

# 풍력발전용 하이브리드 타워 하중영향 및 경제성 분석

이승민\*, 권대용, 김용천, Shi wei, 박현철\*\*, 정진화

## Analysis of Load on the Hybrid Tower and Cost Effectiveness of the Wind Turbine

Seunugmin Lee\*, Daeyong Kwon, Yongchun Kim, Shi wei, Hyunchul Park\*\*, Chinwha Chung

### Abstract

With the development of wind industry, rated power of the wind turbine also increases gradually. Accordingly, size of the wind turbine tower is becoming larger. Tower base diameter of the 2MW wind turbine is about 4m. Larger tower is expected for 4MW or 5MW turbines. Due to limitation of transportation, new type of tower with smooth transportation and effective cost is needed. In this work, a hybrid tower consisting of steel and concrete is designed and analyzed. The optimum ratio of steel and concrete of the hybrid tower is calculated as well as the thickness of the concrete part. Different FE analysis including modal analysis, buckling analysis and static analysis are performed to check the design of hybrid tower comparing with the steel tower. Redesign is also expected after various analyses.

### Key words

Hybrid tower(하이브리드 타워), Wind turbine tower(풍력발전기 타워), Steel-concrete(스틸-콘크리트), Design load case(설계 하중조건), Extreme load(극한하중)

(접수일 2010. 12. 1, 게재확정일 2010. 12. 17)

\* 포항공과대학교 풍력특성화대학원 석사과정

■ E-mail : lsm3747@postech.ac.kr ■ Tel : (054)279-2837 ■ Fax : (054)279-0589

\*\* 포항공과대학교 풍력특성화대학원 교수

■ E-mail : hcpark@postech.ac.kr ■ Tel : (054)279-2837 ■ Fax : (054)279-0589

### Nomenclature

$V_{ref}$  : reference wind speed, m/s

$V_{ave}$  : average wind speed, m/s

$A$  : category for high turbulence

$B$  : category for low turbulence

$I$  : turbulence intensity

$a$  : slope parameter

$d_x$  : local diameter, m

$S_x$  : local section modulus,  $m^3$

$\sigma_x$  : local stress, MPa

$S$  : steel tower

$C$  : concrete tower

## subscrip

IEC : International Electrotechnical Commission  
 DLC : Design Load Case  
 GH : Garrad Hassan  
 NWP : Normal Wind Profile  
 NTM : Normal Turbulence Model  
 ECD : Extreme Coherent gust ind Direction change  
 EOG : Extreme Operating Gust  
 EWS : Extreme Wind Shear  
 EDC : Extreme Direction Change  
 EWM : Extreme Wind Model

## 1. 서론

오늘날 대부분으로 사용되어지고 있는 풍력발전용 타워는 콘크리트 기초의 스틸 원통형 타입으로써, 풍력발전기의 전체 제작비용의 약 26.3%의 매우 큰 비중을 차지한다<sup>(2)</sup>. 이렇듯 풍력발전기는 타워의 큰 비용 대비 발전기가 최대의 에너지를 산출하게끔 수명주기 동안 안정적일 수 있게 높이 및 직경이 정해져야만 한다. 따라서 현재 대형의 기준 모델인 1.5~2MW급 육상 풍력발전기 타워는 60m~80m로 결정 되어져있다. 하지만 대기의 특성상 지면에서 멀어 질수록 증가하는 풍속 때문에 양질의 바람을 획득 하고자, 현재에는 100m이상의 타워도 사용되고 있다. 그러나 단순 타워의 높이 증가는 많은 문제점을 유발 시킨다. 그 중에서도 대형화된 높이만큼 증가되는 무게와 타워 단면의 직경은 운반 및 설치비용을 급격하게 증가시키기 때문이다. 국내 도로 교통법상 적재물의 높이는 지상으로부터 4m로 제한받고, 도로 구조의 보전과 통행의 안전에 지장이 없다고 판단되면 고시한 도로노선의 경우 최

Table 1. 풍력발전기 구성요소 및 원가 구조

구성요소	원가 비율(%)
타워	26.3
블레이드	22.2
기어박스	12.9
파워 컨버터	5.0
발전기	3.4
메인샤프트	1.9

대 4.2m로 정해진다. 더 많은 전력을 생산하기 위해 풍력 발전기의 대형화는 필수요소이지만, 설치 및 운송에 제약이 있다면 설계과정에서 무게와 크기를 줄이는 방안을 강구 해야만 한다. 그러므로 현재 국내외로 여러 가지 새로운 대안들이 제시되고 개발되어지고 있다<sup>(4)</sup>. 본 논문 또한 이러한 설치 및 운송의 문제점을 해결하고, 기존의 타워보다 경제적인 타워를 개발하고자, 스틸과 콘크리트가 융합된 하이브리드 형식의 타워 개발을 위한 연구를 목적으로 한다.

## 2. 연구목표 및 내용

본 연구의 목표는 2MW급 풍력발전기를 IEC Class IIA 조건에 의해 GH-Bladed를 이용하여 하중해석을 실시하며, 타워 설계에 필요한 타워의 위치별 극한하중을 추출한다. 그리고 획득한 하중 정보들을 바탕으로 스틸-콘크리트 하이브리드 타워의 개발 가능성과 하중영향 및 경제성 평가를 주목표로 한다.

하중 추출에 사용되어질 풍력발전기는 3블레이드 전 방향(upwind) 구조, 허브위치 80m, 로터 반경 44m, 중공 원통형 스틸 타워가 적용된 2MW급 풍력발전기를 시뮬레이션하여 극한하중, 고유진동수 및 기타 정보들을 획득할 것이다.

하중 취득 예상지점은 타워의 최상단부와 기저부를 포함하여 각 섹션별에서 하중 획득이 가능하게끔 하였다. 그리고 입

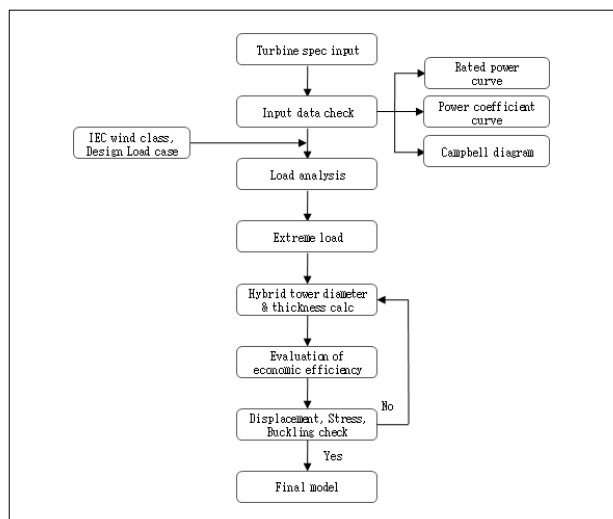


Fig. 1 설계 절차

력 상황의 신뢰도를 판별하기 위하여 풍속대비 정격출력, 출력계수 곡선과 Campbell diagram을 그려보았다<sup>(3)</sup>.

