



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](#)

碩士學位論文

해양수서생물이 해상풍력  
발전시스템의 기초구조에 미치는  
영향 및 억제방안에 관한 연구



濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

洪 義 鎔

2015 年 2月

# 해양수서생물이 해상풍력 발전시스템의 기초구조에 미치는 영향 및 억제방안에 관한 연구

指導教授 金 相 宰

洪 義 鎔

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



洪仁哲의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 최종현  
委 員 고경남  
委 員 김성계

濟州大學校 大學院

2014 年 12-月

Marine Growth effect on offshore wind turbine  
support structure and  
the protection method

Eui-Yong, Hong  
(Supervised by professor Sang-Jae, Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the  
degree of Master of Science

2014. 12.

This thesis has been examined and approved.



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

홍이영 감독



Thesis director, Jong-Chul Huh, Prof. of Mechanical Engineering

Kyungnam Ko



Thesis director, Kyung-Nam Ko, Prof. of Faculty of Wind Energy Engineering

Sangjae, Kim



Thesis director, Sang-Jae, Kim Prof. of Mechatronics Engineering

.....  
Date

Multidisciplinart Graduate School Program for Wind Energy

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

List of Figures

List of Tables

Abstract

I. 서론 .....	1
1.1 연구배경 및 목적 .....	1
1.2 연구내용 .....	3
(1) Jacket 구조 설계 .....	4
(2) Jacket 구조의 특성 .....	6
II. 연구 배경 이론 .....	9
2.1 Marine Growth(해양수서생물) .....	9
(1) 해양수서생물의 형태 .....	9
(2) 해양수서생물의 분포 .....	11
2.2 파랑 하중 .....	11
(1) 파랑 하중 이론 .....	11
(2) 파랑 이론 .....	13
2.3 Marine Growth의 동유체(Hydrodynamics)하중 영향 .....	14
(1) 강 부재 지름 및 체적 변위의 변화 .....	15
(2) 항력 및 관성계수의 변화 .....	15
(3) 질량 증가 .....	17
III. 해석 수행 모델 및 하중 조건 설정 .....	19

3.1 해석 수행 풍력 발전기 모델 .....	19
3.2 설계 풍속 .....	20
3.3 설계파랑 .....	20
(1) 설계파고 및 주기 .....	20
(2) 파랑이론의 선정 .....	21
3.4 Marine Growth 두께 선정 .....	21
3.5 항력 및 관성(Drag & Inertia) 계수 .....	22
<b>IV. 하중 분석 결과 및 고찰 .....</b>	<b>24</b>
4.1 고유진동수의 변화 .....	24
4.2 Marine Growth의 Section별[T.P,X-Brace(M.S.L),Mud leg] 영향 .....	26
4.3 타워 아이젠 모드(Eigen mode)에 미치는 Marine Growth 영향 .....	30
4.4 DLC.1.1 Power Production .....	34
4.5 Marine Growth의 두께 영향 .....	36
4.6 Marine Growth 성장 억제 방안 .....	38
<b>V. 결론 .....</b>	<b>43</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>45</b>

## List of Figures

Fig. 1 Advantages and disadvantages of Offshore Wind Turbine .....	1
Fig. 2 Types of the support structure of offshore wind turbine .....	2
Fig. 3 Types of Jacket Foundation : (A)Hochtief Solution (B)ATKINS/BiFab Jacket .....	2
Fig. 4 Marine biofouling on steel members(Jacket) .....	3
Fig. 5 Design of wind turbine using GH Bladed ver4.2 .....	4
Fig. 6 Characteristics input window of the GH Bladed .....	5
Fig. 7 Node properties input window of the GH bladed .....	5
Fig. 8 Member properties input window of the GH bladed .....	6
Fig. 9 Design of Member1 [Member 1 end1(Node1) & Member 1 end2(Node2)]	6
Fig. 10 Support structure of the Jacket .....	7
Fig. 11 Growth process on the tubular steel member .....	9
Fig. 12 Soft & Hard marine growth .....	10
Fig. 13 Growth of Barnacles (up to 80mm) .....	10
Fig. 14 Cross-section of tubular member with marine growth .....	11
Fig. 15 Relative importance of inertia, drag and diffraction wave force .....	12
Fig. 16 Diagram of regular wave theory selection .....	14
Fig. 17 Effects of surface roughness on $C_d$ .....	16
Fig. 18 Distributions of displaced mass and hydrodynamics added mass .....	18
Fig. 19 General characteristics of rotor and turbine .....	19
Fig. 20 Marine growth distribution profile in central and northern part of North Sea .....	22
Fig. 21 Eigen mode of tower .....	25
Fig. 22 Natural frequencies of support structures with different M.G.T graph ..	26
Fig. 23 Sections of jacket .....	26
Fig. 24 Graphical analysis of marine growth effect at T.P Leg .....	27

Fig. 25 Graphical analysis of marine growth effect at M.S.L (X-brace) .....	28
Fig. 26 Graphical analysis of marine growth effect at mud leg .....	29
Fig. 27 Location and coordination of members .....	30
Fig. 28 Graphical analysis of Effect on Mbr.1 loads when increasing M.G.T .....	31
Fig. 29 Graphical analysis of Effect on Mbr.5 loads when increasing M.G.T .....	32
Fig. 30 Graphical analysis of Effect on Mbr.9 loads when increasing M.G.T .....	33
Fig. 31 Graphical analysis of Effect on Mbr.13 loads when increasing M.G.T .....	34
Fig. 32 Graphical analysis of Marine growth effects in various wind conditions	35
Fig. 33 Graphical analysis of effects on loads in various M.G.T .....	38
Fig. 34 The adverse effects of TBT on shell formation in the oyster .....	39
Fig. 35 FE-SEM micrographs of ZnO nanoparticles .....	40
Fig. 36 X-ray diffraction pattern of ZnO nanopaint coatings on glass substrate	41
Fig. 37 Photograph of bare and ZnO nano paint coated substrates (Before and after 30days in Sea) .....	42





## List of Tables

Table 1 members properties of designed jacket structure .....	7
Table 2 Selection of wind velocity .....	20
Table 3 Selection of wave condition .....	21
Table 4 Selection of wave theory .....	21
Table 5 Properties of marine growth .....	22
Table 6 Selection of $C_d$ and $C_m$ .....	23
Table 7 Numerical values of natural frequencies of support structures with different M.G.T .....	25
Table 8 Numerical values Marine Growth Effect at T.P Leg .....	27
Table 9 Numerical values Marine Growth Effect at M.S.L(X-brace) .....	28
Table 10 Numerical values Marine growth effect at mud leg .....	29
Table 11 Numerical values Effect on Mbr.1 Loads when increasing M.G.T .....	31
Table 12 Numerical values Effect on Mbr.5 loads when increasing M.G.T .....	32
Table 13 Numerical values Effect on Mbr.9 loads when increasing M.G.T .....	33
Table 14 Numerical values Effect on Mbr.13 loads when increasing M.G.T .....	34
Table 15 Numerical values Marine growth effects in various wind conditions ..	35
Table 16 Numerical values Effects on loads in various M.G.T .....	37

## Abstract

In general offshore industry, different foundation types (monopile, jacket, tripod, floating) can be used for offshore wind turbine to support this structure in different sea conditions. Recently, the most wind turbines using monopile or gravity as a foundations, but it can work under less water depths. To overcome that problems, nowadays choosing a jacket type foundation as a good choice for the intermediate water depth in 20~50 m. The marine growth formation is one of the major obstacle in off-shore industry because of reducing the life time and efficiency. Further more investigation is required to solve this issue.

In this view, this work aimed to investigate the effect of marine growth on jacket foundation in off-shore wind turbine. For calculating hydrodynamic load, a jacket foundation was designed using GH Bladed ver 4.2. The effect of marine growth thickness on the natural frequency of off-shore wind turbine was investigated using Eigen mode. The results showed that the natural frequency of off-shore wind turbine reduced due to increasing the marine growth thickness. Further, also the marine growth effect on different section of jacket foundation was analyzed. Compared to TP leg and X-brace (M.S.L), the mud leg showed higher amount marine growth formation. Based on that results, the bending moment and shear force of jacket foundation at mud leg was analyzed. It is concluded that marine growth highly affect the bending moment (side to side mode) and the axial force.

Finally, ZnO nanopaint was developed using ball milling for the prevention of marine growth. The growth of marine organism on bare and ZnO nanopaint coatings are examined. The experimental results confirmed that ZnO nanopaint coatings prevented the growth of marine organism. This work showed that the ZnO nanopaint can be used as a marine growth inhibitor for off-shore wind turbine applications.

# I. 서론

## 1.1 연구배경 및 목적

최근 환경 오염 및 에너지 고갈 문제로 인하여 신재생 에너지를 이용한 에너지 개발에 관한 많은 연구가 진행 되고 있으며, 이 중에서 특히 상대적으로 육상풍력에 비해 저 난류강도를 가져, 에너지 밀도가 높아 더 좋은 바람의 질을 가지고 있는 해상 풍력 발전에 관한 관심이 많이 증가하고 있는 추세이다. 또한 민가가 없어 소음 및 저주파 등으로 발생할 수 있는 민원발생의 가능성이 적다 (as shown in Fig. 1) [1]. 그리고 육상 운송 시 최고 적재용량인 43.2톤의 제한이 없어 5MW 이상급 대형 해상풍력터빈을 설치할 수 있는 이점이 있다.



Fig. 1 Advantages and disadvantages of offshore wind turbine[1]

해상 풍력 발전 단지는 1990년 이후, 여러 국가에서 운영되어졌으며, 지반 및 수심등 다양한 해양환경에 따라 적합한 Monopile, Tripod, Jacket 및 Floating 형태의 다양한 기초구조물을 선정하여 많은 연구가 진행되어지고 있다.[2]

과거 전세계적으로 대부분의 해상 풍력발전기의 기초구조물은 Monopile로 사용하였으나, 우리나라와 같이 깊은 수심을 가지고 있는 해양환경 조건에서는 매우

제한적일 수 밖에 없다. 또한 Floating 형식의 기초구조는 현재 가장 각광 받고 있으며 많은 연구가 진행되고 있으나 깊은 수심, 즉 -60m 이상의 수심에서는 큰 경제성을 가질 수 없어 심해 해상풍력발전기의 기초구조형식으로 연구가 진행되고 있다. Jacket형식의 경우 수심에 제한되지 않으며 5MW 이상의 해상풍력발전기를 지지할 수 있어 오늘 날 해상풍력발전단지의 기초구조물로서 가장 각광받고 있다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 해양 산업에서의 기초구조물에 관한 연구에 따르면 수심 25~50m의 구간에서는 Jacket 구조의 형태가 가장 추천되어진다.[2]

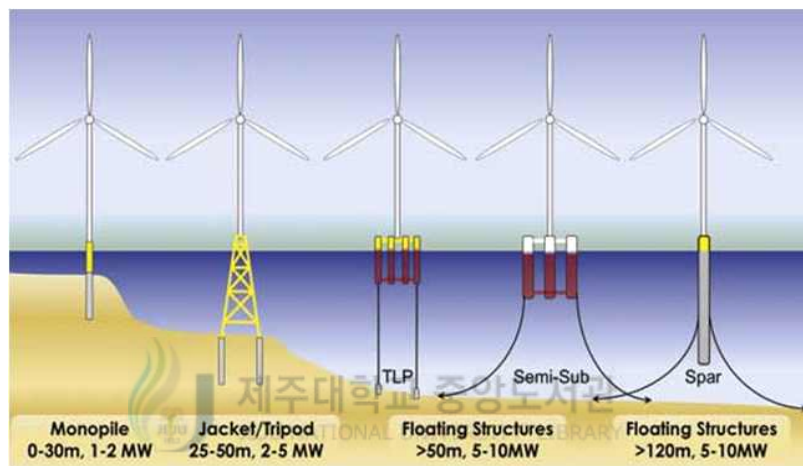


Fig. 2 Different types of support structures used in offshore wind turbine[2]

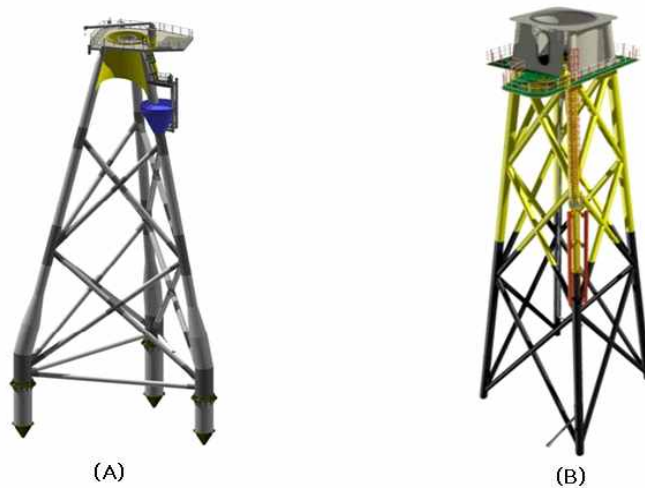


Fig . 3 Types of Jacket foundation:(A)Hochtief solution  
(B)ATKINS/BiFab.[3]

Fig. 3은 Jacket 구조의 2가지 형태를 보여주며 첫 번째로 Hochtief Solution은 EnBW Baltic Project에서 처음 개발되어졌으며 23 ~ 44m의 수심을 토대로 설계되어졌다 [3]. 하지만 구조물의 특성상 해상풍력의 큰 장점 중 하나인 5MW급 이상의 해상풍력발전기의 기초구조로는 큰 무리가 있어 ATKINS/BiFab Jacket 형식이 개발되게 되어졌으며 가장 큰 차이점은 Hochtief Solution의 경우 3개의 Leg가 지탱하고 있는 형식이었던 반면 ATKINS/BiFab Jacket 형식의 경우 4개의 Leg를 가져 상대적으로 적은 하중의 영향을 받아 5MW급 이상의 대형 풍력발전기를 지지할 수 있다.[3],[4] 본 연구에서의 수심은 45m로 설정하였으며 5MW의 해상풍력발전기 모델을 선정하였으므로 ATKINS/BiFab Jacket 형식을 선정하였다.



Fig. 4 Marine biofouling on surface of steel members(Jacket)[5]

Jacket 구조는 일반적으로 수십개의 강 부재 (Steel Member)들의 횡단면 집합으로 구성되어진 구조이며 이러한 강 부재들에 해양수서생물이 성장하게 되었을 경우 Fig. 4에서 보여주듯이 기초구조물의 표면거칠기 및 질량을 상당히 증가시킬 수 있게 되어 동유체하중(Hydrodynamics Loads)을 증가시킬 수 있게 된다 [5][6]. 이는 기초구조물의 경제성 및 수명에 악영향을 끼칠 수 있는 중요한 요인 중의 하나로서 본 실험에서는 Marine Growth가 각 Section, Mode, 풍속 및 두께에 따라 하부구조물에 어떠한 하중의 변화를 가져오는지 연구하였다.

## 1.2 연구내용

앞서 언급했듯이, 해양수서생물이 Jacket 형식의 강(Steel)부재들의 횡단면 접합으로 구성되어진 기초구조물에 성장하게 되었을 경우 가장 크게 영향을 끼칠 수 있는 부분은 질량 및 표면거칠기의 증가로 인한 동유체하중의 증가이다.[6] 이에 따라 Marine Growth 영향에 관한 연구를 수행하기 위하여 GH Bladed ver 4.2를 이용하여 Jacket 형식의 기초를 설계하게 되었으며 설계 Code는 OC4 (Offshore Code Comparison Collaboration continuation)을 참조하여 설계하였다. 본 Jacket 구조는 총 87개의 노드 및 140개의 멤버로 설계되어졌다.[7],[8]



Fig. 5 Design of wind turbine using GH Bladed ver4.2

Fig. 5는 GH Bladed로 설계된 전체 해상풍력발전시스템을 보여주고 있으며, 타워 및 RNA특성은 Garrad Hassan에서 기본적으로 제공하는 5MW 풍력발전기의 제원을 사용하였다.

