

<기술노트>

## 해상 풍력발전기 기초의 안전율에 관한 설계기준 분석 연구

### Comparison of Design Strands for Safety Factor of Offshore Wind Turbine Foundation

장화섭\* · 김호선\*\* · 이경우\*\*\* · 김만응\*\*\*\*

Jang, Hwa Sup · Kim, Ho Sun · Lee, Kyoung Woo · Kim, Mann Eung

#### Abstract

This study is carried out to analyze the design method and safety rate degree for IEC 61400-3, DNV-OS-J101, GL Wind, EUROCODE, AASHTO and domestic design standard used for offshore wind turbine foundation design. The findings will provide a design parameter for domestic offshore wind turbine foundation design. The design of the steel Support Structure of an offshore wind turbine can be based on either the Allowable Stress Design(ASD) approach or the Load and Resistance Factor Design(LRFD) approach. The design principles with the use of LRFD method are described with various limit states. A limit state is a condition beyond which a structure or part of a structure exceeds a specified design requirement. Design by the LRFD method is a design method by which the target component safety level is obtained by applying load and resistance factors to characteristic reference values of loads (load effects) and structural resistance. When the strength design of the steel Support Structure is based on the ASD approach, the design acceptance criteria are to be expressed in terms of appropriate basic allowable stresses in accordance with the requirements specified. After comparison an economics domestic offshore wind turbine foundation standard will be developed.

**Keywords** : offshore wind turbine, foundation, design standard, safety factor

#### 요 지

본 연구는 해상풍력발전기 기초 설계에 사용되는 IEC 61400-3, DNV-OS-J101, GL Wind, EUROCODE, AASHTO 및 국내 설계기준의 설계방법 및 안전율의 정도를 비교, 분석함으로써, 국내에서 해상풍력발전기 기초 설계시 필요한 제반사항을 제공하고자 한다. 해상풍력발전기 기초 설계에 관한 국내외 설계기준을 분석한 결과 설계법은 크게 설계접근법, 하중저항 설계법, 허용응력설계법을 적용하고 있으며, 각 설계법에 따른 안전율 정도를 분석한 결과 하중저항계수 설계법과 설계접근법은 거의 유사한 수준의 안전율을 확보하고 있는 반면, 허용응력설계법에서는 다소 보수적인 안전율을 적용하고 있어 해상풍력발전기 기초의 경제적 설계를 위한 국내 설계기준 개발이 필요할 것으로 판단된다.

**핵심어** : 해상풍력, 기초, 설계기준, 안전율

#### 1. 서 론

인류의 지속가능한 성장과 지구 온실가스 문제 해결을 위해 다양한 신재생에너지 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그중에서도 풍력발전은 가장 경제성이 높고 공급비중이 가장 빠르게 증가하고 있는 에너지원이다. 이러한, 풍력발전의 최근 경향은 대형화, 대규모화, 해상풍력 이렇게 3가지로 분류할 수 있다. 최근에 바람이 우수하고 소음이나 경관의 문제가 비교적 없는 해상풍력발전 단지의 개발이 크게 늘고 있으며 이를 위해 해상 풍력 발전용 초대형 풍력발전 시스템의 개발 및 설치가 늘어나고 있다.

해상 풍력발전기는 육상 풍력발전기와 달리 수중 기초 구조물 및 지반 설계에 따른 시공비용이 전체 금액의 약 30~40% 정도를 차지하고 있어 이 분야의 안전성 확보는 물론 비용 절감을 위해서는 최적의 기초설계 기준이 필요한 실정이다. 그러나, 해상 풍력발전기 설계와 관련된 국제 설계기준인 IEC(International Electro Technical Commission) 기준에서도 해상 풍력발전기 기초 설계에 관한 기준이 명확하지 않으며 단지 국제적으로 통용되는 기준으로 설계하도록 권장하고 있다. 또한, 국내에서는 해상 풍력발전기 기초에 관한 설계기준이 전무한 상황에서 어느 설계기준을 적용하느냐에 따라 해상 풍력발전기 기초의 설계 내하력(Load-

\*정회원 · 교신저자 · (사)한국선급 녹색산업기술원 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : janghs@krs.co.kr)

\*\* (사)한국선급 녹색산업기술원 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : kimhs@krs.co.kr)

\*\*\* (사)한국선급 녹색산업기술원 팀장 · 공학박사 (E-mail : kwolee@krs.co.kr)

