



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

濟州海域內的 海上風力터빈 設置를  
위한 자켓形 基礎土木構造物 研究

濟州大學校 産業大學院

風力工學科

李 相 奎

2014 年 8 月

# 濟州海域內的 海上風力터빈 設置를 위한 자켓形 基礎土木構造物 研究

指導教授 이 병 걸

李 相 奎

이 論文을 風力工學科 碩士學位 論文으로 提出함

2014 年 8 月

李相奎의 風力工學科 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ ①

委 員 \_\_\_\_\_ ①

委 員 \_\_\_\_\_ ①

濟州大學校 産業大學院

2014 年 8 月

# Research of Substructure for Structure Installation of Jacket Type Offshore Wind Turbine in Jeju Ocean

Sang-Kyu Lee  
(Supervised by professor Byung-Keol, Lee)

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

2014. 8.

This thesis has been examined and approved.

.....  
Thesis director, Byung-Gul Lee, Prof. of Civil Engineering

.....  
Date

Department of Wind Energy Engineering

GRADUATE SCHOOL of INDUSTRY

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

# 목 차

LIST OF FIGURES	-----	i
LIST OF TABLES	-----	iv
SUMMERY	-----	v
I. 서론		
1. 연구 배경	-----	1
2. 국내·외 동향	-----	2
3. 연구 목적	-----	4
II. 형식 및 특성비교	-----	5
1. 기초구조물의 형식분석	-----	5
1) 기초구조물 형식별 특성	-----	5
2) 수심에 따른 사례비교	-----	7
2. 기초구조물 비교분석	-----	10
III. 자켓형 기초구조물 분석	-----	12
1. 해상풍력과 토목의 상관관계	-----	12
2. 연구범위 및 방법	-----	13
1) 연구범위	-----	13
2) 연구방법	-----	14
3. 자켓형 기초구조물의 개요	-----	14
4. 외부하중의 이론적 해석	-----	15
5. 자켓기초 적용성 검토	-----	22
IV. 결론	-----	50
참고문헌	-----	52

# LIST OF FIGURES

- Fig 1 수심별 해상풍력발전 중력식 구조물 분류
- Fig 2 수심별 해상풍력발전 모노파일 구조물 분류
- Fig 3. 수심별 해상풍력발전 트라이포드 구조물 분류
- Fig 4. 수심별 해상풍력발전 자켓형 기초구조물
- Fig 5. 수심별 해상풍력발전 플로팅 기초구조물
- Fig 6. 자켓형 기초구조물의 도식화된 개요도
- Fig 7. Loads adapting Structures of Offshore wind power
- Fig 8. Wave load effect : different sea states
- Fig 9. Wave effects on different Foundation section : Fx
- Fig 10. Morrison's caculation methods
- Fig 11. An area of the ocean in Jeju
- Fig 12. the flood strength
- Fig 13. the edd strength
- Fig 14. Modeling of Substructure in 35m depth
- Fig 15. Modeling of Substructure in 45m depth

# LIST OF TABLES

- Table 1 서남해 2.5GW 해상풍력 종합 추진 계획
- Table 2 한반도 주변 해양의 수심별 면적
- Table 3. 형식별 적용성 검토
- Table 4. 해상풍력 부지선정시 기준
- Table 5. 설계기준 비교분석 (국내·외)
- Table 6. Ultimate load results
- Table 7. Stress calculation
- Table 8. Wave elevation : defferent sea states
- Table 9. 자켓 기초설계 흐름도
- Table 10. 기본풍압
- Table 11. 월별 풍속 수치화
- Table 12. 월별 풍속 도식화
- Table 13. Tide level
- Table 14. the wave height and cycle in 10years frequency
- Table 15. the wave height and cycle in 50years frequency
- Table 16. 상부시설 규모
- Table 17. 하부자켓 규모
- Table 18. 설계파랑
- Table 19. 설계풍속
- Table 20. 상부하중
- Table 21. 35.0m the depth of water
- Table 22. 35.0m Jacket Pile
- Table 23. 35.0m Jacket Leg
- Table 24. 35.0m Joint Can
- Table 25. 35.0m Jacket Brace

Table 26. 35.0m Deck  
Table 27. 35.0m displacement  
Table 28. 45.0m the depth of water  
Table 29. 45.0m Jacket Pile  
Table 30. 45.0m Jacket Leg  
Table 31. 45.0m Joint Can  
Table 32. 45.0m Jacket Brace  
Table 33. 45.0m Deck  
Table 34. 45.0m displacement  
Table 35. 변위검토  
Table 36. 지지력 검토  
Table 37. 변위검토  
Table 38. 지지력 검토  
Table 39. 응력비 검토 요약(35.0m)  
Table 40. Jacket Pile (35.0m)  
Table 41. Jacket Leg(35.0m)  
Table 42. Joint Can(35.0m)  
Table 43. Jacket Brace(35.0m)  
Table 44. Deck(35.0m)  
Table 45. 응력비 검토 요약(45.0m)  
Table 46. Jacket Pile(45.0m)  
Table 47. Jacket Leg(45.0m)  
Table 48. Joint Can(45.0m)  
Table 49. Jacket Brace(45.0m)  
Table 50. Deck(45.0m)  
Table 51. data of the wave(35.0m)  
Table 52. results of the analysis(35.0m)  
Table 53. data of the wave(45.0m)  
Table 54. results of the analysis(45.0m)

## SUMMERY

To estimate the characteristics of the substructure of jacket type offshore wind turbine, this research was studied on European offshore wind turbine models and its related systems. In the study, the substructure types of offshore wind turbine in the coastal region can be divided into two ones such as a monopile or gravity and a jacket or tripod, which are strongly related with the water depth. The gravity or monopile type is constructed in the area of shallow water depth less than 20m, however the jacket type is in relatively deep water depth as the 30~40m. Two types also were considered to a structure stability and economical feasibility since the construction budget and structure safety for the construction of offshore wind turbine were important things. In the study, the jacket type was analyzed to apply it to 35m and 45m water depth of Jeju island coastal area based on the theoretical and technical approaches of the substructure because the island coastal region has deep water depth. In the analysis procedures, this study also considered the ocean environmental conditions such as wind waves, tide and wind forces effecting to the jacket. To estimate the jacket structure safety, the jacket structure stress and displacement and other deformation items were calculated. From the calculation of the jacket structure, this research found that the selected parameters of the ocean environment conditions and wind force were reasonable, and the jacket structure analysis results by numerical model were very useful for constructing offshore wind turbine in 35m and 45m depths of Jeju coastal area. Therefore, this research found that the offshore jacket structures proposed by the paper can be applied to the real coastal environmental conditions in Jeju ocean.

# I. 서 론

## 1. 연구 배경

해상풍력발전기의 하부구조는 개발초기(1990년대 ~ ) 중력식(최대용량 2MW 이하, 수심 10m 이하)이 많이 적용되었다. 이후 해상풍력발전단지가 기하급수적으로 증가하기 시작한 2005년 전후로는 모노파일(Monopile) 형식이 대세를 이루기 시작하였다. 그 주된 이유는 주 건설지역인 유럽의 북해 및 흑해의 조건이 발전용량과 수심의 조건이 각 3mw, 30m이하의 사질토 지반으로 대구경 강관파일을 타입(Driven)공법으로 하루이내에 시공이 가능하여 시공성 및 경제성을 확보하기 유리하였기 때문이었다. 최근에는 기술적인 노력으로 발전용량은 5MW이상으로 증가하고 수심 또한 30m 이상 깊어지면서 해상풍력 기초하부구조의 초기단계에 두각을 보였던 모노파일 이외에 자켓(Jacket)식, 트라이포드(Tripod)식, 트라이파일(Tripile)형식, 중력식(GBS) 등으로 다양한 형식이 제안되어 설계되고 시공 및 운영중에 있다.

해외의 수많은 해상풍력 발전단지 사례에서 알수 있듯이 해상풍력 발전기의 기초하부구조는 발전기의 용량, 설치수심에 의해 형식이 크게 좌우되었는데, 그 이유는 발전기의 용량이 증가하고 수심이 깊어질수록 외력에 대한 저항성능보다는 바람과 파도에 의한 가진진동수와 풍력발전기 지지구조물의 고유진동수의 공진현상에 대한 안정성 확보를 위함이며, 현재에도 이를 극복하고 구조적으로 오랜 기간 전력생산을 위한 구조적으로 안정적인 기초구조물을 설계·시공하기 위한 끊임없는 연구가 계속되고 있다.

기초 형식 선정에 있어서는 기본적으로 우선시 적용되는 것이 ① 해상풍력의 발전용량이 될 것이며, ② 설치 수심이 형식을 결정하는데 가장 큰 인자로 작용할 것은 분명하다. ③ 그리고 해저면 지반의 종류, 가설을 위한 장비의 적용 가능여부와 해상가능 작업일수 등의 ④ 시공성, 이에 따른 ⑤ 경제성, 그리고 생태 및 주변 경관 등에 미치는 ⑥ 환경적 영향 또한 발전용량과 수심과 함께 중요한 변수로 작용할 것이다.

이러한 해상풍력발전기의 기초구조물의 형식을 결정짓는 데는 다양한 측면이 고려되어지는데 국내에서는 그러한 연구가 미미한 실정이며, 해외선진사례를 보더라도 환경적 특성에 맞는 제한적인 해상풍력 기초형식을 갖추고 있는 실정이다.

## 2. 국내·외 동향

### 1) 국제 풍력시장

現국제 풍력산업의 성장은 지속적인 성장추세를 보이고 있으며, 그러한 누적흐름을 수치화해보면 그 규모만 약 960억불('10년), 누적 설치용량은 196.6GW('11년)이다. 풍력발전의 경우 발전단가가 저렴하고, 오염물질 배출이 없어 가장 이상적인 대체에너지이며, 올해 설치용량이 전년대비(2014년기준) 29.6% 성장하면서 세계 전력수요 중 최소 2.87%를 공급할 것으로 관측하고 있다. 이 밖에도 육·해상풍력의 통합자료에서 국내풍력은 1%미만의 초기단계이지만 이미 Grid parity에 근접하여, 신성장 동력으로서 풍력산업은 신재생 에너지 성장을 견인할 전망으로 내다보고 있다. 반면 우리나라에서 풍력발전이 차지하는 비중은 미미한 수준이다.

### 2) 국내 풍력시장

우리나라의 지난해 풍력발전 설비용량은 전년 대비(2014년기준) 79MW(16.4%) 증가한 561MW로 집계되었다. 하지만 2010년에 “해상풍력로드맵”을 발표, 2013년에 100MW(6,036억원) 국산 해상풍력발전기 실증단지를 조성한 후 2016년까지 900MW(3조254억원) 시범단지, 2019년까지 1,500MW(5조6,300억원) 해상풍력단지를 추가 건설할 계획을 추진하고 있다.

이러한 추진 계획의 움직임으로 서남해 2.5GW[1], 전남4GW, 제주380MW 등 약 18조원 규모의 시장이 예상되지만 아직 상업용 설치 전례가 없어 국내 많은 연구가 필요함을 시사하고 있다.

Table 1.. 서남해 2.5GW 해상풍력 종합 추진 계획[1]

구분	실증단계	시범단계	확산단계
일정	'13 ~ '16년(3년)	'16 ~ '19년(3년)	'19 ~ '22년(3년)
목적	Track Record 확보 단지설계기술 확보	운영기술 확보 상업적 가능성 입증	대규모 단지 개발 상업적 운영
규모	100MW(5MW*20기)	900MW(5MW*180기)	1,500MW(5MW*300기)
계통연계	고창전력시험센터(154kV)		새만금변전소(345kV)
사업비	6,036억원	3조254억원	5조6,300억원

위 표에서도 알 수 있듯이 풍력산업의 추진계획은 크게 나타나고 있는데, 이러한 목표설정에 앞서 해상풍력의 연구는 미흡한 실정이다. 풍력터빈을 해상에 설치하기 위해서는 육상에서와는 달리 해상 지지구조물을 구축해야 하기 때문에 서남해와 같은 해상단지 예정지역의 수심은 경제성에 매우 큰 영향을 가져다 준다. 앞서 언급한 바와 같이 해상풍력발전의 기초구조물은 수심에 따라 다른 지지구조형식을 적용하고 있다. 그 중에 모노파일과 같은 고정형식의 기초구조물은 많은 해양구조물 기초시공 실적을 통하여 검증이 완료된 구조형식으로 얕은 수심에서는 경제적이고 효율적이지만 수심이 깊어지면 경제성이 낮아지는 단점이 있다. 반면 부유식 기초는 해안에서 멀리 떨어져 수심이 깊은 곳에 설치가 가능하지만 기술개발 수준이 낮고 아직까지 시공사례가 거의 없어 실제 현장적용에 이르기 까지 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다.