Fig. 2와 같이 풍력발전기는 Cut-in 풍속 3.5m/s에서 발전이 시작되고, 정격풍속 11.5m/s에서 2MW의 출력이 나오고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에서 보듯이 정격풍속에서 최대 약 0.48의 출력계수가 나타나며, 그 이상의 풍속에서는 정격출력을 유지하기 위해 출력 계수가 예상한대로 감소하는 것을 알 수 있다. 이것으로 모델링된 풍력발전기가 올바르게 작동하고, 하중추출을 위해 사용되어질 수 있다고 판

Table 2. IEC Class

풍력 터빈 클래스	I	II	III	IV
$V_{ref}(m/s)$	50	42.5	37.5	30
$V_{ave}(m/s)$	10	8.5	7.5	6
A	115(-)	0.18	0.18	0.18
	a(-)	2	2	2
B	115(-)	0.16	0.16	0.16
	a(-)	3	3	3

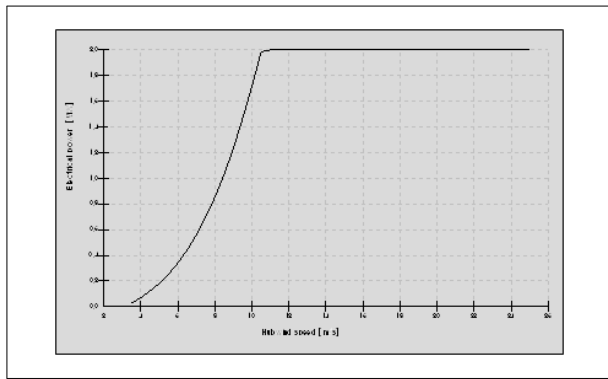


Fig. 2 풍속대비 정격출력 곡선

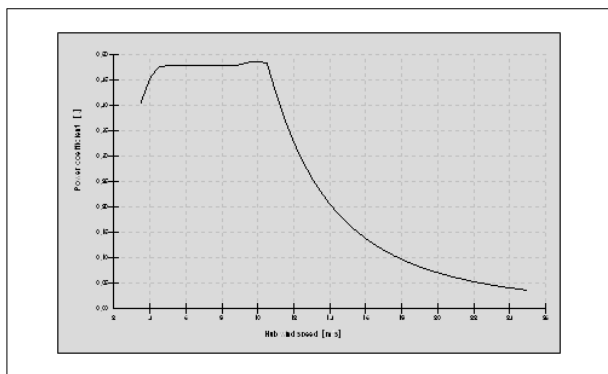


Fig. 3 풍속대비 정격출력 곡선

단되어진다.

다음으로 Campbell diagram을 통해 모델링 된 풍력발전기가 GL-guideline인 식 (1)과 부합되는지 확인하였다.

$$\frac{f_R}{f_1} \leq 0.95, \frac{f_{R,m}}{f_n} \leq 0.95 \text{ or } 1.05 \leq \frac{f_{R,m}}{f_n} \quad (1)$$

$f_R$  : 운전 중 로터최대주파수

$f_1$  : 타워 1차 고유 진동수

$f_{R,m}$  : m 로터 블레이드 통과 주파수

$f_n$  : 타워 n차 고유진동수

모델링된 타워의 고유진동수는 Table 3과 같고, 이 진동수는 로터 최대주파수(0.278Hz)와 시동시 m=3 일때의 로터블레이드 통과주파수와와의 공진여부를 판별해보았다<sup>(6)</sup>.

$$\frac{f_R}{f_1} = \frac{16.7rpm/60}{0.36} = 0.77 \leq 0.95 \quad (2)$$

$$1.05 \leq \frac{f_{R,m}}{f_n} = \frac{3 \times 8.628rpm/60}{0.36} = 1.198 \quad (3)$$

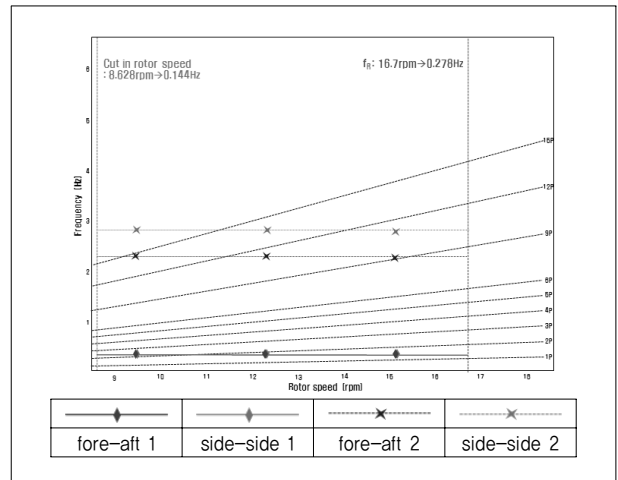


Fig. 4 Campbell diagram(스틸타워)

Table 3. 타워 고유진동수

	고유진동수[Hz]
Tower fore-aft mode 1	0.36
Tower fore-aft mode 2	2.32
Tower side-side mode 1	0.36
Tower side-side mode 2	2.75

### 3. 2MW급 풍력발전기 타워 하중 해석

GH-Bladed 상에 입력되어진 풍력발전기를 다음의 IEC-61400-1 설계하중조건에 따라 하중을 해석하여 극한하중을 추출하였다. 설계하중조건은 발전, 발전 중 고장, 시동, 정상 및 비상정지, 아이들링, 파킹의 7가지 상황과 NWP(Normal Wind Profile), NTM(Normal Turbulence Model), ECG(Extreme Coherent Gust), ECD(Extreme Coherent gust wind Direction change), EOG(Extreme Operating Gust), EWS(Extreme Wind Shear), EDC(Extreme Direction Change), EWM(Extreme Wind Model)의 8가지 바람모델이 적용되며, 각각의 케이스 별로 요에러(-10°, 0°, +10°), 바람의 크기 및 방향 등으로 나뉘어 239가지의 상황이 구현된다<sup>(7)</sup>. 즉 설계하중조건은 풍력발전기가 실제 상황에서 접할 수 있는 다양한 상황이 구현 될 수 있게끔 되어있다. 본 논문에서는 이 상황들과 더불어 결빙 상황, 유지보수상황의 하중조건을 추가하여 좀 더 구체적인 하중해석이 되도록 하였다.

