

허용응력설계법 및 하중저항계수설계법에 의한 고정식 해양구조물 설계결과 비교

정배근¹, 조두용^{2*}

Design comparison of Fixed Offshore Structures Designed by WSD and LRFD Methods

Bae-Keun Jeong¹, Doo-Yong Cho^{2*}

Abstract: When designing fixed jacket structures, overseas design standards are applied due to the absence of domestic design methods. Although the US API standards are mainly applied, API RP 2A suggests two design methods: the allowable stress design method (WSD) and the load resistance coefficient method (LRFD), and is applied according to the designer's judgment. In this study, the stress ratio of the two design methods was reviewed and compared using SACS, an analysis program dedicated to marine structures, for fixed marine structures actually installed on the domestic coast. As a result of the review, it was found that the LRFD design method showed a greater stress ratio for extreme load analysis and transportation analysis, and the WSD design method showed a greater stress ratio for loading and lifting. Therefore, when applying the design method, it is considered appropriate to select the final design method considering safety and economic feasibility after conducting an applicability review for the two design methods.

Keywords: Jacket structure, Structural analysis, Design criteria, Allowable stress design method (WSD), Load resistance coefficient design method (LRFD)

1. 서 론

고정식 자켓구조물은 천해영역의 해양플랜트 구조에 적용되는 대표적인 하부지구조물 중의 하나이며, 국내외 시장 동향을 봤을 때 해양플랜트와 해상풍력시장의 확대로 고정식 해양구조물의 수요는 증가할 것으로 예상하고 있다. 국내에서는 자켓 구조형식을 적용하여 해상과학기지, 기상탑 등의 구조물에 설치된 사례가 있다. 하지만, 해양구조물에 관한 설계 기준은 국내기준이 없어 일반적으로 해외의 기준을 적용하고 있으며, 대표적인 설계기준으로는 API(American Petroleum Institute)에서 제시하는 설계기준이 있으며 국내에서는 해양과학기지에 적용된 자켓구조물 설계기준으로 적용되었다. API에서는 석유개발을 위한 유전사업과 관련한 해양산업 부분에서 고정식 구조물과 부유식 구조물을 포함하여 500여 가지가 넘는 분야에 대한 설계기준 및 가이드라인을 제시하고 있으며, API는 1969년 처음으로 해양구조물 중 고정식 구조물에 대한 실무 가이드라인을 제시한 이후 지속적으로 변화

하는 산업분야의 요구와 산업발전에 따른 필요성을 충족시키기 위해 다양한 분야에서 실질적인 설계기준을 확장하고, 세분화하고 있다. 따라서, API Recommended Practice 2A(이하 API RP 2A)는 허용응력설계법(WSD)과 하중저항계수법(LRFD)의 설계기준을 제시하고 있으며, 최근 자켓 구조물 설계 시에는 LRFD설계법이 세계적인 추세라는 이유로 적용되고 있다. 그러나 국내 환경하중에 대한 평가가 없는 사항에서 맹목적인 적용은 구조물 안전성에 위협이 될 수 있다.

Ferguson(1990)이 수행한 설계방법에 대한 연구에서는 구조물의 자중이 지배할 경우 허용응력설계법이, 파랑, 지진 하중과 같이 환경하중이 지배할 경우에는 LRFD설계법이 더 보수적으로 평가하는 것으로 확인하였다.

Jang et al.(2012)는 제주도 구좌읍 월정리 해안가 해상풍력 발전 단지 내의 해상환경 설계조건을 이용하여 3MW급 타워기둥과 하부구조물 자켓에 대하여 상용프로그램인 ANSYS를 이용하여 정적해석을 수행하였다. 하중 조건 중의 최대응력은 허용응력 값 이내에서 만족하였다.

Sun et al.(2014)는 5MW급 해상풍력 하부구조물과 관련하여 구조물의 설계방법을 제시하고 구조 안전성을 고찰하였다. 하부 자켓구조물의 구조 안전성 평가 기준은 American Institute of Steel Construction(이하 AISC) 9th WSD를 근간으로 적용하였고 설계안은 극한하중 조건에서 허용기준을 모두

¹정희원, 충남대학교 융복합시스템공학과 박사과정 수료

²정희원, 충남대학교 융복합시스템공학과 교수

*Corresponding author: dooyongcho@cnu.ac.kr

Dept. of Convergence System Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 6월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

만족하였다.

Lee et al.(2017)는 서남해안을 대상으로 국내용 해상풍력 지지구조물 설계기준을 적용하여 자켓 하부구조물 설계를 진행하였다. 사용된 설계기준은 한국선급과 DNVGL, IEC와 비교하였으며 한국선급 기준이 다소 보수적인 평가 결과를 도출하였다. 차이가 발생하는 원인으로는 하중계수와 저항계수의 차이에 기인하며 그 차이는 크지 않음을 알 수 있었다.