\*\*\*\* 정회원 · (사)한국선급 신성장산업본부 본부장 · 공학박사 (E-mail : mekim@krs.co.kr)

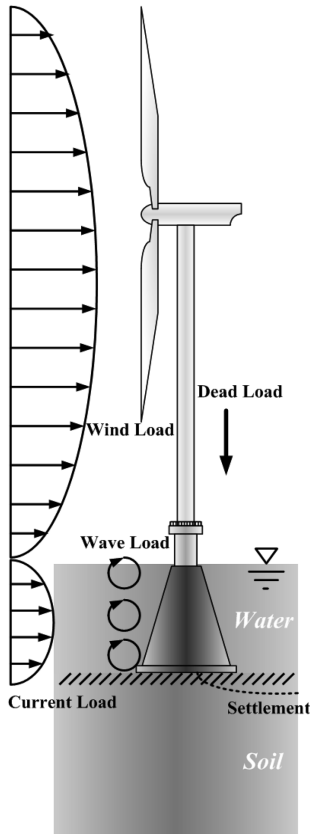


그림 1. 해상풍력발전기 개념도

bearing Capacity)에 큰 차이가 발생된다.

국제적으로 해상 풍력발전기 기초 설계에 사용되는 설계기준으로는 IEC 61400-3, DNV-OS-J101, GL Wind가 이용되며, 이 기준들은 모두 하중저항계수 설계법(LRFD)을 적용하고 있어, 국내 설계기준과 차별화 되어 있다.

따라서, 본 연구에서는 해상 풍력발전기 기초의 안전성을 확보하기 위한 안전율의 정도를 국제적으로 인정된 설계기준인 IEC 61400-3, DNV-OS-J101, GL Wind, EUROCODE, AASHTO와 국내 설계기준을 비교함으로써, 향후 국내 해상 풍력발전기 설계에 필요한 제반사항을 제공하고자 한다. 본 연구에서 선정한 EUROCODE와 AASHTO 설계 기준은 해상 풍력발전기 기초 설계를 위한 전용 설계기준은 아니지만, 토목 분야에서 이미 검증된 설계기준으로서 해상 풍력발전기 기초 설계에 적용 가능할 것으로 판단되어 함께 비교, 분석하였으며, 그림 1은 대략적인 해상풍력발전기의 개념도를 나타내었다.

## 2. 국내외 설계기준 분석

### 2.1 IEC 61400-3

풍력과 관련된 IEC 설계 기준은 아래와 같으며, 이 중 해상 풍력발전기 기초 설계와 관련된 기준은 IEC 61400-3으로서 설계법은 하중저항계수 설계법(LRFD)을 적용하고 있다. 또한, IEC 61400-3에서는 해상 풍력발전기 구조물의 안전 등급을 크게 2가지 범주로 구분하고 있으며, 설계에서는 Normal safety class에 해당하는 기준을 적용하고 있다.

IEC 61400-3에서는 해상 풍력발전기 기초의 안전성을 검토하기 위한 저항계수(Resistance Factor)에 대한 기준을 따

로 제시하고 있지 않으며, 국제적으로 인정된 값을 사용하도록 권장하고 있다. 다만, 타워의 경우 재료에 대한 부분안전계수(Partial Safety Factors for Materials)값과 파괴의 중요도에 따른 부분안전계수(Partial Safety Factors for Consequences of Failure) 값은 IEC 61400-1에서 제시된 값을 사용하도록 권장하고 있다.

### 2.2 DNV-OS-J101

DNV-OS-J101에서는 해상 풍력발전기의 안전등급을 크게 3가지로 구분하고 있으며, 설계방법 역시 LRFD를 적용하고 있다. 해상 풍력발전기 기초의 경우 Normal safety class로 설계하도록 권장하고 있다.

만약, High safety class로 설계할 경우 Normal safety class에서 환경하중에 대한 하중계수를 13%로 증가시킨다. 기초의 안전성을 검토하기 위한 저항계수는 대표적으로  $\gamma_M = 1.25$ 를 제시하고 있다.

