creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000263288

2012년 8월
석사학위논문

2 MW급 대형 수평축 풍력발전 시스템을 위한 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 최적설계에 관한 연구

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

임 성 진

2 MW급 대형 수평축 풍력발전 시스템을 위한 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 최적설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2 MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems

2012 년 8 월 24 일

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

임 성 진

2 MW급 대형 수평축 풍력발전 시스템을 위한 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 최적설계에 관한 연구

지도교수 공 창 덕

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함.

2012 년 4 월

조 선 대 학 교 대 학 원

항 공 우 주 공 학 과

임 성 진

임성진의 석사학위 논문을 인준함

위원장 ㈜유니슨 선임연구원 방 조 혁 (인)

위 원 호원대학교 교수 박 현 범 (인)

위 원 조선대학교 교수 공 창 덕 (인)

2012 년 5 월

조 선 대 학 교 대 학 원

LIST OF FIGURES iii

LIST OF TABLES v

NOMENCLATURE vii

ABSTRACT ix

제 1 장 서 론 1

제1절 연구 배경 1

제2절 연구 내용 및 범위 4

제3절 선행 연구 분석 5

1. 풍력발전 시스템 타워 설계 연구 5

1-1. 국내·외 선행 연구 분석 5

1-2. 선행연구 결과 분석 요약 8

제 2 장 금속재 적용 타워 설계 10

제1절 타워 구조 설계 10

1. 구조설계 개요 11

2. 구조해석 13

2-1. 정상 작동시 블레이드가 회전하면서 발생시키는 추력 14

2-2. 타워가 바람에 의해 받는 하중 15

2-3. 타워와 나셀 및 블레이드 무게에 의한 하중 18

2-4. 두께 설정 19

2-5. 타워 섹션별 설계 결과 23

제2절 타워 구조 해석 및 안전성 평가 25

1. 구조해석 결과 25

2. 결론 27

제 3 장 복합재 적용 타워 설계 29
제1절 Trade-off study : 적층패턴 31
제2절 Trade-off study : 두께 34
제3절 Trade-off study : 출입구 해석 40
제4절 Trade-off study : 고유진동수 해석 및 공진가능성 검토 41
제5절 Trade-off study : 연결부위 44

제 4 장 축소형 모델 설계 및 실험 48
제1절 축소형 타워 구조 설계 48
제2절 축소형 타워 제작 51
제3절 축소형 타워 실험 52

제 5 장 결 론 54

참 고 문 헌 56

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Filament wound composite structures 2

Fig. 2 The classification wind turbine system tower 11

Fig. 3 Design procedure of wind turbine system tower 12

Fig. 4 Various applied loads on tower 14

Fig. 5 Vertical stress distribution 20

Fig. 6 Proposed conceptual tower configuration 24

Fig. 7 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the steel tower .. 26

Fig. 8 Primarily section design model for tower structure 29

Fig. 9 Stress and deflection graph of lay-up ratio 32

Fig. 10 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the tower using case 6 design result 33

Fig. 11 Stress and deflection graph of each case thickness 36

Fig. 12 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the composite tower design result 38

Fig. 13 The finite element analysis result of composite tower door 40

Fig. 14 Cambell diagram for resonance check at 15rpm 42

Fig. 15 Cambell diagram for resonance check at 20rpm 42

Fig. 16 L-flange connect 44

Fig. 17 Design conceptual configuration of flange 46

Fig. 18 Simplification of bolt and flange 46

Fig. 19 The finite element analysis result of bolt and flange 47

Fig. 20 Tower and blade under performance testing 48

Fig. 21 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the small scale tower design result 50
Fig. 22 Tower manufacturing process 51
Fig. 23 Stress measurement of small scale tower 52
Fig. 24 FEM Moeling of small scale tower for stress distribution 52
Fig. 25 Stress analysis result of small scale tower 53

LIST OF TABLES

Table 1 System specification of tower 13

Table 2 Load case for tower design 14

Table 3 Z_b, Z_G levels 17

Table 4 G_f levels 17

Table 5 Shape factor 18

Table 6 Estimation of wind load on each tower section 19

Table 7 Tower design result using steel 24

Table 8 Mechanical properties of material used in the tower design 25

Table 9 Analysis results of steel tower used program 26

Table 10 Analysis result of steel tower used MSC. NASTRAN 26

Table 11 Buckling analysis result of steel tower 27

Table 12 Technical data for given 2MW tower 27

Table 13 Mechanical properties of used materials 30

Table 14 Structural analysis result according to lay-up sequence 31

Table 15 Structural analysis result according to thickness 35

Table 16 Structural analysis result according to stress and deflection 35

Table 17 Design results of composite tower 37

Table 18 Analysis results of composite tower used program 37

Table 19 Analysis results of composite tower used MSC. NASTRAN 37

Table 20 Buckling analysis result of composite tower 38

Table 21 Spanwise stress distribution core ply and deformation of the composite tower 39

Table 22 The natural frequency analysis result of composite tower 43

Table 23 The mechanical properties of flange and bolt 45

Table 24 Moment on the each flange 45

Table 25 The specification of the target wind turbine system 48

Table 26 Design results of small scale tower 49

Table 27 Analysis results of small scale tower used program 49

Table 28 Analysis results of small scale tower used MSC. NASTRAN 49

Table 29 Buckling analysis result of small scale tower 49

NOMENCLATURE

p	Blade dynamic pressure
ρ	Air density
C_F	Thrust coefficient
V	Normal operation speed
F_a	Thrust power
S	Swept area
P	Wind Load
W	Wind pressure
A	Wind projected area
q	Wind velocity pressure
C_f	Wind force coefficient
E	Coefficient presented by the Ministry of Construction
V_0	Velocity of design
H	Tower height
Z_b, Z_G	Special coefficient
G_f	Wind influence coefficient
σ_c	Compressive stress
F_w	Tower self-weight
A_T	Tower area
k	Curvature
M_0	Couple of force
dA	Shear strength
M	Moment
z	Section midulus
M_a	Thrust moment
F_a	Blade thrust
M_T	Distribution load moment

Q	Distribution load
M_B	Blade weight moment
W_{Bf}	Blade weight
δ_{Fa}	Displacement of concentrated load
L	Tower height
E	Elasticity modulus
I	Inertia moment
δ_Q	Displacement of distribution load
M_n	Flapwise moment
M_t	Chordwise moment

ABSTRACT

A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2 MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems

by Lim, Sung Jin

Advisor : Prof. Kong, Changduk, Ph. D.

Department of Aerospace Engineering,

Graduate School of Chosun University

Humankind has used wind energy through the several forms for several thousand years. The wind turbine system which has long history like that is the most economical new renewable energy technology until now, but it completely depends on the wind. So, wind turbine system's quantity and system's efficiency are somewhat low. However, experiences, academic theories and new technologies in the past were intensively invested to wind turbine system because of the recent exhaustion of fossil fuel, so lots of studies from small scaled wind turbine system to large wind turbine system of MW class are conducted. As the wind turbine system becomes large, blade and tower are also becoming large. In case of blade, studies on the weight lightening with composite are conducted actively. But, for tower, studies on the application of composite are insufficient. Wind turbine system tower is simpler than other mechanical elements, but its unit cost is so high enough to share 20~25% of the whole cost of wind turbine system. Therefore, it's important to develop tower which is competitive in price. In case of tower applied by composite, its production price can be reduced if comparing existing steel

towers through the weight lightening and simple manufacturing process in comparison with existing steel towers. And, it can be established more easily than existing towers through the simplification of moving and establishment.

As the result of analyzing domestic and international studying, tower applied by steel material is studied actively on designing and establishment of optimal thickness. But, studies on towers applied by composite are insufficient.

This study conducted optimal designing for wind turbine system tower of 2 MW and MW-grade horizontal axis with glass fiber/epoxy. Through the load analysis, optimal designing was conducted by applying composite through the optimal process, after the pre-designing applied by steel. During the designing of tower structure, wind load, blade reaction, weight by nacelle, tower, etc. were considered. The optimal layer pattern was decided by optimal process and optimal thickness was decided by considering buckling, stress, displacement, etc.

For the model designed, structural safety was examined by commercial finite element program, MSC.NASTRAN/PATRAN, and all of requirements for designing were satisfied. Also, miniature model was manufactured by same method and then, outermost distribution of stress was confirmed.

In this study suggested the procedure to design large-scaled wind turbine system tower applied by composite, conducted optimal designing and confirmed that the designed tower satisfied the designing requirements.

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

인류는 수천 년에 걸쳐 여러 가지 형태로 바람에너지를 이용해왔다. 가장 오래된 풍력의 이용은 돛에 의한 배의 추진이지만, 중국, 이집트 등의 문헌에는 풍차에 관하여 기술해 놓은 것이 있고, 이 문헌들에는 풍차는 3000년 이전부터 사용되어온 것이라 기록되어 있다. 이렇게 오랜 역사를 가진 풍력발전기술은 현재까지 가장 경제성이 있는 신・재생에너지 기술이지만 전적으로 바람에 의존함으로서 발전전력의 양과 시스템의 효용성이 다소 낮은 편이다.[1] 그러나 세계는 에너지 위기를 맞이하고, 환경 문제 등을 겪으면서 청정에너지의 필요성이 커져 세계 여러 나라들은 그들이 과거에 풍력을 이용했던 경험과 학문적 이론 및 신기술을 풍력발전 기술에 집중 투자하여 소형 발전 시스템에서부터 MW급 대형 풍력발전 시스템에 이르기까지 많은 연구 결과와 이용을 보이고 있다. 이러한 연구 결과들은 상업화로 이어져 기존 에너지원 보다 사용상에 있어 많은 불편함을 가지고 있음에도 불구하고 그 수요가 날로 늘고 있으며 많은 나라에서 그 이용을 증가시키기 위한 연구 개발에 노력하고 있다.[2] 풍력 에너지는 바람을 에너지 개발원으로 하여 발전한다는 점에서 무공해 발전이 가능하다는 장점이 있고, 같은 양의 전력을 생산하기 위해 필요한 시설물의 설치 면적도 화석연료나 태양광 등에 비해 적고, 설치 후 별다른 노력 없이 반영구적 발전이 가능하다. 다양한 이점을 가진 풍력에 의한 발전량이 점점 증가함에 따라, 기존의 소형발전 시스템 보다 대용량 MW급 풍력발전 시스템에 대한 연구가 활발해지고 있다. 국내의 풍력 산업은 1993년 제주도 풍문단지에 250kw급 발전기가 설치된 것을 시작으로 성장하여 왔으며, 2002년 750kw급, 2005년은 1MW급 발전기가 개발 되었으며 점차 대형화가 되어 2012년까지 2,250MW 규모로 확대가 되어 질 전망이다. 풍력 발전 시스템의 대형화에 따라 블레이드뿐만 아니라 타워 역시 대형화가 이루어지고 있는 추세이다.

풍력발전 시스템은 크게 풍력으로부터 에너지를 전달 받아 발전기에 전달하는 블레이드 로터(blade rotor), 동력전달장치, 발전기 및 각종 전기, 기계 장치가 설치되어 있는 나셀(nacelle), 그리고 블레이드를 통하여 전달되는 하중과 나셀 조립 체의 자중을 지지하는 타워로 구성되어 있다. 풍력발전 시스템에서 타워는 블레이드의 회전으로 발생하는 추력, 나셀 및 블레이드의 무게에 의한 자중을 지지하고, 풍

하중, 지진하중 등과 같은 외부의 하중에 대한 안정성을 유지하여야 하며 이와 함께 작업자 및 전력선의 이동 통로등의 부가적 역할을 수행하여야 한다. MW급 대형 풍력발전 시스템의 경우 50m 이상의 대형 블레이드가 사용된다. 이에 풍력발전 시스템의 대형화에 따라, 높이 100m 이상의 대형 타워 시스템의 개발에 대한 필요성이 증대되고 있다. 대형 풍력발전 시스템의 경우 블레이드에 있어서는 복합재를 적용한 경량화 방안의 연구가 활발히 이루어지고 있으나 타워에 있어서는 복합재를 적용한 경량화 방안에 대한 연구가 미비한 실정이다. 기존의 연구는 금속재 타워, 스틸과 콘크리트를 혼용한 하이브리드 타워에 관한 연구정도가 진행 되었을 뿐이다.[3] 그러나 타워의 구조는 다른 기계요소에 비해 간단한 구조물의 형상 이지만 전체 풍력발전 시스템 비용의 20~25% 정도를 차지할 정도로 단가 비용이 매우 높기 때문에 가격 경쟁력이 있는 타워의 개발이 중요하다. 복합재를 적용한 타워의 경우 기존의 금속재 타워에 비하여 높은 재료 단가를 보이지만, 경량화 및 단순한 제조과정을 거치면서 기존의 금속재 타워와 비교를 하였을 경우 가격 면에서 경제성을 확보할 수 있다.

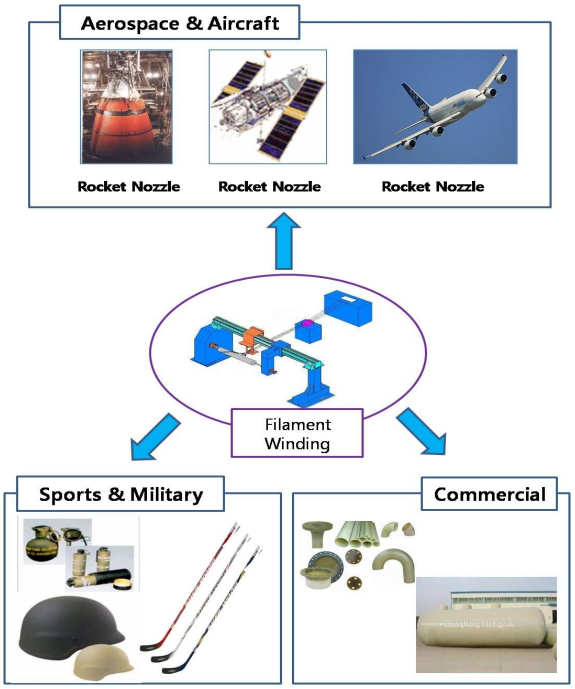


Fig. 1 Filament wound composite structures

본 연구에서는 타워의 제작에 있어서 필라멘트 와인딩 공법을 적용 하였다. 필라멘트 와인딩 공법은 머신 쉘 구조물의 제작에 보편적으로 사용되는 공법이다. 제어기를 통해 모든 제작과정이 자동적으로 수행될 수 있으므로 노동력 절감뿐만 아니라, 제작 시간 단축, 대형 복합재 구조물의 대량 생산에 매우 적합하며, 프리프레그를 사용하는 것보다 저렴하게 제작될 수 있는 공법이다.[4] 필라멘트 공법이 적용되고 있는 응용 예는 Fig. 1 보는 바와 같이 원통형의 쉘 구조물에 사용되며 좌·우 대칭 구조에 보편적으로 사용되고 있는 추세이다. 높은 비강도, 비강성 등의 장점을 가진 섬유강화 복합재료는 적층각도와 적층 수, 섬유 및 사용되어 지는 레진에 의해 각기 다른 기계적 특성을 가지고 있으므로 복합재의 강도를 설계자가 요구하는 방향으로 설정이 가능하다.

이에 본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공법을 적용하여 복합재가 적용된 경량 화된 타워를 설계함으로써 기존의 금속재 타워 보다 가격 생산성에서도 경제성 있는 풍력발전 시스템 타워를 Trade-off 과정을 통하여 복합재 적용 풍력발전 시스템 타워의 각 섹션별 두께 최적설계에 관한 연구를 수행 하였다.

제 2 절 연구 내용 및 범위

본 연구에서는 메가 와트급 대형 수평축 풍력발전 시스템용 복합재 적용 타워의 설계에 관한 연구를 수행하였다. 이를 기반으로 하여 소형 수평축 풍력발전 시스템용 복합재 적용 타워의 재설계를 수행하고, 이를 기반으로 하여 실험 및 해석을 통한 설계 타당성을 검증하는 연구를 수행하였다.

본 연구의 전반부에서는 타워의 높이, 바람이 받는 단면적 등을 고려한 하중조건을 정의 하였다. 이러한 이론·해석적 연구 결과를 바탕으로 전체적인 타워의 형상과 각 섹션별 두께, 적층 패턴을 결정하는 연구를 수행하였다. 해석을 통하여 각 섹션별 타워의 자중을 고려하여 타워의 연결부위를 설계 하였으며, 이 역시 해석을 통하여 안전성을 확인하는 연구를 수행하였다.

