

신뢰성 기반 최적설계를 이용한 130m급 고정식 해양구조물 최적설계 개발

김 현 석^{1†} · 김 현 성² · 박 병 재³ · 이 강 수⁴

¹한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 친환경연료추진연구본부 선임연구원,
²한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 연구원,
³한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 선임연구원,
⁴한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 해양플랜트연구본부 책임연구원

Reliability-Based Design Optimization of 130m Class Fixed-Type Offshore Platform

Hyun-Seok Kim^{1†}, Hyun-Sung Kim², Byoungjae Park³ and Kangsu Lee⁴

¹Senior Researcher, Alternative Fuels and Power System Research Division, KRISO, Daejeon, 34103, Korea

²Researcher, Offshore Platform Research Division, KRISO, Daejeon, 34103, Korea

³Senior Researcher, Offshore Platform Research Division, KRISO, Daejeon, 34103, Korea

⁴Principal Researcher, Offshore Platform Research Division, KRISO, Daejeon, 34103, Korea

Abstract

In this study, a reliability-based design optimization of a 130-m class fixed-type offshore platform, to be installed in the North Sea, was carried out, while considering environmental, material, and manufacturing uncertainties to enhance its structural safety and economic aspects. For the reliability analysis, and reliability-based design optimization of the structural integrity, unity check values (defined as the ratio between working and allowable stress, for axial, bending, and shear stresses), of the members of the offshore platform were considered as constraints. Weight of the supporting jacket structure was minimized to reduce the manufacturing cost of the offshore platform. Statistical characteristics of uncertainties were defined based on observed and measured data references. Reliability analysis and reliability-based design optimization of a jacket-type offshore structure were computationally burdensome due to the large number of members; therefore, we suggested a method for variable screening, based on the importance of their output responses, to reduce the dimension of the problem. Furthermore, a deterministic design optimization was carried out prior to the reliability-based design optimization, to improve overall computational efficiency. Finally, the optimal design obtained was compared with the conventional rule-based offshore platform design in terms of safety and cost.

Keywords : 130m class fixed-type offshore platform, variable screening, uncertainty, reliability analysis, reliability-based design optimization

1. 서론

초기의 해양구조물은 원유 생산을 위해 개발되었으며, 이후 원유의 처리 및 저장까지 가능하도록 그 기능이 확장되었다. 최근에는 해양공간을 이용한 에너지 개발 등의 목적으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 설치 위치 및 목적에 따라 특유의 형상과 기능을 가진다. 상대적으로 낮은 400m 이하의 수심에서는 주로 고정식 해양구조물이 활용되며, 부유식 구조물에 비해 상

대적으로 강한 내구성을 가지는 장점이 있으나 이동이 불가능하고, 육상으로부터 멀리 떨어진 곳에 설치된 경우 사고 및 고장에 대한 대응에 제약이 있어 이를 극복하기 위해 설계수명 동안의 높은 수준의 구조안전성이 요구되며, 이를 위해 설치 해역에서 측정된 환경 하중과 각 급 규정을 엄격하게 준수하여 설계된다.

하지만 해양구조물은 설계, 제작, 설치 그리고 운용하는 과정에서 환경하중, 제작 공차 및 재료 물성 등 다양한 불확실성을 경험하게 된다. 기존 규정 기반 설계에서는 이러한 불확실

[†]Corresponding author:

Tel: +82-42-866-3977; E-mail: hskim85@kriso.re.kr

Received May 31 2021; Revised July 2 2021;

Accepted July 20 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

성을 반영하기 위해 경험적으로 도출된 안전 계수 등의 개념을 도입하였으나, 이는 너무 보수적인 설계 또는 안전하지 못한 설계를 도출할 수 있어 경제성 측면이나 안전성 측면 모두에서 위험성이 내재되어 있다. 조선해양 산업은 유가에 지배적인 영향을 받기 때문에 해양구조물의 제작비용을 저감하고자 해양구조물의 최적설계에 대한 다양한 시도가 있었다. Fadaee와 Besharat(2005)는 부재의 수가 많고 고려되는 하중 조합이 여러 개인 해양구조물에 대해 유전 알고리즘과 wavelet 신경망(neural network)을 결합하여 계산 상 효율적인 최적설계를 도출할 수 있는 근사 최적설계 방법론을 제시하였다. Nasserri 등(2014)은 해양구조물의 설계에 있어 기준이 되는 축 응력, 굽힘 응력, 그리고 좌굴 등을 제약 조건으로 고하고 무게를 저감하는 고정식 해양구조물의 결정론적 최적설계(Deterministic Design Optimization, DDO)를 수행하였으며, 최적설계 결과 각 부재들의 영향력을 분석하였다. 뿐만 아니라 해양구조물의 경량화를 위해 부재의 외경과 두께 등을 설계변수로 하는 크기(sizing) 최적설계 뿐만 아니라 부재들의 최적 연결성을 도출할 수 있는 위상최적설계 방법론을 활용한 연구 또한 수행되었다. Jung 등(2017)은 위상최적설계를 활용하여 해양구조물의 경량화를 위해 상부구조물에 설치되는 캔틸레버식 헬리테크의 하부 트러스 구조물에 대한 최적설계 연구를 수행하였으며, Kim 등(2020)은 솔리드 요소 기반 위상최적설계를 통해 고정식 해양구조물의 주각의 유무에 따른 최적 부재 연결성을 도출하고 이를 모형 스케일에서 실험적으로 검증하였다. 다만, 제약조건과 매우 근접한 최적해를 도출하는 결정론적 최적설계와 최적 연결성을 도출하는 위상최적설계는 무게 저감 효과가 우수하나 불확실성의 영향을 고려하였을 때 신뢰성이 부족하거나 각 급 규정에서 정의하지 않는 형태의 부재 연결성이 사용되어 실제 스케일에서의 실험적 검증이 요구된다.

