가거초 자켓 구조물의 허용응력비를 고려한 구조 최적설계

김 병 모¹·하 승 현^{2†}

¹한국해양대학교 해양공학과 전임연구원, ²한국해양대학교 해양공학과 부교수

Structural Design Optimization of Gageocho Jacket Structure Considering Unity Check

Byungmo Kim¹ and Seung-Hyun Ha^{2†}

¹Researcher, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

²Associate Professor, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

Abstract

Offshore jacket structures generally comprise steel members, and the safety standard for jacket structures typically focuses on the steel components. However, large amounts of concrete grouting is filled in the legs of the Gageocho jacket structure to aid in the recovery from typhoon damage. This paper proposes a safe and lightweight design for the Gageocho ocean research station comprising steel members instead of large amounts of concrete reinforcement in the legs. Based on the actual design, the structural members are grouped according to their functional roles, and the inner diameter of the cross-section in each design group is defined as a design variable. Structural optimization is carried out using a genetic algorithm to minimize the total weight of the structure. To satisfy the conservative safety standards in the offshore field, both the maximum stress and the unity check criteria are considered as design constraints during optimization. For enhanced safety confidence, extreme environmental conditions are assumed. The maximum marine attachment thickness and the section erosion in the splash zone are applied. Additionally, the design load is defined as the force induced by extreme waves, winds, and currents aligned in the same direction. All the loading directions surrounding the structure are considered to design the structure in a balanced and safe manner. As a result, compared with the current structure, the proposed structure features a 45% lighter design, satisfying the strict offshore safety criteria.

Keywords : offshore jacket structure, structural design optimization, genetic algorithm, unity check, Gageocho ocean research station

1. 서론

가거초 해양과학기지(Ocean research station, 이하 ORS)는 2009년 가거초 상에 자켓형 해양구조물로 설치되었으나 태풍 무이파와 곤파스 때 파손되어 2012~2013년에 복구된 바 있다(Kim *et al.*, 2017). 복구를 위해 상부 플랫폼을 5m 높이고 플랫폼과 하부구조물의 연결부를 직경이 큰 부재로 변경했으며 자켓 레그 내에 강관파일을 삽입하고 콘크리트를 채워 넣었다(Fig. 1). 복구 후 구조물 거동을 예측해 고유주파수, 모드형상 등 동특성을 분석(Kim *et al.*, 2017)하였고, 그 고유주파수를 기준으로 구조물 강재와 콘크리트 탄성계수를 밝히기 위한 모델 개선을 수행하여 레그 내 콘크리트 탄성계수가 설계목표보다

작을 수 있음을 확인하였다(Kim *et al.*, 2019). 보강공사 특성 상 실험적 자켓 레그 내에 콘크리트 반죽을 타설했으므로 양생 상 원인이 있을 것으로 추측되나, 운용 중이므로 그 검증에 한계가 있다.

이 같은 콘크리트의 불확실성은 유지관리의 측면에서도 불확실성으로 작용할 수 있다. 또, 자켓식 해양구조물 안전평가 기준을 제공하는 기관들도 강재기준 코드를 제시하는 것이 보편적이다. 따라서 강재로만 이루어진 가거초ORS 자켓 설계를 제시한다면 보다 불확실성이 적고 설계 과정에서 안전평가 기준의 만족 여부를 명확히 파악하기가 용이하다. 더불어 자켓 레그 안 전체를 콘크리트로 채워 넣는 것보다 사용되는 재료 양을 아낄 수 있어 용선료 등 설치비용 절감에 도움이 될 수 있다.

[†]Corresponding author:

Tel: +82-51-410-5246; E-mail: shha@kmou.ac.kr

Received May 28 2021; Revised June 25 2021;

Accepted June 28 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.

Fig. 1 Gagecho ORS before and after recovery(Kim *et al.*, 2019; Woo and Sin, 2012)

따라서 본 논문에서는 가거초ORS 강재들의 현재 단면을 기준으로 부재 내경을 변경해 극한환경하중에서도 허용응력 및 허용응력비 제약조건을 만족하도록 안전하면서도 보다 가벼운 가거초ORS 설계를 제안하고자 한다.