본 연구에 적용된 타워는 동일한 길이의 4개의 섹션으로 나누어진 100m 높이의 구조로 결정 하였다. 풍력발전 시스템은 하나의 구조물이 아닌 외관상의 아름다움 역시 고려하여야 하기에 연결 부위는 각 섹션 내경의 차이를 고려하여 테이퍼진 형상을 채택 하였다. 연결 부위는 L-Flange를 적용 하였으며 타워의 맨 하부의 경우 출입구 및 지반과의 연결을 고려하여 높은 항복강도를 보이는 금속재(Steel)를 적용하여 설계를 진행 하였다.

전반부의 연구를 기반으로 하여 후반부는 기존의 설계 방법을 활용하여 소형 풍력발전 시스템 타워를 설계를 하고, 이것을 실험과 해석을 통해 타당성을 검증하는 연구를 수행하였다. 각 섹션별 하중조건 및 두께 결정 역시 MW급 대형 풍력발전 시스템의 경우와 동일한 방법으로 연구를 수행하였다. 실험은 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된 복합재 타워를 실험에 직접 사용 하였으며, 실험의 결과와 FEM 해석을 통해 비교, 검증하는 연구를 수행하여 본 연구에 적용된 설계 방법의 타당성을 검증 하였다.

제 3 절 선행 연구 분석

복합재 적용 타워의 설계는 현재 미비한 실정이나 금속재 타워, 금속재 콘크리트 하이브리드 형태의 타워에 대한 연구는 다양하게 수행되었다. 국외에서는 2000년대 초반부터 복합재를 적용한 타워 설계 연구가 선행 되었다. 국내에서는 복합재료 활용이 다양해지면서 여러 분야에 걸쳐 연구가 진행 되었으나, 복합재 타워의 경우 현재 미흡하게나마 진행이 되고 있다. 복합재를 적용하여 타워를 설계를 수행 한 연구가 미비하여 본 연구를 위해 국내·외 선행 연구 결과에 대하여 풍력터빈 시스템 타워 설계 연구와 복합재 적용 타워 및 블레이드 설계 및 해석에 관한 연구 주제로 분석 하였다.

1. 풍력발전 시스템 타워 설계 연구

1-1. 국내·외 선행 연구 분석

풍력터빈 시스템 타워 설계에 대한 연구는 국내·외적으로 다양한 연구가 수행되었다. P.E. Uys는 고유진동수를 고려하여 풍력터빈 시스템 타워의 높이와 직경의 최적화 설계를 수행 하였다.[5] Tongguang Wang은 블레이드의 회전에 의해 생기는 항력을 고려하여 타워의 거동을 분석 한 후 해석결과와 비교하는 연구를 수행 하였다.[6] Luong Van Binh는 풍력터빈 타워에 받는 하중조건을 가우스 응답법을 고려하여 분석을 하고 FEM 해석을 통하여 오차범위를 확인하는 연구를 수행 하였다.[7] M.A. Mikitarenko는 트러스 구조의 풍력터빈 시스템 타워의 진동에 의한 피로수명에 대한 연구를 수행 하였다.[8] P.J. Murtagh는 타워의 고유진동수를 분석하여 타워의 안전성을 분석하였다.[9] N.Bazeos는 정적 하중을 받는 타워의 구조해석을 수행 하였다. 좌굴의 안전성을 확인하고 해석을 통해 출입구의 안전성을 검증하는 연구를 수행 하였다.[10]

국내 연구로는 김석현 등이 1kW급 소형 독립형 풍력 발전기의 원격 진동 모니터링 시스템을 적용하여 블레이드와 타워의 공진에 대한 안전성을 검증하는 연구를 수행 하였다.[11] 홍혁수 등은 2MW급 대형 풍력발전 시스템 타워의 쉘 두께를

이론적 해석을 수행한 후 수치해석을 이용하여 쉘의 두께의 변화에 따른 고유진동수, 강도, 피로, 좌굴 값의 변화율을 검토하였으며, 타워 쉘 두께의 최적화 설계를 진행하는 연구를 수행 하였다.[12] 김동만 등은 MW급 대형 풍력발전 시스템 타워에 대하여 풍하중 및 지진하중의 영향을 고려하여 구조진동특성을 계산 하였고, 이를 FEM 해석을 통하여 확인하는 연구를 수행 하였다.[13] 김분주는 JEMONT사의 J48/750 모델을 기준으로 선정하여 축소 모형을 제작하여 블레이드와 타워 사이의 고유치를 실험과 해석을 통해 비교 하는 연구를 수행 하였다.[14] 김남형 등은 풍력 발전 시스템 타워에 미치는 파력과 풍력에 대해 SMB법을 이용하여 천해파랑을 산출 하였고, 이 값을 MacCamy&Fuchs에 의한 회절파 이론에 적용하여 타워에 미치는 영향을 수치 해석적 연구를 수행 하였다.[15] Dimos J. Polyzois는 8개의 다중 쉘로 구성된 GFRP 복합재 타워에 대한 설계를 수행 한 후 실험과 해석을 통해 타당성을 검증하는 연구를 수행 하였다. 원형강관 형태의 설계는 어려움이 있어 다각형 모양의 다중 쉘로 구성된 타워를 설계 제작하여 직접 실험을 통해 안전성을 검토 하였다.[16] Jane E. Lundberg는 하중의 영향을 받고 있는 원형 강관에 대해 유리섬유만 적용된 원형강관과 콘크리트충전강관을 비교하고 이를 해석을 통해 안전성을 검토 하였다. 그리고 각 강관에 대해 가격경제성 비교를 하는 연구를 수행 하였다.[17] E. Gutierrez은 테이퍼진 유리섬유 복합재료가 적용된 풍력터빈 타워를 고전적층판 이론을 적용 하여 설계를 수행 하였다. 설계 후 실제크기 타워를 제작하여 하중 조건에 맞는 하중을 작용하여 실험을 수행 하였다. 타워 설계뿐만 아니라 연결부위 설계를 수행하여 연결부위의 안전성 역시 확인 하는 연구를 수행 하였다.[18] Hani M. Negm은 100kW급 풍력터빈 시스템(ERDA-NASA MOD-0)모델 타워의 최적설계 연구를 수행 하였다. 기존의 금속재 타워에 대하여 수학적 경험식과 해석 결과 값을 비교하여 고유진동수를 기준으로 하여 최적 설계 연구를 수행 하였다. 그리고 이것을 설계기준점과 비교 하여 타당성을 검증 하였다.[19] 국내 연구로는 이성우등이 콘크리트 충전 복합소재 파일의 토목 구조물 적용을 위한 기초 연구를 수행 하였다. 연속 필라멘트 와인딩 공정을 이용하여 대구경 콘크리트 충전 복합소재 파이프의 휨과 압축 거동에 대하여 실험을 수행하여 수적층과 외부 필라멘트 와인딩 성형방법과 비교를 하여 연속 필라멘트 와인딩 공법이 가장 우수함을

밝혔다.[20] 또한, GFRP 튜브로 구속된 충전 콘크리트의 응력-변형률 거동을 적층 구조에 따라 실험을 통하여 분석 하였다. 그리고 이를 기반으로 하여 응력-변형률 거동식을 제안 하였다.[21] 한정영등은 대형 풍력발전 시스템 타워에 대한 기초 연구를 수행 하였다. 복합재 적층 물성치 적용 방법에 따른 타워의 좌굴 해석 결과, 좌굴 하중 값을 비교하였다. 또한, 필라멘트 와인딩 각도에 따른 좌굴 하중 값을 비교 하였다.[22] 박강근은 콘크리트 충전 원형 및 각형 합성 강관 기둥의 축 압축 거동에 관한 연구를 수행 하였다. 콘크리트 충전 원형 강관과 각형강관 기둥에 대해 하중 값을 실험을 통하여 정의 하였다.[23]

본 연구에서는 총 100m의 4개의 섹션으로 나누어진 풍력발전 시스템 타워에 대한 연구를 수행 하였다. 타워의 설계와 함께 연결부위 역시 타워의 높이와 자중, 모멘트 등을 고려하여 설계 되어야 한다. 그리고 본 연구에서는 기존의 금속재 타워보다 2배의 수명연장을 목표로 하고 있으므로, 피로수명에 대한 선행연구도 수행 하였다. 김강길은 풍력발전 시스템 타워 설치 시 사용되는 볼트에 초기응력이 작용할 때 플랜지에서의 구조적 특성을 살펴보는 연구를 수행 하였다. 초기응력을 고려하여 기존의 타워 플랜지와 볼트의 재설계를 통하여 최적화 설계를 수행 하였다.[24] 조경수등은 풍력발전 시스템 블레이드와 허브를 결합하는 부품인 T-bolt에 적용 할 Pre-tension 값을 설정하기 위해 유한요소 해석을 수행하고, 이론값을 계산하여 분석하는 연구를 수행 하였다.[25] Walter Salvatore는 금속재와 콘크리트 복합재 파이프에 작용하는 하중들을 분석하여 연결부위 설계를 하였다. 설계 후 실험과 유한요소 해석을 통하여 안전성을 검토하는 연구를 수행 하였다.[26] Jeong Kim은 4가지의 볼트 모델을 유한요소 모델링을 통하여 해석을 수행한 후 모델링 기법을 제안 하였다. 또한, 응력과 더불어 전단흐름을 고려하여 모델링을 하는 연구를 수행 하였다.[27] Wenchun Jiang는 풍력발전 시스템 타워와 하부 플랜지 사이의 용접에 의한 결합부의 잔류응력을 고려하여 타워 연결부위 해석을 수행 하였다. 4개의 유한요소 해석 모델을 제시하였으며, 용접에 의한 안전성을 검토 하였다.[28] Abdel-Hakim Bouzid는 고온에 노출된 플랜지와 볼트에 대하여 스프링요소를 적용한 플랜지와 볼트 연결부위와 볼트 부분을 빈 공간으로 설정한 후 고정경계조건을 적용한 3D 유한요소 해석 모델을 제안 하였다. 또한, 열응력과 각각에 가

해지는 응력과 모멘트를 계산하여 해석 결과 값과 비교하는 연구를 수행 하였다.[29]

복합재의 피로에 대한 문제는 최근에 활발히 연구가 진행 되고 있는 추세이다. J. Aghazadeh Mohandesi는 카본/에폭시 복합재 적층판에 축척된 손상에 의한 피로수명 연구를 수행 하였다. 꾸준한 충격손상을 가하여 복합재 적층판의 균열과 박리 등을 실험을 통해 확인하는 연구를 수행 하였다.[30] Christoph W. Kensche는 S-N커브를 이용하여 대형급 풍력발전 블레이드의 피로수명을 예측하는 연구를 수행 하였다. CFRP로 설계되어진 복합재 블레이드에 대하여 바람이 불때와 동일한 하중을 적용하여 스킨뿐만 아니라 웨브와 플랜지에 있어서 피로수명을 예측하고 이것을 실험을 통하여 S-N커브와 비교하는 연구를 수행 하였다[31] Knut O. Ronold는 풍력발전 시스템 블레이드의 flapwise를 고려하여 피로수명을 예측하고 이것을 기반으로 하여 복합재 블레이드를 설계하는 연구를 수행 하였다. 블레이드에 받는 하중을 예측하고 이것을 E-N커브를 이용하여 증명 하였다.[32]

1-2. 선행연구 결과 분석 요약

국내・외적으로 금속재 타워를 적용하여 설계한 경우 최적화 설계 연구가 현재 활발히 진행되고 있는 추세이다. 이와 반대로 풍력발전 시스템 복합재 적용 타워 설계에 관한 연구는 미비하게 연구가 진행되어 오고 있다. 타워 설계에 있어 굽힘 응력, 변위, 좌굴 및 고유진동수와 블레이드와의 공진 가능성을 검토하여 최적 설계가 이루어 져야 한다. 연결부위의 경우 플랜지와 볼트의 위치에 작용하는 모멘트와 응력을 계산하여 플랜지의 두께나 볼트의 직경 등을 설계 하게 된다. 추후 FEM 해석을 통하여 안전성을 검토 하여야 하며, 해석 수행 시 여러 경우의 볼트 모델링 역시 고려하여야 한다. 또한 피로수명 연구의 경우 블레이드와 복합재 적층판에 관한 연구는 꾸준히 진행 되었고 발전되어 왔다. 그러나 복합재 타워 시스템의 경우 피로수명을 고려한 연구는 미흡하였다.

선행 연구 분석 결과 복합재 적용 풍력발전 시스템 타워 설계의 명확한 기준이 없는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통해 금속재를 적용하여 선행 연구 및 설

계를 진행한 후 복합재 적용 풍력발전 시스템 타워의 설계를 진행 하였다. 또한 복합재 적용 타워 설계 기준을 제시하고, 이를 FEM 해석과 축소형 모델 재설계와 실험을 통해 검증하는 연구를 수행 하였다.

제 2 장 금속재 적용 타워 설계

제 1 절 타워 구조 설계

풍력발전 시스템의 역사와 함께 타워의 역사도 시작 되었다. 고대의 타워에서부터 오늘날의 타워에 이르기 까지 타워의 역할은 크게 변하지 않았다. 그러나 모양과 재질은 기술이 발달됨에 따라 많은 변화를 거쳐 왔다. 공학적인 연구와 그에 부응할 수 있는 재질의 개발로 오늘날은 다양한 타워의 모양을 갖추고 있다. 타워의 모양을 외형적으로 크게 분류하면 Shell Type, Stepped Shell Type, Truss(or Lattice) Type, 그리고 Guyed Shell(or Similarly, Guyed Truss)Type로 구분 지을 수 있다.[33] Shell Type의 경우 원뿔형태의 모양을 가지며 대형급 풍력발전 시스템 및 소형 풍력발전 시스템에도 두루 사용되는 형태이다. Stepped Type의 경우 각 구간이 나누어져 타워의 상부로 갈수록 작아지는 형태의 원통을 연결하는 방식으로 대형급 풍력발전 시스템에 사용된다. Truss Type의 타워는 용접에 의해 제작되며, Shell Type의 절반정도의 재료를 사용함으로써 제작비용을 절감하고, 타워의 중량을 감소시키는 장점이 있다. 그러나 외관상의 문제 및 대형 풍력발전 시스템에는 부적합한 형태가 된다. 소형 풍력발전 시스템이 주로 사용되는 Guyed Shell Type의 경우 직경이 작고 긴 관과 지지와이어로 구성되는 형태로서 타워의 제작비용 절감 및 중량감소의 장점을 가지고 있지만 견딜 수 있는 하중이 적고, safety area가 필요한 단점이 있다. 구조적으로 타워의 형상은 1950년대 까지는 Truss type을 주로 사용하였다. 1960~1970년대에는 Truss Type과 Shell Type의 타워가 같이 사용 되었으나, 피로수명의 문제와 진동 문제 때문에 Truss Type의 경우 점차 사용이 줄어들게 되었다. 현재는 풍력발전 시스템의 대형화에 따라 Shell Type의 타워와 Stepped Shell Type의 타워의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 또한, 풍력발전 시스템의 대형화와 재료의 발달로 인해 기존의 나무와 콘크리트, 금속재(Steel)를 비롯하여 풍력발전 시스템 전체의 경량화와 제작비용 절감, 설치 및 이동의 편의를 위해 복합재료를 적용한 타워의 발전이 이루어지고 있다. 이에 본 장에서는 복합재적용 타워의 설계에 앞서 금속재를 적용하여 타워를 설계, 해석 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 이동 및 설치가 용이하고 대형급 풍력발전 시스템에 많이 사용되어지는 Stepped Shell Type의 타워를 적용하여 설계를 진행 하였다.