#### (1) Jacket 구조 설계

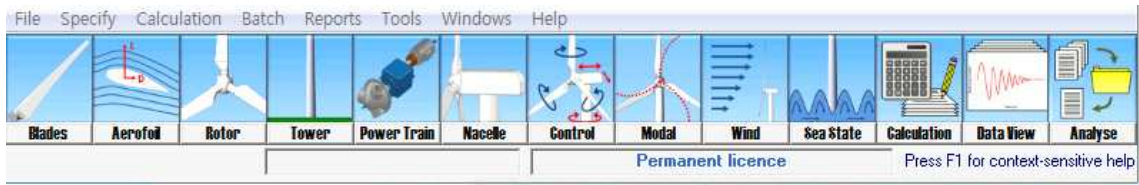


Fig. 6 Characteristics input window of the GH Bladed

Fig. 6은 GH Bladed 실행시 가장 먼저 볼 수 있는 풍력발전기 설계를 위한 제원 입력 창이다. 본 연구에서의 RNA 및 Tower의 특성 및 제원은 GH에서 제공하는 5MW 해상 풍력 발전기를 참조하였으며 이번 절에서는 Tower 및 Jacket 구조의 설계에 관하여 설명한다.

Support Structure						
Node	Height (m)	Local x (m)	Local y (m)	Point mass (kg)	Foundation	
1	-45.5	6	6	0	Rigid	
2	-45	6	6	0		
3	-44.001	5.967	5.967	0		
4	-43.127	5.939	5.939	0		
5	-24.614	5.333	5.333	0		
6	-45.5	-6	6	0	Rigid	
7	-45	-6	6	0		

Fig. 7 Node properties input window of the GH bladed

Fig. 7은 해상풍력발전기의 Tower 및 Jacket구조 설계를 위한 노드(Node) 설계 창이다. 노드는 각 멤버들의 위치를 설정해주는 역할을 하며 본 연구에서는 Jacket 구조의 Pile(-98m)에서 Hub(80m)까지 총 87개의 노드가 설정되었다. 총 87개의 노드를 각 노드별로 수심(height) 및 X, Y 좌표를 OC4 Project Code를 바탕으로 설계하였으며 노드의 가장 하단 부분은 Fig. 7 에 표시되지는 않았지만 Pile의 끝 구간인 -98m까지 노드를 설정하여 주었고 평균수심에서 머드라인까지의 수심은 -45m이다. 또한 -45.5m ~ -50m 구간을 그라우트(Grout)구간으로 설정하였으며, 설계된Jacket은 87개의 노드로서 총 140개의 멤버들의 횡단면 집합으로 설계하였다.

Fig. 8은 GH Bladed Tower 설계 부재특성 입력창이다. 멤버는 노드 설정값으로 설계되는 강 부재(Tubular steel member)를 뜻하며, 멤버에는 각 2개의 노드

를 설정하여 “멤버 1 end 1 (Node 1)” 및 “멤버 1 end 2 (Node 2)” 두 개의 끝을 연결하여 하나의 멤버1으로 설계되어진다.

Member	Node	Diameter m	Wall thickness mm	Material	Flooded?	Marine growth thickness, mm	Mass/unit length kg/m	Bending Stiffness Nm <sup>2</sup>	Torsional stiffness Nm <sup>2</sup>	Polar inertia kg.m	Axial-Stiffness N	Sealed?
1(End 1)	1	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
1(End 2)	2	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
2(End 1)	2	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
2(End 2)	3	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
3(End 1)	3	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
3(End 2)	4	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
4(End 1)	4	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
4(End 2)	5	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
5(End 1)	6	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
5(End 2)	7	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
6(End 1)	7	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes
6(End 2)	8	1.2	20	Steel A	No	50	582.01	2.711E+09	2.091E+10	202.656	1.557E+10	Yes

Fig. 8 Member properties input window of the GH bladed

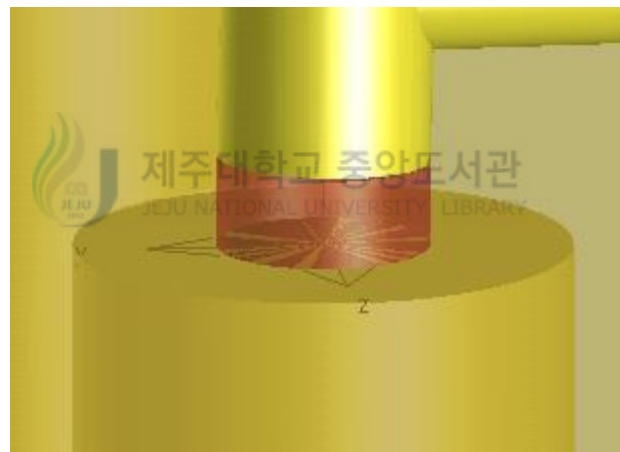


Fig. 9 Design of Member1 [Member 1 end1 (Node1) & Member 1 end2(Node2)]

Fig. 9는 “멤버 1 end1(Node1)” 및 “멤버 1 end2(Node2)” 를 연결시켜 설계된 1번 멤버를 보여주고 있다. 타워의 각 멤버는 Garrad Hassan에서 가상 (fictitious)버전으로 제공하는 트라이포드 기초구조를 가지는 5MW 발전기의 타워특성을 참조하여 설계하였다.

## (2) Jacket 구조의 특성



우선 X 및 Mud 받침목(Brace)은 Fig. 10의 회색구간으로 나타내었으며, 이 구간의 외경은 0.8m 이며 벽두께는 20mm 의 특성을 가지고 있다. 최저 해저면에서의 Leg는 외경 1.2m 및 벽두께는 50mm 설정하였으며, 2단계 ~ 4단계 Leg의 외경 및 두께는 1.2m, 35mm로 설정하여 설계하였다.

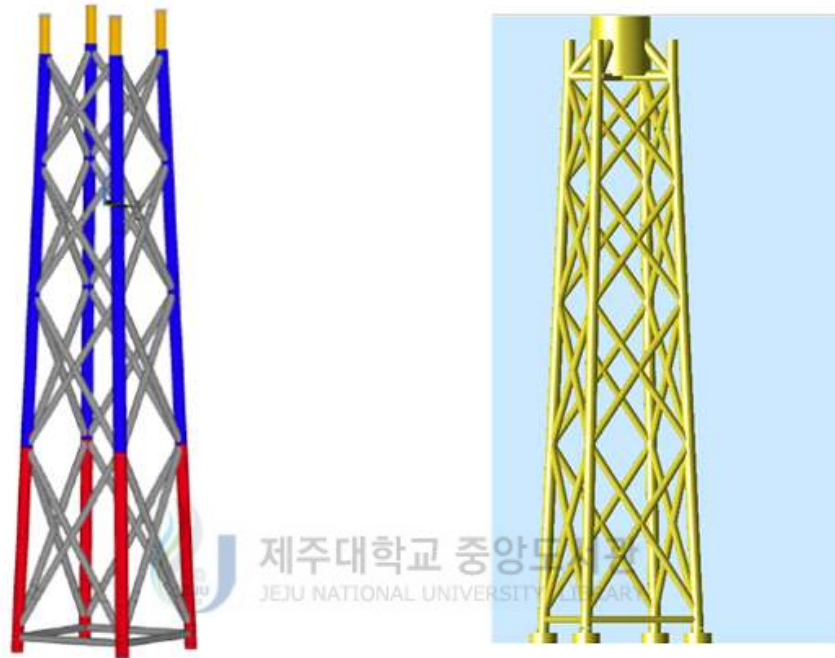


Fig. 10 Support structure of the Jacket

Table 1 Members properties of designed jacket structure

	섹션	색상	외경	벽두께
1	X & 머드 받침목	회색	0.8m	20mm
2	최저해저면 leg	빨강	1.2m	50mm
3	2~4단계 leg	파랑	1.2m	35mm
4	연결요소 leg	오렌지	1.2m	40mm

본 연구는 (주)한국남부발전에서 제공받은 해상풍력 해상기상탑 구매:기본 및 실시설계 종합보고서의 기상탑 설계과정에서 조사된 해상환경 및 풍속을 적용시켜 실험을 수행하였다.[9] 각 섹션에 따른 Marine Growth의 영향을 분석 하였고 가장 큰 Marine growth의 영향이 미치고 있는 섹션에서의 타워모드에 따른 하

중의 변화 및 DLC(Design Load Case) 1.1을 적용시켜 3.5m/s, 12.3m/s, 25m/s에 따른 Marine Growth 영향을 연구하였으며 두께에 따른 영향을 분석하였다. 마지막으로 최근 Marine Growth 및 부식 방지를 위해 사용되고 있지만 해상환경에 치명적인 영향을 끼치는 TBT의 대안이 될 수 있는 ZnO Nanopaint를 제작하여 실험하였다.



## II. 연구 배경 이론

### 2.1 Marine Growth(해양수서생물)

#### (1) 해양 수서 생물의 형태

해양산업에서 다양한 기초구조물들의 부재에는 해양 생태계에서 서식하는 해양 미생물(Marine organism)들이 서식하고 있다. 각 지역의 해양환경에 따라 다양한 종류의 해양미생물들이 강 부재를 서식지로 삼아 성장 하게 되는데 이를 Marine growth라 칭한다. Fig. 11은 Marine Growth가 강 부재에서 성장하는 과정을 보여준다.[10] 강 부재(Steel member)가 해상에 설치된 후, 1분~ 1시간 내에 물의 산소( $O_2$ )가 강관에 들어오게 되며 강이 가지고 있는 철( $Fe^{2+}$ )성분이 빠져나가게 된다. 이에 따라 해양생태계의 다양한 해양미생물들이 모여들게 되며 서서히 성장해 나가게 된다. 약 1년정도 빠른 속도로 성장해나가게 되며 1년이 지나면 강부재의 산소부족현상으로 인하여 더 이상 성장하지 않게 된다.

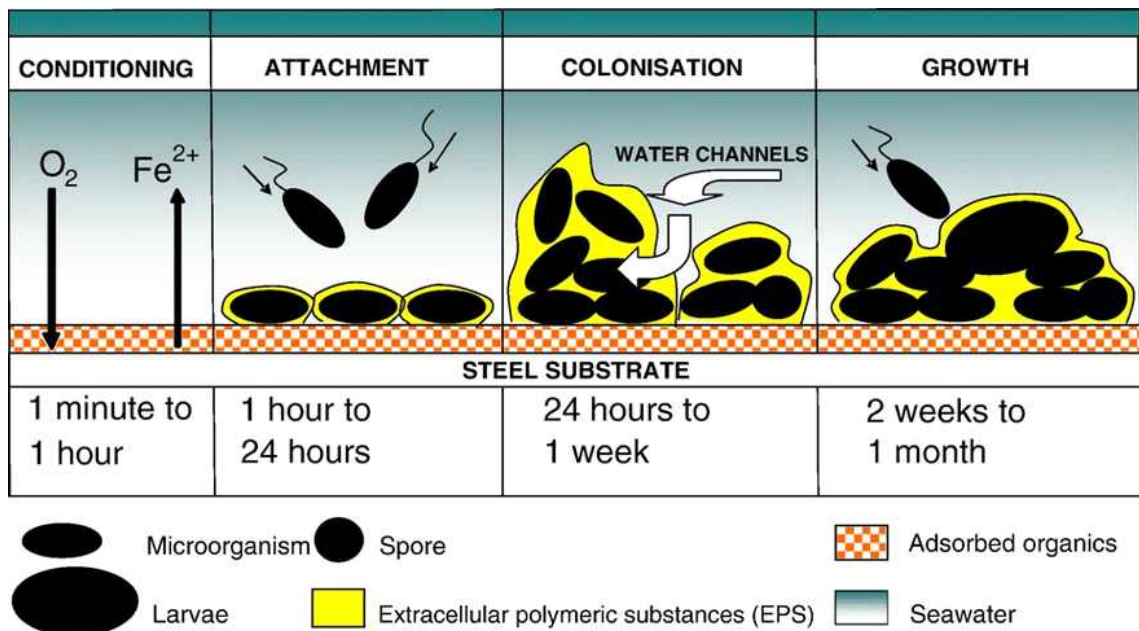


Fig. 11 Growth process on the tubular steel member[10]

Marine Growth는 크게 "Hard Growth" 및 "Soft Growth" 두가지의 형태로 나뉘어 지게 되며 Hard Growth의 두께는 Soft Growth에 비해 크지 않지만 표면 거칠기를 상대적으로 더 많이 증가시키며 반면에 Soft Growth는 두께가 두껍고 표면거칠기는 상대적으로 적게 증가하게 된다. Hard Growth의 대표적인 예로서는 Oysters, Barnacles, Mussle 등이 있으며, Soft Growth는 Seaweeds, Anemone, hydroids 등이 있다.[11],[12] Fig. 12는 Hard Growth 및 Soft Growth의 대표적인 예들의 성장된 모습을 그림으로 보여주며[13] Fig. 13은 실제 바다에서 촬영된 Marine growth의 형태를 보여주고 있다 [14].

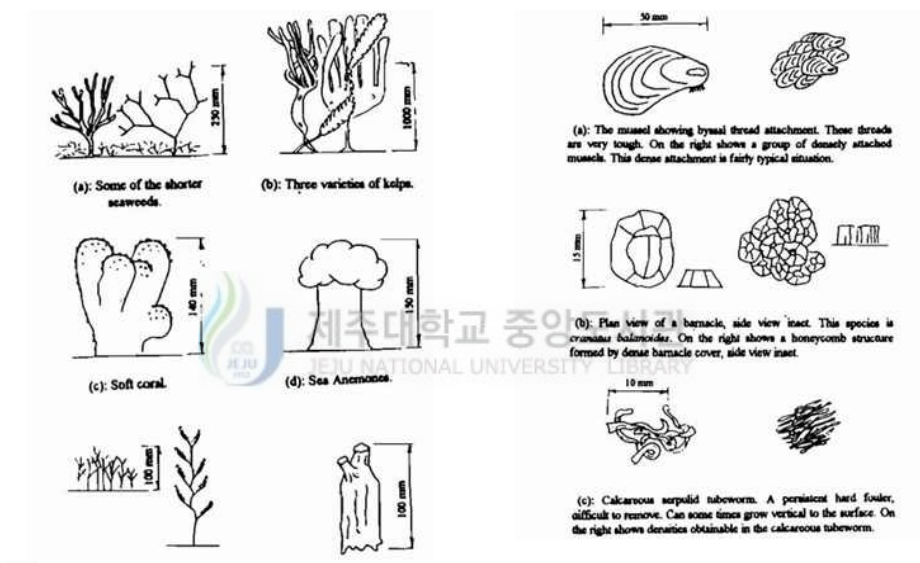


Fig. 12 Soft & hard marine growth[13]



Fig. 13 Growth of barnacles (up to 80 mm)[14]

(2) 해양 수서 생물의 분포

수심에 따라 서식하는 플랑크톤, 빛 그리고 미생물들의 종류가 다양하기 때문에 수심에 따라 각기 다른 종류의 Marine Growth가 성장하게 된다. 이는 수심에 따라 다른 두께의 Marine Growth가 성장함을 나타내며, 이렇듯 Marine Growth가 성장하게 되었을 경우 Jacket구조의 부재의 외경 역시 변하게 된다. [15]

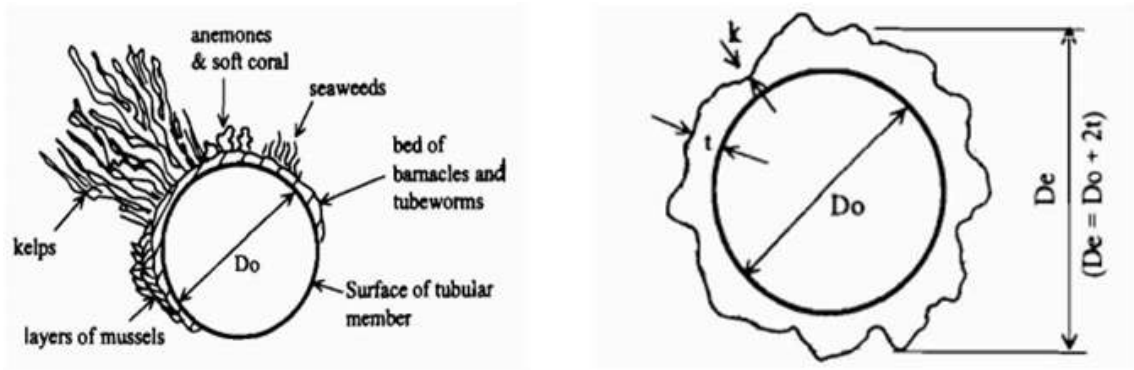


Fig. 14 Cross-section of tubular member with marine growth[15]

Fig. 14는 Marine growth가 어떠한 형태로 강 부재에 부착되어지는지를 그림으로 보여주며, Marine growth를 포함하는 강 부재의 유효지름을 나타내어준다.[15] Marine Growth가 성장하였을 때 강부재의 유효지름은 Eqn.(1)로 계산할 수 있다.

$$D_e = D_o + 2t \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $t$  = Marine growth 평균 두께

2.2 파랑 하중

(1) 파랑하중이론

일반적으로 Jacket구조 및 여러 형태의 해상 기초구조물에 가장 큰 영향을 미칠

수 있는 부분은 파랑(Wave)의 영향으로 인한 동유체하중(Hydrodynamic loads)의 변화이다. 동유체하중의 분석을 위한 적용식은 해상환경의 파장 및 기초구조의 강 부재의 지름에 따라 선정되어진다. Fig. 15 및 Eqn (2),(3)은 “회절 이론(Diffraction theory)” 또는 “모리슨 식”의 선정을 위한 그래프 및 식을 나타내며, 파장과 지름의 비가 ~5 이하의 경우 기초구조 부재의 큰 지름으로 인하여 파랑 회절(Wave Diffraction)이 생기게 되어 모리슨식을 적용시킬 수 없다. 본 연구에서 설계된 Jacket 구조와 같은 작은 지름을 가지는 강 부재들로 이루어진 지지구조물의 경우 모리슨식을 적용시킨다.