하지만, 선행연구들은 주로 LRFD설계기준을 유럽기준 등과 비교하거나 WSD방법으로 구조검토를 수행하고 있으며, 국내 환경하중에 대한 연구가 수행되지 않아 국내에서 API설계 기준 적용 시 설계법에 대한 판단기준을 제시하지 못하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 세계적으로 통용될 뿐만 아니라 국내 해양플랜트 구조물 설계 시 주로 적용되고 있는 API의 설계기준을 준용하여 국내 환경조건인 서남해 연안에 설치된 자켓구조물에 대해 구조해석을 실시하였고 LRFD와 WSD에 따른 해석결과를 비교하여 설계자가 설계방법 선택 시 가이드라인을 제공하고자 한다.

2. 설계방법의 이론적 배경

국내외에서 널리 적용되고 있는 설계기준인 API RP 2A의 허용응력 설계법(WSD)과 하중저항계수 설계법(LRFD)의 개념적 차이는 아래와 같다.

2.1 허용응력설계법(WSD)

허용응력설계법은 현재까지 강구조물의 설계법으로 계속 사용되어온 설계법으로 그 기본적인 개념은 강구조물의 부재 응력-변형곡선이 Hooke의 법칙에 따른다는 것을 전제로 한다. 이 법칙에 따라 계산되는 각종 하중에 의해 강재에 작용하는 응력의 합계(f)가 Table 1에 대응하는 허용응력 f_a 이하가 되도록 각 부재 단면을 설계하는 것이다. 이를 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$f \leq f_a \quad (1)$$

여기서, f : 발생응력, f_a : 허용응력

Table 1 Allowable stress of steel

Item	Force Type	Allowable Stress	Safety Factor
f_a	Tensile(Bending)	$f_a = f_y / SF_{ten}$	According to Condition and Loading
	Compression	$f_a = f_y / SF_{com}$	
	Flexural-Compression	$f_a = f_y / SF_{fc}$	
τ_a	Shear	$\tau_a = f_y / (SF \sqrt{3})$	

한편, 구조물은 강도적으로 튼튼하더라도 강성이 부족하여 처짐이 너무 크면 허용한계를 넘거나 진동하기 쉬운 구조물이 되어 사용상의 지장을 초래할 수도 있다. 따라서, 처짐에 대해서도 허용되는 한계 즉, 처짐의 허용량을 설정하여 그 이하가 되는 것을 검토하도록 설계기준에서는 명기하고 있다. 하지만, 허용응력설계법에서는 하중의 가변성에 있어 많은 문제점을 보여주고 있는데 즉, 안전율이 단지 구조물의 저항 값에만 적용되고 있으며 여러 종류의 하중들의 다양한 불확실성을 전혀 고려하지 않고 모든 하중을 동일하게 취급하고 안전율의 선택이 구조물의 위험에 대한 정량적인 측정에 의하지 않고 단지 경험과 판단에 의해서 결정된다는 점이다.

2.2 하중저항계수 설계법(LRFD)

하중저항 계수설계법은 지난 1986년에 미국의 AISC에서 채택한 새로운 설계법으로 지난 1980년대 초 이래로 유럽이나 캐나다 등에서 발전된 한계상태설계법(LSD)과 유사하며 구조 신뢰성 이론에 기초한 일종의 확률론적 한계상태 설계법이다. LRFD설계법에서는 하중 및 저항 관련 안전 계수인 설계 안전율의 결정을 종래의 허용응력설계법에서와 같이 주로 오랜 기간의 경험에 의존하여 결정하지 않고, 하중과 저항에 관련된 모든 불확실성을 확률 통계적으로 처리하는 구조 신뢰성이론에 기초하여 결정한다. 따라서, 일관성있는 적정 수준의 안전율을 확보할 수 있어 구조물의 신뢰도를 높일 수 있는 보다 합리적이고 새로운 설계법이다. 그러나, API RP 2A LRFD는 1993년 초판 출시 후 2019년 2번째 개정판 하고 API RP 2A WSD는 2014년 22번째 개정판을 출시하여 꾸준히 보완하고 있으며, 국내외에서도 LRFD보다는 WSD를 널리 적용하고 있는 실정이다. 또한, Table 2에서와 같이 유럽에서 고정식 자켓구조물의 설계기준으로 자주 적용되는 DNV-LRFD(2008)와의 파괴확률을 비교해도 API RP 2A의 파괴확률의 약 40배정도 큼을 알 수 있어 LRFD설계법이 세계적인 추세이지만 무조건적인 반영은 구조물의 안전성에 큰 문제를 야기시킬 수 있을 것이다.

3. 설계방법에 따른 구조거동평가

3.1 하중계수 및 허용응력계수

설계방법별 하중계수는 Table 3에, 안전계수 및 저항계수는 Table 4와 같다.