Shell Type　　Stepped Shell Type　　Truss Type　　Guyed Shell Type

Fig. 2 The Classification of wind turbine system tower

1. 구조설계 개요

본 연구에서 고려한 구조설계 및 해석 절차는 Fig. 3과 같으며 설계요구조건에 적합한 형상 설계가 완료되면, 구조적으로 안정된 설계를 위한 유사구조형상, 재질, 제작 방법 등을 고려하여 구조적 개념 설계를 수행한 후 각 하중 case에 따른 하중해석을 수행하고 이를 바탕으로 간단한 이론 또는 경험적 수식을 이용하여 정적 구조설계 및 해석을 수행한다. 구조설계가 완료되면 MSC.Patran으로 전처리 과정을 거친 후 MSC.Nastran을 이용하여 정적응력 해석, 모달해석 등을 통하여 구조적 안전도를 확보하고 구조설계를 확정한다. 구조설계의 절차는 Fig. 3에 나타내었다.

타워의 구성품은 타워 그 자체로서 블레이드가 회전할 수 있도록 받쳐주고 지지해 주는 역학을 한다. 타워는 블레이드에 의해 발생하는 추력에 의한 집중하중과 바람에 의해 타워 전체에 분포하중이 작용하기 때문에 타워의 상단에 집중하중이 그리고 타워전체에 분포하중을 받고 있는 받고 있는 보로 해석할 수 있다. 집중하중은 허브의 중 심축을 타고 타워의 중심축으로 전달되고, 분포하중은 타워전체에 작용한다. 타워 상부는 자유단, 하부는 기초 구조물과 연결된 고정 단으로서 타워의 하부에 반력이 발생하여 응력이 집중된다.

풍력발전 블레이드의 경우 폭풍시의 하중조건은 블레이드를 정지 시키게 되므로

거스트 조건을 고려하여 설계를 수행한다. 그러나 풍력발전 시스템 타워의 경우 폭풍시의 극한하중을 받으므로 폭풍조건을 고려하여 설계를 수행 하였다.

본 연구에서는 타워의 설계를 위하여 구조적으로 만족할 만한 타워의 높이와 직경을 결정한 후 두께를 조절해 나가는 순으로 계산을 수행하였다. 타워의 높이를 100m로 결정 하였고, 총 4개의 섹션으로 구분 하였다. 타워의 상단부 섹션의 직경은 3m로, 그 외

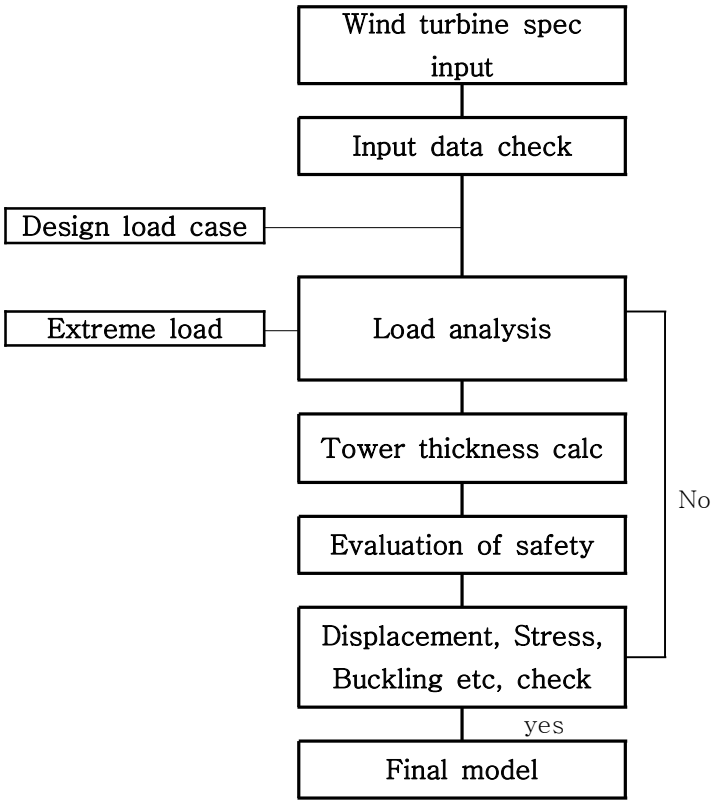


Fig. 3 Design procedure of wind turbine system tower

나머지 섹션은 외형을 고려하여 3.4m, 3.7m, 4m로 결정 하였으며, 각 섹션의 연결부위는 테이퍼진 연결부위를 적용하여 타워의 전체적인 형상을 결정 하였다.

2. 구조해석

풍력발전 시스템 타워의 설계를 수행하기 위해서는 먼저 시스템 사양에 대한 정립이 필요하다. 시스템의 사양은 사용 목적 및 용도에 맞도록 정의되어지며, 이러한 시스템의 규격이 정해지면 세부적인 설계 요구조건을 정립할 수 있게 된다. 풍력발전 시스템 타워의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 나셀, 블레이드 및 타워 자체의 자중을 견뎌야 하는 두께와 직경이다. 본 연구에서는 직경을 먼저 결정한 후 두께를 변화 시켜 나가는 방법으로 구조해석을 수행 하였다. 본 연구에서는 유사 대형급 풍력발전 시스템 자료 및 국내 바람지도를 바탕으로 Table 1과 같은 시스템 사양을 정립하였다.[34, 35]

Table 1 System specification of tower

Type	Stepped Shell Type			
Target	Large Scale Horizontal Axis Wind Turbine System(MW)			
Rated power	More than 2MW			
Height	100m			
Diameter	1st Section	2nd Section	3rd Section	4th Section
	3.0m	3.4m	3.7m	4.0m
Rated rotor speed	5~25 rpm (To be determine the optimal value)			
Rotor diameter	120m			
Tower material	Glass/epoxy composite			
Weight	Nacelle and Rotor		Blade(3EA)	
	300ton		21ton	

타워의 구조 해석은 먼저 각각의 하중조건을 고려하여 하중을 결정하고 하중의 타당성을 검토한 후 응력 및 변위 해석 순으로 진행 하였다. 각 각의 상황에 따른 하중 조건으로는 풍속의 변화에 따라 받는 타워의 하중을 고려할 수가 있겠다. 이는 크게, 정상작동시 타워가 받는 하중과 폭풍시 정지하였을 때 타워가 받는 하중을 고려할 수가 있다. 본 연구에서는 극한하중조건을 고려하여 타워를 설계 하여야 하므로 폭풍시를 기준으로 설계를 수행하였다. 타워의 구조해석시 고려 할 주 하중으로는 크게 세 가지가 있다. 블레이드가 회전하면서 발생시키는 추력에 의한 하중, 바람에 의해 타워자체가 받는 분포하중 그리고 나셀과 블레이드 및 타워의 무

게에 의해 발생하는 하중으로서 간단히 모델링하면 fig. 4와 같다.

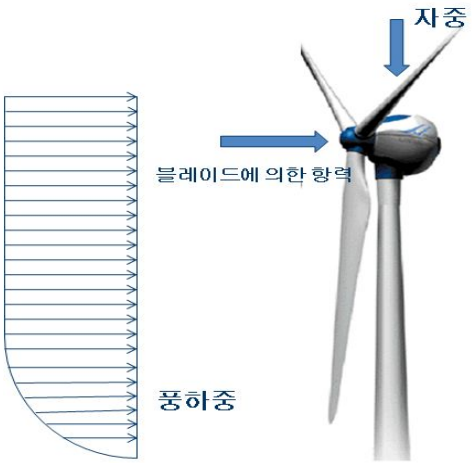


Fig. 4 Various applied loads on tower

타워의 바람에 의해 받는 하중조건을 구하기 위해 하중조건을 정의하여 Table 2에 나타내었다. 타워는 상단부분에 집중하중이 작용되어 지고 타워 전체에는 분포하중을 받고 있는 비 균일보로 해석할 수 있다.

Table 2 Load case for tower design

Load Case	Case Ⅰ	CaseⅡ	CaseⅢ
Reference wind speed	8.0 m/s	20.0 m/s	55.0 m/s

2-1. 정상작동시 블레이드가 회전하면서 발생시키는 추력

블레이드가 회전하면서 발생시키는 추력은 블레이드가 회전할 때 발생하는 동압

$$p = \frac{1}{2}\rho C_F V^2 \tag{1}$$

으로부터 구할 수 있다. 여기서 ρ는 공기의 밀도(1.25), C_F는 추력계수(0.64), V는 정상작동시 바람의 속도(8m/)를 나타낸다. 각각의 값을 대입하며 위의 식을 정리하면 동압은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = 0.4V^2 \tag{2}$$

따라서 블레이드에 의해 발생하는 힘 F_a는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Fa = p \times S = 0.4V^2S \tag{3}$$

여기서 S는 블레이드가 회전하면서 만드는 swept area를 의미한다. 폭풍시 블레이드는 회전하지 않고 정지 한다. 이 때 블레이드에 생기는 공력은 정상 작동시의 40%에 해당하는 출력이 발생하게 된다.

2-2. 타워가 바람에 의해 받는 하중

블레이드의 경우 통상적으로 거스트 조건일 경우 블레이드를 고정 시켜 운용을 중단하게 되므로 Case Ⅱ를 극한하중으로 가정하여 구조설계가 이루어진다. 하지만 타워의 경우 폭풍시 역시 바람에 의한 하중을 견뎌야 한다. 따라서 타워 구조설계 시에는 Case Ⅲ를 적용한다. 타워는 원통형 보의 형상을 하고 있는데, 높이가 높아질수록 바람에 의한 하중이 커지게 된다. 이때 타워는 Fig. 3에 보여 지는 바와 같이 바람에 의한 선형변화분포하중을 받는다. 타워의 각 높이에 따른 하중은 다음 경험식들을 이용하여 구할 수 있다.[1]

$$P = W \cdot A \tag{4}$$

여기서 P는 풍하중[N]을 W는 풍압력을[N/m^2], A는 바람의 투영면적을 나타낸다. 타워에 받는 하중은 두 가지의 경우로 나누어 계산을 수행하여야 하나 본 연구에서는 폭풍시 풍압력을 구하는 방법만을 고려하여 설계를 수행 하였다. 폭풍시 타

위에 받는 풍압력을 구하는 식은 다음과 같다.

$$W = q \cdot C_f [N/m^2] \tag{5}$$

여기서 W는 풍압력[N]을 q는 속도압[N/m^2], C_f는 건설성에서 고시한 풍력계수를 나타낸다. 속도압 q는 식 (6)을 이용하여 구한다.

$$q = 0.6 E V_0^2 [N/m^2] \tag{6}$$

여기서 E와 V_0는 건설성에서 제시한 수치와 속도를 나타낸다. 본 연구에서는 폭풍시를 기준으로 하여 설계를 수행하였으므로 V_0는 55m/s를 적용하여 설계를 수행 하였다. 타워의 높이는 각각의 섹션높이 25m, 50m, 75m, 100m을 적용하였으며 다음 식을 통하여 각 섹션에 작용하는 풍압력을 구하였다. 폭풍시의 조건이므로 속도는 Case Ⅲ의 55m/s를 적용하였다.

$$V_0 = 55 m/s \tag{7}$$

지상으로부터 각 섹션별 높이를 고려할 경우 평균풍속 높이 방향의 분포를 나타내는 계수 E_r을 구하는 식은 H가 Z_b이하의 경우 식 (8)을 H가 Z_b을 넘는 경우 식 (9)을 적용한다.

$$Er = 1.7 (Z_b / Z_G)^{\alpha} \tag{8}$$

$$Er = 1.7 (H / Z_G)^{\alpha} \tag{9}$$

여기서 H는 지상으로부터 높이를 Z_b, Z_G는 지표면 조도에 대응하여 Table 3에서 제시한 수치를 따른다. 본 연구에서는 지표면 조도에 대응하여 Ⅰ을 적용하여 설계를 수행 하였다.

Table 3 Z_b, Z_G levels

e **levels**	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
Z_b	5	5	5	10
Z_G	250	350	450	550
α	0.10	0.15	0.20	0.27

첫 번째 섹션이 25m의 경우를 고려하여 계산을 수행할 경우, H가 Z_b을 넘으므로, 식 (9)을 적용한다.

$$E_r = 1.7(H/Z_G)^{\alpha} = 1.7(25/250)^{0.1} \tag{10}$$

돌풍영향계수(G_f)의 경우 Table 4를 이용하여 구한다.

Table 4 G_f levels

지표면 조도구분 \ H	**(1)**	**(2)**	**(3)**
	10m 이하의 경우	**10m~40m**	**40m 이상의 경우**
Ⅰ	2.0	(1)과 (3)의 값을 선형적으로 보간한 수치	1.8
Ⅱ	2.2		2.0
Ⅲ	2.5		2.1
Ⅳ	3.1		2.3

25m의 경우 (2)의 영역 이므로 1.9의 값을 적용 하였다. 이때, 속도압 산출에 사용되는 수치(E)는 아래의 식을 이용한다.

$$E = E_r^2 \cdot G_f \tag{11}$$

속도압 q는 식 (6)에 대입한다. 형상계수의 경우 Table 5를 참고하여 결정한 후 각 값을 식 (12)에 대입하여 풍압력을 구해낸다.

Table 5 Shape factor

H/B	(1)	(2)	(3)
	1이하의 경우	1~8	8이상의 경우
C_f	$0.7k_z$	(1)과 (3)의 수치를 직선적으로 보간한 수치	$0.9k_z$
	H가 Z_b 이하의 경우	H가 Z_b를 넘는 경우	
		Z가 Z_b 이하의 경우	Z가 Z_b를 넘는경우
k_z	1.0	$(Z_b/H)^{2\alpha}$	$(Z/H)^{2\alpha}$

Z는 지표면으로부터의 높이이고, B는 타워의 직경, 타워의 높이는 H이다.

$$W = q \cdot C_f \tag{12}$$

각 섹션별 결과를 계산한 수치는 아래 Table 6에 나타내었다.

2-3. 타워와 나셀 및 블레이드의 무게에 의한 하중

풍력발전 시스템의 경우 제일 상단부에 나셀 및 로터가 장착이 된다. 타워는 나셀 및 로터의 무게를 지탱할 뿐만 아니라 타워 자체의 자중역시 작용하게 된다. 이러한 무게들은 타워에 압축응력을 발생시키는 원인이 된다. 식 (13)으로부터 무게에 의한 응력을 구할 수 있다.

$$\sigma_c = \frac{F_w}{A_T} \tag{13}$$

여기서 F_w는 타워의 자중, 나셀 및 블레이드, 로터 등의 무게를 나타낸다. 그리

고 A_T는 힘을 받는 타워의 단면적을 나타낸다. F_w의 경우 중력에 의해 발생하는 힘으로 타워의 아래쪽으로 힘이 작용한다. 무게에 의한 하중은 바람이 변수가 되지 않으므로 풍속의 영향을 받지 않는다.

Table 6 Estimation of wind load on each tower section

H[m]	E_r	G_f	E	q	B[m]	H/B	계수	k_z	C_f	$W[N/m^2]$
0	0	2	0	0	4	0	0.7	1	0.7	0
25	1.350	1.9	3.464	6288.22	4	6.25	0.8	0.757	0.606	3812.46
50	1.447	1.8	3.770	6843.10	3.7	13.51	0.9	0.870	0.783	5361.53
75	1.507	1.8	4.088	7421.15	3.3	22.72	0.9	0.944	0.849	6305.59
100	1.551	1.8	4.330	7860.65	3	33.33	0.9	1	0.9	7074.59

2-4. 두께 설정

타워의 상부는 자유단이고 하부는 고정단의 모습을 하고 있다. 이 때문에 타워의 하부에 응력이 집중되는 현상이 나타난다. 블레이드의 추력, 타워의 분포하중 그리고 나셀과 블레이드 및 타워자중에 의한 하중이 응력 발생의 주원인으로서 이를 계산하여 굽힘 응력을 구하면 타워가 받는 응력과 변위를 구할 수 있다. 본 연구에서는 굽힘 응력과 변위를 이용하여 각 섹션별 두께를 설계 하였다. 원형강관 형태이고 대칭이기 때문에 최대인장응력과 최대압축응력이 타워 단면의 중심으로부터 가장 먼 위치에 발생하게 된다. 이 때 바람을 받는 쪽엔 최대인장응력이 발생하고 그 반대쪽에 최대압축응력이 발생한다. 수직변형률 ϵ_x로부터 보의 단면에 수직으로 작용하는 응력 σ_x를 구할 수 있다. 본의 경우 길이 방향은 오직 인장이나 압축을 받게 된다. 본 장에서는 금속재를 적용하여 타워를 설계 하였으므로 응력-변형률 선도가 선형 탄성적 이므로 후크의 법칙을 사용할 수 있다.

$$\sigma_x = E\epsilon_x = -Eky \tag{14}$$

여기서 k는 곡률을 나타내고 y는 중심 면으로 부터의 거리를 나타낸다. 우력 M_0가 Fig. 5에 보이는 바와 같이 작용할 때 중심면의 하부는 음의 응력(압축)을 나타내고 중심면의 상부는 양의 응력(인장)을 나타낸다.

