

복합재료를 이용한 Off/On Shore에서의 복합하중을 받는 Tower에 대한 최적설계

손충렬^{*} · 변효인^{*} · 김성준^{*}

^{*}인하대학교 선박공학과

Design Optimization of Complex Loaded Tower Using Composite Materials in Off and On Shore

CHOONG-YUL SON, Hyo-In Byun AND Sung-Jun Kim

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Inchon 402-751, Korea

KEY WORDS: Composite Materials 복합재료, Filament Winding 필라멘트 와인딩, Design Optimization 최적설계, Finite Element Method 유한 요소법, Tubular Tower 관모양 타워, Aerodynamic Loads 공력하중, Gravity Loads 중력하중

ABSTRACT : Unlike Tubular Steel Tower, This Composite Material Tower is a low-technology Component, whose design is easy to optimize, and which therefore during the design process-lends itself easily as an object for possible cost reduction at very little effort. This may come in useful as the cost of a tower usually significant part of the total cost of a structure. This paper is written by the Composite Materials Tower which loaded Complex loading in Off and On shore. This Composite Material Tower is made by the Method of Filament Winding, and the Component of Composite Material is used by the Roving RS220PE-535. When it loaded Complex loading, there is a results which is bigger than steel tower deflection. We controlled this large deflection by stiffeners which has thickness 20mm. At last, Off and On Shore Tower which used Composite Materials is compared with Off and On Shore Tower which used Steel.

1. 서 론

일반적인 Tubular Tower는 강도와 강성을 고려하여, 주로 강(Steel)을 재질로 한 Truss구조로 설계되었다.

그러나 이런 강(Steel)을 이용한 Tubular Tower의 경우에는 철판의 용접상태의 따라 응력(Stress)의 상태나 국부하중의 상태가 바뀔 수 있으며, 부식(Corrosion)이나 용접 후 가공을 다시 해야한다는 단점이 있다.

본 연구에서는 위와 같은 단점을 보완하며, 낮은 자중에 비해 높은 강성과 뛰어난 동적 거동 특성을 가지고 있는 복합재료를 이용하여 강(Steel)으로 만들어진 Tubular Tower와의 가격경쟁력 뿐만 아니라 품질가공 및 설치과정의 우수성 등을 비교해 보았다. 우선 Off/On Shore에서 복합하중을 받는 Tower의 최적설계를 수행하기 위해서 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 최적설계를 수행하였다. 현재 복합재료를 이용하여 최적 설계된 Tower는 F.R.P 제작 업체에서 제작중이며, 이 복합재료 Tower에 풍력발전시스템인 날개(Blade), 발전기(Generator)와 나셀(Nacelle)을 연결하여 제주도 월령에 있는 풍력단지에 설치할 예정이다.

우선 복합재료Tower에 대한 최적설계를 수행하기 위한 설계 개념으로 Tower는 Tubular Tower의 형상을 또 상단부와 하단부 Tower의 직경이 다른 Shell Type을 채택하였다.

위와 같은 설계개념을 기초로 하여 설계 시 가장 중요한 복합 Tower의 Off Shore에서의 On Shore에서의 Tower에 작용하는 복합하중을 계산하였다. 하중을 계산한 후 이 하중값을 유한요소 프로그램인 ANSYS에 적용하여 허용응력(Allowable Stress)안에서 만족하는 Tower의 최적 두께(t)를 찾아보았다. 하중 계산 시 적용되는 하중으로는 On Shore에서는 바람에 의해 발생하는 공력하중(Aerodynamic Load)과 Tower의 상부에 설치될 구조물로 인한 중력하중(Gravity Load)으로 나뉘며, Off Shore에서는 바람에 의한 공력하중(Aerodynamic Load)과 파력에 의한 파하중(Wave Load)이 있다. 그 외에 조류의 흐름에 의한 조력하중(Current Load)이 있겠으나 파하중에 비하면 미비하여 이 하중은 적용하지 않았다.