Table 4. 설계 하중 조건

상황	DLC	바람 상태	
1. 발전	1.1	NTM	$V_{hub}=V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.2	NTM	$V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$
	1.3	ECD	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.4	NWP	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.5	EOG <sub>1</sub>	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.6	EOG <sub>50</sub>	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.7	EWS	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.8	EDC <sub>50</sub>	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	1.9	ECG	$V_{hub} = V_r$
2. 발전 중 고장	2.1	NWP	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	2.2	NWP	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	2.3	NTM	$V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$
3. 시동	3.1	NWP	$V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$
	3.2	EOG <sub>1</sub>	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
	3.3	EDC <sub>1</sub>	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
4. 정상정지	4.1	NWP	$V_{in} \leq V_{hub} \leq V_{out}$
	4.2	EOG <sub>1</sub>	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
5. 비상정지	5.1	NWP	$V_{hub} = V_r$ 또는 $V_{out}$
6. 아이들링	6.1	EWM	$V_{hub} = V_{e50}$
	6.2	NTM	$V_{in} < 0.7V_{ref}$
7. 파킹	7.1	EWM	$V_{hub} = V_{e1}$

Table 5. 타워 최상단부 극한 하중

		Load case	Mx	My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz
			kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max	dlc 2.1 c	2719.9	-1865.7	3298.3	149.0	396.7	128.3	416.9	-1505.9
Mx	Min	dlc 2.1 b	-4577.0	-4839.6	6661.1	-1591.6	-139.4	188.2	234.2	-1440.8
My	Max	dlc 1.1 f	1722.1	2879.1	3354.9	1039.5	186.2	-93.6	208.4	-1458.0
My	Min	dlc 3.2 c	1050.9	-7192.4	7268.8	-1778.3	-120.3	187.0	222.4	-1454.9
Mxy	Max	dlc 3.2 c	1050.9	-7192.4	7268.8	-1778.3	-120.3	187.0	222.4	-1454.9
Mxy	Min	dlc 4.2 f_g1 19	26.3	-4.54	26.7	-1607.6	-60.7	-91.9	110.1	-1358.8
Mz	Max	dlc 2.1 e	-338.4	-2739.5	2760.3	5343.5	293.4	-67.4	301.1	-1515.0
Mz	Min	dlc 3.2 c	744.0	-3402.4	3482.8	-5028.0	-206.7	288.6	355.0	-1330.3
Fx	Max	dlc 1.5 a_g1 15	741.0	-809.0	1097.1	441.5	735.3	-49.4	736.9	-1513.8
Fx	Min	dlc 1.5 a_g1 17.45	629.7	-4594.0	4636.9	-1405.9	-753.9	-51.5	755.7	-1416.9
Fy	Max	dlc 6.1 b_wind 42.5 2	-1354.0	-472.2	1434.0	-2275.4	9.88	756.4	756.5	-1257.8
Fy	Min	dlc 6.1 e_wind 42.5 3	864.8	-3068.6	3188.1	2787.0	52.7	-625.8	628.0	-1289.1
Fxy	Max	dlc 1.10 d_icing 2	2236.4	-1307.7	2590.7	1219.7	674.0	-413.3	790.7	-1538.8
Fxy	Min	dlc 4.2 c_g1 20.25	-151.2	-2898.8	2902.8	26.2	-0.16	-0.067	0.17	-1459.9
Fz	Max	dlc 7.1 b_pa 60	-193.1	-1198.1	1213.5	-964.7	86.5	3.82	86.6	-971.1
Fz	Min	dlc 1.10 f_icing 2	2057.9	-2522.1	3255.2	888.2	417.4	-367.5	495.8	-1706.7

최종적으로 후처리를 통하여 Table 5와 같이 극한하중을 추출하였다. 보시는 것과 같이 대부분 제어 고장 및 계통상실 상황에서 지배적인 모멘트 및 하중이 나타났다<sup>(8)</sup>.

획득된 극한하중에 대해 설명하면, X방향에서는 각각 발전 중 요 제어 불능 상황과 발전 중 돌풍을 동반한 계통상실 상황에서 최대 모멘트 및 하중이 발생하였다. Y방향에서는 각각 시동 상황 중 돌풍 발생 때와 아이들링 상황 중 극치 난류가 발생할 때 최대 모멘트 및 하중이 발생하였고, Z방향에서는 발전 중 1개 블레이드 피치제어 불능 상황과 발전 중 두 개 블레이드 결빙 상황에서 최대 모멘트 및 하중이 발생하였다.

### 4. 2MW급 하이브리드 타워 선정

획득한 하중 정보들을 사용하여 하이브리드 타워의 직경 및 두께를 선정한다. 스틸 타워의 직경은 이미 보유한 직경을 사용하며, 콘크리트 타워부 직경은 5.8m로 정하였다<sup>(1)</sup>.

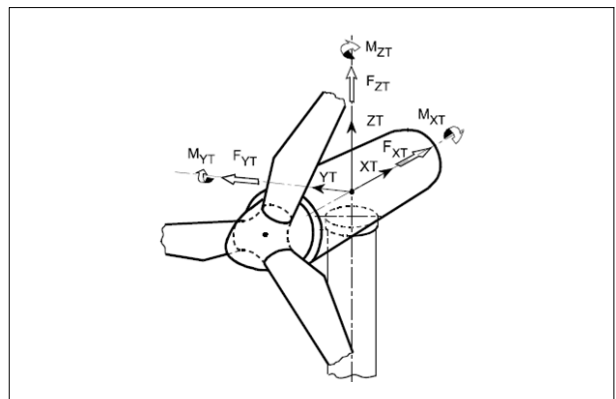


Fig. 5 타워 좌표계

정의한 직경을 이용하여 섹션 직경을 식 (4)로 표현하고, 섹션의 단면계수를 식 (5)와 같이 섹션별 직경과 두께로 표현한다. 그리고 앞서 획득한 하중과 단면계수를 이용하여 섹션별 응력을 식 (6)과 같이 계산할 수 있다.

