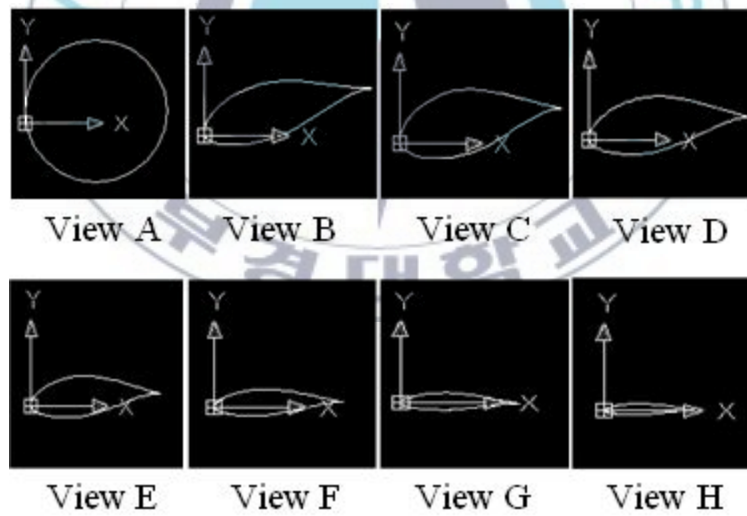
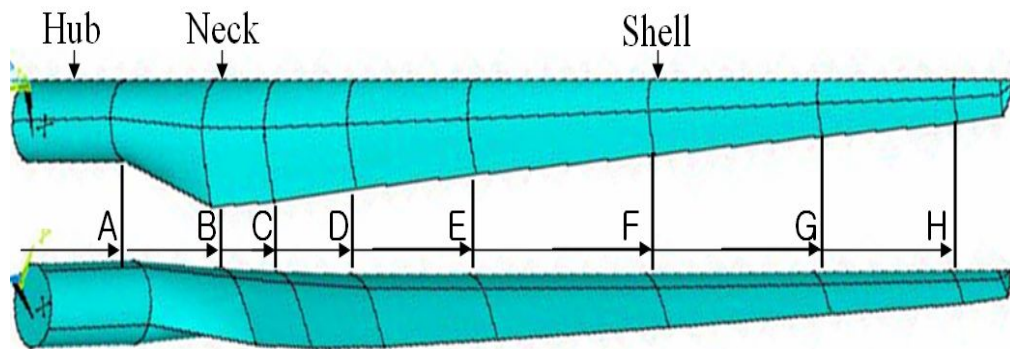


Fig. 8 The entire model and Cross section of rotor blade

Table 5 Material property of the rotor blade

	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Tensile ultimate strength (GPa)
Skin	10.3	0.3	0.151
Lining	10.3	0.3	0.151
Unidirectional fiber	37	0.31	0.986
Balsa Core	3.518	0.3	0.013
Plain Woven CFRP	149.3	0.1	1.546

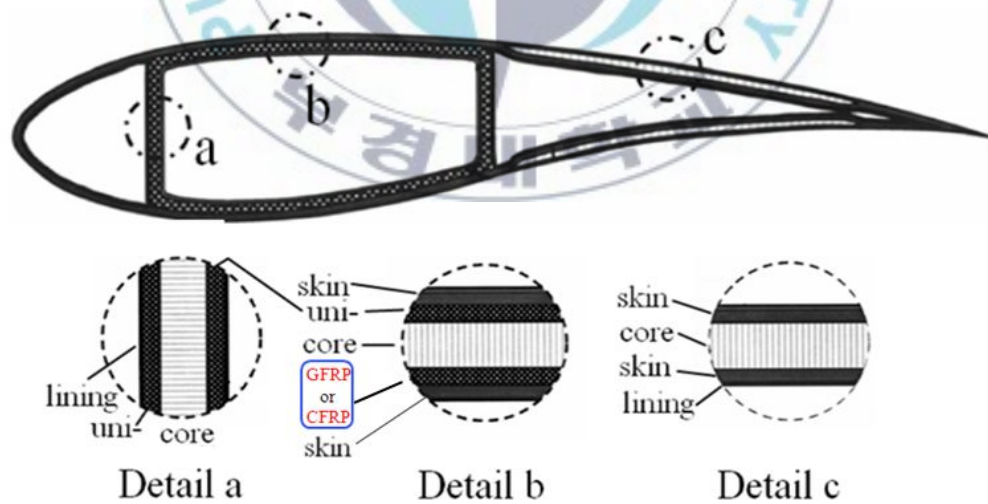
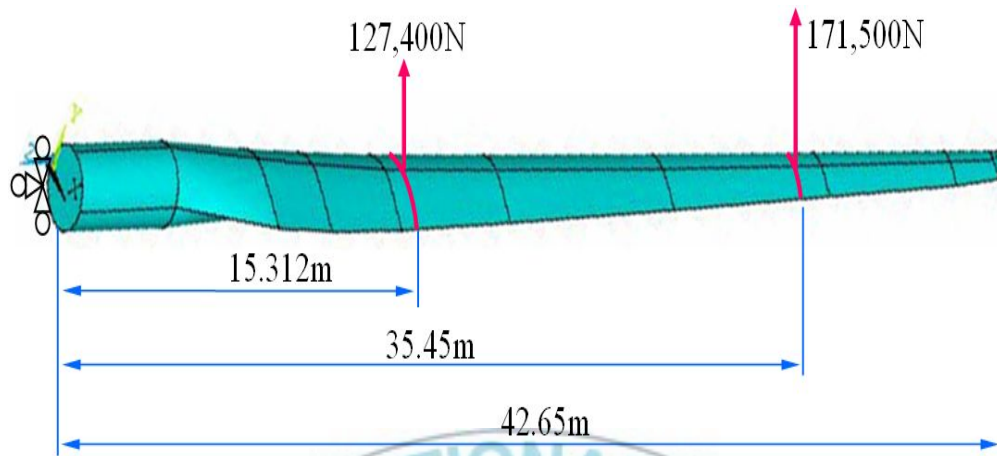


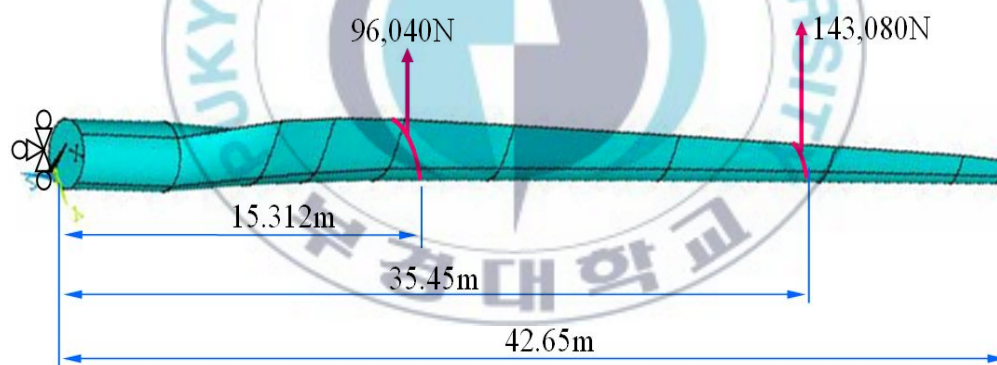
Fig. 9 The structure material of rotor blade

