

해상풍력 하부구조물 하중영향평가 및 해석기술연구

권대용*, 박현철**, 정진화, 김용천, 이승민, Wei Shi

A Study on Load Evaluation and Analysis for Foundation of the Offshore Wind Turbine System

Daeyong Kwon*, Hyunchul Park**, Chinwha Chung, Yongchun Kim, Seungmin Lee and Wei Shi

Abstract

With growing of wind turbine industry, offshore wind energy is getting more attention in recent years. Among all the components of offshore wind turbines, the foundation of the offshore wind turbine plays a key role in stability of whole system. In this work, the 5 MW NREL reference wind turbine with rated speed of 11.4 m/s is used for load calculation. Wind and wave loads are calculated using GH-Bladed (Garard Hassan) and FAST (NREL). Additionally, FE simulation is carried out to investigate the wave effect on the support structure. Meanwhile, this work is to simulate systemic and optimized load cases for the foundation analysis of wind turbine system.

Key words Offshore Wind Turbine(해상풍력발전시스템), Foundation(기초 구조물), Monopile(모노파일), Wave Load(파도하중)

(접수일 2010. 12. 1, 게재확정일 2010. 12. 17)

* 포항공과대학교 풍력특성화대학원

■ E-mail : coltm43@postech.ac.kr ■ Tel : (054)279-2837 ■ Fax : (054)279-0589

** 포항공과대학교 풍력특성화대학원

■ E-mail : hcpark@postech.ac.kr ■ Tel : (054)279-0584 ■ Fax : (054)279-0589

Nomenclature

f : wave frequency

H : wave height (m, Regular wave)

H_s : significant wave height(m, Irregular wave)

T : wave period

T_p : peak wave period

γ : peak shape parameter

σ_v : equivalent stress

IEC : international electrotechnical commission

IEA : international energy agency

FAST : fatigue, aerodynamics, structures and turbulence

FE : finite element

PM : Pierson-Moskowitz spectrum

JS : Jonswap spectrum

NSS : normal sea state

SSS : severe sea state
 SWH : severe wave height
 ESS : extreme sea state
 EWH : extreme wave height
 RWH : reduced wave height

1. 서론

해상 풍력발전기는 육상용과는 달리 해상환경의 영향을 받게 되는데 풍 하중뿐만 아니라 수심, 토양 등과 같은 환경 변수와 조류, 파랑 등과 같은 하중변수가 복합적으로 작용하게 된다⁽¹⁾. 이 복합하중은 해상풍력 시스템의 기초 구조물에서 대부분을 부담한다.

해상 풍력발전기에 작용하는 해상 하중은 풍 하중과 달리 일반적인 기준이 없으며, 설치 지역 특성에 큰 영향을 받기 때문에 하중 예측과 시스템의 해석은 설계 이전의 필수적인 과정이 된다. 또한 기초 구조물은 해상발전기에서 상당한 비용을 차지하기 때문에 경제성 있는 기초 구조물 설계를 위해 해상 환경 영향 평가는 매우 중요한 과정이다⁽¹⁾.

본 논문에서는 IEC 61400-3에 명시되어 있는 하중 조건 표준에 따라 해상풍력발전기의 극한 하중 해석이 수행되었다. 정량적 평가가 이뤄졌으며, 해상풍력발전 시스템의 해석 방법 체계화와 타당성에 대하여 연구하였다. 또한 파도 하중의 영향 평가 연구가 부가적으로 수행되었다.

2. 해석 수행 모델 및 해석 방법

2.1 해상풍력 발전 시스템

해석 수행에 사용되는 해상풍력발전기는 5MW급 NREL Reference 모델을 기초로 하였으며, 수심 20m 깊이에 모노파일(Monopile)기초(Fig. 1) 설치를 가정한 모델을 사용한다. 능동 피치 제어(Active pitch control)를 하는 3 블레이드 수평축 풍력발전기이며 정격풍속은 11.4m/s이다(Table 1).