Section diameter (4)

$$d_x = d_a + (d_b - d_a) \frac{x}{H}$$

- $d_x$  : 임의의 단면 직경(연결부 직경)
- $x$  : 타워 최상단부에서 떨어진 거리
- $H$ (타워 높이)=78.5m
- $d_a$  : 콘크리트부 상단 직경
- $d_b$  : 콘크리트부 하단 직경

Section modulus (5)

$$S_x = \frac{I}{c} = \frac{\pi(d_x^4 - (d_x - 2t_x)^4)/64}{d_x/2}$$

$$= \frac{\pi(8d_x^3t_x - 24d_x^2t_x^2 + 32d_x t_x^3 - 16t_x^4)}{32d_x}$$

- $S_x$  : 임의의 단면계수,  $I$  : 관성모멘트
- $c$  : 중립축으로부터 떨어진 거리
- $t_x$  : 임의의 단면 두께

Section stress (6)

$$\sigma_x = \frac{M_x + Px}{S_x}$$

$$= \frac{32d_x(M_x + Px)}{\pi(8d_x^3t_x - 24d_x^2t_x^2 + 32d_x t_x^3 - 16t_x^4)}$$

- $\sigma_x$  : 단면 굽힘 응력
- $M_x, P$  : 타워 최상단부 최대모멘트, 최대하중

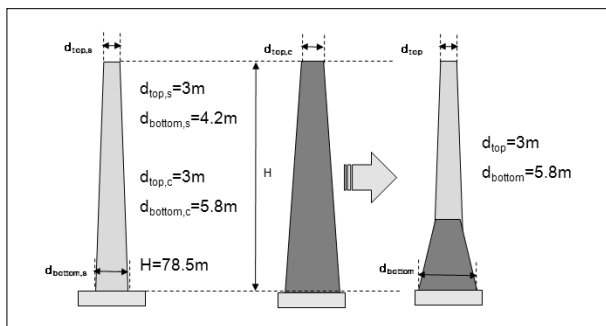


Fig. 6 정의된 타워 최상단부 & 기저부 직경

최종적으로 섹션별 두께는 단면의 직경과 최상단 모멘트, 하중, 허용응력으로 식 (7)과 같은 4차 방정식의 해로서 표현이 가능하다. 다음으로 전체 타워에서 콘크리트부가 차지할 높이를 계산하기 위해 획득 되어진 두께를 적용하여 높이 변화에 따른 무게를 계산한다. 무게 계산 시 플랜지와 브래킷의 무게는 고려치 않았다.

Section thickness (7)

$$0 = -16t_x^4 + 32d_x t_x^3 - 24d_x^2 t_x^2 + 8d_x^3 t_x - \frac{32d_x(M_x + Px)}{\sigma_x \pi}$$

무게를 계산한 결과 Table 6와 같이 정리가 되며, 오직 콘크리트로만 이루어진 타워의 경우 가장 무거운 것으로 나타났다. 또한 스틸 타워에서 콘크리트 타워로 갈수록 약 7 배의 무게 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 다음으로 과제 수행을 위한 공동 연구기관의 도움을 받아, 스틸 타워와 PC 콘

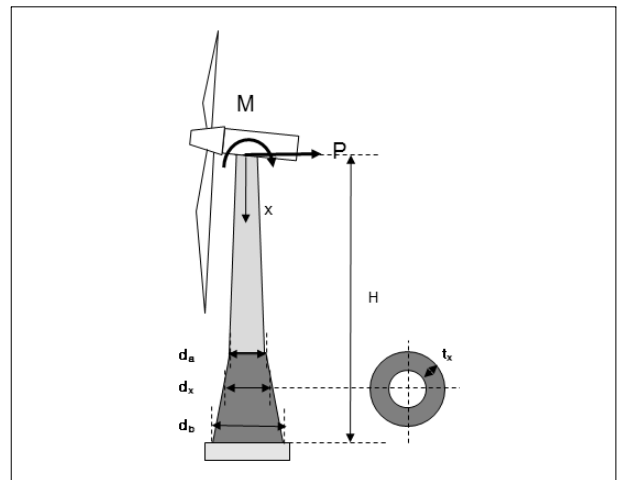


Fig. 7 콘크리트 부 두께 계산 개념도

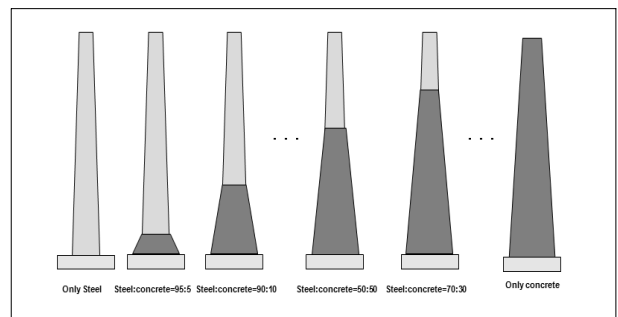


Fig. 8 하이브리드 타워 무게 계산 개념도

크리트의 제작비, 운반비 및 설치비를 적용하여 11가지 타입의 타워에 대한 전체 비용을 계산하였다. 가격을 계산한 결과 Table 7와 같이 스틸 타워의 가격은 약 5억 1천만원으로 나타났고, 콘크리트 타워의 가격은 약 7억 2천만원으로 나타났다. 이것은 약 1.4배정도의 가격 차이를 보이고 있다. 하지만 기저부에서부터 약 20%를 콘크리트 타워가 부담하게 되면, 기존의 스틸 타워보다 경제성 있는 제품이 도출되었다. 그 가격은 약 4억 6천만원 정도이고, 이는 하이브리드타워가 풍력발전용 타워로서 적용 가능성이 있다고 말 할 수 있다고 생각되어진다. 그 정도는 기존 스틸 타워의 가격대비 약 11% 감소

된 가격을 예상 할 수 있으며, 이는 2MW급 78.5m 타워의 경우 타워 하나당 약 5천 7백만원의 가격 절감을 기대할 수 있다. 또한 Fig. 9을 보면 알 수 있듯이, 콘크리트 타워로 갈수록 설치비의 비용이 급격하게 증가한다는 것을 알 수 있다. 이는 스틸 타워 대비 현저히 증가하는 무게에서 기인한다고 할 수 있다.