해외에서 운영 중인 해상풍력단지는 대부분 수심 30m이내에 위치하고 있으며, 기술적으로는 수심이 대략 50m인 해역까지 고정식 기초구조물의 설치가 가능한 것으로 파악된다.

### 3. 연구 목적

앞서 언급한대로 해상풍력은 에너지 자급력 확보 및 대체에너지로서의 역할에 선두로 해양을 에워싸고 있는 한반도 지형적 특성상 유리한 산업이다. 하지만 육상풍력에 비해 위험적인 측면이 높기 때문에 보다 안정적인 토목구조의 연구가 시급한 실정이며, 지형적·환경적 특성에 대한 면밀한 검토가 선행되어야 할 것이다.

Table 2. 한반도 주변 해양의 수심별 면적[2]

수심(m)	0~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	Total
면적(km <sup>2</sup> ) (면적비, %)	1,655 (3.6)	6,484 (13.9)	15,767 (33.8)	9,530 (20.5)	5,423 (11.6)	7,728 (16.6)	46,587
누적면적(km <sup>2</sup> ) (누적면적비, %)	1,655 (3.6)	8,139 (17.5)	23,906 (51.3)	33,436 (71.8)	38,859 (83.4)	46,587 (100.0)	46,587

국내 지형특성을 분석해보면 서해에 저수심 영역이 넓게 분포하고 있지만 동해안의 경우는 급격한 해저경사로 저수심 영역이 해안 일부로 국한되어 있다. 육지로부터 풍력단지의 이격거리는 해상풍력의 경관 문제를 고려하기 위한 것으로 해양의 저수심 면적이 확보되지 않는다면[3] 고정식 기초형식을 갖춘다는 것은 사실상 불가능하다.

본 연구에서는 해상풍력의 기초형식에 대해 지형적·환경적 특성을 고려한 보다 면밀한 비교분석 및 가장 현실적인 대안인 자켓식 기초형식의 구조적 특성과 함께 외부요인에 대한 영향치 분석을 심층적으로 해보고자 한다. 이를 통해 향후 국내 해상풍력발전단지 형성에 보다 안정적인 구조설계를 위한 기초설계 자료에 바탕이 되고자 한다.

## II. 형식 및 특성 비교

### 2.1 기초구조물의 형식 분석

#### 2.1.1 기초구조물 형식별 특성

##### 1) 중력식 기초구조물 형식

먼저 지반조건에 따른 적응성이 가장 우수한 중력식 기초구조물을 분석해보면 기초하단이 해저면상에 거치되므로 기초의 활동, 침하, 연직도관리가 필요함을 알 수 있다.

그리고 환경적인 측면에서는 훌륭하여 민원상의 우려는 다소 적으며, 미관상의 불쾌함을 덜 주고 있다.

구조적으로 콘크리트의 표면으로 구성되어 균열·박리·손상 등의 우려가 있으나 유지관리는 다소 유리하다. 다만 중력의 의존적임을 감안해 볼 때 큰 중량으로 인하여 공용년수 이후 해체작업이 다소 불리하다. 이 밖에도 중량이 매우 커 대규모 장비가 요구되며, 수직도 조절이 어렵다.

##### 2) 모노파일 기초구조물 형식

모노파일 형식은 유럽과 같은 수심이 얇은 해상구간에서 주로 이용되어 지는데 이는 북해나 흑해처럼 가설지역이 대부분 사질토 지역으로 이루어져 있기 때문에 경제적으로 매우 유리하다.

그러나 풍력발전 제작기술이 지속발전하면서 발전용량 또한 기존 1~2MW에서 3MW이상의 대용량 발전기가 설치되면서 구조적으로 설치시공이 어려운 모노파일은 하향추세에 놓여지게 되었다.

이는 바람과 파도로 인한 가진진동수와 구조물의 고유진동수로 인한 공진현상으로 인하여 모노파일 단면의 직경 및 두께가 급격히 증가하기 때문이다.

만일 5.0MW에 적용한다면 수심의 한계는 25m이며, 수심증가에 따라 소요강재량은 수심의 제곱에 비례하기 때문에 매우 비경제적으로 알려져 있다.

### 3) 트라이포드 기초구조물 형식

트라이포드(Tripod) 형식은 대형장관구조에 연결된 긴 Leg로 하중을 지지하는 구조로 자켓식과 함께 최근 5MW 이상, 30m이상의 수심에 많이 적용되고 있는 형식이다.

자켓식보다 강재량이 30~50%정도 많이 소요되나 비교적 제작이 단순하고 모든 시공 조건을 감안하면 시공비는 자켓식과 차이가 없는 것으로 알려져 있다.

다만 풍력발전 용량 및 수심 증가에 따른 타워 직경의 증가는 과압을 받는 투영면적의 증가로 보다 큰 강성을 요구하게 되어 공사비가 크게 증가한다. 지반과의 지지를 위한 파일기초 또한 자켓식보다 대구경이 필요하다.

### 4) 자켓식 기초구조물 형식

이 중 경관상의 아쉬움은 있으나 국내기준에 가장 부합하는 자켓식 기초구조물의 경우 주로 석유 및 가스 시추작업에서 수심 20~80m에서 적용되어지는데, 해상풍력발전기의 기초구조물로는 대용량, 대수심구간에 주로 적용되고 있다.

기초형식은 3-Leg 와 4-Leg방식이 있는데 4-Leg방식이 주로 이용되며, 3-Leg 방식은 강재량을 줄일수는 있으나 기초가 부담하는 하중이 커지기 때문에 보다 대규모 기초가 필요하다.

지반과의 연결을 위한 기초형식으로는 ①Main-piling ②Post-piling ③Pre-piling 등의 방법이 있다. 먼저 Main-piling은 자켓 Leg 내부로 파일을 근입하기 때문에 수심이 20m만 되어도 편파일 길이가 50m가 넘어 수심이 깊어질수록 불리하다. 그 다음 Post-piling은 자켓 Leg 외부에 설치된 슬리브 내부에 파일을 시공하는 방법으로 이 두 형식은 자켓 假거치 후 편파일을 근입한다. 끝으로 Pre-piling의 경우 미리 파일을 시공하고 자켓을 미리 시공된 파일에 연결하는 방식으로 대부분 이 방법을 따른다. Pre-piling은 이미 가스 및 석유플랜트 산업에서의 시공경험도 풍부하여 가장 신뢰성이 있고, 지반특성이 암반층이 주로 이루어져 있을 경우 노출암으로 인하여 파일시공시 암지반 굴착문제에 있어서도 파일의 구경이 크지 않아 국내 장비확보가 가능하며, 공기확보가능하다. 다만 파일시공시 부유사 및 진동,소음이 다소 발생할 우려가 있으나 타공법과 비교할 때 그리 크지는 않을 것으로 판단된다. 공진현상에 따른 문제 또한 모노파일 기초구

조물 형식보다 자유롭고 시공이 단순하여 공기확보가 가능하고 자연히 경제적이다.

### 2.1.2 수심에 따른 사례비교

#### 1) 중력식 기초구조물 형식

Type	Water Depth(m)									
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Gravity										
	Water Depth : 2.5 ~ 35m, Max. Turbine Size : 5MW									

Fig 1. 수심별 해상풍력발전 중력식 구조물 분류

2) 모노파일 기초구조물 형식

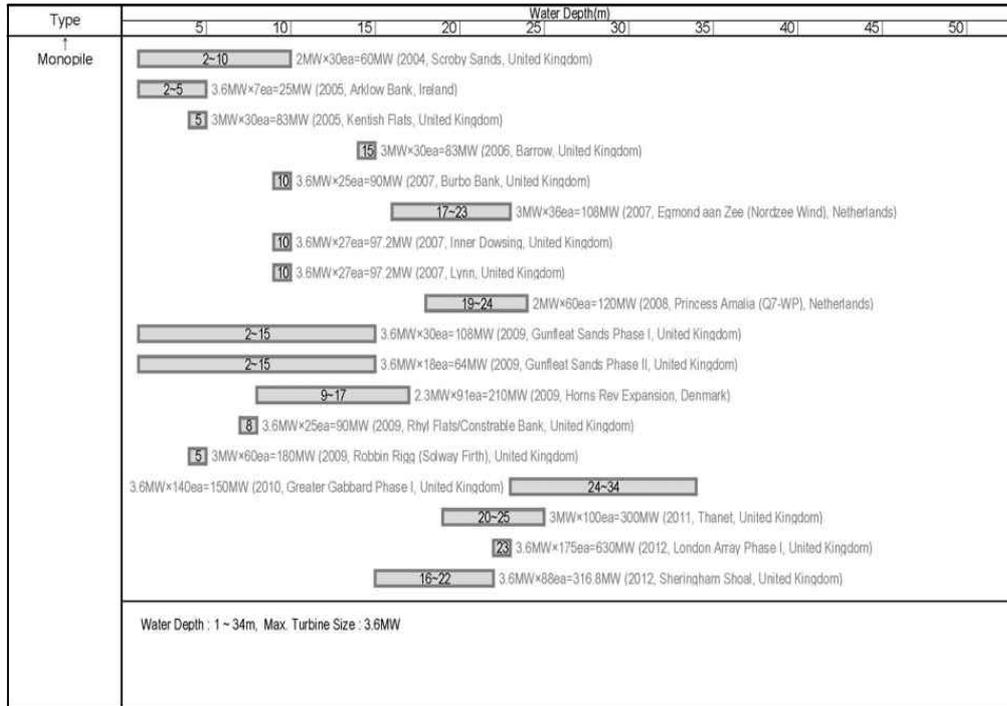


Fig 2. 수심별 해상풍력발전 모노파일 구조물 분류

3) 트라이포드 기초구조물 형식



Fig 3. 수심별 해상풍력발전 트라이포드 구조물 분류

4) 자켓 기초구조물 형식

Jaket	<p>5MW×2ea=10MW (2008, Beatrice (Moray Firth), United Kingdom) 43</p> <p>1.5MW×1ea=1.5MW (2007, Bohai Bay, China) 31</p> <p>30 5MW×6ea=30MW (2009, Alpha Ventus/Borkum West, Germany)</p> <p>17-22 5MW×30ea=150MW (2011, Ormonde, United Kingdom)</p>
	<p>Water Depth : 17-43m, Max. Turbine Size : 5MW</p>

Fig 4. 수심별 해상풍력발전 자켓형 기초구조물

5) 플로팅 기초구조물 형식

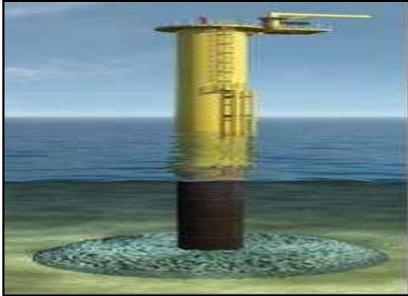
Floating	<p>0.08MW×1ea=0.08MW (2007, Blue H Puffin (Pilot), Italy) 108</p> <p>2.3MW×1ea=2.3MW (2009, Hywind/Karmoy (Floating Pilot), Norway) 120-700</p>
	<p>Water Depth : 108-700m, Max. Turbine Size : 2.3MW</p>

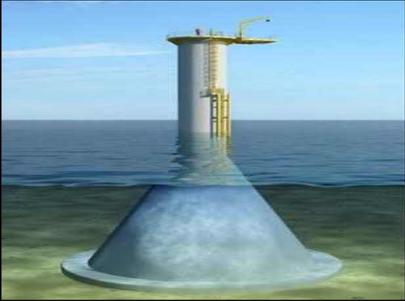
Fig 5. 수심별 해상풍력발전 플로팅 기초구조물

## 2.2 기초구조물 비교분석

종합적으로 국내 해양여건 적용기준에 부합한 기초구조물 형식을 비교분석해보면 아래와 같이 구분사항을 통해 어떠한 유·불리조건을 갖추고 있는지 알아보았다.