본 연구수행 과정에서 강(Steel)으로 만들어진 Tower는 철판을 용접하여 만들어나, 복합재료로 만들어진 Tower의 경우는 여러 복합재료중의 하나인 Roving RS220PE-535를 사용하여 Operating과정중의 하나인 필라멘트 와인딩(Filament Winding)이라는 공법으로 만들어진다.

이렇게 제작되는 복합재료 Tower와 기존의 강(Steel)으로 만

제1저자 손충렬 연락처 : 인천광역시 남구 용현동 인하대학교
Tel) 032-860-7338 soncy@inha.ac.kr

들어지는 Tower의 응력특성 및 변위(Deflection)특성을 비교해석 해보았고, 해석된 결과를 토대로 Tower의 최적설계를 수행해 보았다. 또 각각의 하중상태에서 강(Steel)으로 만들어진 Tower와 복합재료(Composite Materials)를 사용하여 만들어진 Tower의 가격경쟁력을 서로 비교해 보았다.

본 연구 수행 중에서는 복합재료 Tower의 상단부 구조물을 풍력발전시스템의 날개(Blade), 발전기(Generator), 나셀(Nacelle)로 적용하여 구조해석을 수행하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 재료의 선택 및 물성치(Material Properties)

Tower의 제작에 주로 사용되는 재료로는 강(Steel), 나무(Wood), 복합재료(Composite Material)등이 있다. 본 연구설계에서는 복합재료 Roving RS220PE-535의 Glass 함량이 80.8%(80.6~81.1%)인 재료의 물성치를 이용하여 설계를 수행하였다.

사용한 복합재료의 물성치는 Table.1과 같으며, Table.2는 규격 KS D 4101-90, SCA10으로 만들어진 강(Steel)의 물성치이다.

Glass 함량 (%)	두께 (mm)	인장 강도 (kg/mm ²)	인장 탄성 계수 (kg/mm ²)	만곡 강도 (kg/mm ²)	만곡 탄성 계수 (kg/mm ²)	압축 강도 (kg/mm ²)	전단 강도 (kg/mm ²)	인장 전단 강도 (kg/mm ²)
80.8	3.03	150.6	5130	151.6	4795	67.3	24.9	1.22

Table.1 복합재료의 Material Properties.

밀도 (kg/m ³)	인장탄성계수 (GPa)	전단탄성계수 (GPa)	Poisson's Ratio	항복응력 (MPa)
7850	200	77	0.29	400

Table.2 강(Steel)의 Material Properties.

2.2 제조방법

제조방법은 복합재료 Operating과정중의 하나인 필라멘트 와 인딩(Filament Winding)공법을 사용하여 만들어진다.



Fig.1 Filament Winding Method

2.3 정적구조해석

최적설계용 Tower는 On Shore의 경우 상단부의 직경이 500mm 하단부의 직경이 750mm이며, 높이는 18m로 설정하였다.

2.3-1 On Shore에서의 하중계산

Tower의 상부구조물에 의한 중력하중(Gravity Load)를 구하기 위해서 풍력발전시스템(블레이드, 발전기, 나셀)을 설치하였다. Tower의 구조해석은 먼저 각각의 하중조건을 고려하여 하중조건을 결정하고, 하중의 타당성을 검토한 후 응력 및 변위 해석 순으로 진행하였다. 각각의 상황에 따른 하중조건으로는 풍속의 변화에 따라 Tower가 받는 하중을 고려할 수 있다. Tower의 구조해석 시 고려해야 할 주요하중으로는 첫째 날개(Blade)가 회전하면서 발생시키는 추력에 의한 하중, 둘째 바람에 의해 Tower가 받는 분포하중, 셋째 발전기(Generator)를 포함한 나셀(Nacelle)과 날개(Blade) 발생시키는 하중이 있다.