실제 스케일에서 해양구조물의 실험적 검증이 거의 불가능하기 때문에 해양구조물에 작용하는 불확실성의 영향을 분석하고 이를 최적설계에 반영하여 구조안전성과 경제성 모두를 확보하기 위한 신뢰성 기반 최적설계(Reliability-Based Design Optimization, RBDO) 연구 또한 제한적으로 수행되었다. Park과 Park(2014)은 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 5MW 풍력발전기 타워의 모노파일형태 하부지구조물에 대한 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였으나 적용 대상이 단순한 형태의 모노파일 지지구조물이며 제작 공차에 대한 불확실성만을 고려하여 한계가 있다. Lee 등(2014)은 NREL 5MW 해상풍력발전기의 모노파일형 지지구조물에 대해 하중, 재료, 그리고 제작 공차의 불확실성을 고려한 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였으나 마찬가지로 복잡함 형태의 자켓형 해양구조물로의 확장에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 북해에 설치되어 운용되는 것을 목적으로 하는 130m급 자켓형 고정식 해양구조물에 영향을 미치는 불확실성의 종류와 그 통계적 특성을 정의하였고, 높은 구조안전성과 경제성을 확보하기 위해 불확실성의 영향을 고려한 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다. 뿐만 아니라 구사되는 부재가 많아 계산 부담이 큰 신뢰성 해석과 신뢰성 기반 최적설계가 어려운 자켓형 고정식 해양구조물에 대해 효율적으로 설계변수를 정의하고 선별할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 대상 구조물

2.1 설치 목표 위치

본 논문에서 고려하는 대상 구조물은 북해(North Sea) Frøy field의 수심 130m 지점에 설치를 목표로 하는 고정식 해양구조물이다. Frøy field는 Fig. 1의 파란색 원에서 확인할 수 있듯이 영국과 노르웨이 중간 지점에 위치하며, Fig. 1의 붉은색 점선 원들로 표기한 바와 같이 평균 수심은 100~200m 정도이다 (van Ledden *et al.*, 2014).

2.2 130m급 고정식 해양구조물

130m급 고정식 해양구조물은 Fig. 2 나타낸 바와 같이 8개의 주각(leg)과 수직 및 수평 브레이스(brace)들로 이루어진 무



Fig. 1 Target installation site

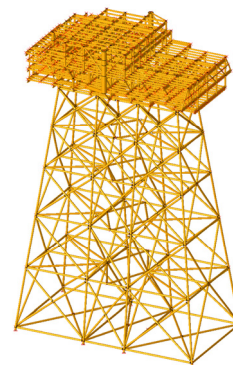


Fig. 2 Support structure and topside structure of 130m class fixed type offshore platform

Table 1 Environmental condition considered for design

Environmental conditions	Value
Wave height(100-year return period)	15.00(m)
Wave period(100-year return period)	15.50(sec)
Wind speed(100-year return period)	40.50(m/s)
Current speed(at surface)	2.007(m/s)

계 90,879kN(약 9,200ton)의 자켓(jacket)형 하부지구조물과 석유 시추 등을 위해 필요한 무게 196,133kN(약 20,000ton)의 상부(topside) 구조물로 구성된다.

2.3 규정 기반 설계

실제 사용을 목적으로 하는 모든 해양구조물은 선급 등 각 규정에 따라 설계된다. 여기서, 고려된 130m급 고정식 해양구조물은 AISC(American Institute of Steel Construction)의 ASD(Allowable Stress Design) AISC 14th Edition(AISC, 2014) 과 API(American Petroleum Institute)의 RP(Recommended Practice) 2A-WSD(Working Stress Design) 21st Edition(API RP 2A-WSD, 2000)을 기반으로 설계하였다.