Table 3. 형식별 적용성 검토

구 분		자켓식(Jacket)	모노파일식(Monopile)
개요도			
적용성		적정수심 30~50m 적정용량 5.5 ~ 7MW	적정수심 10~30m 적정용량 5MW 이하
시공성	제작	○	◎
	운반	◎	◎
	공기	○	×
구조안전성		◎	△
공진저항성		○	×
경 관 성		△	◎
경 제 성		◎	×
시공사례		○Beatrice(UK) ○대수심의 ○Alpha 양구조물 Ventus(DE) (석유 및 가스시추산업 에 다수	○Utgrunden(SW) ○Scroby ○HornsRev(DK) Sands(UK) ○Blyth(UK) ○Barrow(UK) ○North ○Kentish Hoyle(UK) Flats(UK)

구 분		트라이포드식(Tripod)	중력식(Gravity)
개요도			
적용성		적정수심 30~40m 적정용량 5.5MW	적정수심 0~40m 적정용량 5.5MW
시공성	제작	◎	△
	운반	○	△
	공기	○	○
구조안전성		△	△
공진저항성		○	◎
경관성		◎	◎
경제성		△	○
시공사례		○AlphaVentus(DE)	○ Vindeby(DK) ○ Lilgrund(SW) ○ TunoKnob(DK) ○ Thornton ○ Iddlegrunden Bank(BE),30m ○ Nysted(DK)

먼저 자켓식 기초구조물의 특성에 대해 분석해보면 유지관리 및 경관성에서 이외 기초구조물보다는 불리하나 적용성 및 시공성 등에서 전반적으로 우수함을 알 수 있다. 트라이포드의 경우 대체적으로 무난한 공법이나 구체의 자중이 자켓식보다 커 공사비가 크게 증가하고, 대용량 발전기의 경우 단일기둥의 파압에 대한 투영면적의 증가로 구조안전성 및 경제성은 불리하다. 그 다음으로 중력식의 경우 지반에 대한 적용성은 가장 우수하나, 자재반입을 위한 제작장 확보의 현실적 어려움을 갖고 있으며, 구체의 자중이 매우 크기 때문에 제작 및 운반, 장비 운용이 이외 기초구조물보다 불리하다. 그 다음으로는 모노파일의 경우 공진문제로 3.6MW는 수심 30m, 5MW는 수심 25m가 한계로 알려져 있으며, 초과시에는 강성확보를 위하여 기둥의 직경 및 두께가 크게 증가하게 된다.(강재량이 수심의

제곱에 비례, 해상공법의 경우 신뢰성이 크게 확보되어야 할 것으로 판단되기에 해상시공경험이 풍부한 공법을 적용함이 타당할 것으로 사료된다.

### Ⅲ. 자켓형 기초구조물 분석

#### 3.1 해상풍력과 토목의 상관관계

해상풍력에서 시공을 포함한 기초구조물의 토목분야가 차지하는 비중은 전체의 40% 이상으로서 육상풍력과 달리 토목분야의 비중이 큰 영역으로서 많은 관심이 필요한 영역이나, 국내의 기존 풍력관련 연구 및 산업은 이 부분에 대한 준비가 매우 부족한 실정이다.

또한 해상풍력 단지설계를 위해서는 광범위한 해양조사 및 환경조사가 필수적이어서 토목, 해양분야의 연구는 필연적이다. [4]

Table 4. 해상풍력 부지선정시 기준[4]

항 목	세부항목	세부기준
풍 황	풍력자원	바람등급(풍력밀도 및 평균풍속)
	태풍 및 풍기상	태풍 발생빈도와 최대풍속
해 황	파랑	파향별 파고 및 주기
	조위차 및 조류속	평균조차, 최대조차, 조류속
	수심 및 지질	수심, 해저지질, 지반상태
	지진	지진활동도, 지진력
환경보호	환경보호지역, 조류이동경로 및 서식지	환경보호지역 조류 이동경로 및 서식지 유무
입지조건	항구/연안/전력선/이격거리	항구, 변전소등으로부터의 이격거리

또한 외국의 경우 현재 운영중이거나 계획중인 대부분의 해상풍력의 설치수심이 20m이내이고, Beatrice 와 같이 대수심 지역에 대해서는 시험적인 연구를 진행중에 있다.

## 3.2 연구범위 및 방법

### 3.2.1 연구범위

자켓형 기초구조물의 경우 기존 설계사례를 보면 수명은 25년으로 나타나며 다양한 범위예측을 통한 정적·동적 하중조합을 통해 연구가 진행되어야 한다. 이를 바탕으로 설계가 이루어지고 재료 및 구조물의 유지관리가 결정되어지는데, 본 연구에서는 자켓형 기초구조물에 가해지는 외력의 이론적·도식적 분석 및 국내 지역을 바탕으로 구조적인 해석으로 자켓형 구조물이 가지는 여러요인들에 대해 분석해 보았다.

이외에도 해상풍력 기초구조물의 설치시 해상조건의 주 요인인 파도예측을 통한 연구사례분석을 통해 본 연구의 이해도를 증진시키도록 하겠다.

### 3.2.2 연구방법

자켓형 기초구조물 설치시 구조물의 안정성 검토를 위한 기본적인 설계결과가 요구되어지는데, 이를 위한 기초흐름도의 도식화 및 이와 관련한 외부 환경적인 요인에는 어떠한 조건이 대별되는데 이론적 접근을 토대로 해석해 보았다.

이와 마찬가지로 실제 제주도 해상일원을 대상으로 기 확보된 해양조건과 해상풍력발전기의 기술데이터를 근거로 구조적인 해석을 하였으며, 환경하중 및 설계시 요구된 기술요소들도 이들에 기초하였다.

다시 말해 이론적 이해·기본설계의 흐름, 끝으로 적용성 검토에 이르는 일련의 과정을 통해 자켓형 기초토목구조물의 설치의 기본적인 흐름을 연구분석하였다.

### 사용 program

해양 및 항만 구조물의 구조해석시 주 사용되는 해석 프로그램인 SACS를 통해 개략적·구조적 접근을 통해 얻게 된 결과 값으로 접근법 예시를 통해 체계적

인 구조 해석을 시행하였다.

### 해석 조건

자켓 기초구조물의 설치 적용안에 대한 연구로서 보다 다양한 접근을 통해 해석값을 얻는 것으로 사료되나, 본 연구에서는 해상풍력의 확대추진 중인 제주도 지역을 바탕으로 조위관측 데이터(국립해양조사원) 및 기상통계자료를 통한 기본적인 환경조건을 활용하였다.

이 외 적용하중 및 계수값에 필요한 근거는 “항만 및 어항설계기준” 와 같은 아래 표시된 국내·외 설계기준을 바탕으로 제주도 지역의 자켓형 기초구조물의 외부하중 적용해석해 보았다.

Table 5. 설계기준 비교분석 (국내·외)

구 분	항만 및 어항 설계기준(국내)	해상풍력 기술매뉴얼(일)	DNV-OS-J101	GL IV-2
년 도	2005	2001	2010	2005
목 적	항만시설설계서	해상풍력발전전 용설계서	해상풍력발전 전용설계서	해상풍력발전 전용설계서
국한하중	불명확	파랑:30~50년 풍속:50년	50년주기	50년주기
하중사례수(개)	불명확	-	31	44
한계상태	미포함	미포함	ULS/SLS	ULS/SLS
해석방법	허용응력설계법	허용응력설계법	한계상태설계법	한계상태설계법

### 3.3 자켓형 기초구조물의 개요

기본적으로 자켓형 기초구조물의 경우 평방형 정사각형 구조의 철골구조물로서 파일링작업을 통한 하부지지형태로 구성되어진다. 앞서 언급한대로 자켓형 구조물은 일반적으로 석유추출 구조물이나 대수심 구역대의 해상풍력단지 형성의 기초구조물로서의 역할로 규정되어져 있다. 하부기초와 타워사이의 Transition

Piece는 하중을 분할시키는 역할을 하며, 하부기초의 부위별 용접 및 구조적 특성은 truss 구조형식을 갖추고 있다.

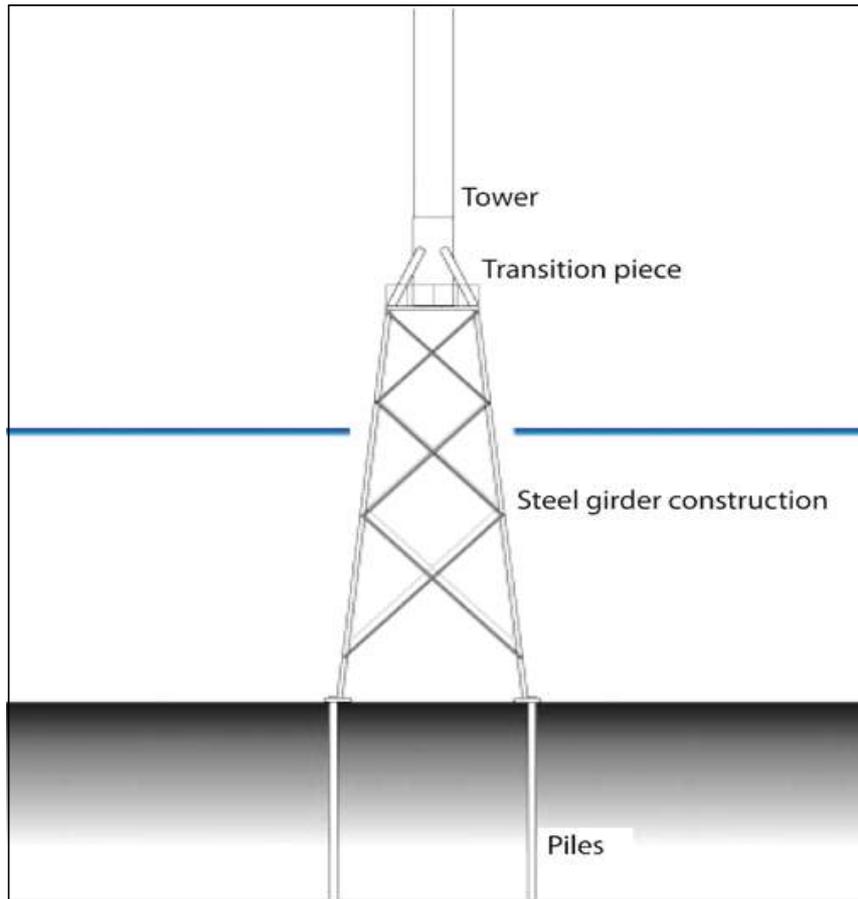


Fig 6. 자켓형 기초구조물의 도식화된 개요도

### 3.4 외부하중의 이론적 해석

일반적으로 기초구조물의 설치시 필요한 설계단계에서 검토되는 설계방법으로는 크게 허용응력설계법과 한계상태법으로 분류되는데 본 연구에서는 자켓형 기초구조물에 가해지는 외력의 범위와 이론적 토대를 통해 향후 설치시 연구방안을 모색하는데 도움을 주고자 하였다. 먼저 허용응력설계법에 경우 구조물의 저항력을 결정하고 이를 작용하중과 비교하는데 주로 경험과 판단에 근거한 획일

적인 안전율(Factor of safety)을 적용하고 있다. 반면 한계상태설계법은 작용하중과 구조물의 저항력에 대한 불확실성의 정도를 정량적으로 평가하여 설계에 반영하므로 각기 다른 하중조건과 구조물의 한계상태에 대해서 적합한 안전수준을 유지할 수 있는 점이 특징으로 해상풍력 기초구조물 설계시 유리하게 적용될 수 있다고 볼 수 있다.

#### 3.4.1 환경하중

자켓형 해상풍력 기초구조물에 가해지는 외부하중에는 파랑하중, 기초에 발생하는 해류, 구조물과 회전자-블레이드사이의 상호작용등이 있다. 기본적으로 기초구조물 토목설계시 고유구조진동수는 가진진동수에 의한 공진현상을 최소화하여야 하며, 풍력발전기에서 발생하는 외부하중으로부터의 내부전달이 해저지반에 미세한 교란을 주기적으로 일으키기 때문에 지반-구조물 상호작용에 대한 연구는 필요하다.

아직 국내에 해상풍력에 대한 체계화된 기준이 미흡한 실정이지만 해상풍력의 선진국인 유럽의 기준을 준용하고 있다. 사실 환경적·지형적 측면을 고려해보면 지진 및 태풍의 중요도가 상대적으로 작으며, 수심의 급경사등 여러 조건들이 상이하지만 해상풍력 연구개발 자체가 시작단계인 점을 감안하면 불가피한 실정이라 할 수 있다.