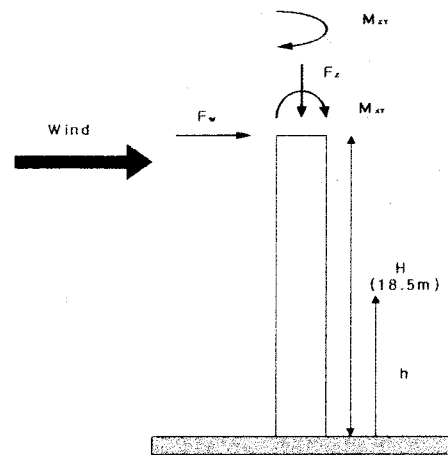


Fig.2 Cantilever Beam Model of Tubular Tower.(On Shore)

1) 날개(Blade)가 회전하면서 발생시키는 추력 :

날개(Blade)가 회전하면서 발생시키는 추력은 날개가 회전할 때 발생하는 동압(Dynamic Pressure)으로 구할 수 있다.

$$P = \frac{1}{2} \rho C_F V^2 \quad (1)$$

여기서, ρ : 1.25 공기의 밀도(kg/m³)

C_F : 0.64 추력계수

V : 바람의 속도(m/s)

또는 풍력발전시스템에 작용하는 항력(Drag Force)으로 구할 수 있다. 항력(Drag Force)은 Tower를 전도시킬려고 하고 날개(Blade)를 후류 방향으로 굽히려고 한다. 회전하고 있는 구조물의 항력을 계산하기 위한 단순화된 공식은 다음과 같다.

$$D = 0.0064 V^2 A \quad (2)$$

여기서 V : 바람의 속도 (m/s)

A : 수평단면적 (m²)

2) Tower가 바람에 의해 받는 하중 :

Tower는 Shell Type의 원통형 외팔보의 형상을 하고 있다. 따라서 최대풍속인 23m/s일때로 가정하고, Tower를 3m 간격으로 Section으로 나눈 후 각 Section의 단면적을 구하여 Tower의 각 Section에 작용하는 하중을 구한다.

$$F_w = \frac{1}{2} \int_{H-h}^H \rho V(Z)^2 \phi D(Z) C(Z) dz \quad (3)$$

여기서 ρ : Air Density
 $V(Z)$: Wind Speed
 $D(Z)$: Outer tower Speed
 $C(Z)$: Form Factor
 ϕ : Gust Factor

또는

$$Q = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad (4)$$

여기서 C_D : 1.2 (실린더의 항력계수)
 ρ : 1.25 (공기의 밀도) (kg/m^3)
 V : 바람의 속도 (m/s)
 A : 바람을 받는 Tower의 면적 (m^2)

3) Tower와 나셀 및 날개의 무게에 의한 하중 :
 이 하중은 다음의 식과 같이 간단히 구할 수 있다.
 {날개의 무게(kg) + 나셀의 무게(kg)} $\times 9.8m/s^2$ (5)

2.3-2 하중계산 결과

1) 중력하중(Gravity Load) :

날개 (Blade) : $30kg \times 3EA = 90kg$

나셀 및 로터시스템 : 450kg

$F_w = (90+450) \times 9.8 = 5292N$

2) 날개(Blade)에 의한 추력 :

$$F_A = 0.0064 \times V^2 \times A$$

$$= 0.0064 \times 23^2 \times 38.5$$

$$= 130.4 \times 9.8 = 1277.92N$$

3) Tower의 항력에 의한 하중 :

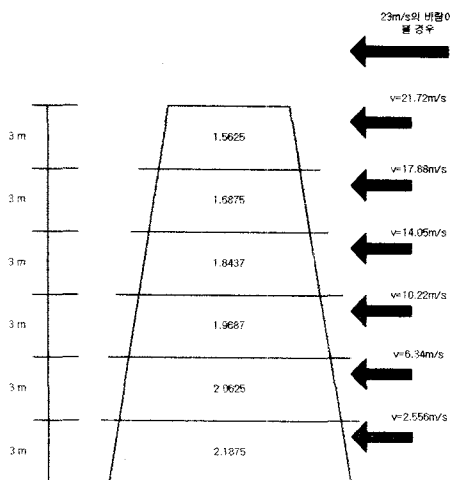


Fig.3 각 Section의 면적 및 풍속

위의 (4)식을 이용하여 계산한 결과는 Table.3과 같다.

