



### 工學博士 學位論文

# 서남해안에 적합한 자켓식 해상풍력 지지구조시스템에 관한 연구

A Study on a Support Structure System of Offshore Wind Turbines with Jacket-type designed for South-Western Coast



2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院

造船海洋시스템工學科 崔 邯 植 本 論文을 崔邯桓의 工學博士 學位論文으로 認准함



## 2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院



목 차

List of Table	S V
List of Figur	es ····· vii
Abstract	xi

제 2 장 해상풍력 지지구조	형식	9
2.1 개요		
2.2 기초형식 조사	1945	
2.2.1 중력 케이슨식	OF OF	12
2.2.2 모노파일식 …		12
2.2.3 트라이 포드식		14
2.2.4 자켓식		•••••15
2.2.5 스틸 중력식 기	기초식	16
2.2.6 모노-석션 케이	기슨식	•••••17
2.2.7 멀티-석션 케이	이슨식	17
2.2.8 부유식		
2.2.9 돌핀식		
2.2.10 트라이 파일스	<u>N</u>	19



	2.3	해외시	례조사
		2.3.1	Middelgrunden Wind Farm20
		2.3.2	Horn Rev Wind Farm21
		2.3.3	Nysted Wind Farm22
		2.3.4	Arklow Bank/Ireland Wind Farm23
		2.3.5	North Hoyle/Wales Wind Farm24
		2.3.6 \$	Scroby Sands Wind Farm25
		2.3.7	Barrow Wind Farm26
		2.3.8	Burbo Bank Wind Farm27
		2.3.9	Kentish Flats Wind Farm28
		2.3.10	Beatrice Wind Farm29
		2.3.11	Sheringham Shoal Wind Farm
			DITIME AND OCEAN
제	3 る	ነ 해상 <sup>.</sup>	풍력 지지구조물 설계하증 및 설계기준 정립
	3.1	개요	
	3.1 3.2	개요 설계히	·중···································
	3.1 3.2	개요 설계히 3.2.1	·중 ···································
	3.1 3.2	개요 설계히 3.2.1 3.2.2	·중
	3.1 3.2	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3	·중
	3.1 3.2	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4	-중
	3.1 3.2	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5	31 -중
	3.1 3.2 3.3	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 실계기	31 중
	<ul><li>3.1</li><li>3.2</li><li>3.3</li></ul>	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 설계기 3.3.1	31 중
	<ul><li>3.1</li><li>3.2</li><li>3.3</li></ul>	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 설계기 3.3.1 3.3.2	31 중
	3.1 3.2 3.3	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 설계기 3.3.1 3.3.2 3.3.3	31 중
	3.1 3.2 3.3	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 설계기 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4	· 중   · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	3.1 3.2 3.3	개요 설계히 3.2.1 3.2.2 3.2.3 3.2.4 3.2.5 설계기 3.3.1 3.3.2 3.3.3 3.3.4 3.3.5	· 중   · 31     · 종력하중(추력)   · 33     · 공력하중(추력)   · 33     · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·



	3.4.1 지반조사 자료	3
	3.4.2 시추조사 결과7	4
	3.4.3 구조물 위치 선정	6
	3.4.4 기초모델	6
3.	5 해상풍력 구조물의 설계방법	8
	3.5.1 한계상태 설계법	8
	3.5.2 해석조건	9
	3.5.3 하중계수	9
	3.5.4 재료계수	0

제	4 장 신	형식 지지구	·조 제안 …	••••••	••••••		••••••81
	4.1 개요	3	•••••••			••••••	81
	4.2 신호	형식 제안 …		<u>E M</u>	1		
	/ 3 TJ/	› · · · 드					
	1.0 4.0	5 에 기 또 된 1 저 도 저 :	레서 ㅁ테 .				
	4.5	1 3 540	개적 도열 "		3	2	00
	4.3	2 머드매트히	해석 모델 "				

제	5 る	· 구조해	석 및	결과분석				
	5.1	3차원 구	· 군해석		1945			
	0.1	511 전2	스 " 전해선		OH OF (	4		
		519 E	저체서					
		5.1.2 8 ~	그에ㅋ	퀴서				
	ΓO	-11.0 -1-1 -11.1 -1 -1	ᆖ매드여	에~걱				
	5.2	해식결과	·문식 ·	••••••	••••••		•••••••	yy
		5.2.1 정주	석해석	•••••	••••••	••••••	••••••	
		5.2.2 동주	적해석	•••••	••••••	••••••	••••••	•••••114
		5.2.3 머브	드매트	해석		•••••	••••••	••••••118

제	6	장	경제성	분석	121
---	---	---	-----	----	-----

6.1	개요	·····121
6.2	제작비 분석	······122
	6.2.1 파일 제작	······122
	6.2.2 자켓 제작	······123
	6.2.3 제작비 분석	······124
6.3	설치비 분석	······126
	6.3.1 개요	······126
	6.3.2 해상장비 현황	······128
	6.3.3 설치로지스틱 수립	······131
	6.3.4 설치비 분석	······135
6.4	경제성 분석	······137

게 7 자 겨르	INE IND OCC.	
세 / 경 실존		
감사의 글		<u>141</u>
참고문헌		143

1945

015



## List of Tables

Table	2.3.1 Middelgrunden Wind Farm20
Table	2.3.2 Horn Rev Wind Farm21
Table	2.3.3 Nysted Wind Farm22
Table	2.3.4 Arklow Bank Wind Farm23
Table	2.3.5 North Hoyle Wind Farm24
Table	2.3.6 Scroby Sands Wind Farm25
Table	2.3.7 Barrow Wind Farm26
Table	2.3.8 Burbo Bank Wind Farm27
Table	2.3.9 Kentish Wind Farm28
Table	2.3.10 Beatrice Wind Farm
Table	2.3.11 Sheringham Shoal Wind Farm
Table	3.1.1 International Codes for Offshore Wind Turbine
Table	3.2.1 Basic Parameters of Wind Turbine Class
Table	3.2.2 Drag Coefficients Cd
Table	3.2.3 Inertia Coefficients Cm
Table	3.2.4 Required Diameters per Frequency61
Table	3.3.1 Characteristics of Tower 66
Table	3.3.2 Characteristics of Turbine66
Table	3.3.3 Aerodynamic Load Cases67
Table	3.3.4 Characteristic of Sea Water68
Table	3.3.5 Design Water Depth68
Table	3.3.6 Extreme Current Velocity at MSL (m/s)69
Table	3.3.7 Current Velocity (m/s) at Water Depth
Table	3.3.8 Predicted Value(Hs, Tp) due to Wind70
Table	3.3.9 Significant Wave and Period



Table	3.3.10 Extreme Design Wave70
Table	3.3.11 Wave Breaking Check71
Table	3.3.12 Drag and Inertia Coefficient71
Table	3.3.13 Marine Growth(Based on EL)72
Table	3.4.1 Investigation Result for each Bole Hole74
Table	3.4.2 Settlement Calculation76
Table	3.5.1 Load Factor79
Table	8.5.2 Load Categories80
Table	1.3.1 Sea Data for West Coast89
Table	1.3.2 Installation Stability Analysis Models90
Table	5.2.1 Applied Material Properties108
Table	5.2.2 Applied Load Summary
Table	5.2.3 Von-Mises Stress Summary110
Table	5.2.4 Natural Frequency Summary114
Table	5.3.1 Offshore Crane Lists
Table	5.3.2 Crawler Crane Lists
Table	5.3.3 Jack-Up System Lists
Table	5.3.4 Barge Lists
Table	6.3.5 RCD Equipment Lists
	9% OF LN



## List of Figures

Fig. 1.1.1 Onshore and Offshore Wind Turbines2
Fig. 1.1.2 Installation Distribution for Onshore and Offshore Wind Turbine $\cdots\!$
Fig. 1.1.3 Project of 2.5GW Offshore Wind Farms in the Korea West-Sea
(KOWP, 2015)4
Fig. 1.2.1 Definition of an Offshore Wind Turbine5
Fig. 1.2.2 Environmental Impacts on Offshore Wind Turbine[Upwind] $\cdots \cdots 6$
Fig. 2.1.1 Substructure Type According to Water Depth(NREL)9
Fig. 2.1.2 Substructure Type According to Water Depth and Generator
Capacity10
Fig. 2.1.3 Installation Percentage of the Support Structure10
Fig. 2.2.1 Gravity Caisson Type12
Fig. 2.2.2 Monopile Type
Fig. 2.2.3 RCD Drilling
Fig. 2.2.4 Tripod Type15
Fig. 2.2.5 Jacket Type16
Fig. 2.2.6 Mono-Suction Caisson
Fig. 2.2.7 Multi-Suction Caisson
Fig. 2.2.8 Dolphin Type
Fig. 2.3.1 Middelgrunden Wind Farm20
Fig. 2.3.2 Horn Rev Wind Farm21
Fig. 2.3.3 Nysted Wind Farm22
Fig. 2.3.4 Arklow Bank Wind Farm23
Fig. 2.3.5 North Hoyle Wind Farm24
Fig. 2.3.6 Scroby Sands Wind Farm25
Fig. 2.3.7 Barrow Wind Farm26



Fig. 2.3.8 Burbo Bank Wind Farm27
Fig. 2.3.9 Kentish Wind Farm28
Fig. 2.3.10 Beatrice Wind Farm29
Fig. 2.3.11 Sheringham Shoal Wind Farm
Fig. 3.2.1 Applicability Ranges of Various Wave Theories(API-WSD, 2007)38
Fig. 3.2.2 Profile of Airy Wave41
Fig. 3.2.3 Profile of Stokes 2nd Order Wave42
Fig. 3.2.4 Profile of Solitary Wave
Fig. 3.2.5 Profile of Cnoidal Wave46
Fig. 3.2.6 Profile of Stream Function Wave48
Fig. 3.2.7 Distribution of Current Velocity Depending Water Depth53
Fig. 3.2.8 Single Degree of Freedom Mass-Spring-Damper System54
Fig. 3.2.9 Quasi-Static Response55
Fig. 3.2.10 Resonant Response
Fig. 3.2.11 Inertia Dominated Response56
Fig. 3.2.12 Upper : Dynamic Amplification Factor per Normalized Frequency 57
Lower : Phase Lag Versus Normalized Frequency
Fig. 3.2.13 Turbulent Dddies in a Wind Field(Van der Tempel, 2006)58
Fig. 3.2.14 Single Blade Passing Through Turbulent Eddy (above) Sampling 1P
Frequency All Three Blades (black, white, blue) Passing Through the Eddy at
3P Frequency58
Fig. 3.2.15 Soft to Stiff Frequency Intervals of a Three Bladed, Constant
Rotational Speed Wind Turbine
Fig. 3.2.16 Structural Model of a Flexible Wind Turbine System
Fig. 3.2.17 Frequency Intervals for a Variable Speed Turbine System61
Fig. 3.2.18 Typical Curve62
Fig. 3.2.19 1P and 3P Frequencies for 80, 100 and 120m Diameter Rotors $\cdots 63$
Operating at Constant Rotational Speed63



3.2.20 Occurrence of Wave Frequencies with Plotted 1P and 3P Fig. Frequencies for Properties of a 3 Bladed Turbine after Opti-OWECS off the Dutch Coast(Ferguson, 1998) ------63 Fig. 3.3.1 Coordinates of Wind Turbine -----67 Fig. 3.3.2 Definition of Water Levels(DNV-OS-J101) ------72 Fig. 3.4.1 Soil Investigation Site ------73 Fig. 3.4.2 N Value Distribution Graph ------75 Fig. 3.4.3 Foundation Model for Structural Analysis ------77 Fig. 3.4.4 P-y and T-z Curves for Foundation Model(PSI) ------77 Fig. 4.2.1 Connection between Jacket and Pile by Concrete Grout ......83 Fig. 4.2.3 Concept of Pile Centralizer, 1998-84 Fig. 4.2.5 Original Tower Foundation ------86 Fig. 4.2.6 Proposed Tower Foundation ------87 Fig. 5.1.1 Selected Wave Theory -----95 Fig. 5.1.3 Design Range of Natural Frequency for 5MW Offshore Wind Fig. 5.2.1 Structural Stress Ratio Fig. 5.2.3 Combined Stress Ratio for Row A -----102 Fig. 5.2.4 Combined Stress Ratio for Row B ------102 Fig. 5.2.5 Combined Stress Ratio for Row 1 ------103 Fig. 5.2.6 Combined Stress Ratio for Row 2 -----103 Fig. 5.2.7 Combined Stress Ratio for Pile above Seabed .....104 Fig. 5.2.8 Axial and Bending Stresses Distribution for Pile below Seabed .....105 Fig. 5.2.9 Stress Ratio Distribution for Pile below Seabed ------106



Fig.	5.2.10 FE Model for Connection Part between Jacket and Pile $\cdots\cdots\cdots107$
Fig.	5.2.11 FE Model for Tower Foundation108
Fig.	5.2.12 Boundary Conditions
Fig.	5.2.13 Applied Loading Concept
Fig.	5.2.14 Von-Mises Stress Contour for Connection
Fig.	5.2.15 Von-Mises Stress Contour for Tower Foundation
Fig.	5.2.16 Applied Loading Concept
Fig.	5.2.17 Deformed Shape
Fig.	5.2.18 Natural Frequency for Structure Type114
Fig.	5.2.19 1st Mode Shape for NJPM ·····115
Fig.	5.2.20 1st Mode Shape for NJTM116
Fig.	5.2.21 1st Mode Shape for GJTM117
Fig.	5.2.22 Wave and Period Frequency for West Coast
Fig.	5.2.23 Overturning Check Summary
Fig.	5.2.24 Bearing Check Summary
Fig.	5.2.25 Sliding Check Summary
Fig.	6.1.1 Installation Sequency of Offshore Wind Turbine System
Fig.	6.2.1 Percentage of Steels for Jacket Type[Unit : Ton, %]124
Fig.	6.2.2 Comparison of Fabrication Price
Fig.	6.3.1 Installation Sequence for Jacket Support Structure
Fig.	6.3.2 Installation Sequence for Jacket Support Structure
Fig.	6.3.3 Installation Sequence for Cast In Place Concrete Pile Foundation $\cdot 133$
Fig.	6.3.4 Installation Logistics for Proposed Jacket-Type
Fig.	6.3.5 Installation Percentage for Support Structures
Fig.	6.3.6 Comparison of Installation Price for Support Structures
Fig.	6.4.1 Total Construction Costs Percentage for Support Structures
Fig.	6.4.2 Total Construction Costs for Support Structures



## A Study on a Support Structure System of Offshore Wind Turbines with Jacket-type designed for South-Western Coast

Choi, Han Sik

Department of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering Graduate Ph. D of Korea Maritime University

# Abstract

The Korea Offshore Wind Power(KOWP) is being planned to construct offshore wind energy farms with an overall rated power of 2.5GW in the south-western coast until 2019.

Hitherto, various structural types of support structures for offshore wind turbines are being proposed but these structures are the lack of study for economic analysis or not performed. So it is difficult to confirm the economical superiority compared to existing types. The offshore structure with economical efficiency means to minimize the mobilizing equipments and short offshore construction period due to application of rapid installation method. The development of new support structure with economical efficiency is then necessary in the most basically view.

Accordingly this study proposes support structure of improved jacket-type with economical efficiency based on analysis results for structural geometries and installation logistics of jacket-type applied in development work for

KEY WORDS: Offshore Wind Turbine, Economical Efficiency, Improved Jacket-Type, Offshore Construction, Wind Energy Farm, Rapid Installation Method



offshore wind turbines of the south-western coast and test-bed of Jeju Wol-jeong-li. This proposed support structure was confirmed economical superiority that is possible shortening of offshore installation period and construction quality improvement through new connection method of jacket and pile.

Also, in order to compare structural adequacy of generally jacket and proposed jacket, static, modal and on-bottom analyses were carried out based on identical design data for offshore environmental and soil conditions of south western coast and aerodynamic load displayed in 5MW upwind report. In consequence, structural behaviour of generally jacket and proposed jacket is respectively showed combined and independent behaviour in accordance with connection method of jacket to pile. This result means that structural stiffness of generally jacket is better than proposed jacket from this paper. However, these support structures are satisfied with all criteria defined in design basis.

To compare economical efficiency for these structures, economic analysis was carried out based on total construction cost combined with fabrication and installation costs. As a result, the proposed jacket was able to confirmation to have economical superiority by minimization of the mobilizing equipments and reduction of offshore installation period through the introduction of new connection method of jacket to pile.

If the proposed jacket in this study is applied in development business of offshore wind energy farms with an overall rated power of 2.5GW in the south-western coast, this project will be able to save construction cost drastically. Further, this structural type will also be foundation of offshore wind turbines in the country.

KEY WORDS: Offshore Wind Turbine, Economical Efficiency, Improved Jacket-Type, Offshore Construction, Wind Energy Farm, Rapid Installation Method



## 제1장서론

#### 1.1 연구배경 및 필요성

#### 1.1.1 연구배경

최근 전 세계적으로 에너지 수요증가와 화석연료의 고갈 그리고 에너지 수급 불안정으로 인한 에너지 문제와 지구 온난화, 이상 기후 등의 환경문제에 직면 하고 있다. 이러한 문제는 화석연료의 과다 사용으로 인해 나타나며 현재 수준 의 에너지 공급과 사용 추세가 지속된다면 2050년 온실가스 배출은 배가 되고, 석유 수요증가에 대처할 수 없어 에너지 수급에 대한 불안 심리는 더욱 고조될 수밖에 없다. 따라서 지속적이고 배출을 저감하는 기술개발이 필요하고, 에너지 정책 마련과 인식 변화에 따른 에너지 혁명에 대한 구체적인 계획이 필요하다. 이에 각 국가는 미래 에너지 시장을 선점하기 위해 신·재생에너지에 대한 연 구와 보급에 집중하고 있다.

신·재생에너지로는 수소 에너지, 연료 전지, 태양 에너지, 풍력, 수력, 지열 에너지, 해양 에너지, 바이오 에너지 등이 있다. 이 중 해양 에너지는 해상풍력, 파력, 조류, 조력, 온도차 등을 에너지원으로 이용하여 전기를 생산하는 재생에 너지 중 하나이다. 특히 삼면이 바다인 국내 지형적 특성을 적극 활용한다면 발전 가능성이 매우 크고, 결국 세계 에너지 시장에서 경쟁력을 확보할 수 있 는 동력이 되므로 국가적으로 기대하는 바가 매우 크다.

특히, 풍력에너지는 오염 물질을 배출하지 않는 무한정의 에너지와 비교적 높 은 효율, 시장 경쟁력 등을 갖추고 있어 세계적으로 설치 용량이 가장 빠르게 증가하고 있는 에너지원이다. 국제에너지기구(International Energy Agency)는 풍력에너지를 신·재생에너지 중 가장 진보적인기술이라 판단하였으며, 현재



- 1 -

여러 국가에서 풍력 발전을 위한 기술 개발 및 발전 용량 확보가 이뤄지고 있 으며, 유럽의 몇몇 국가에서는 총 전력량의 15~30%를 풍력에너지로 대처하고 있다(IEA, 2013). 이처럼 풍력 발전은 전 세계적으로 급성장하고 있는 기술로서, 대규모의 설치비용 없이도 발전단지를 건설 할 수 있을 정도로 경제적인 문제 도 많이 개선되었다.

풍력발전은 설치 장소에 따라 육상 및 해상 발전으로 분류되고, 초기 풍력발 전 시장은 육상 풍력 발전을 위주로 발달했지만, 일정량과 일정 속도 이상의 바람과 넓은 공간의 필요로 인해 설치 장소가 한정적이며, Blade이송 길이의 한 계로 대형화가 어렵고, 발전기의 가동 소음과 그림자, 경관방해 등으로 민원이 야기된다는 여러 가지 단점으로 인해 해상풍력발전이 새로운 대안으로 각광받 게 되었다. 해상은 육지에 비해 바람의 난류와 높이나 방향에 따른 풍속변화가 적은 것이 특징이다. 해상풍력발전기의 풍력시스템에 대해서는 소음이 육상만 큼 문제가 되지 않기 때문에 육상에서는 날개 끝 속도를 60m/s정도로 제한하지 만 해상에서는 100m/s를 초과하는 고속화와 대형화가 가능해진다. 이러한 장점 들로 인해 여러 국가들은 대형화, 고속화 풍력발전기를 경쟁적으로 개발하여 많은 해상풍력발전단지를 계획 중에 있다.

하지만, 해상상태에서는 작업여건이 불리하여 작업일수가 극히 제한될 수 있 으므로 과대한 설치비용의 문제점과 고가의 높은 유지보수 비용 그리고 육상에 비해 작업 공간의 한계성, 접근의 어려움 등은 극복해야 할 문제이다. 또한, 발 전설비가 해양에 설치되기 때문에 강한 바람과 파도 그리고 염분성분으로 육상 풍력발전에 비해 더욱 높은 기술이 요구된다.



Fig. 1.1.1 Onshore and Offshore Wind Turbines



#### 1.1.2 연구필요성

Fig. 1.1.2는 육상 및 해상풍력발전에 소요되는 비용을 나타낸 것으로 육상풍 력의 경우 사업비의 60% 정도를 터빈이 차지하지만, 해상풍력의 경우 터빈 비 중은 낮고 해상기초구조물, 타워, 케이블시공 등의 비중이 상대적으로 높다. 특 히, 지지구조물 및 기초의 제작과 설치, 유지·관리비용의 비율이 시스템 전체 설치비용의 최소 30%를 차지하며, 수심이 깊어지면 50%에 이를 정도로 높아지 게 된다. 이는 긴급수리 또는 정비를 위한 고비용 문제뿐만 아니라 지속적인 발전설비 감시를 위해 특별선박을 유지해야 하는 등 유지관리에 어려움을 갖고 있기 때문이다. 그리고 태풍에도 견딜 수 있는 발전설비제작과 태풍 상륙 시에 발전설비 가동을 철저히 통제하기 위한 어려움도 존재한다. 이로 인해 해상풍 력발전 생산기업은 기술문제 해결과 정비비용에 많은 손실을 감수하고 있다. 따라서, 기술개발을 통해 경제성이 높고 경쟁력 있는 지지구조를 개발할 경우, 그 파급효과가 육상풍력에 비해 상대적으로 크다(한국전력기술, 2010).



Fig. 1.1.2 Installation Distribution for Onshore and Offshore Wind Turbine

국내 해상풍력발전은 2010년 제주 월정 해상실증단지에 최초로 2MW급이 설 치되었고, 이후 2011년 두산중공업에서 동일 해상 실증단지 내에 3MW급 해상 풍력터빈을 설치한 경우를 제외하고 해상풍력발전기 설치 사례가 없다. 이 두 개의 해상풍력발전 지지구조형식은 모두 자켓식(Jacket Type)이 설치되었다.

한편, 정부에서 발표한 Multi-GW급 해상풍력발전단지 조성(TOP-3)추진 로드 맵에 따르면 대규모 해상풍력발전단지가 전북 위도에서 전남 안마도 해상지역



에 조성되는 것으로, 산업통상 자원부는 2008년 10월부터 2년 동안 우리나라 전체 해상을 대상으로 풍황, 수심, 계통연계조건, 해안과의 이격거리, 변전소 이 격거리, 확장성 등을 조사해 서남해안권중 부안·영광지역 해상을 최적지로 선 정했다. 이들 해역에 실증단지 조성을 시작으로 2019년까지 3단계로 나누어 총 2.5GW 규모의 대규모 해상풍력발전단지를 건설하게 된다. 투자 규모는 약 10조 원이며, 이중 정부는 해상구조물 등의 기술개발에 290억원을 지원하고, 나머지 발전기 개발·설치, 지지구조물 설치·계통연계 등 대부분의 예산은 민간에서 투자하게 된다.

또한 해상풍력단지 개발에 장기간에 걸쳐 대규모 투자가 이루어지고, 인허가 등 해결해야 할 문제가 많으므로 원활한 사업추진을 위해 '한국해상풍력추진단' 을 구성·운영 중에 있다.



Fig. 1.1.3 Project of 2.5GW Offshore Wind Farms in the Korea West-Sea (KOWP, 2015)

그러나, 국내 서남해안의 경우 지반조건은 퇴적층이 10~60m로 열악하고, 태풍 의 경로에 위치하고, 최대조위차가 약 8m~10m로 경제적인 구조형식 개발을 통 해 경쟁력을 확보할 필요가 있다.



#### 1.2 연구목표 및 내용

#### 1.2.1 연구목표

해상풍력발전은 블레이드의 공력특성을 이용하여 바람의 운동에너지를 회전 에너지로 바꾸고, 발전기를 통해 전기에너지로 변환시키는 장치인 터빈 (Turbine)과 터빈을 지지하는 타워(Tower) 그리고 이들 상부 구조시스템(터빈+ 타워)을 지지하는 하부구조(Substructure)와 기초(Foundation)로 크게 나눌 수 있 다.



Fig. 1.2.1 Definition of an Offshore Wind Turbine

해상풍력 지지구조는 해상에 설치되는 블레이드, 너셀, 타워 등의 상부발전시 설물을 설계수명 동안 안전하게 지지하여야 하며, 상부하중의 영향을 일정수심 깊이 아래의 해저지반에 전달하기 위한 구조시스템으로 정의될 수 있다. 기존 의 석유시추를 목적으로 설치한 해상구조물은 연직하중이 약 5,000~30,000톤으



로, 수평하중의 10배 이상 되기 때문에 수평하중의 영향을 고려하지 않지만, 해 상풍력구조물의 경우 바람, 파도, 조류 등에 의한 수평하중의 크기가 연직하중 에 비해 매우 크기 때문에 수평하중의 평가가 매우 중요하며, 지속적인 반복하 중으로 인한 피로하중도 중요한 외력으로 고려되어야 한다(윤희정 등, 2009).

해저지반에서 비교적 먼 높이에 수평하중의 중심축이 존재하여 기초가 부담 해야 할 모멘트가 상당히 크므로, 이런 하중특성들을 반영할 수 있는 최적의 기초형식 선정이 필요하다. 바다의 염도나 해양부착물, 설하중, 선박통행량, 해 양쓰레기 및 기초주변 매설파이프나 케이블과 같은 영향 인자들도 추가적으로 고려되어야 할 사항이다.



Fig. 1.2.2 Environmental Impacts on Offshore Wind Turbine[Upwind]

해상풍력발전은 육상풍력발전과 달리 높은 풍력에너지 밀도를 가지며, 난류나 풍력에너지 감소를 유발하는 여러 요소가 사라져, 균일한 풍향과 풍속 확보와



대규모 단지건설이 가능하다. 주거지역이 아닌 해상에 설치되어 산림훼손, 소 음, 진동과 같은 민원으로부터 비교적 자유롭고, 파력이나 조력과 같은 신재생 에너지 개발과 연계한 복합발전단지 건설도 가능하다는 장점을 갖고 있으나, 해상에 설치되어 상부를 지지하는 구조물 건설이 필요할 뿐만 아니라, 파도와 조류, 풍속 등 고려해야 할 해양 환경인자가 많아, 육상풍력대비 2배 이상의 설 치 및 유지·보수비용이 발생한다(한국풍공학회, 2010).

해상풍력 지지구조는 크게 고정식(Fixed Type)과 부유식(Floating Type)으로 나눌 수 있고, 수심 25m 이하는 모노파일(Mono-Pile Type)이나 중력식(Gravity Type)이 적합하고, 40m까지는 트라이포드(Tripod Type)나 자켓(Jacket Type), 그 이상의 수심에서는 부유식을 사용하는 것이 경제성과 안정성 측면에서 적합한 것으로 알려져 있다(박우선 등, 2010).