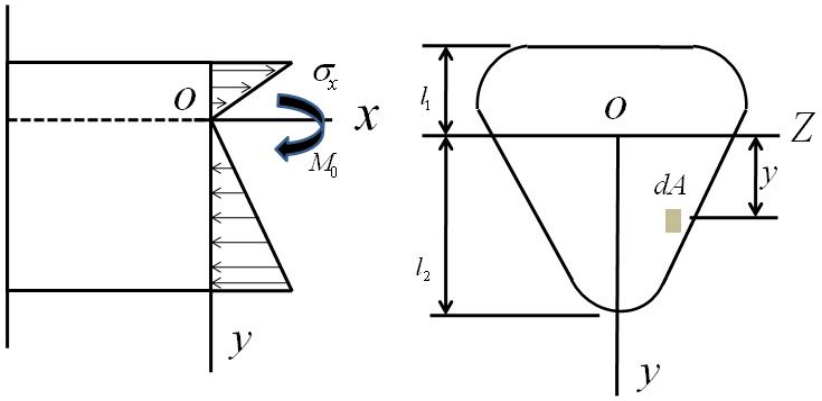


Fig. 5 Vertical stress distribution

단면에 작용하는 축 방향 응력은 없으므로 오직 우력 M_0만이 존재함에 따라 두 개의 정역학적인 평형방정식을 얻을 수 있게 된다. 중립축에서 y만큼 떨어진 미소 면적 dA를 고려해보면 이 요소에 작용하는 힘은 단면에 수직인 방향으로 $\sigma_x dA$인 값을 갖는다. 단면에는 어떠한 수직 방향의 힘의 성분도 작용하지 않으므로 단면의 전 면적에 대한 $\sigma_x dA$의 적분은 영이 된다. 여기서 단면에 작용하는 응력 σ_x에 의한 합성모멘트를 고려해 보면 미소면적 dA에 작용하는 힘 $\sigma_x dA$는 σ_x가 양일 때 양의 x방향으로 작용하면 σ_x가 음일 때 음의 x방향으로 작용하는 것이므로 우력 M_0에 의해 미소한 $\sigma_x dA$의 값으로 표시되는 z축에 대한 모멘트 값은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$dM_0 = -\sigma_x dA \tag{15}$$

전체면적에 걸친 적분값은 전 모멘트 M과 같으므로 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$M_0 = -\int \sigma_x y dA \tag{16}$$

굽힘 모멘트 M이 $-M_0$와 같다는 사실에 주의하여 식 (14)에 대입하면

$$M = \int \sigma_x y dA = -kE\int y^2 dA \tag{17}$$

가 되고 이 식을 간단하게 표기하면

$$M = -kEI \tag{18}$$

여기서 $I = \int y^2 dA$ 이며 이것은 z축에 대한 단면 2차 관성모멘트 이다.

$$k = \frac{1}{\rho} = -\frac{M}{EI} \tag{19}$$

식 (19)를 식 (14)에 대입하면

$$\sigma_x = \frac{M_y}{I} \tag{20}$$

식 (20)으로 구할 수 있다. 이 식으로부터 응력은 굽힘모멘트에 비례하고 단면의 관성모멘트 I에 반비례 하는 것을 알 수 있다. 또한 응력은 중심축으로부터의 거리 y에 비례한다는 것을 알 수 있다.

보에서 최대 인장응력과 최대 압축응력은 앞에서도 언급했지만 중심축으로부터 가장 먼 위치에서 일어난다. 중심축으로부터 양과 음의 방향으로 가장 먼 위치의

거리를 각각 l_1, l_2라 하면 최대 수직응력은 다음 식과 같다.

$$\sigma_1 = \frac{Ml_1}{I} = \frac{M}{z_1} \qquad (21)$$
$$\sigma_2 = \frac{Ml_2}{I} = \frac{M}{z_2}$$

z는 단면계수이다. 굽힘모멘트 M이 양의 값이면 응력 σ_1은 인장, σ_2는 압축이며 M이 음일 경우에는 반대가 된다.

타워는 단면이 z축에 대하여 대칭인 형상을 갖고 있다. 단면에 z축에 대하여 대칭이면 $l_1 = l_2 = l$이고 최대인장응력과 최대압축응력의 값은 같다. 따라서 타워에 작용하는 최대인장응력과 최대압축응력은 식(22)로부터 구할 수 있다.

$$\sigma = \frac{M_{total}}{z} \qquad (22)$$

여기서 z는 $\frac{I}{y}$이다. 총 모멘트는

$$M_{total} = M_a + M_T - M_B \qquad (23)$$

로부터 구할 수 있다. 여기서 M_a는 블레이드의 추력에 의해 발생하는 모멘트로서 $M_a = F_a \times dx$이다. F_a는 블레이드의 추력이고 dx는 타워의 상단부분에서 하단부분까지를 미소구간으로 나눈 거리이다. M_T는 타워의 분포하중에 의해 발생하는 모멘트로서 $M_T = Q \times dx$로부터 구살 수 있다. Q는 타워가 받는 분포하중 이고 dx는 타워의 상단부분에서 하단부분까지를 미소구간으로 나눈 거리이다. M_B는 블레이드의 자중에 의해 발생하는 모멘트로서 블레이드가 타워의 중심축으로부터 벗어나 설치되기 때문에 생기는 모멘트이다. $M_B = W_{Bf} \times d$이다. 여기서 W_{Bf}는 블레이드의 자중을 나타내고 d는 타워의 중심축으로부터 블레이드의 중심까지의 거리이다. 본

연구에서는 대형급 풍력발전 시스템의 일반적인 설계 사양들을 참고하여 4m를 적용하여 설계를 수행 하였다. M_B는 M_T, M_a와 반대 방향으로 모멘트가 작용하기 때문에 부호는 (-)가 된다. 본 연구에서 I값은 각 섹션별 값을 구하여 계산 하였다. 계산된 M_{total}과 z로부터 타워에 발생하는 최대 인장응력과 최대압축응력을 구할 수 있다. 타워 전체에 작용하는 응력을 계산해 보면 식 (24) 와 같다.

$$\sigma_C = \sigma_b + \sigma_c \qquad (24)$$
$$\sigma_C = \sigma_b - \sigma_c$$

굽힘하중에 의한 변위는 식 (25)로부터 구할 수 있다.

$$\delta_t = \delta_{F_a} + \delta_Q \qquad (25)$$

δ_{F_a}는 집중하중을 받는 보의 변위로서 $\delta_{F_a} = \dfrac{F_a L^3}{3EI}$로부터 구할 수 있다. F_a는 블레이드에 의해 발생하는 추력, L은 타워 높이, E는 탄성계수, I는 관성모멘트를 나타낸다. δ_Q는 분포하중을 받는 보의 변위로 $\delta_Q = \dfrac{QL^4}{8EI}$로부터 구하게 된다.

2-5. 타워 섹션별 설계 결과

위의 과정들을 이용하여 금속재를 적용한 타워의 각 섹션별 두께를 결정하였다. 타워의 각 섹션별 높이는 25m로 결정하였으며 각 섹션별 내경은 상단부터 3m, 3.4m, 3.7m, 4m로 결정하였다. 타워 설계 결과를 Table 7에 나타내었다. 상용 프로그램인 MSC. Nastran을 사용하여 해석을 수행한 결과 타워 전체의 자중은 480ton으로 확인 되었다. 타워의 각 섹션별 연결부위는 외관을 고려하여 테이퍼진 형태를 적용 하였다. 타워의 전체적인 형상은 Fig. 6에 보이는 바와 같다.

Table 7 Tower design result using steel

Section	Diameter[mm]	Height[mm]	Thickness[mm]	Mass[ton]
1(Top)	3,000	25,000	25	480
2	3,400	25,000	35	
3	3,700	25,000	45	
4(Bottom)	4,000	25,000	55	

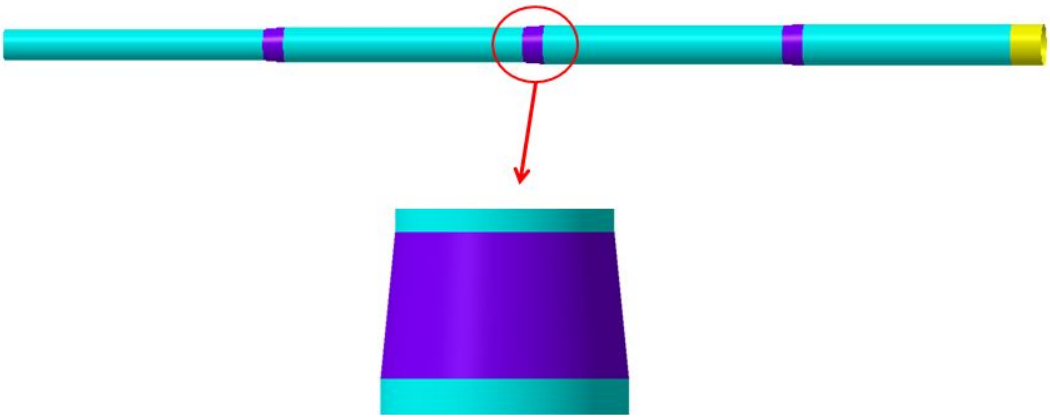


Fig. 6 Proposed conceptual tower configuration

제 2 절 타워 구조 해석 및 안전성 평가

각각의 하중을 고려하여 상용 프로그램인 MSC. Nastran을 이용하여 구조해석 및 안전성 평가를 수행 하였다. 타워의 구조해석 결과 타워의 바닥으로 갈수록 응력이 높아지는 것을 알 수 있었다. 일반적인 풍력발전 시스템 타워의 경우 하부에서 상부로 갈수록 테이퍼비를 0.5를 갖는 형태를 가지고 있으나 본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 경제성뿐만 아니라 외관상의 아름다움을 고려하여 연결부위의 부분만 테이퍼진 형상을 하고 있다.[12]

1. 구조해석 결과

구조해석은 타워가 받을 수 있는 각 하중을 고려하여 프로그램을 만들어 계산하였다. 각 하중 조건 중 하중이 가장 큰 폭풍시의 조건만을 고려하였다. 적용한 재료의 물성치는 Table 8과 같다.

Table 8 Mechanical properties of material used in the tower design

Material	Young's modulus	Density	Poisson's ratio	Yield stress	Ultimate stress
Steel	210[GPa]	7,850[GPa]	0.3	1,000[MPa]	1,200[MPa]

재료의 경우 일반적으로 사용되는 강철을 적용 하였다. Table 9는 프로그램 해석 결과를 보여준다. 해석의 결과 값은 출입구의 응력집중 현상이나 섹션간의 연결부위를 고려하지 않을 결과 이다. 본 장의 연구에서는 복합재 적용 설계의 선행연구 과정이다. 출입구의 응력집중과 연결부위는 복합재적용 설계 단계에서 다룰 것이다. Fig. 7과 Table 10의 경우는 상용 프로그램인 MSC. NASTRAN을 사용하여 해석한 결과 값을 보여준다. Table 11은 해석을 통한 좌굴형상과 좌굴하중배수를 보여준다.

Table 9 Analysis results of steel tower used program

Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)
55[MPa]	49[MPa]	1200[mm]

Table 10 Analysis results of steel tower used MSC. NASTRAN

Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)	Mass(max)
42.2[MPa]	47.1[MPa]	1080[mm]	480[ton]

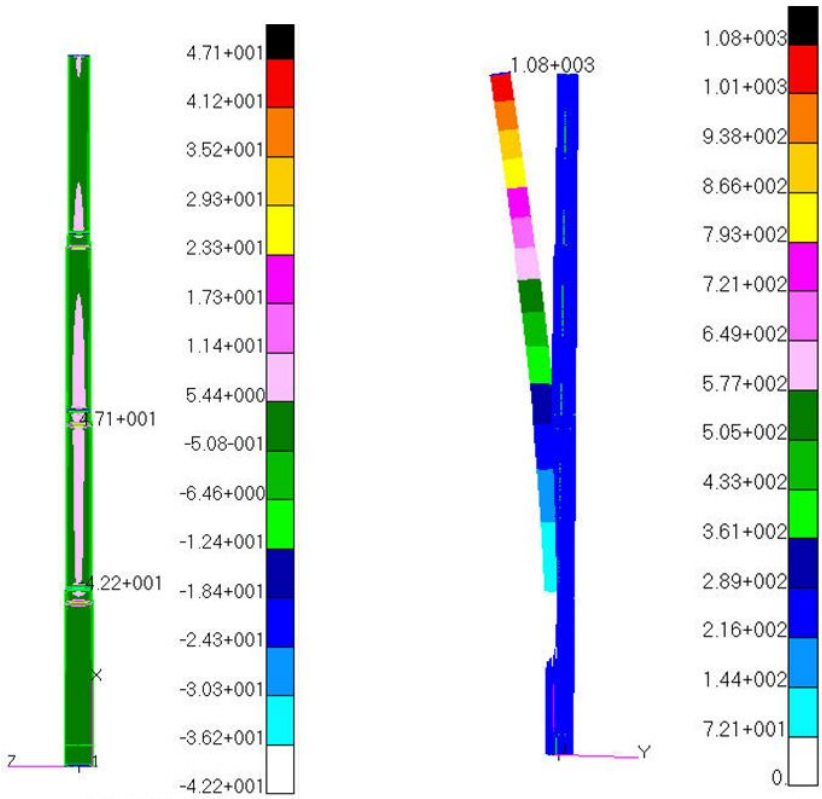
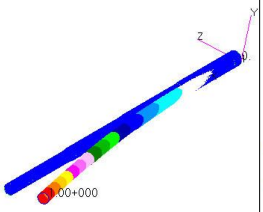
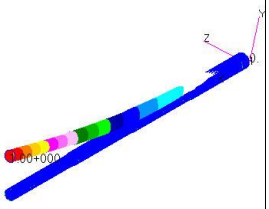
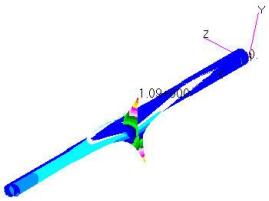


Fig. 7 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the steel tower

Table 11 Buckling analysis result of steel tower

	1st mode	2nd mode	3rd mode
Mode shape			
Buckling load factor	3.3796	3.3809	4.5921

2. 결론

본 연구를 통해 대형급 수평축 풍력발전 시스템에 적합한 타워의 구조 설계 절차를 확립하였다. 연결부위와 출입구 부위는 선행 연구 단계이므로 고려를 하지 않았다. 추 후 복합재 적용 설계 장에서 고려를 하여 최종 설계를 이룰 계획이다. 설계 결과를 기존의 동일한 타워의 형상과 비교하여 본 결과 유사한 형상을 보인다. Table 12는 기존의 2MW급 및 대형 풍력발전 시스템 타워의 형상을 보여준다. 타워의 자중의 경우 동일한 타워를 모델링 후 상용유한요소 프로그램에 적용하여 구하였다. 본 연구에서 설계를 수행한 타워의 중량이 기존의 타워들 보다 경량화 되었음을 확인 할 수 있다.

Table 12 Technical data for given 2MW tower

HAWT	Rated power	Height[mm]	Diameter[mm] (top/bottom)	Mass[ton]
MM92	2 MW	80,000	2,955/4,300	620
PMSG	2 MW	76,900	3,000/4,200	560
Designed tower	2 MW	100,000	3,000/4,000	480

구조 설계 프로그램 해석 결과와 유한요소 해석 결과를 비교하여 그 정확도가 입증 되었다. 또한 상용 해석 프로그램을 통해 타워의 안전성을 검증 하였다. 각 섹션별 두께를 결정한 후 해석을 수행한 결과 변위의 범위가 타워의 높이에 비해 크다고 판단되어 응력과 변위를 모두 만족하는 범위의 두께를 결정 하였다. 응력은 42.2 MPa의 최대 압축응력과 47.1 MPa의 최대 인장응력을 받고 있다. 각 최대응력은 타워의 섹션 3번과 4번 사이의 연결부위 부분에서 발생 하는 것을 확인 할 수 있다. 좌굴 역시 좌굴하중배수가 1이상이므로 안전하다고 판단된다.