설치 목표 위치에 따라 고려된 설계 환경 하중은 Table 1에 정리하였다. 파도의 높이, 주기 그리고 바람에 의한 설계 환경 하중은 DNV-GL 선급의 OS-E301(DNVGL-OS-E301, 2018) 규정에 따라 모두 100년 주기 반복 하중을 기준으로 정의하였으며, 조류에 의한 설계 환경 하중은 상기 규정에 따라 설치 목표 위치에서의 표면 조류 속도에 기반하여 그 값을 결정하였다.

3. 고정식 해양구조물에 작용하는 불확실성 정의

3.1 환경 하중 불확실성

기존 각 규정에 따른 해양구조물 설계에서 고려하는 파도, 바람, 조류 등과 같은 설계 환경 하중은 측정 데이터를 기반으로 100년 마다 해당 설치 목표 위치에서 반복될 것으로 추정되는 값이다. 하지만, 자연 상태에서는 불확실성이 존재하기 때문에 이 설계 환경 하중이 반드시 정해진 주기마다 반복되는 것이 아니며, 이에 따라 예상하지 못한 해양구조물의 손상이나 파괴가 발생할 수 있다. 때문에 이러한 불확실성을 설계에 반영하고 안전한 설계를 도출하기 위해 특정 반복 주기가 아닌 전체 반복 주기를 고려할 수 있는 분포 하중을 활용하였다. 불확실성의 영향에 의해 분포를 지닌 설계 환경 하중의 통계적 특성은 Table 2에 정리하였다(Ashkenazy and Gildor, 2011; DNV REPORT NO. 95-2018, 1996; Havard *et al.*, 2018; Johannessen *et al.*, 2001; Peter, 2008).

Table 2 Statistical characteristics of environmental variables

Name	Distribution type	Mean	Standard deviation
Wind speed(m/s)	Weibull	7.5197	4.5290
Wave height(m)	Weibull	3.0014	1.5451
Wave period(sec)	Lognormal	9.9360	2.2929
Current speed(m/s)	Weibull	0.1370	0.0100

Table 3 Statistical characteristics of material variables

Name	Distribution type	Mean	Standard deviation
Elastic modulus (kN/cm ²)	Lognormal	21.0000	1.0500
Yield strength (kN/cm ²)	Lognormal	39.8880	2.2736

3.2 재료 물성 및 제작 공차 불확실성

해양구조물은 대부분 강철 재질로 만들어진다. 이러한 강철의 물리적 특성을 표현하는 탄성계수(elastic modulus)와 항복강도(yield strength)와 같은 재료 물성에도 불확실성이 존재하며, 마찬가지로 예기치 못한 국부 손상 및 피로 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 재료 물성의 불확실성은 시편 시험 등을 통해 그 통계적 특성을 도출할 수 있으며, 고려된 재료 물성 불확실성은 Table 3에 정리하였다(DNV REPORT NO. 95-3204, 1996; Alpsten, 1972).

아울러 해양구조물을 구성하는 부재들을 제작할 때 발생할 수 있는 공차(tolerance)는 표준 편차와 평균의 비를 의미하는 변동 계수(coefficient of variation)를 5%로 두어 정의하였으며, 신뢰성 기반 최적설계 과정에서 추가 제약조건(side constraint)으로 반영하였다.

4. 130m급 고정식 해양구조물의 신뢰성 기반 최적설계

본 연구에서 고려하는 130m급 고정식 해양구조물의 구조 해석은 각 규정과 선급 규정을 구조해석에 정확하게 반영할 수 있어 조선해양 현업에서 널리 사용되고 있는 Bentley사의 해양구조물 전용 구조해석 프로그램 SACS v13.1(Bentley, 2019)을 활용하였다. 아울러 설계의 신뢰성 해석, 결정론적 최적설계, 그리고 신뢰성 기반 최적설계는 RAMDO Solutions, LLC 사의 RAMDO(RAMDO software, 2021)를 사용하여 수행되었다.

4.1 설계변수 정의

130m급 고정식 해양구조물의 신뢰성 기반 최적설계에서 고려한 설계변수는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 이를 구성하는