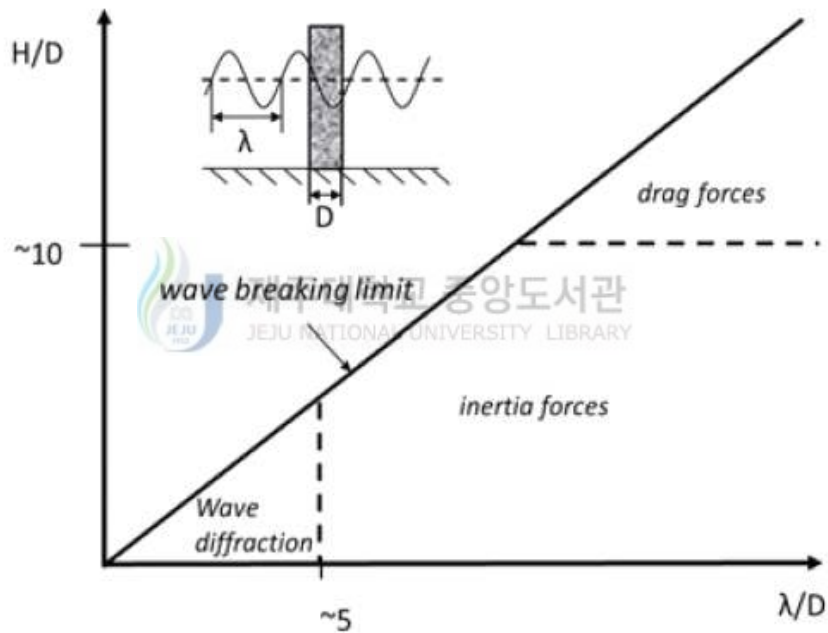


Fig. 15 Relative importance of inertia, drag and diffraction wave force[15]

$$D < 0.2L \quad \rightarrow \quad \text{모리슨 식} \dots\dots\dots (2)$$

$$D \geq 0.2L \quad \rightarrow \quad \text{회절 이론} \dots\dots\dots (3)$$

여기서,  $D =$  부재 지름  $L =$  파장

$$F = F_D + F_I \dots\dots\dots (4)$$

*Drag + Iertia*

$$F = \frac{1}{2}\rho C_D U |U| + \frac{1}{4}\rho C_m \pi D_e^2 \dot{U} \dots\dots\dots (5)$$

여기서,  $\rho$ =물의 밀도,  $C_D$  =항력계수,  $C_m$ =관성계수,  $D_e$ =강부재의 유효지름 (Marine growth 두께포함),  $U$ =물입자속도 및  $\dot{U}$ =물입자가속도

윗 Eqn. (4), (5)은 모리슨 식은 항력과 관성력의 합으로서 나타내어지며, Eqn. (5)에서처럼 Marine growth의 성장이 표면거칠기 및 외경에 영향을 미침으로 인해 파랑하중을 증폭 시킬 수 있다.

## (2) 파랑이론

해양에서 파랑을 일으키는 요인은 조석차, 지진, 태풍 및 폭풍에 이르기까지 매우 다양하고 복잡함으로 파랑을 수학적으로 기술함에 있어서 일반해는 하나로서 존재할 수 없다. 그러므로 파랑을 물리적인 관점에 따라 적절한 가정을 적용시켜 생성시켜야 하며, 해양산업에서 파랑을 선정하는 가장 대표적인 이론은 스토크스 (Stokes) 이론 및 에어리(Airy) 이론이다. Fig. 16에서 보여지는 것처럼 해상환경의 파고와 평균수심에 따라 파랑이론을 산정할 수 있으며,[16] 본 실험에서는 극한상황 및 평시상황 모두 스토크스 이론을 산정하였다.

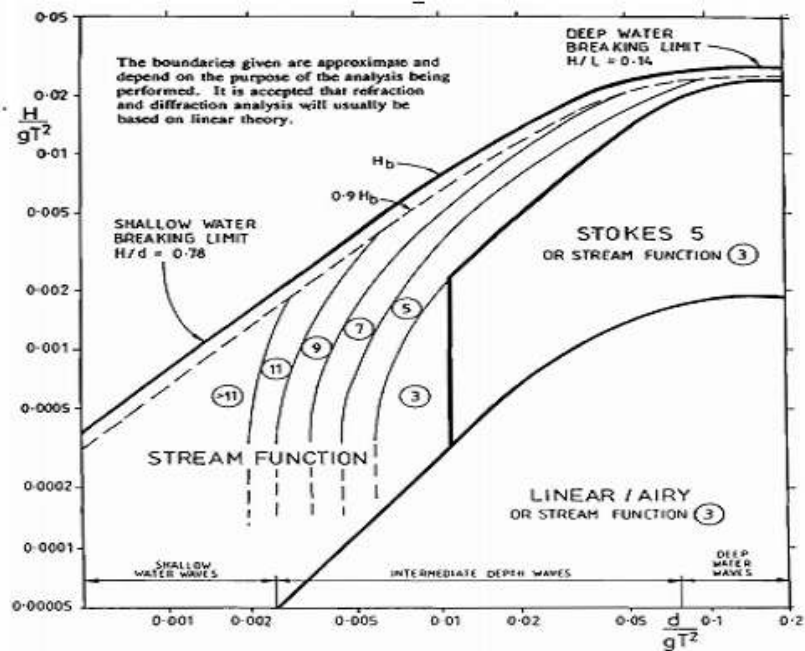


Fig. 16 Diagram of regular wave theory selection[16]

Nomenclature

- $H/gT^2$  = Dimensionless wave steepness       $D$  = Mean water depth
- $d/gT^2$  = Dimensionless relative depth       $T$  = Wave period
- $H$  = Wave Height       $L$  = Wave length
- $H_b$  = Breaking Wave height       $G$  = Acceleration due to gravity

에어리이론은 점성을 무시한 가장 완전한 유체의 흐름을 가정하는 이론으로서 가장 이상적인 바다의 흐름을 나타내어주는 이론이며, 스토크스 이론은 점성을 고려하여 가장 실질적인 바다의 흐름을 나타내어주는 이론으로서, 본 연구에서 극한 및 평시 상황 모두 스토크스 이론을 적용시켜 수행하였다.

**2.3 Marine Growth의 동유체(Hydrodynamics)하중 영향**

Marine Growth가 하부구조물의 하중에 영향을 끼칠 수 있는 요인들은 여러 가지가 있으며 이번 절에서는 Marine Growth로 인하여 변화되는 특성들로는 다음과 같이,



- 강부재 지름 및 체적변위(Displacement Volume) 증가
- 항력(Drag) & 관성(Inertia) 계수의 변화
- 질량의 변화로 인한 고유진동수 변화

가 있으며 이러한 특성들의 변화가 하중에 어떠한 영향을 끼칠 수 있는지 설명한다.[15]

### (1) 강 부재의 지름 및 체적변위의 변화

일정 단계의 수중에 침수되어 있는 강 부재의 표면에 Marine growth의 성장이 시작되면 Jacket의 각 부재의 유효지름이 변하게 되어 체적변위(Displacement volume)에 영향을 미칠 수 있다. 이로 인해 횡단면의 접합부에 축하중의 영향에 상당히 크게 미칠 수 있으며 특히, Jacket구조와 같이 작은 지름을 가지는 구조의 경우 더욱 큰 영향을 받을 수 있다.



### (2) 항력 및 관성계수의 변화

Marine Growth가 부재에 성장하게 되었을 때 강부재의 표면거칠기에 상당한 악영향을 미칠 수 있으며 이에 따라 Morison Equation의 항력 및 관성계수(Drag & Inertia Coefficient)에도 영향을 미치게 되어 파랑하중을 증폭시킬 수 있다.[15],[17]

$$C_d = \begin{cases} 0.65 & \text{for } k/D < 10^{-4} \text{ (Smooth)} \\ \frac{29 + 4\log_{10}(k/D)}{20} & \text{for } 10^{-4} < k/D < 10^{-2} \\ 1.05 & \text{for } k/D > 10^{-2} \text{ (rough)} \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, k = Surface Roughness D = Diameter of Structure's member

Eqn. (6)은 표면거칠기에 따라 변화하는 항력계수를 선정하기 위한 식이며 Marine growth가 성장하지 않은 표면(Smooth)은 0.65를 선정시킬 수 있으며 Marine growth가 성장된 표면(Rough)은 1.05를 선정할 수 있다.

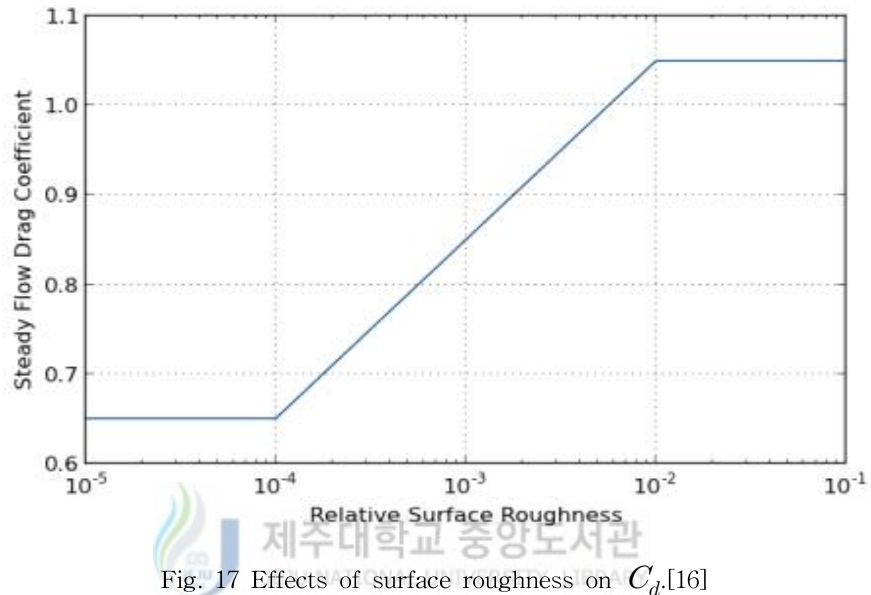


Fig. 17 Effects of surface roughness on  $C_d$ [16]

Fig. 17은 표면 거칠기에 따라 변화하는 항력계수를 보여주며, 그림에서 보여지듯이 거칠기가  $10^{-4}$ 이하에서는 0.65를 나타내며,  $10^{-2}$  이상의 거칠기에서는 1.05를 선정할 수 있음을 보여준다. 일반적으로 항력계수 및 관성계수는 크리건-카펜터 수(Keulegan-Carpenter number)의 영향을 많이 받게 되며 Eqn. (7)은 KC 산정을 위한 식이다.

$$KC = u_{\max} T_i / D \dots\dots\dots (7)$$

여기서,  $u_{\max}$  = 최대 물입자 속도,  $T_i$ =파랑의 주기,  $D$ =강부재의 지름

KC 수는 Eqn. (7)을 적용하여 구할 수 있으나, 물입자속도는 지역적 특성에 따

라 크게 달라지므로 오랜시간 지역의 최대 물입자 속도를 분석하여 적용시켜야 할 것이므로 본 연구에서의 관성계수는 항력 계수식에 적용시켜 산정하였다.

$$C_m = \begin{cases} 2.0 - 0.044(KC - 3) \\ 1.6 - (C_{ds} - 0.65) \end{cases} \dots\dots\dots (8)$$

Eqn. (8)을 보면 알수 있듯이, 항력계수가 증가함에 따라 관성계수는 감소함을 알수 있다. 이는 레이놀즈(Reynolds) 방정식에 따라 증명될 수 있다.

$$Re = \frac{VD}{\nu} \dots\dots\dots (9)$$

여기서  $\nu$  = 동점성계수,  $V$ = 물입자속도,  $D$  = 부재 지름

레이놀즈 방정식은 일반적으로 관성력(분자)과 점성력(분모)의 비로 나타내어 질 수 있다. 관성계수의 경우 레이놀즈 방정식에 따라 표면거칠기가 증가하게 되면 유체의 흐름을 방해하는 점성력이 증가하게되며, 관성력이 감소하게 된다. 이와 반대로 항력계수의 경우 표면거칠기가 거칠어지게 되어 저항력이 커지게 되고 항력계수가 증가하게 된다. 즉, Marine growth로 인한 표면거칠기의 변화는 레이놀즈 방정식에서의 점성력을 증가시켜 관성력을 감소시키고 유체 흐름의 저항력을 크게 만들어 항력계수를 증가시킨다.

### (3) 질량 증가

Marine Growth의 성장으로 인해 나타나는 체적의 변위에의해 구조의 질량  $m_r$  및 동유체적 부가질량  $m_a$  역시 증가하게 되며 Fig. 18은 부재의 질량 변위와 동유체 부가질량의 분포를 보여주고 있다.[18]

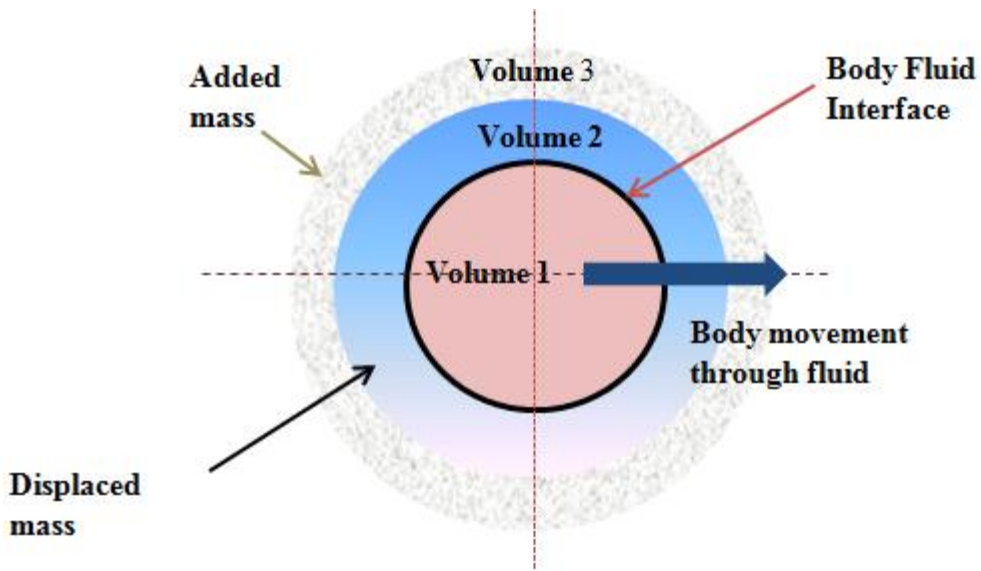


Fig. 18 Distributions of displaced mass and hydrodynamics added mass[18]

Fig. 18에서 “Volume 2” 구간은 Marine Growth의 성장으로 인해 강 부재의 체적의 변위로 인해 고유질량이 증가하게 되는 구간이며, “Volume 3” 구간은 Marine growth 성장으로 인한 “Volume 2” 구간의 표면의 변화로 인해 고유질량 변위가 일어나 파랑에 의해 발생하는 동유체 부가 질량이 증가하는 부분이다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m_d + m_a}} \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $K$  =강성 (Stiffness)

Eqn. (10)은 질량 변위 및 부가질량의 증가로 인한 고유진동수의 변화를 나타내어주는 식이다. Marine growth의 성장으로 인해 증가된  $M_f$  및  $M_a$ 는 타워의 고유진동수를 감소시키게 되고, 이는 Blade의 가진진동수에 의해 공진에 대한 위험성이 커짐을 뜻하게 되며 Marine growth에 따른 공진주파수 분석은 해상풍력 발전단지내의 해상풍력발전기 설치전에 수행되어야 할것이다.