해상풍력은 가스나 석탄, 육상 풍력에너지와 같은 수준의 비용감소를 위해서 는 대용량, 대단지와 같은 규모의 경제(Economies of Scale)가 필요하다. 따라서, 점차 육상에서 멀리 떨어진 깊은 바다로 이동하고 있다. 해안에서 멀어질수록 제작, 운반, 설치 등 건설에 소요되는 비용과 기술력을 필요로 하게 된다(송명 관 등, 2010). 지지구조물의 건설비용 절감을 위한 노력이 최근의 산업동향에 맞추어 전 세계적으로 진행되고 있는 가운데, 신형식 하이브리드 지지구조물에 대한 연구와 관심이 높아지고 있다.

앞서 언급하였듯이 제주 월정 해상실증단지에 설치된 2MW급과 3MW급 해상 풍력발전 지지구조형식은 모두 자켓식(Jacket Type)이 설치되었고, 현재 서남해 안 해상풍력지지구조 형식 또한 자켓식으로 기본설계가 완료되어 있다. 그러나, 이들 해상풍력 지지구조물은 석유시추 구조물에서 사용하던 형식과 설치방법을 적용하여 경제성 측면에서 효과를 보지 못했다.

따라서, 본 연구에서는 대단지로 개발될 서남해안 해상풍력발전단지 개발에 맞춰 현재의 자켓식을 서남해안의 특성에 적합한 구조로 개선하여 물량을 절감 하고, 해상 작업을 최소화한 경제성을 갖춘 신형식 지지구조를 제안하고자 한 다. 나아가 제안된 신형식 지지구조물(Substructure)이 해상풍력발전산업 전반에 확대되어 기반기술의 확보에 기여하는데 연구목적을 두고 있다.



-7 -

#### 1.2.2 연구내용

본 연구는 제주 월정리 해상 실증단지에 설치된 자켓식과 서남해안 해상풍력 발전단지 개발사업의 기본설계에 적용된 자켓식 지지구조물에 대해 전반적인 구조형상 및 특징을 조사하여 서남해안의 환경 및 지반 특성에 적합하도록 구 조개선을 통해 이들 자켓형 대비 물량절감 및 해상작업을 최소화한 경제성을 갖춘 개선된 해상풍력 지지구조를 제안하는데 목적이 있다.

이를 위해 제 1장에서는 본 연구를 수행하게 된 배경과 필요성 그리고 본 연 구를 통해 구현하고자 하는 연구목적을 기술하였으며, 제 2장에서는 다양한 해 상풍력발전 지지구조들의 구조적인 특성과 설치방법을 기 수행된 프로젝트와 국내·외 사례조사를 통해 살펴본다.

제 3장에서는 해상풍력 지지구조 설계시 적용되는 설계데이터를 각국의 설계 기준을 바탕으로 분석하여 본 연구에 적용할 설계기준서를 정립하고, 제 4장에 서는 기존의 자켓식 해상풍력발전 지지구조물의 구조적인 특성과 서남해안 해 역의 특성을 분석하여 설치시 공사기간을 단축시키고, 서남해안에 적합한 구조 로 개선하여 전체 물량을 절감하고, 해상작업을 최소화할 수 있는 경제성을 갖 춘 신형식 지지구조를 제안한다.

제 5장에서는 본 연구에서 다루는 해상풍력발전 지지구조물에 대한 정·동적 구조해석을 통해 각 구조형식의 응력과 변위 그리고 고유진동수에 대한 구조적 인 특성을 비교·검토하고, 또한, 본 연구에서 제안할 스커트 플레이트(Skirt Plate)를 머드매트에 설치하였을 경우 기존형식 대비 해양외력에 대한 저항성이 얼마나 향상되는지 확인한다.

제 6장에서는 기존의 자켓형과 본 연구에서 제안한 자켓형 지지구조에 대한 경제성 분석 수행을 위해 다양한 해상풍력발전 지지구조물에 대한 설치과정을 분석하여 최적의 설치공정을 수립한다. 이를 기반으로 각 지지구조형식의 제작 비와 설치비를 산정하여 경제성 분석을 수행한다. 마지막으로 제 7장에서는 본 연구에서 수행된 연구결과를 정리하고, 더 나아가 향후 추가연구가 필요한 범 위를 제시한다.

## 제 2 장 해상풍력 지지구조 형식

### 2.1 개요

해상풍력발전용 지지구조물의 주요역할은 풍력터빈에서 발생하는 하중들을 상부구조와 일체화되어 이들 하중을 분담하고, 전체 구조물을 지지하는 지반에 원활히 전달하는 것이다. 따라서, 해상풍력은 육상풍력과 달리 풍력발전기를 해 상에 설치할 때 사용되는 기초 즉, 지지구조물의 설치 및 시공기술이 가장 중 요한 핵심기술이다. 그러므로 지지구조물의 운송 및 설치시 구조안전성과 경제 성을 확보하는 방안에 대한 고려가 필요하며, 육상에서 제작하여 현장까지 운 반 후 설치작업이 진행되기 때문에 각 과정이 경제적이고 합리적이어야 한다. 또한 설치 과정에서는 구조적인 손상이 발생하지 않도록 각 단계에서 예상되는 작업방법과 위험도를 분석(Risk Analysis)하고, 동원가능한 장비의 용량 등을 고 려하여 설계에 반영해야하므로 어렵고 중요한 기술이라고 할 수 있다.

Fig 2.1.1은 수심별 해상풍력 지지구조형식의 비용을 나타낸 것으로 수심이 깊어질수록 파일로 지지되는 트라이포트나 자켓 구조형식이 주를 이루고 대수 심이나 고정식이 불가능할 경우 부유식 구조 설치가 필요하다.

1945



Fig. 2.1.1 Substructure Type According to Water Depth(NREL)



아래 Fig. 2.1.2와 Fig. 2.1.3에서 여러 가지 해상풍력발전 지지구조형식들 중 모노파일이 다양한 수심 및 발전용량 대비 가장 많이 사용되었고, 수심에 따른 지지구조물의 구조형식 및 특징을 보면, 수심이 얕은 곳(약 10m 내외)에서는 중 력식이 가장 많이 사용되었다. 특히, 수심이 깊어질수록 중력식보다 파일로 지 지되는 자켓, 모노파일 그리고 트리플 구조가 주로 사용됨을 알 수 있고, 또한, 수심이 깊어질수록 발전용량이 크다. 이것은 대형화 및 경쟁력 강화를 위해 원 양심해로 이동 중 임을 알 수 있다.



Fig. 2.1.2 Substructure Type According to Water Depth and Generator Capacity



Fig. 2.1.3 Installation Percentage of the Support Structure



#### 2.2 기초형식 조사

해상풍력 지지구조는 그 형식에 따라 크게 고정식과 부유식으로 나눌 수 있고, 고정식은 설치수심과 발전구조물 크기에 따라 다음과 같이 분류된다.

① Monopile / Guyed Monopile

② Multiple – Piles(Tripod)

③ Jacket

④ Concrete & Steel Gravity Base

(5) Mono & Multiple(Tripod)-Suction Caisson

이들 구조물 형식 중 자켓식은 석유와 가스 산업에서 널리 쓰이고 있는 구조 형식이고, 이러한 기술로부터 풍력터빈기초에 차용할 수 있다. 하지만 위 2개의 산업은 하중 조건과 경제적인 요건들이 다른 점을 고려하여 다음과 같은 요소 들을 주의하여 풍력터빈 지지구조를 설계해야 한다.

① 석유나 가스 산업 구조물에 비해 수직 하중이 일반적으로 매우 작다. 반면
에 수평하중과 그에 따른 모멘트의 비율은 훨씬 증가한다.

② 풍력발전을 위한 설비는 석유나 가스 산업처럼 한(1)기가 건설되는 것이 아니기 때문에 경제적인 지지구조가 요구된다.

③ 설계는 극한 상태에서의 조건보다 동적응답과 사용시 피로검토에 의해 결정되어 진다.

또한, 해상풍력발전에서 높은 가격을 결정짓는 주요 요소 중 하나인 터빈 기 초 부분은 육상기초 부분과 다음과 같은 점을 비교해야 한다.

① 높은 타워에 의해 상부구조물을 지지함(수심에 의한 부가적인 높이)

② 외력에 대한 건전성과 해양 환경(바람, 파도, 조수)에 의해 발생하는 전도 모멘트

③ 지반 조건에 따른 경제성과 적용 가능한 형식의 결정



#### 2.2.1 중력 케이슨식

중력식은 자중이 전도모멘트에 저항하는 구조형식으로 낮은 수심에 적용되었 으나 30m 수심에 적용된 사례(Thornton Bank, 2008)도 있다. 주로 육상에서 제 작되어 해상크레인을 이용해 설치한다. 육상 제작과 양생을 위한 부지확보가 필요하고, 구조물의 중량이 크기 때문에 운반·설치를 위한 대형 해상장비가 필요하나, 해저지반이 양호한 수심 15m이내의 조건에서 가장 공사비가 저렴한 형식이다.

중력 케이슨식 구조는 Fig. 2.2.1과 같으며, 덴마크의 해상풍력 하부구조물에 주로 사용되고 있는 방법으로서, 자중과 해저면의 마찰력을 이용하여 설치하게 된다. 방파제에 많이 사용되어온 공법으로 실적이 많아 신뢰성이 높다. 이 방법 은 육상에서 사전 제작된 케이슨을 운송하여 해상에 직접 설치하므로 해상작업 량이 적어 시공을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나, 수심 10m 이상의 해 역에서는 기초에 작용하는 파력에 저항하기 위하여 대규모 구조물이 요구되고 경우에는 제작 및 설치가 어렵고 그에 따른 제작 및 시공비용이 증가하게 된 다. 또한, 해저지반이 불량할 경우 부등침하나 편심경사로 인한 안정성이 문제 가 될 수도 있다.



Fig. 2.2.1 Gravity Caisson Type

#### 2.2.2 모노파일식

해저면에 대구경의 파일을 고정시키고, 중앙부에 철근콘크리트로 그라우팅하여 해저면에 고정하는 개념이다. 해저기초구조물과 풍력터빈의 타워는 플랜지



로 연결된다. 모노파일은 용접된 파이프 형태이며, 이를 항타 또는 드릴링으로 굴착하여 해저면에 고정한다. 따라서 설치 시 해저면 토양에 크게 영향을 받게 되며 해저면이 경암인 경우 상대적으로 유리하고, 수심이 25m이하의 얕은 바다 에 사용된다.



Fig. 2.2.2 Monopile Type

구조가 간단하여 현재까지 대단위 해상풍력단지에서 가장 많이 사용되고 있 다. 하지만 파일의 직경이 커지는 경우 신규 굴착 장비가 도입되어야 하며, 파 일의 제작비용은 작지만 시공비용이 많이 소요된다. 설치 후 해저면 강성이 저 하될 수 있으며 풍력터빈의 해체시에 어려움이 따른다. 이러한 모노파일 시공 절차는 다음과 같다.

① 모노파일의 이송 : 모노파일은 직경 3.5~5.0m, 두께 40~50mm이며 후판 을 로울러로 곡가공하여 제작한다. 바지선 등을 이용하여 현장 이송한다.

② 모노파일의 타설 : 모노파일을 설치 위치에 SEP(Self Elevation Platform)바 지를 이용하여 고정하고 타격공법 또는 드릴링 공법을 이용 해저면의 설계 깊 이까지 타설한다. 타격공법은 비교적 연약지반인 경우에 가능하며 디젤해머 또 는 유압해머를 이용한다. 우리나라에서는 아직 3m이상 파일의 타격공법 시행경 험이 없다. 드릴링공법은 초기위치를 타격공법 등으로 설정한 후 Fig. 2.2.3과



같이 RCD(Reverse Circulation Drilling) 장비를 파일내부에 설치하고 해저면을 드릴링하여 파일을 근입시키는 공법으로 연암층과 같은 암반층에 사용한다. 이 때 근입 깊이는 통상 연암층에서 파일직경의 2-3배 정도이다. 우리나라 대부분 의 해역 해저면에 암이 존재함으로 드릴링 공법은 사용 가능성이 높다.

③ 모노파일의 내부 채움 공사 : 모노파일 내부는 안정성 향상을 위하여 철근 콘크리트로 그라우팅 한다.

④ 상부타워 연결부 설치공사 : 사전에 제작된 상부타워와 연결부를 조립 설 치한다. 이때 미세조정이 가능하도록 연결부위가 설계되어야 한다.



Fig. 2.2.3 RCD Drilling

#### 2.2.3 트라이 포드식

수심이 깊어지고 터빈이 커지면 모노파일 또한 너무 커져서 현재의 기술력으 로는 설치가 불가능해지고, 케이슨 또한 비경제적으로 커지게 된다. 깊은 수심 에서는 트라이포드 혹은 테트라포드 같은 다수의 지지점을 가지는 것이 좀 더 효과적이다. 이러한 기초는 간단한 강구조물로 설치되어 터빈타워를 지지하게 된다. 트라이포드의 장점은 보강재를 구조물 어느 곳에나 설치가 가능하기 때 문에 타워의 길이에 제약을 받지 않는다. 그러므로 동적 응답에 대한 요구사항



들을 쉽게 충족시킬 수 있다. 이러한 트라이포드 기초는 3개의 다리를 갖는 기 초방식이며, 중앙의 Steel Pipe에 달려있는 Steel Frame은 타워에서 받는 하중을 3개의 Steel Pile에 전달하는 역할을 한다. 이 3개의 파일은 해저면으로 지반조 건에 따라 10~20m 까지 관입된다. 이 트라이포드 기초의 장점은 비교적 깊은 수심에 적합하고 설치를 위한 준비기간이 적은 편이나 3개의 파일을 설치하는 데에 비용과 각 연결점에서 발생하는 피로현상에 대한 고려가 필요하다. 또한 모노파일 형식과 마찬가지로 많은 암석이 있는 지반에는 적합하지 않고 수심이 얕은 지역에는 적합하지 않다. 왜냐하면 얕은 수심에서는 이러한 하부 구조형 태로 인해 수리나 정비를 하기 위한 선박의 접안에 문제가 되기 때문이다.



Fig. 2.2.4 Tripod Type

#### 2.2.4 자켓식

자켓형식은 석유 및 가스 시추산업에 많이 사용되는 지지구조물로 트러스형 상을 갖고 있어, 파력이 큰 곳에 유리한 구조형식이다. 수심 20m~80m까지 대수 심에 적용되며, 공장에서 모두 제작하여 한 번에 설치하는 것이 일반적이다. 부 재간 많은 용접으로 인해 타 형식에 비해 제작비 부담이 증가하게 되고, 용접 부 피로검토에 의해 설계가 지배될 가능성이 높다. 자켓 길이가 긴 경우에는 운반과 설치시의 안정성에도 주의해야 한다. 대표적인 적용사례는 영국의 Beatrice 프로젝트로 수심 45m조건에 설치되었다.

Jacket 기초는 Piles, Jacket, Transition Piece의 3개 구조로 구성된다. Jacket



은 K-, N-, X-brace에 의해 보장 되어지는 3~4개의 다리(Leg)를 갖는 특징이 있다. 4개의 다리를 갖는 Jacket의 Main Pile은 X-brace에 의해 보강되어진다. 진동이 덜하고 큰 크기의 풍력터빈에 적합하지만 모노파일 보다 훨씬 높은 강 성으로 인해 구조물의 첫 번째 고유진동수가 코드(Code)에 명시된 범위를 만족 시키기 힘들다. (참고 : 강성이 4배 올라가면 고유진동수는 2배 올라간다.) 만약 고유진동수를 낮추려면 더 가느다란 타워가 필요하게 된다. 대안으로는 허브의 높이가 증가되어야 한다. 주요부재와 보강재의 접합부에서 발생되는 피로에 의 한 파괴가 일어나기 쉽고, 구조물을 설치 지역에 옮긴 후 파일링 작업 후 그라 우팅이 필요하기 때문에 설치 기간이 많이 든다.



Fig. 2.2.5 Jacket Type

#### 2.2.5 스틸 중력식 기초식

스틸 중력식 기초(Steel Gravity Base)는 콘크리트 중력식 케이슨의 방법과 유 사하다. 철근콘크리트 대신에 해저면에서의 평평한 스틸 상자의 위 원통형 스 틸 튜브가 사용된다. 스틸 중력식 기초의 크기는 보통 14 X 14m(혹은 직경 15m의 원형 기초)이고, 수심이 4~10m되는 곳에 설치가 된다.(풍력 터빈 로터의 직경이 65m일 때 기준) 스틸 중력식 기초는 기존의 콘크리트 기초보다 상당히 가볍다. 마감된 기초가 약 1,000톤 정도 되지만, 스틸 구조는 80-100톤 정도뿐 이 되지 않는다. 비교적 적은 하중의 바지선에 의해 운송되고 가벼운 무게의 크레인을 사용함으로써 많은 기초들을 빠르게 설치가 가능하다. 중력식 기초들



은 밀도가 높은 광석인 감람석으로 채워지며, 이것에 의해 기초는 파도와 빙하 에 기인한 압력에 충분히 견딜 수 있게 된다. 스틸 중력식 기초의 끝 부분에 큰 암석이나 바위들을 놓아 부식을 방지하는 것이 일반적이다. 이러한 이유 때문 에 이것은 현저한 부식이 예상되는 지역에서는 비교적 많은 돈이 드는 편이다.

#### 2.2.6 모노-석션 케이슨식

모노-석션 케이슨(Mono-Suction Caisson)은 풍력터빈을 지탱하는 기둥과 그 기둥에 이어진 Suction Caisson으로 구성된다. 이러한 구조에 의해 기둥에서 전 달되는 하중은 아래의 Suction Caisson으로 전달되게 된다. 풍력터빈 타워는 지 탱하는 기둥에 평균 해수면 이상의 높이에서 설치된다. 이 기초는 흡사 양동이 를 뒤집어 놓은 것 같이 생겼다. Mono-Suction Caisson 설치시 케이슨이 위치할 해저면을 조금만 파내어 케이슨을 위치시키고 후에 케이슨 안에 갇혀진 물이 나오면서 지반을 빨아들여 최종 위치를 잡는다. 이러한 공사의 장점은 장비를 줄이는데 있는 것이 아니라 간단한 시공 절차에 있다.



Fig. 2.2.6 Mono-Suction Caisson

#### 2.2.7 멀티-석션 케이슨식

멀티-석션 케이슨(Multiple Suction Caisson)은 기존의 트라이포드 구조물이 파일 대신에 석션 케이슨으로 사용된 형태이다. 설치방식은 모노-석션 케이슨



의 경우와 동일하며 하부 케이슨을 제거하고 파일로 대체할 수도 있다. 이러한 방식의 구조물은 수심 20~50m에 적합한 구조이다.



Fig. 2.2.7 Multi-Suction Caisson

#### 2.2.8 부유식

부유식 지지구조(Floating Structure)는 플로팅 플랫폼(Floating Platform) 위에 풍력발전기를 설치하는 방법으로서 구조물의 설치, 관리 및 철거 비용의 절감 등 몇 가지 이점이 있으며, 가장 중요한 이점은 50m 이상의 수심지역에 설치가 가능하다는 점이다. 이러한 점은 얕은 해상구역이 없거나, 또는 접해 있는 바다 의 대부분이 심해인 국가들에게는 최대의 이점으로 작용할 수 있다. 하지만, 플 로팅 플랫폼 및 풍력발전기의 동적 상호 거동의 문제점을 앉고 있다. 이러한 문제점은 플랫폼과 앵커링 시스템을 설계하는데 어려움을 주고 있다.

#### 2.2.9 돌핀식

약 8~9개 이상의 강관파일을 이용해 말뚝군을 형성시키고 두부를 콘크리트 를 기초형식으로 접합하여 플랫폼을 타설한 돌핀형 지지구조물은 동중국해에서 상용화 되었다. 다수의 강관파일을 설치하여 전체구조시스템의 여용력을 증가 시켜 타워구조물을 지지하므로 비교적 경제성이 높다.

그러나, 돌핀을 설치하기 위해서는 해상에서 콘크리트 타설작업이 이루어져야

- 18 -



하고 양생기간 중 타워하중이 하부로 전달되지 않도록 일정기간 타워를 지지하 기 위한 별도의 해상설비가 필요하다. 수심이 깊어지면 횡방향의 파랑하중과 지진하중에 취약하여 횡방향 변위가 커질 수 있고, 추가적인 수평부재나 경사 부재가 설치되어야 하므로 경제성이 떨어진다.



Fig. 2.2.8 Dolphin Type

#### 2.2.10 트라이 파일식

Collection

트라이 파일(Tri-Pile)은 독일의 Bard Engineering에서 개발한 형식으로 3개의 강관파일 설치 후, 특수 제작된 트랜지션 피스(Transition Piece)의 끝단을 강관 파일 내부로 일정깊이 삽입하여 완성한다. 강관파일이 수면위로 노출되어 있어 트랜지션 피스만 운반·설치하므로 트라이포드나 자켓에 비하여 시공성이 우수 하다. 그러나, 타워로부터 하중전달 역할을 하는 트랜지션 피스의 크기 증가 및 대구경 강관파일 3본의 설치로 인해 경제성이 저하 될 수 있다.



Fig. 2.2.9 Tri-Pile Type

- 19 -

### 2.3 해외사례조사

#### 2.3.1 Middelgrunden Wind Farm

Middelgrunden 해상 풍력단지 사업은 1993년에 처음으로 계획되어, 최초의 풍 력발전협동조합(Wind Turbine Cooperative) 소유의 풍력발전단지가 현실화되기 까지 7년이 소요되었다. 현재의 풍력단지는 Middelgrunden Wind Turbine Cooperative와 Copenhagen Energy Wind에 의해 조성되었다. 풍력단지에는 현 재 Siemens에 인수 합병된 Bonus Energy사 2MW급 풍력발전기 20기로 총 설비 용량이 40MW이다.

Site/Country	Middlegrunden / Denmark
Installed	2001
Distance to Shore	2-3km
No. of Turbines	20
Turbine & Rating	Bonus, 2MW
Water Depth	2-6m
Foundation Type	1945 Concrete Gravity
Total Wind-Farm Length	3.4km

Table 2.3.1 Middelgrunden Wind Farm



Fig. 2.3.1 Middelgrunden Wind Farm



#### 2.3.2 Horn Rev Wind Farm

덴마크 환경 에너지부는 I/S Elsam 사와 Eltra Amba 사와 합작하여 해상 풍력 단지를 북해에 위치한 Horns Rev에 1998년 2월 착공하여 2002년 겨울에 완공 하였다. 이 풍력단지는 2MW 출력을 내는 80기의 풍력 발진기로 구성되어 있으 며 총 설비용량은 약 160MW로 150,000가구에 전기를 공급할 수 있다.

해안에서 14~20km 떨어진 곳에 각각의 터빈의 560m 간격을 두고 바둑판 모 양으로 건설되었다. 현재 덴마크 전력 수요의 2%를 담당하고 있다.

Site/Country	Horn / Denmark
Installed	2002
Distance to Shore	14-20km
No. of Turbines	80
Turbine & Rating	Vestas, 2MW
Water Depth	6-14m
Foundation Type	Driven Monopile with Transition Piece
Wind-Farm Site	1945 20km <sup>2</sup>
Distance between Turbines	560m

Table 2.3.2 Horn Rev Wind Farm



Fig. 2.3.2 Horn Rev Wind Farm


# 2.3.3 Nysted Wind Farm

이 풍력단지는 2.3MW 출력을 내는 72기의 풍력 발진기로 구성되어 있으며 총 설비용량은 약 165.6MW의 전기를 생산하고 있다. 해상풍력발전단지는 계획 관리를 ENERGI E2에서 주관하였으며, ENERGI E2, DONG 그리고 Sydkraft의 소유로 되어있다.

Site/Country	Nysted / Denmark		
Installed	2003		
Distance to Shore	10km		
No. of Turbines	72		
Turbine & Rating	Bonus, 2.3MW		
Water Depth	6-10m		
Foundation Type	Concrete Gravity		
Wind-Farm Site	20km <sup>2</sup>		
Distance between Turbines	1945 560m		
14 × 1			
Norway Dermark Germany Rødbyhavn			

Table 2.3.3 Nysted Wind Farm



Fig. 2.3.3 Nysted Wind Farm

# 2.3.4 Arklow Bank/Ireland Wind Farm

세계 최초로 3MW급 터빈이 상업용으로 사용된 해상풍력단지로서 Arklow해안 으로부터 약 10km 떨어진 해상에 위치하고 있다. GE Energy에서 소유와 운영 을 하고 있는 이 해상풍력단지에서는 25MW의 전력을 생산하고 있다.

Site/Country	Arklow Bank/Ireland	
Installed	2003	
Distance to Shore	7-12km	
No. of Turbines	7	
Turbine & Rating	GE, 3.6MW	
Water Depth	5m	
Foundation Type	Monopile with Transition Piece	
Distance between Turbines	600m	
Chartlet Key Lad Drise Above 10 metres Drying rocky Arklow Arklow Head Klessignera	Arklow Bank	

Table 2.3.4 Arklow Bank Wind Farm

Fig. 2.3.4 Arklow Bank Wind Farm

J

de.

11



 $\left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \right) \left( \right) \left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \right) \left( \right) \left( \right) \left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \right) \left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \left) \left( \right) \left( \right) \left( \left) \left( \left) \left( \left) \left( \left( \right) \left( \left( \right) \left( \left) \left( \left( \right) \left( \left( \left) \left( \left( \left( \right) \left( \left( \left( \left$ 

Point

# 2.3.5 North Hoyle/Wales Wind Farm

2003년에 건설된 해상풍력발전단지로서 영국의 청정에너지 향한 정책에 주요 한 전환점이 되었다. North Wales 해안가에서 4~5mile 떨어져 건설되었으며 Vestas에서 제작한 2MW급 풍력터빈 30개로 이루어져있다.

추정 공사비 £1.35m/MW 보다 적은 £1.18m/MW이 들었으며 총 공사비는 £81m (Prior to Grant)이 소요되었다. 소유권은 2005년 12월에 npower renewables로 부터 Beaufort Wind Limited.로 이전되었다.

Site/Country	North Hoyle/Wales	
Installed	2003	
Distance to Shore	6-8km	
No. of Turbines	30	
Turbine & Rating	Vestas, 2MW	
Water Depth	12m + 8m tide	
Foundation Type	Monopile with Transition Piece	
Distance between Turbines	een Turbines 350m (N-S), 800m (E-W)	

Table 2.3.5 North Hoyle Wind Farm



Fig. 2.3.5 North Hoyle Wind Farm



### 2.3.6 Scroby Sands Wind Farm

총 공사비 €87 million이 투입된 Scroby Sands wind farm은 2MW급 풍력터빈 이 30기로 조성되었으며 총 전력량은 60MW이다. Department of Trade의 보고 서에 의하면 운영 초기에 기계적인 결함들로 인해 전력 생산량이 심각하게 감 소하였다.

이 해상 풍력단지는 당초 우려했던 주변 해양생물들에게 거의 영향을 미치지 않았으며, 기대보다 많은 수의 관람객이 방문을 하는 등 관광자원으로서의 가 능성을 보여 주었다.

Site/Country	Scroby Sands/UK	
Installed	2004	
Distance to Shore	2.5km	
No. of Turbines	30	
Turbine & Rating	Vestas, V 80-2MW	
Water Depth	5m~10m	
Foundation Type	Monopile with Pre-Fitted Flange	
Distance between Turbines	1945	

Table 2.3.6 Scroby Sands Wind Farm



Fig. 2.3.6 Scroby Sands Wind Farm



# 2.3.7 Barrow Wind Farm

Walney Island 남서쪽 7km지점에 조성된 해상풍력단지로서 30개의 3MW급 풍 력터빈으로 구성되어있으며, 총 전력생산량은 90MW이다. 2006년 7월부터 전력 을 생산하기 시작하였으며, Vestas V90-30MW 풍력터빈을 사용하였다. Dong Energy에서 운영하고 있다.