해양구조물의 경우, 해상풍력터빈 자켓하부구조에 대해 동특성 제약조건 하의 유연도 최소화를 위한 위상최적설계(Kim and Chung, 2014)가 수행된 바 있다. 해양구조물용 헬리데크의 트러스구조에 대해 유연도 최소화를 위한 위상최적설계(Jung *et al.*, 2017)와 상용단면 기반의 최적단면결정(Sim *et al.*, 2019)이 연구된 바 있다. 본 논문에서는 설계변수인 내경에 따라 변하는 허용응력비 제약조건을 적용하였으므로, 넓은 설계영역 상 비선형 제약조건 내에서 효율적으로 최적해를 탐색하고자 유전 알고리즘을 적용하였다.

2. 본 론

2.1 설계조건

2.1.1 유한요소모델

본 연구에서 사용한 가거초ORS 유한요소모델(Fig. 2)은 선행연구(Kim *et al.*, 2019)를 참고하여 ANSYS Mechanical APDL 17.1(ANSYS Inc., 2017)을 통해 만들었으며, 연구목적에 따라 콘크리트 채움은 생략하였다. 자켓레그 부재들은 pipe288, 그 위 강재들은 beam188 요소타입으로 16,978개 절점과 12,066개의 요소로 구성된다. 가거초 보강 설계보고서(Woo and Sin, 2012)에 따라 강재 탄성계수는 200GPa을, 푸아송 비는 0.3을 적용하였다. 항복응력(σ_y)은 연직레그가 345MPa, 조인트캔이 부착된 일부 조인트에서 290MPa이며 이들은 상대적으로 직경이 큰 부재들이다. 그 외 모든 부재에서 250MPa인 강재가 사용되었다.

Fig. 2 Gagecho ORS FE model(L: element type; R: yield stress)

2.1.2 설계 환경 조건

본 논문에서는 가거초 보강 설계보고서(Woo and Sin, 2012)를 참고하여 바람, 파랑, 조류 및 해양부착생물과 비말대 부식을 설계 환경 조건으로 고려하였으며 50년 재현주기를 기준으로 설계를 진행하였다.

바람의 경우 1분 평균풍속 38.7m/s를 적용하였다. 극한파의 파고와 주기는 20.95m와 14.25초를 고려하였으나 가거초ORS의 평균수심이 15m로 Fig. 3과 같이 이 수심에서는 쇄파가 발생하기 때문에, 보강 설계보고서와 동일하게 27.5m의 가상수심을 고려하여 9차 유선헌수이론(stream function theory)을 적용하였다. 이때의 설계파장은 약 246.8m 이다. 조류의 경우

Fig. 3 Applicability of wave theories (API, 1996; Atkins Engineering Service, 1990)

Fig. 4 Profile of the design current(Woo and Sin, 2012)

Fig. 4와 같이 조류와 풍성류의 합으로 수심별 설계 조류속을 고려하였다.

해양부착생물은 정수면 위 3m~수심 10m까지 10cm, 그 이상 수심에서 5cm를 적용하였다. 비말대 부식은 정수면 위 11m~수심 6m 영역에서, 자켓 레그는 1cm, 브레이스는 0.5cm를 최대 부식두께로 적용하였다.

2.1.3 설계 하중 산정

극한환경조건 중 파랑과 조류에 의한 하중과 풍하중을 설계 하중으로 고려하였다. 설계파의 파장 246.8m 대비 가거초ORS의 최대 직경(약 8.5m)이 작으므로 식 (1)의 모리슨 공식(Dawson, 1983)을 적용하여 유체력을 산정하였다.

$$F_{hydro} = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_p u_w |u_w| + \rho_w C_M V_s \dot{u}_w \quad (1)$$

여기서, ρ_w 는 해수의 밀도($1,025 \text{ kg/m}^3$), A_p 는 속도방향의 투영단면적, V_s 는 배수체적, u_w 와 $\dot{u}_w$ 는 유체입자의 속도 및 가속도, C_D 와 C_M 는 각각 항력계수 및 관성력계수이다. 이 유체력 계수들은 미국석유회(American Petroleum Institute, 이하 API)의 규정(API, 1996)에 따라 Table 1의 값을 기본적으로 적용하며, 본 연구에서는 구조물의 부식을 방지하기 위해 레그에 부착된 양극(Anode) 등의 영향을 고려한 선행 보강 설계보고서의 값을 적용하였다.