3.2.2 Flap-Wise test 해석조건

일반적으로 블레이드의 구조시험은 블레이드에 발생하는 최대하중을 적용하여 그 하중에 대한 구조적 안전성 및 설계의 타당성을 검토 하고자 한다. 블레이드 구조시험 시에 사용하는 실험방법으로는 Eigenvalue test, Flap-wise test, Chord-wise test가 있다. 이 중 Flap-wise test는 블레이드 구조시험 중 가장 큰 하중 값을 설정하여 실험을 수행하는 것으로 블레이드가 Flap-wise test를 통과하게 되면 그 블레이드의 강도는 이미 충분히 입증된 것으로 여겨진다²⁵⁾. 따라서 본 연구의 해석 조건은 Flap-wise test조건 중 에 포함되어 있는 Maximum Flap-Wise test와 Minimum Flap-Wise test조건을 해석조건으로 부여하였다. 블레이드는 CATIA V5R18을 사용하여 3D모델링 하였으며 이를 유한요소 상용 프로그램인 ANSYS 9.0에서 불러들여 격자 분할 및 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 요소는 solid 10절점 요소를 사용하였으며 요소의 수는 약 127만개 이다. Fig. 10에 해석조건을 도식화 하였다. 하중조건은 Flap-wise test에서 블레이드 성능 통과 시험 기준 하중의 120%를 부여하였다. 동일한 하중조건 하에서 현재 실증 단계의 모델에 대한 해석을 수행한 그 결과와 본 논문에서 제시한 모델의 해석결과를 비교하였다.



(a) Minimum Flap-Wise test



(b) Maximum Flap-Wise test

Fig. 10 Boundary condition of numerical analysis model for Flap-wise test.

4. 결과 및 고찰

4.1 재료특성치 결과

평직 CFRP 적층 복합재료의 전형적인 인장시험에 대한 결과로서 응력 - 변형률 선도를 Fig. 11에 나타내었다. 응력 - 변형률 선도는 거의 파단 시까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있으며, 최대응력 1,546 MPa에서 급작 파괴가 발생하였다. 얻어진 기계적 재료 특성치는 Table 6에 나타낸다.

Table 6 Mechanical properties of tensile specimen

Tensile modulus, E	Ultimate strength, σ_u	Poisson's ratio, ν
149.3 GPa	1,546 MPa	0.1

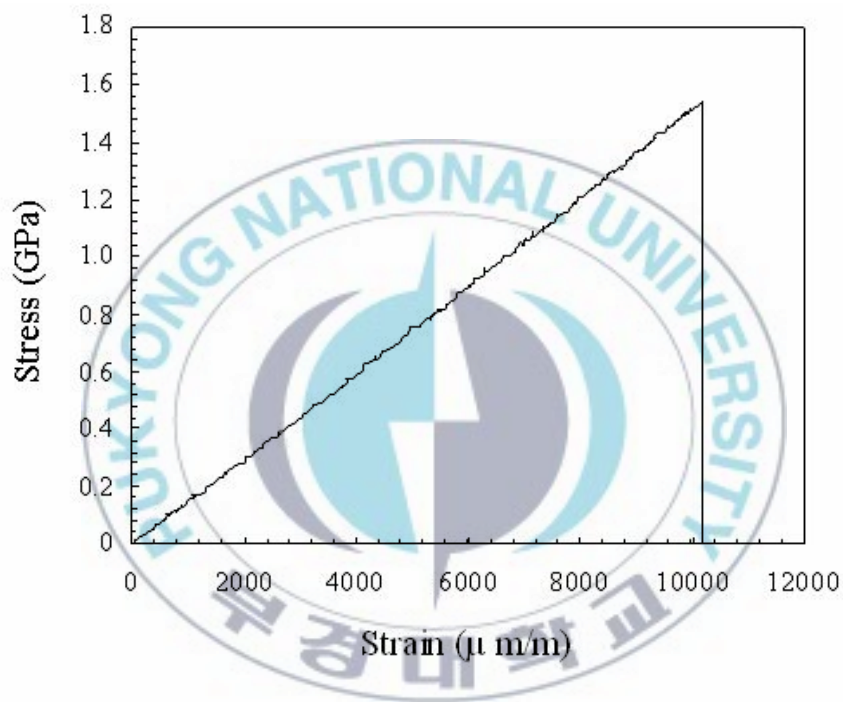
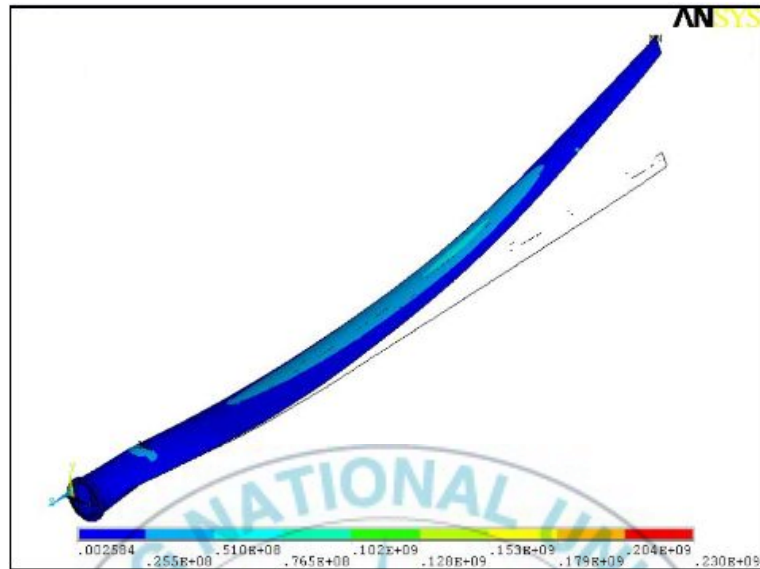


Fig. 11 A typical stress-strain curve acquired for a plain woven CFRP composite under uniaxial tensile test.