### 5. 2MW급 하이브리드 타워 시스템 해석

경제적인 타입으로 도출된 하이브리드 타워는 콘크리트 부의 높이가 기저부에서부터 약 20%를 차지하며, 전체 무게는

Table 6. 하이브리드 타워 무게

	Steel	Concrete	
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	2446	
Mass[ton]			
	Steel	Concrete	Total
Only steel	167	0	167
S:90% C:10%	129	126	255
S:80% C:20%	119	199	318
S:70% C:30%	88	335	423
S:60% C:40%	70	447	517
S:50% C:50%	53	557	610
S:40% C:60%	44	633	677
S:30% C:70%	31	756	787
S:20% C:80%	17	944	961
S:10% C:90%	10	1058	1068
Only concrete	0	1214	1214

Table 7. 하이브리드 타워 경제성 평가

[1,000 won]	제작비	운반비	설치비	전체비용
Only steel	445,694	7,189	61,054	513,937
S:90% C:10%	384,138	10,066	76,144	470,348
S:80% C:20%	358,633	11,908	86,348	456,889
S:70% C:30%	342,855	15,843	109,652	468,350
S:60% C:40%	330,299	19,092	128,905	478,296
S:50% C:50%	322,625	22,355	148,453	493,433
S:40% C:60%	321,625	24,656	162,386	508,667
S:30% C:70%	327,933	28,541	186,249	542,723
S:20% C:80%	350,036	34,692	224,496	609,224
S:10% C:90%	370,129	38,535	248,631	657,295
Only concrete	393,353	43,706	280,966	718,025

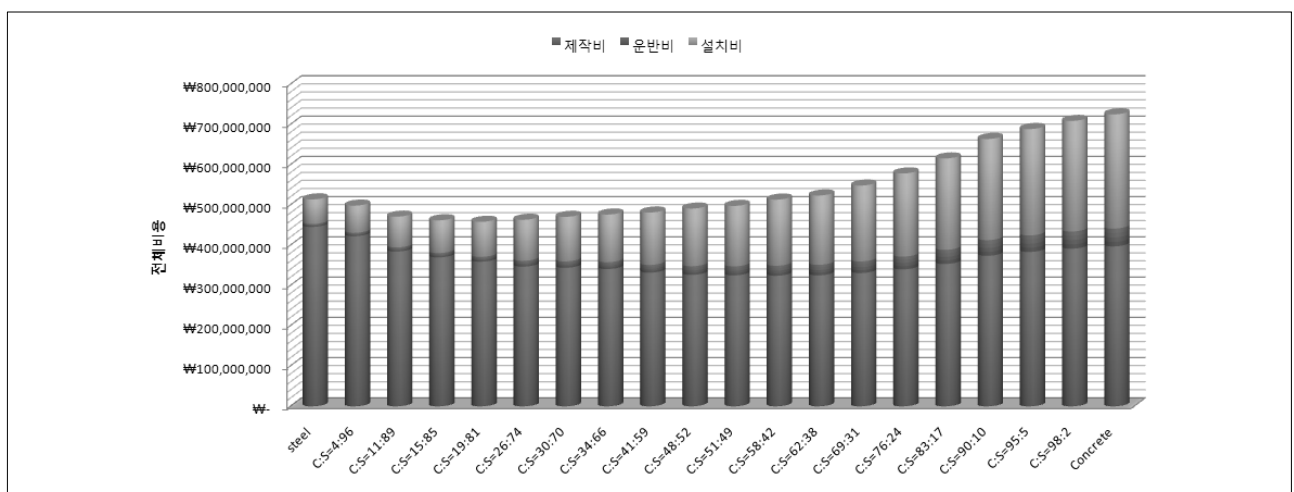


Fig. 9 전체 비용 대비 부분별 비용

Table 8. 하이브리드 타워 최상단부 극한 하중

		Mx	My	Mxy	Mz	Fx	Fy	Fxy	Fz
	Load case	kNm	kNm	kNm	kNm	kN	kN	kN	kN
Mx	Max h_dlc_2.1_c	2739.9	-1942.6	3358.6	352.7	382.7	141.8	408.1	-1495.8
Mx	Min h_dlc_2.1_b	-4550.9	-4918.2	6700.7	-1651.9	-138.8	221.3	261.2	-1441.6
My	Max h_dlc_1.1_f	1643.9	2772.9	3233.5	982.5	159.3	-70.5	174.2	-1460.3
My	Min h_dlc_3.2_c	1085.6	-7240.6	7321.5	-1760.0	-124.7	171.1	211.7	-1456.9
Mxy	Max h_dlc_3.2_c	1085.6	-7240.6	7321.5	-1760.0	-124.7	171.1	211.7	-1456.9
Mxy	Min h_dlc_4.2_f_gl_15	29.2	45.4	53.9	-1895.8	-62.3	-122.3	137.2	-1369.7
Mz	Max h_dlc_2.1_e	-804.0	-2683.2	2801.0	4627.8	271.1	-57.8	277.2	-1509.4
Mz	Min h_dlc_3.2_c	807.8	-3322.4	3419.2	-4953.7	-156.5	243.9	289.8	-1329.9
Fx	Max h_dlc_1.5_a_gl_15	873.3	698.7	1118.5	482.1	824.3	4.84	824.4	-1524.9
Fx	Min h_dlc_1.5_a_gl_17.45	-417.7	-4557.7	4576.8	-1366.6	-719.8	-23.7	720.2	-1418.2
Fy	Max h_dlc_6.1_b_wind_42.5_2	-1258.4	-675.4	1428.2	-2481.7	-6.50	671.4	671.4	-1275.9
Fy	Min h_dlc_6.1_e_wind_42.5_1	971.3	-3624.5	3727.8	1808.7	-130.4	-619.9	633.5	-1419.2
Fxy	Max h_dlc_1.5_a_gl_15	1189.8	-683.4	1372.1	500.0	824.3	-21.7	824.6	-1520.2
Fxy	Min h_dlc_5.1_a	140.6	-2870.5	2873.9	0.18	0.15	0.074	0.17	-1452.1
Fz	Max h_dlc_7.1_b_pa_30	500.5	-1417.3	1503.1	-2410.3	152.0	60.1	163.5	-974.7
Fz	Min h_dlc_1.10_f_icing_2	1959.1	-2493.5	3171.1	770.3	401.7	-226.0	460.9	-1702.2

309ton으로 이는 기존 스틸 타워보다 약 1.9배 정도 무게가 증가되었다. 획득된 제원으로 하이브리드 타워 적용 시 하중의 변화를 확인하기 위하여, GH-Bladed를 이용하여 하중 해석을 수행하였다.