풍속이 최대풍속일 때 : 23m/s			
높이(m)	단면적(m^2)	풍속(m/s)	항력(N)
3	2.1875	2.5556	10.71507
6	2.0625	6.34	62.17757
9	1.9687	10.22	154.2207
12	1.8437	14.05	272.9632
15	1.6875	17.88	404.6132
18	1.5625	21.72	552.8419
합계			1457.8419

Table.3 항력하중 계산결과

2.3-3 Off Shore에서의 하중계산

Off Shore에서의 하중계산은 On Shore에서의 하중값에 파하중(Wave Load)을 더해지면 된다.

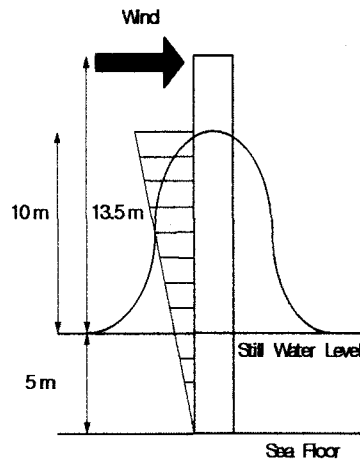


Fig.4 Cantilever Beam Model of Tubular Tower.(Off Shore)

파랑에 의한 파하중(Wave Load)을 계산하기 위해서 연근해의 평균수심을 5m로 가정하였으며, 설계파고는 10m로 풍속은 23m/s로 설정했으며, 수평치수(D)와파장(L)의 비 D/L값이 0.05 보다 작기 때문에 Morison Formula를 이용하여 파하중(Wave Load)을 계산한다. 파하중(Wave Load)은 구조물의 형상, 주변의 흐름형태 및 파입자의 속도에 의한 관성력(Inertia Force)과 구조물의 형상, 표면의 Roughness, Reynolds number에 의한 항력부분으로 나뉘며, 단위 길이당 파하중은 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u^2 + \rho C_m V \frac{du}{dt} \quad (6)$$

여기서 C_m : inertia 계수
 C_D : Drag 계수
 A : 단위면적
 u : 물입자 속도

C_m 이나 C_D 은 물체의 형상, 표면상태 및 Reynolds number에 따라 결정되는 계수로써 ABS Rule에 따라 C_D 값은 0.5, C_m 은

1.5(D≤2.5m) 설정하였다.

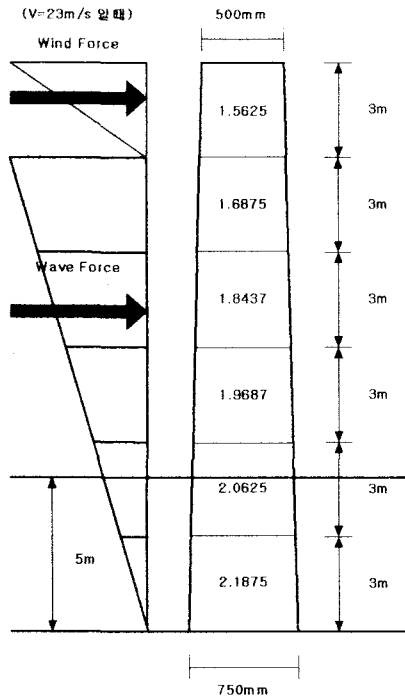


Fig.5 Off Shore에서의 하중

위의 (4)식과 (6)식을 이용하여 Off Shore에서의 하중을 구하여보면 파하중(Wave Load)값은 66820N이 나오며, 바람에 의한 풍하중(Wind Load)값은 275.4N이 나오는 결과를 얻었다.