Table 2 Probability of failure

Item	API RP 2A	DNV
Probability of Failure	$4 \times 10^{-4} (\beta=3.35)$	$1 \times 10^{-5} (\beta=4.25)$

Table 3 Load factor

Item	Load Case	Load factor		
		Dead Load	Live Load	Environment Load
API RP 2A WSD	Operating	1.0	1.0	1.0
	Ultimate	1.0	1.0	1.0
	Fatigue	1.0	1.0	1.0
	Earthquake	1.0	1.0	1.0
API RP 2A LRFD	Operating	1.3	1.5	1.2
	Ultimate	1.1	1.1	1.35
	Fatigue	1.0	1.0	1.0
	Earthquake	1.1	1.1	0.9

Table 4 Safety and resistance factor

Item	Safety and resistance factor
API RP 2A WSD	SF = 1.67
	$f_a = f_y / SF$ SF = 1.25(Increase 1/3)
	$f_a = Allow$ $f_y = Yield$ -
API RP 2A LRFD	SF = 1.7(Increase 2/3)
	$f_r = \psi \times f_y$ $\psi = 0.95$ (Tension & Bending) $\psi = 0.85$ (Compression) $\psi = 0.95$ (Shear)

Table 5 Allowable stress factor

Analysis case	Allowable stress factor
In-Place Operating	1.00
In-Place Extreme Storm	1.33
Load-out(Transporter)	1.00
Transportation	1.33
Lifting	1.00

허용응력설계법(WSD)를 사용할 경우, API-RP WSD 3.3.5 규정을 반영하여 Table 5와 같이 허용응력계수(Allowable Stress Factor)를 적용하였다.

3.2 구조해석 모델 및 해석조건

3.2.1 구조해석 모델

본 연구에서의 대상 구조물은 현재 서남해 인근에 설치된 하부 구조물로 형식은 고정식 자켓 구조물이다. 자켓 형식은 4개의 Main말뚝에 의하여 지지되는 형식으로 상부에 작용하는 하중 및 천해역의 수심 등을 고려하여 직항식 자켓 구조형식을 적용하였다.

고정식 자켓 구조물의 구조해석은 말뚝과 구조물의 상호작용과 3차원적인 구조해석을 수행하기 위하여 미국의

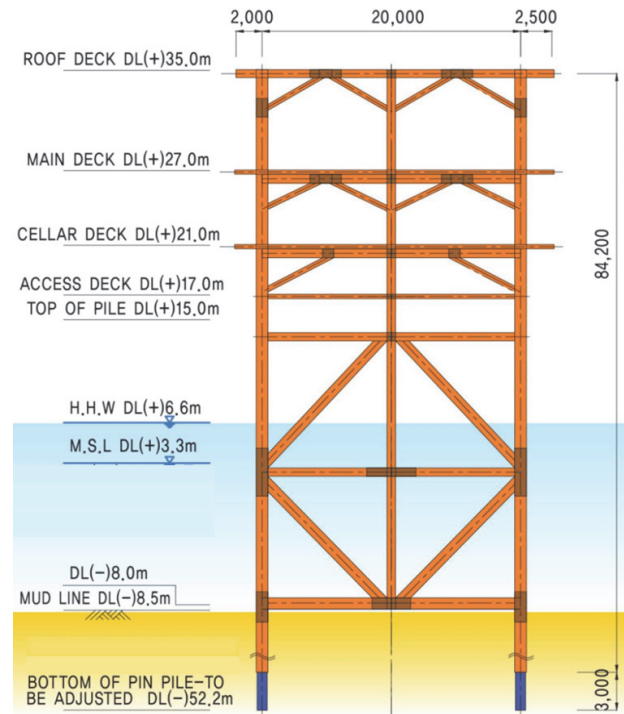


Fig. 1 Jacket vertical framing

EDI사가 해양 구조물의 해석용으로 개발한 SACS(Structural Analysis Computer System)을 이용하였고 부재단면의 응력 및 지점반력, 부재 접합부 응력해석 등을 검토하였다.

해석 시 적용된 기본제원은 Fig. 1에서 보여주고 있으며 적용된 강재는 API에서 제시하는 강재등급인 미국재료시험협회(ASTM)의 규격이므로 API에서 제시한 등급의 동등 이상의 강도 및 강성을 가진 한국표준(KS) 강재를 설계에 적용할 수 있다.

3.2.2 구조해석 조건

고정식 해상구조물의 설계과정은 설계기준을 확정된 후 정역학적 안정해석을 수행하여 부재의 형상과 크기를 정하고 그 이후 지진해석과 설치해석을 통한 상세설계를 진행하였다.