### III. 해석 수행 모델 및 하중 조건 설정

이 절에서는 하중 해석을 위한 해석 수행 모델 풍력발전기의 스펙과 하중 조건의 선정 및 적용 값에 대하여 설명한다. 해상 풍력발전기의 기초구조물을 설치하기 전 설치 지역의 실측데이터를 바탕으로 해석 조건을 산정하는 것이 중요하지만 해상환경의 경우 실측데이터 수집은 쉽지 않다. 본 연구에서는 (주)한국남부발전의 지원을 받아 제주대정해상풍력 해상기상탑 설치[9]를 위한 설계보고서에서 부지의 풍속 및 파랑 데이터를 적용시켜 해석을 수행하였으며, Marine Growth의 경우 DNV Guide Line에서 제공하는 Central & Northern North Sea의 데이터를 참조하여 적용 시켜 실험을 수행하였다.

#### 3.1 해석 수행 풍력 발전기 모델

본 연구에서 수행된 해상 풍력발전기의 타워 및 RNA의 제원은 GH에서 제공하는 5MW를 토대로 설계되었으며, 하부 지지구조물의 경우 OC4 Project에서 제공하는 Code Line을 바탕으로 설계되었다 [19].

Rotor diameter	118 m
Number of blades	3
Teeter hinge	No
Hub height	80 m
Offset of hub to side of tower centre	0 m
Tower height	78 m
Tilt angle of rotor to horizontal	4 deg
Cone angle of rotor	0 deg
Blade set angle	-3 deg
Rotor overhang	6 m
Rotational sense of rotor, viewed from upwind	Clockwise
Position of rotor relative to tower	Upwind
Transmission	Gearbox
Aerodynamic control surfaces	Pitch
Fixed / Variable speed	Variable
Diameter of spinner	6 m
Radial position of root station	2 m
Extension piece diameter	2.5 m
Extension piece drag coefficient	1
Cut in windspeed	3.5 m/s
Cut out windspeed	25 m/s

Fig. 19 General characteristics of rotor and turbine.

발전기의 제원은 수동 피치 제어(Active Pitch Control)를 하는 3 블레이드 수평축 풍력발전기이며 그림 같이 시동풍속은 3.5m/s, 정격풍속은 12.3m/s, 종단풍속은 25m/s 이다.[6] 해상 기초구조물은 수심 45m의 총 노드 87개 및 140개의 섹션에 따라 다른 특성을 가지고 있는 Jacket 구조이며 평균수심에서 타워 최상부까지의 높이는 78.3m이며 허브 높이는 80m이다. 타워와 기초구조물의 경우의 재료 밀도는 강(Steel)로서 7850 kg/m<sup>3</sup> 이며, Pile과 최저해지면 Leg의 이음부인 Grout의 재료 밀도는 3339.12kg/m<sup>3</sup>이다. 또한, 블레이드의 길이는 57m 이며 로터 회전지름은 118m 이다.

### 3.2 설계 풍속

설계 풍속은 Table 2에 정리되어 있는 자료처럼 (주)한국남부발전에서 제공 받은 현지 조사 풍황데이터와 모슬포항 인근 고산 기상대의 (높이10m) 풍황기록데이터를 비교 분석하여 큰 값을 적용 시켰다. 따라서 설계풍속은 평시 운전 조건은 8.85m/s으로 산정 하였으며, 극한 조건은 51.40m/s를 적용 시켜 해석을 수행 하였다.[9]

Table 2 Selection of wind velocity

구분		한국남부발전(주)	고산기상대
설계풍속	1년 빈도풍속(연간 10분 평균풍속)	8.85 m/sec(◎)	8.70 m/sec
	50년 빈도풍속(최대 10분 평균풍속)	44.25 m/sec	51.40 m/sec(◎)
적용		※:(◎) 불리한 조건으로 적용함.	

### 3.3 설계 파랑

#### (1) 설계 파고 및 주기

설계파고는 재현기간 1년인 평시 운전 조건인 경우와 재현기간 4년인 극한조건  
 의 경우에 대하여 국립해양조사원의 1979~ 2003년 동안 관측된 자료로부터 산정  
 되었다. 관측된 자료로는 1년의 짧은 기간의 통계치이며 설계파고 산정시 유의  
 파고에 1.86배 하여 산정되었으며 주기의 경우 큰 변화는 없을 것으로 판단되어  
 유의 주기는 그대로 적용시켰다.

Table 3 Selection of wave condition

운전 조건		재현기간	유의파랑 (Hs, Ts)	적용설계파 (Hmax, Tmax)
평시운전조건	파고(m)	1년	3.20m	5.95m
	주기(sec)	1년	9.90sec	9.90sec
극한조건	파고(m)	50년	8.30m	15.44m
	주기(sec)	50년	14.30sec	14.30sec

## (2) 파랑이론의 선정

Fig. 16을 참조하여 수심 -45m에서의 파고와 주기를 적용시켜 파이론을 산정  
 하였으며 평시 및 극한 조건 모두 스토크스 이론을 산정하여 본 실험에 적용 시  
 켰다.

Table 4 Selection of wave theory

조건	수심(D)	파고(H)	주기(T)	$D/gT^2$	$H/gT^2$	파이론
평시운전조건	-45m	3.20m	9.90s	0.0468	0.0033	스토크스
극한조건	-45m	8.30m	14.30s	0.0224	0.0041	스토크스

## 3.4 Marine Growth의 두께

Marine Growth 두께 실측 데이터는 DNV에서 제공하는 Central and northern  
 North Sea의 Marine Growth의 두께 특성 가이드라인을 참조하여 적용시켰다.[5]  
 Marine Growth의 두께 및 표면거칠기의 증가는 풍력발전단지의 부지의 영향에  
 따라 크게 바뀌어질 수 있으며 본 연구에서는 Fig. 20에서 보여주듯이 Central

and northern North Sea의 데이터를 참조하여  $-40\text{m} \sim +4.3\text{m}$ 까지의 Marine Growth는  $100\text{mm}$ 로 설정하였고  $-45\text{m}$  이하의 수심에서는  $50\text{mm}$ 를 적용시켜 실험하였다.

Fig. 20 및 Table 5는 Marine growth가 수심에 따라 달라지는 것을 보여주는 하나의 지표이며 본 연구에서의 실험은 최대 수심  $-45\text{m}$ 로서 Marie Growth의 최대 두께는  $100\text{mm}$ 로 적용시켰다.[20]

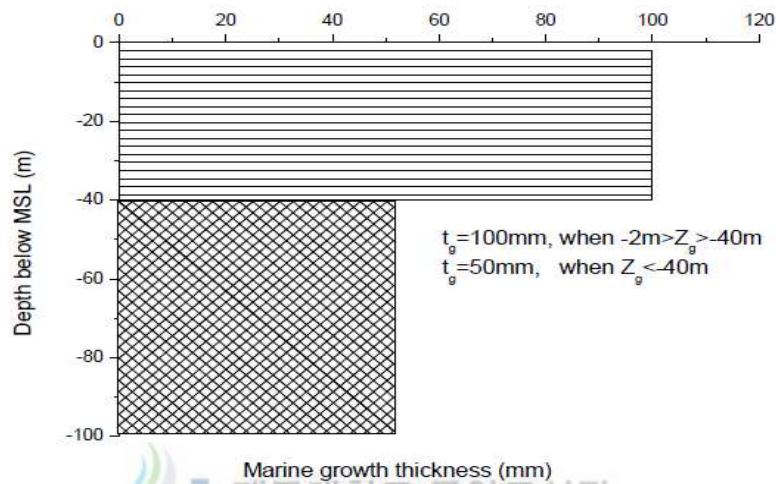


Fig. 20 Marine growth distribution profile in central and northern part of North Sea

Table 5 Properties of marie growth

수심	해저면	두께(mm)
$-40 < Z_g < \text{MSL}(+4.3\text{m})$	Mud line	100
$Z_g < -45(\text{m})$	Mud line	50

### 3.5 항력 및 관성(Drag & Inertia) 계수

항력 및 관성 계수의 선정은 Eqn. (6),(8)을 토대로 Marine Growth Thickness (이하 M.G.T)에 따라 다르게 적용시켰으며, M.G.T:0mm인 표면을 Smooth로 선정하여 항력계수 0.65, 관성계수 1.6으로 선정하였다. M.G.T:100mm인 표면을 Rough로 선정하여 1.05으로 적용시켰다. 또한 관성계수의 경우도 Eqn. (8)을 토대로 항력계수에 따라 M.G.T:0mm는 1.6, M.G.T:100mm는 1.2로 선정하여 적용



시켰다. 마지막으로 M.G.T를 억제시켰을 때(M.G.T:50mm)의 하중의 변화 실험에서는 항력계수 및 관성계수가 선형적으로 감소하였을 것이라 가정하여  $C_d$ :0.85,  $C_m$ :1.4를 적용시켰다.

Table 6 Selection of  $C_d$  and  $C_m$

M.G.T	$C_d$ (항력계수)	$C_m$ (관성계수)
0mm	0.65	1.6
50mm	0.85	1.4
100mm	1.05	1.2

## IV. 하중 분석 결과 및 고찰

이번 절에서는 Marine Growth의 성장으로 인한 해상풍력발전기의 하중 및 고유진동수의 변화를 알아보기 위하여 GH Blade ver4.2로 하중해석을 수행하였다. 우선적으로 Eqn. (10)에 따라 Marine Growth의 성장두께에 따른 고유진동수의 변화를 알아보았다. 그리고 각 섹션별 연결요소 leg(Transition piece Support) & X-받침목 (Splash Zone) & 최저해저면 Leg (The Lowest in sea bed)에서의 Marine Growth의 영향을 0mm, 100mm로 나누어 하중평가를 수행하였다. 그리고 타워 모드에 따른 하중의 변화를 굽힘모멘트 및 전단력 나누어 실험하였다. 또한 DLC1.1 (Power Production)을 적용시켜 풍속에 따른 Marine Growth의 하중영향을 평가했으며 Marine Growth의 억제 방안의 하나로서 ZnO Nanopaint를 제안해 보았다. 마지막으로 제안한 Marine Growth 억제방안인 ZnO Nanopaint가 Marine Growth를 50% 억제가능했을 경우를 가정하여 M.G.T:50mm로 설정하여 M.G.T:100mm와 하중의 영향을 비교분석하여 보았다.

### 4.1 고유진동수의 변화

Marine Growth가 성장으로 인해 질량변위 및 동유체하중을 증가 시킬 수 있으며 이는 Eqn. (10)에서 나타내었듯이 고유진동수의 감소를 유발 시킬 수 있다. 파랑을 일으키는 요인인 조석차, 지진, 태풍 및 폭풍에 이르기까지 매우 다양하고 복잡한 해상환경에서의 고유진동수의 감소는 블레이드 가진진동수와 결합된 불분명한 해상환경에서 공진을 유발할 수 있는 위험이 있다. Fig. 21는 타워의 아이겐 모드(Eigen mode)를 보여주고 있으며 1<sup>st</sup> Side-to-Side 모드, 1<sup>st</sup> Fore-aft 모드는 발전기가 1차원 점 운동에 의해 유발되는 고유진동수이며, 2<sup>nd</sup> Side-to-Side, 2<sup>nd</sup> Fore-aft모드는 2차원 면 운동에 의해 풍력발전기가 2차원곡선 운동을 하고 있음을 보여준다. 또한, 1st Torsional 모드는 발전기 전체의 뒤틀림 모드에 의해 유발되는 진동수를 나타낸다. Table 7 및 Fig. 22은 M.G.T의 두께 변화에 따라 타워의 고유진동수의 변화를 보여준다. 1<sup>st</sup> Side-to-Side 및 1<sup>st</sup>



Fore-aft 모드에서의 고유진동수의 변화는 M.G.T에 따라 큰 변화의 폭을 보여주지 않았지만, 2<sup>nd</sup> Side-to-Side, 2<sup>nd</sup> Fore-aft 및 1<sup>st</sup> Torisonal 모드에서 고유진동수가 상당량 감소함을 보여준다. 이는 Marine Growth의 성장은 Blade의 가진 진동수와 일치하는 공진주파수의 범위내로 좁혀질 수 있는 가능성을 의미한다.

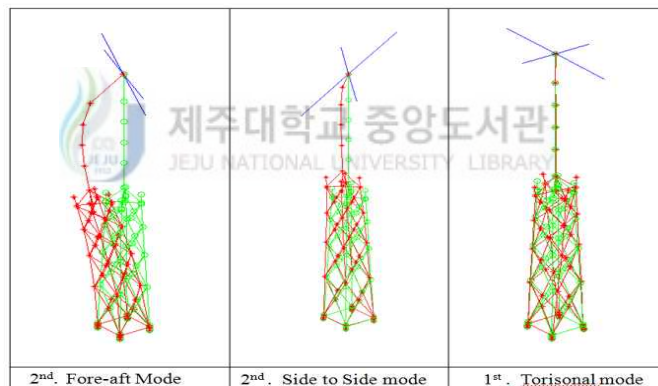
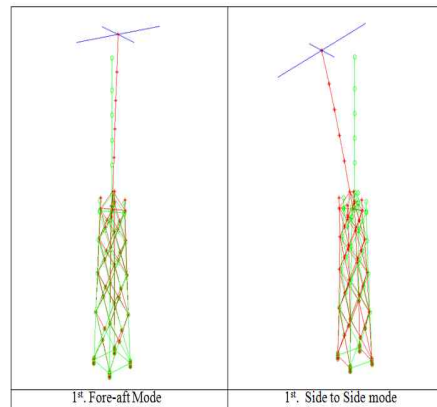


Fig. 21 Eigen mode of tower

Table 7 Numerical values of natural frequencies of support structures with different M.G.T

Mode	M. G. T = 0 mm	M.G.T = 50 mm	M.G.T = 100 mm
1 <sup>st</sup> . Fore-aft	0.277	0.276	0.276
1 <sup>st</sup> . Side to Side	0.277	0.277	0.277
2 <sup>nd</sup> . Fore-aft	2.037	2.022	2.007
2 <sup>nd</sup> . Side to Side	1.946	1.933	1.920
1 <sup>st</sup> . Torisonal	2.418	2.407	2.396

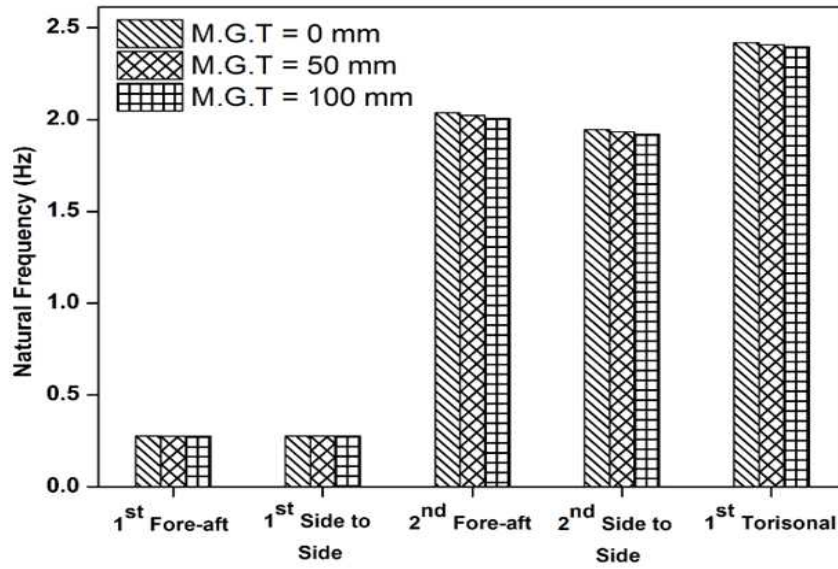


Fig. 22 Graphical analysis of natural frequencies of support structures with different M. G. T graph

#### 4.2 Marine Growth의 Section별 [T.P, X-Brace(M.S.L), Mud leg] 영향

본 연구에서 설계된 Jacket구조의 경우 연결요소(Transition piece)leg, X 받침목 및 최저해저면 Leg등과 같이 많은 섹션들로 이루어진 강부재 접합체이다.