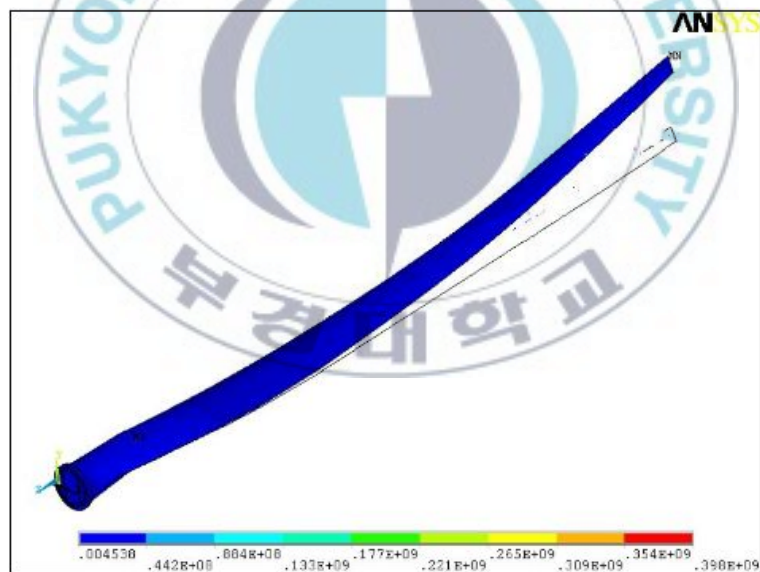
4.2 Minimum flap-wise test 결과

Minimum Flap-Wise test조건을 부여하여 해석한 결과에 대한 응력등고선 분포를 Fig. 12의 (a)와 (b)에 나타내었다. 두 모델을 비교한 결과 CFRP가 적용된 블레이드의 경우 내부 구조재료 중 대체한 CFRP층에 의한 하중 부담으로 인해 블레이드 전체적인 응력 등고 분포가 GFRP모델에 비해 규칙적으로 나타났으며 낮은 응력 값을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 13의 (a)와 (b)는 블레이드 표면의 종 방향을 따라서 발생한 응력 값을 나타내었다. 블레이드는 Nose cone부와 플랜지형태로 체결 되어서인데 Shell과 Neck까지 Boxspar 형태의 내부구조를 이루다가 Hub부에서는 플랜지형 체결을 위해 원통형 내부구조를 이룬다. 본 논문에서는 경제성을 고려하여 Boxspar부의 구조재료를 변경하였기 때문에 두 모델 다 블레이드의 Flap-Wise test 시에 Hub와 Neck의 연결부에서 높은 응력 값이 나타났다. 이후 선형적인 증가를 나타내다 대략 26.5m지점에서 최대응력이 발생하였는데 GFRP블레이드의 경우 55.89MPa, CFRP블레이드의 경우는 32.4MPa로 나타나 블레이드의 구조재료 중 한 층만 CFRP로 대체하여도 구조적인 강도 측면에서 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다. 또한 취약부분인 Hub와 Neck 연결부의 구조 및 구조재료의 변경을 통한 강도향상에 관한 연구가 추가적으로 필요함을 확인하였다.

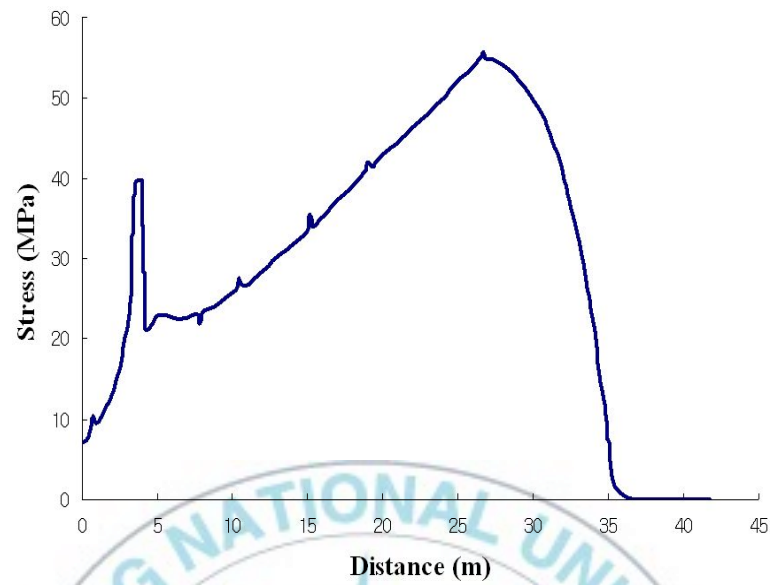


(a) GFRP blade

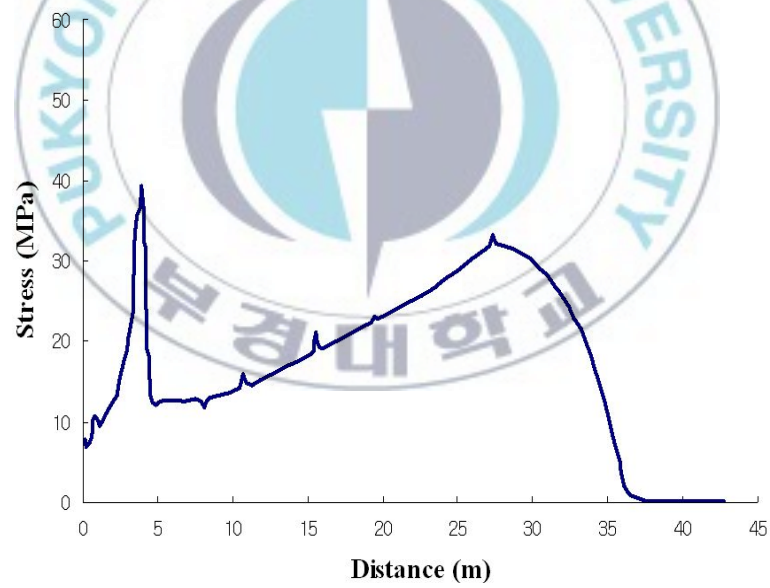


(b) CFRP blade

Fig. 12 The comparison of stress contours for the rotor blade under the minimum flap-wise test.



(a) GFRP blade



(b) CFRP blade

Fig. 13 The stress distribution along the longitudinal direction of the rotor blade under the minimum flap-wise test.

블레이드의 경우 극한 외부환경에서는 Shell의 중간부와 Hub와 Neck의 연결부에서의 파손이 주를 이루기 때문에 Flap-Wise test와 같은 실험을 수행한다. 하지만 사용 중에는 twisted tip부분에서 균열이 발생하고 성장하여 유지·보수비용이 발생하는 경우가 대부분이다. Fig. 14의 (a)와 (b)는 블레이드의 twisted tip을 따라서 발생한 응력 값을 나타내었다. Hub와 Neck 연결부에서는 블레이드 구조재료의 내부 적층구조의 변화에 따른 불규칙한 응력 분포 형태를 나타내었으며 twisted tip이 시작되는 8.434m에서 부터 선형적인 증가를 나타내다 26.5m지점에서 GFRP블레이드의 경우 최대 값이 약 10.99MPa, CFRP블레이드의 경우는 6.45MPa로 나타났다. 따라서 Boxspar부의 구조재료 변경을 통해 twisted tip 부분에서 GFRP와 CFRP의 인장강도를 고려한 안전율에서 훨씬 우수한 성능을 나타내었다.

Fig. 15의 (a)와 (b)에 각각 블레이드 내부의 GFRP층과 대체된 재료인 CFRP층에 대한 응력등고선을 나타내었다. 두 모델을 비교한 결과 CFRP모델이 GFRP모델에 비해 응력등고분포의 변화가 규칙적으로 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 16의 (a)와 (b)는 블레이드의 변위분포를 나타낸 그래프이다. GFRP블레이드의 경우 최대변위는 6.752m로 CFRP블레이드의 경우는 3.994m로 각각 나타나 블레이드의 구조재료 중 한층만 CFRP로 대체하여도 전체적인 변형발생을 억제하는데 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다.