1) 정역학적 안정성 검토

정역학적 안정성 해석이란 해양구조물이 설치되어 운영되고 있는 상태에서 환경하중에 대한 자켓구조물의 안전성을 검토하는 해석이다. 따라서, 자켓뿐만 아니라 상부구조와 말뚝의 해석이 동시에 수행되어야 하며 이 수행결과를 바탕으로 API RP 2A WSD와 LRFD 기준에 따라 부재를 설계하였다. 환경하중은 정상시조건(Operating Condition)과 극한시조건(Ultimate Condition)에 대하여 각각 수행하였으며 정상시조건과 극한시 조건은 풍하중, 파랑하중 등 환경하중에 대한 재현빈도를 고려하여 정상시 조건은 1년 재현빈도를, 극한시

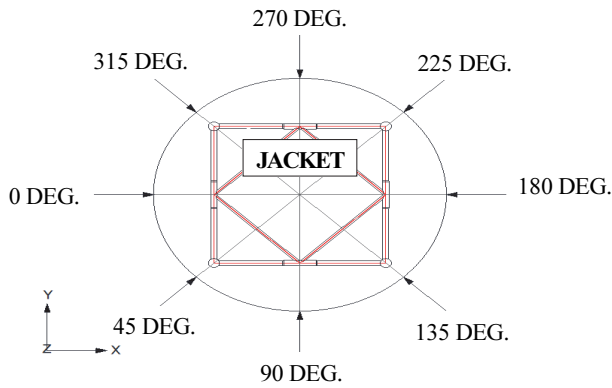


Fig. 2 Direction of environmental loading

Table 6 Average wind speed by recurrence period

Recurrence Period (year)	Duration (min)	Average Wind velocity (m/s)
1.0		23.10
100.0	1.0	52.21

Table 7 Design wave height and period

Recurrence Period(year)	Wave height (m)	Period (sec)
1.0	9.24	10.16
100.0	11.63	11.98

조건은 100년 재현빈도를 적용하였다. 파랑하중은 Fig. 2와 같이 45°씩 8방향에 대해 하중을 재하하며 각 방향에 대하여 같은 크기의 최대 파랑과 최대 풍속을 적용하였다.

Table 6 과 7은 각각 자켓구조물이 설치된 위치의 재현빈도 별 풍속과 설계파고이다.

바람은 시간과 높이에 따라 변하므로 풍속 평균시간과 기준높이가 정해져야 한다. API에서 기준높이는 해수면으로부터 10m, 평균시간은 1분을 적용하고 있다.

설계파고는 설치지점의 해저 지형조건을 고려한 천해역 파랑변형 수치해석을 1년, 100년의 빈도별로 실시하여 추정된 천해파랑 결과를 구조물 설계파고로 적용하였다.

Table 8에서는 해석대상 구조물의 적용된 하중을 정리하여 보여주고 있으며, Table 9은 정적해석의 세부적인 하중조건을 설명하고 있다.

2) 지진 안정성 검토

고정식 해양 구조물과 같은 수중 구조물에 설계지진과 설계파가 동시에 발생할 확률은 매우 작으므로 지진해석 시 파랑의 작용을 무시한다. 주위의 유체에 대한 구조물의 상대속

Table 8 Applied load

Load	Value
Dead	1,820tonf (Self-weight and equipment load etc. is automatic calculated from Program)
Wave	$H_{max} = 11.52m$ (Application of 100-year period numerical model results)
Current	$V = 1.337m/s$ (Apply 30-days observation data)
Wind	$V_{10} = 48.15m/s$ (Application of the 10-minute average extreme wind speed value of the 100-years period)
Earthquake	$A_g : 0.224g$ (Applied of Seismic class I in KOREA)
Fatigue	Statistical analysis of annual wave data for 25 years (20years of life cycle with 5years of installation & disassembly)
Impact	320GT Vessel(Investigation data)

Table 9 Static analysis load combination and their conditions

Case	Conditions
LC #1	Dead load(surcharge of 5% jacket, 10% deck)
LC #2	Utility load(Stair, Padeye, Handrail etc.)
LC #3	Self-weight(Building etc.)
LC #4	Equipment load(Electrical, mechanical etc.)
LC #5	Live load
LC #11~18	1-year cycle environmental load during Operating
LC #31~38	100-years cycle environmental load during storm

도가 충분히 작아서 유동의 관성력 영향을 부가질량(Added Mass)으로 포함하고, 점성력의 영향은 감쇠계수를 적절히 증가시켜 구조물이 대기 중에 있는 것으로 간주하여 해석하였다(Kim et al., 2016).

본 자켓구조물의 내진설계는 API RP 2A의 Dynamic Response Procedure를 따르며 응답스펙트럼은 국내 지진재해도를 반영한 항만 및 어항설계 기준을 적용하였다. 항만 및 어항 설계기준의 내진 설계규정은 UBC97의 기준을 참조하여 작성되었다.