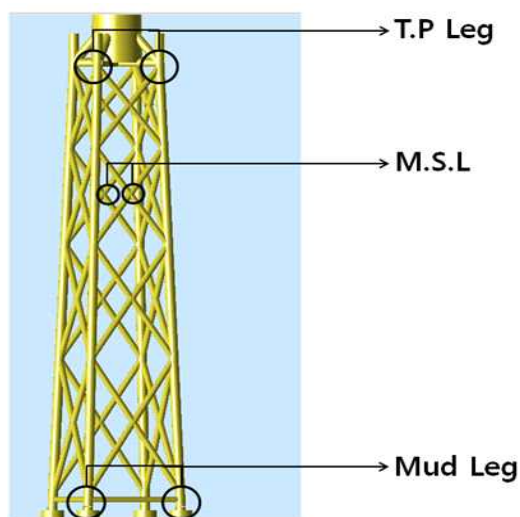


Fig. 23 Sections of jacket

연결요소 Leg의 경우 수면 위 해상풍력발전기의 타워를 지지하는 섹션으로서 가장 큰 하중의 영향을 받을 것으로 예상되었으며, 따라서 Marine Growth의 영향에 관한 하중해석을 수행하였다. Fig. 24 및 Table 8은 Marine Growth의 성장으로 인해 증가하는 하중의 증가율을 보여준다. 연결요소 Leg의 경우 멤버No. 111,112,113,114로 설계되었으며, 최대 7028KNm의 굽힘모멘트로 가장 큰 하중을 받고 있었다.

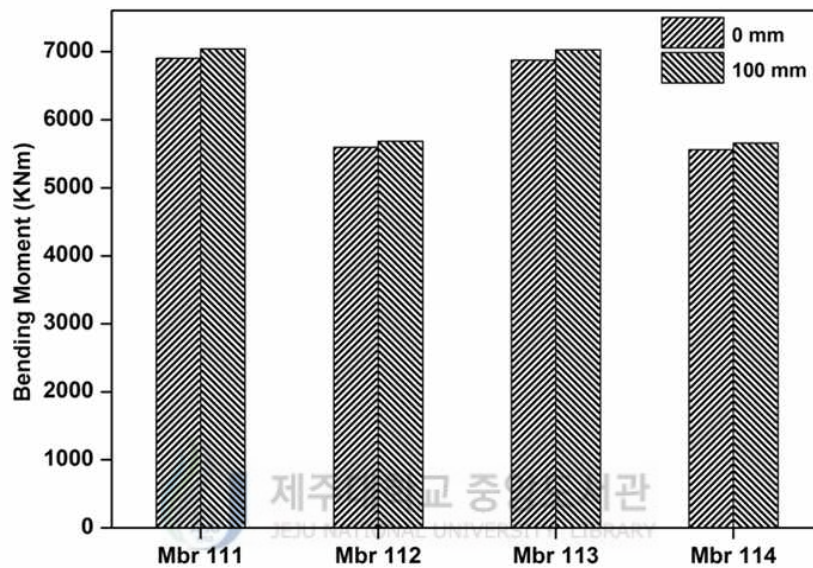


Fig. 24 Graphical analysis of marine growth effect at T.P Leg

Table 8 Numerical values of Marine Growth effect at T.P Leg

T. P Leg	M.G.T	Mbr 111	Mbr112	Mbr113	Mbr114
	0 mm	6902.96	5594.92	6876.43	5558.82
	100 mm	7042.67	5683.31	7028.33	5658.62
	증가율	2%	2%	2%	2%

하지만 Marine Growth의 성장의 유무에 따라 하중의 증가율은 약 2%로 소폭 증가함을 보여주고 있다. 따라서 Marine Growth는 유연한 움직임을 가지는 기초 구조인 Jacket 형식의 구조에는 연결요소 Leg에 지대한 영향을 미치고 있지 않는다.

평균수심단계의 X-받침목 섹션은 해상표면에 위치한 섹션으로서 스플래쉬 존 (Splash Zone) 구역이다. 스플래쉬 존은 조석 차에 의해 수심이 변하므로 강

(Steel)표면의 노출이 가장심해 부식의 큰 위험이 있는 섹션이다. Fig. 25 및 Table 9는 Marine Growth의 영향에 의한 평균수심의 X- 받침목에서의 하중 변화율이다. 평균수심 단계의 X-받침목 섹션에서의 Marine Growth의 영향 역시 4% 내외로 크지 않았으며 가장 큰 하중을 받고 있는 멤버는 멤버. 26에서 약 395KNm의 하중을 받고 있다.

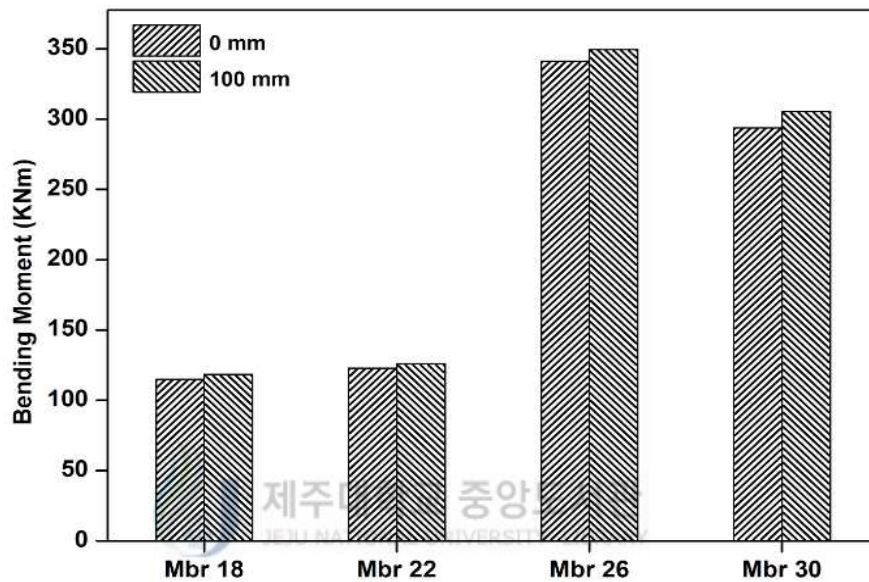


Fig. 25 Graphical analysis of marine growth effect at M.S.L (X-brace)

Table 9 Numerical values of Marine Growth effect at M.S.L(X-brace)

M.S.L (X-brace)	M.G.T	Mbr 18	Mbr22	Mbr 26	Mbr 30
	0 mm	114.965	122.867	340.966	293.853
	100 mm	118.331	125.806	349.485	305.478
	증가율		3%	2%	2%

마지막으로 수직축 실린더(Vertial Cylinder) 형태로서 해상풍력발전기 최저 해저면 구간에서의 Leg 섹션에서의 Marine Growth의 영향에 의한 하중을 분석하였다. Fig. 26 및 Table 10은 최저해저면 Leg에서의 Marine Growth의 영향을 보여주고 있으며 상당히 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 최저해저면 Leg에서의 Marine Growth의 하중 증가율은 최대 92.26%까지 증가함을 보여준다. 이는 최저해저면 Leg의 경우 해상풍력발전기의 최저단에서 해상 풍력 발전기 전체를 지

지하는 섹션

임과 동시에 그라우트 부분과 직접적으로 연결됨으로 Marine Growth로 인해 전체 무게가 변하므로 최저해저 섹션에서 Marine Growth로 인한 하중의 변화량이 가장 커질수 있음을 알수 있다.

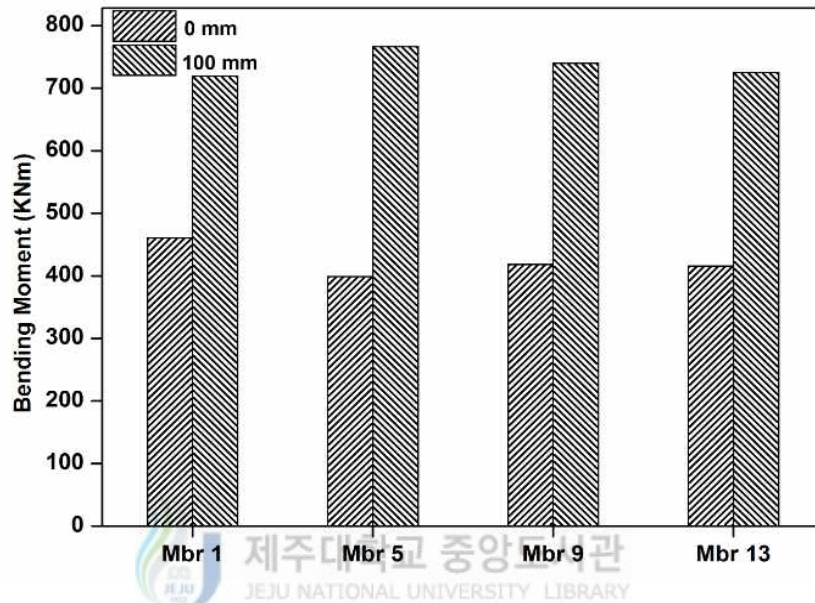


Fig. 26 Graphical analysis of Marine Growth effect at mud leg

Table 10 Numerical values of Marine Growth effect at mud leg

Mud Leg	M.G.T	Mbr1	Mbr 5	Mbr9	Mbr 13
	0 mm	460.955	398.73	418.121	415.831
	100 mm	719.787	766.616	739.803	724.985
	증가율		56.15%	92.26%	76.93%

### 4.3 타워 아이젠 모드(Eigen mode)에 미치는 Marine Growth 영향

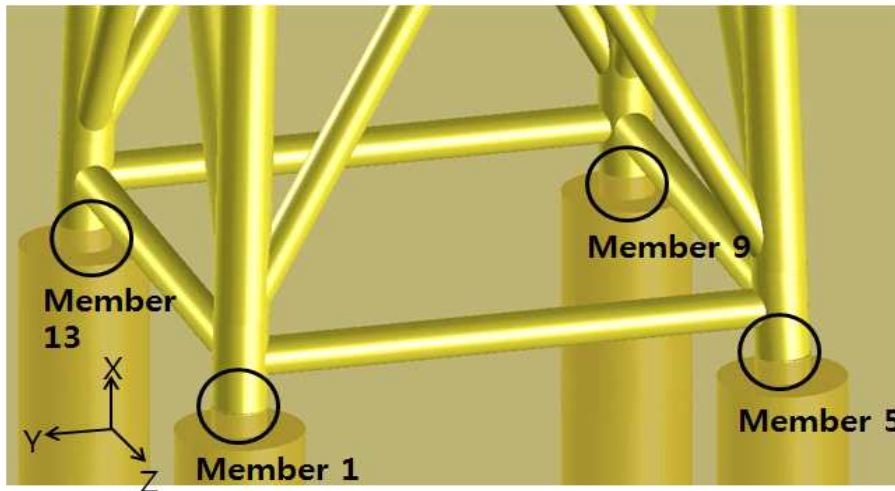


Fig. 27 Location and coordination of members

Fig. 27은 최저 해저면 Leg에서의 타워 아이젠 모드(Eigen mode)에 따른 Marine Growth의 영향을 분석하기 위한 좌표 및 멤버의 위치를 보여주며 멤버.1,5는 기초구조의 앞축( fore-axis)의 강 부재이며, 멤버.9,13은 기초구조의 뒷축( aft-axis)에 위치하고 있다. 기초구조의 좌표의 Z축은 기초구조의 Fore-aft 모드의 움직임을 의미하며, Y축은 Side-to-Side 그리고 X축은 축방향의 하중을 의미한다. Fig. 28 및 Table 11은 멤버.1에서의 Marine Growth에 의해 증폭되는 하중 데이터를 보여준다. 멤버.1에서의 굽힘모멘트는 Side to Side 방향의 움직임에 가장 큰 영향을 받고 있었으며 Marine Growth의 영향이 가장 많이 미치는 것을 알 수 있다. Side-to-Side 움직임에서 Marine Growth의 생성에 따른 굽힘모멘트는 약 56%증가 폭을 나타내었으며 전단력의 경우 체적변위(Displaced Volume)에 의해 축하중 방향의 하중에 가장 큰 지배를 받고 있었고 Marine Growth의 영향에 의해 약 7%의 증가율을 보였다. Marine Growth의 영향을 가장 크게 받는 Tower의 움직임은 Fore-aft 방향이었으며, 약 118%의 증가율을 나타낸다. 굽힘모멘트에 따른 체적변위로 인해 일어나는 최저해저면 Leg에서의 Marine Growth에 의해 생기는 하중의 변화율 Fore-aft방향 (Fz)방향으로 가장 큰 하중



이 미치고 있지만 부재의 접합면에 생기게 되는 축하중에 비해 매우 작으므로 축하중의 영향이 가장 중요하다고 사료되지만 멤버.1의 경우 Marine growth의 영향은 미비 하였다. 이는 유연체로 구성된 Jacket 구조의 경우 앞축과 뒷축을 비교하였을 때, 뒷축에 비해 앞축이 좀 더 축하중의 지배에서 자유롭다는 것을 알 수 있다. Marine Growth로 인해 증가되는 횡단면 접합면의 축하중은 피로에 의해 접합면의 절단을 가져올 수도 있으며 극한상황에서의 Marine Growth의 성장으로 인해 증폭되는 경우도 뒷축의 경우 상당히 위험할 것으로 사료된다. 따라서 Marine Growth는 해양산업에서의 기초구조의 설계 수명에 큰 영향을 기여할 수 있으므로 현재 해양산업에서 Marine Growth의 억제 방안 및 유지 관리에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

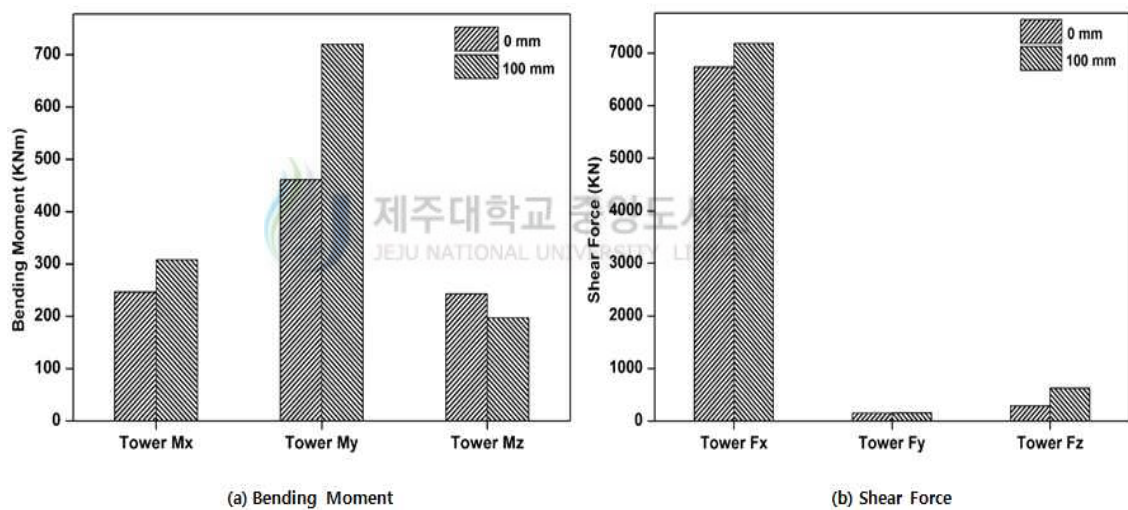


Fig. 28 Graphical analysis of effect on Mbr.1 loads when increasing M.G.T

Table 11 Numerical values of effect on Mbr.1 loads when increasing M.G.T

Mbr.	M.G.T	Bending moment (KNm)			Shear Force (KN)		
		Tower M <sub>x</sub>	Tower M <sub>y</sub>	Tower M <sub>z</sub>	Tower F <sub>x</sub>	Tower F <sub>y</sub>	Tower F <sub>z</sub>
1	0 mm	246.096	460.955	242.464	6733.95	150.013	285.088
	100 mm	308.107	719.787	197.061	7186.16	153.236	621.884
	증가율	25%	56%	-19%	7%	2%	118%