타워와 기초 하부 구조물의 재료는 밀도 8500kg/m³, 탄성계수 2.1E+11N/m²인 강(Steel)으로 설계 되었다. Table 2

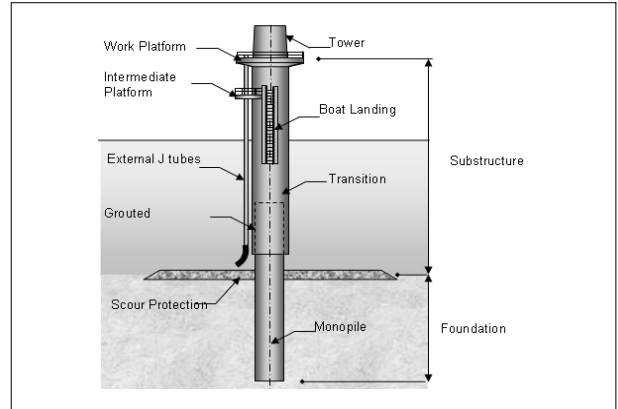


Fig. 1 Monopile foundation

Table 1. NREL 5 MW reference model

	Details
Rating	5 MW
Rotor Orientation	Upwind
Configuration	3 Blades
Control	Variable speed Collective Pitch
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Cut-In, Rated Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
RNA	350,000 kg
Tower Mass	347,460 kg

Table 2. Section properties of tower and foundation

Tower station number	Height above surface (m)	Outside diameter	Wall thickness (mm)
Monopile foundation			
1	-20	6,00	60,00
2	10	6,00	60,00
Tower properties			
3	10,00108	6,00	27,00
4	17,76	5,79	26,20
5	25,52	5,57	25,40
6	33,28	5,36	24,60
7	41,04	5,15	23,80
8	48,80	4,94	23,00
9	56,56	4,72	22,20
10	64,32	4,51	21,40
11	72,08	4,30	20,60
12	79,84	4,08	19,80
13	87,6	3,87	19,00

에서 볼 수 있듯이 섹션 1,2 부분(-20m~10m)이 기초 구조물이 되며, 상단의 타워 부분보다 두께가 크게 설계되어 있다.

2.2 해석 프로그램

해석 수행에 사용되는 프로그램은 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory) 연구소에 개발된 FAST와 영국의 Garrad Hassan社의 Bladed로 해석하게 된다. 각종 하중조건을 적용하게 되며 그에 따른 두 프로그램의 결과를 비교·분석하게 된다. 각 프로그램에서 적용되는 파도 모델 및 하중 해석 알고리즘 등은 Table 3에 자세하게 분류하였다.

2.3 해석 수행 방법 및 순서

본격적인 연구에 앞서 해석의 타당성 검증과 신뢰성의 제고를 위해 FAST와 GH-Bladed의 벤치마크 테스트가 먼저 수행된다. (1)벤치마크 테스트 완료 후 특정 해상 지역을 설정하여 (2) IEC 표준에 따른 극한 하중 해석을 진행하였다. 마지막으로 (3)타워 위치에 따라 파도 하중이 얼마나 영향을 미치는지 알아보았다.

Table 3. Overview of characteristics of FAST & Bladed

Offshore environment	FAST	GH-Bladed
Deterministic waves	Airy ⁺	Airy+, Stream
Stochastic waves	Pierson-Moskowitz, JONSWAP, Airy ⁺	Pierson-Moskowitz, JONSWAP, Airy ⁺ , CNW
Hydrodynamic load calculation	Morison equation - relative kinematics - drag and inertia - added mass Potential flow theory - diffraction, radiation	Morison equation - relative kinematics - drag and inertia - added mass - breaking wave - MacCanny-Fuchs correction for diffraction
Analysis method	Modal, FEM (Finite element method)	Modal, MBS (multi body system)
Rotor aero dynamics	Blade element theory (BEM), Generalized dynamic wake (GDW)	Blade element theory (BEM), Generalized dynamic wake (GDW)

Airy⁺: modified for free surface effect e.g Wheeler - stretching

3. 벤치마크 테스트

FAST 프로그램에서 사용되는 풍력발전시스템은 IEA(International energy agency) task23 OC3(Offshore Code Comparison Collaboration)에서 이미 검증이 완료된 모델로 기준 해석 프로그램으로 사용이 가능하다⁽²⁾. 하지만 Bladed에 입력된 설계 데이터는 직접 입력한 값으로 신뢰성 및 타당성에 대한 문제가 발생한다. 따라서 임의의 하중 조건을 적용하여 FAST와 Bladed의 하중 결과를 비교 즉, 벤치마크(Benchmark) 테스트를 통해 GH-Bladed의 입력 설계 사항이 올바르게 검토한다. GH-Bladed 입력의 타당성이 검증되면 FAST와의 결과를 비교·분석하여 시뮬레이션 수행 결과의 신뢰성을 높게 된다.