지진에 대한 동역학적 해석은 응답스펙트럼 방법을, 모드 응답합성에는 CQC(Complete Quadratic Combination)법을 적용하고, 방향별 응답합성에는 합성된 가속도 스펙트럼을 부재의 x, y, z방향별로 각각 100%, 100%, 50%를 동시에 적용하여 응력을 계산하였으며 구조물의 진동특성을 해석할 때 감쇠계수는 API RP 2A에 따라 해양구조물에 대하여 5%를 적용하였다.

Table 10은 적용된 지표지반의 응답스펙트럼을 보여주고 있다.

Table 10 Applied ground acceleration

Item	Value	Standard Response Spectrum
Earthquake factor	C_a	0.16
	C_v	0.23
Control cycle	T_s	0.575
	T_o	0.115

3) 설치안전성 검토

자켓 구조물은 사용중의 운영하중과 극한하중 모두에 대하여 구조적으로 적합하여야 할 뿐만 아니라 설치과정 중에도 안전해야 한다. 따라서, 설치 중 안전성 확보를 위해 선적, 운송, 인양 중에 대한 구조해석을 수행하여야 한다.

(1) 선적해석

선적(Loadout)이란, 현장에서 제작된 자켓과 데크를 바지(Barge)에 옮겨 놓는 작업을 말한다. 선적작업에는 크게 양중(Lifting), Skidding System, 운반차(SPMT 또는 Transporter) System이 있으며, 본 과업에서는 현장여건 등을 고려하여 SPMT방식을 선택하였다. SPMT(Self Propelled Modular Transporter)방식은 SPMT가 능동적으로 적재된 구조물의 높낮이를 맞추므로써 기초의 처짐이나 바지의 처짐 상태를 SPMT가 흡수하게 되며 SPMT의 축수를 증가시켜 5000tonf 이상의 구조물도 선적할 수 있게 된다. Fig. 3은 SPMT를 이용한 선적작업을 보여주고 있다.

(2) 운송해석

운송(Transportation)해석은 Fig. 4와 같이 구조물을 바지(Barge)에 선적(Loadout)시킨 후에 제작 장소로부터 설치장소까지 운송 중 발생하는 관성하중에 대한 구조물의 안정성을 검토하는 해석이다. 파도나 바람 등의 환경하중이 운송 중 관성하중을 발생시키므로 운송해석에서는 환경하중을 고려하였다. 운송해석의 해석을 위한 모델링은 선적해석과 동일한 모델링을 사용하고 운송해석 시 바지에 구조물을 고박하므로 회전지점 조건만 설정하였다. 구조물의 자중과 기타 부속물 하중에 대해 구조물의 무게 중심과 바지의 평형수 채움 조건을 고려하여 선적위치를 선정하였다. 해석시 정적(Static) 상태에서의 자중과 운송 바지(Barge)의 운동에 의해 발생하는 관성력을 분리하여 산정한 후 이를 선형조합하는 방법으로 운송해석을 수행하였다.

(3) 인양해석

인양(Lifting)해석은 해상에서 바지(Barge)로 운송된 구조물(Deck & Jacket)을 들어 올리는 상태에서의 안전성과 부재

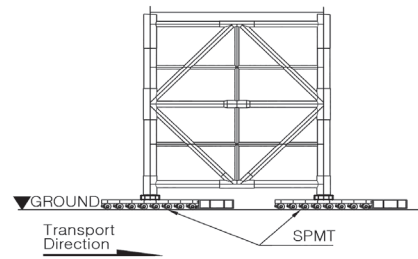


Fig. 3 Loadout by SPMT

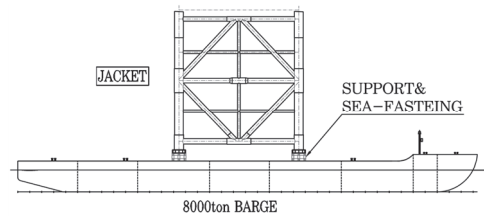


Fig. 4 Transportation using barge

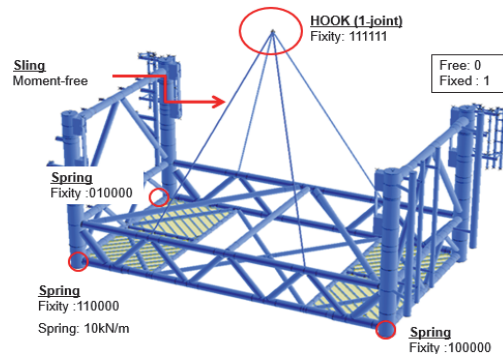


Fig. 5 Analysis conditions for lifting state

가 받는 응력을 검토하게 된다. 일반적으로 인양작업은 환경조건이 설치에 양호한 상태에서 진행하므로 해석 시 풍하중의 영향이 경미하므로 해석 시 고려하지 않는다. 인양해석에 사용하는 데크(Deck)와 자켓(Jacket) 모델은 정역학적 안전성 해석(Inplace Analysis)에 사용된 모델을 해석 조건에 맞게 수정하여 사용하고, 인양 시 작용하는 하중 조건에 대한 구조물의 안전성을 검토하였다. 또한, Fig. 5와 같이 인양해석에서는 구조물에 스프링의 힘을 가하여 구조물의 강제운동(Rigid Body Motion)을 방지한다. 구조물의 자중과 기타 부속물 하중에 대해 구조물의 무게중심을 산정하고, 수직선상에 Hook Point를 만들어 구조물이 회전하지 않도록 하였다. Sling각도는 API 적용 규정에 따라, 최소 60°로 하였다.