풍하중은 API(1996)에 따라 식 (2)와 같이 산정하였다.

$$F_{wind} = \frac{1}{2} \rho_a C_h C_s A_p u_a^2 \quad (2)$$

Table 1 Drag and inertia coefficients(Woo and Sin, 2012)

Surface roughness	C_D	C_M
Smooth surface	0.65	1.6
Rough surface	1.05	1.2

Fig. 5 8 design loading cases

여기서, ρ_a 는 공기밀도(1.293 kg/m^3), C_h , C_s 는 각각 높이계수와 형상계수, u_a 는 풍속이다. API(1996)에 따라 높이계수는 정수면 위 15.3m까지 1.0, 15.3m~30.3m까지 1.1, 그 이상에서 1.2를 적용하였고, 형상계수는 자켓구조물 원형실린더 부재에 0.5, 데크 I-형 보는 1.5를 적용했다.

가장 보수적인 하중조건을 위해 바람, 파랑, 조류가 동일한 방향에서 가해진다는 가정 하에 Fig. 5와 같이 가거초ORS를 중심으로 8가지 방향의 하중을 고려하였다.

2.2 안전성 평가

2.2.1 안전성 평가 기준

안전한 설계를 제시하기 위해 최적설계 과정에서 허용응력 조건(DNV, 2001)과 허용응력비조건(AISC, 1989)을 모두 고려하였으며, 극한환경조건 하의 허용응력(σ_A)으로 항복응력(σ_Y)을 사용(API, 1996)하였다. 가거초ORS의 부재별 항복응력에 맞게 안전성 평가가 수행된다.

허용응력조건은 설계하중 하에 발생하는 등가응력(Von-mises stress)이 부재의 허용응력을 초과하지 않는 조건이며, 허용응력비조건(unity condition)은 식 (3)~(5)에 의해 계산되는 세 허용응력비(unity) 중 가장 큰 값인 임계 허용응력비(critical unity, U_{cr})가 1보다 작은 조건이다(Sim et al., 2019).

$$U_1 = \frac{\sigma_{ax}}{\sigma_{AX}} + \frac{\sigma_{by}}{\sigma_{BY}} + \frac{\sigma_{bz}}{\sigma_{BZ}} \quad (3)$$

$$U_2 = \max\left(\frac{\sigma_{vy}}{\sigma_{VY}}, \frac{\sigma_{vz}}{\sigma_{VZ}}\right) \quad (4)$$

$$U_3 = \max\left(\frac{\sigma_{ax}}{\sigma_{EY}}, \frac{\sigma_{ax}}{\sigma_{EZ}}\right) \quad (5)$$

여기서, σ_{ax} , σ_{by} , σ_{bz} , σ_{vy} , σ_{vz} 는 각각 축 방향, y 및 z축 굽힘과 전단에 대한 발생 응력이고, σ_{AX} , σ_{BY} , σ_{BZ} , σ_{VY} , σ_{VZ} , σ_{EY} , σ_{EZ} 는 각각 축 방향, y 및 z축 굽힘, 전단과 오일러 좌굴에 대한 허용응력으로, 부재직경과 단면두께 간의 비에 의해 결정된다.

2.2.2 안전성 평가 과정 검증

본 연구에서는 해양환경 정의 및 응력해석을 위해 ANSYS의 Ocean commands 기능을 사용하였으며, 그를 토대로 In-house code를 이용해 허용응력비를 평가하였다. 이 과정에 대한 검증을 위해 해양구조물 구조해석 전용 프로그램인 SACS IV(Engineering Dynamics, INC., 1995)와 결과를 비교하였다. 직관적인 검증을 위해 항력 및 관성력 계수를 1.05와 1.20으로 통일한 후, 현재의 가거초ORS 설계에 대한 구조해석 및 안전성 평가를 수행하였다. 단, 내부의 콘크리트 채움은 무시하였다.