Site/Country	Barrow/UK		
Installed	2005		
Distance to Shore	7km		
No. of Turbines	30		
Turbine & Rating	GE, 3.6MW		
Water Depth	21-23m		
Foundation Type	Monopile with Transition Piece		
Distance between Turbines 750m(Rows), 500m(Column)			

Table 2.3.7 Barrow Wind Farm



Fig. 2.3.7 Barrow Wind Farm



## 2.3.8 Burbo Bank Wind Farm

Siemens사의 3.6MW급 풍력터빈 25개를 사용하여 총 전력생산량은 80,000가구 에 공급할 수 있는 90MW를 생산가능하다. Burbo Bank 해상풍력단지는 DONG Energy에서 소유와 운영을 하고 있다.

이 풍력발전단지가 향후 20년간 운영된다면 약 6.4 백만톤의 탄소 산화물을 줄일 수 있다.

Site/Country	Burbo Bank/UK	
Installed	2005	
Distance to Shore	6-7km	
No. of Turbines	25	
Turbine & Rating	Siemens, 3.6MW	
Water Depth	6-10m	
Foundation Type	Monopile with Transition Piece	
Distance between Turbines		

Table 2.3.8 Burbo Bank Wind Farm



Fig. 2.3.8 Burbo Bank Wind Farm



## 2.3.9 Kentish Flats Wind Farm

이 풍력단지는 3MW급 터빈 30개를 사용하였으며, 탬즈강 어귀에 위치하고 있다. 2004년 8월 공사를 시작되었으며 2005년 8월 조성이 완료되었다. 2007년 풍력터빈의 기어박스 결함으로 전력생산에 심각한 타격을 입었다(전력생산이 73.5% 감소하였으며, 이 전력생산량은 평년 전력생산량과 비교할 때 매우 낮은 전력량이라 할 수 있다). 조류조사, 쇄굴조사, 수중 소음조사 등을 실시한 결과 큰 문제가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

Site/Country	Kentish/UK	
Installed	2005	
Distance to Shore	8-9km	
No. of Turbines	30	
Turbine & Rating	Vestas, 3MW	
Water Depth	5m	
Foundation Type	Monopile with Transition Piece	
Distance between Turbines	1945	

Table 2.3.9 Kentish Wind Farm



Fig. 2.3.9 Kentish Wind Farm



# 2.3.10 Beatrice Wind Farm

이 풍력단지를 조성하기 위하여 총 £35million이 들었으며, 이 자금은 EU에서 €6million, DTI에서 £3million 그리고 Scottish Executive사에서 £3million로 조성 되었다. 수심이 약 45m에 달해 하부구조물 형식은 자켓식으로 만들어졌다.

타워의 높이는 59m이며 풍력터빈 REpower사의 5MW급 184개로 구성되었다.

Site/Country	Beatrice/UK	
Installed	2006	
Distance to Shore	15km	
No. of Turbines	184	
Turbine & Rating	REpower, 5MW	
Water Depth	25-50m	
Foundation Type	Jacket	
Distance between Turbines	-	
	1945	

Table 2.3.10 Beatrice Wind Farm



Fig. 2.3.10 Beatrice Wind Farm



# 2.3.11 Sheringham Shoal Wind Farm

2011년에 완공 예정인 이 풍력단지는 220,000가구에 전력을 공급하며, 년간 500,000톤의 탄소를 줄일 수 있도록 설계되어졌다. 88개의 3.6MW급 풍력터빈에 서 315MW의 전력을 생산을 목표로 하고 있다.

Site/Country	Sheringham Shoal/UK
Installed	2009
Distance to Shore	17-22km
No. of Turbines	88
Turbine & Rating	Siemens, 3.6MW
Water Depth	16-22m
Foundation Type	Monopile
Distance between Turbines	

Table 2.3.11 Sheringham Shoal Wind Farm



Fig. 2.3.11 Sheringham Shoal Wind Farm



# 제 3 장 해상풍력 지지구조물 설계하중 및 설계기준 정립

# 3.1 개요

일반적인 해상풍력발전 지지구조물의 설계기준 및 인증은 International Electrotechnical Commission(IEC, 61400-3), Germanicher Lloyd(GL)-Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Det Norske Veritas(DNV)-DNV-OS-J101, American Petroleum Institute(API)-Working Stress Design(WSD), American Petroleum Institute(API)-Load and Resistance Factor Design(LRFD), International Organization for Standardization(ISO, 19902)을 사용한다. 여기서 IEC 61400-3, GL 그리고 DNV는 해상풍력발전기 전용 설계기준이고, API RP 2A WSD, API RP 2A LRFD 그리고 ISO 19902는 해상구조물 범용 설계기준이다.

종래에는 국제적으로 허용응력설계법이 유일한 설계법으로 사용되어졌으며 1960년대 초반부터 신뢰성 이론이 접목된 강도설계법이 시방서에 채택되었다. 그리고 1970년 초에 이르러서는 한계상태설계법이 영국의 설계기준에 등장하였 다. 우리나라도 역시 1983년부터 강도설계법을 사용하였지만 국제적인 흐름이 신뢰성 이론을 접목시킨 설계법으로 변화하면서 우리나라 또한 국제적인 흐름 에 대처할 필요성이 부각되기 시작했다.

결정론적 설계법의 단점을 보완하기 위하여 구조물에 신뢰성 이론을 접목시 킨 신뢰성 설계기법이 발전되어져왔다. 신뢰성 설계기법은 결정론적 설계법과 는 다르게 설계단계부터 각 변수들의 불확실성을 고려할 수 있는 확률론적 개 념에 기초한 설계법이다. 신뢰성 이론은 전기전자 계통의 장치들에 대한 기능 성을 향상시킬 목적으로 1940년대에 군사 분야에서 먼저 시작되었고, 1980년대 이후 구조물 설계에 대한 확률적방법이 개발되어진 시스템의 안전성을 해석하 는 이론으로 발전하여 많은 분야에 상당히 넓게 확대 적용되어졌다.



한편, 설계하중에 의하여 발생하는 구조물 각 부재의 응력은 탄성이론에 기초 하여 구하고, 각 부재의 응력이 재료의 항복응력 또는 극한강도를 안전율로 나 눈 허용응력을 초과하지 않도록 부재의 치수를 설계하는 방법을 허용응력 설계 법(Working Stress Design, WSD)이라고 한다.

MMI Engineering(2009)에서 수행한 연구 결과에 의하면 터빈 지지구조물의 설 계시 IEC 61400-3과 ISO 19902(ISO, 2007)을 활용하여 설계한 결과는 API RP 2A-WSD과 잘 일치하고 있다. 그러나, IEC/ISO 기준은 50년 빈도 기준의 해양 환경과 IEC 61400-3의 하중계수, ISO 19902의 저항계수 및 신뢰성 설계법을 채 택하였고, API 기준은 100년 빈도 기준의 해양환경과 API RP 2A-WSD에서 정의 한 안전계수 및 허용응력 설계법을 사용하였다.

Table 3.1.1은 해상풍력 발전기 건설에 적용 가능한 국내외의 설계서들을 비 교 정리한 것으로 국내에는 항만 및 어항 설계기준을 참조하였다.(윤희정, 2013)

Intorno		N			Ministry	Technical
tional		DNV-OS	CI	IEC 🧧	Maritime	Manual for
Codec	AFI KF ZA	-J101	GL	61400-3	Affairs	Offshore Wind
Coues					Fisheries	Turbine(Japan)
모저	해상구조물	ᅰ사프러	바고 거요?	너게기즈	항만시설	해상풍력발전
44	범용설계기준	ণা থ হ ল	일신 신공~	길게기군	설계기준	전용설계기준
극한	100년즈기		501271	H	보며하	파랑:30~50년
하중	1002千八		30년구기		물장력	풍속 :50년
하중	비머히	00-JI	11-11	(ا <del>د</del> ۱ د	비머히	2개(지진시
조합	물망왁	337∄	44/1	34/∥	굴성적	/폭풍시)
한계		ULS/SLS			미꼬하	미고하
상태		UL5/5L	20		-12-8	-1-2
해석	한계상태설계	ਰੱ	하게사태선거	ו	허요	우려서게
방법	허용응력설계	ĩ	그게 이에 된게		510	0 7 2/1
			API방법		하다 미	
		API방법	DIN		이 하 사 거 세 하 사 가 가 하 가 하 가 하 가 하 가 하 가 하 가 하 가 하 가	일본
지지력	лынгы	및 다른	2003	ISO	기장실계	항만시설기준
계산	API당립	공인된	다른	19902	기군의	의 지지력
		표준	공인된		시시덕   시기시	산정식
			표준		산성식	

Table 3.1.1 International Codes for Offshore Wind Turbine





## 3.2 설계하중

본 절에서는 해상풍력 지지구조물 설계시 적용하는 일반적인 설계하중을 설 명하고, 이를 바탕으로 3.3절에서 본 연구에서 적용할 설계기준을 정립하였다.

해상풍력 구조물의 강도에 영향을 주는 주요하중은 크게 상부구조와 하부구 조에 작용하는 하중으로 구분할 수 있다. 상부구조에 작용하는 하중은 바람과 터빈 작동시 발생하는 블레이드의 공력 등이 있고, 하부구조는 정수압, 파도, 조류, 빙하, 지진, 온도 등이 있다. 이들 중 해상풍력 구조물에 가장 큰 영향을 미치는 설계하중은 블레이드의 공력하중과 환경외력인 파랑하중이다.

## 3.2.1 공력하중(추력)

블레이드가 회전하면서 발생하는 추력은 날개가 회전할 때 발생하는 동압으 로 부터 구할 수 있고, 풍력발전의 실제 얻을 수 있는 출력 P는 다음 식과 같 이 계산될 수 있다.

1945

$$P_e = \frac{1}{2} C_p \rho V^3 A$$

Collection

여기서,  $P_e$  : Blade Thrust[W]

 $C_p$  : Blade Thrust Coefficient[-]

 $\rho$  : Air Density[ $kg/m^3$ ]

V : Rated Wind Speed[m/s]

A : The Area of the Formed by the Blade Rotation[ $m^2$ ]

출력을 계산하는 수식에서 보는 것과 같이 풍속의 세제곱만큼의 출력상승효 과를 볼 수 있기 때문에 육상보다 풍황이 좋은 해상 풍력발전과 풍력발전의 대 형화는 보다 높은 효율의 풍력발전을 위해 필수적이라고 할 수 있다.

#### 3.2.2 풍하중

바람은 해수면 위에 상부 구조물 즉, 플랫폼, 타워 및 블레이드에 작용하여 진동을 발생시키는 것으로 바람의 세기는 파랑이나 해류와 마찬가지의 영향을 주며 해저면 기초면에서 발생하는 모멘트 계산에 중요한 영향을 준다. 특히 해 상에서는 일반적으로 바람이 더 세고 빈도가 잦은 관계로 해상구조물 설계에서 중요한 요소로 작용하게 된다. 바람은 불규칙한 성질을 가지므로 이를 고려하 여 해석을 수행하여야 하지만, 해석상의 편의를 위해 주로 정역학적으로 해석 을 수행한다.

해수면 바람은 돌풍과 지속풍으로 나눌 수 있는데, 돌풍은 일시적으로 갑자기 큰 풍속으로 부는 바람이며 해양 구조물과 기초 설계에 쓰이는 설계 풍속은 지 속풍이 쓰인다. 우리나라의 서해안은 태풍이 통과하는 길목이므로 유럽과는 달 리 내풍설계도 필수적이므로 이에 따른 검토도 필요하다. 바람조건은 정상과 극치조건으로 구분된다. 정상조건의 경우 빈번히 발생하는 조건이며 극치조건 은 드물게 발생하는 조건을 나타낸다. 설계 하중조건은 이러한 외부조건과 풍 력발전기의 운전모드 및 기타 상태들의 조합에 의해 결정된다. 외부조건은 풍 력발전기를 설치하려는 지역의 유형에 따라 정해지는데 이는 Table 3.2.1의 풍 력발전기의 클래스로 구분한다.

Wind Class	Ι		Ш	S
$V_{ref}$ (m/s)	50	50 42.5 37		
A $I_{ref}(-)$	A $I_{ref}(-)$ 0.16			제조자가
В І <sub>ref</sub> (-)	B I <sub>ref</sub> (-) 0.14			규정하는 값
C <i>I</i> <sub>ref</sub> (-)	0.12			
V <sub>ref</sub> 10분 평균한 기준 풍속				
A 고 난류강도	A 고 난류강도에 대한 카테고리			
B 중 난류강도	중 난류강도에 대한 카테고리			
C 저 난류강도	난류강도에 대한 카테고리			
I <sub>ref</sub> 풍속이 15m	<sub>f</sub> 풍속이 15m/s일 때 난류강도의 기대 값			

Table 3.2.1 Basic Parameters of Wind Turbine Class



일반적으로 바람조건은 바람속도와 표준편차로 표시한다. 바람속도의 변화를 측정하는 난류강도는 바람 속도를 의미하는 것으로 바람속도 표준편차의 비로 써 정의된다. 풍력발전기 허브의 높이에서 10분간 평균적으로 지속되는 바람속 도를  $V_{hub}$ 라 한다. 이것은 Design Load Cases(DLCs)에서 난류 바람 조건으로 정 의한다. DLCs에서 언급된 안정된 바람 조건은 1분 혹은 3초 동안 바람 속도를 사용한다.

풍하중을 구하기 위한 작용 풍속은 정상바람일 경우 지면으로 부터의 높이 z 의 함수로서 평균 풍속을 나타낸다. 표준 풍력발전기의 클래스인 경우에 정상 바람은 지수법칙에 따라 다음 식을 이용한다.

위 식으로 구한 높이 별 작용하는 풍속을 이용해 해상풍력 구조물의 단면적 에 작용하는 풍하중에 대한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A$$

Collection

여기서,  $C_D$  : 실린더의 항력계수

ho : 공기의 밀도

V : 높이 Z에 작용하는 풍속

A : 하중을 받는 면적

### 3.2.3 파랑하중

파랑하중은 해양구조물에 작용하는 외부 하중 중 가장 영향이 크며 설계에서 고려해야 하는 가장 중요한 하중이며 설계 하중의 큰 부분을 차지하고 있다. 일반적으로 파랑은 파장(Wave Length), 수심(Water Depth), 파고(Wave Height), 주기(Wave Period) 및 파속(Phase Velocity)을 갖는 파형으로 해양 구조물 기초 설계나 구조물 각 부재의 설계에 가장 직접적인 큰 힘을 가해 부재의 크기나 길이 설계에 결정적인 요소로 작용한다. 설계상의 편의성을 위해 규칙파로 가 정하여 파랑모델을 설계에 적용하는데 이는 수심, 구조물 형상, 적용 파고 등에 따라 달라진다.

설계파의 변수로 파고, 파 주기, 수심의 세 가지로 분류되며, 설계파는 구조물 의 각 부제에 작용하는 물 입자 속도와 가속도를 계산하여 모리슨 방정식으로 부터 항력과 관성력의 합에 의해 파력을 등가 절점력으로 산정한다.

파 이론(Wave Theory)에는 Linear Airy Wave Theory, Stokes Finite Amplitude Wave Theory, Cnoidal Wave Theory, Stream Function Wave Theory, Standing Wave Theory 등 많은 이론들이 있다. 파랑모델은 Stokes 5th Order Wave Theory, Airy Wave등이 실질적으로 많이 사용되며, 어떤 파랑모델을 선 정하느냐에 따라 수심, 구조물 형상, 적용 파고 등이 달라진다. 또한, 파랑에 대 한 이론의 특성은 각각 다르기 때문에 실제 파도의 특성과 일치하는 파랑 이론 을 선택하는 것이 중요하다. 수심을 d, 설계파의 파장을 L이라 하였을 때, d/L>0.5인 심해(Deep Sea)에서는 Stokes 5th Order Wave Theory, Airy Wave를 d/L<0.04인 천해(Shallow Sea)에서는 Cnoidal, Solitary Wave Theory를 쓰는 것이 좋다.

일반적으로 파랑하중의 계산은 실제 해양 상태에 대한 파랑 매개변수를 결정 하고 다음의 모리슨 방정식(Morison Equation)을 이용하여 구한다.

$$F = F_D + F_I = C_D \frac{w}{2g} A U |U| + C_m \frac{w}{g} V \frac{\delta U}{\delta t}$$

여기서, F: Hydrodynamic Force  $F_D$ : Drag Force  $F_I$ : Inertia Force



 $C_D$ : Drag Coefficient  $C_m$ : Inertia Coefficient w: Density of Water

A: Projected Area Per Unit Length g: Acceleration

U: Velocity Vector |U|: Absolute Value of U

 $\frac{\delta U}{\delta t}$ : Local Acceleration Vector V : Displaced Volume

Drag Force는 유체가 물체 주위를 흐를 때 생기는 마찰력과 물체의 후면에서 유체의 흐름이 분리되어 부서지며 생기는 유체방향의 압력이 주원인이며 Inertia Force는 유체 중 물 분자가 가속도를 갖기 때문에 발생하는 것이다.

일반적으로 실린더 형식의 구조물들은 Drag Force가 Inertia Force에 비해 크 게 작용하며 Gravity Structure과 같은 지름이 큰 구조물들은 그 반대인 Inertia Force가 더 크게 작용한다. 부재의 형상에 따른 항력계수와 관성력계수의 값은 각각 Table 3.2.2와 3.2.3과 같다.

Shape	Base Area	Drag Coefficient
원주(지름:D, 길이:L)	DL	1.0
각주(너비:B, 길이:L)	1945	1.0
원판(지름 : D)	$\pi D^2/4$	1.2
구(지름 : D)	$\pi D^2/4$	0.5~0.2
입방체(폭, 너비:D)	$D^2$	1.3~1.6

Table 3.2.2 Drag Coefficients Cd

### Table 3.2.3 Inertia Coefficients Cm

Shape	Base Area	Inertia Coefficient
원주(지름:D, 길이:L)	$\pi D^2/4L$	2.00
정각주(너비:B, 길이:L)	$D^{2}L$	2.19
구(지름 : D)	3 π D <sup>3</sup> /8	1.50
입방체(폭, 너비:D)	$D^3$	1.67





Fig. 3.2.1에는 각 파 이론별 적용 범위를 그림으로 나타내었다.

Fig. 3.2.1 Applicability Ranges of Various Wave Theories(API-WSD, 2007)



일반적으로 유체의 동적해석 이론으로는 유체의 연속방정식인 식(3.2.1)을 이 용하여 구할 수 있다.(Streeter & Wylie 1986)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{3.2.1}$$

여기서 *u*, *v*, *w*는 3축방향의 유체의 흐름 속도이고, *x*, *y*, *z*는 각 좌표축을 의 미한다. 그리고 Laplace(1785 : 1749~1827) 방정식을 이용하여 다음 식(3.2.2)을 확인 할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 y} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 z} = \nabla^2 \Psi(x, y, z, t) = 0$$
(3.2.2)

또한 Bernoulli(1738) 방정식은 다음 식(3.2.3)으로 나타 낼 수 있다.

$$\frac{1}{2}(u^2 + v^2 + \omega^2) + \frac{p}{\rho} + gz + \frac{\partial\Psi}{\partial t} = 0$$
(3.2.3)

2차원적 해양 파랑을 구현하기 위하여 축을 *x*, *z*으로 한정하면 Laplace 방정 식은 식(3.2.4)로 나타낼 수 있으며, Bernoulli 방정식은 식(3.2.5)로 다시 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial^2 z} = \nabla^2 \Psi(x, z, t) = 0$$

$$\frac{1}{2} (u^2 + \omega^2) + \frac{p}{\rho} + gz + \frac{\partial \Psi(x, z, t)}{\partial t} = 0$$
(3.2.4)
(3.2.5)

여기서 u는 x축 방향의 속도이고, ω는 z축방향의 유체의 운동속도를 나타낸 다. 그리고 Ψ는 시간 t에 대한 유체의 Velocity Potential이며, p는 유체 어느 점 에서의 압력, ρ는 유체의 질량, g는 중력가속도, z는 수직 거리이다.

이러한 연속방정식인 Laplace 방정식과 Bernoulli 방정식을 이용하여 경계조건 인 지반 경계조건(BBC), 운동역학적 표면 경계조건(KSBC), 동적 표면 경계조건 (DSBC)를 사용하여 그 해를 풀 수 있다. 그러므로 지반 경계조건(BBC)에서의 기본 가정은 속도는 0이고, 운동역학적 표면 경계조건(KSBC)에서는 자유표면에 서의 압력은 0, 동적 표면 경계조건(DSBC)에서는 자유표면은 연속성을 가지는





것을 기본 경계조건으로 하여 파랑에 대한 특성을 구할 수 있다. 지반 경계조 건(BBC)을 이용하면 식(3.2.6)과 같이 해저지반에서의 유체 수직속도가 0임을 나 타낼 수 있다.

$$\omega = \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0, \ z = -d \tag{3.2.6}$$

그리고 유체의 자유표면에서는 운동역학적 표면 경계조건(KSBC)을 이용하여 유체의 자유 표면에서의 수직 속도는 ω로서 식(3.2.7)로 표현되어진다.

$$\omega = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad z = \eta \tag{3.2.7}$$

또한 불안정한 비회전성 흐름을 구현하기 위하여 Bernoulli 방정식을 이용하 며, 여기서 동적 표면 경계조건(DSBC)을 고려할 경우 식(3.2.8)로 나타낼 수 있 다.

$$\frac{1}{2}(u^2 + \omega^2) + gz + \frac{\partial \Psi}{\partial t} = 0, \ z = \eta$$
(3.2.8)

따라서 운동학적 자유표면 경계조건(KSBC)과 동적 자유표면 경계조건(DSBC) 을 선형화 하면, KSBC의 경계조건을 이용하여, 초기 수면에서의 유체의 수직 속도는 식(3.2.9)로 나타낼 수 있다.

$$\omega = \frac{\partial \eta}{\partial t}, \ z = 0 \tag{3.2.9}$$

그리고 DSBC의 경계조건을 적용할 경우 식(3.2.10)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta(x,t) = \frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial t}\right) = 0, \ z = 0 \tag{3.2.10}$$

그리고 운동학적 자유표면 경계조건(KSBC)을 적용하면 식(3.2.11)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Psi}{\partial z} = 0 \tag{3.2.11}$$

상기의 여러 가지 경계조건을 이용하여 각 파 이론에 대한 상세한 설명을 첨

Collection

부하였다.

① Airy Wave

아래 Fig. 3.2.2는 일반적인 선형파인 Airy Wave에 대한 형상을 나타낸다.



Fig. 3.2.2 Profile of Airy Wave

Airy 파는 파고가 파장이나 수심에 비해 매우 작다는 가정 하에서 자유 표면 경계 조건을 선형화하여 해를 구한 것이며, Small Amplitude Wave(미소 진폭파) 또는 선형파라고도 한다. Airy파에서는 물 입자가 폐쇄 경로로 운동을 하고 질 량 수송이 생기지 않으며 계산 결과로 나온 입자 가속도가 고차 이론 결과와 큰 차이가 없기 때문에 주로 선체의 파력을 구하는데 많이 쓰인다.

그리고 Airy Wave의 Velocity Potential, ₩는 다음 식(3.2.12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \frac{gH\cosh(k(d+z))}{2\omega\cosh(kd)}\sin(kx-\omega t)$$
(3.2.12)

여기서, H는 파고, ω = 2π/T는 각속도, T는 파주기, k = 2π/L 파수, L은 파 장, z는 Ψ의 수면에서의 수직좌표, d는 수심, x는 수면에서의 수평좌표, t는 시 간이다.

동적 표면 경계조건(DSBC)의 자유표면은 연속성을 가지는 것을 가정하면, Ψ 로부터 수평좌표와 시간 t일 경우 자유수면 높이, η(x,t)는 상기 식(3.2.10)을 이 용하여 식(3.2.12)을 시간 t에 대하여 미분하면 다음 식(3.2.13)으로 나타낼 수 있

Collection

다.

$$\eta(x,t) = \frac{H}{2}\cos\left(kx - \omega t\right) \tag{3.2.13}$$

여기서 H는 파고,  $\omega = 2\pi/T$ 는 각속도, T는 파주기,  $k = 2\pi/L$  파수를 나타낸 다.

② Stokes 2<sup>nd</sup> Order Wave

다음의 Fig. 3.2.3은 Stokes 2<sup>nd</sup> Order Wave파형을 나타내고 있다.



Fig. 3.2.3 Profile of Stokes 2<sup>nd</sup> Order Wave

Stokes 파는 고차 이론을 적용하여 해를 구하기 때문에 비선형 경계 조건을 어느 정도 만족시키며, 파봉이 더 뾰족해지고 파곡이 더 평평해지는 실제 파랑 에 더욱 근접한 형태를 나타낼 수 있다. Stokes 파는 Airy 파에 비해 물 입자 속도를 더 정확하게 나타낼 수 있으므로 Jacket 또는 Jetty와 같은 해양 구조물 의 파력을 구하는데 많이 쓰인다.

Stokes Second order Wave의 Velocity Potential, *Ψ*는 다음 식(3.2.14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \Phi_{\iota} + \frac{3\pi H}{8kT} \left(\frac{\pi H}{L}\right) \frac{\cosh\left(2k(z+d)\right)}{\sinh^4(kd)} \sin\left(kx - \omega t\right) \tag{3.2.14}$$

여기서,  $\Psi_{\iota}$ 는 Airy Wave의 Velocity Potential, H는 파고,  $\omega = 2\pi/T$ 는 각속도,



- 42 -

T는 파주기, *k* = 2*π*/*L* 파수, L은 파장, *z*는 Ψ의 수면에서의 수직좌표, d는 수 심, *x*는 수면에서의 수평좌표, t는 시간이다. 따라서 동적 표면 경계조건(DSBC) 의 자유표면은 연속성을 가지는 것을 가정하면, Ψ로부터 수평좌표 와 시간 t일 경우 자유수면 높이, *η*(*x*,*t*)는 상기 식(3.2.10)을 이용하여 식(3.2.14)을 시간 t에 대하여 미분하면 다음 식(3.2.15)으로 나타 낼 수 있다.

$$\eta(x,t) = \eta_{\iota} + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} (2 + \cosh 2kd) \cos 2(kx - \omega t)$$
(3.2.15)

여기서,  $\eta_i$ 은 Airy Wave의 자유수면 높이 $\frac{H}{2}cos(kx-\omega t)$ , H는 파고,  $\omega = 2\pi/T$ 는 각속도, T는 파주기,  $k = 2\pi/L$  파수, L은 파장,  $z \in \Psi$ 의 수면에서의 수직좌 표, d는 수심, x는 수면에서의 수평좌표, t는 시간이다. 또한 해저 면이 경사면 일 경우 사면 경사,  $\beta_f$ 를 고려하여 수심을 변화시켜,  $d_x = d - x \cdot \tan\beta_f$ 될 수 있도록 하여야 한다.

③ Solitary Wave

Solitary 파는 매우 수심이 낮은 지역에서는 파봉이 뾰족해지고 파곡은 평평해 져 파장과 주기가 무한대인 하나의 이동하는 파봉으로 나타낼 수 있는데 쓰나 미와 같은 대형 파, 천해에서의 쇄파, 심해에서 Steepness가 매우 큰 파 등에 적용되어진다. Fig. 3.2.4는 Solitary Wave파형을 나타내고 있으며, Solitary Wave 는 Tsunami와 같은 파형을 표현하고자 할 경우 사용한다.