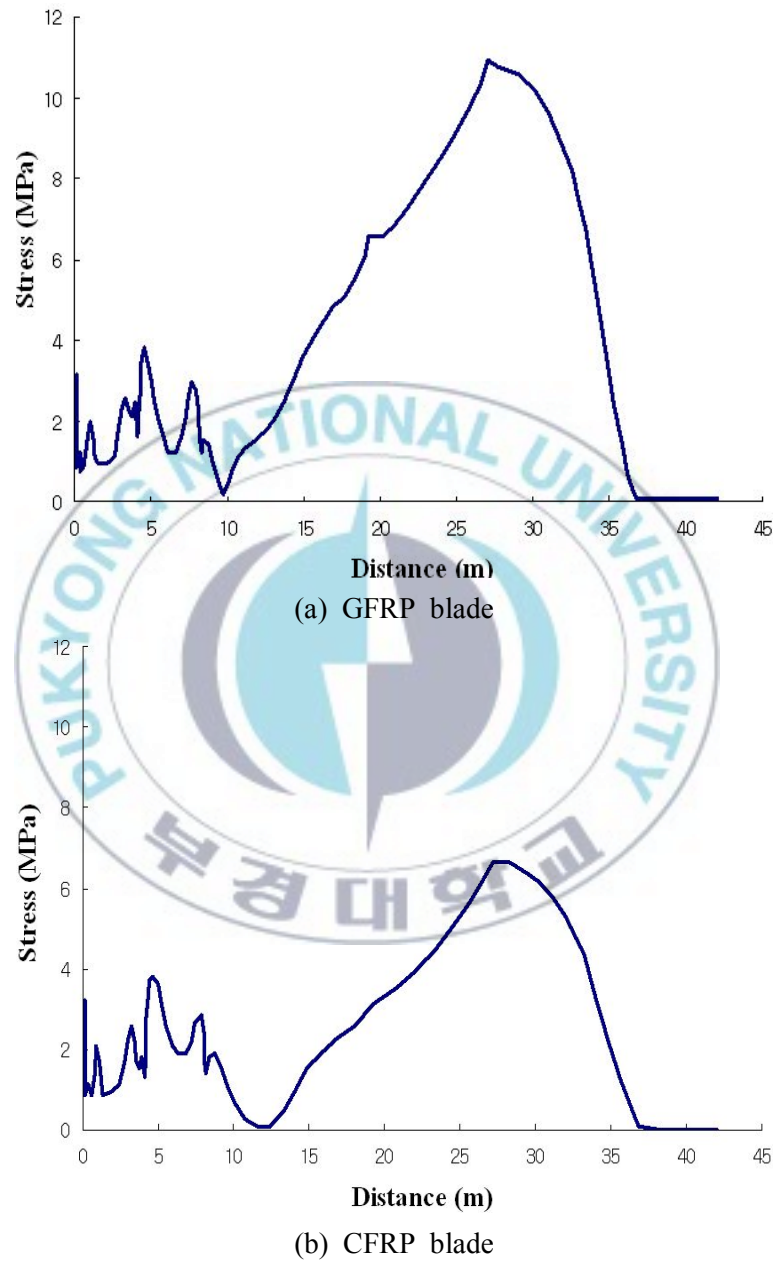
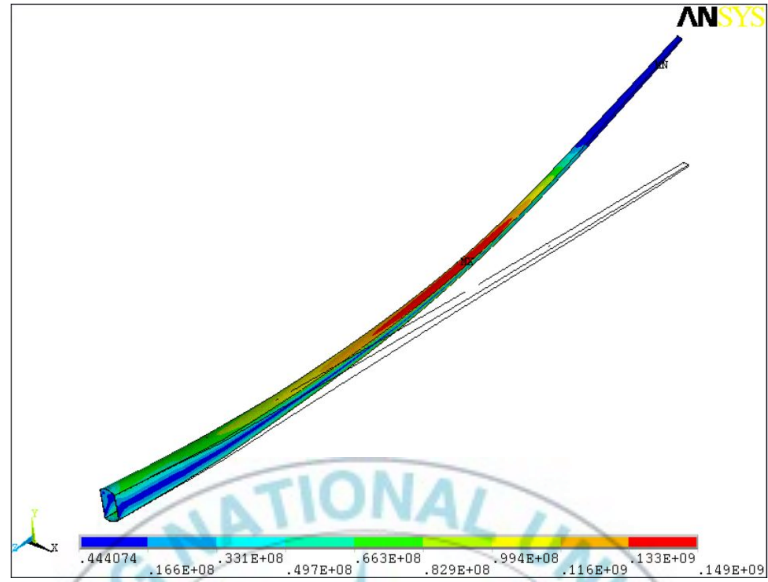
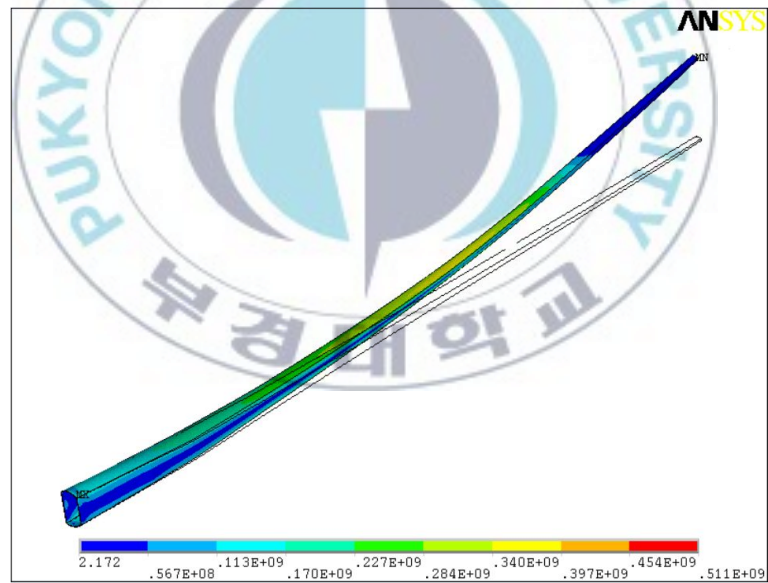


Fig. 14 The stress distribution along the twisted tip of the rotor blade under the minimum flap-wise test.

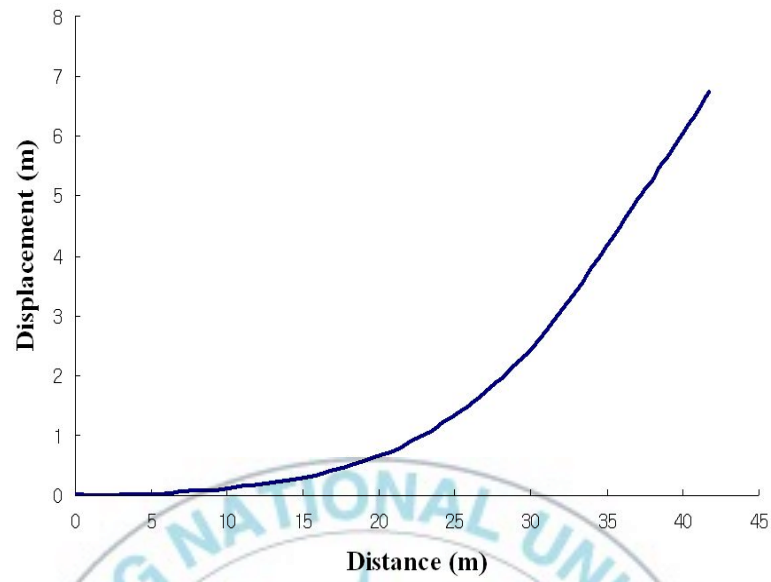


(a) GFRP blade

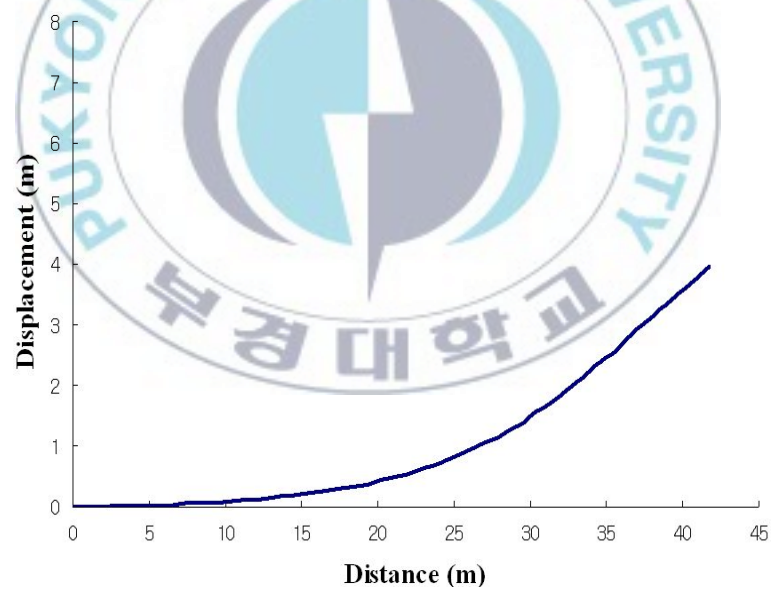


(b) CFRP blade

Fig. 15 The comparison of stress contours for the inter-layer in the rotor blade under the minimum flap-wise test.