제 3 장 복합재 적용 타워 설계

본 장에서는 앞서 설계한 타워을 섹션별 두께를 기준으로 하여 복합재를 적용하여 재설계를 수행 하였다. 복합재를 적용한 타워의 설계 예는 많지 않다. 이에 본 연구에서는 Trade-off study를 통하여 각 섹션별 두께 최적설계를 수행 하였다. 선설계를 통하여 결정한 섹션별 두께를 기본으로 하여 적층패턴의 변화를 주어가며 최적화 적층패턴과 최적화 두께를 재설계 하였다. 본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공법을 고려하여 설계를 수행 하였다. 본 장에서는 Trade-off study 과정을 통하여 섹션별 두께 최적설계를 수행한다.

본 연구에서는 먼저 타워에 작용하는 하중을 분석한 후 각 섹션별 적층패턴을 최적화하는 과정을 수행하였다. 최적화된 적층패턴을 기반으로 하여 각 섹션별 두께를 결정한 후 좌굴해석을 수행하여 안전성을 검토한다. 출입구 해석을 통해 최종 형상을 결정한다. 연구에 사용된 재료는 China CPIC 4400 TEX을 사용 하였다. 타워의 전체적인 구조는 유리섬유, 모레의 샌드위치 구조로 타워의 단면형상을 Fig. 8에 나타내었다. 본 연구에서는 단순한 복합재료 타워의 설계가 아닌 제작상 경제성을 고려하여 코어부분에 모레를 적용 하였다. 일반적인 필라멘트 와인딩 복합재료의 강도는 오토클레이브 몰드(autoclave mold) 복합재료의 강도보다 저하되는데, 대부분의 복합재료 강도에 관한 문헌자료는 오토클레이브에서 성형된 시편시험을 기준으로 한 결과들이다. 본 연구에서와 같이 오토클레이브에서 성형하지 않을 경우 이러한 강도를 직접 적용하는 것은 타당하지 못하다. 따라서 선택된 재질(glass/epoxy)에 대한 시편 시험이 필요하게 되어 이를 수행하였다. Table 13는 시편 시험의 결과로부터 얻어진 재질의 물성치 이다.

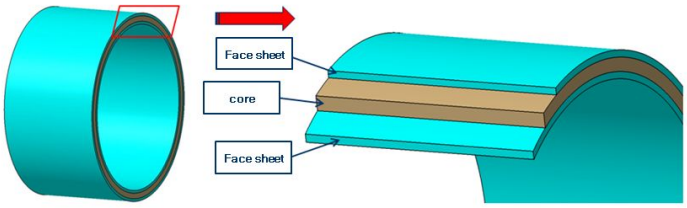


Fig. 8 Primarily section design model for tower structure

Table 13 Mechanical properties of used materials

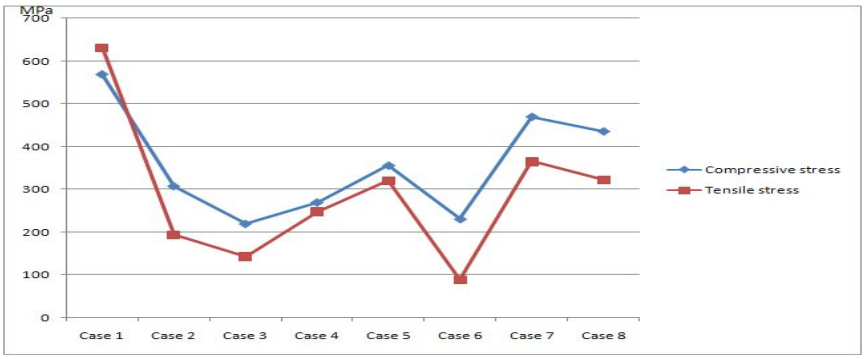
Property \ Material	Glass/Polyester UD	Polyester Sand
E1 [N/mm^2]	17000	5600
E2 [N/mm^2]	500	5300
G12 [N/mm^2]	6500	1930
ν	0.3	0.37
Xt [N/mm^2]	233	96.5
Xc [N/mm^2]	128	54.6
Yt [N/mm^2]	215	83.8
Yc [N/mm^2]	108	53.8
Density	2000E-9 kg/mm^3	1700E-9 kg/mm^3
Ply thickness [mm]	0.38	

제 1 절 Trade-off study : 적층패턴

복합재 구조물의 경우 적용하는 재료에 따라서 다른 특성을 보이게 된다. 또한, 적층 플라이수나 적층각도에 따라 다른 특성을 보이게된다. 본 연구에서는 필라멘트 와인딩 공법을 적용하였으며 제작공정상의 단가를 고려하여 최적화 적층패턴을 찾는 연구를 수행하였다. 타워와 같은 긴 원형강관의 경우 0, 90도가 적절히 혼합되어 적층 되어지는 것이 가장 좋은 강도를 보인다.[21] 필라멘트 와인딩의 경우 와인딩 기계에 따라 와인딩 가능한 각도가 달라지게 된다. 본 연구에서는 축소형 모델 제작과 실험을 의뢰한 업체의 와인딩 기계의 특성을 고려하여 최소각도인 35°를 기준으로 하여 90°를 적절히 혼합하는 방법을 선택하였다. 복합재를 적용한 타워의 경우 명확한 설계방법이 없어 본 연구에서는 위에서 언급한 바와 같이 해석을 통한 Trade-off study 과정을 통하여 최적의 적층패턴을 정하였다. 먼저 최적화 패턴을 찾는 과정이므로 앞장에서 수행한 금속재적용 타워의 직경을 기준으로 하여 35°와 90°를 적절히 혼합하여 적층하여 유한요소 해석을 통하여 가장 안전하다고 판단되는 적층패턴을 적용 하였다. 공진특성, 극한강도 해석, 연결부위, 피로수명, 좌굴특성 등을 고려하여 설계를 수행 하여야 하나 본 절에서는 극한강도 해석과 좌굴, 변위를 비교하여 안전하다고 판단되는 적층패턴을 선정 하였다. 해석 결과 값은 Table 14에 보이는 바와 같다. Fig. 9은 각 Case에 따른 압축, 인장응력 및 변위의 변화를 보여준다.

Table 14 Structural analysis result according to lay-up sequence

Case	Lay-up squence ratio(35°/90°)	Compressive stress(max)[MPa]	Tensile stress(max)[MPa]	Deflection (max)[mm]
1	10% 90%	568	631	6.71×10^4
2	20% 80%	304	193	3.98×10^4
3	30% 70%	219	143	2.93×10^4
4	40% 60%	269	248	2.44×10^4
5	50% 50%	355	320	2.13×10^4
6	60% 40%	230	89	1.90×10^4
7	70% 30%	469	365	1.88×10^4
8	80% 20%	435	323	1.83×10^4



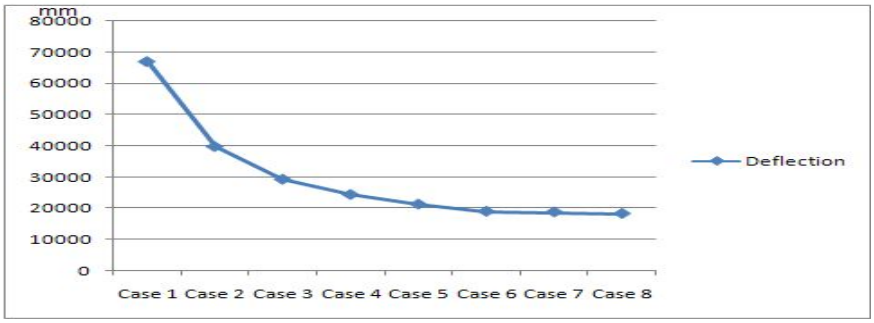


Fig. 9 Stress and deflection graph of lay-up ratio

위의 표에서 보여지는 바와 같이 변위는 상당히 크게 나타난다. 본 절에서는 적층패턴을 찾는 과정이므로 변위는 무시하고 최대 압축응력과 최대 인장응력이 작게 작용하는 적층패턴을 적용한다. 최대 압축응력과 최대 인장응력을 비교 하여 보았을 경우 90°의 적층이 많을수록 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이에 본 절에서는 최대 압축응력과 최대 인장응력을 만족하는 기준으로 하여 적층패턴을 결정하였다. Case 3의 경우 가장 낮은 압축응력을 보이고 있다. 하지만 Case 6에 비해 인장응력과 변위가 큰 것을 확인할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Case 6의 경우를 최적적층 패턴으로 결정 하였다. Fig. 10에서는 Case 6에 대한 해석 결과를 보여준다. 변위의 경우 19000mm로 상당히 크게 보여지나 다음절의 두께 설정을 통해 줄어든 변위와 보다 낮은 최대 압축응력과 최대 인장응력을 구할 것으로 기대가 된다.

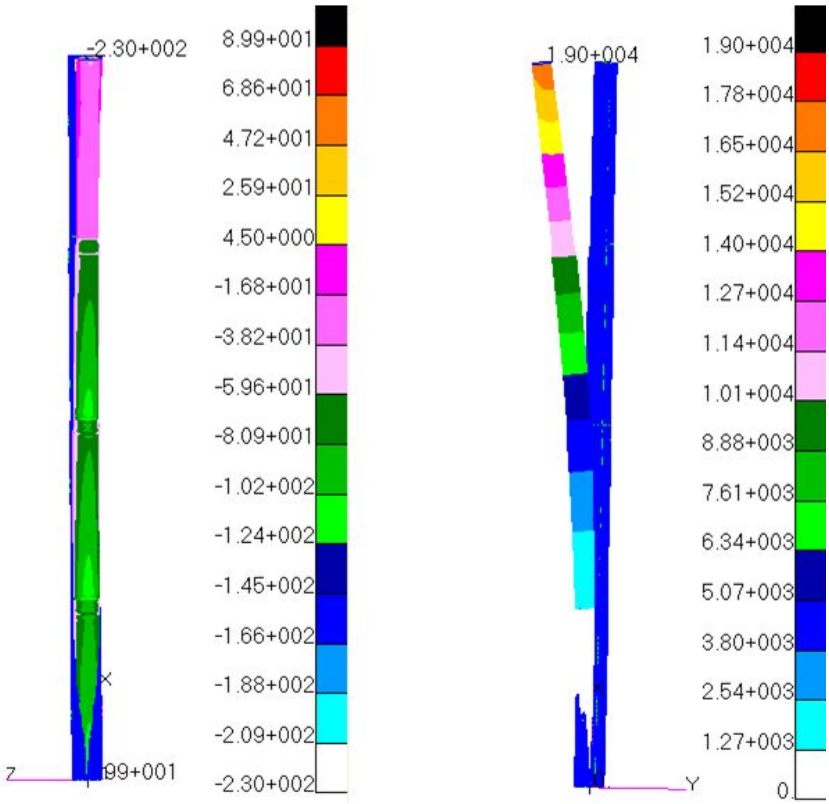


Fig. 10 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the case 6

제 2 절 Trade-off study : 두께

앞 절에서 결절한 적층 패턴의 경우 가장 안정적인 것을 결정 하였다. 본 절에서는 앞 절에서의 변위와 좌굴 등의 안전성을 확보하기 위해 최적두께를 결정한다. 섹션별 두께의 경우 타워를 제작하는데 있어서 제작 단가를 결정하게 된다. 먼저 선 설계를 통하여 구축한 금속재 물성치 적용의 타워 두께에서 각 섹션별 일정한 두께를 증가 시켜 섹션별 최적 두께를 결정한다. 본 절에서는 최적 두께 형상을 결정한 후 제작상의 단가를 고려하여 유리섬유 뿐만 아닌 전체 섹션 두께의 50%의 모래코어 층을 적용한다. 모래의 경우 등방성 물성치를 가지므로 기존의 적층패턴을 그대로 적용하여도 무관하다고 판단된다. 전체적인 적층 패턴은 각 섹션별 두께에 [±35], [90], [core]를 각각 30%, 20%, 50%를 적용 하였다. 섹션별 두께를 제외한 타워의 형상이 변하지 않는다고 가정을 하면 응력의 변화는 오직 타워 셀의 두께의 변화에 의하여 결정된다. 본 연구에서는 금속재를 적용한 타워의 두께에 일정한 두께 증가를 적용하여 최적화된 타워의 두께를 결정한다. 본 절에서는 각 섹션별 재료의 최대 압축응력, 최대 인장응력, 변위 그리고 좌굴모드를 분석하여 안전한 두께를 결정한다. 프로그램을 사용하여 타워의 두께를 일정하게 증가 시키면서 최적 두께를 결정하였다. Table 15, 16은 일정한 두께의 증가에 따른 타워에 작용하는 최대응력 값을 보여준다.

Table 15 Structural analysis result according to thickness

Case \ Section	1 [mm]	2 [mm]	3 [mm]	4 [mm]
1	28.08	37.44	46.8	59.28
2	31.2	43.68	53.04	62.4
3	37.44	46.8	59.28	68.87
4	62.4	74.88	84.24	93.6
5	84.24	90.48	93.6	106.8
6	84.24	93.6	99.84	109.2
7	84.24	93.6	102.96	110.6
8	84.24	93.6	106.08	112.4
9	84.24	93.6	106.08	113.8
10	84.24	93.6	106.08	115.44

Table 16 Structural analysis result according to stress and deflection

Case \ Stress	Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)
1	580[MPa]	516[MPa]	67100[mm]
2	573[MPa]	450[MPa]	41100[mm]
3	480[MPa]	397MPa]	32100[mm]
4	350[MPa]	300[MPa]	11563[mm]
5	240[MPa]	222[MPa]	10023[mm]
6	227[MPa]	120MPa]	9412[mm]
7	130[MPa]	115[MPa]	6555[mm]
8	119[MPa]	103[MPa]	3526[mm]
9	106[MPa]	71[MPa]	1860[mm]
10	88.8[MPa]	57.6[MPa]	1530[mm]

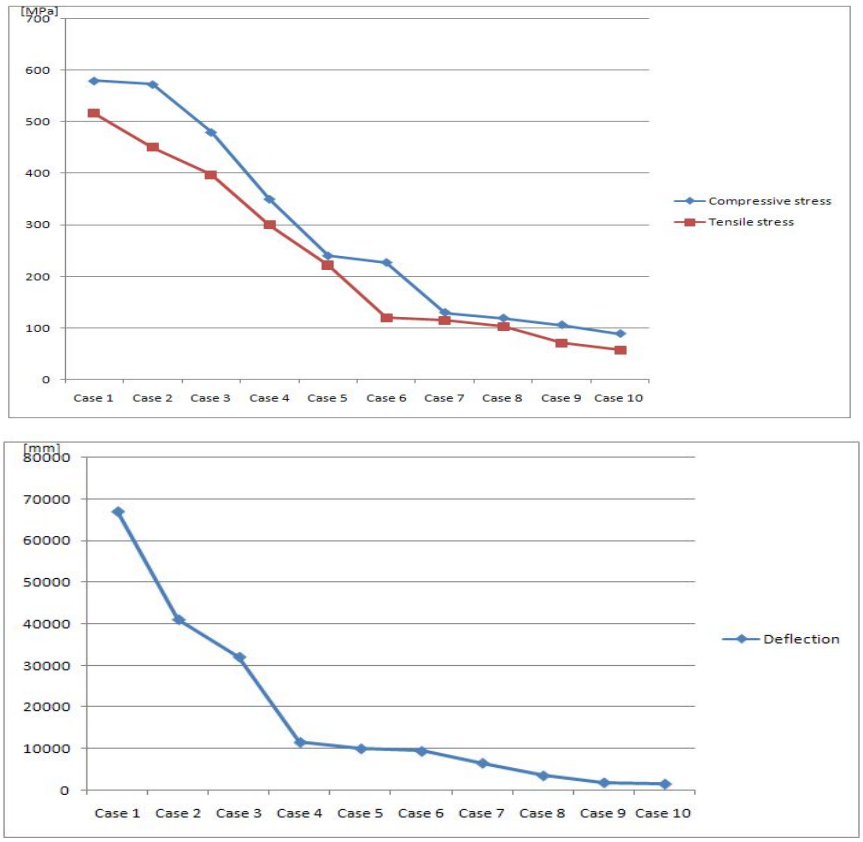


Fig. 11 Stress and deflection graph of each case thickness

Fig. 11은 Table 15, 16의 각 Case별 두께를 적용 하였을 경우 최대 압축 응력, 인장응력, 그리고 변위의 변화를 보여준다.