Fig. 3.2.4 Profile of Solitary Wave



Solitary Wave의 Velocity Potential, *Ψ*는 다음 식(3.2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \Phi_0 + z \frac{\partial \theta_0}{\partial z} - \frac{z^2}{2} \frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial x^2} - \frac{z^3}{6} \frac{\partial^3 \theta}{\partial x^3}$$
(3.2.16)

여기서,  $\frac{\partial \theta}{\partial x} = -d \frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial x^2}$ 를 상기 식(3.2.16)에 대입하여 다시 나타내면 식(3.2.17) 과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \Phi_0 + z \frac{\partial \theta_0}{\partial z} - \frac{z^2}{2} \frac{\partial^2 \Phi_0}{\partial x^2} + \frac{dz^3}{6} \frac{\partial^4 \Psi_0}{\partial x^4}$$
(3.2.17)

 $\frac{\partial \theta_0}{\partial z} = -d \frac{\partial^2 \theta_0}{\partial x^2} - \frac{d^3}{2} \frac{\partial^4 \theta_0}{\partial x^4}$ 이므로 이를 상기 식(3.2.17)에 대입하면, 식(3.2.18)과 같이 Velocity Potential에 대하여 최종적으로 나타낼 수 있다.

$$\Psi = \Phi_0 - dz \frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial x^2} - \frac{d^3 z}{2} \frac{\partial^4 \Psi_0}{\partial x^4} - \frac{z^2}{2} \frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial x^2} + \frac{dz^3}{6} \frac{\partial^4 \Psi_0}{\partial x^4}$$
(3.2.18)

여기서, *d*는 수심을 나타내고, 𝒵₀및θ₀는 𝗴와𝑘의 함수로 식(3.2.19), 식(3.2.20), 식(3.2.21), 식(3.2.22)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \Psi_0}{\partial x} = -u_0 = -w_0 \frac{\eta}{d} \tag{3.2.19}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_0}{\partial x^2} = -\frac{w_0}{d} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$
(3.2.20)

$$\frac{\partial^3 \Psi_0}{\partial x^3} = -\frac{w_0}{d} \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}$$
(3.2.21)

$$\frac{\partial^4 \Psi_0}{\partial x^4} = -\frac{w_0}{d} \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \tag{3.2.22}$$

여기서  $\omega_0 = \omega_0 = 2\pi/T$ 로서 파의 각속도로 표현된다.



따라서 긴 파장인 규칙파로 나타 낼 경우 아래 식(3.2.23)로 Velocity Potential 을 간단히 나타낼 수 있다.

$$\Psi(x,t) = \Psi_s(A,k,x-wt) = A(t) \operatorname{sech}^2(k(t)x - wt)$$
(3.2.23)

여기서,  $z \in \Psi$ 의 수면에서의 수직좌표, d는 수심,  $x \in$  수면에서의 수평좌표, t 는 시간, 파수  $k = 0.5\sqrt{(1-1/c)}$ 이고, Parameter A는 다음 식(3.2.24)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \frac{12k^2}{4k^2 - 1} = 3(1 - c) \tag{3.2.24}$$

또한 파 전파속도, c는 다음 식(3.2.25)과 같다.

$$c = \theta' = \frac{1}{(1 - 4k^2)} = \sqrt{gd} \left(1 + \frac{1}{2}\epsilon - \frac{3}{20}\epsilon^2\right), \ \epsilon = \frac{H}{d}$$
(3.2.25)

그리고 동적 표면 경계조건(DSBC)의 자유표면은 연속성을 가지는 것을 가정 하면, Ψ로부터 수평좌표와 시간 t일 경우 자유수면 높이, η(x,t)는 상기 식 (3.2.10)을 이용하여 식(3.2.23)을 시간 t에 대하여 미분하면 다음 식(3.2.26)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta(x,t) = H\operatorname{sech}^{2}(q) - \frac{3H}{4}\frac{H}{d}\operatorname{sech}^{2}(q)\tanh(q)$$
(3.2.26)

여기서, H는 파고(Wave Height)이고,  $q = \sqrt{(3H/d)}/2d(1-5H/8d)(x-ct)$ , 파속 (Wave Velocity)인  $c = \sqrt{gd}(1+0.5\epsilon-3\epsilon^2/20)$ ,  $\epsilon = H/d$  는 각속도, T는 파주기, 파수  $k=0.5\sqrt{(1-1/c)}$  파수, L은 파장,  $z \in \Psi$ 의 수면에서의 수직좌표, d는 수 심, x는 수면에서의 수평좌표, t는 시간이다. 또한 해저면이 사면일 경우, 사면 경사,  $\beta_f$ 를 고려하여 수심을 변화 시켜,  $d_x = d-x \cdot \tan\beta_f$  될 수 있도록 하여야 한다.

④ Cnoidal Wave

ollection

그리고 Fig. 3.2.5는 Cnoidal Wave파형을 나타내고 있다.



Fig. 3.2.5 Profile of Cnoidal Wave

Cnoidal파는 수심이 낮은 지역의 파들은 해저면의 효과를 고려해야 하기 때문 에 Stokes파를 쓸 수가 없으며, 이때는 Cnoidal 파가 적용되며 이 파는 수심의 양 극단에서 각각 Stokes파, Solitary파와 같아진다. 또한 Cnoidal Wave의 Velocity Potential, Ψ는 다음 식(3.2.27)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\Psi = \frac{\pi^2 A}{kK^2} \Sigma_{n=1}^{\infty} \operatorname{cosech}(n\pi K'/K) \sin(nk\theta) \cosh(nkz + nkd)$$
(3.2.27)  
여기서, 완전 타원함수 1차 적분,  $K(m) = \frac{2}{(1+m^{1/4})^2} \operatorname{Ln}(\frac{2(1+m^{1/4})}{(1-m^{1/4})}),$   
 $K'(m) = K(1-m) = \frac{2\pi}{(1+m^{1/4})^2},$ 타원매개변수  $m = 1 - 16e^{(-\sqrt{\frac{3gHT^2}{4d^2}})}$ 이고,  
 $k = \pi \kappa/K, \ \kappa = \frac{\pi}{2} \frac{d+\ell}{d^2}$ 이며,  $\ell$ 는 파장의 특성 치로서

$$\ell = d(1 + \frac{H}{md}(1 - \frac{m}{2} - \frac{3}{2}\frac{E(m)}{K(m)}))^2$$
로 나타낼 수 있다.

그리고 z는 수면에서의 Velocity Potential의 위치의 수직거리이고, d는 수심을 나타낸다.

동적 표면 경계조건(DSBC)의 자유표면은 연속성을 가지는 것을 가정하면, Ψ 로부터 수평좌표와 시간 t일 경우 자유수면 높이, η(x,t)는 상기 식(3.2.10)을 이 용하여 식(3.2.27)을 시간 t에 대하여 미분하면 다음 식(3.2.28)으로 나타낼 수 있

Collection

다.

$$\eta(x,t) = Hcn^{2}(\pi \frac{\alpha(x-ct)}{d} \frac{1}{2K} + \eta_{t}$$
(3.2.28)

여기서 완전 타원함수 2차 적분, E(m) = K(m)e(m)으로 나타내며,  $e(m) = \frac{(2-m)}{3} + \frac{\pi}{2KK^{'}} + 2(\frac{\pi}{K^{'}})^{2}(-\frac{1}{24} + \frac{q_{1}^{2}}{(1-q_{1}^{2})^{2}}), q_{1} = e^{-\pi K/K^{'}}$ 로 나타난다.

그러므로 Cnoidal Wave인 경우 파봉의 높이, η<sub>crest</sub>는 다음 식(3.2.29)로 나타 낼 수 있다.

$$\eta_{crest} = \frac{H}{m} [1 - \frac{E(m)}{K(m)}]$$
(3.2.29)

또한 파곡인  $\eta_{trough}$ 는 아래 식(3.2.30)으로 표현된다.

$$\eta_{trough} = \frac{H}{m} [1 - m - \frac{E(m)}{K(m)}]$$
(3.2.30)

그리고 여기서 코비 타원함수는 다음 식(3.2.31)과 같이 나타낼 수 있으며, Cnoidal Wave 자유수면 높이인  $\eta(x,t)$ 의 식(3.2.28)에 사용되어진다.

$$sn(z,m) = (m)^{-1/4} \frac{(\sinh w - q_1^2 \sinh 3\omega)}{(\cosh \omega + q_1^2 \cosh 3\omega)}$$
(3.2.31)

$$cn(z,m) = \frac{1}{2} \left(\frac{m_1}{mq_1}\right)^{1/4} \frac{(1 - 2q_1 \cosh 2\omega)}{(\cosh \omega + q_1^2 \cosh 3\omega)}$$

$$dn(z,m) = \frac{1}{2} \left(\frac{m_1}{q_1}\right)^{1/4} \frac{(1+2q_1\cosh 2\omega)}{(\cosh \omega + q_1^2\cosh 3\omega)}$$

여기서 
$$m_1 = 1 - m$$
, 이고  $\omega = \frac{\pi z}{2K'} = \pi \frac{(\frac{\alpha(x - ct)}{h})}{2K'}$ ,  $h = d - \eta_{trough}$ 로 나타나며, 파의 전파속도  $c = \sqrt{gd}(1 + \frac{H}{md}(1 - \frac{m}{2} - \frac{3}{2}\frac{E(m)}{K(m)}))$ 로 나타낸다.

Collection

-47-

또한 
$$\alpha = \sqrt{\frac{3}{4} \frac{H}{h}} \left(1 - \frac{5}{8} \frac{H}{h} + \frac{71}{128} (\frac{H}{h})^2 - \frac{100627}{179200} (\frac{H}{h})^3 + \frac{16259737}{28672000} (\frac{H}{h})^4 \circ \right]$$
고, 파장,  $L = 21.5d \ e^{-1.87 \frac{H}{d}}$ , 여기서 d는 수심으로 표현된다.

또한 Cnoidal Wave는 Ursell Number로 그 적용성을 고려하고,  $U = H \frac{c^2}{d^3} \ge 40$ 일 경우 Cnoidal Wave를 적용할 수 있다.

그리고 해저면이 사면일 경우, 경사  $\beta_f$ 을 고려하여 수심을 변화시켜,  $d_x = d - x \cdot \tan \beta_f$ 될 수 있도록 하여야한다.

⑤ Stream Function Wave

또한 Fig. 3.2.6은 Stream Function Wave파형을 나타내고 있다.



Fig. 3.2.6 Profile of Stream Function Wave

Stream파는 Airy파나 Stokes파처럼 Velocity Potential Function을 풀지 않고 Stream Function을 풀어 해를 구하여 얻은 파 이론이다.

Stream Line을 가로지르는 흐름이 없다는 가정 하에서 Stream Function이 정 의되었으므로 자유표면 같은 Stream Line은 Stream Function이 상수가 된다. 이 를 수치 해석하여 연속적으로 풀면 비선형 항을 잘 나타내고 다른 파 이론에 비해 넓은 범위에 걸친 실제 파를 더 효과적으로 나타내는 해를 얻을 수 있는 장점이 있다.



Stream Function Wave의 Velocity Potential,  $\Psi(x,z,t)$  및 스트림 함수(Stream Function)인  $\Phi(x,z,t)$ 는 다음 식(3.2.32)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi = 0, \nabla^2 \Psi = 0$$

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$$
(3.2.32)

그러므로 동적 자유표면 경계조건(DSBC)을 고려하면 식(3.2.33)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial\Psi}{\partial t}\right)_{z=\eta} + g\eta + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right)^2\right]_{z=\eta} = Q(t)$$
(3.2.33)

여기서 g는 중력가속도,  $\eta = \eta(x,t)$ 은 x방향의 수면 변동 높이, 그리고  $\frac{\partial \Phi}{\partial x} = -\frac{\partial \Psi}{\partial z} = v, \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \Psi}{\partial x} = -u$ 로 나타낼 수 있고, u는 물입자의 수평 속도, v는 물입자의 수직 속도, Q(t)는 시간에 따른 Bernoulli Number이다.

또한 운동학적 자유표면 경계조건(KSBC)을 적용하면, 다음 식(3.2.34)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\partial\Psi}{\partial z}\right)_{z=\eta} = \frac{\partial\eta}{\partial t} + \frac{\partial\eta}{\partial x}\left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\right)_{z=\eta}$$
(3.2.34)

그리고 지반 경계조건(BBC)을 적용하면 식(3.2.35)과 같다.

$$\left(\frac{\partial\Psi}{\partial z}\right)_{z=-d} = \left(\frac{\partial\Psi}{\partial x}\right)_{z=-d} = 0 \tag{3.2.35}$$

또한 Laplace 방정식을 이용하면 Velocity Potential과 유함수(Stream Function) 를 식(3.2.36)과 같이 정의 할 수 있다.

$$\Phi(x,z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-nkd} [e^{nk(d+z)} - e^{-nk(d+z)}] \cos nk(x-ct)$$

$$\Psi(x,z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-nkd} [e^{nk(d+z)} + e^{-nk(d+z)}] \sin nk(x-ct)$$
(3.2.36)

그러므로 표면에서의 유함수(Stream Function)는  $\Phi(x,\eta,t) = 0$ 이다.

- 49 -



그리고 시간에 따른 수면 변동 높이  $\eta(x,t)$ 는 식(3.2.37)과 같이 나타난다.

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^{1} \frac{C_n}{c} e^{-nkd} \left[ e^{nk(d+\eta)} - e^{-nk(d+\eta)} \right] \cos nk(x-ct)$$
(3.2.37)

여기서 *C<sub>n</sub>*은 상수, *n* = 1,2,3,..., *k*는 파수, L은 파장, c는 파의 전파속도를 나타낸다.

운동 반대의 속도 c를 추가하고, (x-ct)를 x로 하여 지속적인 흐름으로 나타 낼 경우 상기 식(3.2.36), 식(3.2.37)에 대하여 아래의 식(3.2.38)으로 표현될 수 있다.

$$\Phi(x,z) = cz - \Sigma_{n=1}^{\infty} C_n e^{-nkd} [e^{nk(d+z)} - e^{-nk(d+z)}] \cos nkx$$

$$\Psi(x,z) = cx + \Sigma_{n=1}^{\infty} C_n e^{-nkd} [e^{nk(d+z)} + e^{-nk(d+z)}] \sin nkx$$
(3.2.38)

$$\eta(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{c} e^{-nkd} \left[ e^{nk(d+\eta)} - e^{-nk(d+\eta)} \right] \cos nkx$$

상기에서 n = 1로 하여 상기 식(3.2.38)에 대하여 다시 계산하면 식(3.2.39)과 같이 나타난다.

$$\Phi(x,z) = cz - C_1 e^{-kd} [e^{k(d+z)} - e^{-k(d+z)}] \cos kx$$

$$\eta(x) = \frac{C_1}{c} e^{-kd} [e^{k(d+\eta)} - e^{-k(d+\eta)}] \cos kx$$
(3.2.39)

$$\eta_{1} = \eta_{\max} = \frac{C_{1}}{c} e^{-kd} [e^{k(d+\eta_{1})} - e^{-k(d+\eta_{1})}]$$
$$= \frac{H}{[(1+\cosh 2\pi\delta) - \coth k(d+\eta_{1})\sinh 2\pi\delta]}$$

$$\eta_2 = \eta_{\min} = \frac{-C_1}{c} e^{-kd} [e^{k(d+\eta_2)} - e^{-k(d+\eta_2)}]$$

여기서 변수 w를 사용하여,  $\eta_1 = \eta_{max}$ 을 아래 식(3.2.40)을 계산할 수 있다.

$$1 + w = \frac{C_1}{c} e^{-kd} k \left( e^{k(d+\eta_1)} + e^{-k(d+\eta_1)} \right), \ 0 \le 1 + w \le 1$$
(3.2.40)

-50-



그러므로 식(3.2.40)을 이용하면 상기 식(3.2.39)의  $\eta_1 = \eta_{\text{max}}$ 로부터 아래 식 (3.2.41)에 대하여 알 수 있다.

$$\frac{(1+w)}{k(e^{k(d+\eta_1)}+e^{-k(d+\eta_1)})} = \frac{C_1}{c}e^{-kd}$$

$$= \frac{\eta_1}{(e^{k(d+\eta_1)}+e^{-k(d+\eta_1)})}$$
(3.2.41)

그러므로  $1+w = k\eta_1 \coth(d+\eta_1)$ 이 된다.

상기의 식(3.2.40)로부터  $C_1$ 을 찾으면 다음 식(3.2.42)을 이용하여 식(3.2.43)을 얻을 수 있다.

$$k(\eta_{1}+d) = \tanh^{-1}\left(\frac{\eta_{1}}{1+w}\right) = \frac{1}{2}Ln\frac{(1+w)+k\eta_{1}}{(1+w)-k\eta_{1}}$$

$$\frac{(1+w)c}{k} = C_{1}e^{-kd}\left(\sqrt{\frac{1+w+k\eta_{1}}{1+w-k\eta_{1}}} + \sqrt{\frac{1+w-k\eta_{1}}{1+w+k\eta_{1}}}\right)$$

$$C_{1} = \frac{c}{k}e^{kd}\frac{\sqrt{(1+w)^{2}-k^{2}\eta^{2}}}{2}$$

$$(3.2.43)$$

상기 식(3.2.41)로부터 다음 식(3.2.44)을 유도할 수 있으며, 이를 이용하여 유 함수(Stream Function), Φ(x,z) 및 수면 변동 높이 η(x)을 식(3.2.45)과 식(3.2.46) 을 구할 수 있다.

$$1 - \frac{(k^2 \eta_1^2)}{(1+w)^2} = 1 - \tanh^2 k (d+\eta_1) = \operatorname{sech}^2 k (d+\eta_1)$$
(3.2.44)

$$\sqrt{(1+w)^2 - k^2 \eta_1^2} = (1+w) \operatorname{sech} k(d+\eta_1)$$

$$\sinh k(d+z) = k (2.2.45)$$

$$\Phi(x,z) = cz - c\eta_1 \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh k(d+\eta_1)} \cos kx$$
(3.2.45)

$$\eta(x) = \eta_1 \frac{\sinh k(d+\eta)}{\sinh k(d+\eta_1)} \cos kx \tag{3.2.46}$$

여기서 η(x)을 파고, 파장 및 수심의 함수로 나타내면 식(3.2.39), 식(3.2.43) 및



식(3.2.44)을 이용하면, 다음 식(3.2.47)으로 표현되어진다.

$$-\eta_{2} = H - \eta_{1} = \frac{\sqrt{(1+w)^{2} - k^{2} \eta_{1}^{2}}}{2k} \left[e^{k(d+\eta_{1}-H)} - e^{-k(d+\eta_{1}-H)}\right]$$
(3.2.47)

$$=\frac{(1+w)}{2k} \operatorname{sech} k(d+\eta_1) [\frac{e^{k(d+\eta_1)}}{2e^{kH}} - \frac{e^{kH} \cdot e^{-k(d+\eta_1)}}{2}]$$

위 식(3.2.42)을 상기 식(3.2.47)에 대입하면, 아래의 식(3.2.48)로 표현되어진다.

$$H - \eta_1 = \frac{\sqrt{(1+w)^2 - k^2 \eta_1^2}}{2k} \left[ \frac{\sqrt{(1+w) + k\eta_1}}{e^{kH} \sqrt{(1+w) - k\eta_1}} - \frac{e^{kH} \sqrt{(1+w) - k\eta_1}}{\sqrt{(1+w) + k\eta_1}} \right]$$
(3.2.48)

$$= \frac{1}{2k} \left[ \frac{(1+w)(1-e^{2kH}) + k\eta_1(1+e^{2kH})}{e^{kH}} \right]$$
$$= \frac{1}{k} \left[ k\eta_1 \cosh kH - (1+w) \sinh kH \right]$$
다음은 상기 식(2.41)의  $1+w = k\eta_1 \coth(d+\eta_1)$ 로부터 다음 식(3.2.49) 및 식

(3.2.50)을 얻을 수 있다.

$$kH = k\eta_1 [(1 + \cosh kH) - \coth k(d + \eta_1) \sinh kH]$$
(3.2.49)

$$\delta = \frac{H}{L} = \frac{\eta_1}{L} \left[ (1 + \cosh 2\pi\delta) - \coth k (d + \eta_1) \sinh 2\pi\delta \right]$$
(3.2.50)

여기서,  $\eta_1$ 은 Newton-Raphson방법으로 그 값을 찾을 수 있으며, 파속도,  $c = \frac{L}{T}$ , 파수인 $k = \frac{2\pi}{L}$ 이다.

해저면이 경사일 때 경사( $\beta_f$ )를 고려하고, 수심을 변화시켜,  $d_x = d - x \cdot \tan \beta_f$ 될 수 있도록 하여야한다.



Collection

6)(

## 3.2.4 해류하중

해류(Sea Current)는 조석이나 바람에 의해 유체 전체가 일정한 방향으로 움 직이는 현상이다. 이중 해양구조물과 관련하여 중요한 것은 조석간만의 차에 기인한 조류(Tidal Currents)와 바람에 의한 조류(Wind-Drift Currents ; 취송류) 이다. 두 경우 모두 해면과 수평하게 이동한다고 볼 수 있으며 수심에 따라 그 속도가 변한다. 조석에 의한 조류는 하루 두 번씩 방향이 바뀌며 특정지역에서 의 관측결과를 통해 유속과 방향을 알 수 있다. 따라서, 설계시 계산에 일정하 게 적용되는 순간 해수면의 조류속도와 방향을 고려하는 것이 일반이다. 이런 수심에 따른 속도변화는 정의할 수 있는 유일한 변수이다.

반면 바람에 의한 조류의 속도는 해면 위 10m 상부에서 측정한 풍속의 약 1% 정도로 추산하며 수면에서 최대이고 수심이 깊어지면서 선형적으로 감소한 다. 조석에 의한 조류는 풍속 계산과 마찬가지로 1/7 지수법칙에 따른다고 본다 [Fig. 3.2.7 참조]. 조류의 방향은 바람에 의한 조류의 경우 바람의 방향과 일치 한다고 볼 수 있지만 조석에 의한 조류는 그 방향이 서로 다를 수 있다.

$$U_T = U_{0T} \left(\frac{y}{h}\right)^{\frac{1}{7}}$$
: Tidal Currents

$$U_W = U_{0W}(\frac{y}{h})$$
 : Wind-Drift Currents



Fig. 3.2.7 Distribution of Current Velocity Depending Water Depth



### 3.2.5 지지구조물의 동적거동

① 동역학 기초

구조 동역학의 적합한 모델링의 중요성은 Fig. 3.2.8에서 보여준 것처럼 단자 유도 질량-스프링-댐퍼시스템으로 가장 쉽게 설명될 수 있다. 완전한 해상풍력 발전시스템은 결합된 다자유도 질량-스프링-댐퍼시스템의 수로 구성되어 있다 고 할 수 있다.



Fig. 3.2.8 Single Degree of Freedom Mass-Spring-Damper System

조화하중(Harmonic Excitation) F(t)가 질량(Mass)에 작용할 때, 발생하는 변위 x의 크기와 위상각은 작용주파수 f에 달려있다. 3가지 정상상태(Steady State)의 응답영역은 Fig. 3.2.9, Fig. 3.2.10, Fig. 3.2.11과 같이 준정적, 공진, 관성지배 상 태로 각각 나타낼 수 있다. 여기서, 파란 실선은 작용외력을 나타내고, 붉은 점 선은 변위를 나타낸다.

Fig. 3.2.9는 작용주파수가 시스템의 고유주파수의 훨씬 아래에 있는 준정적 응답상태(Quasi-Static Response)를 설명하는 것으로 질량의 변위는 마치 정적하 중이 작용하는 것처럼 거의 즉시 힘을 변화시키는 시간을 따른다.

Fig. 3.2.10은 시스템의 고유주파수 부근의 좁은 지역에서 작용주파수에 대한 전형적인 응답을 보여준다. 이 지역에서 스프링력과 관성력은 거의 무시되고 정적인 응답보다 더 큰 몇 배수의 응답이 생긴다. 그 결과 진폭은 현재 시스템 의 댐핑에 지배된다. 작용주파수가 고유주파수보다 위에 있을 때 질량은 더 이 상 적용하중을 따르지 않는다. 결과적으로 Fig. 3.2.11에 나타난 것처럼 응답수





Fig. 3.2.10 Resonant Response





Fig. 3.2.9에서 Fig. 3.2.11까지는 정상상태에서 선형시스템에 적용된 정현파 (Sinusoidal)입력은 크기와 위상각이 다른 동일한 주파수에 대한 정현파를 출력 한다는 일반적인 사실을 설명한다. 선형시스템의 특성이 수정된 크기나 위상은 동적증폭계수(Dynamic Amplification Factor, DAF)와 위상지연(Phase Lag)으로 요약할 수 있다. 동적증폭계수는 동적응답의 크기와 동일한 하중의 크기에 의 한 정적 응답크기 사이의 비율을 나타낸다. Fig. 3.2.12는 Fig. 3.2.8에 묘사된 단 자유도 시스템의 동적증폭계수와 위상지연을 보여준다.

Fig. 3.2.12에서 최고점(Peak)은 시스템의 고유진동수와 일치한다. 피크의 높이 는 댐핑에 의해 결정되므로 어떠한 공진문제라도 적절한 댐핑으로 해결할 수 있다. 동역학에서 외력에 의한 작용주파수(Frequency of Excitation)는 적어도 그 크기만큼 중요하다. 공진거동(Resonant Behaviour)은 심각한 하중케이스를 발생시키고, 심지어 파괴까지 일으킬 수 있지만, 대부분은 잠재적인 피로문제 때문에 우려한다. 동역학적 문제가 예상되는 구조물은 예상된 작용주파수와 구 조물의 전체 또는 부분의 고유진동수에 대한 상세한 지식이 매우 중요하다. 동 적증폭계수는 일반적으로 예비설계 단계에서 정적응답(위상정보는 무시함)과 비 교하여 동적응답 효과를 계산하기 위해 사용된다. 일반적으로 동적증폭계수는



Fig. 3.2.12에 나타낸 것과 유사하게 시간영역 시뮬레이션으로부터 유도된다. 여 기서 얻을 수 있는 중요한 결론은 시간에 따라 변하는 하중을 받는 해상풍력발 전 시스템의 응답은 신중하게 평가되어야 한다는 것이다.



Fig. 3.2.12 Upper : Dynamic Amplification Factor per Normalized Frequency Lower : Phase Lag Versus Normalized Frequency

② 연성(Soft)과 강성(Stiff) 풍력터빈시스템

터빈이 작동 중일 때 로터(Rotor)는 3차원 난류영역에서 회전하므로 이 영역 은 난류의 영향과 관련지어서 설명할 수 있다. Fig. 3.2.13은 Blyth Offshore Wind Turbines의 블레이드에 모델되었던 난류영역을 그래픽으로 표현한 것으 로, 난류강도 12%, 풍속 10m/s에서 가로 100m × 세로 100m의 면적을 포함한 다. 풍속이 높고 낮은 지역이 명확하게 구분된다.

회전하는 블레이드가 소용돌이(Eddy)를 통과할 때, 풍속이 높거나 낮을 때의 짧은 주기를 경험한다. Fig. 3.2.14는 Fig. 3.2.13에서 500s와 550s사이에서 발생 하는 소용돌이를 확대한 것인데, 1블레이드(위)와 3블레이드(아래)를 나타낸다.


소용돌이 규모는 블레이드가 소용돌이를 몇 번씩 통과할 때와 같기 때문에, 터 빈 구조는 1P라고 불리는 로터의 회전주파수에서 하중의 최고점(Load Peak)이 발생한다. 이런 소용돌이 일부(Eddy Slicing)는 1P 주파수뿐 아니라, 모든 블레이 드 통과 주파수에서 하중최고점을 발생시킬 것이다. 3개의 블레이드를 가진 터 빈은 *N<sub>b</sub>P*=3*P*로 나타낼 수 있다.