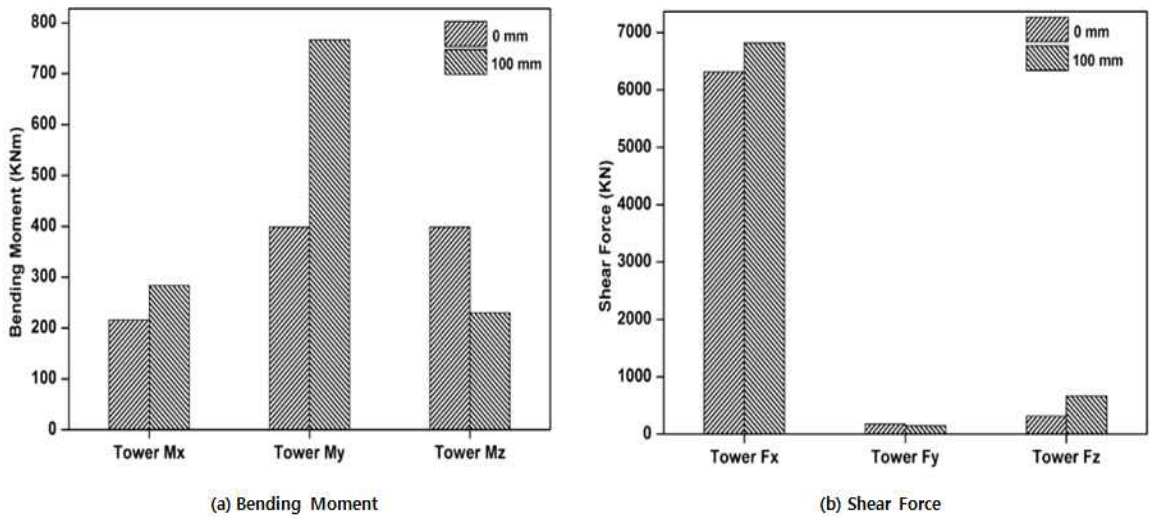


Fig. 29 Graphical analysis of effect on Mbr.5 loads when increasing M.G.T

Table 12 Numerical values of effect on Mbr.5 loads when increasing M.G.T

Mbr.5	M.G.T (mm)	Bending moment (KNm)			Shear Force (KN)		
		Tower M <sub>x</sub>	Tower M <sub>y</sub>	Tower M <sub>z</sub>	Tower F <sub>x</sub>	Tower F <sub>y</sub>	Tower F <sub>z</sub>
	0 mm	215.702	398.73	398.73	6315.34	179.001	311.756
	100 mm	283.537	766.616	230.054	6819.45	147.386	665.644
	증가율	31%	92%	-42%	8%	-18%	114%

Fig. 29 및 Table 12는 멤버. 1과 동일하게 앞축( fore-axis)에 위치하고 있는 강부재로서 멤버. 1과 비슷한 하중의 분포를 보여준다. 멤버. 1과 마찬가지로 Mrarine Growth가 성장함으로서 굽힘모멘트는 Side-to-Side 모드에서 92%의 하중 증가폭을 나타내며 전단력의 경우 축하중의 가장 큰 지배를 받고 있었다. 마찬가지로 전단력의 경우 Fore-aft 모드의 전단력이 Marine Growth의 영향을 가장 크게 받고 있었으며, 114%의 하중 증가율을 보여준다. Table 13 및 Fig. 30은 기초구조의 뒷 축(aft-axis)에 위치하고 있는 멤버. 9의 Marine Growth의 영향을 보여준다. 앞 축과 대체적으로 비슷한 결과를 보여주고 있으나 굽힘모멘트의 경우 Side-to-Side 모드에서 77%의 큰 증가율을 보여주고 있다. 하지만 앞 축과 비교해보았을 때 축 하중에 가장 큰 지배를 받고 있음은 동일하였으나 Marine Growth의 영향이 앞 축과 다르게 축 하중에 가장 크게 미치고 있다.

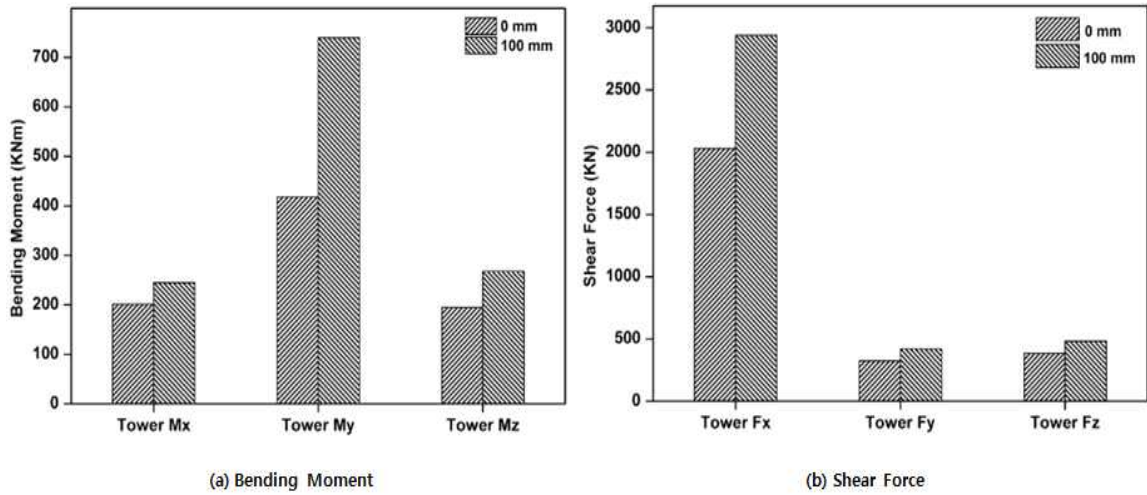


Fig. 30 Graphical analysis of effect on Mbr.9 loads when increasing M.G.T

Table 13 Numerical values of effect on Mbr.9 loads when increasing M.G.T

Mbr.9	M.G.T	Bending moment (KNm)			Shear Force (KN)		
		Tower M <sub>x</sub>	Tower M <sub>y</sub>	Tower M <sub>z</sub>	Tower F <sub>x</sub>	Tower F <sub>y</sub>	Tower F <sub>z</sub>
	0 mm	201.052	418.121	194.529	2031.29	325.395	385.487
	100 mm	245.244	739.803	267.606	2939.11	421.042	483.951
	증가율	22%	77%	38%	45%	29%	26%

이는 파랑의 영향을 1차적으로 받고 있는 앞 축의 경우 가장 큰 하중의 지배를 받게 되지만 파랑 하중에 의한 기초구조의 움직임이 Marine Growth의 성장으로 체적변위(Displaced Volume) 및 질량변위(Displaced mass)의 증가로 인해 뒷 축의 축 하중이 Marine Growth의 영향을 가장 크게 받고 있음을 알 수 있다. Fig. 31 및 Table 14는 멤버. 13의 Marine Growth의 하중 분포 및 변화율을 나타낸다. 멤버. 13의 경우 멤버. 9의 경우와 마찬가지로 굽힘모멘트는 Side-to-Side 움직임이 가장 크게 74%의 증가율을 보였으며, 전단력의 경우 축 하중의 전단력에 가장 큰 영향을 미친다.

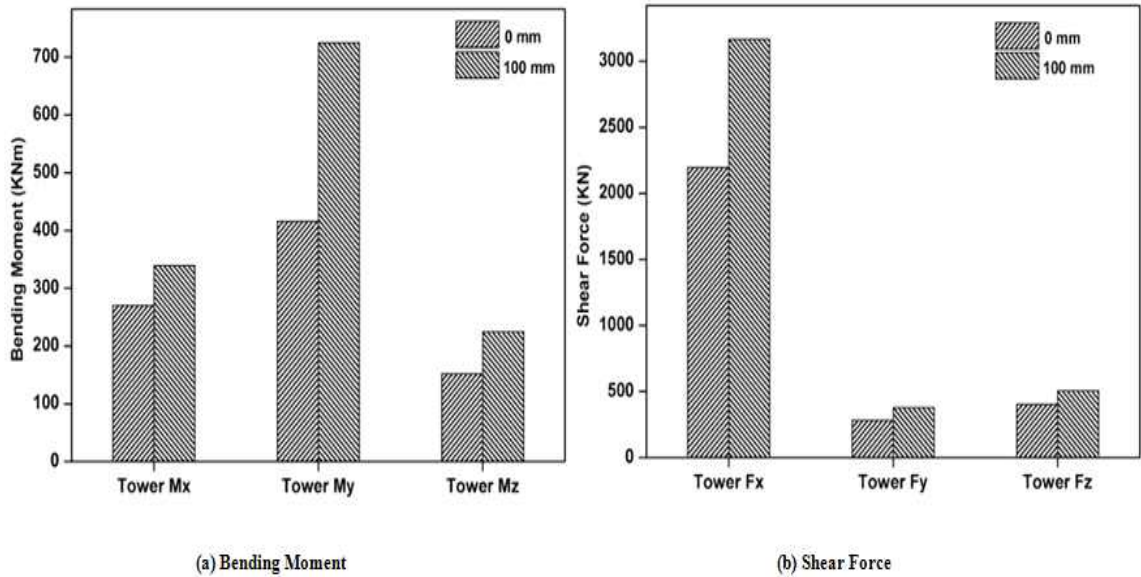


Fig. 31 Graphical analysis of effect on Mbr.13 loads when increasing M.G.T

Table 14 Numerical values of effect on Mbr.13 loads when increasing M.G.T

Mbr.13	M.G.T	Bending moment (KNm)			Shear Force (KN)		
		Tower M <sub>x</sub>	Tower M <sub>y</sub>	Tower M <sub>z</sub>	Tower F <sub>x</sub>	Tower F <sub>y</sub>	Tower F <sub>z</sub>
	0 mm	270.256	415.831	152.036	2196.11	283.449	401.935
	100 mm	339.151	724.985	224.597	3166.02	379.171	505.36
	증가율	25%	74%	48%	44%	34%	26%

#### 4.4 DLC. 1.1 Power Production

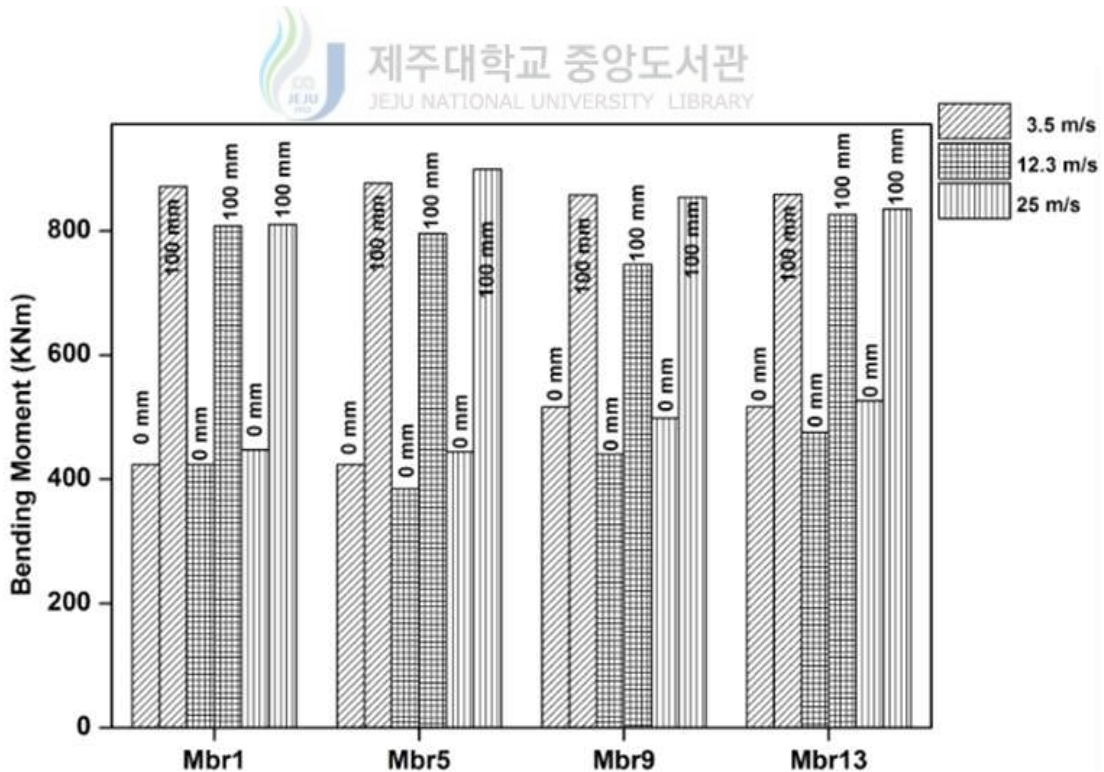
이번 절에서는 풍속에 따른 Marine Growth의 영향을 해석해보기 위하여 DCL 1.1 Power Production을 적용시켜 해석을 수행하였다. 설계케이스는 다음과 같다.

- Wind Condition : 3.5m/s, 12.3m/s, 25m/s
- Wave Condition : NSS (  $H_s = 5.95\text{m}$ ,  $T_s = 9.90\text{s}$  )
- Water Level : MSL

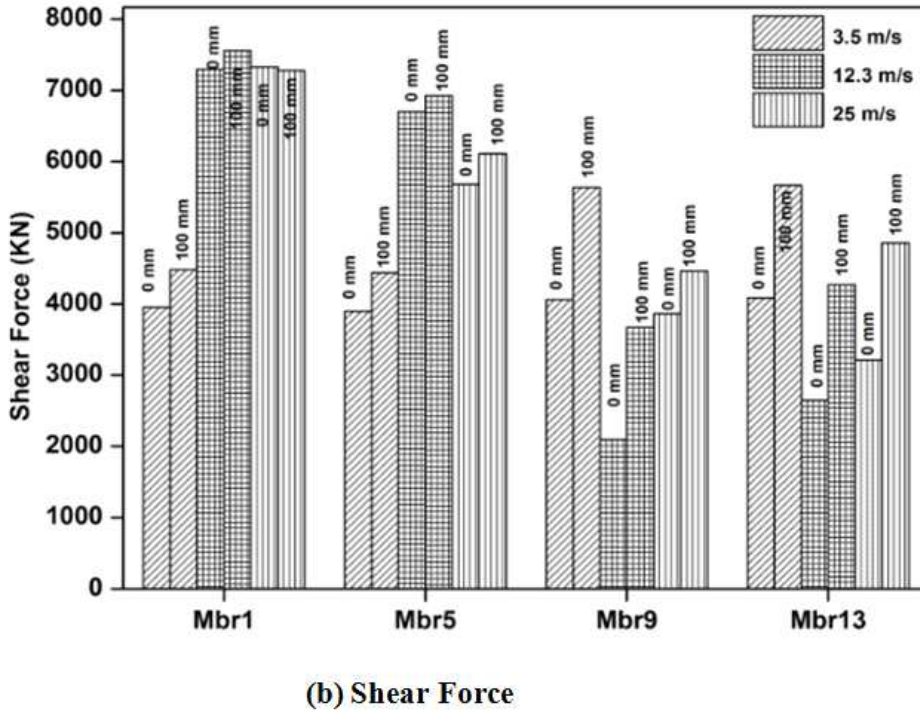
IEC 61400-3을 참조하여 하중설계케이스를 설정하였고, 풍속은 시동풍속 3.5m/s, 정격풍속 12.3m/s, 종단풍속 25m/s로서 세 가지의 풍속조건으로 해석을 수행하였으며, 파랑조건은 NSS(Normal Sea State), 수심은 평균수심으로 설정하였다.