3. 유한요소 해석

유한 요소법(Finite Element Method)을 이용한 구조해석에 본 연구설계에서는 ANSYS 범용패키지 프로그램을 사용하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석 결과 강(Steel, Young Modulus : 210GPa)에 비해 사용한 복합재료(Young Modulus : 20~50GPa)의 탄성계수(Young Modulus)값이 작기 때문에 Deflection이 더 많이 발생하였다. 그러나 강(Steel)의 허용응력에 비해 해석된 복합재료의 허용응력은 (복합재료의 특성 : 강도와 강성이 강(Steel)에 비해 강하다.)작게 해석되었다. 본 연구에서는 복합재료의 탄성계수값이 강(Steel)에 비해 작아서 발생하는 Maximum Deflection을 제어하기 위해서 Tower의 0m, 4.5m, 9m, 13.5m 18m부분에 Ring Stiffener를 설치하였다. 보통, 건축구조물의 경우에는 Maximum Deflection을 높이의 1/100정도로 규정하고 있으나 본 연구설계의 경우와 같은 Tower는 Deflection에 대한 특정 규정이 없으며, 또한 강(Steel)에 비해 Young Modulus값이 작다는 재료의 특성상 높이의 1/100안에서 Deflection을 제어하는데 초점을 두고 최적설계를 수행하였다. 그리고 마지막으로 강(Steel)으로 제작된 Tower와 복합재료를 이용하여 해석된 Tower의 최적설계 결과를 서로 비교하였다.

3.1 On Shore에서의 유한요소 해석

On Shore에서의 유한요소해석에 적용되는 하중은 크게 공력하

중(Aerodynamic Load)과 중력하중(Gravity Load)을 적용하였으며, 해석결과는 다음과 같다.