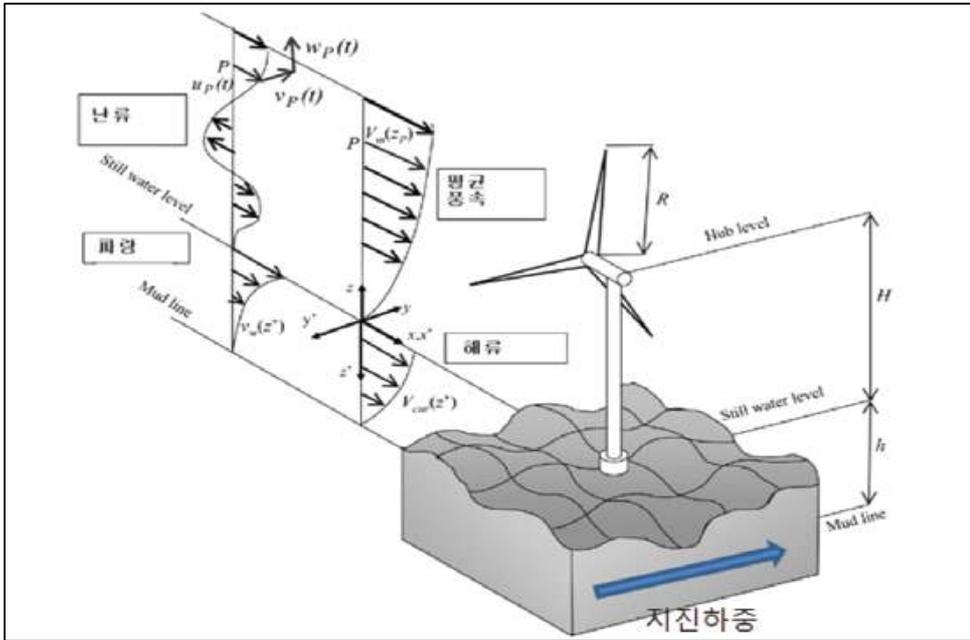


Fig 7. Loads adapting Structures of Offshore wind power

### 1) 파랑하중

해상풍력 자켓식 하부기초의 중요한 요인인 파랑은 일정한 파장, 파고, 주기를 갖는 일련의 파형으로 구조물 각 부재의 직접적인 큰 힘을 가한다. 파랑의 가장 중요한 특징은 불규칙성이므로 스펙트럼 모델이 어떤 해상 상태를 표시하는 척도가 되는데, 이 때는 구조물 해석도 통계적으로 수행되어야 한다. 그러나 설계상의 편리성과 그 동안의 경험에 비추어 규칙파 모델링도 해양 구조물 설계에 매우 적합한 것으로 인정되고 있다. 현재 실용화되어 있는 파랑모델에는 스토크스 5차파 및 에어리파 등이 있다. 어떤 파랑모델을 구조물 설계시 적용하느냐는 수심, 구조물 형상, 적용 파고등에 따라 달라진다. 이렇게 선택된 파를 설계파라고 하는데, 설계파의 변수는 파고, 파주기, 수심의 세가지로 대별된다. 이 설계파로부터 구조물의 각 부재에 작용하는 물 입자의 속도 및 가속도를 계산하여 모리슨식 방정식으로부터 항력과 관성력의 힘에 의해 최종적으로 파력을 등가절점력으로 산정하게 된다.

## 2) 해류하중

파랑이 물입자의 진동에 의한 파형의 흐름이라 한다면 해류는 물입자가 여러 요인에 의해 수평방향으로 직접 이동하는 흐름이라 할 수 있다. 해류를 발생시키는 요인은 대규모적인 것과 국지적인 것으로 나눌 수 있는데, 대규모적 요인에는 항풍과 지구회전에 의한 것, 온도차나 염도차에 의한 것 등이 있고, 국지적 요인에는 해저 퇴적물에 의한 것, 파랑에 의한 것, 조석에 의한 것, 바람이나 태풍에 의한 것이 있다. 해류에 의한 물입자의 속도는 해파에 의한 물입자의 속도등으로 모리슨 방정식을 이용하여 해상풍력 기초구조물에 작용하는 하중을 구한다.

## 3) 해수면하중

수면의 승강현상에 의하여 발생하는 하중으로 주로 천체의 움직임에 의하여 발생하거나 국지적으로 바람이나 파랑, 압력의 차이로 생기는 현상에 의하여 발생하는 하중이다.

따라서 이 모든 것을 더하여 설계 최대 수심을 결정하게 된다. 보통 최대 수심에서 최대 파고가 구조물에 접근했을 경우를 가정하여 외력 산정과 플랫폼 높이 등을 정하여야 한다. 또 최대 수심과 최소 수심의 수직선상 범위를 계산하여 구조물인 경우 최대 부식 범위의 산정, 고착성 해양 생물의 두께 산정 등에 이를 적용하여야 한다. 보트의 접안시설, 방식조치 범위를 정하는데 이용되고 해석시의 여러 항목을 위하여 수심은 명확히 기술되어야 한다. 설계환경 과정의 높이는 정수수위(SWL: Still Water Level)에 겹쳐서 더하여야 한다.

## 4) 풍하중

구조물에 작용하는 풍하중은 변동에 따른 시간 의존적 하중이다. 풍하중은 폐단면 구조의 외면에 작용하고 개단면 구조의 내면에도 작용할 수 있다. 풍하중은 포면의 법선방향량으로 작용한다. 큰표면에 바람이 몰아칠 때, 접선방향의 항력에 의한 마찰력 또한 고려되어야 한다.

- 신설 타워 설치로 인한 바람흐름의 교란
- 풍력발전단지과 같이 풍력발전기가 다른 풍력 발전기 뒤에 위치한 곳에서의 wake effects
- 발전기 축에 대한 바람 흐름의 엇갈림
- 공탄성 효과(터빈의 움직임과 바람간의 상호작용)
- 난류와 돌풍
- 뱀핑

#### 5) 지진하중

우리나라도 더 이상 지진 안전 지대가 아니며 최근에도 여러번 근해 지역을 진앙으로 한 지진이 일어나고 있다. 이를 감안해 볼 때 해상풍력 구조물 설계시, 하부 지질 구조를 면밀히 검토함으로써 지진시 동시 다발적으로 생길 수 있는 단층 현상, 퇴적물 이동 현상 등을 고려한 내진 설계가 필요하다

#### 3.4.2 파도하중영향 연구사례분석

환경하중에서 기초구조물에 가장 큰 요인인 파도하중에 대한 연구사례를 통해 하중의 영향을 알아보겠다. 먼저 파도하중의 영향을 집중적으로 보기위해 풍하중 조건은 정격풍속인 11.4m/s로 동일하게 설정하였다.

Table 6. Ultimate load results

height(m)	Fx[kN]	Fy[kN]	Fz[kN]	Mx[kNm]	My[kNm]	Mz[kNm]
-20	-109	2500	-8525	-244510	16861	-11593
0	-71	2430	-6637	-193943	18796	-11629
10	-51	2395	-5693	-168650	19863	-11662
87.6	112	1203	-2682	411	73324	-5168

Table 7. Stress calculation

height(m)	$\sigma$ (kpa)	$\tau$ (kpa)	$\sigma_v$ (kpa)
-20	156492.8	948.8184	156501.5
0	124289.2	810.4567	124297.1
10	108238.1	737.0326	108245.7

Table 8. Wave elevation : defferent sea states

Sea state	Hs(m)	Tp(s)	Min(m)	Max(m)	std.
nss	1.5	6.5	-1.3	1.1	0.4
sss	6.5	7.9	-4.8	4.7	1.6
swh	12.0	15.2	-9.3	10.9	3.2
ess	6.7	8.1	-4.9	4.9	1.6
ewh	9.3	10.5	-6.9	7.5	2.3
rwh	7.5	10.5	-5.7	6.2	1.8

파도 종류에 따라 상이한 하중 결과를 보였는데, 그 중 Severe wave height 에서 급격한 하중의 상승을 보였다. 전반적으로 유의파고( $H_s$ )가 커질수록 하중이 커지는 경향을 보였으며, 유의파주기( $T_p$ )에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 한편, 수심이 깊어질수록 급격한 하중의 상승을 보여주는데, 타워 10m위치에서부터 해저면으로 내려갈수록 급격하게 하중이 증가함을 알수 있었다.