Fig. 3.2.13 Turbulent Dddies in a Wind Field(Van der Tempel, 2006)



Fig. 3.2.14 Single Blade Passing Through Turbulent Eddy (above) Sampling 1P Frequency All Three Blades (black, white, blue) Passing Through the Eddy at 3P Frequency



이 두 주파수를 그래프로 나타내면 Fig. 3.2.15와 같다. 수평축은 주파수, 수직 축은 값이 없는 임의의 응답을 나타낸다. 고차의 외력작용으로 1P와 3P가 주요 작용력으로 고려된다. 공진을 피하기 위해 구조물은 첫번째 고유진동수가 1P나 3P의 작용과 동시에 발생하면 안된다. 이것을 피하기 위한 3가지 구역이 있다. 1차 고유진동수가 3P이상인 매우 강한 구조물을 "Stiff-Stiff Structure"라 하고, 1P와 3P사이인 경우 "Soft-Stiff Structure"라 하고, 1P 아래인 매우 연성구조는 "Soft-Soft Structure"로 불린다.



Fig. 3.2.15 Soft to Stiff Frequency Intervals of a Three Bladed, Constant Rotational Speed Wind Turbine

유연한 풍력터빈은 Fig. 3.2.16과 같이 꼭대기에 질량( $m_t$ )가진 깃대처럼 모델 링 될 수 있다. 이 모델은 Fig. 3.2.8의 단자유도 시스템과 유사하다. 타워의 휨 유연성은 스프링 강성을 나타내고, 감쇄는 댐핑 계수의 형태로 주어진다.



Fig. 3.2.16 Structural Model of a Flexible Wind Turbine System



고정단 기초와 꼭대기에 질량을 가진 균일한 보(Beam)로 구성된 이 모델의 경우 1차 고유진동수 계산을 위해 식 (3.2.51)의 근사식이 유효하다.

$$\begin{split} f_{nat}^2 &\cong \frac{3.04}{4\pi^2} \frac{EI}{(m_{\mp} + 0.227\mu L)L^3} \eqno(3.2.51) \\ \\ \mbox{$q$7]A}, \ f_{nat} : 첫 번째 고유진동수(Hz) \\ m_{\mp} : 상단의 질량(kg) \\ \mu : 단위 m당 타위의 질량(kg/m) \\ L : 타위의 높이(m) \\ EI : 타위의 높이(m) \\ EI : 타위의 휨강성(N \cdot m^2) \\ \\ I &\cong \frac{1}{8}\pi D_{av}^3 t_w \mbox{ and } \mu = \rho_{steel} \pi D_{av} t_w \mbox{ and } a = \frac{m_{\mp}}{\rho_{steel} \pi D_{av} t_w L} \\ \\ \mbox{$(3.2.52)$} \mbox{$(3.2.52)$} \mbox{$(3.2.52)$} \mbox{$(3.2.51)$} \mbox{$(3.2.51)$} \mbox{$(3.2.53)$} \mbox{$(m_{\mp})$} \\ \\ \mbox{$(3.2.52)$} \mbox{$(m_{\mp})$} \mbox{$(3.2.51)$} \mbox{$(m_{\mp})$} \\ \\ \mbox{$(3.2.52)$} \mbox{$(m_{\mp})$} \mbox{$(m_{\mp})$} \\ \\ \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \\ \\ \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \\ \\ \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$} \\ \\ \mbox{$(m_{\pi})$} \mbox{$(m_{\pi})$$$

ρ<sub>steel</sub> : 강재의 밀도(7,850 kg/m<sup>3</sup>)

예를 들어, 두 개의 블레이드로 구성된 일정한 속도의 터빈이 회전주파수 1P 는 0.3Hz, 블레이드 통과주파수 2P는 0.6Hz로 가정하고, Soft-Soft구조물은 첫 번째 고유진동수가 0.25Hz, Soft-Stiff는 0.5Hz, Stiff-Stiff는 1Hz, 벽체 두께는 전 체높이 모두 75mm, 상단 질량은 130,000kg로 가정하면, 식 (3.2.53)을 지정된 고 유진동수에 해당하는 직경 D를 결정하기 위해 적용하면, 그 결과는 Table 3.2.4 와 같다.



Туре	$f_{nat}$	Diameter
Soft-Soft	0.25 Hz	2.4m
Soft-Stiff	0.50 Hz	4.2m
Stiff-Stiff	1.00 Hz	7.4m

 Table 3.2.4 Required Diameters per Frequency

큰 관형 타워의 구매 및 취급비용은 주로 직경에 영향을 받기 때문에 투자관 점에서 보면 "부드러운(Softest)" 구조물이 최선의 선택일 것이다. 이 계산들은 단지 설명을 위한 것으로 실제 해상풍력발전 지지구조물은 더 많은 영향인자에 의해 치수가 결정될 것이다. 예를 들어, 지반특성은 Fig. 3.2.16에 고정단으로 가 정했던 것보다 좀 더 유연할 것이다. 이 유연성은 전체적으로 고유진동수를 낮 추는 결과를 주지만, 직경을 증가시키는 보강이 필요할 수도 있다.

③ 지지구조물의 동적설계 요건

변속터빈(Variable Speed Turbines)은 정속터빈 시장으로부터 점유율을 확보하 고 있고, 높은 에너지와 낮은 동적진동을 제공한다. 예를 들어, Vestas 2MW 터 빈은 10.5~24.5RPM의 회전속도를 가지고 있다. 이 의미는 Fig. 3.2.17에서 보여 준 것처럼 연강성(Soft-Stiff)설계를 하기 위한 영역이 좁다는 것을 말한다.



Fig. 3.2.17 Frequency Intervals for a Variable Speed Turbine System

로터 블레이드는 더 길어지고 타워상단의 발전기 질량이 더 큰 대형터빈을 만들기 위한 트렌드는 여전히 강하다. 로터 직경의 증가는 연성(Soft)에서 강성



(Stiff)설계로 접근하는 방식에 직접효과가 있다. 풍력터빈의 전력성능은 Fig. 3.2.18과 같이 선단속도비(Tip Speed Ratio, TSR)의 함수로 나타낼 수 있고, 식 (3.2.54)로 표현된다.



1P 회전주파수에 해당되는 값은 식 (3.2.55)로 나타낼 수 있다.

$$f_{1P} = \frac{\lambda V_w}{\pi D_{rotor}} \tag{3.2.55}$$

이것은 직경이 증가할 때 최상의 선단속도비에 대한 회전주파수는 감소한다 는 것을 의미한다. 풍속  $V_w = 11.4m/s$ ,  $\lambda = 8$ 과 로터직경 80m, 100m, 120m를 식 (3.2.55)에 각각 대입하여 결과를 나타내면 Fig. 3.2.19가 된다.

또한, 로터 직경의 증가는 더 높은 허브높이(Hub Height)를 요구한다. 식 (3.2.53)에서 고유진동수는 타워높이 L의 제곱에 반비례한다는 것을 알 수 있는 데, 이것은 높이가 증가하면 고유진동수는 크게 감소한다는 것을 의미한다.

Collection



Fig. 3.2.19 1P and 3P Frequencies for 80, 100 and 120m Diameter Rotors Operating at Constant Rotational Speed

추가로 해상풍력발전 시스템에는 파도에 의한 작용력이 존재하고, 파 주파수 는 일반적으로 로터의 회전주파수 보다 낮다. 파도는 다양한 기간에 걸쳐 오기 때문에 넓은 주파수 대역으로 분포한다. Fig. 3.2.20은 파도의 평균주파수 범위 (Range of Mean Wave Frequencies)를 보여주는 실제 사례이다. 히스토그램은 Dutch Coast에서 1년 동안 발생한 파랑의 주파수를 보여준다. 해상풍력발전 시 스템이 공진을 피하기 위해 회전주파수 아래의 영역으로 고유진동수를 갖도록 설계할 경우에는, 파랑의 작용으로 인한 공진이 중요한 영역으로 고려되어야 한다.



Fig. 3.2.20 Occurrence of Wave Frequencies with Plotted 1P and 3P Frequencies for Properties of a 3 Bladed Turbine after Opti-OWECS off the Dutch Coast(Ferguson, 1998)



④ 보정조건

앞 절에 설명된 것처럼 강재를 적게 사용하여 보다 경제적인 지지구조물을 설계하기 위해서는 연성(Soft-Soft)구조가 되어야 할 것이다. 지지구조물의 고유 진동수에 대한 경향을 보면, 실제로 큰 로터와 구조물 및 다양한 속도의 터빈 이 적용될 때, 파랑의 작용으로 발생하는 공진 거동의 주요 위험도 함께 연성 (Soft)영역으로 이동될 것이다. 이런 흐름에 역할을 하는 두 가지 중요한 현상이 있다. 공력감쇠(Aerodynamic Damping)와 변속터빈의 제어능력(Control Ability of Variable Speed Turbines)이다.

로터의 IP 주파수에 의한 공진작용을 막기 위해 전형적인 연성(Soft-Soft)지지 구조물로 설계할 때, 약 10% 정도는 고유진동수 근처의 주파수를 갖는 파랑과 만나게 된다. 공진거동이 발생하더라도 Fig. 3.2.12에서 피크 높이를 현저히 감 소시키는 시스템에 감쇠기가 추가된 로터를 사용할 경우, 작용하는 풍하중에 따라 동적응답은 상당히 감소된다. 그러므로 타워상단 변위와 전체 피로손상도 이에 상응하여 감소된다. 그러나 공력감쇠는 블레이드가 공회전 또는 주차된 경우와 같이 터빈이 에너지를 생산하지 않을 때는 나타나지 않는다. 주차된 터 빈과 비교했을 때 Opti-OWECS 지지구조의 피로수명은 작동중인 터빈의 두 배 로 계산된 연구결과도 있다.

변속터빈은 최적의 속도로 시스템의 작동을 유지시키는 정교한 제어장치를 갖고 있다. 회전속도의 다양성은 지지구조물의 '안전한'고유진동수 영역의 폭 은 좁히지만, 제어기는 새로운 간격(영역)을 만드는데 사용될 수 있다.

고유진동수가 회전주파수 대역의 범위에 놓여 있더라도, 제어기는 고유진동수 주변의 회전주파수를 건너뛰도록 프로그래밍 할 수 있다. 이것은 타워의 고유 진동수로 작용으로부터 로터를 보호할 것이다. 불확실한 지반조건이나 특별한 설치조건은 적절하게 설계된 고유진동수와는 다른 고유진동수를 발생시킬 수 있기 때문에, 실제로 지지구조물 설치하고 첫 번째 고유진동수에 대해 측정한 후 제어기를 동조(Tuning of the Controller)함으로써 시스템을 최상의 상태로 만들 수 있다. 제어시스템에 의해 건너뛰는 주파수는 스웨덴의 Utgrunden Wind Farm에 성공적으로 적용되었다.



## 3.3 설계기준정립

설계기준이란 풍력터빈 및 지지구조물 설계시 근거가 되는 설치지역의 외부 조건, 적용할 RNA(Rotor-Nacelle-Assembly)의 설계사항, 설계일반 및 설계철학 등을 풍력단지 설계의 신뢰성과 안전성을 보장하기 위해 기술하는 것으로 본 설계기준은 한국전력공사의 전력연구원에서 2013년 12월에 발간한 서남해 2.5GW 해상풍력 실증단지 설계근거 중간보고서 (풍력터빈 및 지지구조물 설계 를 위한 기본자료)를 바탕으로 작성되었으며, 본 연구에서 다루는 모든 구조물 의 구조해석에 동일하게 적용되었다.

본 설계에 있어 관련 코드는 다음의 적용순서에 따라 기준을 준용하였다.

① 설계기준 (본 절 내용)

- ② IEC 61400-3: Design requirements for offshore wind turbines, 2009
- ③ DNV OS J-101: Design of offshore wind turbine structures, 2011

④ ISO standard

(5) API/Eurocode/NORSOK/AISC/AASHOTO/ASTM/ACI/KS code

⑥ 항만 및 어항설계기준/구조물 기초설계기준/콘크리트 구조설계기준/도로교 설계기준

#### 3.3.1 공력하중

본 연구에 사용될 풍력터빈은 5MW(NREL) 모델이며, 그에 따른 타워와 터빈 의 제원은 Table 3.3.1과 3.3.2에 각각 나타내었다. 지지구조물과의 경계면인 타 워기초(Tower Base)의 외경은 5.6m, 강재의 두께는 32mm로 구성되어 있으므로 타워와 연결되는 타워기초는 최소한 5.6m 이상의 형상을 가지도록 하였다.

실제 해상풍력 지지구조 연구에 사용되는 공력하중은 앞서 Table 3.1.1에 나 타낸 것처럼 터빈 상황에 따라 총 33케이스(DNV기준)로 구분되고, 이들이 해상 조건과 조합하게 되면 수백에서 수천 개의 하중조합이 만들어진다. 이 모든 하 중조건을 구조해석에 적용하는 것은 해석시간과 결과분석에 방대한 시간이 필



요하고, 무엇보다 본 연구목적에 부합하지 않으므로 다양한 공력하중 조건 중 Table 3.3.3의 가장 일반적인 하중조건을 선택하여 구조해석에 적용하였다. 이 공력하중을 바탕으로 국내 실증단지와 서남해안 타당성 조사에 적용된 기존의 자켓형과 이 자켓형을 일부 개선한 신형식 자켓형 지지구조의 정적 및 동적성 능을 비교 분석한다.

		Height	Outer Diameter	Outer Diameter	Section	
Hub Height, 85.76 m	Section	or Section to MSL	at Section top	at Section bottom	Wall Thick.	Mass
6	(-)	(m)	(m)	(m)	(mm)	(kg)
5	82.76	77.76	4.000	4.118	30	1000 (at 82.76m)
4	77.76	68.76	4.118	4.329	20	0
	68.76	58.76	4.329	4.565	22	0
3	58.76	48.76	4.565	4.800	24	0
2	48.76	36.76	4.800	5.082	28	1400 (at 48.76m)
1	36.76	26.76	5.082	5.318	30	0
	26.76	14.76	5.318	5.600	32	1900 (at 14.76m)

Table 3.3.1 Characteristics of Tower

Table 3.3.2 Characteristics of Turbine

Turbine Parameter	Value
Rated Power(MW)	5.0
Rotor Diameter(m)	126.0
Mass of Rotor and Nacelle(ton)	350.0
Nominal Rotor Speed(m/s)	12.1
Cut-in Wind Speed(m/s)	3.0
Cut-out Wind Speed(m/s)	25.0



구조해석에 적용된 공력하중 조건들은 Table 3.3.3에 나타내었고, 각 하중조건 별 방향은 Fig. 3.3.1에 표현하였다.



# Fig. 3.3.1 Coordinates of Wind Turbine

Lood Coso		Мх	Му	Mz	Fx	Fy	Fz
Luau Case		(kN · m)	(kN · m)	(kN · m)	(kN)	(kN)	(kN)
1.3ec_1	Mx_Max	21,067	24,935	-602	396	-175	-5,593
1.3ea_2	Mx_Min	-7,294	9,281	2,235	316	116	-5,637
1.3ca_3	My_Max	7,467	58,379	2,678	924	-21	-5,722
1.4aa	My_Min	12,836	-5,283	276	37	-149	-567
1.3ec_3	Mz_Max	10,804	10,907	7,352	239	-59	-5,888
1.3ea_2	Mz_Min	728	6,838	11,290	310	54	-5,563
1.3aa_2	Fx_Max	3,159	50,301	2,141	972	20	-5,785
1.4aa	Fx_Min	13,135	-4,357	141	15	-126	-5,675
1.3ea_3	Fy_Max	-1,905	14,437	2,589	406	202	-5,685
1.4cc	Fy_Min	18,210	18,072	186	353	-250	-5,649
1.3ea_3	Fz_Max	5,389	18,015	2,858	358	-9	-5,368
1.3ec_3	Fz_Min	8,266	9,548	6,218	258	-71	-5,921
DLC 1.3 Power Production + Extreme Turbulence (Extreme, Normal)							
DLC 1.4	DLC 1.4 Power Production + Extreme Coherent Gust with Change of Direction						
(Extreme,	Normal)						

# Table 3.3.3 Aerodynamic Load Cases



## 3.3.2 환경하중

① 해수(Sea water)

국립해양조사원에서 제공하는 군산 외항의 해양 관측년보 자료와 영광원전 인극 해역의 관측 결과를 이용하여 해수 특성을 파악하였다.

Water density	1,025 kg/m <sup>3</sup>
Water salinity	31.55 p.s.u
Water temperature	$13.40^{-0}C$

Table 3.3.4 Characteristic of Sea Water

② 설계수위(Design Water Depth)

조위 변동 분석은 과거 장기 관측 자료가 존재하는 위도 조위관측 자료를 분 석한 결과를 이용하였고, 해일고는 해양과학기술원에서 산정한 값을 이용하였 다.

Table 3.3.5 Design Water Depth

Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, 2005	Water Level	Based on IEC	
서게고즈익(50wr)	E.L. (+) 4.136m	-Highest Still Water Level(HSWI)	
= = = = = = = = = = = = = = = = = = =	D.L. (+) 7.413m	-Ingliest Still water Level(IISwE)	
야킹ㅋㅋㅈ이(App HUWI)	E.L. (+) 3.276m	+ Highest Astronomical Tide(HAT)	
목죄고고조귀(App. HHwL)	D.L. (+) 6.552m	+ Highest Astronomical Hide(HAT)	
퍼그케스이(MCI)	E.L. (+) 0.000m	-Moon Soo Lovel(MSL)	
평판애구귀(MSL)	D.L. (+) 3.276m	= Mean Sea Level(MSL)	
	E.L. (-) 3.276m	Lowest Astronomical Tide(LAT)	
약최세세조취(App. LLWL)	D.L. (+) 0.000m	+Lowest Astronomical Tide(LAT)	
서 쾨 ㄱ ㅇ)(드아~)	E.L. (-) 4.136m	Lewest Still Water Level(LSWI)	
실계적조취(JUYI)	D.L. (-) 0.860m	⇒Lowest Still water Level(LSwL)	
양의 해일고(50yr)	(+) 0.860m MSL	≒Positive Storm Surge(A)	
조차	6.552m	≠Tidal Range(B)	
음의 해일고(50yr)	(-) 0.860m MSL	≒Negative Storm Surge(C)	



쇄파에 의한 해류는 발생하지 않는 것으로 가정하였고, 해모수 1 지점과 실증 단지의 극한해류는 아래 Table 3.3.6과 같다. 해수 유동실험을 통해 산정된 조류 속도(1.05m/s)를 50년 빈도의 Tidal Current로 가정하고, DNV Code를 기반으로 빈도별 최대 수심에 대한 조류속도 산정하였으며, Current Blockage Factor는 1.0을 적용하였다.

Return period(yr)	HEMOSU-1	Test Bed		
1	1.0241	0.8041		
50	1.0562	0.8361		

Table 3.3.6 Extreme Current Velocity at MSL (m/s)

Table 3.3.7 Current Velocity (m/s) at Water Depth

Water Depth(m)	lyr Return period V <sub>tide</sub> (m/s)	50yr Return period V <sub>tide</sub> (m/s)
MSL(-)	0.70 (≒ 1.05 x 70% 가정)	1.05
MSL(-) 10%	0.69	1.03
MSL(-) 20%	0.68	1.02
MSL(-) 30%	0.67 1945	1.00
MSL(-) 40%	0.65 OF CH	0.98
MSL(-) 50%	0.63	0.95
MSL(-) 60%	0.61	0.92
MSL(-) 70%	0.59	0.88
MSL(-) 80%	0.56	0.83
MSL(-) 90%	0.50	0.76
MSL(-) 100%	0.36	0.54



## ④ 파랑조건(Wave conditions)

풍파에 의한 유의파고 별 평균주기는 아래 Table 3.3.8과 같고, 재현 주기에 따른 극치해상 조건은 Table 3.3.9와 같다. 파력은 모리슨식을 적용하여 산정하 였다.

V(m/s)	<1	1-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15
Hs(m)	0.80	0.82	0.90	1.11	1.48	1.93	2.42	2.85
Tp(s)	5.34	5.38	5.37	5.59	6.25	7.03	7.99	8.92
V(m/s)	15-17	17-19	19-21	21-23	23-25	25-27	27-29	
Hs(m)	3.26	3.66	3.87	4.17	3.37	2.37	3.16	
Tp(s)	9.63	10.30	10.17	9.37	8.00	10.00	7.50	

Table 3.3.8 Predicted Value(H<sub>s</sub>, T<sub>p</sub>) due to Wind

Table 3.3.9 Significant Wave and Period

Return period(yr)	Hs		Tp
1	4.90	B	12.05
50	6.87	TT I	13.70
100	7.26		13.89

극치설계파고(Extreme design wave height: EWH)와 파주기는 IEC61400-3에 따라 다음 식에 의해 Table 3.3.10과 같이 정리할 수 있으며, Wave Kinematic Factor는 보수적으로 1.0을 적용하였다.

$$H_1 \approx 1.86 H_{s1}, H_{50} \approx 1.86 H_{s50}$$

$$11.1\sqrt{H_{s,}\frac{ESS}{g}} \le T \le 14.3\sqrt{H_{s,}\frac{ESS}{g}}$$

Table 3.3.10 Extreme Design Wave

Return period(yr)	H₅(m)	EWH[H <sub>max</sub> (m)]	$T_{min}, T_{max}$	
1	4.90	9.11	7.85, 10.11	
50	6.87	12.78	9.29, 11.97	



⑤ 쇄파 검토(Wave Breaking)

쇄파 발생 여부는 DNV-OS-J101 기준을 이용하였고, 검토 결과 쇄파는 고려 하지 않아도 된다.

Condition	d(m)	H(m)	L(s)	H/d	H/L	Remark
정상 파랑	20.0	1.48	59.25	0.074<0.78	0.024<0.14	미 고려
극치 파랑	20.0	12.78	178.12	0.639<0.78	0.071<0.14	미 고려

Table 3.3.11 Wave Breaking Check

⑥ 항력계수 및 관성계수

항력계수와 관성계수, Cd 및 Cm은 기본적으로 API Code에 따라 부드러운 표 면(Smooth: EL.(+)0.0m이상)에서 0.65와 1.60, 거친 표면(Rough: EL.(+)0.0m 이하) 에서는 1.05와 1.2를 적용한다. 본 해석에서는 거친 표면을 적용한다.

		0		
Surface Shape 📥	D	rag Coefficie	nt	Inertia Coefficient
부드러운 표면 S		0.65		1.60
거친 표면		1.05		1.20

Table 3.3.12 Drag and Inertia Coefficient

#### 3.3.3 해양수서생물

OH OF L

1945

해양수서생물란 해양구조물이 물에 잠겨있는 표면에 여러 생물개체들이 축적 되는 것을 말하며 구조물에 대해 다음과 같은 영향을 끼친다.

① Surface Roughness를 늘려 Drag Force 커짐

② Project Area와 Volume, Added Mass를 증가

③ Protective Coating을 파괴하고 Crevice Corrosion을 일으켜 부식을 촉진

④ Inspection과 Maintenance를 방해

따라서, 구조부재에 부착된 해양수서생물의 영향을 파력과 조력 산정에 고려 하기 위해 해저면(Sea Bed)에서부터 수면까지 강관부재의 바깥지름과 일반 구 조용 강재의 최대치수를 다음과 같이 증가시킨다. 부착생물의 밀도는 1,250



Itom	From Elevation	To Elevation	Marine Growth Thickness		
item	(m)	(m)	(cm)		
Marine Growth	(+) 3.0	(-) 10.0	5		
Profile	(-) 10.0	Mudline	10		

Table 3.3.13 Marine Growth(Based on EL)

## 3.3.4 비말대

비말대의 범위는 다음과 같이 DNV-OS-J101에 따라 산정하였다.

① 비말대 상부한계(Upper limit) = Highest astronomical tide(HAT) + 60% of the reference wave height(one-third of the 100 year wave height) = 3.276 + 0.6×1/3×12.78 = 5.832m => 약 6m MSL

② 비말대 하부한계(Upper limit) = Lowest astronomical tide(LAT) + 40% of the reference wave height(one-third of the 100 year wave height) = -3.276 -0.4×1/3×12.78= -4.98m => 약 -5.0m MSL



Fig. 3.3.2 Definition of Water Levels(DNV-OS-J101)

# 3.3.5 강재 부식두께

부식허용두께(Corrosion allowance: CA)는 구조물의 외부에 대하여 고려하고, 0.15mm/y로 가정하여 설계수명 20년 동안 총 3mm 부식이 발생한다고 가정하였다.



# 3.4 지반조사 및 분석

#### 3.4.1 지반조사 자료

본 연구에서 제안하는 개선된 자켓형 지지구조물을 서남해안 2.5GW 해상풍 력단지에 적용가능성을 확인하기 위해 예정해역에 가장 근접한 지반조사 데이 터를 구조해석에 사용하였다. 본 지반조사 자료는 호남광역경제권 선도산업 기 술개발사업(사업기간 : 2009년 10월~2011년 12월)을 통해 ㈜디엠에스에서 수행 한 지반조사로 2010년 3월 30일에 완료되었다. 이 지반조사 보고서에 의하면 지반조사는 총 5개소에 대해서 수행되었고, 위치는 아래 Figure 3.4.1에서 나타 낸 전라남도 영광군 낙월면 왕등여 북동측 해상 일원에 위치한다. 시추조사는 셉 바지(Sep barge)에 탑재한 회전수세식(Rotary Wash Type) 유압형 시추기를 사용하였으며, 시추규격은 NX(Φ76mm) 규격으로 실시하였다. 또한, 시추조사 심도는 조사목적 및 지층분포 특성을 고려하여 풍화암 15m 이상 또는 연암 2.5m 이상 확인하는 것을 원칙으로 하였다.



Fig. 3.4.1 Soil Investigation Site



#### 3.4.2 시추조사 결과

조사 지역 5개소에 대하여 시추조사 및 표준관입시험을 실시하였으며, 조사결 과, 지층 구성 상태는 Table 3.4.1과 같이 상위로부터 해성퇴적토층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층 순으로 분포되어 있다.

BH	Boring Investigation								
No	Clay/Silt(m)	Sand(m)	Sand(m) Weathering		Soft	Sum(m)	SPT(N)		
110.	Ciay/Siit(iii)	Soil(m)		Rock(m)	Rock(m)	Sumun			
W-1	29.0	14.5	-	6.0	5.5	55.0	33		
W-2	26.7	14.8	12.5	14.8	3.0	71.8	46		
W-3	27.3	17.2	14.0	16.5	-	75.0	51		
W-4	20.5	16.3	14.2	1.5	3.0	55.5	35		
W-5	31.3	11.2	13.0	12.5	2.5	70.5	46		
합계	134.8	74.0	53.7	51.3	14.0	327.8	211		

Table 3.4.1 Investigation Result for each Bole Hole

① 해성퇴적토층

본 층은 지표면으로부터 36.8~44.5m의 두께로 분포하고 있으며, 토성은 실트 질 점토(CL), 모래질 실트(ML) 실트질/실트 섞인 모래(SM, SP-SM)로 구성되어 있다. 점성토(CL, CH, ML)층의 경우 층 중부 또는 하부에 약 4.8~24.0m의 두께 로 분포하고 있으며, 사질토층이 협재하고 있다. N값은 0/30~32/30으로 나타나 며 대체로 0/30~14/30으로 매우 연약함 내지보통 단단한 연경도를 나타낸다. 색조는 암회색이 주를 이루고 있으며, 함수상태는 습윤 상태 내지포화 상태를 보이고 있다. 사질토(SM, SP-SM)의 경우 층 상부 또는 하부에 약 1.0~9.5m의 두께로 분포하고 있다. N값은 0/30~50/16의 범위로 나타나나 대체로 8/30~ 29/30으로 느슨함 내지 보통 조밀한 상대밀도를 나타낸다. 색조는 암회색 내지 갈색을 띠며, 함수상태는 포화 상태를 보이고 있다.