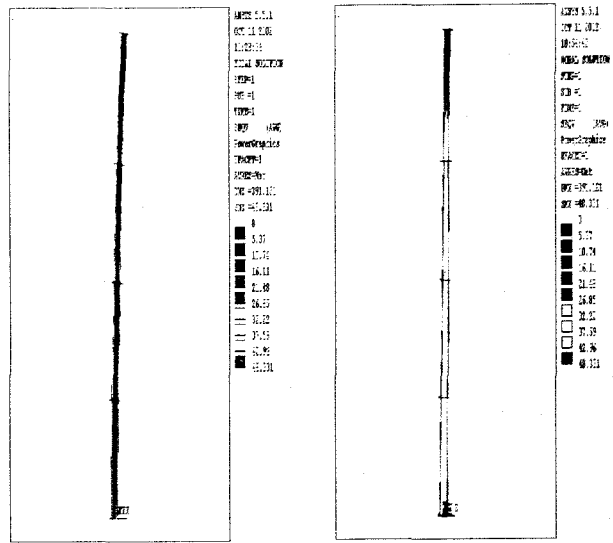


Fig.6 복합재료를 사용한 Tower의 ANSYS 해석결과

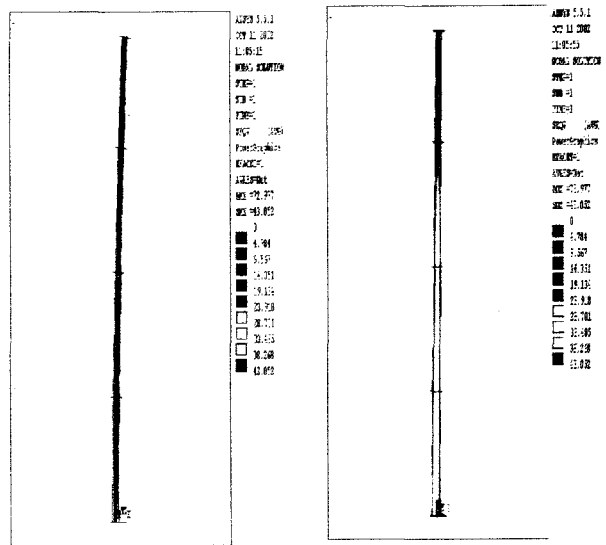


Fig.7 강(Steel)을 사용한 Tower의 ANSYS 해석결과

해석결과 풍속이 23m/s일때 복합재료를 사용한 Tower의 최대응력이 46MPa, Maximum Deflection이 325mm였으며, 똑같은 풍속일 때 강(Steel)을 사용한 Tower의 최대응력이 43MPa, Maximum Deflection이 72.977mm가 계산되었다. 비교적 바람이 많이 부는 제주도내의 경우 제주시가 3.8m/s, 제주 고층지역이 6.9m/s, 서귀포와 성산포 지역이 3.1m/s인 점을 감안하면 설계 풍속 23m/s는 극한상태(태풍)의 풍속임을 알 수 있다. 결과적으로 복합재료로 만들어진 Tower의 높이에 대한 Maximum Deflection이 약 1.8%정도임을 고려하면 건축구조물의 1/100 규정에 만족한다고 판단된다.

위의 결과를 토대로 Tower의 Thickness를 Table.4와 같이 결정하였다.

Section	복합재료 Tower	Steel Tower
0 ~ 4.5m	28 mm	8 mm
4.5 ~ 9.0m	25 mm	8 mm
9.0 ~ 13.5m	20 mm	6 mm
13.5 ~ 18.0m	14 mm	6 mm
Ring Stiffener	20 mm	8 mm

Table.4 Tower의 Thickness(On Shore)

3.2 Off Shore에서의 유한요소 해석

Off Shore에서의 유한요소해석에 적용되는 하중은 On Shore에서의 하중에 Wave Load를 추가해주면 된다. Off Shore에서는 극하중(태풍)시 파하중(Wave Load)이 대단히 크기 때문에 On Shore에서보다 상부, 하부 직경을 더 크게 설계개념을 설정하였다. 즉, 하단부의 직경이 1500mm, 상단부의 직경이 1000mm로 설정하였고 On Shore와 같은 위치에 Ring Stiffener를 설치하였다. Off Shore에서의 ANSYS 해석결과는 다음과 같다.

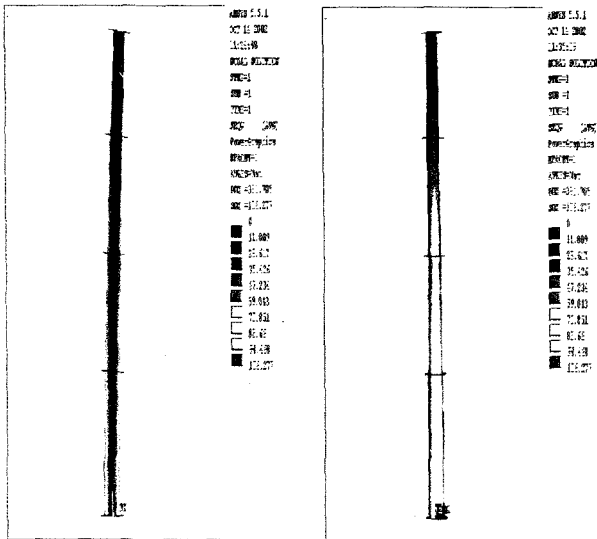


Fig.8 복합재료를 사용한 Tower의 ANSYS 해석결과

On Shore에서와 같이 똑같은 설계개념에 재료의 물성치를 강(Steel)으로 바꿔서 응력은 허용응력(Allowable Stress) 범위안, Deflection은 높이의 1/100안에서 제어하는 Tower의 두께(Thickness)를 찾는 최적설계를 수행하였다. 강(Steel)을 사용한 Tower의 ANSYS 해석결과는 다음과 같다.