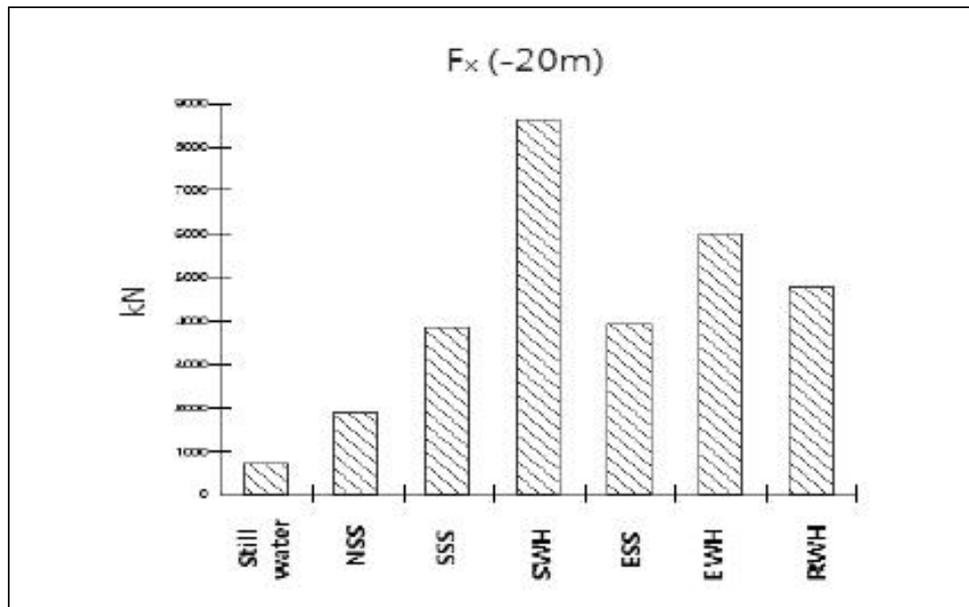


Fig 8. Wave load effect : different sea states

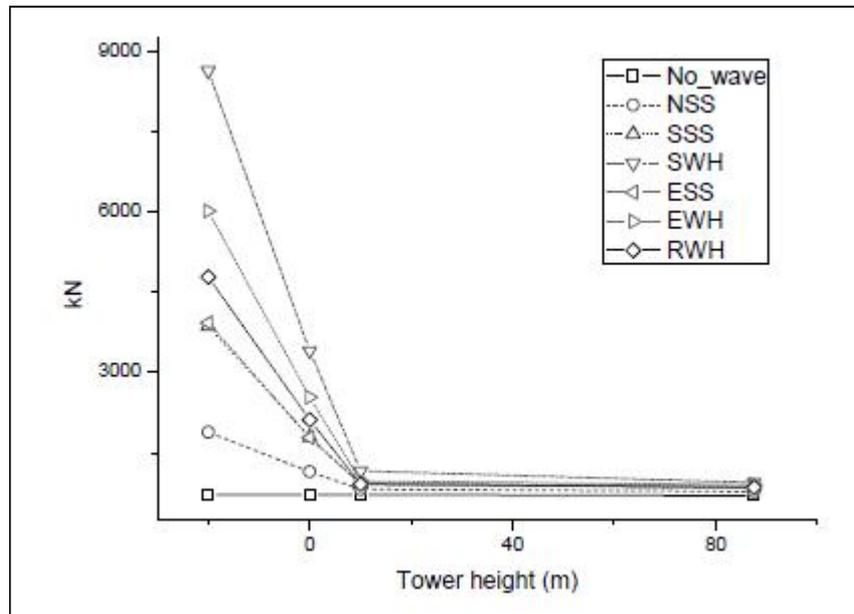


Fig 9. Wave effects on different Foundation section : Fx

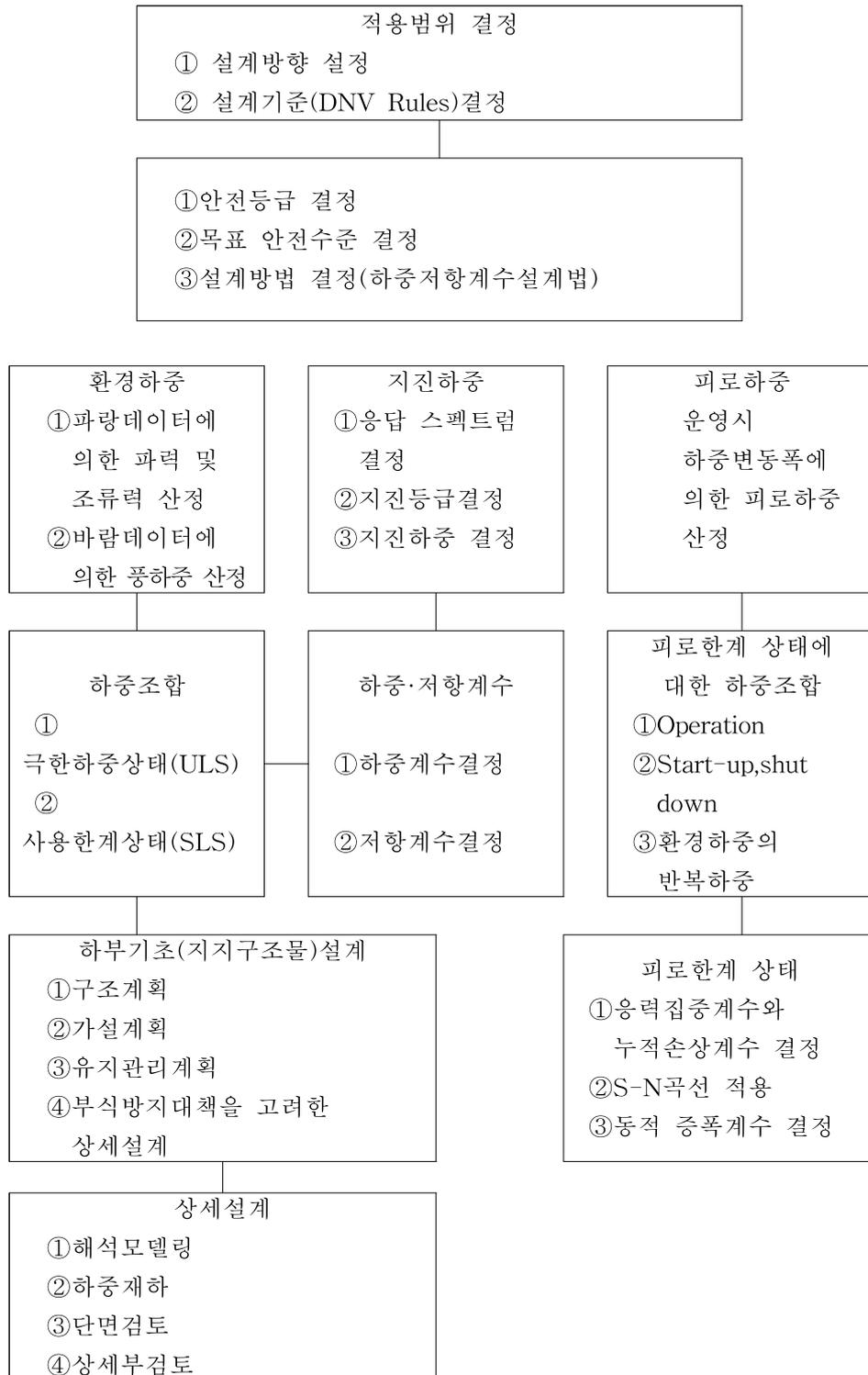
연구사례를 통해서도 알 수 있듯이 파도하중이 기초구조물에 미치는 영향은 다양한 파도섹션에 따라 상이하지만 특정한 부위에서 크게 영향을 받음을 알 수 있었으며, 파도가 직접적으로 부딪히는 기초부에서는 하중의 급격한 상승을 보여 주었다. 이러한 결과는 해상풍력 구조물이 육상풍력과 달리 해상조건에 대한 선행조사와 해석이 필수적인 과정이며, 하부 기초구조물의 경우 해상풍력발전기의 안정성에 있어 가장 중요한 부분이라는 것을 알 수 있다.

### 3.5 자켓 기초 적용성 검토

#### 3.5.1 흐름도

자켓 기초구조물 설치시 안정성·시공성·경제성 등 안전한 구조물 설계를 위한 필수단계로서 아직 국내에 명확한 기준이 규정되어 있지 않기 때문에 국외기준을 분석하여 흐름도를 이해해보았다.

Table 9. 자켓 기초설계 흐름도



### 3.5.2 설계방향

기본적으로 해상풍력발전기의 기초구조물 설계시 구조요소들은 모든 일시적이거나, 운용중이거나 손상조건에서 발생할 수 있는 하중을 견디며, 구조물의 설계수명동안 구조물의 적절한 안전을 확보하며, 사람과 주위의 사항에 대한 적절한 안전을 유지하며, 구조물의 설계수명동안 적절한 내구성을 가져야 한다.

이 밖에도 구조시스템, 시스템의 요소와 상세의 설계는 가능한 한 적절한 기계적, 물리적 그리고 화학적 손상에 대한 저항성을 가져야 하며, 제작과 가설이 적정하고 안정된 기술과 경험으로 다루어져야 하며, 점검 및 유지관리 그리고 보수가 가능하여야 한다.

### 3.5.3 안전등급과 목표안전수준

기초토목구조물의 구조적 안전은 원칙적으로 안전등급분류법(Safety class methodology)을 사용함으로써 확보된다. 설계되는 구조물은 파괴영향에 기초한 안전등급으로 분류되어지는데, 등급분류는 일반적으로 구조물의 목적에 의해서 결정된다. 이러한 등급을 해상풍력발전기에 세 가지의 안전등급으로 규정시킬 수 있는데 대입해보면 각각의 안전등급에 대해서 목표안전수준은 공칭연간파괴확률에 의해서 결정할 수 있다. 먼저 구조물의 파괴가 개인의 상해나 오염에 낮은 위험을 초래하고, 경제적 손실과 인명에 경미한 위험을 일으키는 구조물에 대해서는 낮은 안전등급(Low safety class)이 사용된다. 구조물의 파괴가 개인의 상해나 오염에 약간의 위험, 또는 약간의 사회적 손실, 또는 중대한 경제적 손실을 일으키는 구조물에 대해서는 보통 안전등급(Normal safety class)이 사용된다.

세 번째로 구조물의 파괴가 개인의 상해나 치명적인 위험의 가능성, 중대한 오염 또는 중대한 사회적 손실, 또는 매우 큰 경제적 손실을 일으키는 구조물에 대해서는 높은 안전등급(High safety class)이 사용된다.

### 3.5.4 하중 계산

#### 1) 파력 및 조류력

자켓 기초구조물과 같이 세장한 구조물에 작용하는 파랑하중을 계산하기 위해 모리슨식을 적용한다.

$$f_N(t) = \rho(1 + C_A)A\dot{v} + \frac{1}{2}\rho C_D Dv|v|$$

$v$  : 유체입자의 속도(m/s)  
 $\dot{v}$  : 유체입자의 가속도(m/sec<sup>2</sup>)  
 $D$  : 부재 직각방향의 지름(m)  
 $\rho$  : 유체 밀도(kg/m<sup>3</sup>)  
 $C_A$  : 부가질량계수( $C_A = \frac{m_a}{\rho A}$ ,  $C_M = 1 + C_A$ )  
 $m_a$  : 단위길이당 부가질량(kg/m)  
 $A$  : 직각방향의 면적(m<sup>2</sup>)  
 $C_D$  : 항력계수

Fig 10. Morrison's calculation methods

#### 2) 풍하중

풍하중에 의한 구조물의 응답은 정적응답과 고유주기 근접에 의한 동조응답의 중첩이며, 동적효과는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- 바람의 난류에 의한 동조응답
- Veritex Shedding에 의한 응답
- Galloping / Flutter

Table 10. 기본풍압

$F = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^2 C_{Dw} A$ <p> <math>F</math> : 풍력  <math>\rho</math> : 공기밀도(1.2kg/m<sup>3</sup>)  <math>C_{Dw}</math> : 형상계수(구조형식에 따라 code화 됨)  <math>A</math> : 풍압면적(m<sup>2</sup>)  <math>\bar{U}</math> : 풍속(code에 의해 선정, 해수면위 10m 상공에서 10분간 지속된 풍속)         </p>
--

### 3) 지진하중

기본적으로 해상풍력 설치시 지진하중은 응답스펙트럼 해석법이 사용될 수 있는데, 자켓형 지지구조물과 같은 경우 세장한 구조이므로 좌굴에 취약하고, 좌굴을 일으킬 수 있는 1개의 수직방향과 2개의 수평방향에 대한 스펙트럼 가속도가 고려되어야 한다.

### 4) 하중 저항계수

#### 가) 하중계수

극한한계상태에 대한 하중계수는 기본적으로

- ULS : G(1.0, 0.9), Q(1.0, 0.9), E(1.35), D(1.0)

이며, 이상시 아래와 같이 대별된다.

- ULS : G(1.0, 0.9), Q(1.0, 0.9), E(1.10), D(1.0)

G (Permanent Load, 고정하중)는 고려된 기간동안 크기, 위치 및 방향이 변하지 않는 하중, 즉, 구조물 중량, 발라스트 및 장비의 중량, 영구 자연상태에서의 내부적이고 외부적인 정수압, 접합된 타워기초 반력이다.

Q(Variable Functional Load,변동하중)은 고려된 기간 동안 크기, 위치 및 방향이 변하는 하중이며, 설치시 일반적인 운용과 사용에 관계된 것이다. 그 하중예로서 사람, 크레인작동하중, 선박충돌하중, 펜더전달하중, 설치와 관련된 하중, 다양한 발라스트와 장비 하중 및 저장된 재료,장비 및 유체압, 그리고 구명보트 하중 등을 말한다. 해양풍력발전구조물에서 작동하중, 사다리 및 플랫폼과 같은 접근구조물 하중, 운용중인 선박의 충돌하중 및 크레인 작동하중을 포함한다.

E(Environmental Load, 환경하중)은 고려된 기간동안 크기, 위치 및 방향이 변하는 하중이며, 구조물의 일반적인 운용과 사용에 관계된 것이다. 그 하중으로는 풍하중, 파랑과 해류에 의한 동수압, 지진하중, 해류하중, 조위효과, marine growth, 눈 및 얼음하중을 정의한다.

D(Deformation Load, 변위하중)은 온도하중, 설치시 변형 및 기초의 침하와 같은 변형 및 변위에 의한 하중이다.

※ 위의 환경하중 계수는 보통등급이며 높은 안전등급의 설계에서는 13%를 할증해서 적용한다.

- 피로한계상태(FLS)에 대한 하중계수는 1.0을 사용
- 사용한계상태(FLS)에 대한 하중계수는 1.0을 사용

## 나) 저항계수

극한한계상태에 대한 저항계수는 부지에 따라 다르며, NORSOK-N-004에 따라 강구조물에 대해 최소값은 1.15을 사용, 피로한계상태에 대한 저항계수는 설계피로계수에 따라 다르다.

## 3.5 설계기준 적용

### 3.5.1 자연 조건

#### 대상지역

기상조건의 활용을 위한 대상지역은 제주도 지역내 북서풍의 영향이 크게 작용하는 모슬포 해상으로 두었으며, 기초적인 자료는 풍력과업수행시 축적된 데이터를 바탕으로 두었다.