② 풍화토층

본 층은 W-1지점을 제외한 전 조사지점에서 해성퇴적토층 하부 약 36.8~ 44.5m 깊이에 12.5~14.2m의 두께로 분포하고 있으며, 토성은 실트질 모래(SM) 로 구성되어 있다. 표준관입시험에 의한 N값은 41/30~50/8의 범위로 조밀함 내



지 매우 조밀한 상대 밀도를 나타내고 있다. 색조는 갈색 내지 회갈색을 띠며, 함수상태는 습한 상태를 보인다.

③ 풍화암층

편마암을 모암으로 하는 풍화암층은 해성퇴적토층 또는 풍화토층 하부에 깊 이 43.5~58.5m에서 두께 약 1.5~16.5m로 분포하고 있다. 풍화암층은 표준관입 시험에 의하여 50회 타격시 관입량이 10cm 이하인 지층으로서 모암의 조직을 그대로 유지하고 있으나, 입자간의 결합력을 대부분 상실하여 노출되면 가벼운 충격에도 쉽게 실트질 모래(SM)로 분해된다. 표준관입시험에 의한 N값은 50/10 ~50/2로 매우 조밀한 상대밀도를 나타내고 있으며, 색조는 갈색을 띠고 있다.

④ 연암층

편마암을 모암으로 하는 연암층은 W-3 지점을 제외한 전 조사지점에서 지표 면으로부터 약 49.5~68.8m의 깊이에서 2.5m 이상의 두께로 분포한다. 코어 회 수율은 52~100%, 암질지수는 0~63%의 범위로 매우 불량 내지 보통 양호의 암질 상태를 나타내며, 회색을 띠고 있다. 풍화정도는 심한 풍화 내지 약간 풍 화, 강도는 약함 내지 강함, 절리간격은 매우 좁은 간격 내지 보통 간격을 나타 내고 있다.



Fig. 3.4.2 N Value Distribution Graph



## 3.4.3 구조물 위치 선정

본 구조해석에 적용할 지반위치를 결정하기 위해 각 5개소에 대한 지반조사 자료를 바탕으로 지반의 침하량을 산정하였다. Table 3.4.2는 W-1~W-5에 대한 침하량 결과를 정리한 것으로 각 충별 침하량을 산정하여 전체 침하량을 합산 한 결과이다. 모든 지반위치에서 침하량이 큰 경향으로 봤을 때 서남해안 해역 의 지반은 전반적으로 연약지반이라는 기존의 조사결과를 재확인 한 것이라 사 료된다. 가장 큰 침하량이 발생한 W-2 지반을 구조해석에 적용하였다.

	W	-1	<b>₩</b> -2		<b>₩-</b> 3		W	/-4	W-5	
Soil Type	Depth (m)	Settle ment (cm)								
실트질 모래	6.0	41.8	5.8	44.4	9.5	37.9	6.9	26.2	6.7	28.5
실트질 점토	11.3	43.4	8.7	48.6	4.8	17.8	5.9	28.8	7.3	43.2
실트질 모래	7.5	14.5	9.0	24.6	3.5	7.4	3.1	4.9	3.2	5.0
실트질 점토	17.7	32.7	18.0	36.1	23.4	44.3	14.6	37.1	24.0	62.8
풍화토	1.0	1.5	12.5	16.2	4 17.3	11.5	20.5	14.3	14.3	9.5
풍화암 +연암	11.5	0.0	17.8	ð/0.0	16.5	0.0	4.5	0.0	15.0	0.0
합계	55.0	133.9	71.8	169.9	75.0	118.9	55.5	111.3	70.5	149.0

Table 3.4.2 Settlement Calculation

## 3.4.4 기초모델

파일기초를 갖는 구조물에 대한 구조해석시 지반을 모델하는 방법은 Fig. 3.4.3에 표현한 것처럼 PSI(Pile-Soil-Interaction), 가상고정점(Virtual Fixity) 그리 고 스프링(Spring) 모델과 같은 3가지 방법이 있다. 여기서 가상고정점과 스프링 모델은 지반을 선형(linear)으로 표현하고, PSI모델은 지반을 비선형(Non-Linear) 으로 표현한다. 원래 지반은 비선형 거동을 하므로 PSI모델이 가장 적합하다 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지반은 PSI모델을 적용하였다.





PSI Model	Virtual Fixity Model	Spring Model
<ul> <li>Model the pile below the mudline using non-linear P-Y and T-Z curves.</li> <li>Accurate and Economical compared with the others</li> </ul>	• Pile model to be applied to length until the point of virtual fixity.	<ul> <li>Considering soil-pile interaction effects as a spring coefficient.</li> </ul>
Mud line Pile	real	Axial Stiffness of Pile

Fig. 3.4.3 Foundation Model for Structural Analysis

PSI모델은 반드시 고려되어야 하는 변수로서 지반을 대표하는 스프링을 대체 하는 p-y곡선, t-z곡선, q-z곡선을 고려해야한다. p-y곡선은 횡방향력에 대한 지 반스프링을 대표하며 t-z곡선은 연직 주면 마찰력을 그리고 q-z곡선은 선단지 지력을 대표하는 곡선이다.

본 연구에서는 이들 곡선을 API-RP-2A에서 제시하고 있는 방법에 따라 산정 하였다. Fig. 3.4.4는 W-2지반에 대한 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT) 결과와 토질의 특성을 바탕으로 API 방법에 의해 산정된 p-y곡선과 t-z곡 선을 나타낸 것이다.



Fig. 3.4.4 P-y and T-z Curves for Foundation Model(PSI)



## 3.5 해상풍력 구조물의 설계방법

## 3.5.1 한계상태 설계법

해상풍력 지지구조물 설계는 Table 3.3.1에 나타낸 것처럼 기본적으로 한계상 태설계(Limit State Design, LSD)를 따른다. 따라서, 본 연구도 한계상태 설계법 을 준용하여 수행한다. 한계상태(Limit State)는 구조물 또는 부재가 그 사용목 적의 요구조건들을 만족하지 못하는 상태를 말하는 것으로 구조물이 한계상태 를 넘으면 사용목적에 적합하지 않다는 개념이다.

(3.5.1)

(3.5.2)

DNV-OS-J-101의 한계상태설계 기준은 식(3.5.1)에 나타내었다.

 $S_d \leq R_d$ 

여기서,  $S_d$  : 설계하중효과(Design Load Effect)

 $R_d$ : 설계저항(Design Resistance)

여기서 설계하중효과(S<sub>d</sub>)는 특정하중과 특정하중에 고려되는 하중계수로 곱하 여 식(3.5.2)와 같이 표현된다.

1945

$$S_{di} = \gamma_{fi} S_{ki}$$

여기서,  $S_{di}$  : 하중 종류별 설계하중효과(Design Load Effect)

 $S_{ki}$  : 하중 종류별 특정하중효과(Characteristic Load Effect)

 $\gamma_{fi}$  : 특정하중의 하중계수(Specified Load Factor)

그리고, 설계저항( $R_d$ )은 식(3.5.3)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_m} \tag{3.5.3}$$

여기서,  $R_k$ : 사용재료의 저항강도(Characteristic Resistance)

 $\gamma_m$  : 재료계수(Specified Material Factor)

$$-78-$$



#### 3.5.2 해석조건

한계상태 설계방법은 해석조건에 따라 크게 4가지로 다음과 같이 구분된다.

① 극한한계상태(Ultimate Limit State, ULS) : 구조물 또는 부재가 파괴 또는 파괴에 가까운 상태로 되어 그 기능을 상실한 상태를 말한다. 이것은 구조물의 최대내력에 해당하는 상태이다. 이 상태는 구조물의 강도와 안전성에 관련된 한계상태인데, 단면의 변형능력을 고려한 구조물의 최대내력을 대상으로 하고 있으므로, 극한한계상태라고 규정한다.

② 사용한계상태(Serviceability Limit State, SLS) : 구조물 사용 중 처짐, 균열, 진동 등이 과대하게 일어나서 정상적인 사용상태의 필요조건을 만족하지 않게 된 상태를 말한다.

③ 피로한계상태(Fatigue Limit State, FLS) : 반복하중에 의하여 구조물이 파 괴되는, 이른바 피로파괴를 일으킨 상태를 말한다.

④ 사건한계상태(Accidental Limit State, ALS) : 구조물 사용 중 파괴나 우발 적인 사건(Event)으로 인해 구조물에 손상이 발생된 상태를 말한다.

#### 3.5.3 하중계수

Table 3.5.1은 Normal Safety 등급인 해상풍력 지지구조물 설계시 적용해야 할 하중계수를 보여준다. 만약 High Safety 등급일 경우 Table 3.5.1의 하중계수 들 중 환경하중(Environmental Load)을 13% 증가시켜 적용되어야 한다.

1945

Lond core	Limit State	Load Categories							
LUau Case		G	Q	E	D				
1	ULS	1.25	1.25	1.00	1.00				
2	ULS	$\psi$	$\psi$	1.35	1.00				
3	ULS for abnormal case	$\psi$	$\psi$	1.10	1.00				
여기서, $\psi$ 는 일반적인 하중조건일 경우 1.0이고, 호의적인(favorable) 하중일 경우									
0.9를 적용한	다. 또한, SLS/ALS/FLS는 하중	중계수는 모	두 1.0을 적	용한다.					

Table 3.5.1 Load Factor



Table 3.5.2 Load Categories

Load Categories	Description
G [Permanent Load]	Loads that will not vary in magnitude, Position, or direction during the period considered -Mass of Structural -Mass of permanent ballast and equipment -External & internal hydrostatic pressure of a permanent nature
Q [Variable Functional Load]	Loads which may vary in magnitude, Position, or direction during the period under consideration -Personal(Live Load), Crane operational loads, Ship impacts -Loads associated with Installation operations -Loads from variable ballast and equipment
E [Environmental Load]	Loads which may vary in magnitude, Position, or direction during the period under consideration -Wind, hydrodynamic loads induced by waves and current -Earthquake loads, tidal effects, Marine Growth, Snow and ice loads -Wind turbine loads, Wave load
D [Deformation Load]	Loads caused by inflicted deformations such as : -Temperature loads -Built-in deformations -Settlements of foundations

# 3.5.4 재료계수

재료계수는 극한한계상태(ULS) 조건에서 강관 부재에 대해서 1.1을 적용하고, 사건한계상태(ALS)와 사용한계상태(SLS)는 1.0을 적용한다. 피로한계상태(FLS)에 서는 구조부재가 위치한 범위(대기중, 비말대, 수중, 쇄굴, 해저면 등)에 따라서 각기 다른 재료계수를 적용해야한다.



# 제 4 장 신형식 지지구조 제안

## 4.1 개요

해상풍력 지지구조물은 다양한 형상과 크기를 가지는데, 모노파일은 지금까지 설치된 대부분의 해상풍력단지에 가장 많이 사용되었고, 콘크리트 중력식구조 도 몇몇 프로젝트에 사용되었다. 풍력 터빈이 커지고, 깊은 수심에 위치하게 됨 에 따라, 트라이포드나 자켓 구조물과 같은 멀티 파일식이 더 유용하게 적용될 수 있다. 자켓식 지지구조는 조선해양산업에서 가장 많이 사용되고 있는 일반 적인 형식으로 해상풍력 지지구조로 사용하기 위해선 일부 구조형식 개선이 필 요하다. 이는 조선해양산업에서의 자켓구조는 상부구조물(Topside Structure)을 구성하는 구조부재나 장비(Equipment) 그리고 전계장(Electrical & Instrument) 등의 주요하중이 중력(Gravity)방향으로 작용하는데 반해 해상풍력 지지구조는 수면에서 약 100m 높이에 설치된 블레이드가 전력생산을 위해 회전할 때 이 회전 중심에서 발생하는 수평력(Lateral Force)이 해저면까지 상당한 휨모멘트를 야기하기 때문에 이들 공용하중에 안전한 지지가 필요하기 때문이다.

그러나, 매년 터빈숫자의 증가에도 불구하고 해상풍력발전 산업은 큰 숙제를 안고 있다. 전기에너지를 생산해내면서 가장 중요한 것이 바로 경제성이다. 가 스나 석탄, 육상풍력과 같은 수준의 비용감소가 필요한데, 이것을 가능하게 하 는 방법은 대단위의 풍력단지 조성으로 단위 공사비를 줄이는 방법과 저비용의 신형식 개발로 요약할 수 있다. 규모의 경제를 실현하기 위해서는 정부나 민간 의 정책적인 뒷받침이 중요하게 작용하나, 신형식의 개발은 연구개발을 통해 가능할 것이다. 또한, 앞서 언급한 대로 동역학적 거동이 지배하는 해상풍력구 조물에 있어, 그 우수성이 상대적으로 탁월해야하고, 충분한 경제성을 확보할 수 있어야 한다.(김현기, 2013)



### 4.2 신형식 제안

현재까지도 해상풍력단지에 적합한 다양한 형식들이 제안되고 있으나, 이들 구조는 해상급속 설치공법 개발 없이는 기존 형식들과 비교했을 때 경제성 측 면에서 큰 장점을 가지지 못한다. 결국, 가장 기본적인 관점에서 기존의 구조형 식 대비 경제성이 우수한 신형식 지지구조 개발이 필요하다.

이에 본 연구에서는 제주 월정리 해상 실증단지와 서남해안 해상풍력발전단 지 개발사업의 타당성조사에 적용된 자켓식 지지구조물에 대한 구조형상과 설 치공법을 분석하여 이들 자켓식보다 설치공법을 단순화하여 해상공사 기간을 단축시킬 수 있는 경제성이 우수한 개선된 자켓형 해상풍력발전 지지구조물을 제안한다. 다음은 본 연구를 통해 기존 자켓구조에서 핵심적으로 개선된 3가지 사항을 설명하였다.

첫 번째로 자켓레그와 파일의 연결부를 개선한 것이다. 일반적인 자켓구조는 자켓을 해저면에 안착한 후 RCD(Reverse Circulation Drill) 천공장비를 이용하여 파일의 설계깊이까지 해저면을 굴착하고, 자켓레그(Jacket Leg) 안에 파일을 관 입한 후 자켓레그 내경과 파일외경 공간에 그라우트(Grout)를 타설하여 두 강관 단면을 일체화시킨다(Fig. 4.2.1 참조). 그러나 강재(Steel)와 콘크리트(Concrete) 는 재질(Material)도 다를 뿐만 아니라 해상작업을 통해서 그라우트 되므로 시공 품질 확보가 어려우므로 보수적인 관점에서 이들을 합성단면으로 가정하여 설 계하는 방법은 적합하지 않을 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 자켓레그와 파일의 연결을 그라우트를 사용하지 않고, 자켓을 해저면에 안착하고, 파일을 설치한 후 자켓레그 상단에 크라운 심 플레 이트(Crown Shim Plate)를 끼워 자켓과 파일을 용접으로 일체화하고 자켓 상단 에서부터 하단까지는 이들 사이를 중공단면으로 고려하는 것이다(Fig. 4.2.2 참 조). 또한, 파일이 자켓레그 중심에 설치되도록 가이드 역할을 하는 파일 센터 라이저(Pile Centralizer)는 자켓의 수평 브레이스(Brace)가 있는 구간에만 설치하 여 파일에서 전달된 수평하중을 자켓에 전달되도록 한다. 그러나 자켓과 파일 은 각각 독립거동을 하므로 축력은 전달되지 않는다[Fig. 4.2.3 참조].





Fig. 4.2.1 Connection between Jacket and Pile by Concrete Grout



Fig. 4.2.2 Connection between Jacket and Pile by Crown Shim Plate





둘째로는 자켓 설치시 연약지반을 가진 해저면에 자켓을 안착시킬 때 머드매 트(Mudmat)가 없을 경우 자켓 레그가 해저면 밑으로 일정 깊이만큼 관입되어 설계 높이를 맞추기 위해 해상크레인을 이용하여 다시 들어 올리는 경우가 발 생할 수 있다. 이를 방지하기 위해 필요한 구조요소가 바로 머드매트인데, 이것 은 설치시 일시적 부재(Temporary Member)로만 고려되어 실제 운용중 설계조 건에서 이들의 무게를 자켓 하단부에 중력하중으로만 고려하여 설계가 되고 있 다. 그러나 본 연구에서는 이 머드매트(Mudmat)를 설치조건에도 만족하고, 영속 부재(Permanent Member)로 적용하는 것이다. 해상풍력은 수면 위 약 100m 높 이에서 블레이드 회전에 의해 발생하는 횡력으로 인해 상당한 회전모멘트와 횡 변위를 발생하는데, 머드매트를 영속부재로 고려하면, 확장된 머드매트 부분에



지반반력 작용으로 전체 구조물의 휨모멘트 및 횡변위 저감이 가능할 것으로 사료된다. 결국 저감된 휨모멘트와 횡변위에 따라 지지구조 부재의 단면을 최 적화가 가능하므로 물량을 절감할 수 있어 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판 단된다. Fig. 4.2.4는 머드매트 빔 평면도와 붉은색 라인에 설치되는 스커트 플 레이트의 단면도를 보여주고 있다.







세 번째는 풍력발전 타워(Tower)를 지지하는 타워기초의 연결방법으로 Fig. 4.2.5에 보여준 기존의 타워기초는 데크(Deck) 상단에 직접 설치하여 상부에서 발생하는 모든 하중을 1차적으로 데크에서 지지하고 하부 자켓에 전달하는 방 법이다. 그러나, 이 연결방법은 모든 6자유도 하중을 데크에서 분담해야하므로 데크 단면의 강성이 커지는 결과를 초래하여 데크의 물량이 불필요하게 증가하 여 비경제적인 결과를 가져오게 된다.





3D View

Fig. 4.2.5 Original Tower Foundation

이를 보완하기 위해 본 연구에서는 Fig. 4.2.6과 같이 타워 기초를 데크를 관 통하여 자켓의 상단 수평 프레임까지 설치하고, 4개의 자켓 레그와 타워 하단



에 경사 브레이스를 직접 연결하여 상부에서 발생하는 모든 하중을 데크를 거 치지 않고, 자켓에 직접 전달하는 방안을 제안한다. 이 방법은 데크는 수평하중 만 지지하고, 나머지 하중은 자켓에 직접 전달되어 지지하게 된다. 또한, 타워 기초 중앙의 십자방향으로 타워기초 외부면(Outer Surface)과 데크 수평부재가 접촉되는 영역에는 고무패드를 설치하여 수평하중의 영향을 최소화하여 타워기 초부의 국부변형을 방지하도록 계획하였다.



Fig. 4.2.6 Proposed Tower Foundation



### 4.3 대상 해석모델

#### 4.3.1 정·동적해석 모델

본 절에서는 본 연구에서 제안한 형식과 기존의 자켓형식과의 정 동적특성 을 비교하기 위해 선정한 3개 구조형식들에 대한 특징을 묘사한다. 기본적으로 이들 구조는 자켓형식으로 구조해석 결과로부터 각 구조가 갖는 구조적인 특징 비교를 쉽게 하기 위해 각 구조를 구성하는 자켓레그, X-브레이스, H-브레이스, 파일등의 구조단면(Section)과 치수(Dimension) 그리고 상부구조의 타워기초도 모두 동일한 조건을 부여하였다. 동일한 부분을 제외하고, 각 구조형식별 정 동적 해석결과에 대한 비교 분석을 쉽게 식별이 가능하도록 각 구조가 갖는 특징에 따라 해석모델 명칭을 다음과 같이 부여하였다.

① NJPM(New Jacket Permanent Mudmat)

: 본 연구에서 제안하는 신형식 자켓 구조로 파일이 해상설치가 완료된 후 크 라운 심 플레이트를 파일에 끼워 용접에 의해 자켓레그와 파일이 연결되고, 머 드매트 부분을 설치조건과 구조물 운영시 전체 구조물의 횡변위에 지지하는 영 속부재로 고려한 지지구조를 나타낸다.

특히 이 구조형식은 다른 형식과 다르게 해저면에 비선형 압축스프링을 고려 해야 하므로 지반의 비선형(PSI)과 동시에 고려할 수가 없다. 따라서, SACS의 Pile Stub length해석을 수행하여 그 결과로 계산된 가상부재의 강성과 길이를 고려하고, 가상부재의 하단을 고정점으로 하여 모든 정·동적 구조해석을 수행 한다.

② NJTM(New Jacket Temporary Mudmat)

: 위 NJPM과 같은 형식으로 단지 머드매트 부분은 설치시 조건에만 부합하는 일시적인 부재로 고려한 지지구조를 나타낸다.

③ GJTM(General Jacket Temporary Mudmat)

: 일반적인 자켓형식 구조로 자켓레그와 파일은 그라우트로 결합되고, 머드매
 트 부분은 설치시 조건에만 부합하는 일시부재로 고려한 지지구조를 나타낸다.



#### 4.3.2 머드매트해석 모델

해양구조물 설치는 해상이 양호한 상태(Calm Sea)에서 수행되므로 설치안정성 검토에 필요한 적절한 파고와 주기를 선정해야만 한다. 이를 위해 서남해안 해 역에 발생하는 파랑 및 주기별 빈도수를 조사하여 해상설치시 적용 가능성이 높은 파고와 주기를 선정하여 설치안정성 해석에 적용하였다.

서남해안의 해상 데이터 수집은 신뢰성을 위해 GMT fluid Mechanics Limited 에서 <u>www.globalwavestatisticsonline.com</u> 사이트를 통해 제공하는 데이터를 조사 하였다. 이 사이트는 전 세계 해역에 대한 바람과 파랑에 대한 해상 환경 데이 터를 제공하고 있고, 해상운송 업체에선 결정된 해상루트에 필요한 해상데이터 를 이 사이트를 통해서 자료를 수집하여 실무에 적용하고 있다.

아래 Table 4.3.1은 www.globalwavestatisticsonline.com을 통해 얻은 서해안 해 역(Sea Area No. 28)에 대한 파고별 주기별 발생빈도수를 나타낸다. Table에서 파고 1m, 2m, 3m의 발생빈도는 각각 32.25%, 35.02%, 19.11%로 전체 파랑의 약 86.38%를 차지하는 것으로 나타났고, 이때 주기는 5초에서 7초가 약 83.16%의 발생빈도를 나타냈다. 따라서, 본 설치안정성 해석에서는 발생 빈도수가 높은 파고 2m~4m와 주기 5초~7초를 적용하는 것이 합리적이라 판단하여 이들 케이 스에 대해서 설치안정성 해석을 수행한다.

Directior	1 : All Dire	ction		Period :	ALL						Sea	Area	28	
Significa	int Wave	Zero Crossing Period												
Hei	ight	< 4	4~ 5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~13	> 13	OBS 1000000	Frequency
14m	15m		1	3	7	7	4	2	1				26	0.00
13m	14m		1	6	13	12	7	3	1				44	0.00
12m	13m		2	12	23	21	12	5	1				76	0.01
11m	12m		4	23	42	37	20	7	2	1			135	0.01
10m	11m		8	45	80	67	34	12	3	1			251	0.03
9m	10m	1	19	97	160	127	61	21	6	1			493	0.05
8m	9m	2	47	220	340	254	116	38	10	2			1,030	0.10
7m	8m	5	126	536	767	535	231	72	18	4	1		2,295	0.23
6m	7m	17	359	1,388	1,820	1,176	474	139	33	7	1		5,413	0.54
5m	6m	59	1,095	3,767	4,461	2,633	979	267	59	11	2		13,334	1.33
4m	5m	222	3,507	10,489	10,981	5,811	1,960	490	100	18	3		33,581	3.36
3m	4m	894	11,484	28,799	25,823	11,914	3,558	798	148	24	4	1	83,448	8.34
2m	3m	3,760	36,430	72,026	52,447	20,150	5,122	995	162	24	3		191,120	19.11
1m	2m	15,854	99,159	136,254	72,554	21,271	4,277	677	92	11	1		350,151	35.02
0m	1m	59,678	133,603	93,161	29,496	5,657	793	92	9	1			322,491	32.25
SL	M	80,491	285,846	346,825	199,013	69,673	17,649	3,618	646	106	16	2	1,000,000	
Frequ	uency	8.05	28.58	34.68	19.90	6.97	1.76	0.36	0.06	0.01	0.00	0.00		

## Table 4.3.1 Sea Data for West Coast



다음에 설명된 구조형식은 본 연구에서 최종 제안한 NJPM 구조형식에 대해 머드매트 외곽에 설치되는 스커트 플레이트(Skirt Plate) 유·무에 따라 설치해 석 조건별 모델 명칭을 부여한 것이다. 설치해석은 파고와 주기를 각각 변화시 켜 도출된 결과를 바탕으로 제안한 스커트 플레이트의 유·무에 따른 차이점을 확인하고자 한다.

① W2P5WS : 여기서 W는 파고(Wave), 2는 2m, P는 주기(Period), 5는 5초 (sec), WS는 스커트 플레이트가 설치된 것(With Skirt)을 의미하는 것으로 스커 트 플레이트가 설치된 구조에서 파고 2m, 주기 5초에 대한 설치해석 조건을 나 타낸다.

② W2P5NS : W2P5는 앞서 설명한 바와 같고, 마지막에 NS는 스커트 플레이 트가 없는 것(No Skirt)을 의미하는 것으로 스커트 플레이트가 없는 구조에서 파고 2m, 주기 5초에 대한 설치해석 조건을 나타낸다.

위와 같은 기준에 따라 Table 4.3.2와 같이 총 18개의 해석모델들이 수립된다. 전체해석은 9개 case에 대해서 수행하여 그 결과를 바탕으로 In-house Sheet를 통해 스커트 플레이트 유·무에 따른 해석결과를 도출하여 비교하였다.

Case	Model Name	Case	Model Name
1	W2P5WS	10	W2P5NS
2	W2P6WS	11	W2P6NS
3	W2P7WS	12	W2P7NS
4	W3P5WS	13	W3P5NS
5	W3P6WS	14	W3P6NS
6	W3P7WS	15	W3P7NS
7	W4P5WS	16	W4P5NS
8	W4P6WS	17	W4P6NS
9	W4P7WS	18	W4P7NS

 Table 4.3.2 Installation Stability Analysis Models



# 제 5 장 구조해석 및 결과분석

본 장에서는 제안한 자켓형과 기존의 자켓형 지지구조물에 대해 3.3절에 명시 된 설계기준과 4.3절에 정의된 해석모델들을 바탕으로 정적해석(Static Analysis) 과 동적해석(Dynamic Analysis) 그리고 머드매트 해석(Mudmat Analysis)을 수행 하여 각 구조가 갖는 특징을 확인하기 위해 해석결과를 비교·분석하였다. 구 조해석 결과의 주요항목으로는 정적해석 결과인 구조물의 응력과 변위, 동적해 석 결과인 고유진동수(Natural Frequency) 그리고 머드매트해석 결과인 활동 (Sliding), 전도(Overturning), 지반지지력(Soil Bearing Capacity)이다.

5.1 3차원 구조해석

#### 5.1.1 정적해석

정적해석은 해상에 설치된 구조물이 운용 중에 발생하는 모든 하중조건들 중 구조물에 가장 위험한 하중조건들을 조합하여 발생한 외력에 대해 구조물이 설 계 안전수준을 만족하는지 검토하는 것이다.