Fig. 6은 0° 방향에서 파랑과 조류가 작용했을 때 구조물 최하단 고정점에서 발생하는 총 기초 전단력(Total base shear force)을 파랑의 한 주기에 따라 계산한 결과이며, 위상에 따라 계산된 총 기초 전단력이 두 프로그램에서 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 한 주기 내에서 가장 큰 총 기초 전단력이 발생하는 위상(phase)에서의 구조해석 결과를 기준으로 설계를 진행하는 것이 일반적(API, 1996)이므로 Table 2에서 이를 비교한 결과, 두 프로그램 중 본 연구에서 사용한 ANSYS가 약 3.6% 더 보수적이었다. SACS IV는 파 표면으로부터 해저면까지를 몇 개의 격자로 나누어 격자점 상 파입자 속도와 가속도를 계산(Engineering Dynamics, INC., 1995)하지만, ANSYS는

Fig. 6 Total base shear force under the design wave and current with incident angle of 0°

Table 2 Largest total base shear force under the design wave and current condition from 0°

	SACS	ANSYS	Relative difference rate
Force	16.975MN	17.586MN	3.59 %

Fig. 7 Largest total base shear forces by direction

Fig. 8 Members not satisfying the unity criterion(L: ANSYS with in-house code, R: SACS)

각 요소 적분점(integration point)에서 계산(ANSYS Inc., 2017)하기 때문에 보다 정확하다고 볼 수 있다.

구조 부재의 배치가 변하지 않는 한 파랑의 한 주기에서 최대하중이 작용하는 위상은 일정함(Dawson, 1983)으로 본 연구에서는 8방향 하중조건 별 최대하중이 작용하는 위상을 찾아 그 구조해석 결과를 토대로 최적설계를 실시하였다.

Fig. 7은 각 설계 하중조건 별 최대 기초 전단력을 보여주며 두 프로그램 모두 입사각 270°에서 약 21.63MN으로 가장 크다. Fig. 8은 그 설계 하중조건에서 콘크리트 채움이 생략된 가거초ORS 모델에 대한 ANSYS와 SACS의 구조해석 결과를 바탕으로 본 연구의 In-house code와 SACS 프로그램을 통해 각각 허용응력비 검사를 수행한 결과를 보여주며, 두 경우에서 유사한 결과를 확인할 수 있다.

2.3 최적설계

2.3.1 설계 케이스

Fig. 8에서 안전성 기준에 미치지 못한 부재들이 속하는 지지구조물을 대상으로 2개의 경우로 최적설계를 진행하였다.

Fig. 9 Design groups for Case-1

Fig. 10 Design groups for Case-2

Case-1은 Fig. 9와 같이 부재들을 역할에 따라 크게 세 종류(연직 레그 부재, 주요 대각 부재, 수평 및 비주요 대각 부재)로 나누었으며, Case-2는 파랑 및 조류하중, 비말대의 부식 및 부착 생물두께 등 풍하중을 제외한 모든 설계조건들이 수심에 따라 변함을 고려하여 Fig. 10과 같이 설계변수를 수심에 따라 보다 세분화하여 총 여덟 종류로 나누었다.

2.3.2 설계 변수

설계대상 부재들은 모두 중공원형단면(Woo and Sin, 2012)으로 내외경을 변경할 수 있다. 그러나 식 (1)과 (2)에서 보듯 설계하중의 크기가 부재의 투영단면과 배수체적에 의해 결정

Fig. 11 Definition of a design variable

되므로 외경이 최적화 과정의 매 반복마다 변하면 설계하중도 변하게 되어 최적화에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 내경 변화만을 고려하여 Fig. 11과 같이 현재 두께 대비 두께 변화율을 설계변수로 설정하였다. 예를 들어 설계변수가 1.34이면 현재 설계보다 부재 두께가 안쪽으로 1.34배 더 두꺼워지며 반대로 0.5이면 현재두께의 절반이 됨을 의미한다. Case-1 및 2의 같은 그룹에 속한 부재들 같은 설계변수에 의해 최적화되도록 하였다.