### 2.3 GL Wind

GL Wind 설계기준의 경우에도 Safety class에 대한 기준은 IEC 61400-3과 동일하게 Normal safety class와 Special safety class 2가지로 제시하고 있다. 그러나, 하중계수는 IEC 61400-3과 다소 차이를 두고 있는데 IEC 61400-3 설계기준의 Normal 값을 GL Wind 설계 기준에서는 Extreme 값으로 제시하고 있다. GL Wind 설계 기준의 경우 독일 선급의 특성에 맞게 대부분의 기준을 EUROCODE에 기반을 두고 있으며, 특이한 사항으로는 GL Wind 설계 기준에서는 설계법을 LRFD를 적용하고 있는데 반해 EUROCODE에서는 지반 설계 정수에 개별적인 부분안전계수들을 적용하는 설계접근법(Design approach)을 제시하고 있다. 또한, GL Wind에서는 구조부재(콘크리트, 강재)의 지지력에 대한 부분안전계수는 EUROCODE 또는 API-LRFD 값을 사용할 것을 권장하고 있다.

API-LRFD 설계 기준에서 Pile 기초에 대한 저항 계수 값을 극한 환경조건일 경우에는 0.8, 운전중 일 경우에 0.7 값의 사용을 권장하고 있으며, 중력식 기초에 대한 기준은 현재 전무하다.

### 2.4 EUROCODE

EUROCODE의 경우는 해상 풍력발전기 기초를 위한 전용 설계 기준은 아니지만, 해상 풍력발전기 개발 및 실용화의 선두가 유럽시장임에 대부분의 해상 풍력발전기 기초의 설계에 EUROCODE가 적용된다. EUROCODE의 경우에는 앞서 설명한 바와 같이 LRFD가 아닌 설계접근법(Design approach)을 적용하고 있다. EUROCODE는 강도확인을 위해 하중 및 재료계수 접근법, 하중 및 저항계수 접근법을 선호하는 나라마다의 차이점을 수용하기 위해 각 국가가 국가 부록을 통해 관할구역 내에서 사용해야 하는 3가지 접근법 중 하나 또는 그 이상을 선택할 수 있도록 하는 방법이다.

EUROCODE에서 설계접근법 1의 원리는 2가지 단계로 기초의 신뢰도를 체크하고 있다. Combination 1에서는 부분 계수가 하중에만 적용되며, 지반강도 및 저항력에는 계수가

적용되지 않는다. Combination 2에서는 부분계수가 지반강도와 변동하중에 적용되는 반면, 영구하중과 저항력에는 계수를 적용하지 않는다. 설계접근법 2의 원리는 하중 또는 하중효과와 저항력에는 동시에 부분계수를 적용하는 반면 지반강도에는 적용하지 않음으로써 기초의 신뢰도를 확인한다. 설계접근법 3의 원리는 구조하중과 재료특성에는 동시에 부분계수를 적용하는 반면 지반하중과 저항력에는 주로 계수를 적용하지 않음으로써 기초의 신뢰도를 확인한다.

### 2.5 AASHTO

AASHTO LRFD Bridge Design Specification의 경우 해상 풍력발전기 기초의 설계를 위한 설계 기준은 아니지만 일반적으로 교량 건설에 사용되는 범용적인 설계 기준이다. AASHTO 설계 기준의 경우 이미 수많은 교량 건설 실적으로 검증된 설계 기준으로서 해상 풍력발전기 기초 설계에 적용 가능하다.

### 2.6 국내기준

해상 풍력발전기 기초 설계와 관련된 국내 설계 기준은 현재 전무하다. 단, (사)한국선급에서 해상용 풍력발전 시스템의 기술 기준을 개발하였으나, 현재까지는 범용적으로 사용되고 있지 않은 상황이다. 국내에 해상 풍력발전기 기초 설계를 위해 참고할 수 있는 범용적인 설계기준으로서는 구조물 기초 설계기준 및 항만 및 어항설계기준이다. 국내 설계 기준의 경우 해외의 경우와 달리 하중 및 지반의 지지력의 불확실성을 모두 고려하여 하나의 안전율을 적용하는 허용응력설계법을 적용하고 있으며 LRFD로의 변환을 추진하고 있는 실정이다.

앞서 설명한 바와 같이 해상 풍력발전기 기초 설계와 관련된 설계기준은 대부분 인준기관에서 제시된 기준으로서 국제적 범용 기술 기준의 최소요구조건 수준으로 이를 종합적으로 분석하면 아래 표 1과 같다.