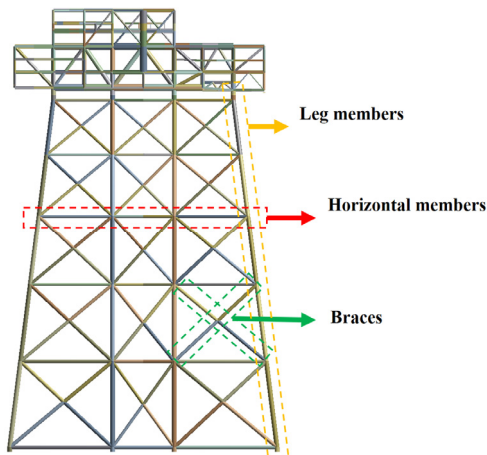


Fig. 3 Groups of fixed type offshore platform

주각(leg), 브레이스, 그리고 수평 멤버(member) 부재들의 외경으로 설정하였다. 이 때 동일한 외경을 지니면서 유사한 위치에 있는 부재들을 매개화하여 하나의 그룹(group)으로 분류하였고, 이에 따라 총 39개의 그룹과 설계변수로 정의할 수 있다. 다만 고정식 해양구조물의 상부구조물은 설계영역에서 제외하였다. 추가 제약조건인 각 설계변수들의 하한과 상한 값을 앞서 정의한 제작 공차의 불확실성과 각 급 규정에서 정의하는 외경과 두께 비(D/t ratio) 그리고 세장비(slenderness ratio)를 모두 만족하도록 정의하였다.

4.2 설계변수 선별

앞서 부재들의 위치와 외경에 따라 총 39개의 설계변수를 정의하였다. 그러나 이는 신뢰성 기반 최적설계에서 다루기에 는 문제의 차원(dimension)이 너무 크고 많은 계산 비용이 요구되기 때문에 각 그룹의 허용 응력 대비 작용 응력의 비를 의미하는 UC(unity check) 값의 크기를 기준으로 설계변수를 선별(screening) 하였다.

대상 해양구조물의 UC 값은 축(axial) 방향 응력과 굽힘(bending) 응력의 선형 결합으로 표현되는 결합 응력(combined stress)과 전단 응력(shear stress)이다. 따라서 39개 그룹에 각각 2개의 UC 값이 존재하며 총 78개 응답의 크기를 Fig. 4와 같이 조사 하였다. 선급 규정에 따르면 일반적으로 각 부재들의 UC 값은 1.0 미만의 값을 지닐 때 안전한 것으로 판단한다. 다만, 본 연구에서는 해양구조물의 피로 파괴 등을 고려하여 각 부재들의 UC 값이 0.5 이하가 되도록 설계하였으며, UC 값이 그 절반 이상인 0.25를 기준으로 설계변수와 응답을 선별하였다. 선별된 설계변수와 응답인 결합 허용응력과 작용 응력의 비 UC값을 Table 4에 정리하였다. 이 때 수월한 구분을 위해 주각 부재 그룹은 ‘L’로, 브레이스 부재는 ‘B’로, 수평 멤버 부재는 ‘H’로,

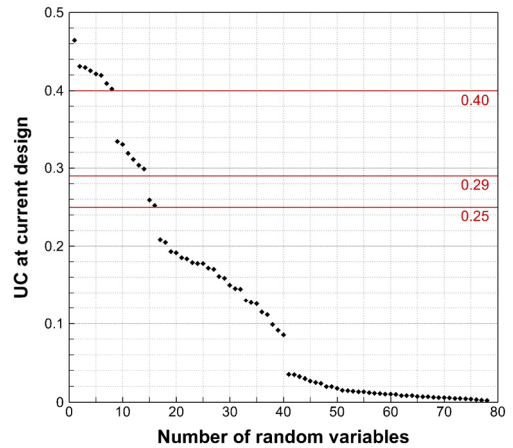


Fig. 4 Variable screening based on output response

Table 4 Variable screening by output response

Response type	Group name	Response(UC)
Combined Stress	B54	0.4644
Combined Stress	L1	0.4312
Combined Stress	B45	0.4297
Combined Stress	B36	0.4256
Combined Stress	L3	0.4216
Combined Stress	L2	0.4197
Combined Stress	B25	0.4093
Combined Stress	L4	0.4022
Combined Stress	E00	0.3350
Combined Stress	L6	0.3312
Combined Stress	B56	0.3186
Combined Stress	H5	0.3110
Combined Stress	H1	0.3037
Combined Stress	H3	0.2987
Combined Stress	L5	0.2590
Combined Stress	B12	0.2521

그리고 상부구조물과 하부구조물이 결합되는 부분은 ‘E’로 그룹 이름이 시작되도록 정의하였으며, 이어지는 숫자는 부재들의 위치에 따라 정의되었다.