2.3.3 최적설계 정식화

본 연구에서 사용한 유전 알고리즘(genetic algorithm, GA)은 유전자(gene)들의 배열인 염색체(chromosome)들의 집단(population)에서, 집단 내 유전연산을 통해 새로운 세대(generation)의 집단을 생성해가는 과정을 거쳐 더 나은 해를 탐색해 나간다. 때문에 변수가 이산적이거나 문제가 비선형적일 때 효율적으로 적용할 수 있다. Fig. 12와 같이 본 연구에서 유전자는 각 설계그룹별 설계변수, 염색체는 그 설계변수들로 결정되는 자켓 구조물 설계를 의미하며 각 설계변수의 의미는 Table 3과 같다. 넓은 영역에서 효율적으로 해를 찾기 위해 식 (7)과 같이 각 설계변수를 0.00과 5.00 사이의 소수점 두 번째 자리에서 이산화된 영역 내에서 탐색하였다. 안전성이 확보된 가거초ORS 경량설계를 제시하기 위해 허용응력조건(식 (8))과 허용응력비조건(식 (9))을 제약조건으로 설정하였다. 식 (9)의 U_{cr} 은 앞서 식 (3)~(5)로 결정되며, 이 세 식의 분모인 각 방향별 허용응력은 부재별 직경과 단면두께 간 비에 따라 달라진다(AISC, 1989). 즉 설계변수가 달라지면 유용영역(R)이 변하는 비선형

Fig. 12 Chromosome(L: Case-1, R: Case-2)

Table 3 Design variables for Case-1 and Case-2

	Case-1	Case-2		
		Top	Middle	Bottom
Horizontal braces	X_1	X_1	X_2	X_3
Diagonal braces	X_2	-	X_4	X_5
Jacket legs	X_3	X_6	X_7	X_8

Fig. 13 Flow chart of optimization

적 제약조건이 주어지므로 GA를 통해 효율적으로 탐색하고자 하였다. 식 (6)과 같이 염색체(X)가 제약조건을 만족하는 유용영역에 위치할 경우($X \in R$) 설계대상의 총 무게(W)가 적합도(fitness, O)로서 최소화되며, X 가 유용영역 밖에 위치할 경우($X \notin R$) 벌칙함수(P)가 적합도로서 최소화된다. 벌칙함수는 해당 세대의 가장 큰 무게에 위반된 제약조건들의 합(penalty)을 더해 계산된다(Deb, 2000; The MathWorks, Inc., 2015). Fig. 13은 최적설계 과정을 보여준다.

$$\min O = \begin{cases} W(X) & \text{for } X \in R \\ P(X) & \text{for } X \notin R \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{s.t. } X = \{(X_1, X_2, \dots, X_n) \mid 0.00 < X_n < 5.00\} \quad (7)$$

$$(\sigma/\sigma_A) - 1 < 0 \quad (8)$$

$$U_{cr} - 1 < 0 \quad (9)$$

3. 최적설계 결과

3.1 Case-1

최적화는 총 100개의 임의의 설계로부터 시작해 Fig. 14와 같이 총 39세대까지 진행되었고, 그 중 37세대에서 수렴되었으며 그 최적해 OPT-1은 Table 4와 같다. 즉 Case-1의 경우 기존 두께에 비해 수평 부재는 1.27배, 대각 부재는 2.07배, 레그 부재는 1.37배 두꺼워짐을 알 수 있다.

극한 설계하중조건에서 OPT-1의 안전성을 검증하기 위해 8개의 입사각별 발생응력 및 허용응력비를 Table 5와 같이 정리하였다. 항복응력 250MPa인 부재직경이 작은 부재들에서 허용응력 대비 발생응력(σ/σ_A)이 50%를 상회하는 수준으로

Fig. 14 Convergence history

Table 4 OPT-1 and its weight

X_1	X_2	X_3	Weight(ton)
1.27	2.07	1.37	460.92

Table 5 Critical unity and equivalent stress of OPT-1

Loading cases(Incidence angle)	U_{cr}	σ_A		
		345MPa	290MPa	250MPa
0°	0.9888	184	65.0	175
45°	0.9947	229	74.0	154
90°	0.9993	186	69.1	182
135°	0.9949	229	75.7	173
180°	0.9718	185	67.0	172
225°	0.9835	226	71.2	153
270°	0.9765	188	65.7	178
315°	0.9940	229	70.7	170

상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 그림에도 모든 설계하중조건에서 허용응력비가 1보다 작으며 발생하는 등가응력도 부재별 허용응력과 비교해 안전함을 확인할 수 있다. 그러나 허용응력비는 모든 하중조건에서 1에 근사하게 작은 반면 등가응력은 허용응력에 비해 크게 여유가 있으므로 최적화의 과정에서 보다 주요하게 작용하는 제약조건은 허용응력비 제약조건임을 알 수 있다.