## 3. 안전율 분석

해상 풍력발전기 기초 설계를 위한 국내외 관련 설계 기준의 안전율 정도를 파악하기 위하여 해상 풍력발전기에 작용하는 대표적인 하중인 자중, 풍하중, 파랑, 조류, 추력, 침하, 온도 하중을 토대로 검토하였으며, LRFD의 안전율 수

준은 다음 식 (1)로 추정하였다.

$$FS_{LRFD} = \gamma / \phi \quad (1)$$

여기서,  $\gamma$  : 평균하중계수,  $\phi$  : 저항계수

해상 풍력발전기 기초 중 항타에 의해 시공되는 Monopile 기초를 예로 선정하여 검토하였다.

### 3.1 IEC 61400-3에 의한 안전율 분석

IEC 61400-3에 의한 하중조합 및 하중계수는 다음과 같다. 최대하중계수는 1.35로서 선형적 조합을 토대로 저항계수는 타위의 재료에 사용되는 안전계수를 사용하였으며, 파괴의 중요도는 Component class 2를 적용하였다. 검토결과 IEC 61400-3 코드에 의한 해상풍력발전기 기초의 안전율 정도는 1.755로 분석 되었다.

$$COMB = 1.35 \times (\text{Dead Load} + \text{Wind} + \text{Wave} + \text{Current} + \text{Thrust} + \text{Settlement} + \text{Temperature})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.35}{1.3 \times 1.0} = 1.755$$

### 3.2 DNV-OS-J101에 의한 안전율 분석

DNV-OS-J101에서 하중조합 아래 식과 같으며, 최대하중계수는 1.35, 평균 하중계수는 1.20이다. 따라서, DNV-OS-J101에 의한 안전율은 1.50으로 분석되었다.

$$COMB = 1.0 \times \text{Dead Load} + 1.35 \times (\text{Wind} + \text{Wave} + \text{Current} + \text{Thrust}) + 1.0 \times (\text{Settlement} + \text{Temperature})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.20}{1.25} = 1.50$$

### 3.3 GL Wind에 의한 안전율 분석

GL Wind에 의한 하중조합은 IEC 61400-3과 동일하나, 저항계수는 API-LRFD 값을 적용하여 안전율을 계산한 결과 1.6875, 1.9285로 분석되었다.

$$COMB = 1.35 \times (\text{Dead Load} + \text{Wind} + \text{Wave} + \text{Current} + \text{Thrust} + \text{Settlement} + \text{Temperature})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.35}{0.7} = 1.9285$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.35}{0.8} = 1.6875$$

표 1. 해상 풍력발전기 기초 설계기준 분석

구분	국내기준		해외기준					
	구조물 기초 설계기준(2009)	항만 및 어항 설계기준(2005)	IEC 61400-3 (2008)	API Code (1993, 2000)	DNV-OS-J101(2007)	GL Wind (2005)	EUROCODE 7 (2009)	AASHTO (2010)
용도	토목/건축구조물 설계서	항만시설 설계서	해상 풍력발전기 설계서	해상 구조물 설계서	해상 풍력발전기 설계서	해상 풍력발전기 설계서	토목/건축 구조물 설계서	토목/건축 구조물 설계서
해석방법	허용응력	허용응력	하중저항계수	허용응력 하중저항계수	하중저항계수	하중저항계수	하중저항계수	하중저항계수
한계상태	-	-	ULS/SLS	ULS/SLS	ULS/SLS	ULS/SLS	ULS/SLS	ULS/SLS
하중계수	-	-	상세	상세	상세	상세	상세	상세
저항계수	-	-	-	0.8/0.7	1.25	API, EURO	상세	상세
안전율	3.0/2.5	2.5/2.0	-	-	-	-	-	-

표 2. 각 설계기준에 따른 안전율 비교

구분						
IEC 61400-3	DNV-OS-J101	GL wind	EUROCODE	AASHTO	구조물 기초 설계기준	항만 및 어항설계기준
1.7550	1.5000	1.6875, 1.9285	1.4786, 1.6343	3.1143, 4.3600, 2.7250 2.1800, 2.4222	3.0000	2.5000

3.4 EUROCODE에 의한 안전율 분석

EUROCODE에 의한 하중조합은 3개의 설계접근법 중 설계접근법 1을 적용하여 분석한 결과 안전율은 1.4786, 1.6343으로 분석되었다. 안전율 1.4786 값은 본 연구에서 검토한 설계 기준에서 가장 낮은 값이다.