각 섹션별 작용하는 응력을 상용 프로그램인 MSC. Nastran에 적용하여 해석을 수행하여 각 섹션별 최적 두께를 결정하였다. Section 1의 경우는 Case 5의 84.24mm에서 안전하게 응력이 작용 하여 Case 5의 두께를 정하였다. Section 2, 3, 4는 각각 Case 6, 8, 10의 두께를 적용 하였다. 최대 압축응력과 최대 인장응력만을 만족하는 두께뿐만 아니라 타워의 안전성 확보를 위해 변위 역시 고려해야 한다. 본 연구의 목적에 맞는 최적설계를 수행하기 위하여 두께를 증가시켜 변위역시 만족하는 두께로 결정하였다. 또한, 좌굴모드해석을 수행하여 좌굴하중배수가 1이 넘는 것을 확인하여 안전하게 설계가 이루어 졌다고 판단된다. Table 17는 최종 설계되어진 복합재 적용 타워의 설계 결과를 보여 준다. Table 18, 19은 프로그램과 상

용 유한요소 프로그램을 사용하여 해석되어진 결과를 보여주고 있다. Fig. 12 에서는 MSC. Nastran을 사용하여 유한요소 해석을 수행한 결과를 보여준다. Table 20은 타워의 좌굴해석 결과를 보여주고 있다. Table 21은 코어에 작용하는 최대 압축, 인장응력을 보여준다. 모든 해석의 결과값이 재료의 허용응력보다 작게 나타나므로 안전하다고 판단된다.

Table 17 Design results of composite tower

Section	Diameter[mm]	Height[mm]	Thickness[mm]	Mass[ton]
1(Top)	3,000	25,000	84.24 $[(\pm35)_{32}/(90)_{22}/core]_S$	270
2	3,400	25,000	93.6 $[(\pm35)_{36}/(90)_{24}/core]_S$	
3	3,700	25,000	106.08 $[(\pm35)_{40}/(90)_{27}/core]_S$	
4(Bottom)	4,000	25,000	115.44 $[(\pm35)_{43}/(90)_{29}/core]_S$	

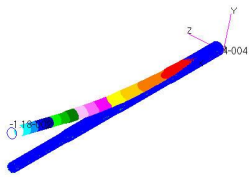
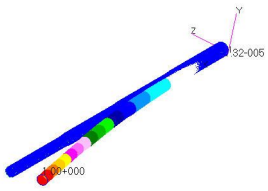
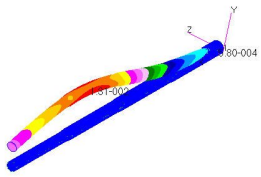
Table 18 Analysis results of composite tower used program

Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)
94.6[MPa]	96[MPa]	1835[mm]

Table 19 Analysis results of composite tower used MSC. NASTRAN

Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)	Mass(max)
88.8[MPa]	57.6[MPa]	1530[mm]	270[ton]

Table 20 Buckling analysis result of composite tower

	1st mode	2nd mode	3rd mode
Mode shape			
Buckling load factor	1.3373	1.3376	10.723

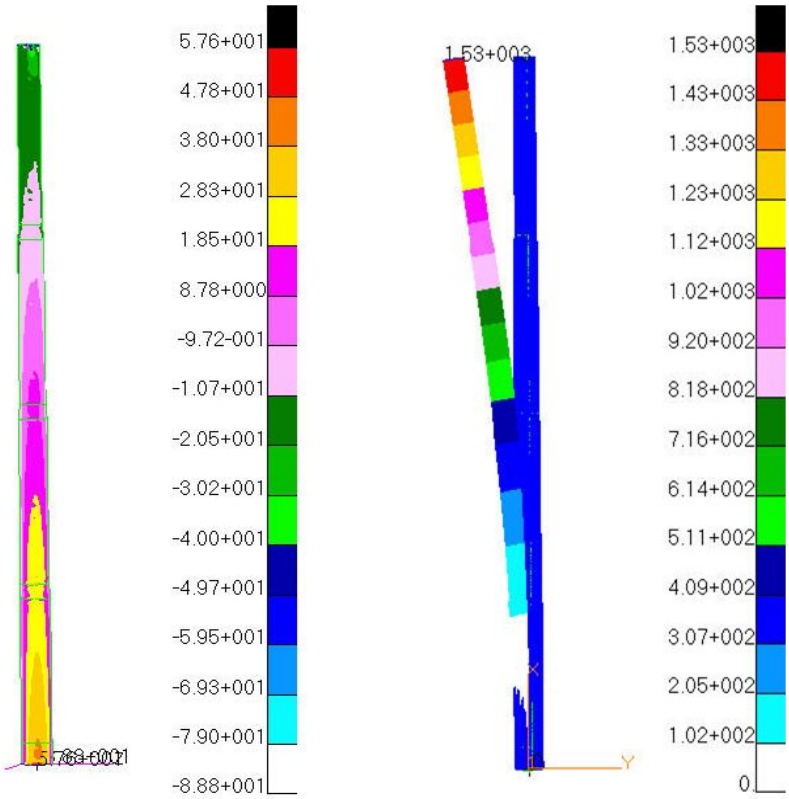
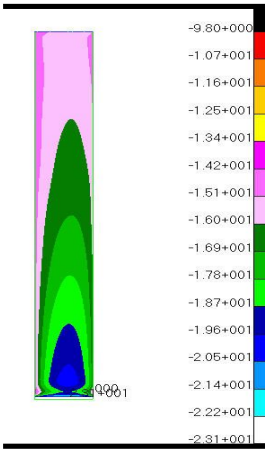
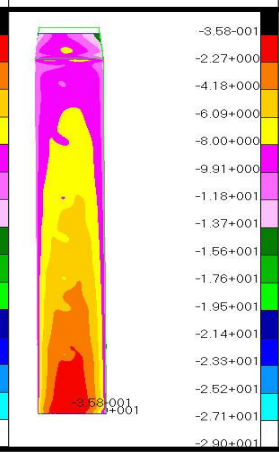
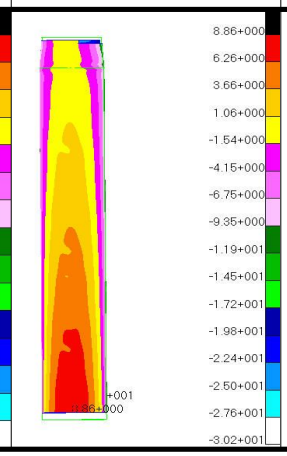
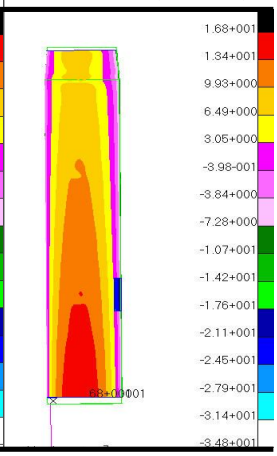


Fig. 12 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the composite tower

Table 21 Spanwise stress distribution core ply and deformation of the composite tower

Section 1(Top)	Section 2	Section 3	Section 4 (Bottom)
			

제 3 절 Trade-off study : 출입구 해석

타워의 전체적인 형상, 적층패턴 그리고 두께의 최적설계를 수행 하였다. 풍력발전 시스템 타워의 경우 단순히 블레이드를 지지하는 역할뿐만 아니라 유지보수를 위한 허브로 올라가는 이동통로의 역할도 수행한다. 따라서 출입구 해석이 필요하다. 출입구의 제작 및 지상과 타워를 연결하는 연결부위의 역할을 수행 하기위하여 제작상의 편의를 고려하여 타워의 마지막 섹션의 지상으로부터 3m 부분은 금속재를 적용하였다. 두께는 기존의 금속재 타워의 두께를 적용 하여 해석을 수행한 결과 타워의 자중이 금속재를 적용한 타워의 경우보다 1.7배의 경량화를 이루었기 때문에 기존의 55mm이던 마지막 세션의 두께보다 작은 30mm로 결정 하였다. 타워의 출입구는 사람의 출입구 역할과 간단한 유지보수를 위한 자제를 운반하는 통로이기 때문에 출입문의 사이즈는 높이 2m, 폭 1m로 결정하였다. 본 연구에서는 타워의 출입구의 경우 해석과 설계의 용이성을 위하여 직사각형 형상의 출입구를 적용 하였다. 직사각형 출입구의 경우 보강재를 적용하여 재 해석을 수행한 결과 재료의 허용응력보다 낮은 응력이 작용하므로 안전하다고 판단되어 진다. Fig. 13은 보강재를 적용하기전과 적용 후 타워의 해석 결과를 보여준다. 보강재를 적용 하였을 경우 응력 집중이 생기지 않아 더 안전한 것으로 확인되어 진다.

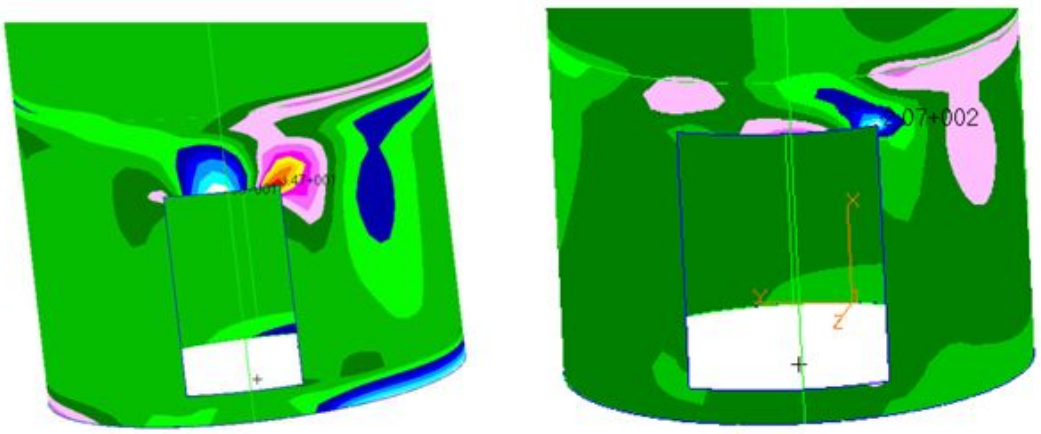


Fig. 13 The finite element analysis result of composite tower door

제 4 절 Trade-off study : 고유진동수 해석 및 공진가능성 검토

고유진동수 해석은 구조물의 공진 여부를 검토하기 위해 수행 된다. 타워의 경우 회전하는 물체는 아니지만 블레이드와의 공진여부를 판단하여야 한다. 본 연구에서는 대형급 풍력발전 시스템 타워의 설계를 수행하였다. 따라서 공진여부 역시 대형급 풍력타워의 일반적인 회전 rpm을 분석하여 공진여부를 판단하였다. Vestas V112의 경우 3MW급으로 회전 rpm은 8.0~18.0rpm 이다. 또한, Nordex N80의 경우 2.5MW급으로 10.8~18.9rpm 이다. 또한 일반적인 1MW급의 경우 25rpm에서 운용되어 지고 있다.[36] 풍력 발전기 타워의 고유진동수는 운전시 발생할 수 있는 타워의 공진 현상을 피하기 위하여 GL-guideline에 따라 식(27)을 만족하여야 한다. 식(27)은 정상운전 rpm이 타워의 첫 번째 고유진동수 보다 95%보다 작아야 하고 모든 타워의 고유진동수는 블레이드 개수를 고려한 블레이드 통과진동수의 5%를 벗어나야함을 보여주고 있다. 이에 본 연구에서는 대형급 풍력발전에 운용 rpm으로 사용되고 있는 15rpm에서부터 30rpm까지를 비교하여 안전한 운용 rpm과 공진가능성을 검토 하였다. 15rpm에서 30rpm을 모두 적용하여 계산한 결과 공진이 발생하지 않음을 확인 하였다. Fig. 14~15의 Cambell 선도를 검토해 보면 가장 흔하게 사용되고 있는 운용 회전수인 15rpm과 20rpm에서 공진이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. Table 22는 타워의 각각의 모드 형상 및 진동수 해석 결과를 도시한 것이다.

$$f_R/f_{0,1} \le 0.95 \quad \text{and}$$
$$f_{R,m}/f_{0,n} \le 0.95 \text{ or } f_{R,m}/f_{0,n} \ge 1.05 \tag{27}$$

where,

f_R : maximum rotational speed of the rotor in normal operation

$f_{0,1}$: first natural frequency of the tower

$f_{R,m}$: m blade passing frequency of the rotor blades

$f_{0,n}$: n-th natural frequency of the tower

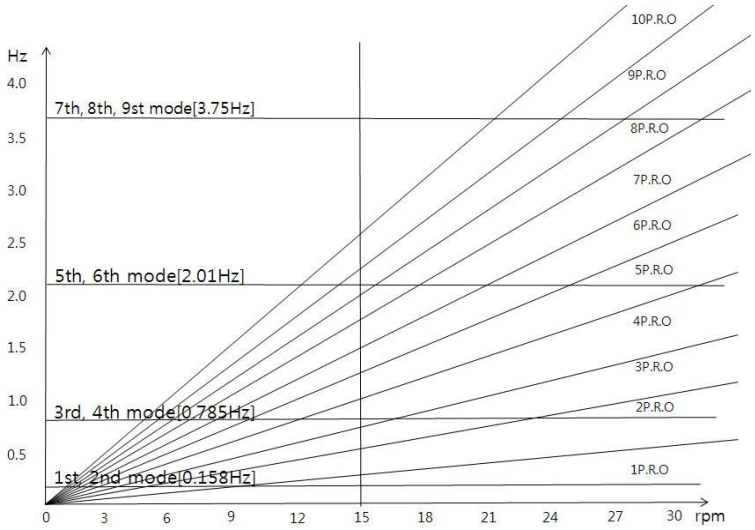


Fig. 14 Cambell diagram for resonance check at 15rpm

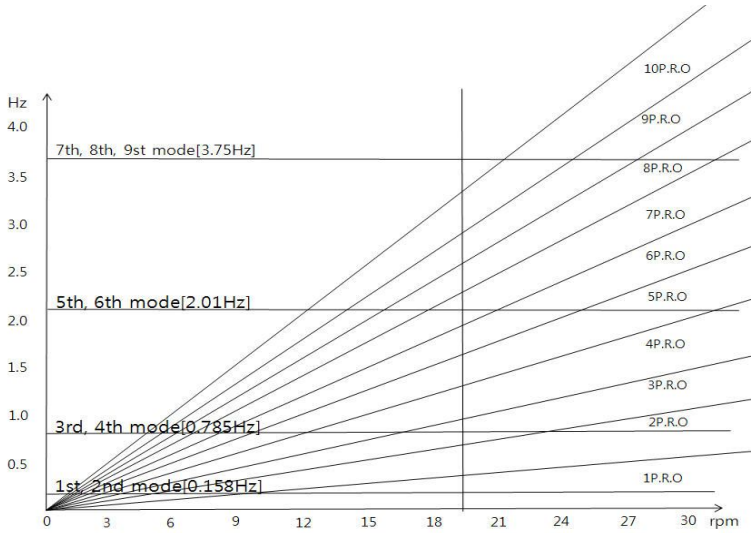
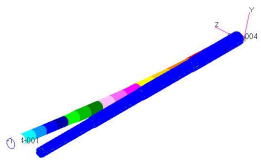
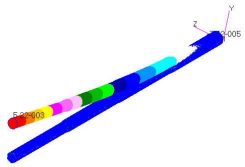
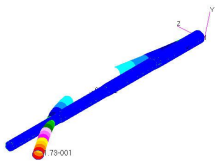
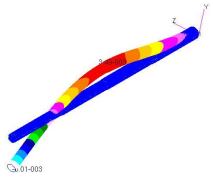
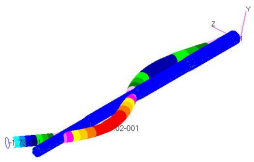
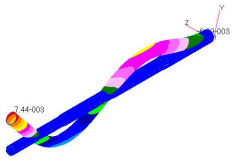
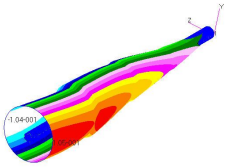
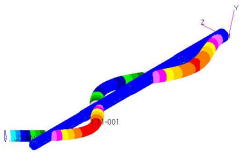
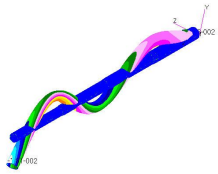


Fig. 15 Cambell diagram for resonance check at 20rpm

Table 22 The frequency analysis result of composite tower

1st mode	2nd mode	3rd mode
		
4st mode	**5st mode**	**6st mode**
		
7st mode	**8st mode**	**9st mode**
		

제 5 절 Trade-off study : 연결부위

본 연구에 적용된 타워는 이동 및 설치의 편의를 위하여 4개의 섹션으로 나누어져 있다. 따라서, 타워의 연결부위 역시 고려하여 설계를 수행 하여야 한다. 기존의 플랜지연결 방식은 타워의 외판에 L-플랜지를 용접하여 연결하는 방식을 적용 하였다. 본 연구에서는 타워의 외관상의 아름다움을 고려할 뿐만 아니라 복합재를 적용하였기 때문에 기존의 타워와 같이 용접방식에 있어 어려움이 있다. 본 연구에서는 L-플랜지를 와인딩시 타워의 내부에 부착하는 방법을 채택 하였다. 플랜지의 경우 기존의 사용되어지는 플랜지를 적용 하였으며 플랜지 연결부위의 볼트 강도 해석을 수행하였다. Fig. 16은 L-플랜지 연결부의 상부 변형을 보여준다. 인장력 Z와 볼트로부터 작용하는 힘 F는 식 (28)을 통하여 구할 수 있다.[37]

$$Z = \frac{4 \cdot M}{D \cdot n} \qquad (28)$$
$$F = Z + R = Z\left(\frac{a+b}{a}\right)$$

여기서 M은 설계 굽힘모멘트를 D는 타워의 직경, n은 볼트의 개수를 나타낸다.