Table 15 Numerical values of Marine growth effects in various wind conditions

풍속 (m/s)	M.G.T	Mbr 1		Mbr 5		Mbr 9		Mbr 13	
		M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>
3.5	0 mm	424.04	3955.0	427.71	3897.4	516.69	4062.7	517.15	4087.5
	100 mm	871.75	4481.8	876.70	4439.1	858.13	5639.0	859.4	5665.4
	증가율	106%	13%	105%	14%	66%	39%	66%	39%
12.3	0 mm	424.07	7292.9	384.31	6700.0	440.80	2093.8	475.33	2646.3
	100 mm	807.78	7557.9	795.71	6924.3	746.02	3668.3	826.45	4272.6
	증가율	90%	4%	107%	3%	69%	75%	74%	61%
25	0 mm	447.51	7329.0	444.97	5682.2	498.59	3864.6	526.75	3210.2
	100 mm	810.48	7273.3	899.55	6109.6	854.27	4461.0	835.17	4860.7
	증가율	81%	-1%	102%	8%	71%	15%	59%	51%



(a) Bending Moment



(b) Shear Force  
 Fig. 32 Graphical analysis of Marine growth effects in various wind conditions

Fig. 32 및 Table 15 는 세 가지의 풍속조건에 따라 각 부재의 하중 변화를 나타내고 있으며, 모든 풍속에서의 Marine Growth의 영향을 크게 받고 있었으나 풍속의 변화에 따른 Marine Growth의 영향은 없었다. 이는 수심 -45m에 위치하고 있는 최저해저면 Leg는 풍속의 영향은 받지 않으며, 파랑의 하중에 지배받고 있는 것을 알 수 있는 결과이다. 하지만 멤버. 1,5의 앞 축(Fore-axis)과 멤버. 9,13의 뒷 축(aft-axis)의 경우 시동 풍속 및 정격풍속에서의 하중 분포가 달랐으며 멤버 .1,5는 정격풍속에서 축 전단력에 가장 큰 지배를 받고 있으며, 멤버. 9,13은 시동풍속에서 가장 큰 하중의 영향을 받고 있음을 보여준다.

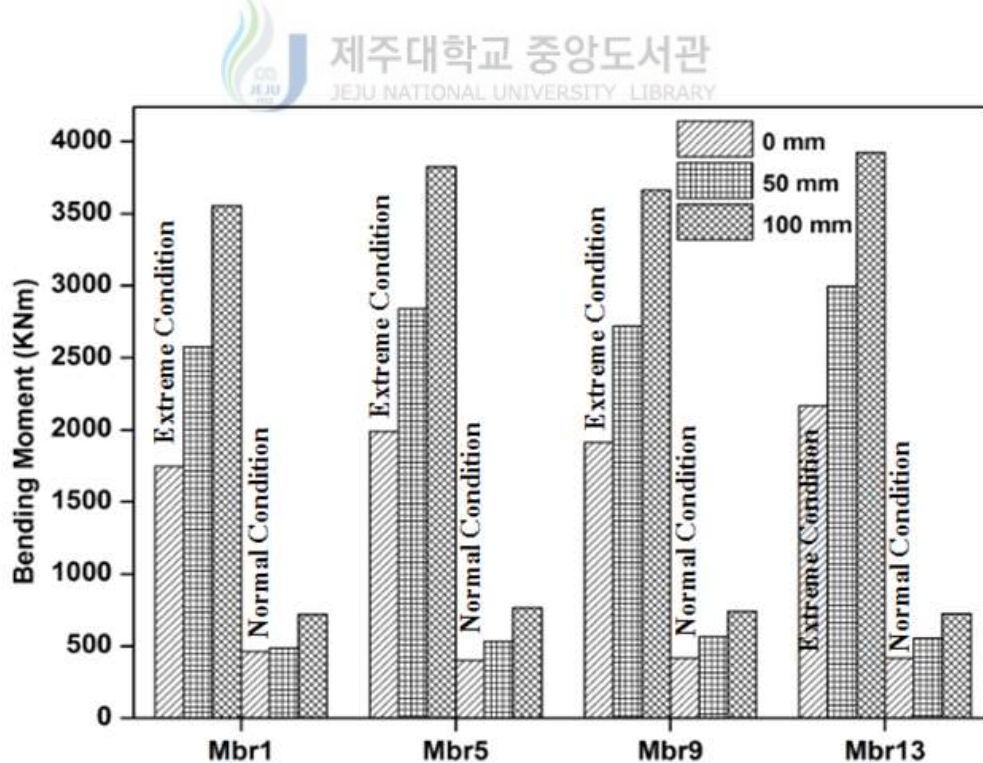
#### 4.5 Marine Growth의 두께에 따른 영향

Marine Growth는 해상풍력발전단지 설립부지의 해상환경에 따라 두께 및 표면 거칠기의 증가가 달라질 수 있다. 고로, Marine Growth의 두께에 따라서 해상풍

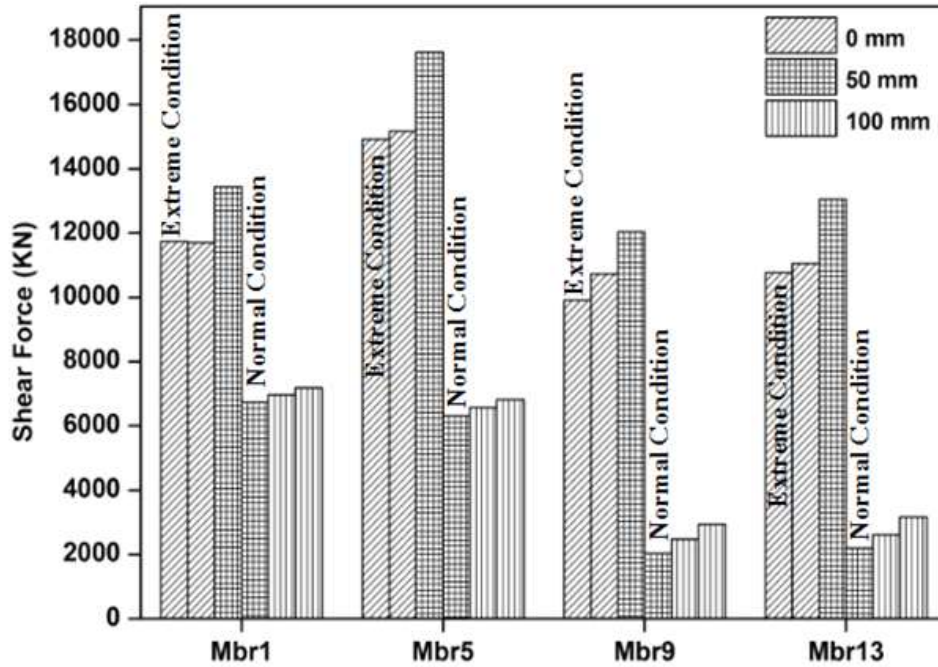
력발전기 기초구조의 최저해저면leg에서의 하중변화를 해석해보았다. 두께는 0 mm, 50 mm, 100 mm로 나누어 해석을 수행하였으며, 극한상황(Extreme Conditon)에서의 두께의 따른 하중영향을 알아보기 위해 극한 상황에서의 하중의 변화를 알아보았다. 극한상황은 DLC 6.1a Parked 상황을 적용시켰으며, 풍속은 51.40m/s, 파랑은 ESS(Extreme Sea State)로 설계하였다.

Table 16 Numerical values of effects on loads in various marine growth thickness

	M.G.T	Mbr 1		Mbr 5		Mbr 9		Mbr 13	
		M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>	M <sub>y</sub>	F <sub>x</sub>
극한	0 mm	1745.1	11740	1988.8	14919	1912.6	9912.4	2168.9	10778
	50 mm	2576.0	11698	2840.6	15166	2718.2	10736	2995.5	11054
	100 mm	3553.2	13438	3823.4	17627	3664	12035	3923.5	13052
평시	0 mm	460.9	6733.9	398.7	6315.3	418.1	2031.2	415.8	2196.1
	50 mm	487.2	6965.2	533.9	6575.5	564.3	2477.9	552.2	2618.5
	100 mm	719.7	7186.1	766.6	6819.4	739.8	2939.1	724.9	3166.0



(a) Bending Moment



(b) Shear Force

Fig. 33 Graphical analysis of effects on loads in various marine growth thickness

Fig. 33 및 Table 16은 Marine Growth의 두께에 따른 하중의 변화를 보여주고 있으며, 극한 상황인 경우 Marine Growth의 영향이 더욱 크게 미침을 알 수 있다. 이처럼 Marine Growth는 해상풍력발전기 기초구조물의 하중에 큰 영향을 끼칠 수 있으며 기초구조물의 수명에도 커다란 영향을 미칠 수 있음을 의미한다. 해상풍력발전기 설치를 위해서 Marine Growth의 하중 평가는 매우 중요한 요인이 될 수 있으며, 설치 후 유지보수(Operation & Maintenance)분야에서도 Marine Growth 제거는 필수적이다. 따라서 Marine Growth 억제를 위한 하나의 대안을 제시해본다.

#### 4.6 Marine Growth 성장 억제 방안

##### (1) 트릴 부틸 주석 페인트 (TBT Paint)



해양산업에서는 오래전부터 Marine Growth의 성장을 억제하는 방법으로서, 트릴 부틸 주석 페인트를 사용하여왔다. 유기주석화합물의 일종으로서 부식 및 해양수서생물의 억제를 위하여 해양 구조물등에 칠하는 페인트 이다. 유기주석화합물에는 TBT 외에도 플라스틱의 첨가제로서 이용되고 있는 MBT 및 DBT 등이 있으나, 이는 해양 환경에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다. 유기주석화합물중 가장 독성이 강한 TBT는 낮은 농도에서도 어패류를 치사시킬 수 있고, 고등 및 소라등 복족류의 암컷에 수컷의 생식기가 생기게 함으로써 불임을 유발하는‘임포섹스’현상을 일으키게된다.

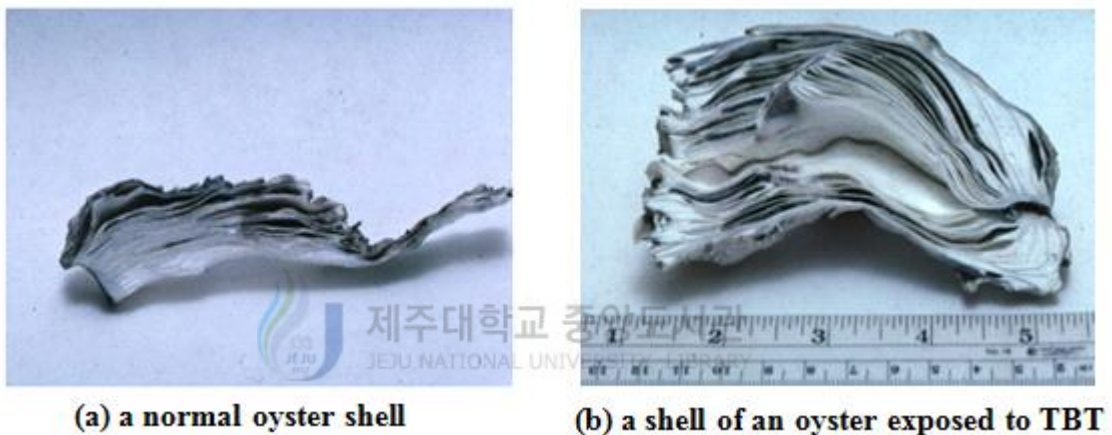


Fig. 34 The adverse effects of TBT on shell formation in the oyster[30]

Fig. 34는 TBT에 노출되어진 Oyster에 치명적인 영향을 미침을 보여주고 있다. 이처럼 해양생물 및 해양환경에 치명적인 악영향을 미칠수 있는 TBT는 미국에서는 사용이 규제되었으며, 영국은  $2\text{ng}/\ell$ , 일본은  $10\text{ng}/\ell$  를 허용기준으로 사용하고 있다. 2003년부터 국제해사기구(IMO)는 현재 TBT의 위해성을 인정하여, 2003년부터 TBT의 사용을 전면 금지하기 위한 방안을 모색하고 있는 것으로 알려졌다.[21][22] 이와 관련하여, 최근에 Marine Growth 및 부식의 대안으로서 페인트에 Nano 물질이 도핑된 페인트 관련 산업이 이슈화 되고 있다 [23]. Nanopaint는 친환경적인 물질로서 많은 연구와 개발이 진행되고 있으며, 본 연구에서는 나노물질로서 뛰어난 항균성을 [24] 가지고 있는 산화아연(ZnO)를 선정하여 페인트를 제작하였으며, 향후 TBT를 대체할 수 있는 친환경 페인트를 억

제 방안으로서 제안해본다.

## (2) 산화아연 나노페인트(ZnO Nanopaint)

Marine Growth는 최저해저면 Leg의 하중에 큰 영향을 미침을 시뮬레이션 결과에서 도출할 수 있었으며, Marine Growth로 인한 하중증가를 최소화시키기 위한 Marine Growth 성장억제의 가능성이 있는 ZnO Nanopaint 실험 결과를 간단히 소개해본다.

### - 시료 물질

Nano Paint 제작은 Alkyd resin(Korea), Thickner A(Vigneshwara Paits Ltd., India), Soya lecithin (Shreenidhi Oils and Foods Ingredinetes Pvt. Ltd., India), Mineral turpentine oil(Indian Oil Corporation, India), aluminum stearate and cobalt naphthenate(Sigma Aldrich, India) 이하의 첨가물의 혼합으로 이루어지며 ZnO 나노물질은 고에너지 볼밀링 시스템(Hige energy ball milling system)을 이용하여 크기 감소 법(Size Reduction methods)로서 제작한다.

### - 결과

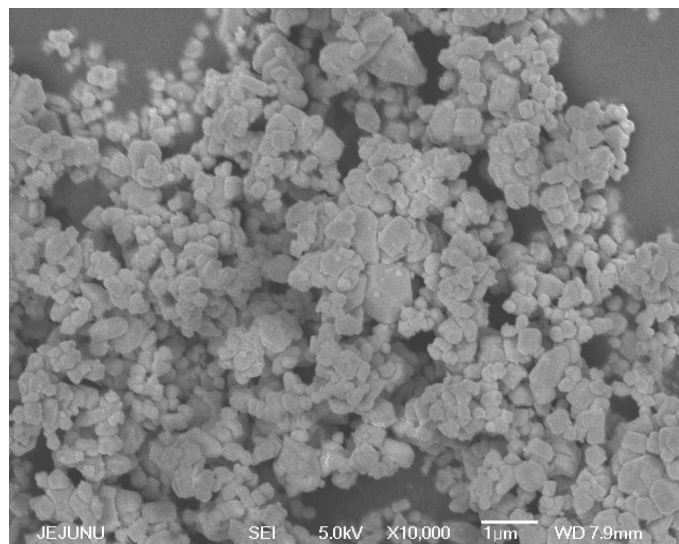


Fig. 35 FE-SEM micrographs of ZnO nanoparticles

Fig. 35 는 제작된 산화아연(ZnO) 나노 입자(Nanoparticle)의 FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscope) 이미지이며 큐빅형태로 100~200nm의 나노 입자들로 구성되어져 있는 것을 알 수 있다. 이는 마이크로 크기의 산화아연(ZnO)입자가 10시간동안의 볼 밀링 프로세스(ball milling process [25])로서 나노크기의 산화아연 입자로 축소 되어졌음을 보여준다.