(a) GFRP blade



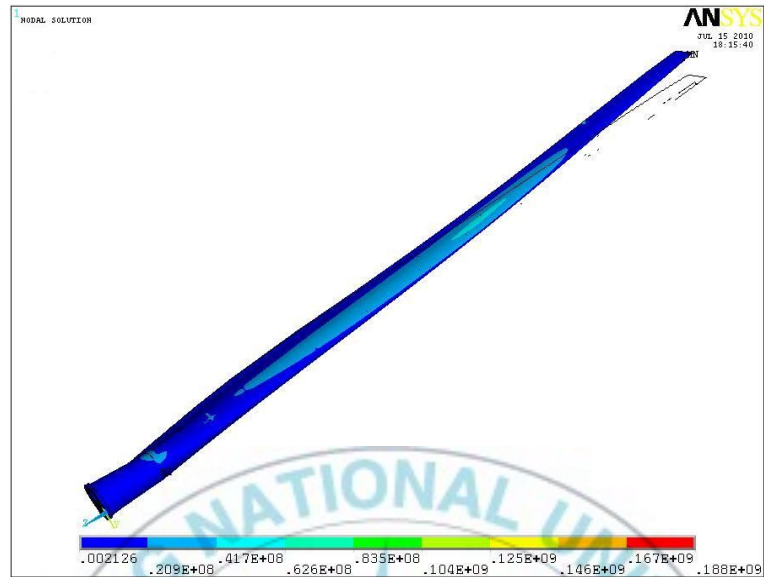
(b) CFRP blade

Fig. 16 The displacement distribution along the longitudinal direction of the rotor blade under the minimum flap-wise test.

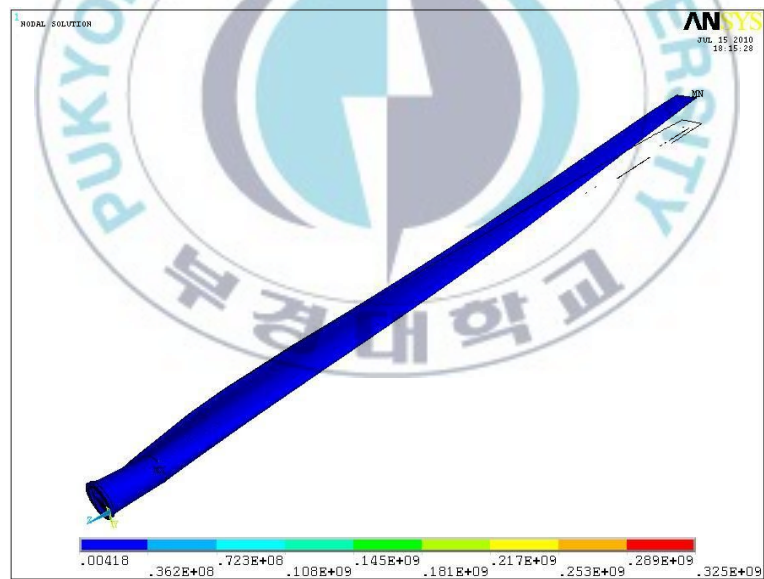
4.3 Maximum flap-wise test 결과

Maximum flap-wise test 조건을 부여하여 해석한 결과에 대한 응력등고선 분포를 Fig. 17에 나타내었다. minimum flap-wise test 조건에서와 같이 CFRP가 적용된 블레이드의 전체적인 응력등고 분포가 GFRP모델에 비해 규칙적으로 나타났으며 낮은 응력 값을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 18의 (a)와 (b)는 블레이드 표면의 종 방향을 따라서 발생한 응력 값을 나타내었다. 응력분포의 양상은 minimum flap-wise test조건인 해석결과와 유사한 경향을 나타내었으며 대략 26.5m지점에서 최대응력이 발생하였는데 GFRP블레이드의 경우 46.65MPa, CFRP블레이드의 경우는 26.87MPa로 나타나 블레이드의 구조재료 중 한 층만 CFRP로 대체하여도 구조적인 강도 측면에서 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다.

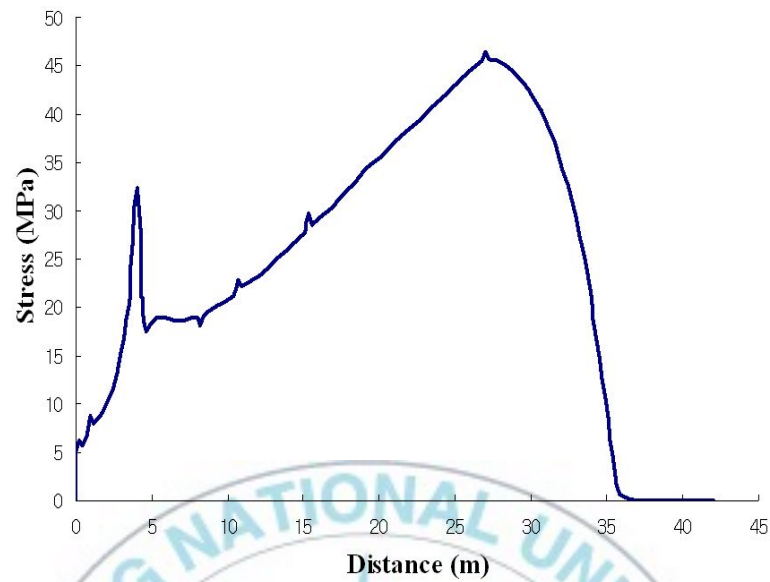


(a) GFRP blade

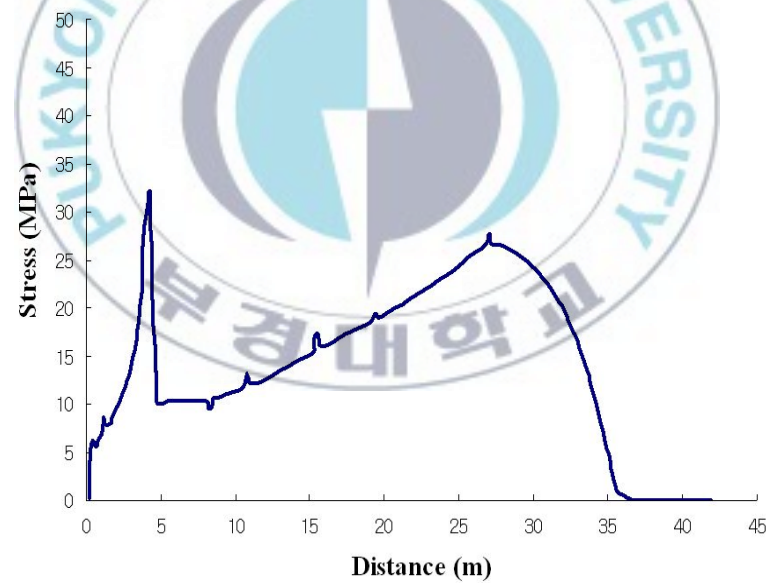


(b) CFRP blade

Fig. 17 The comparison of stress contours for the rotor blade under the maximum flap-wise test.