그 결과 하이브리드 타워의 최상단부 극한 하중의 경우 스틸 타워와 비교하여 큰 하중의 변화는 없는 것으로 나타났다. 하지만 Z방향 모멘트 값과, X 및 XY방향에서는 최대모멘트가 획득되어지는 상황이 다르게 나타났다. Mz의 경우는 기존 스틸 타워에서는 발전 중 1개 블레이드 피치제어 불능 상황(DLC\_2.1\_e)에서 최대 모멘트가 발생하였으나, 하이브리드 타워의 경우는 시동 중 돌풍 발생 상황(DLC\_3.2\_c)에서 최대 모멘트가 발생하였다. Fx의 경우는 발전 중 돌풍을 동반한

Table 9. 극한하중 비교

	Steel Tower	Hybrid tower	변화량
Mx [kNm]	4577	4551	-26
My [kNm]	7192	7241	49
Mxy [kNm]	7269	7322	53
Mz [kNm]	5344	4954	-390
Fx [kN]	754	824	70
Fy [kN]	756	671	-85
Fxy [kN]	791	825	34
Fz [kN]	1707	1702	-5

Table 10. 고유 진동수 비교

[Hz]	Steel tower	Hybrid tower
Tower fore-aft mode 1	0,36	0,38
Tower fore-aft mode 2	2,32	2,40
Tower side-side mode 1	0,36	0,38
Tower side-side mode 2	2,75	2,87

계통상실 상황(DLC\_1,5) 중에서 스틸 타워의 경우 계통상실이 해석 시작 후 7.45초에 시작 되었을 시, 최대 하중이 발생 하였으나, 하이브리드 타워의 경우 해석 시작 후 5초에 계통상실이 일어났을 경우 최대 하중이 발생 하였다.

다음으로 스틸 타워와 하이브리드 타워의 고유진동수 비교를 해보았다. Table 10을 보면 알 수 있듯이 진동수의 변화는 타워 1차 고유 진동수는 약 0.02Hz 증가하였고, 2차 타워 고유 진동수는 fore-aft 경우 약 0.08Hz 증가, side-side 경우는 약 0.12Hz 증가하였다. 하지만 증가의 폭은 있었으나 선 급기준에 따라 식 (8)과 식 (9)와 같이 계산한 결과는 만족스러운 값이라고 할 수 있다.

$$\frac{f_R}{f_1} = \frac{16.7rpm/60}{0.38} = 0.732 \leq 0.95 \quad (8)$$

$$1.05 \leq \frac{f_{R,m}}{f_n} = \frac{3 \times 8.628rpm/60}{0.38} = 1.135 \quad (9)$$

마지막으로 하이브리드 타워에 대한 변위, 응력 분포 및 좌굴 상태를 확인하기 위하여, 유한요소해석을 실시하였다. 해석은 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 통해 진행 되었다. 타워 최대 변위는 스틸 타워와 하이브리드 타워 모두 최상단 위치에서 발생 되었다.두 타워 간의 변위 차이는 0.132m로 계산되어졌다. 이는 약간의 하중 차이와 하이브리드 타워의 콘크리트부의 영향이라 생각되어진다.

최대 응력은 스틸 타워의 경우 기저부에서 약 40~50% 지점과 개구부 주위에서 나타났다. 개구부의 최대 응력은 타워 외형의 급작스런 변화에서 기인한 응력 상승 때문이다. 반면에 하이브리드 타워의 경우 스틸과 콘크리트 타워가 연결되는 부위에서 최대 응력이 발생하였다. 이는 현재 연결부의 재

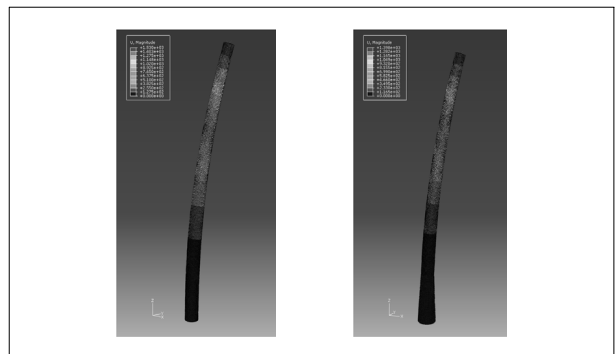


Fig. 10 타워 변위 확인(좌:스틸 타워, 우: 하이브리드 타워)

료의 급작스런 변화, 스틸 타워의 매우 작은 두께, 플랜지 및 연결부의 미적용에서 기인한 응력 상승이라 사료된다. 그리고 개구부의 응력 집중도 발생하였다. 하지만 이는 연결부 응력의 크기에 비해 매우 낮은 폭으로 상승하였다. 그래서 콘크리트부의 상세한 해석을 위하여, 콘크리트 타워만 분리하여 모델링하여, 20%의 높이의 하중을 추출하여 직접 적용하여 해석을 진행하였다.

콘크리트부만 부분적으로 유한요소 해석을 위해 GH-Bladed에서 연결부의 하중을 추출하였다. 하중은 마찬가지로 h\_dlc\_1.5\_a\_gl\_15의 X 방향 최대 하중이 발생할 때의 값을 추출하였다. 그 값은  $M_x=1893.6\text{kNm}$ ,  $M_y=56922\text{kNm}$ ,  $M_z=557.5\text{kNm}$ ,  $F_x=924.9\text{kN}$ ,  $F_y=-35.3\text{kN}$ ,  $F_z=-299639\text{kN}$ 으로 나타났다. 이 값들을 콘크리트 타워 상단부 중심에 적용 시킨 결과 역시

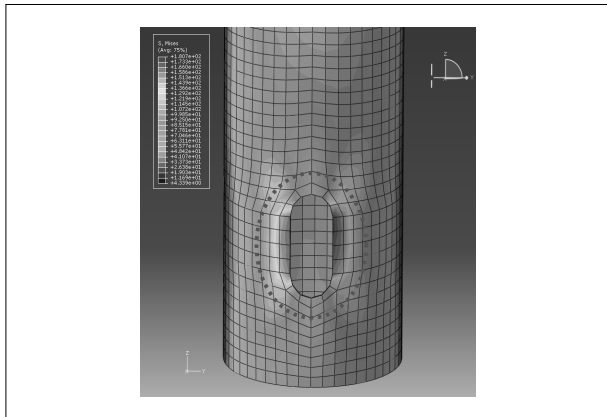


Fig. 11 스틸 타워 개구부 응력분포

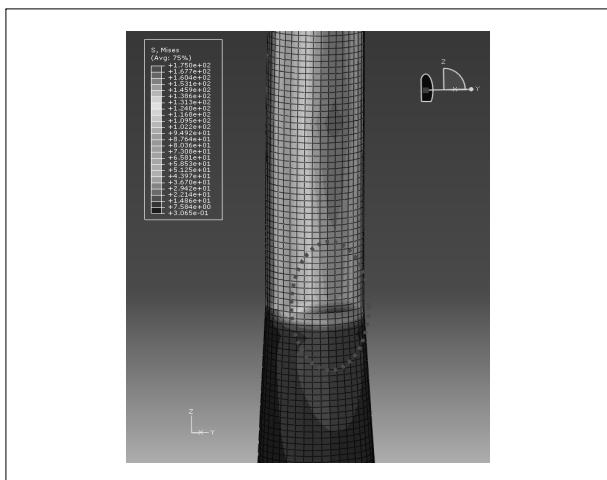


Fig. 12 하이브리드 타워 연결부 응력분포

연결부 지점에서 높은 응력이 발생하였고, 개구부 쪽으로는 약간의 응력 집중을 볼 수 있었다. 최대 응력은 마찬가지로 Von Mises 이론에 의해 도출된 값을 사용한다. 그리고 콘크리트 타워 연결부의 안전율을 볼 수 있다<sup>(9)</sup>.