3.3 해석결과 검토

3.3.1 정역학적 안정성 해석

고정식 해상구조물의 정역학적 안정성 해석은 평시운전조

Table 11 Unity check for operating condition

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Boat landing	0.63	0.85
Pile	0.51	0.73
Jacket leg	0.42	0.58
Jacket brace	0.41	0.54
Top side	0.77	0.84

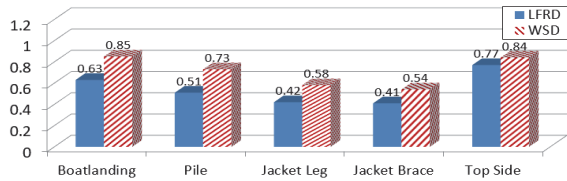


Fig. 6 Comparison of U.C in operation condition

Table 12 Unity check for ultimate condition

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Boat landing	0.88	0.82
Pile	0.89	0.89
Jacket leg	0.66	0.67
Jacket brace	0.83	0.71
Top side	0.63	0.64

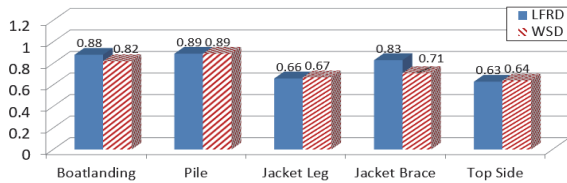


Fig.7 Comparison of U.C in ultimate condition

Table 13 Unity check for earthquake condition

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Boat landing	0.22	0.22
Pile	0.61	0.66
Jacket leg	0.48	0.52
Jacket brace	0.53	0.52
Top side	0.78	0.60

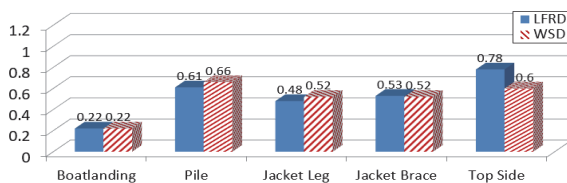


Fig. 8 Comparison of U.C in earthquake condition

건(1년 재현빈도 하중)과 극한운전조건(100년 재현빈도 하중)에 대하여 각각 수행하였다. Table 11과 Fig. 6은 평시조건 시 각 주요부재에서 발생한 응력비를 나타내며 허용응력비의 약 85%이하로 모두 안전하며 LRFD와 WSD의 해석방법 비교결과 WSD에서 높은 응력비를 보여주고 있다. 여기서 응력비는 허용응력 대비 발생응력이다.

Table 12과 Fig. 7은 극한조건 시 각 주요부재에서의 응력비를 보여주고 있다. 극한조건에서 응력비가 89%이하로 모두 만족하였으며 말뚝을 제외한 모든 부재에서 LRFD가 WSD보다 높은 응력비를 보여주고 있다.

3.3.2 동적해석

Table 13과 Fig. 8은 지진 시 각 주요부재에서의 응력비를 보여주고 있다. 지진 시 응력비는 78% 이내로 모두 만족하였으며 Top Side를 제외한 모든 부재에서 LRFD와 WSD가 비슷한 응력비를 보여주고 있다. 지표면에서 상대적으로 높고 있어 지진하중에 의한 영향이 큰 Top Side 부재의 경우, LRFD가 높은 응력비를 보여주고 있어 자켓구조물의 높이가 높을수록 LRFD 설계기준이 보수적인 결과를 보일 것으로 예측할 수 있다.

3.3.3 설치해석

Table 14~19와 Fig. 9~14은 설치해석 시 각 주요부재에서의 응력비를 보여주고 있으며 설치 시 하부 자켓구조물과 상부데크 구조물이 따로 선적, 운송, 인양 되므로 나누어 검토하였다. 설치 전 부재의 응력비는 1 이하로 모두 구조적 안정성을 확보하였으며 환경하중을 고려하는 운송해석 시를 제외하면 WSD방법에서 높은 응력비가 나타났고 부재의 재원이 상대적으로 작은 상부데크에서 높은 응력이 발생하였다.