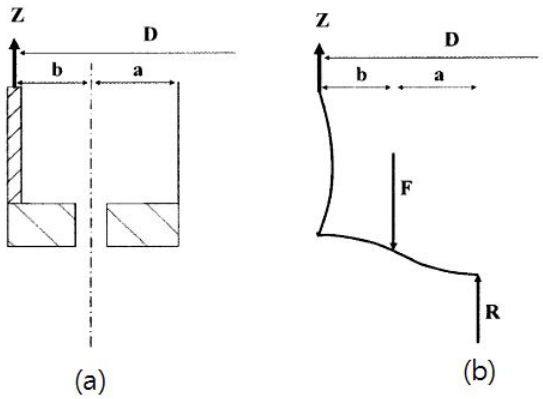


Fig. 16 L-flange connect

본 연구에서는 플랜지를 기존의 동급 타워에 사용되었던 플랜지를 적용 하였다.

플랜지는 최소 항복강도가 355MPa인 S355 구조용 강재를 사용하였으며, 체결용 볼트는 등급이 10.9인 M42 볼트를 사용 하였다. 본 연구에 사용된 타워 플랜지와 볼트의 재료 물성치를 Table 23에 나타내었다.

Table 23 The mechanical properties of flange and bolt

Property \ Material	Flange	Bolt
Elastic modulus	210[GPa]	89.8[GPa]
ν	0.3	0.3
Min. ultimate strength	470[MPa]	1000[MPa]
Min. yield strength	355[MPa]	900[MPa]
Density	7850 kg/m^3	7850 kg/m^3

또한, 각 플랜지 마다 받는 하중 성분의 크기를 Table 24에 나타내었다.

Table 24 Moment on the each flange

Flange	Height[mm]	M_x[kN]	M_y[kN]	M_z[kN]	M_r[kN]
1	75200	2394	-6292	-1360	6305
2	75000	2141	-12584	-1360	12610
3	50200	1888	-18876	-1360	18915
4	50000	1635	-25168	-1360	25221
5	25200	1382	-36892	-1360	36926
6	25000	1129	-48617	-1360	48631
7	3000	876	-72925	-1360	72946
8	0	623	-97234	-1360	97262

위의 하중들을 적용하여 Ansys를 사용하여 볼트와 플랜지에 작용하는 응력 및 변위 해석을 수행 하였다. fig. 17은 플랜지의 전체적인 형상을 보여 주고 있다. 해석시에는 간단화한 모델을 적용하여 각 플랜지에 작용하중을 분배하여 적용 하였다. Fig. 18에 형상을 간단화한 볼트와 플랜지의 형상을 보여 주고 있다.

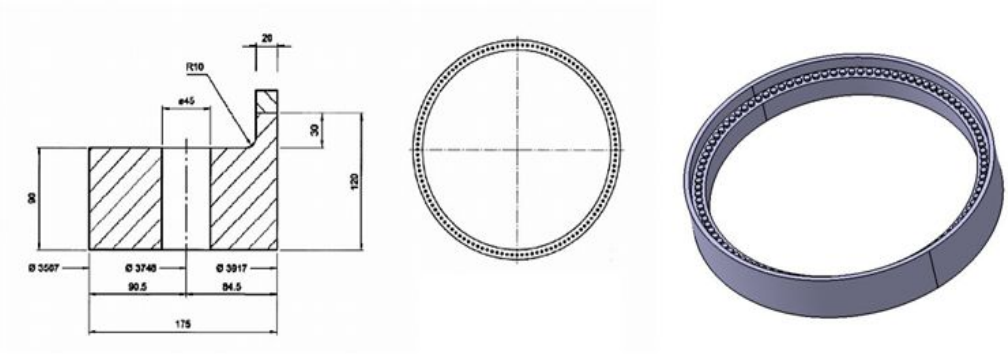


Fig. 17 Design conceptual configuration of flange

본 연구에서 적용된 플랜지는 위에 언급한 바와 같이 동급의 풍력터빈 타워에 적용된 플랜지를 적용 하였다. 적용된 모델은 REpower사 MM92 모델로 플랜지의 위치 역시 연구대상 타워와 유사한 위치에 적용 되어 있다.

Fig. 19은 최상단 플랜지와 중간, 그리고 지상과 타워를 연결해 주는 제일 하부 플랜지의 해석 결과를 보여준다. 볼트의 플랜지의 작용하는 하중이 항복강도인 355MPa 보다 낮게 나타나는 것으로 보아 안전하다고 판단된다.

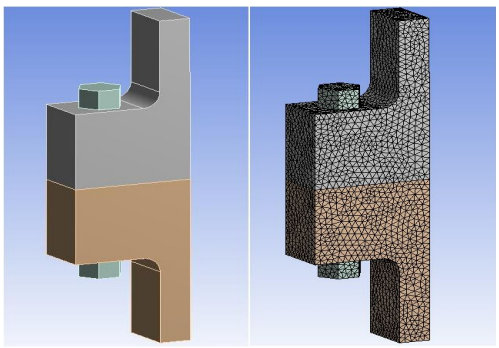


Fig. 18 Simplification of bolt and flange

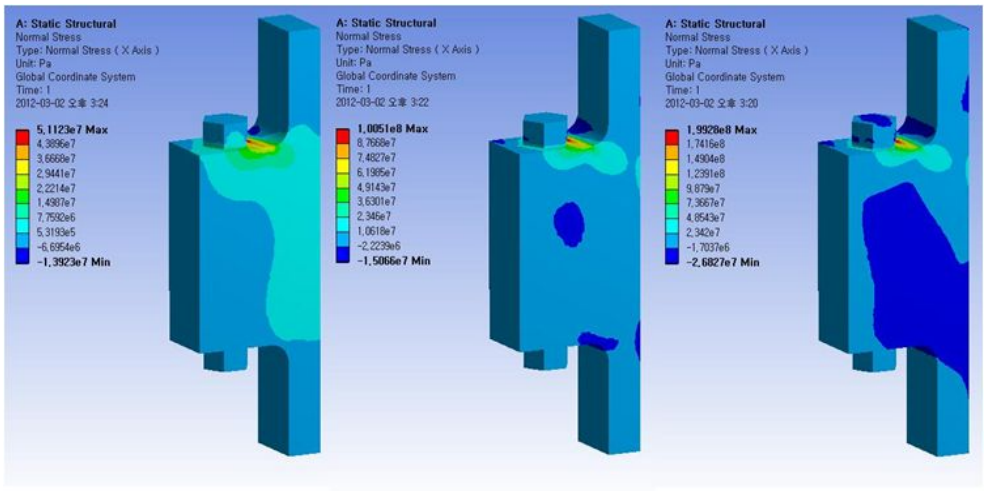


Fig. 19 The finite element analysis result of bolt and flange

제 4 장 축소형 모델 설계 및 실험

제 1 절 축소형 타워 구조 설계

설계의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 위한 축소형 모델 설계를 수행 하였다. 설계 방법은 위의 방법들과 동일하게 수행 하였다. 대상 풍력발전은 500W급으로 대상 풍력발전에 대한 제원은 Table 25에 명시 하였다.[38]

Table 25 The specification of the target wind turbine system

500W wind turbine system	
Blade power	500W
Rated wind speed	8m/s
Rotor diameter	2.5m
Blade weight	1.3kg
Nacelle weight	30kg
Tower height	2.2m
Tower diameter	0.12m

Fig. 20 Tower and blade under performance testing

Fig. 20는 대상 풍력발전 블레이드를 타워에 장착하여 실험을 수행한 모습을 보여준다. 본 장에서 적용한 타워의 형상은 축소형 모델 제작과 실험의 간소화를 위하여 섹션 구분이 없는 일직선 형태의 파이프 타워를 채택 하였다. Table 26~29은 축소형 타워의 설계 결과 및 해석 결과를 보여 준다. Fig. 21는 유한요소 프로그램 해석 결과를 보여 준다.

Table 26 Design results of small scale tower

Section	Diameter[mm]	Height[mm]	Thickness[mm]	Mass[kg]
1	120	2200	15.6	23

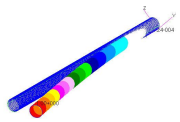
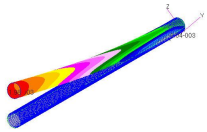
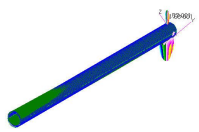
Table 27 Analysis results of small scale tower used program

Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)
29[MPa]	31[MPa]	45[mm]

Table 28 Analysis results of small scale tower used MSC. NASTRAN

Compressive stress(max)	Tensile stress(max)	Deflection(max)	Mass(max)
21.2[MPa]	21.3[MPa]	36.6[mm]	23[kg]

Table 29 Buckling analysis result of small scale tower

	1st mode	2nd mode	3rd mode
Mode shape			
Buckling load factor	23.073	24.722	58.897

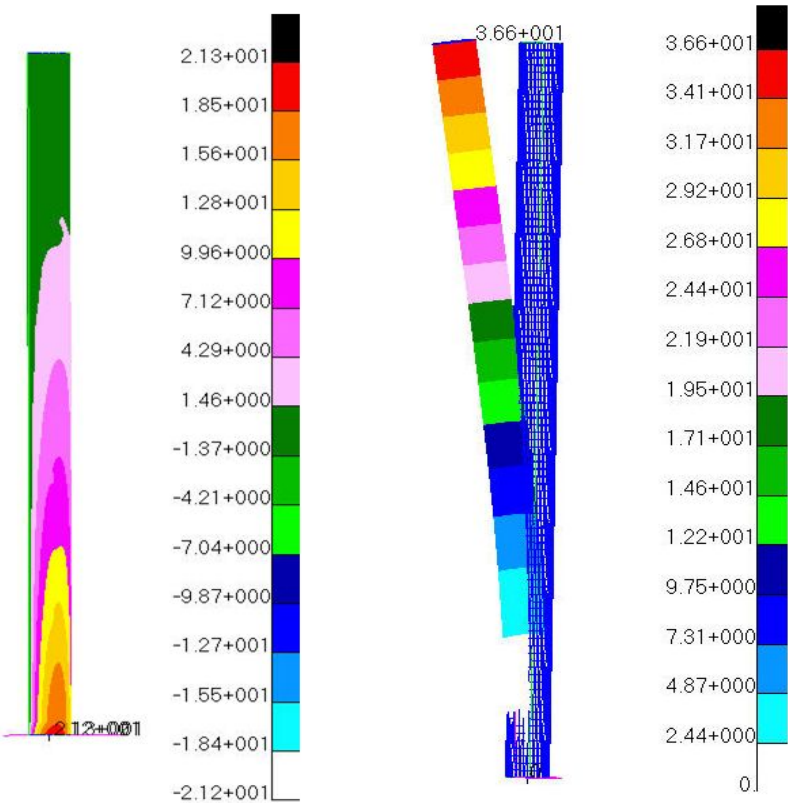


Fig. 21 Spanwise stress distribution 1st ply and deformation of the small scale tower

제 2 절 축소형 타워 제작

설계결과를 바탕으로 하여 필라멘트 와이딩 공법을 적용하여 축소형 타워 제작을 수행 하였다. 타워의 제작은 (주)화이버텍에 의뢰하여 제작을 의뢰 하였다. 타워의 제작 순서는 Fig. 22에 순서대로 나열하였다. 타워의 적층형태는 앞장의 방법과 동일하게 전체 두께의 50%의 코어층과 30%의 ±35도층, 20%의 90도 층을 적용하였다.

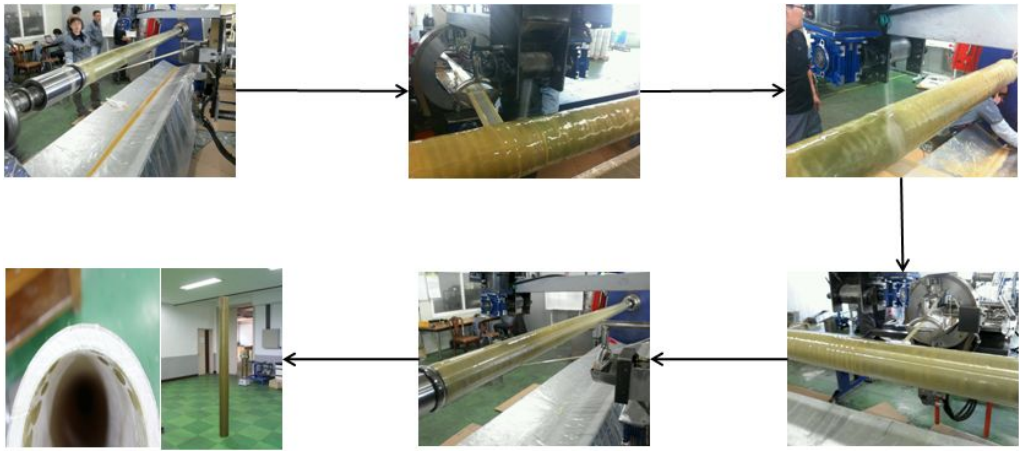


Fig. 22 Tower manufacturing process

제 3 절 축소형 타워 실험

설계의 타당성을 검증하기 위하여 실험을 위한 축소형 모델 설계를 수행 하였다. 설계 방법은 위의 방법들과 동일하게 수행 하였다. 하중의 경우 실험의 용이성을 위하여 풍하중만이 작용한다고 가정 하였으며, 타워의 1/10사이즈에 대한 유한요소 해석 결과를 분석하여 최 외각층 응력 분포를 검토 하였다. Fig. 23은 축소형 타워가 장착된 UTM의 모습을 보여주고 있다.