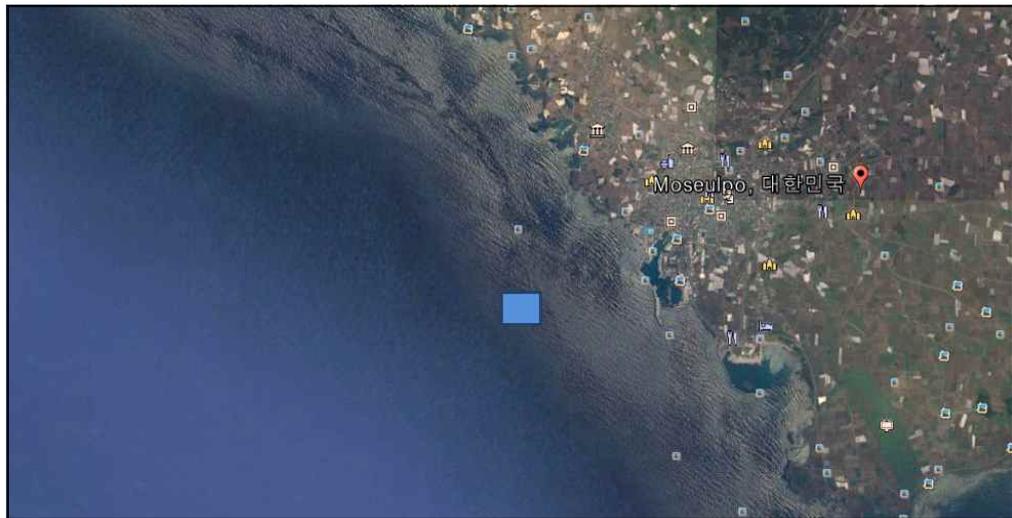


Fig 11. An area of the ocean in Jeju

#### 풍속

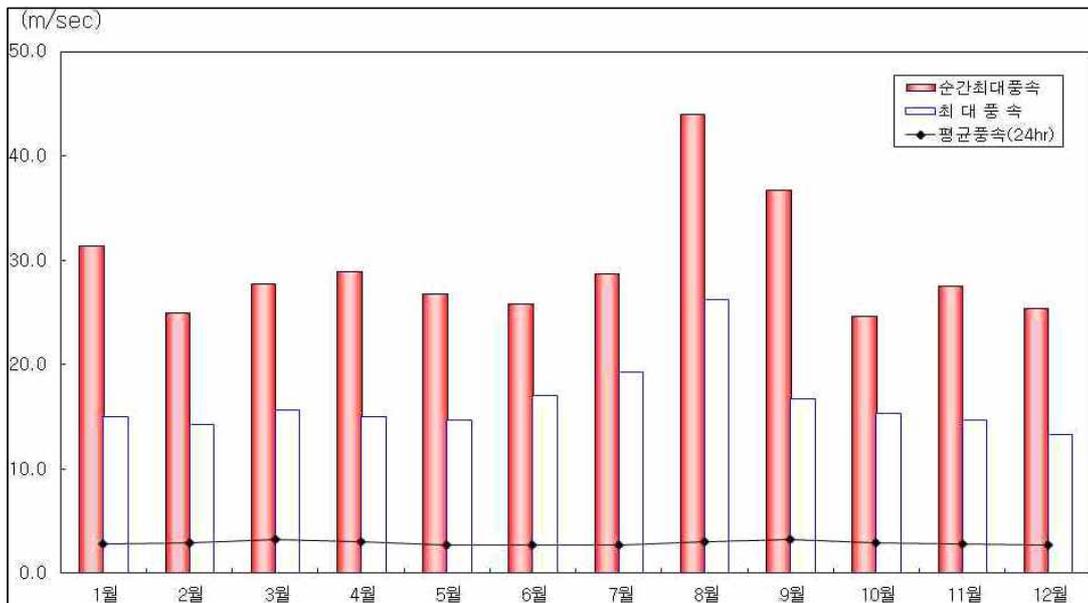
본 연구 대상지역의 연평균풍속은 2.9m/s 이며, 최대풍속은 26.2m/s로 관측되었다. 풍향별 출현빈도는 NE방향에서 가장 높고, S방향에서 가장 낮음을 알 수 있었다.

이와 같은 데이터는 기상청 통계연보를 통해서 30년 빈도분석을 한 것이다.

Table 11. 월별 풍속 수치화 (단위:m/s)

월별	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
평균풍속	2.8	2.9	3.2	3.0	2.7	2.7	2.7	3.0	3.2	2.9	2.8	2.7
최대풍속	15.0	14.3	15.7	15.0	14.7	17.0	19.3	26.2	16.7	15.3	14.7	13.3
	SW	N	ENE	NE	N	ENE	ENE	NW	NE	NE	SE	NW
순간 최대풍속	31.4	25.0	27.8	29.0	26.8	25.9	28.7	44.0	36.8	24.7	27.6	25.4
	NE	NE	ENE	NW	N	ENE	ENE	NE	NW	W	S	SE

Table 12. 월별 풍속 도식화



### 조위 및 조석

해당 구역을 대상으로 조위관측 분석결과 조석은 반일주조가 우세한 혼합조형으로 대조차는 209.0cm, 평균조차는 147.2cm, 소조차는 85.4cm로 나타났다.

Table 13. Tide level

비조화상수	조위(cm)	조위도
약최고고조위	294.0	
대조평균고조위	251.5	
평균고조위	220.6	
소조평균고조위	189.7	
평균해면	147.0	
소조평균저조위	104.3	
평균저조위	73.4	
대조평균저조위	42.5	
약최고저조위	0.0	

파랑

파랑조건외의 경우 한국해양조사원에서 추정정보고서로 제출한 개정 심해설계파를 근거로 대상 지역에 인접한 설계파를 활용하여 대입하였다.

Table 14. the wave height and cycle in 10years frequency

파향및방향		N	E	ESE	SE	S	SSW	SW	W	NW
H(m)	max	0.68	1.50	2.40	2.99	5.17	4.25	3.86	4.38	4.52
	min	2.51	3.56	4.99	5.65	7.02	5.32	4.73	5.13	6.98
	std	1.59	2.09	3.32	4.30	5.94	4.67	4.22	4.68	5.90
T(s)	max	9.96	11.91	12.45	12.30	11.18	9.84	9.16	9.85	12.29
	min	10.35	12.34	12.67	12.51	11.33	9.91	9.43	9.91	12.50
	std	10.08	12.20	12.57	12.41	11.24	9.86	9.24	9.88	12.41

10년 빈도 파랑 내습시 평균 파고는 5m 이상이 S파향에서 파랑이 나타나는 경우였으며, 최대파고는 S 파향의 파랑이 내습할 때 7.02m로 추정, 파향별 평균 파고는 1.59~5.94m, 평균 주기는 9.03~12.57sec 추정하였다.

Table 15. the wave height and cycle in 50years frequency

파향및방향		N	E	ESE	SE	S	SSW	SW	W	NW
H(m)	max	1.18	2.16	3.63	4.69	7.90	6.80	5.46	5.38	5.00
	min	3.39	4.72	7.04	7.50	10.68	8.93	7.31	6.60	7.48
	std	2.28	2.90	4.98	6.07	8.98	7.72	6.16	5.79	6.34
T(s)	max	11.28	13.82	15.56	14.54	14.00	12.54	11.25	11.05	12.50
	min	11.99	14.07	15.79	15.25	14.14	12.66	11.36	11.14	12.74
	std	11.55	13.98	15.69	14.95	14.06	12.59	11.29	11.09	12.62

50년 빈도 파랑의 내습했을 때의 평균 파고는 5m로 나타났으며, 최대파고는 S 파향의 파랑이 내습할 때 10.68m로 추정, 파향별 평균 파고는 2.28~8.98m, 평균 주기는 10.12~15.69sec로 추정하였다.

#### 유속

조류속의 경우 정확한 측정치는 없으나, 국립해양조사원에서 조사한 자료에 의하면 해역에 2.3knot의 창조류(밀물)는 북서·북북서방향으로, 낙조류(썰물)는 남동·남남동방향으로 3.3knot 흐름값을 나타냈다.

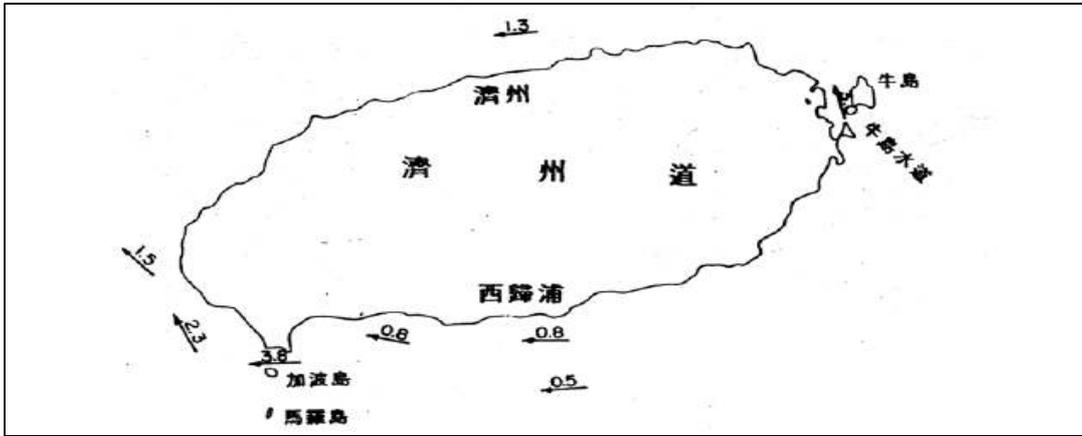


Fig 12. the flood strength

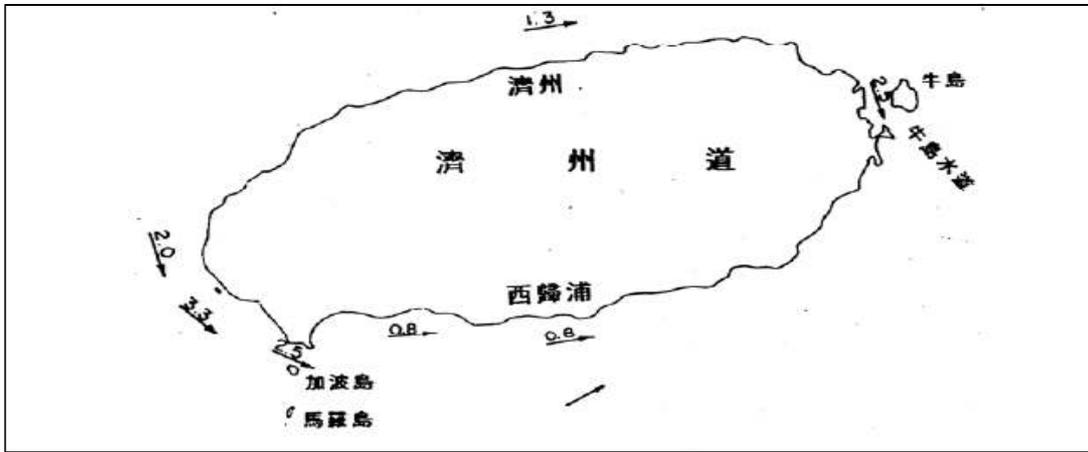


Fig 13. the eddy strength

### 3.5.2 자켓 설계개요

Table 16. 상부시설 규모

구분	규모
용량	7MW급 Offshore Wind Turbine
Rotor Diameter	171.2m
Hub Height	110.0m(M.S.L 기준)

Table 17. 하부자켓 규모

구분	DL(-) 45.0m	DL(-) 35.0m	설계기준강도(Mpa)
Pile Type	사향(1:10)	사향(1:10)	-
높이(H)	64.0m	54.0m	-
Jacket Leg	Φ2,336.80*34.93t	Φ2,336.80*34.93t	315
Joint Can	Φ2,336.80*53.98t	Φ2,336.80*57.15t	315
Jacket Pile	Φ2,844.80*38.10t	Φ2,844.80*38.10t	315
Brace	Φ762.00*25.40t	Φ762.00*25.40t	235

1) 조건

수심은 자켓별 규모에 명시한 데로 35m(dl)와 45m(dl) 두 개의 비교군으로 정하였으며, 파랑 및 풍속은 국내 설계기준을 따랐다.

항만 및 어항설계기준의 경우 제주도지역을 대상지역으로 지정하였기에 이에 따른 지역풍속을 기준으로 하였다.

Table 18. 설계파랑

구분		상시(50년)		이상시(100년)	
		0(→)	120(↖)	0(→)	120(↖)
파고	H	7.02	5.65	10.68	7.5
	Hmax	12.63	10.17	19.22	13.5
주기(s)		11.33	12.51	14.14	15.25

Table 19. 설계풍속

구분	상시		이상시	
	0(→)	120(↖)	0(→)	120(↖)
풍속(m/s)	11.9	15.8	60.0	60.0

2) 하중

고정하중의 경우 자켓 적용하중은 전산 프로그램내 자동계산에 따라 적용된 것이며, Anode 하중은 696.74kN(수심45m), 532.15kN(수심35m)을 적용하였다.

Table 20. 상부하중

구분	Load	Factor	구분	Load	Factor
Fx	2,783.30kN	1.1	Mx	316,204kN·m	1.35
Fy	3,451.50kN	1.35	My	206,149.00kN·m	1.1
Fz	14,156.00kN	1.5	Mz	29,470.00kN·m	1.1

3.5.3 자켓 설계

1) 해석모델

구조물 해석시 사용된 요소는 해석프로그램에서 제공되는 Frame 요소를 적용하였으며, Automatic Design 기능을 사용하여 구조물을 이상화하였다. 또한 구조물의 경계조건은 PSI(Pile-Soil Interaction)기능을 이용하였으며, 부재의 응력 검토는 DNV Code에서 요구하는 NORSOK Code로 검토하였다.