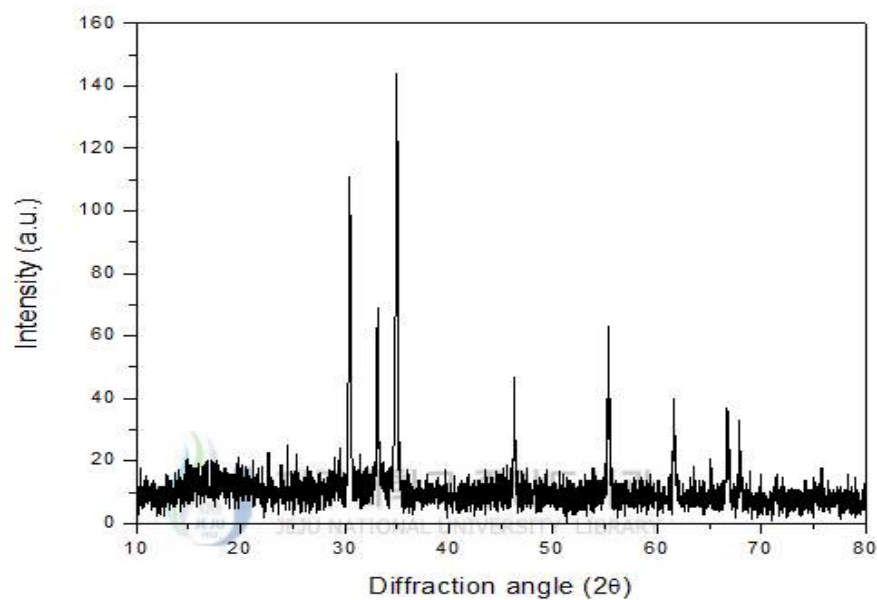
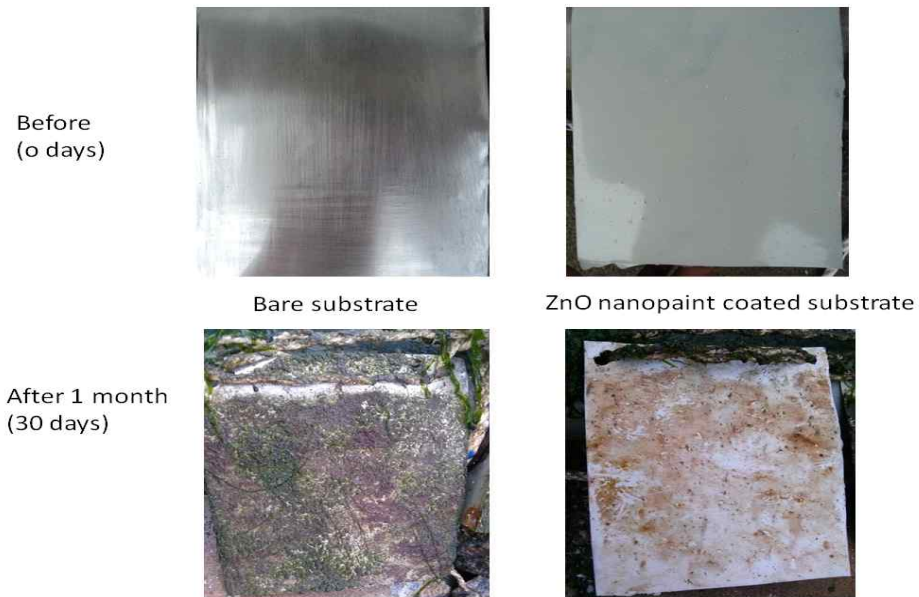


Fig. 36 X-ray diffraction pattern of ZnO nanopaint coatings on glass substrate

Fig. 36은 10시간동안의 볼밀링 프로세스로 인해 구성된 나노입자를 토대로 제작한 Nanopaint의 XRD(X-ray Diffraction) 측정 결과이다. 이 결과는 글래스 기판에 코팅된 ZnO Nanopaint가 홍아연광 상에 일치함을 보여주고 있다 [26][27]. 또한 알키드 레진(Alkyd resin)의 피크는 나타나지 않고 있음을 보여주고 있는데 이는 알키드레진이 비결정물질일 뿐만 아니라 ZnO 페인트 내의 피그먼트/바인더의 비율이 매우 높기 때문이다. 이렇듯 ZnO의 특성을 페인트 내에 도핑하여 제작된 ZnO Nanopaint를 강 기판에 브러쉬 코팅법(Brush coating method [28])로 코팅하여 실험하였다.

본 실험에서는 제주대학교 해양 연구소의 지원을 받아 수심 1m정도의 실제 바다 [29] 에서 Marine Growth 억제를 위한 ZnO NanoPaint 실험을 수행하였으며,

실험은 1개월동안 진행되었으며, 한달간 ZnO NanoPaint를 스테인레스 강 (Stainless steel)에 코팅하여 실험하였다



제주대학교 중앙도서관  
Fig.37 Photograph of bare and ZnO Nanopaint coated substrates  
(Before and after 30days in Sea)

Fig. 37은 ZnO NanoPaint의 1개월간의 실험결과를 보여주고 있으며, Marine Growth성장이 눈에 띄게 억제된 것을 볼 수 있다. 이는 ZnO NanoPaint가 Marine Growth억제에 큰 기여를 할 수 있는 가능성이 있음을 보여주는 결과이다.

## V. 결론

이 연구에서는 해상풍력발전기의 기초구조물인 Jacket을 GH Bladed ver4.2를 활용하여 OC4 Code Line을 바탕으로 설계하였으며, 수심 -45m의 해상에서 Marine Growth의 생성이 어떠한 영향을 미치는지에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- **고유진동수의 변화** : 타워의 아이겐모드(Eigen mode)에 따라 Marine Growth가 해상풍력발전기 기초구조의 고유진동수에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였으며, 2nd side-to-side, 2nd Fore-aft 모드 및 1st Torsion 모드에서 고유진동수가 감소하고 있다. 이와 같은 결과는 Marine Growth의 성장이 Blade의 가진진동수와 일치하여 공진주파수 범위내에 일치할 가능성이 커져 해상풍력발전기의 기초구조의 안전성에 영향을 미칠 수 있으므로 실제 해상풍력발전기 설계시 Marine Growth의 영향에 의한 주파수 분석은 필수적으로 요구된다.

- **섹션별 Marine Growth의 영향** : Transition Piece, MSL(X-받침목), 최저해저면 leg에서의 Marine Growth에 가장크게 영향을 받고 있는 섹션을 알아보기 위한 해석을 수행하였으며, Transition Piece의 경우 가장 큰 하중의 지배를 받고 있는 구간이었지만 Marine Growth의 영향은 약2%정도로 미미하였으며, MSL(X-받침목) 역시 Marine growth의 영향으로 인한 하중의 증가는 Transition Piece와 마찬가지로 약2~4%정도로 큰 영향은 받지 않았다. 해상에서 유구조(Flexible structure)의 형태인 Jacket의 경우 최저해저면 Leg(Rigid foundation)에서 Marine Growth의 생성으로 인해 구조 무게의 증가 및 표면거칠기의 변화로 인해 하중의 크기가 약 92%이상 증가하고 있었다.

- **타워아이겐모드(Eigen mode)에 미치는 Marine Growth영향** : Jacket과 같은 유구조형식의 기초구조의 경우 최저해저면 Leg에서 가장 큰 Marine Growth의 영향을 받고 있었으며 타워의 아이겐모드에 따라 미치는 영향이 Bending

Moment의 경우 최저해저면Leg의 전부재에서 Side-to-Side(My)에서 가장 크게 나타났다. 하지만 강부재의 횡단면 접합으로 구성된 Jacket 구조의 경우 앞축 (fore-axis)인 멤버1.5과 뒷축(aft-axis)인 멤버9.13의 축전단력에 미치는 영향은 다르게 나타났다. 단면의 접합면에 미치는 축하중의 경우 모든 최저해저면의 모든 부재에서 가장 큰 하중의 지배를 받고 있으나, 앞축 (fore-axis)의 축하중에는 Marine Growth의 영향이 크지 않았던 반면 뒷축(aft-axis)의 경우 큰 Marine Growth의 영향이 미치고 있었다.

- **DLC.1.1 Power Production** : 모든 풍속케이스에서 Marine Growth는 벤딩모멘트 및 축하중에 영향을 끼치고 있었지만 풍속이 증가함에 따라 Marine Growth의 영향이 커진다고 보기에는 어려움이 있었다 수심-45m 구간의 최저해저면 Leg에 풍속의 영향이 미치기는 어려운 것으로 나타났으며, Marine Growth의 영향은 파랑하중의 지배를 받고 있었다. 하지만 Jacket 구조의 경우 풍속이 증가함에 따라 앞축은 정격풍속구간에서 축전단력의 지배를 받고 있었으며 뒷축은 시동풍속구간에서 축전단력의 지배를 받고 있다.



- **Marine Growth의 두께 영향** : Marine Growth의 두께의 변화에 따라 무게 및 표면거칠기의 증가로 인해 관성 및 항력계수가 변동되어 Marine Growth의 생성 두께에 따라 하중에 큰 변화가 있었다. 이는 Marine Growth의 억제해상 풍력발전시스템의 유지 보수 과정에서 필수적이라는 것을 보여준다.

- **Marine Growth 성장 억제 방안** : Marine Growth는 해상풍력발전기 기초구조물의 최저해저면 Leg에 큰 영향을 미칠 수 있으며, Marine Growth 억제를 위한 방법으로서 TBT에 규제가 강화된 최근에 가장 이슈화 되고 있는 나노물질기반 페인트중에서 산화아연을 선정하여 직접 제작하고 실험해보았다. 제주대학교 해양연구소에서 약 1개월간의 실험을 수행하였고 이는 Marine Growth의 성장을 상당량 억제시켜줄 수 있었다. 친환경적인 소재인 Nanopaint는 해양환경에 치명적인 악영향을 미칠 수 있는 TBT의 대안으로서 큰 가능성을 가지고 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 이준신 "국내 해상풍력발전 현황 및 방향성 분석", 한국전력 녹색성장연구소, 2010
- [2] Wind Farm - Technical Regulations, Potential Estimation and Siting Assessment Edited by Gastón O. Suvire,: Chapter 2 Open Access "O&M Cost Estimation & Feedback of Operational Data" by T. Obdam, H. Braam, R.V. Pieterman and L. Rademakers.
- [3]<http://www.4coffshore.com/windfarms/jacket-or-lattice-structures-aid271.html>  
1 Jacket or Lattice structures.
- [4] Det Norske Veritas (DNV), "Design of Offshore Wind Turbine Structures", Offshore Standard DNV-OS-J101, 2010.
- [5] N. R. Forteath, G. B. Picken, R. Ralph and J. Williams, "Marine growth studies on the north sea oil platform Montrose Alpha", Mar. Ecol. Prog. Ser. Vol. 8, pp.61-68, 1982.
- [6] J. Wolfram, and A. Theophanatos, "The effects of marine fouling on the fluid loading of cylinders: some experimental Results", Offshore Technology Conference, 1985.
- [7] K.M. Rollins, K. G. Olsen, D. H. Jensen, B. H. Garrett, R. J. Olsen, and J.J. Egbert, "Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Analysis", Journal of Geotechnical and Geo Environmental Engineering, Vol. 132, No. 10, pp.1272-1283, 2006.
- [8] F. Vorpahl, W. Popko, and D. Kaufer, "Description of a basic model of the Upwind reference jacket for code comparison in the OC4 project under IEA Wind Annex XXX", Technical Report, Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology (IWES), 2011.
- [9] 제주 대정 해상풍력 해상기상탑 구매:기본 및 실시설계 종합보고서, 2012.
- [10] L.D. Chambers, K.R. Stokes, F.C. Walsh, and R.J.K. Wood, "Modern

approaches to marine antifouling coatings”, Surf. Coat. Tech. Vol. 201, pp.3642 - 3652, 2006.

[11] MID (The Marine Technology Directorate Ltd.), Appraisal of Marine Growth on Offshore Installation, MID Ltd, London, 1992.

[12] J. Wolfram, I. Jusoh, and D. Sell, “Uncertainty in the Estimation of Fluid Loading Due to the Effects of Marine Growth, Proceeding. of the 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 2, Glasgow, 1993.

[13][http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/11-12/MORE/enviornmental/marine\\_growth.html](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/11-12/MORE/enviornmental/marine_growth.html)

[14] R.S.W.M. Kingsbury, “The current and future levels of marine growth on offshore structures in U.K. waters, Appendix 2. Appraisal of Marine Fouling on Offshore Structures. A Report for MaTSU, Department of Energy, U.K, 1979.

[15] I. J. Msut, and J. W. Frina, “Effects of marine growth and hydrodynamic loading on offshore structures” , Jurnal Mekanikal, Vol.1, No. 1, pp.77-96, 1996.

[16] IEC 61400-3 wind turbines Part 3: design requirements for offshore wind turbines. IEC; 2009

[17] N.D.P. Barltrop, and A.I. Adams, “Dynamics of Fixed Marine Structures, Third Edition. Butterworth-Heinemann Ltd & Marine Technology Directorate Ltd., London, 1991.

[18] <http://www.calqlata.com/productpages/00021-help.html>

[19] J. Jonkman and W. Musial, “Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment” Technical Report NREL/TP-5000-48191 Dec 2010

[20] W. Shi, H.-C. Park, J.-H. Baek, C.-W. Kim, Y.-C. Kim and H.-K. Shin, “Study on the Marine Growth Effect on the Dynamic Response of Offshore Wind Turbines”, International Journal of Precision Engineering and



Manufacturing,

[21] [네이버 지식백과] 트리부틸주석 [TBT] (시사상식사전, 박문각)

[22] M. Lejars, A. Margailan, and C. Bressy, "Fouling release coatings: a nontoxic alternative to biocidal antifouling coatings", *Chem. Rev.* Vol.112, pp.4347 - 90, 2012.

[23] J.A. Callow, and M. E. Callow, Trends in the development of environmentally friendly fouling-resistant marine coatings. *Nat. Commun.* Vol.2, Article No-244, 2011.

[24] M. Premanathan, K. Krishnamoorthy, K. Jeyasubramanian, and G. Manivannan, "Selective toxicity of ZnO nanoparticles toward Gram-positive bacteria and cancer cells by apoptosis through lipid peroxidation", *Nanomedicine: Nanotech. Biol. Med.* Vol.7, pp.84-192, 2011.

[25] G. Subbiah, M. Premanathan, S.-J. Kim, K. Jeyasubramanian, and K. Krishnamoorthy, "Preparation of TiO<sub>2</sub> nanopaint by ball milling and investigation on its antibacterial properties", *Mater. Exp.* Vol.4 pp.393-399, 2014.

[26] R. Mohan, K. Krishnamoorthy, and S.-J. Kim, "Diameter dependent photocatalytic activity of ZnO nanowires grown by vapor transport technique". *Chem. Phys. Lett.* Vol.539-540, pp.83-88 (2012).

[27] R. Mohan, K. Krishnamoorthy, G.-S. Kim, S.-J. Kim, "ZnO piezoelectric fine wire gated graphene oxide field effect transistor", *Journ. Nanosci. Nanotech.* Vol.13 pp.3573-3576, 2013.

[28] S. Dieter, F. and Werner, *Paints, coatings and solvents.* 2<sup>nd</sup>ed. Weinheim:Wiley-VCH;1998.

[29] K. Krishnamoorthy, K. Jeyasubramanian, M. Premanathan, S. Geetha, H.-S. Shin, and S. J. Kim, "Graphene oxide nanopaint", *Carbon*, Vol. 72, pp.328-337, 2014.

[30] <http://ic.ucsc.edu/~flegal/etox80e/SpecTopics/TBT/>

## 감사의 글

가장 먼저 저의 지도교수님이신 김상재 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 학부생 2학년 때 저를 눈여겨 보시어 실험실로 인도해주시고 지금까지 저에게 많은 가르침을 주시고 많은 경험을 할 수 있게 만들어 주셔서 감사드립니다. 또한 풍력대학원 학생으로서 남부발전 인턴의 길을 열어주시어 저에게 큰 경험을 얻게 해주셨으며, 바쁘신 가운데 제 학위 논문의 심사위원장 및 심사위원을 맡아주셔서 부족한 저에게 따끔한 충고와 유익한 조언을 해주신 허종철, 고경남 교수님께 감사의 말씀을 드립니다. 학부생 3학년때 이후로 같은 연구실에서 고생해온 소운이와 이번 졸업논문을 준비함에 있어 큰 멘토가 되어준 대영이형 그리고 옆에서 많이 도와준 태현이에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 또한 학부생 및 대학원 생활을 함에 있어 많은 지식을 가르쳐 준 Kumar, Karthi에게도 또한 고맙다는 말을 전하며, 이번에 함께 졸업을 하게 된 Kumar, Ananth, Thiyagu, 그리고 소운이에게는 축하하다는 말과 동시에 그동안 정말 수고 많았다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 현재 인턴생활을 하고 있는 남부발전의 팀장님, 차장님 그리고 선배님들에게도 남부발전의 자료를 거리낌 없이 제공해주었으며, 많은 조언을 해주신 것에 큰 감사의 말씀을 드립니다. 이외에도 가장 힘든시기에 못난 제 옆에서 따끔한 충고와 따뜻한 위로의 말을 해주었던 우리 친구들에게도 고맙다는 말과 함께 우정 변치 말자는 말을 전하고 싶습니다.

마지막으로 언제까지나 부족하고 모자란 저를 사랑으로 보살펴주시는 부모님께 감사드립니다. 언제나 옆에서 걱정만 끼치게 해드려 항상 죄송한 마음뿐이었지만 앞으로는 부모님에게 떳떳하고 자랑스러운 아들이 되도록 하겠습니다. 모든 분들께 다시 한번 감사드리며 더욱더 노력하도록 하겠습니다. 감사합니다.

2014년 12월 25일

홍의용 올림