본 연구에서 다루는 3개의 해석모델들은 동일조건에서 도출된 해석결과를 비 교하여 가장 효과적인 구조형식을 판단하기 위해서 기본적으로 같은 단면을 부 여하였고, 각 구조가 갖는 특징에 따라 모델방법의 차이가 있다. 신형식 자켓식 과 기존 자켓식의 가장 큰 차이점은 앞서 설명한 것처럼 자켓과 파일의 연결방 법에 있고, 신형식 자켓들은 머드매트의 역할에 따라 경계조건이 다르다. 즉, 일시적인 머드매트는 전체 구조물의 변형을 파일이 모두 지지하고, 영속 머드 매트인 경우 파일 외에 추가로 머드매트 하단에 해저면의 지반특성을 고려한 지반반력 스프링이 고려된다.

다음은 각각의 구조형상과 사용된 구조단면을 구조형식별로 나타내었다.

Collection

- 91 -



# ① NJPM(New Jacket Permanent Mudmat) :





# ② NJTM(New Jacket Temporary Mudmat) :




# ③ GJTM(General Jacket Temporary Mudmat) :



각 해석조건별 해석에 적용할 파이론은 다음식에 의해 계산되고, 선정된 파이 론은 Fig. 5.1.1에 나타내었다.



Fig. 5.1.1 Selected Wave Theory



구조해석에 사용될 하중조합은 앞서 설명한 공력하중과 다양한 해상조건을 조합하여 구조해석을 수행한다. 이들의 조합방법은 DNV-OS-J101에 명시된 조 합조건을 준용하였으며, 아래 Fig. 5.1.2와 같이 1.3 공력조건은 총 144개, 1.4 공 력조건은 총 288개의 하중조합을 적용하였다.



Fig. 5.1.2 Load Cases and Combinations



## 5.1.2 동적해석

해상풍력 지지구조에서 터빈 작용으로 인한 고유진동수(Natural Frequency)는 구조물 적정성 검토나 설계를 결정짓는 중요한 요소이다. 동적해석은 Modal Analysis을 통해 수행되었다. 동적해석시 SACS 프로그램은 지반의 비선형 해석 (PSI)을 지원하지 않으므로 파일과 지반의 강성을 미리 고려하여 계산된 Super-element 파일을 모델 파일과 합성하여 동적해석을 수행하였다.

해상풍력발전기의 주요 외력은 바람에 의한 로터의 회전과 블레이드가 회전 할 때 생기는 주파수 및 육상풍력과는 다른 파랑에 의한 주기적인 하중이다. 동적효과를 줄이기 위해서는 고유주파수(Eigen Frequency)가 작용주파수 (Excitation Frequency) 근처 범위에서 나타나는 것을 피해야한다. 일반적으로, 로터의 회전이 증가하면, 그 에너지를 이용하여 나셀(Nacelle)이 전력을 생산하 는데, 이때 회전주파수(Rotational Frequency)효과가 나타난다. 또한, 바람의 작 용으로 블레이드(Blade) 주변에 집중되는 공기역학적인 하중(Aerodynamic Load) 은 블레이드의 통과주파수(Blade Passing Frequency)를 증가시킨다. Fig. 5.1.3은 NREL-5MW 터빈의 회전주파수 및 통과주파수를 나타내고, 설계에서 고려해야 할 영역을 나타낸다.



Fig. 5.1.3 Design Range of Natural Frequency for 5MW Offshore Wind Turbine[NREL]



가로축은 주파수, 세로축은 값이 없는 임의의 응답을 나타낸다. 고차의 외력 (Higher Order Excitations)이 작용하지만, 여기서는 회전주파수 범위와 블레이드 통과주파수 범위가 주요외력으로 고려되었다. 공진을 피하기 위해서 지지구조 물은 첫 번째 고유주파수가 로터의 회전주파수나 블레이드 통과주파수와 같이 발생하지 않아야 한다.

이것을 피하기 위한 3가지 구역이 있으며, 각 영역별 연성(Soft)과 강성(Stiff) 의 특징을 갖고 있다. 즉, 구조물의 고유주파수가 블레이드 통과주파수 이상의 범위에 위치할 경우 매우 강한 구조물로 Stiff-Stiff Structure라 불리고, 회전주 파수영역과 통과주파수영역 사이에 위치하면 Soft-Stiff, 첫 번째 고유주파수가 로터의 회전 주파수영역 아래에 있는 연성구조물은 Soft-Soft Structure로 불린 다. 풍력터빈 제작사들은 고유진동수 범위의 상·하위 10%를 추가적인 여유 (Safety Margin)로 권장하고 있다.

#### 5.1.3 머드매트해석

Collection

본 연구에서 머드매트해석은 지지구조물의 설치해석을 뜻하며, 결국 머드매트 설계를 의미한다. 머드매트는 자켓이 해상현장에 놓인 후부터 파일들이 완전히 설치되어 자켓이 고정될 때까지의 짧은 기간 동안만 자켓을 안전하게 지지하는 데 그 목적이 있다.

파일설치가 완료된 후에는 상부구조물과 자켓의 자중 그리고 외부하중 등 모 든 하중은 파일이 지지하는 것으로 보고 머드매트는 하중을 지지하지 않는 것 으로 간주한다.

따라서, 머드매트의 설계하중조건은 설치기간 동안의 최대 하중조건을 적용하 며 이것은 보통 자켓의 설계 최대하중조건이나 작동하중조건보다 훨씬 작은 값 을 갖는다. 본 연구에서 머드매트해석을 위한 환경하중은 4.3.2절에 명시된 조 건을 적용하여 수행되었다.



5.2 해석결과분석

#### 5.2.1 정적해석

① 구조응력 검토

정적해석 결과를 바탕으로 5.1.1절에 표현한 3개 구조물들에 대해 구조물을 구성하는 각 부재들의 구조응력을 비교·분석하였다. Fig. 5.2.1은 각 구조물을 구성하는 구조부재들의 합성응력비를 표현한 것으로 GJTM의 자켓레그는 파일 과 합성단면이고, NJTM과 NJPM은 자켓레그와 파일이 독립거동을 하므로 GJTM 의 자켓레그의 구조응력비가 가장 양호하고, NJPM이 NJTM보다 8% 정도 더 큰 응력비를 나타낸 것은 머드매트 영속성 고려에 의한 자켓레그의 휨 (Bending-y&z) 및 압축(Axial) 저항력이 더 커진 결과라 판단된다.

그리고 경사와 수평브레이스 경우 NJPM이 가장 큰 응력비를 보여주는데, 이 또한 머드매트 영속성 고려에 의한 전체 구조물의 휨 거동 저항이 발생하여 브 레이스에 전달되는 힘이 가중된 결과라 판단된다.



Fig. 5.2.1 Structural Stress Ratio



다음은 각 구조형식별 응력양상을 파악하기 위해 주요부재들의 응력비(Stress Ratio)를 비교·검토하였다. Fig. 5.2.2는 Fig. 5.2.3부터 Fig. 5.2.7까지 보여주는 각 구조단면의 위치를 표현한 것이다.



Fig. 5.2.2 Model 3D View



- 100 -

Fig. 5.2.3부터 Fig. 5.2.6에서 자켓 레그에 대한 합성응력비는 기존 자켓형인 GJTM은 자켓 레그와 파일이 그라우팅으로 결합되는 합성단면이고, NJPM과 NJTM은 두 단면이 독립거동을 하므로 합성 응력비(압축+휨)는 GJTM이 가장 좋 고, 다음은 NJPM으로 나타났다.

해상풍력 지지구조물이 조선해양에서 사용하는 해양구조물과의 큰 차이점은 설계하중의 방향에 있다고 할 수 있다. 조선해양 구조물은 수직하중이 주요하 중인 반면에 해상풍력 구조물은 횡력이기 때문이다. 이 횡력은 수면에서 약 100m 위에 설치되어 있는 블레이드가 회전하면서 발생하여 전체 지지구조물의 전도모멘트를 야기한다. 이러한 해상풍력의 특징을 감안하여 NJPM은 머드매트 를 영속부재로 고려하여 지지구조물의 전도 저항효과를 극대화한 것이다.

따라서, NJTM과 달리 파일 뿐만 아니라 머드매트 하부 해저면의 지반반력도 구조물을 지지하므로 구조물의 전도모멘트에 효과적으로 저항하여 NJTM보다 더 양호한 응력비를 나타낸 것으로 판단된다.

그리고 사(Diagonal) 브레이스나 수평 브레이스는 NJPM이 다른 구조형식에 비 해 가장 큰 응력비를 보여주는데, 이 또한 머드매트 영속성 고려에 의한 전체 구조물의 휨 거동에 효과적으로 저항하기 때문에 브레이스에 전달되는 힘이 가 중 된 것으로 판단되고, NJTM의 경우 세 구조물 중 구조연성이 가장 좋으므로 전체적인 힘 분배가 잘 이뤄져 응력비가 가장 좋은 결과를 나타낸 것으로 사료 된다.





Fig. 5.2.4 Combined Stress Ratio for Row B





Fig. 5.2.6 Combined Stress Ratio for Row 2



Fig. 5.2.7은 해저면 위에 파일의 합성응력비를 도시한 것으로 앞서 설명한 바 와 같이 NJPM이 전도모멘트에 효과적으로 저항하여 NJTM보다 전체적으로 응 력비는 양호하게 나타났다.

Fig. 5.2.8은 해저면부터 설계깊이까지 NJTM과 GJTM에 대한 파일의 압축응력 과 휨응력을 도시한 것이다. NJTM의 휨응력은 해저면으로부터 4m 깊이에서 가 장 크게 발생하여 약 23m에서 수렴하는 것으로 나타났고, 전체적인 압축 및 휨 응력은 GJTM 보다 더 크게 나왔다. 이것은 파일의 독립거동의 양상을 잘 표현 하고 있다고 사료된다. 따라서 Fig. 5.2.9에 도시한 합성응력비도 NJTM이 크다.



Fig. 5.2.7 Combined Stress Ratio for Pile above Seabed





Fig. 5.2.8 Axial and Bending Stresses Distribution for Pile below Seabed





Fig. 5.2.9 Stress Ratio Distribution for Pile below Seabed



② 연결부 유한요소해석

다음은 자켓과 파일의 연결부와 타워기초 연결부에 대한 정밀해석을 위해 범 용 구조해석 프로그램인 MIDAS/FEA를 이용하여 수행된 유한요소해석(Finite Element Analysis)에 대한 전반적인 내용을 수록하였다.

우선 자켓과 파일의 연결방법은 파일 설치가 완료된 후에 크라운 심 플레이 트를 파일에 끼워넣은 후 필렛 용접(Fillet Welding)에 의해 자켓과 파일이 연결 된다. 이들 연결부는 전력생산시 상부구조에서 발생한 힘을 하부 자켓으로 전 달해 주는 매개체 역할을 하므로 전체구조의 안전을 지배하는 요소 중 가장 중 요한 부분이라 할 수 있다. 따라서, 유한요소해석으로 필렛 용접부의 안전성과 설계된 목두께(Throat Thickness) 40mm의 적절성을 검증하기 위해 8절점 솔리 드 요소(Solid Element)를 사용하였다. 이를 위해 자켓과 파일은 이 필렛용접 두 께 40mm에 의해 연결되고, 다른 부분은 절점을 공유하지 않는 독립적인 솔리 드 요소로 모델하였다. 또한, 메쉬 사이즈(Mesh Size)는 신뢰할 수 있는 결과를 얻기 위해 50mm × 50mm로 fine mesh 모델링 하였다. 자켓과 파일 연결부 해석 을 위한 모델 구성은 Fig. 5.2.10과 같다.



Fig. 5.2.10 FE Model for Connection Part between Jacket and Pile

다음은 타워기초부로 기존의 타워기초는 Fig. 4.2.5와 같이 상부데크 보(Beam) 위에 직접 설치하여 상부데크에서 일차적인 하중을 지지해야하므로 데크 구조 단면이 커지는 단점이 있다. 본 연구에서는 이 부분을 개선한 것으로 타워기초 하단이 데크와 직접 연결되지 않고, 데크를 관통하여 자켓 레그와 4개의 사 브



레이스(Diagonal Brace)로 연결시킨 것이다. 이것은 상부에서 전달되는 수직력과 수평력에 의한 모멘트를 상대적으로 강성이 큰 자켓 레그에 직접 전달함으로써 데크 구조단면을 최소화할 수 있고, 또한, 모멘트 중심을 아래쪽으로 이동시킴 으로써 전체 구조계의 휨 모멘트를 저감할 수 있는 안전적인 구조단면이다.

이를 유한요소해석을 통해 구조응력의 적절성을 검증하기 위해 4절점 판 요 소(Plate Element)를 사용하였다. 메쉬 사이즈(Mesh Size)는 신뢰할 수 있는 결 과를 얻기 위해 50mm × 50mm로 fine mesh 모델링 하였다. 연결부 해석을 위한 모델 구성은 Fig. 5.2.11과 같다.



Fig. 5.2.11 FE Model for Tower Foundation

본 구조물들은 모두 강재(Steel Material)로 구성되고, 유한요소해석을 위해 적 용된 각 구성요소의 재료모델은 선형재료 모델로, 탄성계수 200,000MPa, 포아송 비 0.3을 적용하였고, 다음 Table 5.2.1과 같다.

Table	5.2.1	Applied	Material	Properties
-------	-------	---------	----------	------------

Connection	Elastic	Ratio of	Vield Strength	Element Type	
Part	Modulus	Poisson		Element Type	
자켓과 파일	205,000Mpa	0.3	345Mpa	8절점 솔리드 요소	
타워 기초	205,000Mpa	0.3	345Mpa	4절점 판요소	

다음은 유한요소해석을 위한 경계조건을 표현한다. 자켓과 파일의 연결부 모 델에서 자켓의 바닥부는 자켓의 연속성을 고려하여 6자유도(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)를 모두 구속하였고, 파일은 자켓과 별개로 독립거동을 하면서 횡방향





거동도 허용하므로 수직방향(Fz)의 변위만 구속하였다. 또한, 타워기초부는 자켓 의 연속성을 고려하여 바닥부를 6자유도(Fx, Fy, Fz, Mx, My, Mz)를 모두 구속 하였다. 이에 대한 개념도가 Fig. 5.2.12와 같다.



Fig. 5.2.12 Boundary Conditions

Fig. 5.2.13은 유한요소해석에 적용된 하중을 모사한 것으로 정역학적 안전성 해석결과로부터 산출된 파일의 연결부와 타워기초부에 작용하는 최대 부재력을 모델의 상단부 중앙에 적용하였으며, 적용된 하중은 Table 5.2.2에 나타내었다.



For Crown Shim Plate(Pile) For Crown Shim Plate (Tower Base)

Fig. 5.2.13 Applied Loading Concept



Connecti	Ev(NI)	Ev(NI)	E7(NI)	Mv(N · mm)	My(N · mm)	M7(N · mm)
on Part	1 A(14)	I YUV	12(11)			
자켓과	712.0	1 204 4	10 5 9 1 9	156.9	617.2	257-1
파일	-715.9	-1,394.4	-10,301.2	-130.0	-017.2	-337.1
타워	6 025 1	001.6	2 0 9 7 0	11 21 4 2	60 791 6	6 001 5
기초	0,035.1	901.0	-3,027.9	11,314.3	09,701.0	0,091.5

Table 5.2.2 Applied Load Summary

유한요소 해석결과는 등가응력(Effective 또는 Equivalent Stress)인 본 미세스 응력(Von-Mises Stress)으로 검토하였고, 3차원 솔리드 요소를 적용한 자켓과 파 일의 연결부는  $\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$ 으로 검 토하고, 2차원 판 요소를 적용한 타워기초부는  $\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$ 으로 검토하였다. 해석결과 Table 5.2.3에 정리한 것처럼 적용된 하중에 대해 각 부재 는 안전한 것으로 확인되었다.

Connection Part	Actual	Yield	Material	Allowable	Result
	Stress(Mpa)	Strength	Factor	Stress	Itebuit
자켓과 파일 연결부					
자켓 캔(Can) 151.12					OK
파일	276.07	1945	1 10	212.6	OK
크라운 플레이트	171.86	01 LH	1.10	515.0	OK
용접부	284.29				OK
타워기초 연결부					
상단 사부재	105.87				OK
하단 사부재	289.77				OK
자켓 레그	289.13	345	1.10	313.6	OK
상부데크 빔	218.05				OK
파일	185.70				OK

Table 5.2.3 Von-Mises Stress Summary





Fig. 5.2.14 Von-Mises Stress Contour for Connection





Fig. 5.2.15 Von-Mises Stress Contour for Tower Foundation



③ 구조변위 검토

Fig. 5.2.16은 사용성 조건의 하중조합(Serviceability Limit State, SLS)으로 검 토한 각 구조물의 상대변위를 나타낸다. 상대변위는 자켓 구조물의 상단 변위 값과 해저면의 변위 값의 차(Difference)로 종방향과 횡방향의 합성변위로 나타 내었다. 괄호()의 값은 자켓 레그 양단의 수직변위 차를 표현한 것이다. 결과에 의하면, 수직변위 차가 가장 큰 NJTM의 변위가 가장 크다. 이것은 순수 횡방향 변위뿐만 아니라 횡력에 의해 발생하는 양단의 수직변위가 횡방향 변위에 추가 로 기여한 결과라 사료된다. Fig. 5.2.17은 각 구조물의 변위형상을 보여준다.



Fig. 5.2.17 Deformed Shape



## 5.2.2 동적해석

Table 5.2.4는 RNA(Rotor-Nacelle-Assembly)와 타워(Tower) 그리고 지지구조물 의 자중(Self-Weight)과 적용된 중력하중들(Gravity Loads)을 바탕으로 발생된 질량행렬(Mass matrix)과 구조물의 강성행렬(Stiffness Matrix)을 사용하여 계산된 동적해석결과를 나타낸다.

해석결과에 따르면, 3개 구조물 모두 1차 고유진동수는 비슷한 값을 나타내는 데, 이것은 모든 구조단면이 같은 조건에 따른 결과라 사료된다. 또한, 모든 구 조물은 회전주파수와 블레이드 통과주파수 사이에 위치하여, 공진을 충분히 피 하고 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 자켓이나 트라이포드(Tripod) 구조형식 은 설계시 고유진동수가 Soft-Stiff영역에 위치하도록 최적화시키는데, 이것은 Stiff-Stiff영역에 주파수가 있을 경우, 강성은 커지지만 경제적이지 못하기 때문 이다. Fig. 5.2.19부터 Fig. 5.2.21은 각 구조물에 대한 1차 모드형상을 나타낸다.

Table 3.2.4 Natural Frequency Summary							
Structure Type	1 <sup>st</sup> Frequency(Hz)	1 <sup>st</sup> Period(Sec)	Main Direction				
NJPM	0.279	3.588	Y- Direction				
NJTM	0.264	3.792	Y- Direction				
GJTM	0.287	3.486	Y- Direction				

 Table 5.2.4 Natural Frequency Summary



Fig. 5.2.18 Natural Frequency for Structure Type











Fig. 5.2.20  $1^{st}$  Mode Shape for NJTM





Fig. 5.2.21  $1^{\rm st}$  Mode Shape for GJTM



#### 5.2.3 머드매트해석

머드매트 해석결과는 본 논문 4.3.2절에서 정의한 18개의 해석케이스들을 바 탕으로 본 연구에서 최종 제안한 NJPM 구조형식의 머드매트에 스커트 플레이 트(Skirt Plate) 유·무에 따른 해석결과를 비교·검토하였다. 본 해석에 적용된 파고와 주기들은 서남해안 해역에 발생하는 파랑 및 주기별 빈도수를 조사하여 해상설치시 적용 가능성이 높은 데이터를 선정하였다.

서남해안의 해상 데이터 수집은 신뢰성을 위해 GMT fluid Mechanics Limited 에서 <u>www.globalwavestatisticsonline.com</u> 사이트를 통해 제공하는 데이터를 조사 하였다. 이 데이터에 의하면 서남해안 해역은 파고 1m, 2m, 3m의 발생빈도는 각각 32.25%, 35.02%, 19.11%로 전체 파랑의 약 86.38%를 차지하고, 이때 주기 는 5초에서 7초가 약 83.16%의 발생빈도를 나타냈다. 따라서, 본 머드매트해석 에서는 발생 빈도수가 높은 파고 2m~4m와 주기 5초~7초를 적용하는 것이 합리 적이라 판단하여 이들 케이스들을 해석케이스로 선정하였다.



Fig. 5.2.22 Wave and Period Frequency for West Coast

Fig. 5.2.23은 전도모멘트(Overturning Moment)에 대한 결과를 나타낸 것으로 파고 3m까지는 스커트 플레이트 유무에 상관없이 해상설치가 가능하고, 스커트 플레이트가 있는 경우 전체 모멘트 팔 거리 증가로 인해 전도모멘트가 커져 미 소하지만 안전율이 더 작게 산정됨을 확인할 수 있고, 파고 3m까지는 설치 가 능한 것으로 나타났다.





Fig. 5.2.23 Overturning Check Summary

Fig. 5.2.24는 자켓 설치시 자켓이 머드매트에 놓여지면 해저면의 지반압력을 받게 된다. 이때 지반이 자켓 구조물을 지지할 수 있는지를 검토한 결과로 파 고에 따른 영향이 가장 크고, 스커트 플레이트 영향은 미미하며, 파고 3m까지 는 설치 가능한 것으로 나타났다.



Fig. 5.2.24 Bearing Check Summary



Fig. 5.2.25는 활동(Sliding)에 대한 결과를 나타낸 것으로 파고와 스커트 플레 이트 유무에 따른 영향이 지배적임을 확인할 수 있다. 특히, 파고 3m 조건에서 스커트 플레이트가 있을 경우 해상설치작업이 가능하나 스커트 플레이트가 없 을 경우에는 활동에 대한 안전율을 만족하지 못하므로 해상설치가 불가능하고, W3PXWS는 W3PXNS에 비해 2배 이상 활동에 대한 안전율이 높은 것으로 나타 났다. 결과적으로 스커트 플레이트는 활동저항에 상당한 영향을 미친다.



앞서 살펴본 바와 같이 스커트 플레이트가 있는 경우 파고 3m까지는 설치안 정성 조건을 모두 만족하나, 스커트 플레이트가 없는 경우 활동조건은 만족하 지 못한다. 결국 스커트 플레이트는 해상상황이 좋지 않은 해역에 구조물 설치 시 원활한 작업이 가능한 역할을 하고, 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 해상구조물 설치시 설치파고 변화에 유동적인 대처가 가능함
- 해상파고로 인한 해상 대기시간 단축 가능함
- 전체해상공사 기간을 단축 및 설치비를 절감할 수 있음
- 연약지반에 사용이 가능하고 효과가 더 좋음

- 120 -



# 제 6 장 경제성 분석

6.1 개요

본 장에서는 본 연구에서 제안한 신형식 지지구조의 경제성을 확인하기 위해 제작비와 설치공사비를 합산한 총공사비(타워+RNA 제외)를 기존형식과의 비교 를 통해 경제성 분석을 수행하였다. 이를 위해 서남해 500MW 해상풍력단지 개 발사업 타당성조사 보고서에 수록된 자켓형 해상풍력 지지구조물의 제작 및 설 치과정에 따른 공사비를 분석하여 본 연구에서 제안한 형식과 비교하였다.

해상풍력발전 시스템은 지지구조물의 제작 및 설치비용이 전체 사업비의 약 30~40%를 차지하므로 경쟁력을 확보하기 위해선 지지구조물의 제작부터 설치까 지 일련의 과정을 파악하여 해상작업을 최소화한 설치로지스틱(Installation Logistics)을 결정하여만 한다. 일반적인 해상풍력발전 시스템의 설치순서는 Fig. 6.1.1[해상풍력발전 전망 및 기초기술동향, 2009 연지회 학술포럼, 신윤섭]과 같 이 먼저 지질 및 지형조사를 한 후, 기초 부재를 제작하고, 파일 기초부재를 해 상에 시공한다. 그리고 타워와 터빈을 차례로 설치하고, 전기에너지 이송을 위 해 해상변압기를 시공하고, 해저 케이블을 시공하면 풍력발전 단지가 완공된다.



Fig. 6.1.1 Installation Sequency of Offshore Wind Turbine System



6.2 제작비 분석

## 6.2.1 파일 제작

다음은 일반적인 자켓 구조물을 지지하는데 사용되는 파일의 제작과정을 보 여준다. 만약 설치할 구조물의 해역이 대수심이고 연약지반일 경우 지반지지력 이 확보된 깊이까지 파일을 설치해야하므로 파일의 길이가 상당히 길어진다. 이럴 경우 해상에서 일체로 파일을 설치할 수 없으므로 파일 설치계획에 따라 일정구간 나눠서 제작한 후 해상운송하여 현장에서 용접하여 설치하게 된다.



(5) Draft Marking



⑥ 제작완료



① Jacket 원자재 입고



③ Leg 제작(복관)

2 Leg Cutting



④ Brace Cutting



⑤ Brace 복관



⑥ Panel 제작



⑦ 제작완료





⑧ 출하



945

#### 6.2.3 제작비 분석

해상풍력 지지구조물의 제작비에 대한 경제성 분석은 제안된 자켓과 서남해 500MW 해상풍력단지 개발사업 타당성조사 보고서에 수록된 자켓형의 직접공사 비(간접비 제외) 비교를 통해 수행하였다.

아래 Fig. 6.2.1은 서남해 500MW 해상풍력단지 개발사업 타당성조사 보고서 에서 제안한 기존 자켓형과 본 연구에서 제안한 개선된 자켓형의 강재(Steel) 물 량을 비교한 것으로 두 지지구조의 큰 차이점은 핀 파일 유·무와 전체 구조의 강재 물량의 차이에 있다. 서남해 500MW의 자켓형의 설계수심은 약 15m로 제 안형의 설계수심 20m보다 더 좋은 조건임에도 불구하고 자켓 물량이 224.15톤, 자켓-파일의 물량이 117톤이 더 사용되었다. 이것은 같은 5MW급이지만, 설계 방법에 따른 차이로 타당성 조사의 자켓이 더 많은 물량이 사용된 것으로 파악 된다. 즉, 타당성 조사의 자켓형은 허용응력 설계법을 제안된 자켓형은 한계상 태 설계법을 적용하였다.





이들 지지구조에 대한 총 제작비는 동일성을 위해 타당성 조사 보고서의 자 재비와 제작비에 따른 단가를 기준으로 평가하였다. 이 보고서에 따르면, 모든 강재의 자재비는 규격에 따른 단가 차이가 있으나 크지 않아 본 평가에서는 대 략의 평균단가인 약 120만원/톤을 적용하고, 제작비는 자켓의 경우 난이도가 있 으므로 160만원/톤, 자켓-파일과 핀 파일은 70만원/톤을 적용하였다. 이를 바탕



으로 두 지지구조의 자재별 개개의 제작비와 총 제작비는 Fig. 6.2.2와 같이 나 타낼 수 있다.

Fig. 6.2.2에서 타당성 조사에서 제안된 기존 자켓은 자켓, 자켓-파일, 핀-파 일, 그라우팅 그리고 도장으로 총 5개 품목으로 구성되어 있고, 제안된 자켓형 은 자켓, 자켓-파일, 도장으로 3개의 품목으로 구성되어 있다. 제안된 자켓형은 앞서 설명한 것처럼 전형적인 자켓형식에 사용되는 그라우팅 대신에 다른 연결 방법을 제안한 신형식 자켓형 구조이므로 이들에 대한 품목이 필요하지 않다.

전체 제작비 비교결과 제안된 자켓형은 기존 자켓형 대비 약 49%를 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 Fig. 6.2.1에 표현한 것처럼 전체 구조 물량의 차이에 기인하는 것으로 기존 자켓형을 허용응력 설계가 아닌 한계상태로 적용 하였다면, 실제 절감율은 줄어들 것으로 사료된다. 그러나 제안된 자켓형에 불 필요한 핀-파일과 그라우트 비용에 대한 제작비를 절감할 수 있고, 다음에 비 교되는 시공비까지 고려한다면 제안된 자켓형은 기존형식 대비 우수한 경쟁력 을 가질 것으로 판단된다.