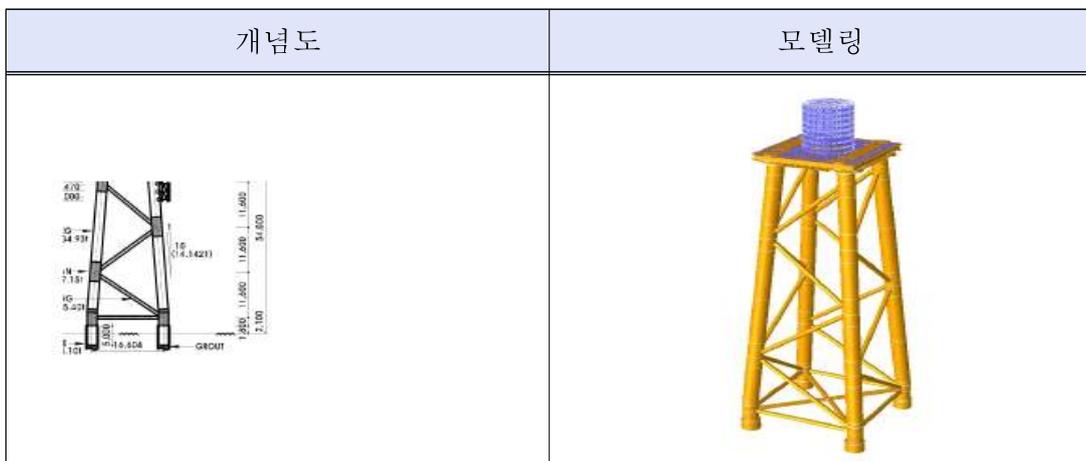


Fig 14. Modeling of Substructure in 35m depth

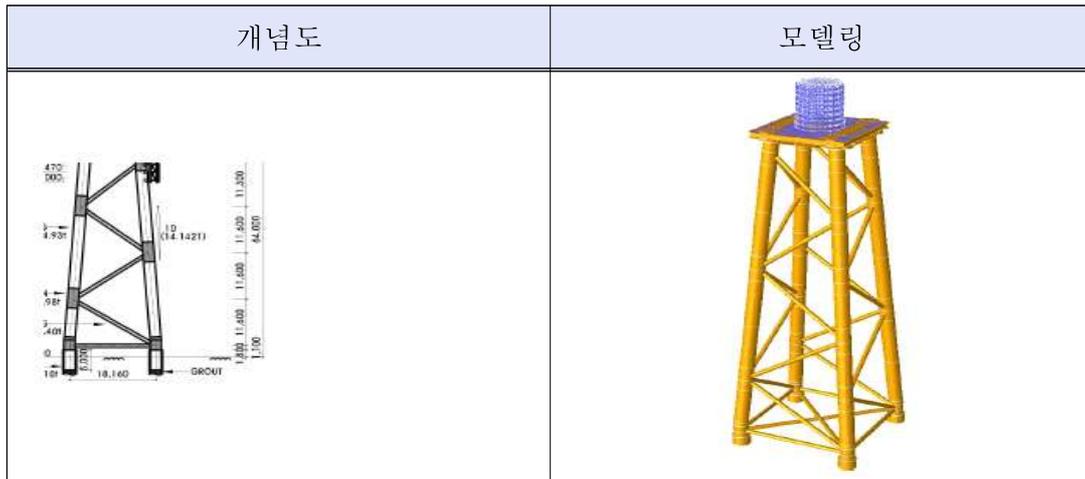


Fig 15. Modeling of Substructure in 45m depth

2) 부재설계

설계결과 요약(35m)

Table 21. 35.0m the depth of water

구분	제원	응력비	판정
Deck	plate (t=53.98,76.2mm)	0.86<1.00	OK
Jacket Leg	Φ2,336.80*34.93t	0.82<1.00	OK
Joint Can	Φ2,336.80*57.15t	0.82<1.00	OK
Jacket Pile	Φ2,844.80*38.10t	0.66<1.00	OK
Brace	Φ762.00*25.40t	0.82<1.00	OK

Table 22. 35.0m Jacket Pile

DL	Load Case	응력비	판정
(-)33.20~(-)35.00	Comb12	0.66<1.00	OK

Table 23. 35.0m Jacket Leg

DL	Load	응력비	판정
(+)15.30~(+)3.70	Comb2	0.72<1.00	OK
(+)3.70~(-)7.90	Comb11	0.75<1.00	OK
(-)7.90~(-)19.50	Comb12	0.82<1.00	OK
(-)19.50~(-)31.10	Comb12	0.75<1.00	OK

Table 24. 35.0m Joint Can

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30	Comb12	0.74<1.00	OK
(+)3.70	Comb12	0.82<1.00	OK
(-).7.90	Comb12	0.79<1.00	OK
(-)7.90	Comb12	0.72<1.00	OK
(-)31.10	Comb12	0.77<1.00	OK

Table 25. 35.0m Jacket Brace

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30~(+)3.70	Comb2	0.52<1.00	OK
(+)3.70~(-)7.90	Comb12	0.68<1.00	OK
(-)7.90~(-)19.50	Comb12	0.64<1.00	OK
(-)19.50~(-)31.10	Comb12	0.82<1.00	OK

Table 26. 35.0m Deck

Thickness	Load Case	응력비	판정
53.98t	Comb12	0.84<1.00	OK
76.20t	Comb5	0.86<1.00	OK

Table 27. 35.0m displacement

구분	최대변위	허용 변위	판정
지진시	127.64mm	360.00mm	OK

설계결과 요약(45m)

Table 28. 45.0m the depth of water

구분	제원	응력비	판정
Deck	plate (t=53.98,76.2mm)	0.88<1.00	OK
Jacket Leg	Φ2,336.60*34.93t	0.80<1.00	OK
Joint Can	Φ2,336.80*53.98t	0.83<1.00	OK
Jacket Pile	Φ2,844.80*38.10t	0.62<1.00	OK
Brace	Φ762.00*25.40t	0.69<1.00	OK

Table 29. 45.0m Jacket Pile

DL	Load Case	응력비	판정
(-)43.20~(-)45.10	Comb12	0.62<1.00	OK

Table 30. 45.0m Jacket Leg

DL	Load	응력비	판정
(+)15.30~(+)4.00	Comb11	0.72<1.00	OK
(+)4.00~(-)7.30	Comb21	0.73<1.00	OK
(-)7.30~(-)18.90	Comb21	0.73<1.00	OK
(-)18.90~(-)30.50	Comb12	0.80<1.00	OK
(-)30.50~(-)42.10	Comb12	0.80<1.00	OK

Table 31. 45.0m Joint Can

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30	Comb11	0.80<1.00	OK
(+)4.00	Comb12	0.59<1.00	OK
(-)7.30	Comb12	0.83<1.00	OK
(-)18.90	Comb12	0.80<1.00	OK
(-)30.50	Comb12	0.65<1.00	OK
(-)42.10	Comb12	0.79<1.00	OK

Table 32. 45.0m Jacket Brace

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30~(+)4.00	Comb2	0.44<1.00	OK
(+)4.00~(-)7.30	Comb6	0.49<1.00	OK
(-)7.30~(-)18.90	Comb21	0.69<1.00	OK
(-)18.90~(-)30.50	Comb12	0.58<1.00	OK
(-)30.50~(-)42.10	Comb12	0.68<1.00	OK

Table 33. 45.0m Deck

Thickness	Load Case	응력비	판정
53.98t	Comb5	0.85<1.00	OK
76.20t	Comb5	0.88<1.00	OK

Table 34. 45.0m displacement

구분	최대변위	허용 변위	판정
지진시	157.33mm	426.67mm	OK

3) 안정검토

35.0m depth of water

Table 35. 변위검토

구분	최대변위	허용 변위	판정
변위검토	86.58mm	360.00mm	OK

Table 36. 지지력 검토

구분	작용력(kN)	허용력지지력(kN)	판정
지지력 검토	41,560.80	84,943.28	OK

45.0m depth of water

Table 37. 변위검토

구분	최대변위	허용변위	판정
변위검토	114.52mm	426.67mm	OK

Table 38. 지지력 검토

구분	작용력(kN)	허용력지지력(kN)	판정
지지력 검토	42,010.55	84,943.28	OK

4) 지진시 검토

Table 39. 응력비 검토 요약(35.0m)

구분		응력비	판정
Deck		0.87<1.00	OK
Jacket Leg	Φ2,336.80*34.93t	0.78<1.00	OK
Joint Can	Φ2,336.80*57.15t	0.82<1.00	OK
Jacket Pile	Φ2,844.80*38.10t	0.50<1.00	OK
Brace	Φ762.00*25.40t	0.56<1.00	OK

Table 40. Jacket Pile (35.0m)

DL	Load Case	응력비	판정
(-)33.20~(-)35.00	Comb21	0.50<1.00	OK

Table 41. Jacket Leg(35.0m)

DL	Load	응력비	판정
(+)15.30~(+)3.70	Comb21	0.75<1.00	OK
(+)3.70~(-)7.90	Comb21	0.74<1.00	OK
(-)7.90~(-)19.50	Comb21	0.78<1.00	OK
(-)19.50~(-)31.10	Comb21	0.73<1.00	OK

Table 42. Joint Can(35.0m)

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30	Comb21	0.82<1.00	OK
(+)3.70	Comb21	0.78<1.00	OK
(-).7.90	Comb21	0.63<1.00	OK
(-)7.90	Comb21	0.64<1.00	OK
(-)31.10	Comb21	0.56<1.00	OK

Table 43. Jacket Brace(35.0m)

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30~(+)3.70	Comb22	0.52<1.00	OK
(+)3.70~(-)7.90	Comb21	0.48<1.00	OK
(-)7.90~(-)19.50	Comb23	0.42<1.00	OK
(-)19.50~(-)31.10	Comb21	0.56<1.00	OK

Table 44. Deck(35.0m)

Thickness	Load Case	응력비	판정
53.98t	Comb23	0.85<1.00	OK
76.20t	Comb22	0.87<1.00	OK

Table 45. 응력비 검토 요약(45.0m)

구분		응력비	판정
Deck		0.88<1.00	OK
Jacket Leg	Φ2,336.80*34.93t	0.75<1.00	OK
Joint Can	Φ2,336.80*53.98t	0.74<1.00	OK
Jacket Pile	Φ2,844.80*38.10t	0.49<1.00	OK
Brace	Φ762.00*25.40t	0.54<1.00	OK

Table 46. Jacket Pile(45.0m)

DL	Load Case	응력비	판정
(-)30.50~(-)42.10	Comb21	0.49<1.00	OK

Table 47. Jacket Leg(45.0m)

DL	Load	응력비	판정
(+)15.30~(+)4.00	Comb21	0.74<1.00	OK
(+)4.00~(-)7.30	Comb21	0.73<1.00	OK
(-)7.30~(-)18.90	Comb21	0.75<1.00	OK
(-)18.90~(-)30.50	Comb21	0.75<1.00	OK
(-)30.50~(-)42.10	Comb21	0.74<1.00	OK

Table 48. Joint Can(45.0m)

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30	Comb21	0.74<1.00	OK
(+)4.00	Comb21	0.55<1.00	OK
(-)7.30	Comb21	0.72<1.00	OK
(-)18.90	Comb21	0.68<1.00	OK
(-)30.50	Comb21	0.62<1.00	OK
(-)42.10	Comb21	0.62<1.00	OK

Table 49. Jacket Brace(45.0m)

DL	Load Case	응력비	판정
(+)15.30~(+)4.00	Comb21	0.42<1.00	OK
(+)4.00~(-)7.30	Comb23	0.43<1.00	OK
(-)7.30~(-)18.90	Comb21	0.48<1.00	OK
(-)18.90~(-)30.50	Comb21	0.42<1.00	OK
(-)30.50~(-)42.10	Comb21	0.54<1.00	OK

Table 50. Deck(45.0m)

Thickness	Load Case	응력비	판정
53.98t	Comb22	0.86<1.00	OK
76.20t	Comb21	0.88<1.00	OK

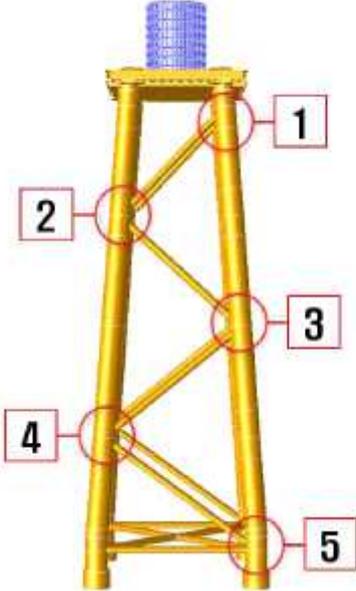
5) 피로해석

반복적으로 순환되는 파랑하중에 의하여 반복적인 하중을 받는 해상 Jacket 구조물 용접 연결점에 대한 피로 내구성을 적용·분석하였다.