3.2 Case-2

Case-2는 설계변수가 더 많으므로 200개의 초기설계로부터 Fig. 14와 같이 76세대에 걸쳐 최적화를 진행했으며 그 결과는 Table 6과 같다. 레그 부재들 중 중간에 위치한 부재들과 유체력 및 비말대에서 벗어난 상부 부재들의 두께가 줄었으며, 다른 부재들의 두께는 커졌음을 확인할 수 있다.

OPT-2의 구조적 안전성을 확인하기 위해 허용응력비 및 발생한 등가응력의 허용응력 대비 비율을 8개의 설계하중조건

Table 6 Optimal design variables of OPT-2

	Top	Middle	Bottom
Horizontal braces	0.70	3.29	1.85
Diagonal braces	-	1.65	1.21
Jacket legs	0.84	0.75	1.41

Table 7 Largest Ucr and allowable stress ratio of OPT-2

$(U_{cr})_{max}$	$(\sigma/\sigma_A)_{max}$
0.9999	0.680

Table 8 Weight of current Gagecho ORS, OPT-1, and OPT-2(unit: ton)

	Current	OPT-1	OPT-2
Steel members	299.56	460.92	376.85
Steel piles in legs	39.17	-	-
Concrete in legs	338.87	-	-
Total weight	677.60	460.92	376.85
Weight reduction	-	-216.68	-300.75
Reduction rate	-	-31.98%	-44.38%

에서 도출해 가장 큰 값을 Table 7에 나타냈으며, 두 조건 모두 1보다 작아 설계조건 상 안전함을 확인할 수 있었다. 한편 OPT-1과 안전성을 비교해 보면 OPT-1의 최대 임계허용응력비는 0.9949였으나 OPT-2의 최대 임계허용응력비는 0.9999로 1에 보다 더 근접한 것을 알 수 있다. 등가응력의 허용응력 대비 비율은 0.680으로 OPT-1의 최대비율 0.728(입사각 90°에서 250MPa의 허용응력부재)보다 감소한 것을 확인할 수 있다.

끝으로 Table 8에서 현재 운용중인 가거초ORS와 OPT-1, OPT-2의 무게를 비교하였다. 가거초ORS는 강재, 파일 및 콘크리트를 더해 총 678톤의 재료로 건설되었으나, 본 연구에서 강재 약 461톤만으로 안전성을 확보한 설계 OPT-1을 제시하여 총 217톤의 무게가 절감된 설계를 제시하였다. 나아가 수심에 따라 설계변수를 세분화한 OPT-2를 통해 약 84톤을 추가적으로 절감해 총 300여 톤 가벼운 설계를 제시했으며, 이는 콘크리트를 포함한 현재 대비 약 45%의 무게가 절감될 수 있음을 의미한다.

4. Conclusions

본 연구에서는 가거초ORS 내 콘크리트를 배제하고 강재로만 이루어진 새 설계를 제시함으로써, 설계단계에서 표준적 안전성 평가가 가능하고, 재료적 불확실성이 적어 유지보수가 비교적 용이하며, 경량화를 통해 설치 시 운반·용선료 등의 절감에 도움이 되고자 하였다.

50년 재현주기 극한환경 및 하중조건에서 허용응력 및 허용

응력비 조건을 모두 만족하는 수준의 안전성을 확보한 설계를 목표로 하였으며, 그 안전성 평가 과정을 선행 검증한 후 최적 설계를 진행하였다. 구조부재를 역할에 따라 세 그룹으로 나눈 Case-1과 수심에 따라 보다 세분화하여 여덟 그룹으로 나눈 Case-2에 대해 각 부재그룹별 현재 치수 대비 단면두께 변화율을 설계변수로 설정하여 유전 알고리즘으로 경량화 최적설계를 탐색하였다.

그 결과 Case-1을 통해 현재 가거초ORS보다 약 217톤 더 가벼운 OPT-1을 찾았고, 설계변수를 세분화한 Case-2에서는 약 84톤을 추가적으로 경량화하여 현재 대비 약 45%의 무게를 절감한 OPT-2를 얻었다. 결론적으로 레그 내 콘크리트 없이도 극한조건에서 허용응력 및 허용응력비를 모두 만족하는 경량화된 가거초ORS 설계를 제시했다.