3.1 공진주파수 비교

타워는 풍속 및 파도 상태의 변화, 블레이드의 영향 등에 따라 진동을 하게 되므로 공진을 피하도록 설계 되어야 한다. 풍력시스템의 안정적인 운영을 위하여 공진주파수의 계산은 필수적인 과정이다⁽³⁾.

Bladed와 FE(ANSYS) 프로그램을 통해 공진 주파수를 계산하고, 그 결과를 IEA 프로젝트에서 수행했던 결과와 비교해 보았다. Table 4에서 볼 수 있듯이 1차, 2차 고유진동수(Natural frequency) 모두 거의 일치하는 만족할 만한 결과를 보여주었다.

3.2 하중 결과 비교

임의의 하중조건을 설정하여 측정되는 하중을 비교해보았다. 하중조건은 규칙파 1종류, 불규칙파 2종류를 설정하여 각각의 프로그램에 적용 및 해석하였다. 자세한 사항은 Table 5에 나타나있다.

해석 결과(Fig. 2,3)를 보면 대체로 Bladed의 값이 큰 것을

Table 4. 공진주파수 결과 비교

	Fore-aft 1st	Side-to-side 1st	Fore-aft 2nd	Side-to-side 2nd
Bladed	0,28	0,28	1,88	2,33
Bladed (IEA)	0,27	0,28	1,86	2,31
FAST (IEA)	0,28	0,28	2,43	2,37
FE	0,28	0,28	2,81	2,38

볼 수 있는데 FAST에 비해 보수적인 해석을 한다는 결론을 내릴 수 있으며, 하중의 차이는 두 프로그램간의 사이의 해석 알고리즘이 다르기 때문에 나타나는 결과이다. 하지만 대체로 결과의 경향성은 일치 하며 해석간의 차이 또한 10% 이내로 나타나기 때문에 Bladed에 입력된 설정 사항이 타당하다는 결론을 내릴 수 있다. 이에 따라 FAST와 Bladed의 해석이 동시에 수행 가능하며 두 프로그램간의 비교를 통해 연구의 신뢰성을 높일 수 있게 된다.

Table 5. Design load cases (Benchmark test)

Wave condition	Wind speed	Wave height	Wave period
Regular (Airy)	11.4 m/s	H = 5 m	T = 15 s
Irregular (PM)		H _s = 1.5 m	T _p = 6.5 s
Irregular (JS)		H _s = 6.5 m	T _p = 8.5 s

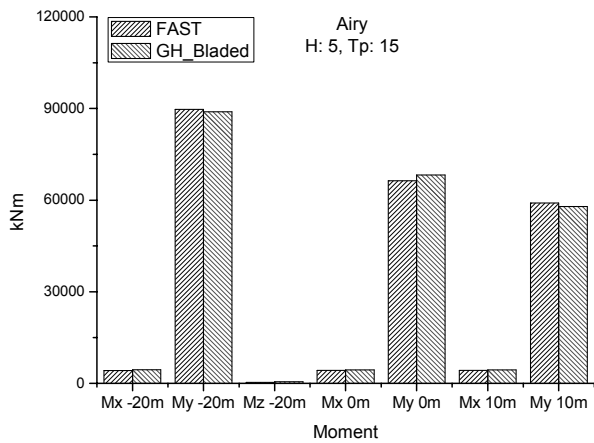


Fig. 2 Benchmark test -regular wave : Moment

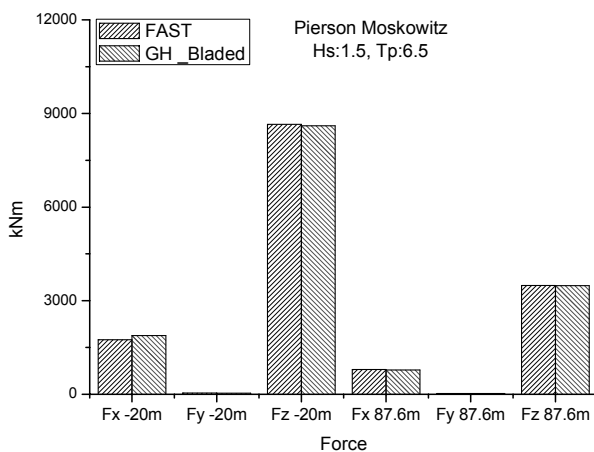


Fig. 3 Benchmark test -irregular wave : Force

4. 극한하중 해석

4.1 하중 조건 설정

IEC standard 3(Edition 3)을 참조하여 풍하중과 파도 하중에 대한 설정을 하게 된다⁽⁴⁾.