(a) GFRP blade



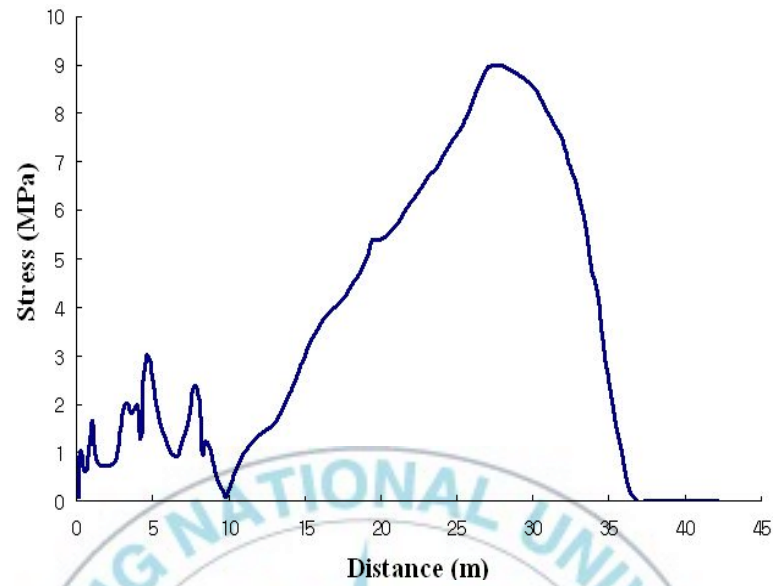
(b) CFRP blade

Fig. 18 The stress distribution along the longitudinal direction of the rotor blade under the maximum flap-wise test.

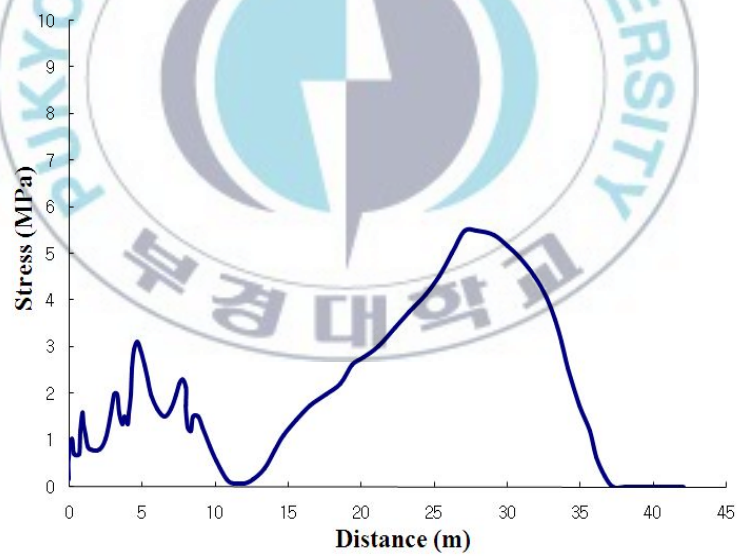
Fig. 19의 (a)와 (b)는 블레이드의 twisted tip을 따라서 발생한 응력 값을 나타내었다. Hub와 Neck 연결부에서 불규칙한 응력분포형태를 나타내었으며 twisted tip이 시작되는 8.448m에서 부터 선형적인 증가를 나타내다 26.5m지점에서 GFRP블레이드의 경우 최대 값이 약 9.17MPa, CFRP블레이드의 경우는 5.24MPa로 나타났다.

Fig. 20의 (a)와 (b)에 각각 블레이드 내부의 GFRP층과 대체된 재료인 CFRP층에 대한 응력등고선을 나타내었다. 두 모델을 비교한 결과 CFRP모델이 GFRP모델에 비해 응력등고 분포의 변화가 규칙적으로 나타났음을 알 수 있다.

Fig. 21의 (a)와 (b)는 블레이드의 변위분포를 나타낸 그래프이다. GFRP블레이드의 경우 최대변위는 5.618mm로 CFRP블레이드의 경우는 3.322mm로 각각 나타나 블레이드의 구조재료 중 한 층만 CFRP로 대체하여도 전체적인 변형 발생을 억제하는데 충분한 효과가 발휘됨을 확인하였다.

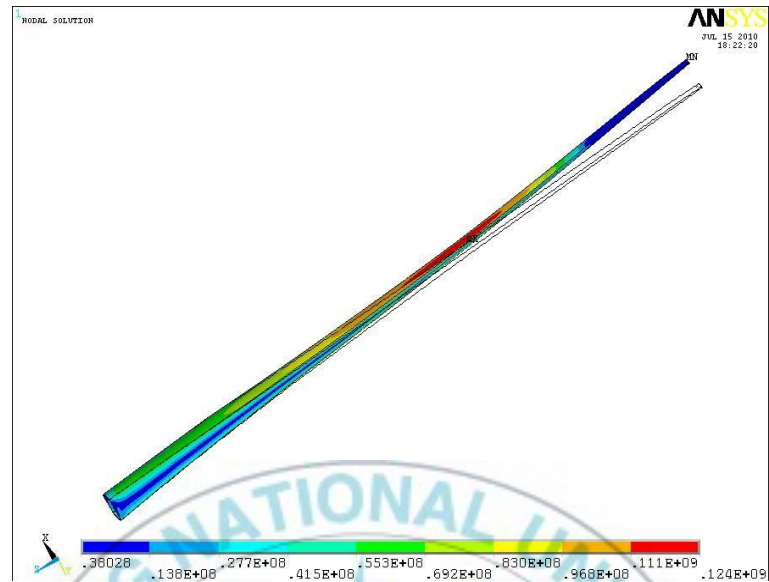


(a) GFRP blade

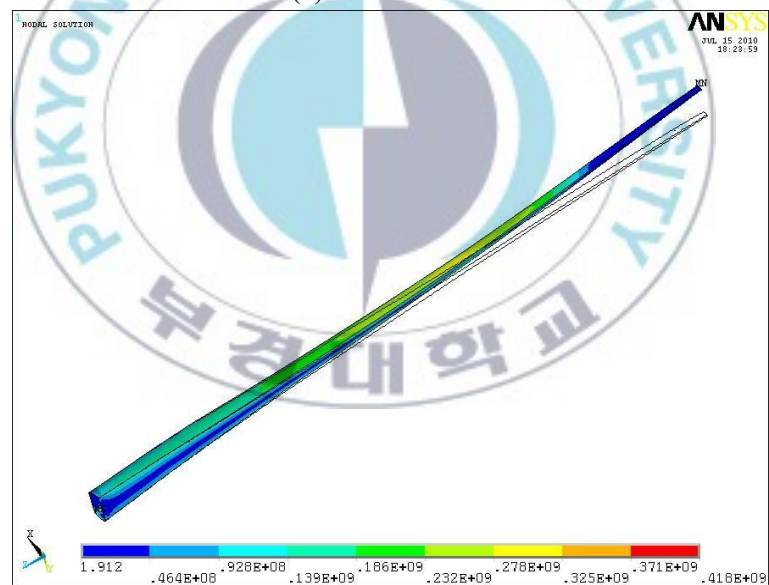


(b) CFRP blade

Fig. 19 The stress distribution along the twisted tip of the rotor blade under the maximum flap-wise test.