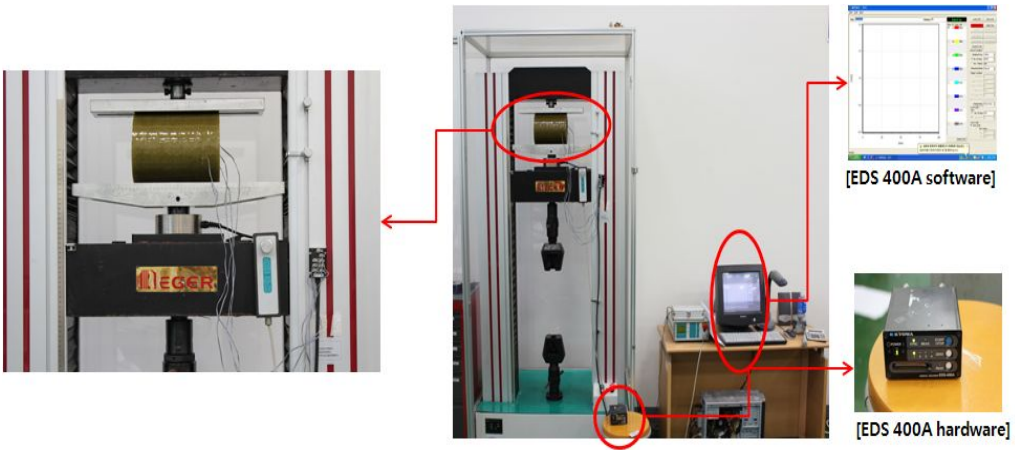


Fig. 23 Stress measurement of small scale tower

Fig. 24은 유한요소 해석을 위한 격자 생성 결과를 보여주고 있으며 경계 조건은 하단부위 단순지지 경계조건을 적용하고 상단부는 하중이 적용되는 방향만 구속하지 않았다.

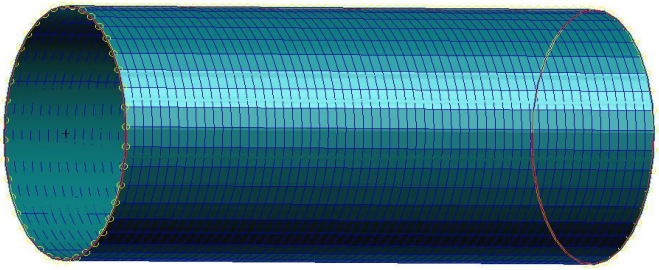


Fig. 24 FEM Modeling of small scale tower for stress distribution test

스트레인 게이지를 Fig. 23에 보이는 바와 같이 상부 50mm 지점에 부착하여 스트레인 게이지로부터 측정한 응력을 확인한 결과와 해석 결과를 비교 하였다. 검토 결과 유한요소 해석결과는 압축응력이 3.41MPa, 인장응력이 6.43MPa 이고, 측정 결과는 압축응력이 3.42MPa, 인장응력이 6.79MPa 로서 유사한 결과임을 확인 하였다. Fig. 25은 유한요소 해석 결과 값을 보여준다.

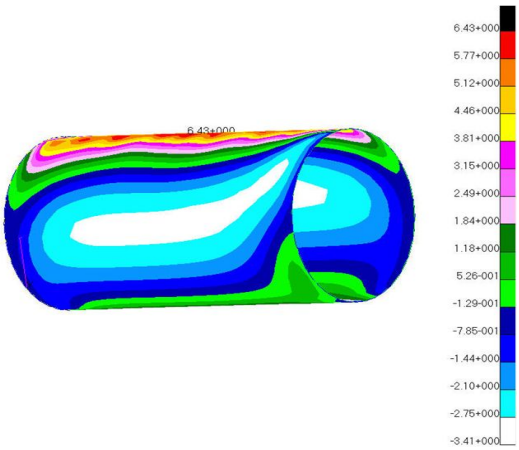


Fig. 25 Stress analysis result of small scale tower

제 5 장 결 론

본 논문에서는 메가 와트급 대형 수평축 풍력발전 시스템용 복합재 적용 타워의 설계에 관한 연구를 수행 하였다. 또한, 복합재 적용 타워의 설계 방안에 대한 절차를 제시 하였다. 이를 기반으로 소형 수평축 풍력발전 시스템 타워 재설계를 수행 하였으며, 설계 결과를 바탕으로 실험을 수행하여 해석결과 값과 실험결과 값의 비교를 통하여 설계의 타당성과 타워의 안전성을 확인 하였다.

본 연구의 전반부에서는 타워가 받는 하중을 분석하여 하중조건을 정의 하였다. 하중 조건 분석 후 이론적 경험식을 바탕으로 하여 금속재를 적용하여 타워 설계를 수행 하였다. 타워의 두께를 결정한 후 유한요소 해석을 수행하여 안전성을 확인 하였다. 복합재를 적용하여 설계 시에는 적층패턴, 두께를 변위, 응력, 좌굴, 고유진동수를 고려하여 최적 설계를 수행 하였다.

본 연구의 후반부는 선행연구에서 복합재 적용 타워와 동일한 방법으로 소형 풍력발전 시스템 타워의 설계를 수행하였다. 설계된 타워를 필라멘트 와인딩 공법을 적용하여 제작한 후 실험을 통하여 설계의 타당성을 확인 하였다.

본 논문의 각 장에서 제시한 연구 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

1장에서는 풍력발전 시스템 타워 설계 및 해석에 관련된 국내외 선행 연구에 대한 분석 결과를 제시하였다.

2장에서는 선행연구로 금속재를 적용하여 풍력발전 시스템 타워 설계를 수행 하였다. 각 하중을 분석한 후 각 섹션별 최적 두께를 결정 하였다. 설계 결과를 유한요소 프로그램을 사용 하여 해석을 수행 하였다. 응력, 변위, 좌굴 분석을 통한 안전성을 확인 하였다. 설계된 결과를 기존의 사용되고 있는 타워들과 비교한 결과 각 섹션의 두께와 중량이 유사함을 확인 하였다.

3장에서는 앞서 설계된 금속재 타워에 최적 적층 패턴을 찾기 위해 필라멘트 와

인딩 공법을 고려하여 최적 적층 패턴을 정의 하였다. 또한 변위와 응력을 기준으로 하여 일정 두께를 증가시키는 방법으로 최적 두께를 정의 하였다. 설계 되어진 결과를 토대로 하여 응력, 좌굴, 변위 뿐만 아니라 고유진동수를 분석하여 대형 풍력 발전 시스템에 적용되는 회전 rpm을 기준으로 하여 블레이드와의 공진에 대한 안전성을 cambell 선도를 통해 검토 하여 안전함을 확인 하였다. 기존의 동일한 풍력발전 시스템에 적용된 플랜지와 볼트를 적용하여 해석을 수행한 결과 연결부위의 안전성도 검토 하였다.

4장에서는 앞서 연구한 방법과 동일한 방법을 적용하여 소형 풍력발전 시스템 타워의 재설계를 수행 하였다. 본 연구의 설계 타당성을 검증하기 위해 소형 풍력발전 시스템 타워 설계를 수행한 후 모델을 동일한 공법으로 제작하여 실험을 수행 하였다. 실험을 통해 확인된 결과와 해석 및 설계 결과를 비교하여 설계 방법의 타당성을 확인 하였으며, 타워의 안전성 역시 확인 할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 고경남 외, “ 풍력공학입문”, 문운당, 2006
2. 방조혁, “소형 풍력발전 시스템의 고효율 경량화 설계 및 해석에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 박사학위논문, 2004
3. 홍철현 외, “대형 풍력 발전용 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 고유 진동수 해석에 관한 연구” 한국해양공학회지 제25권 제2호 2011.4, page(s): 73-78
4. 이동건, “필라멘트 와인딩 복합재 구조물의 해석 및 최적 설계” 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 1998
5. P.E. Uys., et al., “Optimisation of a steel tower for a wind turbine structure", Engineering Structure 29, 2007, page(s): 1337-1342
6. Tongguang Wang., et al., "A high resolution tower shadow model for downwind wind turbine", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89, 2001, page(s): 873-892
7. Luong Van Binh., et al., "A peak factor for non-Gaussian response analysis of wind turbine tower", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 96, 2008, page(s): 2217-2227
8. M.A. Mikitarenko., et al., "Safe fatigue life of steel towers under the action of vibrations", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, 1998, page(s): 1091-1100
9. P.J.Murtagh,. et al,. "Along-wind response of a wind turbine tower with blade coupling subjected to rotationally sampled wind loading", Engineering Structures 27, 2005, page(s): 1209-1219
10. N.Bazeos,. "Static, seismic and stability analyses of a prototype wind turbine steel tower", Engineering Structures 24, 2002, page(s): 1015-1025
11. 김석현 외, “1kW 소형 풍력발전기의 진동 모니터링”, 한국신・재생에너지학회 춘계학술대회 논문집, 2006, page(s): 308-311

12. 홍혁수 외, “2MW급 풍력발전기 타워 쉘 최적 설계”, 신재생에너지학회지, 2006, page(s): 19-26
13. 김동만 외, “지진기반 가진효과를 고려한 MW급 풍력발전기 타워의 구조진동 특성연구”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2009, page(s): 616-620
14. 김분주, “풍력 발전용 Tower 구조물의 설계 특성에 따른 구조해석 및 실험적 고찰”, 경부대학교 대학원 석사학위논문, 2010
15. 김남형 외, “해상 풍력발전타워에 작용하는 파력과 풍력에 관한 기초연구”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, 2010, page(s): 536-539
16. Dimos J. Polyzois., et al., "Static and dunamic characteristics of multi-cell jointed GFRP wind turbine towers", Composite Structures, 2009, page(s): 34-42
17. Jane E. Lundberg., et al., "Load and resistance factor design of composite columns", Structural Safety, 1996, page(s): 169-177
18. E. Gutierrez., et al., "A wind turbine tower design based on the use of fibre-reinfirced composites", Europen Laboratory for Structural Assessment(ELSA), 2003
19. Hani M. Negm., et al., " Structural design optimization of wind turbine towers", Computers and Structures 74, 2000, page(s):649-666
20. 이성우 외, “대구경 콘크리트 충전 복합소재 파일의 휨-압축 거동에 대한 실험적 분석”, 콘크리트학회지, 제25권 5A호, 2009, page(s):519-529
21. 이성우 외, “수적층 및 필라멘트 와인딩을 이용한 GFRP 튜브로 구속된 콘크리트의 압축 거동”, 콘크리트학회지, 제28권 6A호, 2009, page(s):861-872
22. 한정영 외, “대형 풍력발전용 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 좌굴 해석”, 한국해양공학회지, 제25권 제2호, 2011, page(s):79-84
23. 박강근, “콘크리트 충전 원형 및 각형 합성 강관 기둥의 축압축 거동에 관한 연구”, 밀양대학교 산업대학원 석사학위 논문, 2002
24. 김강길, “체결용 볼트의 초기응력을 고려한 해상풍력발전시스템 타워플랜지의 구조적 특성에 관한 연구”, 목포대학교 대학원 석사학위 논문, 2011

25. 조경수 외, “풍력 발전 시스템의 T-bolt 체결부 해석에 관한 연구”, 한국해양공학회 춘계학술대회 발표논문집, 2009, page(s):713-717
26. Walter Salvatore., et al., "Design, testing and analysis of high ductile partial-strength steel-concrete composite beam-to-column joint", Computers and Structures 83, 2005, page(s):2334-2352
27. Jeong Kim., et al., "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joint", Applied Mathematical Modeling 31, 2007, page(s):895-911
28. Wenchun Jiang., et al., "Optimization of welding joint between tower and bottom flange based on residual stress considerations in a wind turbine", Energy 35, 2010, page(s):461-467
29. Abdel-Hakim Bouzid., et al., "The modeling of bolted flange joints used with disc springs and tube spacers to reduce relaxation", International Journal of Pressure Vessels and Piping 87, 2010, page(s):730-736
30. J. Aghazadeh Mohandesi., et al., "Fatigue damage accumulation in carbon/epoxy laminateed composites", Material and Design 30, 2009, page(s):1950-1956
31. Christoph W. Kensche, "Fatigue of composite for wind turbines", International Journal of Fatigue 28, 2006, page(s):1363-1374
32. Knut O. Ronold., et al., "Reliability-based fatigue design of wind-turbine rotor blades", Engineering Structures 21, 1999, page(s):1101-1114
33. Spera. D.A "Wind turbine technology", ASME Press, 1994, page(s):139-194
34. 공창덕, “ 항공기 구조역학”, 조선대학교 출판부, 2004
35. 이억섭 외, “재료파괴강도학”, 원창출판사, 1993
36. 손충렬 외, “해상풍력발전”, 도서출판 아진, 2010
37. 김강길, “체결용 볼트의 초기응력을 고려한 해상풍력발전시스템 타워 플랜지의 구조적 특성에 관한 연구”, 목포대학교 대학원 석사학위논문, 2011
38. 최수현, “소형 풍력발전 시스템용 저소음 경량화 복합재 블레이드의 설계에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 석사학위논문, 2008

39. Luise Karger et al., “Efficient simulation of low-velocity impacts on composite sandwich panels”, Computer and Structures 86, 2008, 988-996

감사의 글

4년의 시간을 실험실에서 보내고 그 동안의 시간을 돌이켜보니 감사해야 할 분들이 너무도 많습니다. 먼저 본 논문을 위해 정성을 다해 관심을 아끼지 않으시고 지도를 해주신 공창덕 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 또한 바쁘신 가운데 본 논문에 대해 지적을 해주시고 심사를 해주신 방조혁 박사님, 박현범 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 학업을 계속 할 수 있도록 후원해 주시고 항상 말없이 지켜봐주신 부모님과 먼저 취직하여 사회생활을 하고 있는 동생에게도 감사의 말을 전합니다. 본 연구를 위하여 시편 제작 및 시험을 도와주신 (주)화이버텍의 고상권 대리님과 김종식 사장님께도 감사의 말을 전합니다. 이제 석사 1학기에 접어들어 홀로 실험실 업무 및 논문 준비에 바쁜 길수 역시 끝까지 최선을 다하여 좋은 결실을 맺기를 기원합니다. 바쁜 와중에도 디아블로 게임을 사러 텐트를 치고 기다리고 틈틈이 질문하면 조언을 해준 실험실 선배 하승이형께도 감사하다는 말을 전합니다. 또한, 항상 학부생으로 실험실에 들어와 열심히 노력하고 있는 광림이와 정우에게도 사소한 일들과 부탁을 들어줘서 고맙고 내년이면 대학원에 진학하는데 좋은 결과를 얻을 수 있기를 기도합니다. 마지막으로 항상 부족한 제 옆에서 잔소리, 쓴소리 해준 대학원 동기 민웅이와 경선이형에게 진심으로 감사하다는 말을 전하고 싶습니다.

저작물 이용 허락서

학 과	항공우주공학과	학 번	20107100	과 정	석사
성 명	한글 임 성 진 한문 林 晟 鎭 영문 Lim Sung Jin				
주 소	광주광역시 동구 지산동 719-54번지 담소그린빌 602호				
연락처	e-mail : curryrice4u@naver.com				
논문제목	한글 : 2 MW급 대형 수평축 풍력발전 시스템을 위한 필라멘트 와인딩 복합재 타워의 최적설계에 관한 연구				
	영문 : A Study on Optimal Design of Filament Winding Composite Tower for 2 MW Class Horizontal Axis Wind Turbine Systems				

본인이 저작한 위의 저작물에 대하여 다음과 같은 조건 아래 조선대학교가 저작물을 이용할 수 있도록 허락하고 동의합니다.

- 다 음 -

1. 저작물의 DB구축 및 인터넷을 포함한 정보통신망에의 공개를 위한 저작물의 복제, 기억장치에의 저장, 전송 등을 허락함
2. 위의 목적을 위하여 필요한 범위 내에서의 편집과 형식상의 변경을 허락함(다만, 저작물의 내용변경은 금지함)
3. 배포・전송된 저작물의 영리적 목적을 위한 복제, 저장, 전송 등은 금지함
4. 저작물에 대한 이용기간은 5년으로 하고, 기간종료 3개월 이내에 별도의 의사 표시가 없을 경우에는 저작물의 이용기간을 계속 연장함
5. 해당 저작물의 저작권을 타인에게 양도하거나 출판을 허락을 하였을 경우에는 1개월 이내에 대학에 이를 통보함
6. 조선대학교는 저작물 이용의 허락 이후 해당 저작물로 인하여 발생하는 타인에 의한 권리 침해에 대하여 일체의 법적 책임을 지지 않음
7. 소속 대학의 협정기관에 저작물의 제공 및 인터넷 등 정보통신망을 이용한 저작물의 전송・출력을 허락함

동의여부 : 동의(0) 반대( )

2012 년 8 월

저작자 : 임 성 진 (인)

조선대학교 총장 귀하