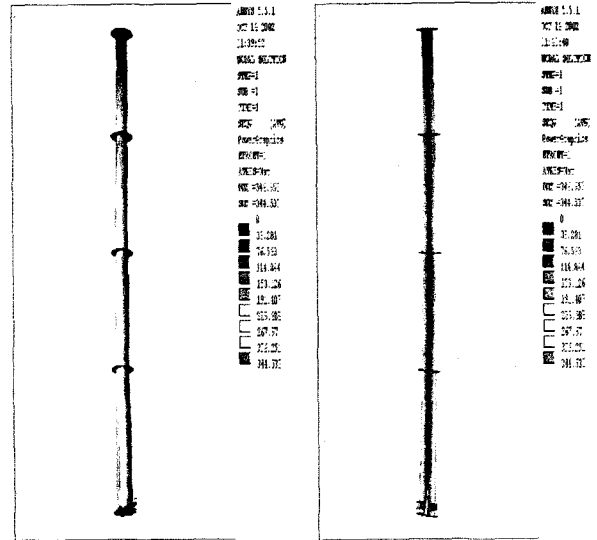


Fig.9 강(Steel)을 사용한 Tower의 ANSYS 해석결과

해석결과 풍속이 23m/s 이며, 10m의 파고가 Tower에 부딪힐 때 복합재료를 사용한 Tower는 최대응력(Maximum Stress)이 106MPa, Maximum Deflection이 381mm이 계산되었다. 강(Steel)을 사용한 Tower는 최대응력(Maximum Stress)이 344MPa, Maximum Deflection이 347mm로 계산되었다. 위와 같은 계산결과를 가지고 측정된 Tower의 Thickness는 다음 Table과 같다.

Section	복합재료 Tower	Steel Tower
0 ~ 4.5m	70 mm	20 mm
4.5 ~ 9.0m	70 mm	20 mm
9.0 ~ 13.5m	60 mm	15 mm
13.5 ~ 18.0m	50 mm	10 mm
Ring Stiffener	70 mm	20 mm

Table.5 Tower의 Thickness(Off Shore)

4. 결과 분석

4.1 On Shore의 경우

On Shore의 경우에는 최대풍속이 23m/s일 때 복합재료를 사용한 Tower는 최대응력이 46MPa, Maximum Deflection이 325mm였으며, 각 Section의 Thickness는 하부부터 28, 25, 20, 14mm였으며, 강(Steel)을 사용한 Tower는 최대응력이 43MPa, Maximum Deflection은 73mm가 계산되었고 각 Section의 Thickness는 하부부터 8,8,6,6mm로 최적설계 되었다. 복합재료를 사용한 Tower가 강(Steel)을 사용한 Tower보다 Maximum

Deflection이 크고, 최대응력값이 작게 측정된 이유는 재료의 물성치 (Material Properties)에서 Young Modulus값이 강(Steel)에 비해 작은 반면 강도나 강성은 크기 때문이다. 이를 정리한 것이 Table 6 과 같다.

	복합재료	Steel
변형량 (mm)	325	73
응력 (MPa)	40	40
평균두께 (mm)	20	8

Table. 6 계산값 비교 (On Shore)

일반적인 복합재료와 강(Steel)의 물성치는 다음과 같다.

	복합재료	Steel
Elastic Modulus (GPa)	20	200
Strength (MPa)	600	200
변형량	10	1
응력	1	10

Table.7 재료의 물성치(Material Properties) 비교

4.2 Off Shore의 경우

Off Shore의 경우에는 최대풍속이 23m/s이며, 10m의 파고가 Tower에 하중을 줄 때 복합재료를 사용한 Tower의 최대응력은 106MPa, Maximum Deflection은 381mm, 강(Steel)을 사용한 Tower는 344MPa, 347mm였다.

	복합재료	Steel
변형량 (mm)	381	347
응력 (MPa)	106	344
평균두께 (mm)	60	20

Table.8 계산값 비교 (Off Shore)