4.3 초기 설계의 구조해석과 신뢰성 해석

앞서 정의된 불확실성을 지닌 변수 파고, 파주기, 풍속, 조류 속도, 탄성계수, 항복강도 등 6개와 선별된 16개 그룹의 설계 변수들을 고려하여 각 급 규정에 따라 설계된 130m급 고정식 해양구조물 초기설계에 대해 신뢰성 해석을 수행하였다. 초기 설계에 대한 신뢰성 해석을 위한 구조해석은 선급 규정에서 정의하는 45도 간격 자중, 파랑하중, 풍하중, 조류하중의 설계 하중 조합 8개를 모두 하중 경계 조건으로 고려하였다(Lee et al.,

Table 5 Reliability analysis results at initial design

Group	B12	B25	B36	B45
Reliability	100.00%	99.92%	99.32%	98.84%
Group	B54	B56	E00	H1
Reliability	93.65%	100.00%	100.00%	100.00%
Group	H3	H5	L1	L2
Reliability	100.00%	100.00%	98.84%	99.63%
Group	L3	L4	L5	L6
Reliability	99.62%	99.97%	100.00%	100.00%

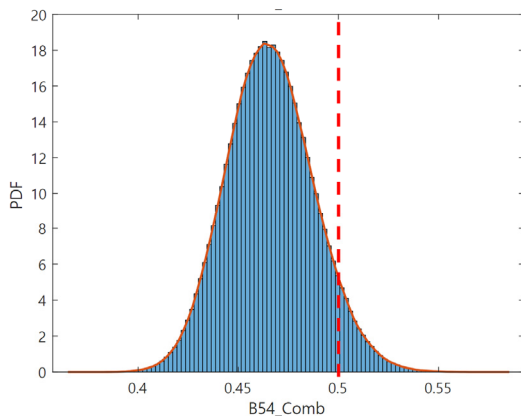


Fig. 5 Effect of uncertainty on member group B54

2018). 아울러 구조해석에서 변위 경계 조건으로 대상 구조물 8개 주각의 최하단에서 고정 경계 조건을 부여하였다. 이 때 응답은 각 설계변수들의 작용 결합 응력과 허용 결합 응력의 비를 의미하는 UC 값이며, 고려한 8개 하중 조합에서 가장 큰 응답 값이 0.5를 넘지 않는 것을 설계 기준으로 정의하였다. 초기설계에서 선별된 각 부재 그룹의 신뢰성 해석 결과는 Table 5에 정리하였다. 신뢰성 해석 결과 고정식 해양구조물의 최하단에 위치하는 수평 브레이스들인 B54 그룹의 신뢰성이 93.65%로 가장 낮게 도출되었다. 고려한 불확실성의 영향으로 인한 결합 응력 UC 값의 분포를 붉은색 점선으로 표기된 제약 조건과 함께 Fig. 5에 나타내었다. 아울러 주각을 구성하는 부재들의 그룹인 L1과 수평 브레이스들의 그룹인 B45의 신뢰성이 그 다음으로 낮게 도출되었다.

4.4 결정론적 최적설계와 신뢰성 해석

130m급 고정식 해양구조물의 효율적인 신뢰성 기반 최적설계를 수행하기 위하여 결정론적 최적설계를 먼저 수행하고 결정론적 최적 해에서 부터 신뢰성 기반 최적설계를 진행하였다. 결정론적 최적설계에서는 앞서 정의한 불확실성을 고려한 환경 하중 및 재료 물성의 평균값을 활용하였다. 이 때 목적함수는 130m급 고정식 해양구조물의 하부지구조물의 무게

이며, 제약 조건은 각 부재 그룹의 결합 응력 UC 값이다. 이를 정식화하면 식 (1)과 같다.

$$\text{Minimize Weight of the support structure} \quad (1)$$

$$LB_i \leq d_i \leq UB_i \quad (i = 1, \dots, 16)$$

$$\text{subject to } UC_j \leq 0.5 \quad (j = 1, \dots, 16),$$

여기서, 설계변수 d_i 는 선별된 16개 부재 그룹들의 외경이다.

결정론적 최적설계는 총 12번의 설계 반복 과정(iteration)을 통해 수렴하였으며, 그 결과와 반복 과정에서 선별된 설계 변수들의 설계 이력을 각각 Table 6과 Table 7에 정리하였다.

Table 6 DDO optimization results

	Initial	Optimum	Ratio(%)
Weight(kN)	90,879	82,567	90.85

Table 7 Design variable history during DDO

Design	B36	H5	L3
0	2.54	3.05	4.83
1	2.53	3.04	4.82
2	2.50	2.97	4.77
3	2.46	2.90	4.72
4	2.43	2.89	4.68
5	2.42	2.88	4.68
6	2.41	2.85	4.66
7	2.32	2.64	4.53
8	2.11	2.21	4.25
9	2.09	2.15	4.22
10	2.07	2.11	4.19
11	2.01	1.95	4.08
12	2.01	1.95	4.08