Table 14 Unity check for jacket in loadout state

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Mudmat frame-1	0.24	0.27
Mudmat frame-2	0.29	0.34
Boat landing	0.21	0.26

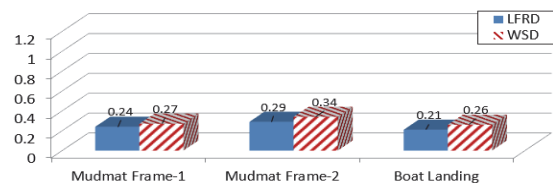


Fig. 9 Comparison of U.C for jacket in loadout state

1) 선적해석

Table 15 Unity check for deck in loadout state

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Roof deck-1	0.51	0.59
Roof deck-2	0.48	0.55
Cellar deck	0.57	0.66

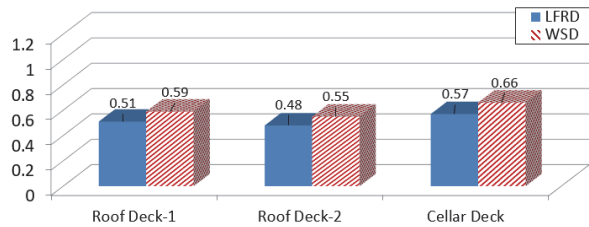


Fig. 10 Comparison of U.C for deck in loadout state

2) 운송해석

Table 16 Unity check for jacket in transportation state

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Mudmat frame	0.31	0.30
Jacket leg	0.14	0.19
Boat landing	0.16	0.21

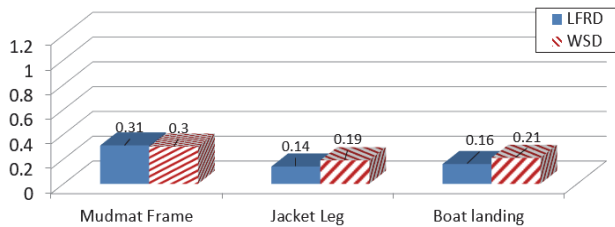


Fig. 11 Comparison of U.C for jacket in transportation state

Table 17 Unity check for deck in transportation state

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Cellar deck-1	0.84	0.91
Cellar deck-2	0.78	0.83
Deck brace	0.67	0.80

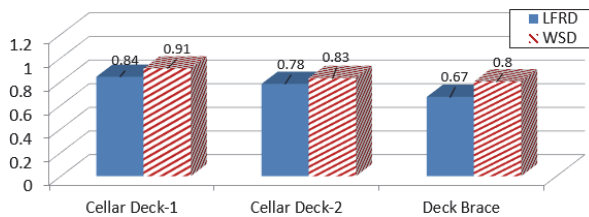


Fig. 12 Comparison of U.C for deck in transportation state

3) 인양해석

Table 18 Unity check for jacket in lifting state

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Mudmat frame-1	0.19	0.22
Mudmat frame-2	0.24	0.28
Jacket leg	0.12	0.20

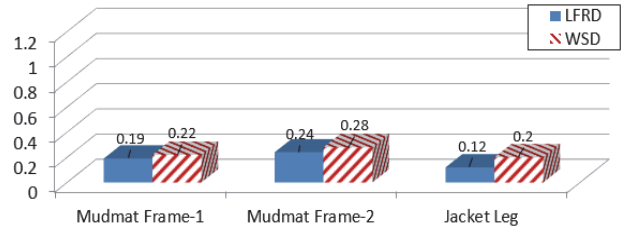


Fig. 13 Comparison of U.C for jacket in lifting state

Table 19 Unity check for deck in lifting state

Member	U.C. of LRFD	U.C. of WSD
Roof deck-1	0.51	0.59
Roof deck-2	0.65	0.77
Cellar deck	0.48	0.55

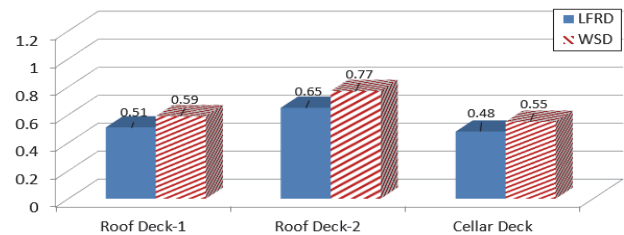


Fig. 14 Comparison of U.C for deck in lifting state

4. 결론

본 연구에서는 국내외에서 널리 적용하고 있는 설계기준인 API의 허용응력설계법과 하중저항계수 설계법을 적용하여 국내 연안에 실제 시공된 고정식 해양구조물에 대해 구조해석을 실시하였다. 두 설계법에 대한 비교 결과는 다음과 같다.

1. 정적해석의 경우, 평시운전 조건하에서는 WSD설계법이 LRFD설계법 대비 응력비의 크기는 최대 1.43배에서 최소 1.09배로 크게 나왔으며 극한운전 조건하에서는 활하중 및 환경하중의 영향이 큰 접안시설에서는 LRFD의 응력비가 1.07배에서 1.17배까지 크게 발생하였다.
2. 지진해석의 경우에는 지표면에서 상대적으로 높고 있어 지진하중에 의한 영향이 큰 Top Side 부재에서 LRFD설

계법이 약 1.3배 크게 나와 자켓구조물의 높이가 높을수록 LRFD설계법이 더 보수적으로 설계함을 알 수 있었다.