5. 결론

위의 결과들을 종합해보면 On Shore 또는 Off Shore의 경우에서 보면 극한하중을 받을 때 최대응력은 허용응력 범위안에 만족한다는 것을 알 수 있다. 특히 복합재료를 사용한 Tower가 더욱 최대응력면에서 안정하다는 것을 알 수 있다. 그러나 Maximum Deflection은 복합재료를 사용한 것이 강(Steel)을 사용한 것보다 크게 계산되었는데 그 이유는 재료의 Young Modulus값이 작기 때문이다. 이 Maximum Deflection을 건축구조물에서와 같이 처짐이 높이의 1/100안에서 만족하도록 제어하는데, 위의 해석결과 On Shore의 경우에는 약 1.8%, Off Shore의 경우에는 2.1%로 계산되었으므로 약간 오차를 내긴 하지만 만족한다고 판단할 수 있다. 또 위에서 최적 설계된 Tower의 두께(Thickness)를 가지고 각 Tower의 가격 경쟁력을 비교해 보았다. 일단 평균두께 8mm인 강(Steel)을 사용한 Tower의 제작단가는 인건비를 포함해서 700만원정도가 소요된다. 그러나 평균두께 20mm의 복합재료를 사용한 Tower의 경우 역시 700만원 정도가 소요된다.

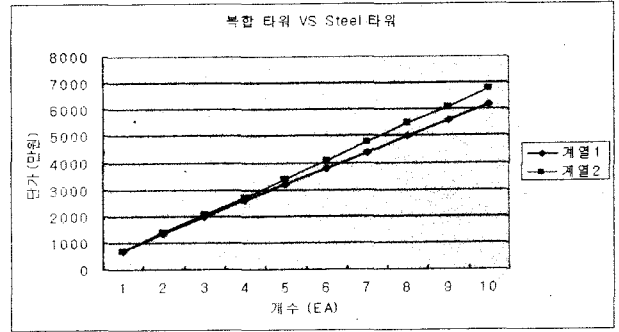


Fig.10 복합타워와 Steel타워의 단가 비교

Filament Winding공법을 사용한 복합재료 Tower의 경우 특성상 용접이 필요하지 않으며, 제작공정 역시 Bolting, Drilling이 간단하여 인건비를 상당부분 줄일 수 있다. 또 용접이 불필요하므로 용접으로 인한 표면의 거칠기도 없다. 또 한번생산하면 거기서 Mould가 생기므로 계속해서 같은 제품을 대량생산이 가능하므로 그로 인한 감가상각비를 최대한 줄일 수 있다는 이점이 있다. 위의 그래프는 복합재료의 Tower와 강(Steel)Tower를 10개 생산할 때의 생산단가를 나타낸 것이다. 대략 3개를 동시에 생산할 때까지는 단가가 거의 비슷하지만 4개를 동시에 제작하면서부터 생산 단가가 더욱 줄어드는 것을 알 수 있었다.

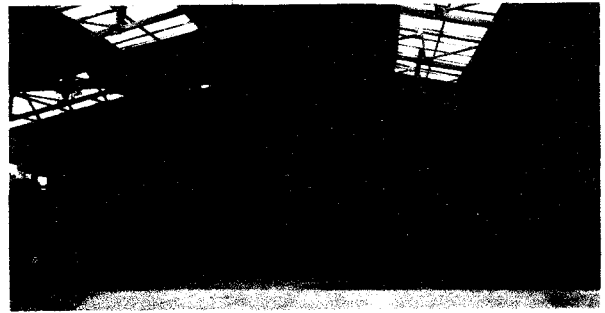


Fig.10 Filament Winding 공법으로 제작되는 복합재료를 사용한Tower.

6. 참고문헌

- [1] 아오시마(1994), "Wind Turbine Handbook"
- [2] M.H.Geier(1997), "Quality Handbook for Composite Materials" CHAPMAN HALL
- [3] Max Irvine(1996) " STRUCTURAL DYNAMICS", London UNWIN HYMAN.
- [4] M.C.Cheney(1999) "Guidline for Design of Wind Turbine", DNV/Riso in technical co-operation.
- [5] David A. Spera(1994), "Wind Turbine Technology" NEW YORK ASME PRESS.
- [6] Martin O . L .HANSEN (1995), "AERODYNAMICS of Wind Turbines", Technical University of Denmark.
- [7] Daryl L. Logan(1998), "Logan의 유한요소법", 시그마프레스.
- [8] 이재신 (1996), "해양구조물 설계요소", 한국해양대학교.
- [9] 안상욱(1999), "기계공학법", 복두출판사.