4.1.1 바람 등급 설정

국내에서는 바람 등급 설정 시 설치 장소에 따라 I, II, III를 모두를 다양하게 사용하였다. 본 연구에서는 바람등급을 II로 설정하고 난류 등급은 국내 환경에 적합한 A로 정하였다.

where

V_{ref} : reference wind speed average over 10 min

A : designated the category for higher turbulence

B : designated the category for medium turbulence

C : designated the category for lower turbulence

I_{ref} : expected value of the turbulence intensity at 15 m/s

4.1.2 풍하중 조건 설정

IEC 표준에 따라 Normal turbulence model (NTM), Extreme wind shear (EWS), Extreme turbulence model (ETM) 등과 같은 바람 조건을 정의 한다. 난류 모델은 Mann 모델을 사용하였다. 풍하중 설정에 대한 사항들은 기존의 많은 연구에서

Table 6. Basic parameters for wind turbine classes

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	Values specified by the designer
A I_{ref} (-)	0.16			
B I_{ref} (-)	0.14			
C I_{ref} (-)	0.12			

Table 7. Wind load case examples

Design situation	DLC	Wind condition	Wave condition
1) Power production	1.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS
3) Start up	3.3	EDC1 $V_{in}, V_r \pm 2, V_{out}$	NSS
4) Normal shut down	4.2	EOG $V_{in}, V_r \pm 2, V_{out}$	NSS
6) Parked	6.1a	EWM $V_{hub} = k1V_{ref}$	ESS

이미 수행되었기 때문에 본 논문에서는 생략하기로 한다.

4.1.3 파도 하중 조건 설정

파도 조건은 2가지 매개변수를 사용하여 스펙트럼으로 나타내게 된다⁽⁴⁾. 2가지 매개변수는 다음과 같다.

H_s : Significant wave height(유의 파고)

T_p : Peak period(유의 파주기)

H_s 는 임의 관측 시간동안 관측된 파고 중에서 파고가 높은 순서로 전체 1/3에 해당하는 파고들의 평균이며, 이와 유사하게 T_p 는 파도 스펙트럼 중 파고가 큰 순서로 전체 파랑의 1/3까지 파랑들의 파주기를 평균한 값이 된다⁽⁵⁾.

파도 하중은 2가지 스펙트럼으로 나눌수 있는데 유의파고(H_s)와 유의파주기(T_p) 관계에 따라 Pierson-Moskowitz와 Jonswap 스펙트럼으로 분류할 수 있다⁽⁶⁾.

- Pierson-Moskowitz 스펙트럼

$$S_{PM}(f) = 0.3125 \cdot H_s^2 \cdot f_p^4 \cdot f^{-5} \cdot \exp\left(-1.25\left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right)$$

where

H_s : Significant wave height(m)

f_p : Peak frequency($= \frac{1}{T_p}$) (Hz)

f : Frequency(Hz) (1)

- Jonswap 스펙트럼

$$S_{JS}(f) = 0.3125 H_s^2 T_p \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-5} \exp\left(-1.25\left(\frac{f_p}{f}\right)^{-4}\right) \left(1 - 0.287 \ln \gamma\right) \exp\left(-0.5\left(\frac{f/f_p - 1}{\sigma}\right)^2\right)$$

where

$\sigma = 0.07$ for $f \leq f_p$

$\sigma = 0.09$ for $f > f_p$

γ : peak shape parameter

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \text{for } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) & \text{for } 3.6 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \\ 1 & \text{for } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \geq 5 \end{cases} \quad (2)$$

파도하중은 풍하중과 달리 해상풍력발전기의 설치 지역의 실제 환경 자료를 받아 하중조건을 설정하여야 한다. 본 연구에서는 국내의 설치 예정 후보지인 전라도의 신안군 앞바다의 통계자료를 사용하여 파도 하중 조건을 설정하였다.