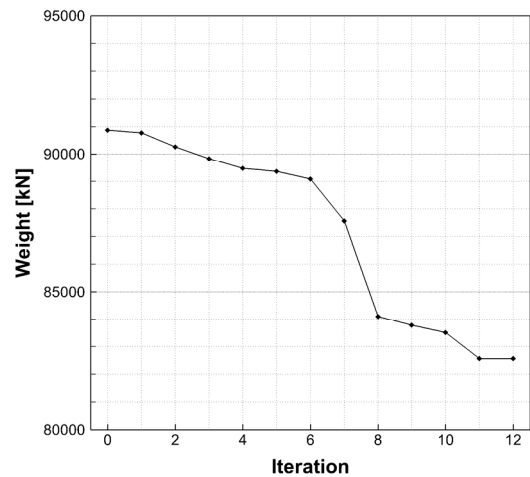


Fig. 6 DDO optimization history

Table 8 Reliability analysis results at DDO optimum

Group	B12	B25	B36	B45
Reliability	100.00%	60.93%	22.45%	53.53%
Group	B54	B56	E00	H1
Reliability	60.39%	100.00%	100.00%	100.00%
Group	H3	H5	L1	L2
Reliability	100.00%	100.00%	55.17%	32.02%
Group	L3	L4	L5	L6
Reliability	25.02%	65.25%	100.00%	100.00%

결정론적 최적설계 이력은 Fig. 6에 도식하였다. Fig. 6의 반복 과정 6과 8 사이에 목적 함수의 큰 감소가 나타나는데, 이는 RAMDO에서 샘플링 기반 최적설계를 수행함에 있어 표본 수가 많아짐에 따라 목적함수를 저감할 수 있는 폭이 큰 방향을 찾았기 때문이다. 표를 살펴보면 결정론적 최적설계 결과 130m급 고정식 해양구조물의 하부 지지구조물 무게를 약 9.15% 저감할 수 있다.

이 때 결정론적 최적 해에서 불확실성의 영향에 따른 신뢰성 해석을 수행하였고, 그 결과는 Table 8에서 정리하였다. 마찬가지로 선급 규정에서 정의하는 8개의 하중 조합에서 가장 큰 응답 값이 0.5를 넘지 않도록 설계 기준을 정의하였다. 신뢰성 해석 결과 결정론적 최적 해에서는 수평 멤버들과 상부구조물과 하부구조물이 결합되는 그룹을 제외한 수직 및 수평 브레이스 멤버 그룹들과 주각 그룹들에서 약 20%에서 65%의 낮은 신뢰성이 도출되어 상당히 취약한 설계임을 확인할 수 있다.

4.5 신뢰성 기반 최적설계

130m급 고정식 해양구조물의 신뢰성 기반 최적설계는 앞서 불확실성의 영향을 고려한 환경 하중과 재료 물성의 분포와 표준편차를 반영하여 수행되었다. 이 때 설계변수, 응답 그리고 목적함수는 결정론적 최적설계와 동일하게 16개 부재 그룹의 외경, 결합 응력의 UC 값 그리고 130m급 고정식 해양구조물의 하부지지구조물 무게이며, 목표 신뢰성은 99.865%로 정의하였다. 이를 정식화 하면 식 (2)와 같다.

Minimize Weight of the support structure (2)

$$LB_i \leq d_i \leq UB_i \quad (i = 1, \dots, 16)$$

subject to $UC_j \leq 0.5$ (where $j = 1, \dots, 16$)

$$P_j(UC_j \leq 0.5) \geq 99.865\%$$

신뢰성 기반 최적설계는 총 10번의 설계 반복 과정 이후 종료되었으며, 그 결과와 반복 과정에서 선별된 설계변수들의

Table 9 RBDO optimization results

	Initial	Optimum	Ratio(%)
Weight(kN)	90,879	86,988	95.72

Table 10 Design variable history during RBDO

Design	B54	H1	L4
1	2.37	2.31	4.50
2	2.95	2.31	4.62
3	4.19	2.71	4.56
4	3.46	2.99	4.69
5	2.88	2.76	4.72
6	3.52	2.54	4.71
7	2.66	2.43	4.80
8	2.66	2.43	4.80
9	3.40	2.37	4.84
10	3.45	2.37	4.84

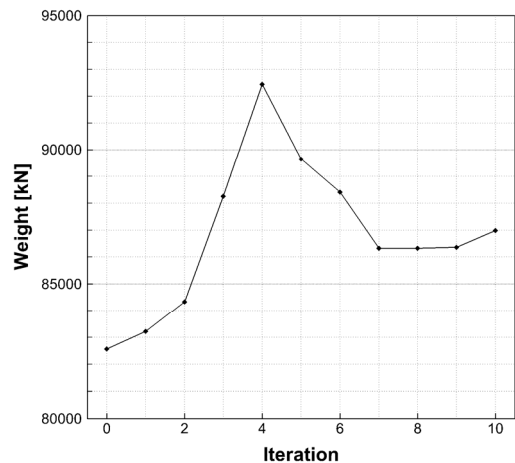


Fig. 7 RBDO optimization history

설계 이력을 각각 Table 9와 Table 10에 정리하였다. 이 때 신뢰성 기반 최적설계 이력은 Fig. 7에 도식하였다. 결과를 살펴보면, 불확실성의 영향을 고려하였을 때 130m급 고정식 해양구조물의 각 응답에 대한 목표 신뢰성을 만족하기 위해 하부지지구조물의 무게가 증가하였다가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이를 초기설계와 비교해 보면 약 4.3%의 자켓형 하부지지구조물 무게가 감소한 것을 확인할 수 있다.