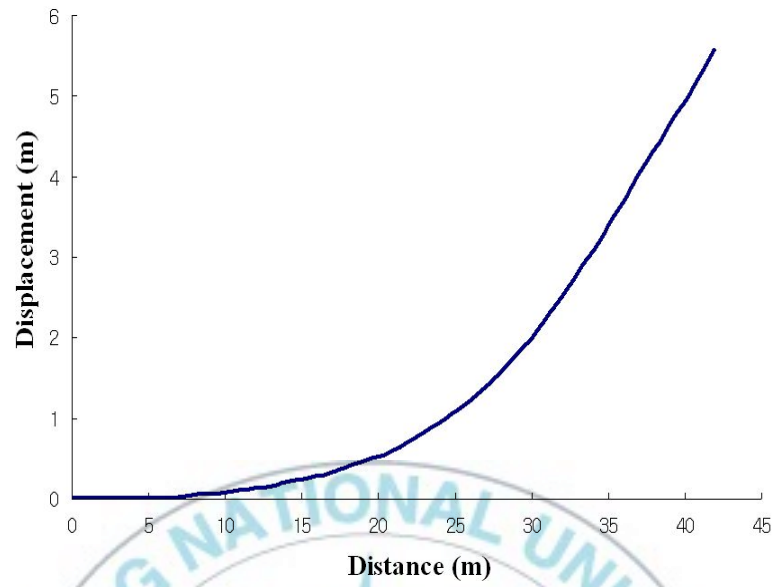


(a) GFRP blade

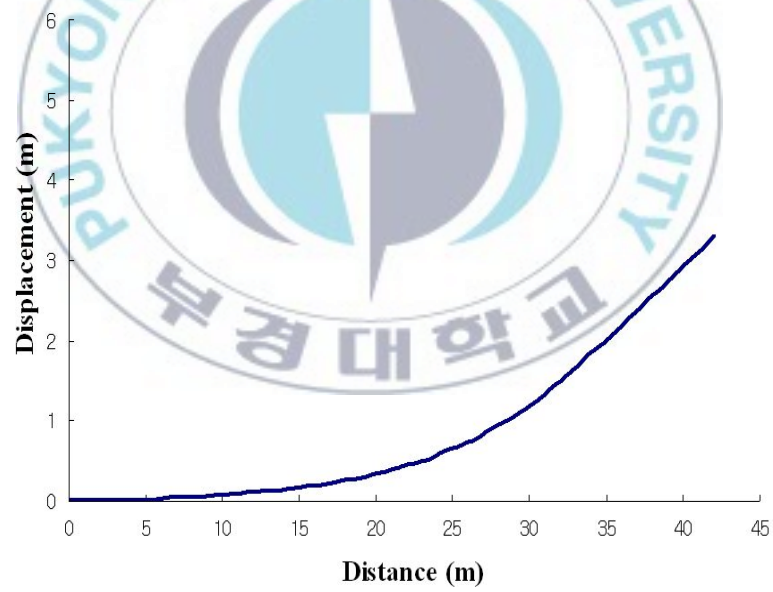


(b) CFRP blade

Fig. 20 The comparison of stress contours for the inter-layer in the rotor blade under the maximum flap-wise test.



(a) GFRP blade



(b) CFRP blade

Fig. 21 (a) The displacement distribution along the longitudinal direction of the rotor blade under the maximum flap-wise test.

5. 결 론

본 연구에서는 풍력발전 설비의 대형화 추세와 외부환경의 급속한 변화에 대비하여 기존 블레이드의 구조재료 일부 층을 재료 특성 평가를 통해 재료의 우수성이 입증된 CFRP로 대체한 모델을 해석 대상으로 하였다. 평가방법은 블레이드의 구조시험중 하나인 Flap-Wise test를 통해 응력분포해석과 변위 분포 평가를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재료 특성 평가 결과 응력 - 변형률 선도는 파단 시까지 안정적으로 선형적인 관계를 보여주고 있으며 얻어진 기계적 특성치를 통해 재료의 우수성을 확인할 수 있었다.
- 2) Flap-Wise test조건을 부여하여 해석한 결과 CFRP가 적용된 블레이드의 경우 내부 구조재료 중 대체한 CFRP층에 의한 하중 부담으로 인해 블레이드 전체적인 응력 등고 분포가 GFRP모델에 비해 규칙적이며 낮은 응력값을 나타내었다. 또한 twisted tip부분에서도 GFRP모델에 비해 낮은 응력값을 나타내 구조적 성능향상을 확인할 수 있었다.

3) 평직CFRP로 대체한 모델의 경우 GFRP모델에 비해 변위발생이 현격히 줄어든 것으로 나타나 블레이드 전체의 변형발생을 억제할 수 있음을 확인하였다. 또한 두 모델은 같은 단면두께를 가지는 모델에 대해 해석을 수행하였으므로 강도향상이 증명된 CFRP모델의 단면두께를 감소시켜 추가적인 경량화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다

4) Hub와 Neck 연결부에서는 두 모델 다 높은 응력값을 나타내었다. 이는 본 연구에서 평직CFRP 적용을 boxspar부분에 대하여서만 시도하였기 때문이다. 따라서 해석결과를 바탕으로 연결부 까지 적용을 넓힐 경우 연결부에 대한 보강이 충분히 이루어 질 것으로 사료된다.

이상과 같이 얻어진 결과를 기초로 하여 Chord wise test 및 실시간 파손 모니터링에 관한 연구가 추가적으로 이루어질 경우 블레이드의 건전성 확보에 한 층 더 높은 기여를 할 것으로 판단된다.

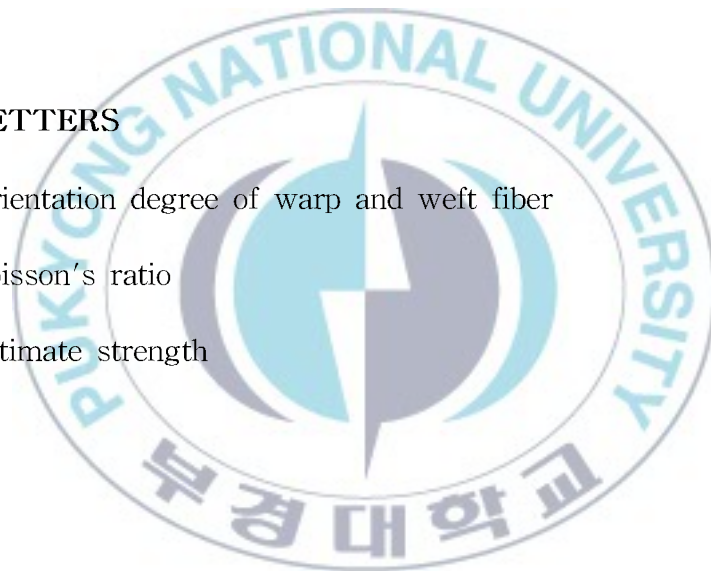
인 용 부 호

NOMENCLATURE

CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Plastic	[-]
E	: Modulus of elasticity	[Pa]
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Plastic	[-]