- 위치 : 신안군 해안에서 15km 거리
- 수심 : 20m
- 기타 : 해상 국립 공원 지역 제외

해양연구원의 통계자료와 IEC 기준의 따라 다양한 파도 상태를 Table 8와 같이 정의하였다.

4.1.4 해석 수행 체계도

해상풍력발전기 기본적 시스템 사양의 입력과 IEC 기준에 따른 풍 하중 및 해상 하중의 설정이 완료되면 극한하중 해석을 진행한다. 수행 체계도는 Fig. 5와 같다.

4.2 극한 하중 해석 결과

IEC 표준에 명시되어 있는 조건을 설정하여 극한 하중 해

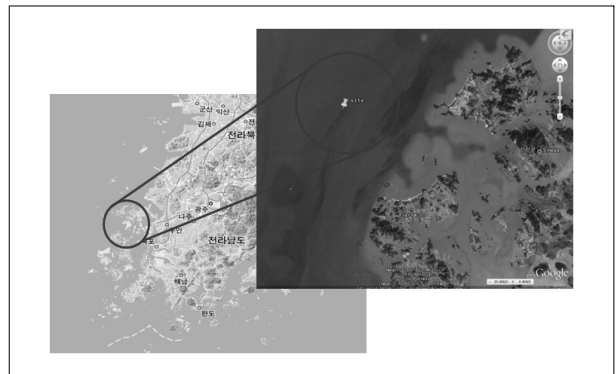


Fig. 4 Specific ocean site

Table 8. Different sea states

Sea state	H_s (m)	T_p (s)
Normal Sea State (NSS)	1,5	6,5
Severe Sea State (SSS)	6,5	7,9
Severe Wave Height (SWH)	12,0	15,2
Extreme Sea State (ESS)	6,7	8,13
Extreme Wave Height (EWH)	9,3	10,47
Reduced Wave Height (RWH)	7,5	10,47

석을 수행하였다. 정상정지, 긴급정지 상태는 피치 조절각의 명확한 기준이 없기 때문에 해석에서 제외하였다.

하중 해석 결과 타워 높이에 관계없이 지배적인 하중이 존재하였으며, DLC 6.x 정지 상태(Parked)일 때 극한 하중이 주로 나타나는 경향을 보였다. 이는 50년 재현 주기의 바람과 파도 하중 등이 가정되는 조건이기 때문에 나오는 결과이다.

각각 타워의 위치에서 Von-Mises 이론을 사용하여 강도 (Stress) 계산이 가능하다(Table 10).

- 등가 응력(Equivalent stress, σ_v)

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{bx}^2 + \sigma_{by}^2} + \sigma_c$$

$$\tau = \sqrt{\tau_{sx}^2 + \tau_{sy}^2} + \tau_t$$

$$\therefore \sigma_v = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

where

σ_c : compressive stress

σ_b : bending stress

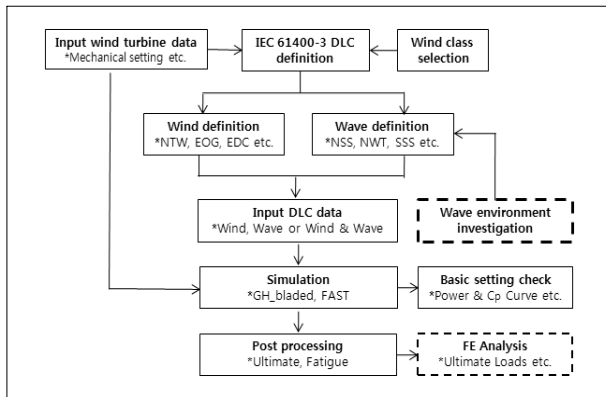


Fig. 5 Analysis procedures

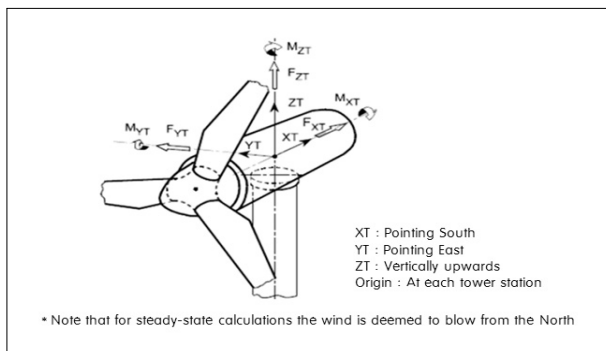


Fig. 6 Tower coordinate system

τ_s : shear stress

τ_t : torsional stress

(3)