신뢰성 기반 최적설계의 마지막 설계 반복 과정에서 각 부재들의 그룹 별 응답의 신뢰성은 Table 11에 정리하였다. 이 때 B54, L1, 그리고 L4 그룹들에서 목표 신뢰성을 만족하지 못하는 것을 알 수 있다. 특히 B54 그룹에서 목표 신뢰성에 비해 매우 낮은 95.81%의 신뢰성이 도출되었는데, 이는 Fig. 8에서 나타난 바와 같이 B54 그룹 부재들의 결합 응력을 감소하기 위해 두께를 증가시켜도 자중의 영향으로 인하여 더 이상 UC 값이

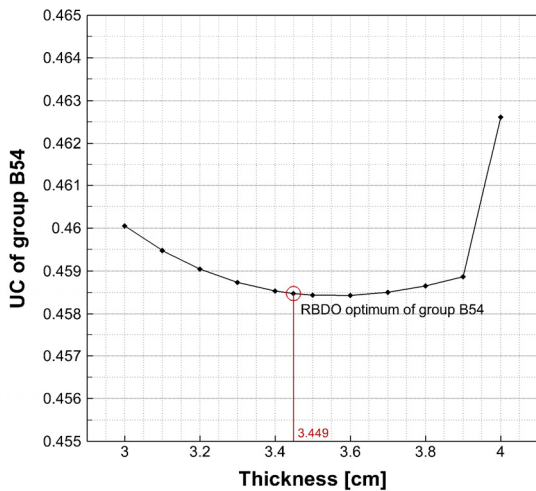


Fig. 8 Plot of B54 group UC values

Table 11 Reliability at last RBDO iteration

Group	B12	B25	B36	B45
Reliability	100.00%	99.99%	99.94%	99.95%
Group	B54	B56	E00	H1
Reliability	95.81%	100.00%	100.00%	100.00%
Group	H3	H5	L1	L2
Reliability	100.00%	100.00%	99.70%	99.93%
Group	L3	L4	L5	L6
Reliability	99.97%	99.83%	100.00%	100.00%

감소할 수 없기 때문인 것으로 분석된다. 이는 현재 130m급 고정식 해양구조물의 설계 기준이 UC값이 0.5 이하로 정의된 문제로 이를 완화해 주면 목표 신뢰성을 만족하는 신뢰성 기반 최적설계의 최적 해를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 현재 도출된 신뢰성 기반 최적설계(안)의 신뢰성을 초기설계와 비교해 보면 불확실성의 영향을 고려하였을 때 대상 해양구조물의 구조안전성이 보다 개선된 결과임을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 북해에 설치되어 운용되는 것을 목적으로 하는 130m급 고정식 해양구조물의 높은 구조안전성과 경제성을 확보하기 위해 불확실성의 영향을 고려한 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다. 고정식 해양구조물에 영향을 미치는 환경하중, 재료 물성 그리고 제작 공차의 불확실성은 관측 및 실험으로 도출된 정보를 기반으로 통계학적 특성을 정의하였다. 아울러 효율적인 신뢰성 해석 및 기반 최적설계를 수행하기 위해 설계변수의 중요도에 따른 선별 방법 또한 소개하였다.

고정식 해양구조물의 신뢰성 기반 최적설계 결과 기존 선급 규정 기반의 설계에 비해 무게를 약 4.3% 저감할 수 있었고, 신

뢰성 또한 개선되었다. 다만, 기존 선급 규정보다 과한 제약조건을 적용하였기 때문에 목표 신뢰성을 만족하는데 한계가 있었으며, 향후 제약조건을 기존 선급 규정과 비슷한 수준으로 완화하여 경제성과 구조안전성이 개선된 최적설계를 도출할 수 있는 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업 “불확실성을 고려한 유탄성 기반 해양구조물 구조손상도평가 핵심기술 개발(2/5)”로 수행된 연구결과입니다(PES3930).