그리고 앞서 보았듯이 하이브리드 타워에서 연결부의 응력 집중 때문에 기존의 타워에서 개구부 보다 더 취약하다는 것을 알 수 있었다. 이 문제점을 해소 할 수 있는 방안으로서는

Table 11. 하이브리드 타워 최대 응력 및 변위

		Load case	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [mm]
Mx	Max	h_dlc_2,1_c	81,28	374,0
Mx	Min	h_dlc_2,1_b	93,15	463,9
My	Max	h_dlc_1,1_f	57,16	278,3
My	Min	h_dlc_3,2_c	90,55	369,8
Mxy	Max	h_dlc_3,2_c	90,55	369,8
Mxy	Min	h_dlc_4,2_f_gl_15	33,38	153,0
Mz	Max	h_dlc_2,1_e	54,94	236,0
Mz	Min	h_dlc_3,2_c	90,55	369,8
Fx	Max	h_dlc_1,5_a_gl_15	175,0	880,7
Fx	Min	h_dlc_1,5_a_gl_17,45	169,0	909,8
Fy	Max	h_dlc_6,1_b_wind_42,5_2	148,2	768,0
Fy	Min	h_dlc_6,1_e_wind_42,5_1	142,6	740,0
Fxy	Max	h_dlc_1,5_a_gl_15	175,0	880,7
Fxy	Min	h_dlc_5,1_a	39,52	77,58
Fz	Max	h_dlc_7,1_b_pa_30	33,01	142,3
Fz	Min	h_dlc_1,10_f_icing_2	98,31	477,0

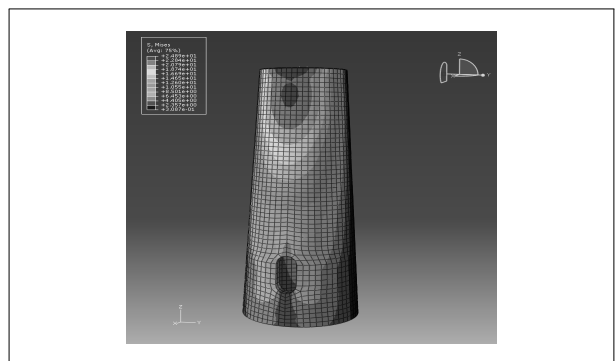


Fig. 13 콘크리트 타워 부 응력분포

Table 12. 콘크리트타워 극한 응력

Position	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{allow}$ (MPa)	Safety
연결부	24.9	43	1.73
개구부	12.5	43	3.44



두 가지 방법이 있다. 연결부의 최대 응력이 발생하는 구간의 두께 조정과 연결 장치의 적용이다. 그래서 200mm 구간을 약 50mm를 두께를 증가하여, 해석을 진행해본 결과, 응력의 감소는 Table 13과 Fig. 14와 같이 나타나며, 그 경향은 2차 함수로 나타나며 식 (10)을 따른다. 이에 따라 연결부 주위의 콘크리트의 두께는 최소 약 78.9mm가 되어야 하고, 최대 약 412mm 이상에서는 거의 응력 감소 효과를 볼 수 없다고 나타나진다.

$$\sigma(t) = 2.29 E-04 t^2 - 0.189 t + 53.48 \quad (10)$$

$$\sigma(t) = 40MPa \quad \text{at} \quad t = 78.92mm$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = 4.58 E-04 t - 0.189$$

$$\frac{d\sigma}{dt} = 0 \quad \text{at} \quad t = 412.5mm$$

연결부 주위의 스틸 타워 쪽 응력 집중을 해소하기 위한 방법으로는 연결 장치의 도입이 해결안이라 생각되어진다. 이를 확인하기 위해 길이 1m (플랜지 포함), 두께 200mm, 스틸 재질의 단순 형상 연결부를 적용하여 해석을 다시 진행 보았다. 그 결과 Fig. 15와 같이 스틸과 콘크리트 경계면에서의 응력 집중이 완화 되었다. 그 정도는 최대 응력 175MPa에서 157MPa로 약 10.4% 정도 감소하였다. 이로써 향후 연결부의

Table 13. 두께 증가에 따른 응력 감소

Thickness (mm)	$\sigma_{max}$ (MPa)	Safety
200	24.89	1.73
250	20.47	1.95
300	17.51	2.46
350	15.38	2.80

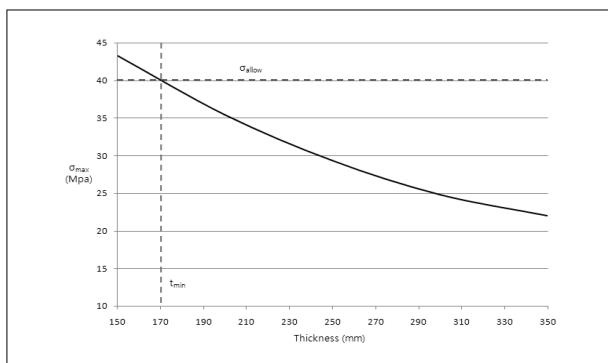


Fig. 14 두께 증가에 따른 응력 감소

상세설계 및 적절한 형상의 도입이 하이브리드 타워의 구조적 안정성 및 경제성을 가능하는 척도가 될 것이라 예상된다.