Fig. 6.2.2 Comparison of Fabrication Price



# 6.3 설치비 분석

#### 6.3.1 개요

해상 설치비를 최소화하는 것은 당해 사업의 성공여부를 가늠하는 가장 중요 한 부분이라 해도 과언이 아니다. 그러므로 구조물의 제작부터 설치까지 전 건 설공정을 파악하여 해상작업을 최소화할 수 있는 방안을 수립해야만 한다. 규 모가 같은 해상공사라도 해상조건, 시공사의 능력, 그리고 동원할 수 있는 해상 장비에 따라 설치공법이 다를 수 있으므로 공사규모가 달라질 수 있다. 예를 들어 A시공사가 5,000톤 해상크레인을, B시공사가 2,000톤 해상크레인을 각각 보유하고 있다고 가정할 경우 3,000톤의 탑사이드 구조물을 자켓 위에 설치해 야 한다면, A시공사는 보유한 5,000톤 해상크레인을 이용하여 인양공법을 통해 쉽게 탑사이드를 설치할 것이다. 이에 반해 B시공사는 2,000톤 해상크레인으로 인양할 수 없으므로 다른 업체에서 보유한 해상크레인을 임대하거나, 앞서 설 명한 Mating 공법을 이용하거나 기타 다른 방법을 강구해야 할 것이다.

추가로 또 하나의 가정을 예로 들면, A사가 보유한 5,000톤 해상크레인이 다 른 프로젝트에 투입되어 있거나 3,000톤의 탑사이드를 설치할 기간에 이 크레 인을 이용할 수 없을 경우 A사도 B사와 같은 방법들을 강구해야 할지도 모른 다. 결국 해상 구조물의 설치과정은 경제성이 가장 중요하므로 이를 고려하기 위해선 다양한 설치조합을 통해 최적(경제성)의 설치방법들을 선정해야만 한다. 결국 해상작업을 최소화 한다는 것은 공사비 절감으로 귀결되기 때문에 현재도 급속설치 공법을 개발하기 위한 노력은 계속되고 있다.

본 연구에서 제안한 신형식 지지구조는 자켓형식을 기반으로 일부 구조를 개 선한 것으로 조선해양산업에서 가장 많이 사용되는 구조형식이므로 일반적인 해양구조물로 분류할 수 있다. 따라서, 신형식 지지구조물에 대한 설치공정을 결정하기 위해선 기존 자켓식의 설치과정을 검토할 필요가 있다.

다음은 설치할 구조물의 규모(크기와 무게 등)나 현장여건(크레인, 운송선, 작 업선 등)과 상관없이 자켓 구조물의 일반적인 전체 설치과정을 순차적으로 나 타낸 것으로 설치할 구조물의 규모나 시공사의 시공능력에 따라 결정되므로 획 일화 되어 있지 않다.

 1) 선적 : 제작장에서 제작완료 된 구조물을 설치해역까지 해상운반하기 위해 안벽(Quay)에 계류(Mooring)된 해상운송선에 선적(Load-out)하는 것으로 다음과 같이 3가지 방법 중 현장여건에 맞게 선택할 수 있다.

① 크레인(Crane) 인양(Lifting) : 구조물의 무게가 가벼울 경우

② 사이드 스키딩(Side Skidding) : 구조물의 무게가 상당히 무거울 경우

③ 트랜스포터(Transporter) : ①과 ②의 중간정도의 무게일 경우

2) 운송 : 선적완료 된 구조물을 설치해역까지 해상운송(Sea-Transportation)하는 것으로 선적완료 된 구조물에 해상운송 중 발생하는 동적하중(Surge, Sway, Heave, Pitching, Rolling, Yawing)에 저항하도록 시패스닝(Sea-Fastening)을 설치 한 후에 해상운송을 해야만 한다.

3) 진수 : 설치해역까지 해상운송 된 구조물을 시패스닝(Sea-Fastening)을 제 거한 후 운송선의 선미(Stern) 또는 선수(Bow)쪽에 물을 채워(Ballasting) 운송선 을 경사지게 한 후에 구조물을 슬라이딩시켜 해상에 진수시키는 것을 말한다. 만약 해상에 진수된 구조물의 부력이 부족할 경우 수면에 부유(Floating)상태를 유지하기 위해 구조물에 별도의 부력탱크(Buoyancy Tank)를 설치해야만 한다.

4) 직립 : 진수완료 된 자켓구조물을 설치위치에서 자켓 레그나 부력탱크에 물을 채워 구조물을 점진적으로 직립시키면서 해상크레인을 이용하여 구조물을 들어올려 완전히 수직으로 세워 해저면에 안착시킨다.

5) 파일설치 : 해저면에 안착된 자켓구조물의 레그(보통 3개~8개)에 설계깊이 까지 파일을 관입하여 자켓 구조물을 해상에 완전히 고정시킨다.

6) 탑사이드 설치 : 해상크레인을 이용하여 탑사이드(Topside) 구조물을 인양 한 후 해상에 고정된 자켓 위에 탑사이드 레그를 안착시킨 후 연결부를 용접하 면 설치가 완료된다. 만약, 탑사이드 구조물이 무거워 해상크레인의 인양능력으 로 해결이 어려울 경우 매이팅(Mating) 방법을 이용하는데 이것은 설치된 자켓 레그 사이로 운송선을 진입시킨 후 운송선에 물을 채워 수중에 점차 가라앉히 면서 탑사이드를 자켓 위에 안착시키는 방법이다.

#### 6.3.2 해상장비 현황

해상구조물 및 풍력발전기 시공은 기초설계 및 각 공정별 시공절차에 따라 진행한다. 해상설치비는 설치작업에 필요한 해상크레인과 국내에서 구입 및 임 대 가능한 장비와 육상 제작장 및 해상 설치 지점과의 환경적, 지리적인 영향 을 사전 검토하여 설치일정에 반영하여야 한다. 현재 국내 해상풍력 지지구조 물 설치를 위한 해상장비 현황은 다음과 같다.

1 해상크레인 : 해상크레인은 해상풍력발전 기초구조물, 기자재 운반 및 설치에 필요한 장비이며 운영업체의 일정 및 건설공정계획을 반영하여 수급 계획을 검토하여야 한다. 장비로 목록은 다음과 같다.

Crane	Lift	Lift	ILE AN	Crane Di	mensions		
Lists	Capacity	Height	Length	Width	Draft	Angle	Company
LISIS	(ton)	(m)	(m)	(m)	(m)	(°)	
삼성1호	3,000	95.3	110	45	4.8	62	삼성중공업
삼성2호	3,600	95.9	110	48	6.0	62	삼성중공업
대우3600호	3,600		110	46	Å	_	대우조선해양
한진호	3,000	115.1	103	46	3.8	70	한진중공업
삼호2000호	1,800	72.0	80-9	4537	5.2	70	삼호아이앤디
삼아2200호	2,200	84.2	85	42	4.6	70	삼호아이앤디
삼호3000호	3,000	82.2	95.4	<b>4</b> 1	4.4	65	삼호아이앤디
삼호4000호	3,600	109.0	110	48	6.0	62	삼호아이앤디
설악호	2,000	73.5	85	45	3.2	61	해양환경관리공단
부림506호	1,300	48.0	74	31	3.4	73	대림산업
효명1200호	1,200	76.0	72	32	3.8	70	효명개발
금용1300호	1,200	90.0	75	32	-	65	금용개발
금용1700호	1,500	94.3	80	34	-	65	금용개발
아주600호	600	-	56.5	27	-	_	아주렌탈
살코1200호	1,000	85.2	78	30	3.5	65	살코
살코600호	600	53.5	57.5	26	-	70	살코
삼진호	500	38.0	43.3	21.4	-	70	태안기업
다산500호	400	50.0	49.82	25.2	-	_	다산건설

Table 6.3.1 Offshore Crane Lists

출처) 서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계



# ② 크롤러크레인

Crane Lists	Lift	Working	Working	Company	
	Capacity(ton)	Radius(m)	Height(m)		
Manitowoc 31000	2,300	14.6~96.0	55.0~105.0	천조건설(주)	
DEMAG CC8800-1	1,600	10.0~138.0	48.0~156.0	(주)육천건설	
LR 11350	1,350	10.0~68.0	48.0~144.0	천조건설(주)	
MANITOWOC M18000-MAXER	750	8.5~130.0	42.7~134	(주)육천건설	
MANITOWOC M18000	600	7.3~78.0	36.6~97.5	(주)육천건설	
KOBELCO SL6000	550 8.0~42.0		36~42	(주)육천건설	
MANITOWOC M250-Maxer	NITOWOC 500 5.5~24.0		14.3~27.8	(주)육천건설	
LR 1650/1800	800	9.0~96.0	42~112	국제건기(주)	
Manitowoc M18000	750	8.5~130.0	42.7~134	국제건기(주)	
Sumitomo SCX-6500 650 6.0~76.0		24.38~91.44	국제건기(주)		
LR 1550	550	4.5~92.0	21~105'	국제건기(주)	
Kobelco CKE 2500	250	4.0~80.0	15.2~91.4	(주)육천건설	

Table 6.3.2 Crawler Crane Lists

③ 잭업 시스템

출처) 서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계

Table 6.3.3 Jack-Up System Lists

1945

Company		Dimension		Jack Up System			
	Vessel Name	LxBxD (m)	Leg Dia.	Leg Length	Grasp Cap.	Lift Cap.	Fee (×10 <sup>4</sup> Won)
			(mm)	(m)	(ton)	(ton)	(/day)
동 국	EASTLAND 1	$37.5 \times 21 \times 3.3$	1,450	52.5		1,920	1,500
	EASTLAND 2	$35 \times 22 \times 3.2$	1,200	40		1,600	1,500
삼보E&C	JB 1	42x21x3.6	1,520	48	3,136	2,353	1,400
	JB 2	42x21x3.6		48	3,136	2,353	1,400
은성0&C	은성750	25x16.5x2.5				1,160	850
해양산업	HAEYANG	38x18.5x2.9		30	2,700	1,500	1,100
금토종합 건설	ILKYUNG	35x20x3.4	1,500	43.5	2,120	1,240	1,100
웅진개발	WJ SEP-1	35x22x3.2		30	1,600	449	850

출처) 서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계


④ 대선(해상운반선) : 해상풍력발전기의 하부구조인 자켓과 자켓-파일등을 적재하여 해상으로 운반하는 장비이며, 자체 동력이 없어 예인선을 이용하여 설치위치까지 운반한다.

Barge Lists	DWT	L(m)	B(m)	D(m)	Company
항만 공사용 대선	300	30.0	6.9	3.0	일반
	500	30.0	11.0	3.0	
	1,500	45.0	15.0	3.0	
동방 21호	3,400	65.0	16.0	4.8	
동방 11호	3,000	65.5	18.0	3.8	
동방 15호	4,000	72.5	21.5	4.2	도비
동방 6001	6,000	80.0	25.0	4.8	6.0
동방 8001	8,000	85.0	27.0	6.0	
동방 20001	12,000	92.5	36.0	5.8	
코리아 익스프레스 3001	3,000	65.0	17.0	4.0	이미하토우
코리아 익스프레스 5001	5,000	79.4	25.0	5.0	이네한중군

Table 6.3.4 Barge Lists

출처) 서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계

⑤ 천공장비 : 현재 국내 시공실적으로 최대 직경 3.0m RCD 천공사례가 있으 며, 자켓레그, 파일 천공 및 모노파일 시공시 원지반 천공장비로 활용가능하다.

Company	Diameter(mm)	Holding Amount	Remark
은성 O&C	3,000	37]	
	1,500	17]	
특수건설	2,000	27]	
	2,500	27]	
민경건설	3,000	_	
마천건설	2,500	-	

Table 6.3.5 RCD Equipment Lists

출처) 서남해 500MW 해상풍력단지 개발사업 타당성조사 보고서(한국전력공사, 2012.5)



#### 6.3.3 설치로지스틱 수립

Fig. 6.3.1은 서남해안 해상풍력 기초구조물 기본설계 보고서(한국해상풍력 (주), 2013.6)에 수록된 자켓형 해상풍력 지지구조물의 설치과정을 나타낸 것으 로 제작장에서 운송선에 선적된 구조물들을 플로우팅 바지를 이용하여 자켓구 조와 타워기초, 파일 및 장비를 해상운반한다. 설치해역에 도착한 후 500톤 플 로우팅 크레인으로 자켓을 해상에 거치하고, 셉 바지 위에서 250톤의 크롤러 크레인과 30톤의 항타기를 이용하여 연암상단까지 자켓 파일을 항타한다. 그런 후 RCD 장비로 연암을 천공하고, 핀 파일을 관입한 후 그라우팅으로 핀 파일 내부를 채워 하부자켓을 해상에 고정한다. 마지막으로 500톤 플로우팅 크레인 으로 타워기초를 설치하여 완료한다.





Fig. 6.3.1 Installation Sequence for Jacket Support Structure



Fig. 6.3.2는 서남해 500MW 해상풍력단지 개발사업 타당성조가 보고서(한국전 력공사, 2012.5)에 수록된 자켓형 해상풍력 지지구조물의 설치과정을 보여준다.



Fig. 6.3.2 Installation Sequence for Jacket Support Structure



Fig. 6.3.3은 서남해 500MW 해상풍력단지 개발사업 타당성조가 보고서(한국전 력공사, 2012.5)에 수록된 현장타설말뚝(Cast In Place Concrete Pile Foundation) 해상풍력 지지구조물의 설치과정을 보여준다.



Fig. 6.3.3 Installation Sequence for Cast In Place Concrete Pile Foundation



본 연구에서 다루는 신형식 자켓구조물에 대한 설치계획은 앞서 살펴 본 내 용들을 참고하여 결정하였고, 시공사의 능력을 배제하고 국내에서 가능한 장비 를 이용하여 수행하는 것으로 가정하였다. Fig. 6.3.4는 제안된 자켓형의 설치 로지스틱을 보여준다.

육상에서 제작된 자켓과 타워기초를 직립으로 해상운송선에 선적하고, 해상운 송 후 플로우팅 크레인을 이용하여 자켓을 설치해역에 거치하고, 파일해머를 이용하여 항타한다. 파일 작업이 완료되면 자켓과 파일을 크라운 심 플레이트 를 이용하여 현장 용접에 의해 일체화 시킨다. 그런 후 타워기초를 자켓 구조 위에 설치하여 완료한다.



Fig. 6.3.4 Installation Logistics for Proposed Jacket-Type



#### 6.3.4 설치비 분석

앞선 절에서 조사된 설치장비들과 설치로지스틱을 바탕으로 각 지지구조형식 에 대한 설치비용을 비교 분석하였다. 설치비용은 해상조건이 양호한 상태에 서 모든 작업이 순차적으로 이뤄진다고 가정하여 산출하였으므로 해상대기일수 는 고려하지 않았다.

Fig. 6.3.5는 주요구조물의 설치비용 부분만을 정리한 것으로 두 구조물의 가 장 큰 차이점은 자켓과 파일의 연결방법이다. 즉, 일반적인 자켓형은 RCD 장비 로 암반을 굴착하여 핀-파일을 암반에 관입한 후 그라우팅 작업에 필요한 Drilling 비용이 전체설치 비용 중 46%를(6.2억원) 차지한다. 그러나 제안된 자켓 형은 핀-파일을 사용하지 않으므로 RCD 작업이 없고, 자켓과 파일의 연결도 그 라우팅 대신에 Crown Shim Plate를 이용하여 현장 용접작업으로 대체가능하므 로 이와 관련된 설치비용은 2천만원으로 전체 설치비용의 3%에 불과하다.

그리고 제안된 자켓형은 자켓 설치비용이 전체 설치비용 중 55%를 차지하는 데, 여기에는 설치비용은 7천5백만원인데 반해 1,500톤 해상크레인을 월임대(3 억5천만원) 조건으로 산정한 결과이다. 그러나 기존 자켓형의 자켓 설치비용은 보고서 내용만으로 파악하는데 한계가 있고, 설치절차에 의하면 잭업바지와 크 롤러 크레인을 이용하는 것으로 나와 있으므로 월임대 조건이 아닌 것으로 추 측된다.



Fig. 6.3.5 Installation Percentage for Support Structures



Fig. 6.3.6은 기존 자켓형과 제안된 자켓형의 전체 설치공정에 따른 설치비용 을 비교한 것으로 제안된 자켓형이 기존 자켓형 대비 약 42%의 설치비용을 절 감할 수 있는 것으로 나타났다. 앞서 언급하였듯이 타당성조사 보고서의 기존 자켓형은 허용응력 설계법을 적용하여 그에 따른 구조물량이 늘어나 상대적으 로 불리한 것으로 나타났다. 그러나 한계상태 설계법을 적용하여 구조물량을 줄일 수 있더라도 기본적인 설치공정의 변화가 없다면, Drilling의 비용은 필수 라 할 것이다. 따라서, 제안된 자켓형은 이러한 공정을 개선한 것으로 기존 자 켓형과 같은 구조물량이라 하더라도 설치비용 절감은 충분히 가능할 것으로 사 료된다.



Fig. 6.3.6 Comparison of Installation Price for Support Structures



### 6.4 경제성 분석

해상건설공사에 투입되는 비용은 설치구조물의 제원, 현장여건, 자원 가용성, 기술력, 시장의 경쟁성 등에 따라 변동하는 특성을 지니고 있어 사업 전 과정 에 걸쳐 적정비용의 실체를 파악하는데 다양한 제약요인이 내제되어 있다. 특 히, 대규모 재원이 투입되는 해상건설공사의 경우 단위사업의 규모가 크고 작 업내용과 비용구조가 복잡하여 정확한 공사비의 예측이 매우 까다롭다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 부분을 최소화하기 위해 기존형식과 제안형식을 동일한 조건하에 경쟁력 분석을 수행하였다.

Fig 6.4.1은 각 구조형식별 총 공사비로 구성된 제작비와 설치비의 비율을 나 타낸 것으로 거의 비슷한 분포를 보여준다. 특히, 제작비의 비율이 큰 이유는 자켓구조물은 여러 개의 강관이 용접으로 연결되는 구조로서 트라이포드나 모 노파일 등과 비교했을 때 연결부가 많아 제작비가 이들 구조보다 더 많이 소요 되어 설치 공사비용보다 제작비용의 비율이 상대적으로 더 크다는 기존의 연구 결과를 재확인할 수 있다.



Fig. 6.4.1 Total Construction Costs Percentage for Support Structures



Fig 6.4.2는 총 공사비를 비교한 것으로 제작비와 설치비 모두에서 경제성이 있는 제안된 자켓형이 기존 자켓형보다 약 47% 경쟁력이 있는 것으로 나타났 다. 앞서 언급하였듯이 본 공사비용은 간접비를 제외한 직접공사비만 비교한 것이고, 여기에 설치공사에 필요한 오탁방지막과 등부표 등은 제외한 것이다. 그 이유는 타당성 조사 보고서에 수록된 자켓형의 공사비 내역(항목)과 동일한 조건으로 비교하기 위해 이들 내역만 발췌하였기 때문이다.



Fig. 6.4.2 Total Construction Costs for Support Structures



## 제 7 장 결론

본 연구에서는 기존의 자켓식 지지구조물에 대한 구조형상과 설치공법을 분 석하여 해상장비 투입을 최소화할 수 있고 개선된 설치방법을 적용할 수 있는 자켓형 해상풍력발전 지지구조물을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 해상풍력 타워기초의 하단을 경사 브레이스로 자켓과 직접 연결하여 데크 에 작용하는 하중을 줄일 수 있었고, 이것은 데크단면의 경량화로 구매비와 제 작비에 대한 경제성을 확보하였다.

(2) 자켓과 파일의 연결은 파일을 설치한 후에 크라운 심 플레이트를 끼워 현 장용접에 의해 자켓과 파일을 일체화시키는 방안을 제안하였다. 이 방법은 별 도 해상장비가 필요하지 않고, 대기중에서 작업이 가능하므로 해상상태에 큰 영향을 받지 않으므로 공사비를 획기적으로 절감할 수 있었다.

(3) 머드매트를 설치조건에도 만족하고 구조물 운용시 횡력을 저항할 수 있는 영속부재로 제안하여 횡력 저항 향상, 구조변위 감소 및 파일 단면의 최적화가 가능하였다.

(4) 머드매트 하단에 설치되는 스커트 플레이트는 해상에 구조물을 설치할 때 활동저항 개선효과가 있어 설치파고 조건을 더 높일 수 있으므로 해상작업시간 단축이 가능하여 해상설치비를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

(5) 본 연구에서 제안한 자켓식은 기존의 자켓에 사용된 핀-파일과 RCD 천공 이 불필요하고 자켓과 파일 연결방법 개선에 따라 제작비와 설치비에서 각각 49%와 42% 절감이 가능한 것으로 나타났다.

마지막으로 다음과 같은 추가연구를 통해 서남해 해상풍력 지지구조 형식으 로 적용 가능성을 확인한다면, 충분한 경제성을 갖춰 있으므로 전체 사업비를 절감한 성공적인 해상풍력발전 사업을 가능하게 할 것으로 사료된다.



(1) 본 연구에서 적용된 공력하중은 5MW Upwind 보고서에 수록된 특정 하중 조건에 대해서 Un-Coupled해석을 수행한 것으로 제시된 모델의 적용 가능성을 확인하기 위하여 풍력발전 시스템을 고려한 통합하중해석이 추가적으로 수행되 어야 한다.

(2) 본 연구에서 제안한 자켓과 파일을 연결하는 크라운 심 플레이트는 전체 구조물의 강성을 책임지는 핵심부로 구조물 수명 내 반복적인 피로하중에 의한 용접부 피로강도 평가가 추가로 수행되어야 한다.

(3) 본 연구에서 제안한 구조형식은 서남해안에 적합한 지지구조로 일반적으로 서남해안의 지반은 연약지반이 넓게 분포해 있다. 이에 반해 제주도와 근접한 남해안은 구조물의 지지층인 암반이 해저면에서 깊지 않은 곳에 있어 해상 구조물 설계시 지지력 확보를 위해 핀-파일이 필요할 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제안된 지지구조가 남해안 지반에 적용가능한지 추가적 인 연구를 통해 확인할 필요가 있고, 남해안에도 적합한 해상풍력 지지구조가 개발된다면 국내 해상풍력 사업에 시너지 효과를 가져올 것이라 확신한다.





# 감사의 글

석사학위 후 15년만에 뜻 깊은 박사학위를 취득하게 되어 무슨 말로 기쁨을 표현해야 할지 모르겠습니다. 이렇게 저는 대한민국에서 정규교육과정으로 받 을 수 있는 가장 높은 학위를 가진 소위 '고학력자'가 되었습니다. 박사가 되기 위한 연구를 하고 논문을 쓰는 것은 일부 저의 능력과 노력의 결과일 수도 있 겠지만, 오늘이 있기까지 수많은 분들의 격려와 도움이 있었기에 가능했습니다. 이에 글로나마 감사한 마음을 전하고자 합니다.

박사학위 논문이 완성이 되기까지 열과 성의를 다해 세심한 지도를 해주신 조 효제 지도교수님께 머리 숙여 감사드리며 다망하신 중에도 논문 심사를 맡 아 따뜻한 충고를 아끼지 않으신 박 주용 교수님, 김 도삼 교수님, 이 승재 교 수님, 부경대학교 구 자삼 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

또한 박사학위에 전념할 수 있도록 팀 프로젝트를 잘 이끌어준 하 성열 차장 과 우리 팀원들 그리고 궂은 일 마다하지 않고 논문작성에 많은 도움을 준 박 영호 군에게도 고마움을 전합니다. 무엇보다 박사학위 기회를 주시고, 많은 조 언과 열렬히 지원해주신 최 병렬 사장님께도 감사의 말씀을 드리고, 학교에서 자기 일처럼 도와주신 황 재혁 박사님과 후배들께도 감사드립니다.

항상 따뜻한 마음으로 저희 가족을 맞아주시는 장인 장모님과 철부지 막내를 낳아주시고, 키워주시고, 응원해주신 부모님께 감사드리고 존경한다는 말씀드립니다. 앞으로도 부모님께 효를 행하는 자식이 되겠습니다.

마지막으로 글로 다 표현할 수 없는 어려움 속에서도 자신을 희생하면서 뒷 바라지를 해준 아내 김 현진과 많은 시간을 함께해주지 못하는데도 씩씩하게 잘 크고 있는 첫째 최 은서와 둘째 최 성영에게 사랑하는 마음과 함께 이 논문 을 바칩니다. 박사학위뿐 아니라 앞으로 제가 어떤 삶을 살며 어떤 것을 가지게 되든 그것 을 자신의 노력만으로 이루었다고 생각하지 않겠습니다. 남들에겐 없었지만 제 가 가질 수 있었던 기회와 행운에 감사하는 마음과 고마운 마음을 잊지 않겠습 니다. 그런 의미에서 다시 한번 모든 분들께 감사의 말씀을 전합니다.





## 참고문헌

- 김현기, 2013. *해상풍력발전 하이브리드 지지구조의 정·동적 거동특성 연구.* 박사학위논문. 건국대학교.
- 윤희정, 권오순, 이광수, 2009. 해상 풍력발전 기초 설계기준서 비교. 2009년 대 한토목학회 학술대회.
- 전력연구원, 2013. 서남해 2.5GW 해상풍력 실증단지 설계근거 중간보고서-풍력터빈 및 지지구조물 설계를 위한 기본 자료.
- 최한식 등, 2015. 서남해안에 적합한 개선된 자켓형 해상풍력 지지구조 시스템 에 대한 연구. 한국해양공학회 2015년도 추계학술대회.
- 최한식, 하성열, 서승기, 최병렬, 2013. 서해안에 적합한 해상풍력 지지구조 형 식 제안. 한국해양공학회 2013년도 추계학술대회.
- 최한식, 서승기, 최병렬, 2012. 서남해안에 적합한 해상풍력발전기 하부기초형식 에 대한 연구. 2012년 대한토목학회 학술대회.
- 한국전력공사, 2012. 서남해 500MW 해상풍력단지 개발사업 타당성조사 보고서. 한국해상풍력(주), 2013. 서남해 해상풍력 기초구조물 기본설계 보고서.
- American Petroleum Institute (API), 1997. *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms–Load and Resistance Factor Design,* API RP–2A–LRFD.
- American Petroleum Institute (API), 2007. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-Working Stress Design, API RP-2A-WSD, 21st edition.
- DET NORSKE VERITAS AS (DNV), 2013. Design of Offshore Wind Turbine

Structures, Norway: DNV-OS-J101.

Fischer, T., de Vries, W., and Schmidt, B.: *Design basis – Upwind K13 deep water site, Endowed Chair of Wind Energy, Stuttgart, 2010* 

Germanischer Llyod (GL) 2005. *Rules and guidelines industrial services IV – 2. Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines.* Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH.

International Electrotechnical Commission(IEC), 2009. *International Standard-Part 3: Design requirements for offshore wind turbines,* IEC 61400-3.

Martijn van Wijngaarden, 2013. *Concept design of steel bottom founded support structures for offshore wind turbines,* Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

Saigal, R. K., D. Dolan, A. D. Kiureghian, T. Camp, and C. E. Smith, 2007. *Comparison of design guidelines for offshore wind energy systems,* Offshore Technology Conference. Houston, TX.

Software Manual, SACS

Tim Fischer, *Final report Task 4.1, Deliverable D4.1.5, WP4: Offshore Foundations and Support Structures.* 

Van der Tempel, J., 2006. Design of support structures for offshore wind turbines, Department of Civil Engineering, Delft University of Technology.
Wybren de Vries, : UpWind\_WP4\_D4.2.8\_Final Report WP4.2: Support Structure

Concepts for Deep Water Sites.