등가 응력을 계산해본 결과 모노파일 기초의 최하단 부분, 해저면 위치에서 가장 큰 응력이 작용하는 것을 볼 수 있다. 하지만 NREL reference 모델에서는 타워 재료에 대한 응력 한계 기준이 없기 때문에 강도에 대한 정성적인 평가가 불가능 하였다.

한편, IEC 극한 하중 해석 기준은 각각의 상황조건이 개별적이며 특수한 상황들을 가정하기 때문에 파도 하중만의 영향을 보기에는 어려움이 있다. 따라서 다음 절에서는 외부 조건을 일치 시키고 파도 하중만을 변동시켜 해석해보았다.

5. 파도 하중 영향 평가

이번 절에서는 파도의 존재 유무에 따른 하중의 차이와 파도 종류에 따라 달라지는 하중의 영향을 평가하였다.

5.1 하중 조건

Table 8에서 설정하였던 해상 하중 조건을 사용하였다. 각 파도 상태의 최대·최소 파고 높이는 Table 11과 같다. 파도 하중의 영향을 집중적으로 보기위해 풍 하중 조건은 정격풍속인 11.4m/s로 동일하게 설정했다.

Table 9. Ultimate load results

height (m)	DLC	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]	Mx [kNm]	My [kNm]	Mz [kNm]
-20	6,2	-109	2500	-8525	-244510	16861	-11593
0	6,2	-71	2430	-6637	-193943	18796	-11629
10	6,2	-51	2395	-5693	-168650	19863	-11662
87,6	6,1	112	1203	-2682	411	73324	-5168

Table 10. Stress calculation

height (m)	σ (kpa)	τ (kpa)	σ_v (kpa)
-20	156492,8	948,8184	156501,5
0	124289,2	810,4567	124297,1
10	108238,1	737,0326	108245,7
87,6	46936,31	588,5163	46947,38

Table 11. Wave elevation : different sea states

Sea state	Hs (m)	Tp (s)	γ	Min (m)	Max (m)	Std.
NSS	1.5	6.5	1 (PM)	-1.3	1.1	0.4
SSS	6.5	7.9	5 (JS)	-4.8	4.7	1.6
SWH	12.0	15.2	2 (JS)	-9.3	10.9	3.2
ESS	6.7	8.1	5 (JS)	-4.9	4.9	1.6
EWH	9.3	10.5	5 (JS)	-6.9	7.5	2.3
RWH	7.5	10.5	3.9 (JS)	-5.7	6.2	1.8

* 11.4 m/s, Normal wind profile

5.2 해석 결과

파도 종류에 따라 상이한 하중결과를 보였는데 SWH(Severe wave height)에서 급격한 하중을 상승을 보였다. 전반적으로 유의파고 Hs가 커질수록 하중이 커지는 경향을 보였으며, 유의파주기 Tp에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(Fig. 7).

한편, 수심이 깊어질수록 급격한 하중의 상승을 보여주는 데, 타워 상단 부에서 타워 10m 위치까지 거의 일정한 값을 보여주지만, 10m 위치에서부터 해저 면으로 내려 갈수록 급격하게 하중이 증가한다(Fig. 8).

6. 결론

본 논문에서는 IEC 기준에 따라 해상 풍력발전 시스템의 대한 정량적 하중 평가를 수행하였으며, 해석 체계에 대하여 연구하였다.

(1) 해상 풍력발전기 하중 해석에서는 파도 환경 조건의 설정이 추가적으로 이뤄지게 된다. IEC 표준에 의거하여 각종 불규칙파의 파도 종류를 구분해본 결과 해상에서는 다양한 파도 상태가 존재하며 상세한 구분이 필요하다. 파도 하중 조건은 일반적인 기준이 없으며, 설치 해양지역의 실측 통계 자료를 통해 설정되는데 파도 상태의 구분은 해상풍력발전기의 인증 해석에 있어 중요한 과정이다. 설치 예상 후보지 설정, 기초 선행 조사 및 통계자료의 수집, 파도 상태의 분류, 하중조건 적용 순으로 인증이 진행되고, 또한 해상풍력 시스템 기초부의 설계 최적화를 위해서는 각 과정의 정교한 설정과 분석이 필수적이다.