References

- AISC (2014) Steel Construction Manual, 14th Edition, American Institute of Steel Construction.
- Alpsten, G. (1972) Variations in Mechanical and Cross-Sectional Properties of Steel, State of the Art Report, *Proc. Int. Conf. Planning & Design of Tall Buildings*, ASCE-IABSE, Lehigh University.
- API RP 2A-WSD (2000) Recommended Practice for Planning, Design and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design 21st Edition, American Petroleum Institute.
- Ashkenazy, Y., Gildor, H. (2011) On The Probability and Spatial Distribution of Ocean Surface Currents, *J. Phys. Oceanogr.*, 41(12), pp.2295~2306.
- Bentley (2019) SACS User Manual, Bentley, USA.
- DNV REPORT NO. 95-2018 (1996) Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis: General.
- DNV REPORT NO. 95-3204 (1996) Guideline for Offshore Structural Reliability Analysis: Examples for Jacket Platforms.
- DNVGL-OS-E301 (2018) Offshore Standard - Position Mooring, Det Norske Veritas and Germanischer Lloyd.
- Fadaee, M.J., Besharat, M. (2005) Design Optimization of Offshore Platforms using Genetic Algorithms and Wave-Net, *Proceedings of the 8th International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structural and Environmental Engineering*, p.38.
- Havard, V., Kjell, A.O., Henrik, S., Henning, W. (2018) Analysis of Tidal Currents in the North Sea from Shipboard Acoustic Doppler Current Profiler Data, *Continental Shelf Research*, 162, pp.1~12.
- Johannessen, K., Meling, T.S., Hayer, S. (2001) Joint Distribution for Wind and Waves in the Northern North Sea, *The 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.19~28.

- Jung, T.-W., Kim, B.-M., Ha, S.-H.** (2017) A Study on Light-weight Design of Cantilever-type Helideck Using Topology Design Optimization, *J. Comput. Struct. Eng. Ins. Korea*, 30(5), pp.453~460.
- Kim, H.-S., Kim, H.-S., Park, B., Lee, K.** (2020) 3D Topology Optimization of Fixed Offshore Structure and Experimental Validation, *J. Ocean Eng. & Technol.*, 34(4), pp.1~9.
- Lee, K., Park, B., Kim, H.-S., Kim, D.,** (2018) Study of Rule Scantling Method and Structural Strength Evaluation to Obtain Structural Design Technology for Fixed Offshore Platform, *KRISO Technical Report*, 58, pp.69~79.
- Lee, Y.-S., Choi, B.-L., Lee, J.H., Kim, S.Y. Han, S.** (2014) Reliability-Based Design Optimization of Monopile Transition Piece for Offshore Wind Turbine System, *Renew. Energy*, 71, pp.729~741.
- Nasseri, T., Shabakhty, N., Afshar, M.H.** (2014) Study of Fixed Jacket Offshore Platform in the Optimization Design Process under Environmental Loads, *Int. J. Marit. Technol.*, 2, pp.75~84.
- Park, Y., Park, H.-C.** (2014) Optimal Design of Wind Turbine Tower Model Using Reliability-Based Design Optimization, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.-A*, 38(5), pp.575~584.
- Peter, C.C.** (2008) Probability Distribution Function of the Upper Equatorial Pacific Current Speeds, *Geophys. Res. Lett.*, 35(12), pp.1~18.
- RAMDO Software** (2021) RAMDO solutions, LLC, Iowa City, IA, <https://www.ramdosolutions.com> May 29.
- van Ledden, M., van den Berg, N.J.F., de Jong, M.S., van Gelder, P.H.A.J.M., den Heijer, C., Vrikling, J.K., Jonkman, S.N., Roos, P.C., Hulscher, S.J.M.H., Lansens, A.J.** (2014) An Idealized Meteorological-Hydrodynamic Model For Exploring Storm Surge Statistics In The North Sea, *Coastal Engineering Proceedings*, pp.1~12.

요 지

본 연구에서는 환경, 재료 물성 및 제작 등에서의 불확실성을 고려하여 130m급 고정식 해양구조물의 신뢰성 기반 최적설계를 수행하였다. 구조물의 구조건전성을 엄밀하게 반영하기 위해 작용 및 허용 응력의 비인 UC 값을 신뢰성 해석 및 신뢰성 기반 최적설계의 제약조건으로 고려하였다. 해양구조물의 제작비용을 저감하기 위해 자켓형 지지구조물의 중량을 최소화하였다. 불확실성의 통계적 특성은 문헌 등을 참고하여 관측되거나 측정된 데이터를 기반으로 정의하였다. 자켓형 해양구조물의 신뢰성 해석과 신뢰 기반 최적설계는 부재 수가 많아 계산 부담이 크므로 문제의 차원을 축소하기 위해 응답의 중요성을 기준으로 설계변수를 선별할 수 있는 방법을 제안한다. 또한 효율적인 계산을 위해 신뢰성 기반 최적설계를 수행하기 전 결정론적 최적설계를 먼저 수행하였다. 마지막으로, 도출된 최적설계(안)을 기존 각 급 규정 기반 설계와 안전성 및 경제성 측면에서 비교 분석하였다.

핵심용어 : 130m급 고정식 해양구조물, 변수 선별, 불확실성, 신뢰성 해석, 신뢰성 기반 최적설계