Table 51. data of the wave(35.0m)

구분	방향	H(m)	T(s)	횟수
1	0(→)	1.00	5.00	13.335
2	120(↖)	1.00	5.00	13.335
3	0(→)	1.25	7.00	16.292
4	120(↖)	1.25	7.00	16.292
5	0(→)	1.50	6.00	17.277
6	120(↖)	1.50	6.00	17.277

Table 52. results of the analysis(35.0m)

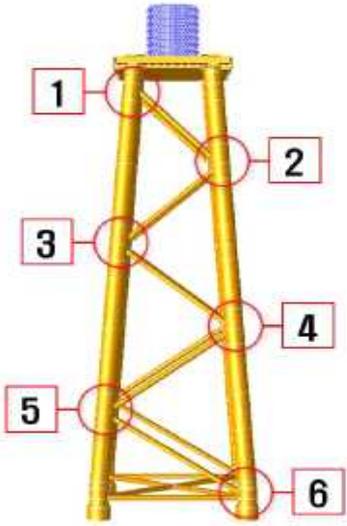
검토위치	구분	Damage Factor	판정
	1	$0.112 \times 10^{-5} < 1.0$	OK
	2	$0.238 \times 10^{-2} < 1.0$	OK
	3	0.039 < 1.0	OK
	4	0.060 < 1.0	OK
	5	$0.034 < 1.0$	OK

마찬가지로 반복적으로 순환되는 과랑하중에 의한 반복적인 하중을 받는 해상 Jacket 구조물 용접 연결점에 대한 피로 내구성을 적용·분석하였다.

Table 53. data of the wave(45.0m)

구분	방향	H(m)	T(s)	횟수
1	0(→)	1.00	5.00	13.335
2	120(↖)	1.00	5.00	13.335
3	0(→)	1.25	7.00	16.292
4	120(↖)	1.25	7.00	16.292
5	0(→)	1.50	6.00	17.277
6	120(↖)	1.50	6.00	17.277

Table 54. results of the analysis(45.0m)

검토위치	구분	Damage Factor	판정
	1	$0.548 \times 10^{-5} < 1.0$	OK
	2	$0.309 \times 10^{-2} < 1.0$	OK
	3	0.052 < 1.0	OK
	4	0.166 < 1.0	OK
	5	0.150 < 1.0	OK
	6	0.118 < 1.0	OK

### III. 결론

#### 1. 해상풍력발전 하부구조 형식별 적용성 검토

자켓(Jacket)식을 포함한 4가지 형식의 기초하부구조에 대하여 현장에 대한 적용성·구조안전성 등에 대한 이론적, 사례조사 내용을 감안하여 비교분석 해보았다.

모노파일(Monopile) 형식의 경우 대용량 및 대수심 구간에서 대입시 공진문제 해결이 어렵고, 설치시 기하급수적인 비용증가가 있을 수 있으며, 트라이포드(Tripod) 형식은 다양한 조건이 본 연구과제인 자켓형 기초구조물의 조건과 동일하게 적용 해석되나, 규모가 커질수록 구조물의 강재량이 증가하여 적용성이 떨어짐을 알 수 있었다.

중력(Gravity) 형식의 경우 규모 및 수심의 깊이 등 외부적 요인이 크지 않을 시 자켓(Jacket)식 구조물과 큰 차이가 없었으나, 규모가 커질수록 트라이포드(Tripod) 형식과 유사한 점을 들어 적용성이 낮았다.

4-Leg 특성상 해수면 위로 경관상의 아쉬운 부분이 다소 있으나, 해양산업에서의 풍부한 경험을 갖춘 자켓(Jacket) 식 기초구조물의 경우 국내 해상조건에 크게 부합됨은 해석프로그래밍 결과값을 통해서도 알 수 있었으며, 이 외에 석유시추작업 등 해양시공경험이 풍부한 점은 향후 해상풍력 기초구조물 설치시 크게 유리하게 작용할 것으로 판단되었다.

#### 2. 국내 설계 기준 확립 필요

1) 해상풍력발전 기초구조물 설계시 적용기준이 되는 DNV-OS-J101 및 GLIV-2 등 국제규격들은 사실상 국내 기술설계 대입시 상이한 점들이 있었다. 기본적으로 한계상태에 대한 적용의 유무가 검토의 필요성이 시급함을 알 수 있었고, 이 외에도 유럽 선진지 해상풍력단지는 해양조건상 국내와 다른 점들이 있기 때문에 동일하게 적용 해석함은 무리가 있어보였다.

2) 보다 안정적인 기초토목설계를 위해서는 해양토목의 기초가 되는 “항만 및 어항설계기준 2005” 및 해외 “API code” 등 국내의 설계규격서를 종합적으로 비교분석하여 현실적인 대책안을 수립하여야 할 것이다.

### 3. 해상풍력 기초구조물의 연구분석 결과

자켓형 기초구조물의 적용성 검토를 위해 해양구조물 전용 해석 프로그램을 통한 기본설계의 단계적 접근을 해 보았는데, 먼저 자켓 기초구조물은 부재응력비는 다소 높지만 변위검토에서는 안정적인 판단결과가 나타났으며, 해당지역내 적합한 기초구조물 형식이 자켓식 구조물임을 입증해 보였다.

피로에 대한 해석 또한 두가지 수심대역에서 손실요소는 전체적으로 허용값대비 안정적인 결과값을 도출하였으며, 크게 다루지는 않았지만, 수심대별 Jacket pile의 차이는 변위조건을 충족하기 위해서는 이와 부합하게 증가되어야 함을 알 수 있었다. 즉 강재량이 그만큼 증가되어야 할 것이다.

지진시 두 조건에서 응력비·변위는 허용값을 밑돌아 상시 낮음을 알 수 있었다. 대상지역의 수심대역별로 35m 구간에서의 강재량의 증가된 점은 경제성의 면에서 불리함을 입증한 결과이며, 이는 해상풍력 설치시 지반조건에 따른 경제성은 크게 차이가 있을 수 있음을 알 수 있었다.

그리고 실제 자켓 구조물 설치시 해상풍력단지임을 감안하면 필수적으로 단지 배치 및 계통연계 최소화 방안도 면밀한 검토가 필요하기 때문에 기초구조물의 구조적인 해석 뿐만아니라 경제적인 측면도 고려시 다양한 접근이 필요함을 연구를 통해 알 수 있었다.

끝으로, 해상풍력 자켓기초구조물은 기본적으로 암반 및 진흙 혹은 모래등 다양한 해양지반조건이 존재하기 때문에 동일한 설계조건으로 해석할 수 없기 때문에 각각의 조건에 적합한 설계는 추가 연구를 통해 검토가 필요하다고 판단되며, 아울러 자켓 기초구조물의 설계 해석시 가장 중요한 요소인 안전성은 대상지역이 해양이고, 불규칙적인 해양환경등의 영향이 불가피하기 때문에 해양조건 수립시 보다 현장에 적합한 해양 및 기상 환경조건을 대입하여 구조물의 안정성 및 경제성에 대한 분석을 해야 될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] Bloomberg New Energy Finance/League Table Results Book(2011)
- [2] Kriegers Flak Offshore Wind Farm, Jacket and Monopile Foundation Study 2008-2009(Ramboll)
- [3] 김지영, 강금석, 오기용, 이준신, 장문석(2009). “국내 해역의 해상풍력 개발 가능량 평가.” 한국신·재생에너지학회 2009 춘계학술발표회.
- [4] 한국전력공사 전력연구원(2009). 국내해상풍력 적정부지 선정 예비평가 보고서.
- [5] Eerens, H. (2008). “Wind Energy Potential in Europe 2020-2030 : Methodology.” Wo가 Programme 2008, Netherlands Environmental Assessment Agency.
- [6] Snyder, M, Kaiser, M.j. (2009). “A comparison of offshore wind power development in Europe and the US: Patterns and drivers of development.” Applied Energy, Vol. 86, pp. 1845~1856.
- [7] Linus Hammar, Sandra Andersson and Rutger Rosenberg, “Adapting offshore wind power foundations to local environment.
- [8] LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구, 한국건설기술연구원, 2008
- [9] 국제설계기준(ISO 2394)과 한계상태설계법, 윤길립, 박준권, 제48권 제2호 2000년
- [10] 국내외 구조물기초의 한계상태설계 동향, 박재현, 김동욱, 광기석, 대한토목학회지
- [11] Ali M. (2010) Feasibility study of offshore wind turbine installation in Iran compared with the world, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14.
- [12] 2010 Market Report (2010) Offshore Wind in Europe, Energy & Natural Resources, KPMG
- [13] Diana Greenslade, 2010, “Surface wave”, The Centre for Australian Weather and Climate Research
- [14] Det Norske Veritas, 2007, Offshore standard DNV-OSJ101.
- [15] 전해역 심해설계과 추정보고서 II, 한국해양조사원, 2005

- [16] 국·내외 풍력기초관련 설계기준, 신윤섭, 2009
- [17] 해양수산부(2005), 항만 및 어항설계기준
- [18] DNV-OS-J101(2010), Design of offshore wind turbine structures
- [19] DNV-OS-C101(2004), Design of offshore steel structures, general(lrfd method)
- [20] DNV-RP-C203(2007), Environmental conditions and environmental loads
- [21] API RP 2A-WSD(2000), Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design, API RP 2A-WSD, 21st edition.
- [22] API RP 2A-LRFD(2003), Recommended Practice for planning, designing and constructing fixed offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design.

## 감사의 글

제주대학교에서 산업대학원생 신분으로 회사내 역무와 상통하는 풍력관련 수업을 들을 수 있었던 것은 저 개인적으로는 큰 기회이자, 도전이었습니다. 사실 직장인의 신분으로 학업을 병행하는 것에 걱정스러운 부분이 많아 기회가 왔을 때 많은 망설임이 있었습니다. 하지만 풍력업무를 하면서 이론적인 지식을 함양한다는 기회는 쉽게 찾아오지 않을 것이라는 생각이 들었고, 무엇보다 그러한 기회·지원을 해주신 남부발전과 그러한 과정을 이끌어준 제주대 풍력공학과가 있었기에 이 자리까지 올 수 있었으며, 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 우여곡절이 있었지만 과제수행에 있어 보다 전문적인 연구를 요하는 논문준비를 하는 동안 많은 가르침과 지도를 주신 이병걸 교수님께 감사를 드리며, 부족한 석사학위논문에 대해 함께 심사 및 지도해주신 허종철교수님과 고경남교수님께도 이 자리를 빌어 감사의 말씀드립니다.

어떤 점에서는 일반대학원생에 비해 무리가 없을 듯 보였던 커리큘럼이었지만 막상 학기가 시작되고 진행되면서 직장생활을 마치고 야간수업을 참여하는 것은 가볍게 생각한 저에게는 힘든 여정과도 같았습니다. 정규시간에 지각할때면 학업생분들과 교수님께 매번 죄송한 마음으로 시간을 보내갔었고, 그런 시간이 반복되면서 체력적으로나 업무강도면에서 우위에 있을 회사 선배님들께 부족한 모습을 보여주는 것 같아 스스로에게는 부끄러운 시간들이었던 것 같습니다. 그렇지만 너무도 감사하게 학기를 이수하는 과정 중에 담당교수님들과 회사 선배님들 특히 담당차장님이신 이준원차장님의 지원과 격려가 큰 힘이 되었기에 무사히 정규학기를 마칠 수 있었던 것 같습니다.

학기의 마무리와도 같은 논문작업이 주변사람들의 관심과 지도가 없었다면 저 혼자 힘으로는 절대 이를 수 없는 과정이라는 것은 형언할 수는 없지만, 이렇게 글로서나마 감사한 마음을 대신 전해드리는 것에 대해 송구스럽게 생각하며, 다시 한번 논문 제출을 마치는데, 지도해주신 지도교수님과 회사동료분들께 깊은 감사드리고, 앞으로도 직장에서건 삶에서건 정진해 나갈 수 있도록 큰 가르침을 갖고 겸손한 마음으로 본연의 위치에서 최선을 다하도록 하겠습니다.

감사합니다.

2014. 6

이 상 규