마지막으로 하이브리드 타워 또한 하나의 기둥으로써 좌굴에 대해 안정성이 있는지 확인하여야 한다. 본 논문에서는 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 모델링 된 하이브리드 타워의 탄성 좌굴 해석을 수행하였다. 그래서 현재 모델링된 타워의 좌굴 임계 하중을 파악하고 최대 축 방향 하중과의 관계에 따라 안정성 여부를 판단하였다. 이를 위해 타워를 결함이 없는 이상 기둥으로 간주하고, Fig. 16와 같이 바닥은 고정되고 상단은 자유로운 상태로 가정하였다. 하중 조건은 모드에 따른 고유 임계 하중 값을 획득하기 위하여 축

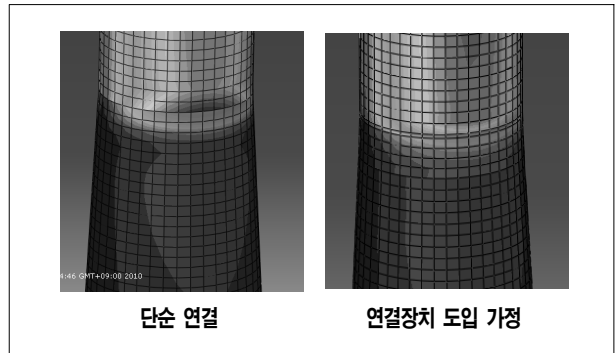


Fig. 15 연결 장치 적용 후 응력분포

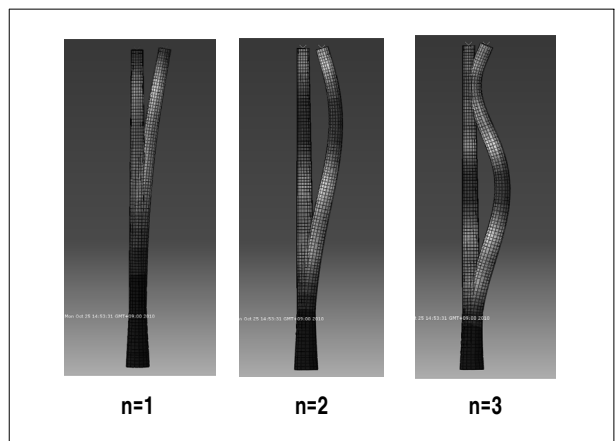


Fig. 16 모드별 좌굴 형태

Table 14. 좌굴 임계 하중

n	$P_{cr}$ (kN)	P(kN)
1	4.79 E+04	1702
2	3.06 E+05	
3	4.69 E+05	

방향 단위 하중을 적용하였다. 그 결과 Table 14와 같은 임계 하중을 획득하였다.

## 6. 결론

지금까지 경제성 면에서 2MW 풍력발전기 하이브리드 타워를 설계하여, 기존 스틸 타워와의 비교와 하이브리드 타워 거동 특성을 알아보았다. 그 결과로써 고강도 콘크리트가 타워 기저부에서부터 전체 높이의 약 20%를 부담하게 되면, 타워 전체 비용이 최대 약 11% 감소하는 효과를 볼 수 있다. 또한 하이브리드 타워의 경우 연결부의 상세 설계가 필요한 것을 제외하면, 기존 스틸 타워와 유사한 거동을 보인다고 알 수 있다. 향후 과제로써 하이브리드 타워의 피로하중 영향에 대한 연구가 계속 진행되어야 될 것이며, 또한 플랜지 및 브래킷을 적용하여 좀 더 면밀한 경제성 및 하중 영향 분석이 이루어져야한다고 생각한다. 하지만 본 논문에서는 개념 연구 단계로써 하이브리드 타워가 풍력 발전기용 타워로써 어느 정도 경제성이 있다고 판단하였고, 스틸과 콘크리트 타워의 연결부의 문제점을 해결하면 가까운 미래에 대형 풍력발전기 타워 시장에서 우위를 차지 할 수 있다고 생각되어진다.

## 후 기

본 연구는 풍력특성화대학원과 RIST가 공동으로 수행한 “타워 및 소재 개발을 위한 풍력발전기 하중해석”과제의 일부 분으로서 수행되었다. 자료 사용에 협조해주신 모든 분들에게 감사드립니다.

## References

- [1] The Concrete Centre, 2007, “Concrete Tower for Onshore and Offshore Wind Farm”, pp. 16–26.
- [2] EWEA, “The Economics of Wind Energy”, a report by the European Wind Energy Association, 2009–3.
- [3] Kim. B. S, 2008, “수평축 풍력 터빈 극한하중평가에 관한 연구”, 대한기계학회 추계학술대회, pp. 2–4.
- [4] Park. H. C, 2010, “신소재 및 하이브리드형 타워 개발 상세 기획 보고서”, 한국에너지기술평가원.
- [5] 시멘트·콘크리트 기술 자료집, 2005, “고강도 콘크리트”, (주)쌍용양회공업, pp. 17–19.
- [6] Hong. H. S, 2006, “2MW급 풍력발전기 타워 셀 최적 설계”, (주)유니슨, pp. 19–26.
- [7] 한국선급, 2008, “풍력발전 시스템의 기술 기준”, pp. 177–194.
- [8] Garrad Hassan, 2007, “GH bladed Theory Manual”, pp. 13–16, 43–47, 49–50, 69–71.
- [9] Isaac M. Daniel, ENGINEERING MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS, New York Oxpord, pp. 98–99.

**이 승 민**



2009년 영남대학교 기계공학과 공학사  
2011년 포항공과대학교 풍력특성화대학원  
공학석사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 공학석사  
(E-mail : lsm3747@postech.ac.kr)

**권 대 용**



2009년 성균관대학교 기계공학과 공학사  
2011년 포항공과대학교 풍력특성화대학원  
공학석사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 공학석사  
(E-mail : coltm43@postech.ac.kr)

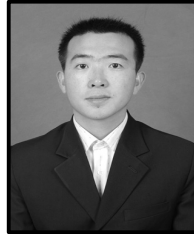
**김 용 천**



2008년 전북대학교 항공우주공학과 공학사  
2011년 포항공과대학교 풍력특성화대학원  
공학석사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 공학석사  
(E-mail : rupee@postech.ac.kr)

**Shi Wei**



2006년 Yanbian대학교 기계공학과 공학사

현재 포항공과대학교 기계공학과 공학석·박사통합과정  
(E-mail : shw@postech.ac.kr)

**박 현 철**



1974년 서울대학교 기관공학과 공학사  
1981년 Iowa 주립대학교 기계공학과 공학석사  
1985년 Iowa 주립대학교 기계공학과 공학박사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 교수  
(E-mail : hcpark@postech.ac.kr)

**정 진 화**



1979년 서울대학교 기계설계학과 공학사  
1986년 South Dakota 주립대학교 기계공학과  
공학석사  
1991년 Iowa 주립대학교 항공우주공학과  
공학박사

현재 포항공과대학교 풍력특성화대학원 교수  
(E-mail : cwchung@postech.ac.kr)