추후 해상풍력발전 등 다양한 자켓식 해양구조물 설계에 이 방법이 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 더 나아가 본 연구에서 다룬 단순 재료절감 뿐 아니라 강재 및 콘크리트의 단가를 고려한 경제성 분석을 토대로 비용 최소화를 위한 최적설계가 진행될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1048396; No. NRF-2021R1C1C200971911).

References

- American Institute of Steel Construction (AISC) Inc. (1989) Allowable Stress Design and Plastic Design, 9th edition.
- American Petroleum Institute (API) (1996) Recommended Practice for Planning Designing, and Constructing Heliports for Fixed Offshore Platforms, 4th edition.
- ANSYS Inc. (2017) ANSYS Mechanical APDL Command Reference Release 17.1.
- Atkins Engineering Services (1990) Fluid Loading on Fixed Offshore Structures, OTH 90 322.
- Dawson, T.H. (1983) *Offshore Structural Engineering*, New Jersey : Prentice-Hall.
- Deb, K. (2000) An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms, *Comput. Methods Appl. Mech. & Eng.*, 186(2-4), pp.311~338.
- Det Norske Veritas (DNV) (2001) Helicopter Decks, DNV-OS-E401.
- Engineering Dynamics, INC. (1995) SACS IV Release 4 User's Manual.

- Jung, T.-W., Kim, B.-M., Ha, S.-H.** (2017) A Study on Lightweight Design of Cantilever-type Helideck Using Topology Optimization, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 30(5), pp.453~460.
- Kim, B., Kim, C., Yi, J.-H.** (2019) Model Updating for Gageocho Ocean Research Station Structure Using Structural Dynamic Characteristics, *J. Coast. Disaster Prev.*, 6(3), pp.103~110.
- Kim, W., Yi, J.H., Min, I.K., Shim, J.S.** (2017) Estimation of Dynamic Characteristics of Gageocho Ocean Research Station using Long-term Measurement Data, *Journal of Coastal Disaster Prevention*, 4(5) [Special issue], pp.263~270.
- Kim, W.C., Chung, T.J.** (2014) Topology Optimization of Offshore Wind-Power Turbin Substructure using 3D Solid-Element Model, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, 36(3), pp.309~314.
- Sim, K., Kim, B., Kim, C., Ha, S.-H.** (2019) Structural Design Optimization of Lightweight Offshore Helidecks Using a Genetic Algorithm and AISC Standard Sections, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 32(6), pp.383~390.
- The MathWorks, Inc.** (2015) *MATLAB and Global Optimization Toolbox Release 2015a*, Natick, Massachusetts, United States.
- Woo, C., Sin, J.** (2012) Precision Safety Diagnosis and Disaster Recovery Design of Gageocho Ocean Research Station, Report No. BSPE98689-10169-7, Korean Ocean Research & Development Institute, 2012.

요 지

가거초 해양과학기지 자켓 구조물 내 콘크리트를 배제하고 강재로만 이루어진 최적설계를 제시한다. 50년 재현주기 극한하중조건에서 허용응력 및 허용응력비 조건을 모두 만족하는 안전한 경량 설계를 목표하였다. 역할에 따라 부재를 세 그룹으로 나눈 설계 조건(Case-1)과 보다 세분화한 설계 조건(Case-2)에 대해 각 부재그룹별 현재 단면 두께 대비 두께 변화율을 설계변수로 설정한 유전 알고리즘을 통해 최적설계를 탐색하였다. 그 결과 Case-1의 결과로 현재 가거초 해양과학기지보다 약 217톤 더 가벼운 설계(OPT-1)를 찾았고, Case-2에서는 추가적으로 약 84톤을 경량화하여 현재 대비 약 45%의 무게를 절감한 설계(OPT-2)를 얻을 수 있었다. 결론적으로 레그 내 콘크리트 보강 없이도 극한조건에서 허용응력 및 허용응력비를 모두 만족시킬 수 있는 경량화된 가거초 해양과학기지 설계를 제시하였다.

핵심용어 : 자켓 구조물, 구조 최적설계, 유전 알고리즘, 허용응력비 검사, 가거초 해양과학기지