3. 설치해석의 경우, 환경하중을 고려하지 않는 선적과 인양해석 시, WSD방법이 크게는 약 1.67배에서 작게는 1.13배 크게 나왔으며 환경하중을 고려한 운송해석에서는 일부 부재에서 LRFD의 응력비가 크게 발생하였으며 WSD방법과의 응력비 차이가 줄어들음을 알 수 있었다. 따라서, 자중이 영향이 상대적으로 큰 사이즈의 자켓은 WSD설계법이, 먼 바다에 설치되는 자켓구조물의 경우는 LRFD설계법이 보수적으로 설계할 것으로 판단된다.
4. 이는 환경하중의 영향이 클수록 LRFD방법에서 환경하중의 불확실성을 고려한 하중계수를 적용함으로써 자켓구조물을 더 보수적으로 설계하는 것으로 판단된다.
5. 본 연구의 대상구조물은 자켓구조물의 주요 하중인 설계 파랑하중이 상대적으로 작은 연안에 설치된 구조물로서 환경하중이 영향이 적었지만 먼 바다에 설치되는 해양구조물의 경우 LRFD설계방법이 영향이 더 클 수 있을 것으로 판단된다.

따라서, 해양 구조물 설계법의 적용은 구조물의 설치 위치, 구조물의 크기 그리고 지형 및 환경적인 특성 등을 고려하여 적용되어야 하며 기본설계 시에 WSD와 LRFD방법에 대한 적용성 검토를 수행한 후 구조 안정성과 경제성 등을 고려하여 최종 설계방법을 적용하는 것이 적절하다고 판단된다.

References

1. Ferguson, M. C. (1990), A Comparative Study using API RP 2A-LRFD, Annual Offshore Technology Conference 22nd, 341-351.
2. Jang, H. S., Goo, J. S., Bae, D. M., and Bae, S. Y. (2012), Analysis of Offshore Wind Turbine Considering Environmental Loads, *KSCE 2012 Convention*, 149-152.
3. Sun, M. Y., Lee, S. B., Lee, K. Y., and Moon, B. Y. (2014), The Study on Substructure Design and Analysis for 5MW Offshore Wind Turbine, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 38(9), 1075-1080.
4. Lee, D. H., Choi, H. S., Ha, S. Y., Jang, H. S., and Kim, H. S. (2017), The Design of a Jacket Substructure for Offshore Wind Turbine based on Offshore Wind Turbine Design Criteria, *Journal of New and Renewable Energy*, 85-89.
5. Kim, W. S., Jeong, Y. S., Kim, K. D., Kim, K. J., Lee, J. H. (2016), Seismic Analysis for Multi-pile Concrete Foundation in 5MW Class Offshore Wind Turbine, *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 29(3), 209-218.
6. SACS User's Manual. (2018), Introduction of Linear and Nonlinear Analysis and its Application of Shell Modelling, 2, 50-65.
7. American Petroleum Institute (API). (2014), Recommended Practice for Planning, Designing and Construction Fixed Offshore Platforms- Working Stress Design, API RP-2A-WSD, 22nd Edition, 38-44.
8. Ministry of Land, Infrastructure and Transportation. (2018), Earthquake Design Standard, Korea Design Standard(KDS) 11 50 25, 15-50.

Received : 01/28/2023

Revised : 03/10/2023

Accepted : 03/13/2023

요 지 : 고정식 자켓구조물 설계 시 국내 설계법의 부재로 해외 설계기준을 적용하고 있다. 특히, 미국의 API기준을 주로 적용하고 있으나 API RP 2A는 허용응력설계법(WSD)과 하중저항계수법(LRFD)의 두 설계법을 제시하고 있고 설계자의 판단에 따라 적용하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 국내 연안에 실제 설치된 고정식 해양구조물에 대해 해양구조물 전용프로그램인 SACS를 이용하여 두 설계법에 대한 응력비를 검토 비교 하였다. 검토결과, 환경하중의 영향이 큰 극한하중해석과 운송해석 시에는 LRFD설계법이, 자중의 영향이 큰 평상시 하중해석과 선적 및 인양 시에는 WSD설계법이 더 큰 응력비를 보여주고 있어 기본설계 시 두 설계법에 대한 적용성 검토를 수행한 후 안전성과 경제성 등을 고려하여 최종 설계법을 선택하는 것이 적절하다고 판단된다.

핵심용어 : 자켓구조물, 구조해석, 설계기준, 허용응력설계법(WSD), 하중저항계수 설계법(LRFD)