GREEK LETTERS

θ	: Orientation degree of warp and weft fiber	[°]
ν	: Poisson's ratio	[-]
σ_u	: Ultimate strength	[Pa]



참 고 문 헌

- (1) 한동영, 안경민, 최원호, 이승구, “풍력발전 시스템 타워의 용접부 강도 연구”, 한국 신재생에너지학회 2006년도 춘계학술대회논문집, pp.304~307, 2006.
- (2) 조정미, 이경봉, “복합재료를 이용한 풍력발전기용 터빈 블레이드의 개발”, 대한기계학회지, 제34권, 제5호, pp.342~350, 1994.
- (3) 이충훈, 박진무, 김태욱, 박지상, “풍력발전기용 대형 복합재 윈드터빈 블레이드 구조설계 및 해석”, 대한기계학회지, 2002년도 기계관련 산학연합심포지엄, pp.558~562, 2002.
- (4) 김윤기, 김정천, “풍력발전용 블레이드의 유동/구조 연성해석”, 한국신재생에너지학회지 춘계학술대회, 제11권, pp.698~701, 2005.
- (5) Paul Gipe, “Wind Energy-The reath of life or the Kiss of Death”, Contemporary Wind Mortality Rates, Vol.14 No.4 2001.
- (6) 이충훈, 정성훈, 박지상, 김태욱, “풍력발전기용 복합재 윈드터빈 블레이드의 설계 개발 시험”, 한국복합재료학회, 2004년도 춘계학술발표대회 논문집, pp.22 -25, 2004.
- (7) Gunjit S.Bir, P.Migliore, “Computerized Method for Preliminary Structural design of Composite for Two-and Three-Blade Rotors“, NREL/TP-500-31486, 2004.

- (8) 이창수, “1MW급 수평축 풍력 터빈 블레이드의 최적 외형 설계 및 공력 하중 해석.” 전북대학교, 석사 학위 논문, 2005.
- (9) 신형기, “풍력발전기 블레이드의 소개”, 한국태양에너지학회지, 제6권, 제2호, pp.22~29, 2007.
- (10) 이충훈, 박진무, 홍순곤, 박지상, 김태욱, “풍력발전기용 대형 복합재 블레이드에 대한 구조해석 및 사이징에 관한 연구”, 한국복합재료학회 2002년도 추계학술발표대회 논문집, pp.5~9, 2002.
- (11) 황병선, 최신 풍력 터빈의 이해, 아진 출판사, 2009
- (12) 박선호, 한경섭, “풍력발전기용 복합재 블레이드의 구조해석 및 인증시험”, 한국신재생에너지학회지, 제4권, 제3호, pp.45~50, 2008.
- (13) 방조혁, 김양수, 류지윤, 김두훈, 박선호, 박병준, “2MW 로터 블레이드 구조설계 및 인증시험”, 한국신·재생에너지학회지, 2007년도 추계학술대회 논문집, pp.349-352, 2007.
- (14) G.S.Bir, "Pre-Processor for Computing Composite Blade Properties", NREL/TP-500-38929 Jan, 2006.
- (15) 양인선, 김석우, 경남호, “풍력발전기에서 발생하는 사고의 원인에 대한 분류”, 한국태양에너지학회논문집, 25권, 4호, pp.29-35, 2005.
- (16) David Craig, Caithness Windfarms Information Forum. Wind Turbine Accident Data, 2005.

- (17) 김광수, “첨단 탄소-탄소 복합재료의 기술개발 및 응용 현황”, 기계저널, 제39권, 제2호, pp.47, 1999.
- (18) 문창권, 타카꾸 아끼라, 고분자복합재료, 시그마프레스, 서울, 2005.
- (19) 이지환, 문창권, 박상보, 복합재료, 원창출판사, 1993.
- (20) 이진희, 섬유강화플라스틱, 기전연구소, 서울, 2003
- (21) 안규중, “항공기용 프리프레그 공정 및 특성”, 한국복합재료학회지, 제6권, 제1호 pp. 101~110, 1993.
- (22) Standard test method for "Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials", ASTM D 3039, 2000.
- (23) G.Bir, P.Migliore, "Preliminary Structural Design of Composite Blades for Two and Three Blade Rotors, NREL/TP-500-31486, 2004.
- (24) Dayton A.Griffin, "WindPACT Turbine Design Scaling Studies Technical Area 1-Composite Blades for 80 to 120 Meter Rotor", NREL/SR-500-29492, 2001.
- (25) Germanischer Lloyd. Guideline for the Certification of wind turbine, 2003.

감사의 글

2년의 학위과정동안 부족한 저를 무사히 마무리 할 수 있게 도와주신 주위의 여러 사람들에게 진심으로 감사드립니다.

부족한 저를 제자로 거두어 주시고 학위과정동안 깊은 관심과 조언을 아끼지 않으셨던 권오현 지도 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 중에도 논문을 면밀히 심사하시고 세밀한 검토와 조언으로 많은 가르침을 주신 장성록 교수님, 신성우 교수님께 감사 드립니다. 그리고 학업과정 동안 많은 가르침을 주셨던 목연수 교수님, 이내우 교수님, 박외철 교수님, 최재욱 교수님, 이동훈 교수님, 이의주 교수님, 오창보 교수님에게 감사의 마음을 전합니다.

제가 대학원에 진학 할 수 있게끔 조언해주시고 학위 과정동안에도 학문적으로 많은 도움을 주시고 또한 졸업 후 인생을 설계하는데 많은 조언을 해주신 강지웅 박사님께 진심으로 감사드립니다. 또한 항상 신경써주시고 많은 충고를 해주신 윤유성 박사님께도 감사드립니다.

저의 미래를 위해 충고 해주시고 쓴소리 해주신 송상민 형님, 회사생활에도 뜻을 이루고자 시간을 쪼개 공부하시는 모범적인 모습을 보여주신 곽정훈 형님, 학위과정동안 많은 시간을 함께 나누고 즐길 수 있게 도와주신 유진규 형님, 김태경 형님께도 진심으로 감사드립니다.

학교생활을 하는데 큰 즐거움을 주고 실험실을 위해 힘든 일도 마다 하지

않는 철준, 실험실의 일꾼이자 항상 열심히 하는 세진이와 경보, 같이 운동하며 땀 흘리고 잔심부름도 마다하지 않는 실험실의 미래 명찬, 영호, 호상, 신지에게도 감사하다는 말 전합니다.

학교생활을 재밌게 할 수 있도록 도와주신 고경찬 박사님, 이종빈 박사님을 비롯한 FLY HIGH 선·후배님들에게도 감사의 마음을 전합니다.

어릴적 부터 항상 재밌게 놀고 기쁜 일, 슬픈 일 함께하고 앞으로도 함께할 석주, 민수, 영석이에게 고맙다는 말 전하고 먼저 취직했던 이유로 금전적인 지원 아끼지 않았던 토곡회 친구들 또한 대학에서 만난 저의 진정한 친구로서 인간적인 모습 보여준 진우에게도 감사하다는 말 전합니다.

마지막으로 집안의 장남으로써 책임감을 가지게 하고 아무 말 없이 뒤에서 지켜봐주시고 지원해주신 아버지, 어머니에게 진심으로 감사드리고 학생들 가르친다고 고생하는 동생 은비에게도 고맙다는 말 전합니다.

2011년 8월

정 우 열 올림