$$COMB1=1.35 \times \text{Dead Load} + 1.50 \times (\text{Wind} + \text{Wave} + \text{Current} + \text{Thrust} + \text{Settlement} + \text{Temperature})$$

$$COMB2=1.0 \times \text{Dead Load} + 1.30 \times (\text{Wind} + \text{Wave} + \text{Current} + \text{Thrust} + \text{Settlement} + \text{Temperature})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.4786}{1.0} = 1.4786$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.2571}{\frac{1}{1.3}} = 1.6343$$

3.5 AASHTO에 의한 안전율 분석

AASHTO의 경우 Wind Load가 적용된 한계상태는 Strength 3(풍속 55 MPH 이상)과 Strength 5(풍속 55 MPH) 기준이며, 본 연구에서는 일반적인 조건을 적용하고자 Strength 5를 적용하였다. 저항계수는 각 조건에 해당되는 값을 모두 적용하여 분석하였으며, 2.18~4.36으로 분석되었다.

$$COMB=1.25 \times \text{Dead Load} + 1.4 \times \text{Wind} + 1.0 \times (\text{Wave} + \text{Current} + \text{Thrust} + \text{Settlement} + \text{Temperature})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.09}{0.35} = 3.1143 \quad (\alpha\text{-method})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.09}{0.25} = 4.3600 \quad (\beta\text{-method})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.09}{0.4} = 2.7250 \quad (\lambda\text{-method})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.09}{0.50} = 2.1800 \quad (\text{CPT-method})$$

$$SF_{LRFD} = \frac{1.09}{0.45} = 2.4222 \quad (\text{End bearing in rock})$$

4. 결 론

해상 풍력발전기 기초 설계에 관한 국내외 설계기준을 분석한 결과 설계법은 크게 설계접근법, 하중저항설계법, 허용응력설계법으로 구분할 수 있다. 각 설계법에 따른 안전율 정도를 분석한 결과 하중저항계수 설계법과 설계접근법은 거

의 유사한 수준을 나타내고 있으나, 허용응력설계법에서는 다소 보수적인 설계가 됨을 알 수 있다.

따라서, 해상 풍력발전기 기초 설계에서 하중저항계수 설계법은 하중 및 저항 특성을 고려하여 해상 풍력발전기 기초의 신뢰도 수준을 일정하게 할 수 있다는 점에서 허용응력 설계법에 비하여 합리적이라고 할 수 있다. 그러나, 현재 국내에서는 일관된 안전율을 적용한 허용응력 설계법을 적용하고 있어, 타 해외 설계 기준과 비교해 볼 때 경제성이 떨어질 수 있으므로 국내 실정에 맞는 해상 풍력발전기 기초 설계기준 개발이 시급하다. 특히, 우리나라와 같은 아시아태평양 지역의 경우 태풍을 포함한 열대성 저기압, 낙뢰, 지진 등의 환경 하중에 대한 영향이 큰 지역이므로 이에 대한 설계 능력 및 설계기준의 확보가 필요하다.

본 연구는 우리나라 최초의 해상풍력 발전기 기초 설계에 대한 설계법 정립이라는 초석을 마련하는데 그 의의를 찾을 수 있으며, 향후 구체적인 설계기준을 마련하기 위해 인증기관 및 관련 전문가들의 업무 협의 및 연구개발이 지속적으로 수행될 필요성이 있다.

참고문헌

국토해양부(2009) 구조물 기초 설계기준 해설.  
 송승호, 정병창(2010) 해상으로 가는 풍력발전, 전기의 세계, 대한전기학회, Vol. 59, No. 5, pp. 47-54.  
 (사)한국선급(2008) 풍력발전 시스템의 기술 기준.  
 (사)한국선급(2011) 해상용 풍력발전 시스템의 기술 기준.  
 해양수산부(2005) 항만 및 어항 설계기준.  
 AASHTO(2007) LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATION.  
 API-LRFD(1993) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms.  
 API-WSD(2002) Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms.  
 DNV-OS-J101(2007) Design of Offshore Wind Turbine Structure.  
 EUROCODE 7 : Geotechnical design- Part 1: General rules.  
 GL wind(2005) Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbine.  
 IEC 61400-3 Part 3, Design requirements for offshore wind turbine.  
 IEC 61400-22 Part 22, Conformity testing and certification of wind turbines.

(접수일: 2011.9.19/심사일: 2011.11.8/심사완료일: 2012.1.12)