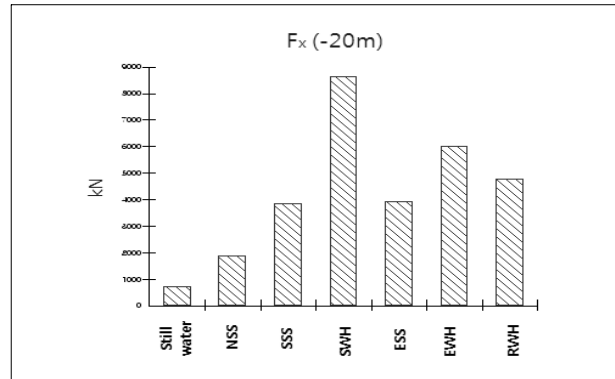


Fig. 7 Wave load effects : different sea states

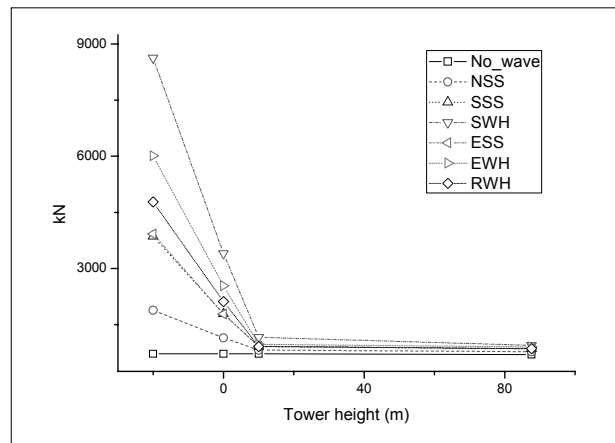


Fig. 8 Wave effects on different tower sections : Fx

(2) 파도 하중 영향 평가에서는 파도하중이 모노파일 기초와 타워의 접합부 이상의 위치에서는 거의 영향을 미치지 않는 모습을 보였다. 하지만 접합부 아래의 위치 즉, 파도가 직접적으로 부딪히는 기초부에서는 하중의 급격한 상승을 보였다. 이러한 결과는 해상풍력발전기의 경우 육상풍력발전기와 달리 해상 조건에 대한 선행조사와 해석이 필수적인 과정이며, 기초부는 해상풍력시스템의 안정성에 있어 가장 중요한 부분이라는 것을 말해준다.

후 기

본 연구는 풍력특성화대학원 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

[1] B. W. Byrne, G. T. Houlby, 2003, "Foundation for offshore wind turbine", University of Oxford
 [2] P. Passon and M. Kuhn, S. Butterfield, J. Jonkman etc., 2007, "OC3-Benchmark Exercise of Aero-Elastic Offshore Wind Turbine Code"s, NREL
 [3] 홍혁수, 박진일, 방조혁, 류지윤, 김두훈, 2006, "2MW급 풍

력발전기 타워 쉘 두께 설계 연구", 한국 신재생에너지학회 2006년도 추계학술대회
 [4] IEC, 2009, IEC 61400-3 edition3, Wind turbine - Part 3 : Design requirements for offshore wind turbines
 [5] Diana Greenslade, 2010, "Surface wave", The Centre for Australian Weather and Climate Research
 [6] Det Norske Veritas, 2007, Offshore standard DNV-OS-J101, pp. 29-36, DNV.

권대용



2009년 성균관대학교 기계공학과 공학사

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

박현철



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

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

정진화



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)



2008년 전북대학교 항공우주공학과 공학사

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

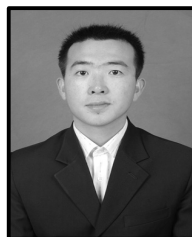
이승민



2009년 영남대학교 기계공학과 공학사

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

Shi Wei



2006년 Yanbian대학교 기계공학과 공학사

현재 포항공과대학교 기계공학과 석박통합과정
 (E-mail : shw@postech.ac.kr)