한국기계가공학회지, 제20권, 제5호, pp. 85～95(2021.05) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 20, No. 5, pp. 85~95(2021.05) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2021.20.05.085

직교배열실험 방법 기반 해양플랜트 플로트오버 설치 공법용 수동형 DSF의 구조설계 민감도와 메타모델링 평가

이동준*, 송창용*,#

*목포대학교 조선해양공학과

Evaluation on Structure Design Sensitivity and Meta-modeling of Passive Type DSF for Offshore Plant Float-over Installation Based on Orthogonal Array Experimental Method

Dong-Jun Lee*, Chang Yong Song*,#

*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National University

(Received 18 January 2021; received in revised form 03 February 2021; accepted 15 February 2021)

ABSTRACT

Structure design sensitivity was evaluated using the orthogonal array experimental method for passive-type deck support frame (DSF) developed for float-over installation of the offshore plant. Moreover, approximation characteristics were also reviewed based on various meta-models. The minimum weight design of the DSF is significantly important for securing both maneuvering performance and buoyancy of a ship equipped with the DSF and guaranteeing structural design safety. The performance strength of the passive type DSF was evaluated through structure analysis based on the finite element method. The thickness of main structure members was applied to design factors, and output responses were considered structure weight and strength performances. Quantitative effects on the output responses for each design factor were evaluated using the orthogonal array experimental method and analysis of variance. The optimum design case was also identified from the orthogonal array experiment results. Various meta-models, such as Chebyshev orthogonal polynomial, Kriging, response surface method, and radial basis function-based neural network, were generated from the orthogonal array experiment results. The results of the orthogonal array experiment were validated using the meta-modeling results. It was found that the radial basis function-based neural network among the meta-models could approximate the design space of the passive type DSF with the highest accuracy.

Key Words : Passive Type DSF(수동형 갑판지지 프레임), Orthogonal Array Eexperimental Method(직교배열실험 방법), Structure Design Sensitivity(구조설계 민감도), Meta-model(메타모델), Float-over Installation(플로트오버 설치공법)

1. 서 론

해양플랜트의 효율 증대와 관련하여 상부구조물(Topside)이 초대형화되고 있으며, 초대형 상부구조물의 안전한 운반과 설치를 위한 새로운 공법 개발과 이에 필요한 구조시스템 설계의 중요성이 대두되고 있다. 플로트오버 설치 공법(Float-over

Corresponding Author : cysong@mokpo.ac.kr
Tel: +82-61-450-2732, Fax: +82-61-452-7774

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 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.

installation)은 완성된 수만톤 규모의 상부구조물을 부두에서 운반 및 설치 전용 선박에 탑재하고, 해양플랫폼으로 안전하게 이송하여 설치하는 것을 목적으로 한다. 플로트오버 설치 공법에 필요한 구조시스템 중 고중량의 상부구조물을 안전하게 지지하고 운반하기 위한 갑판 지지 프레임(Deck support frame, DSF)은 실제 운용 조건이 반영된 선급 규정을 적용하여 설계되어야 한다. DSF는 플로트오버 공법의 규모나 목적에 따라 새로운 형식으로 개발되어야 하며 구조설계 안전성의 확보와 함께 DSF가 탑재되는 특수선박의 운동성능과 부력확보를 위해 최소중량설계가 매우 중요하다.

해양구조물의 설계분석과 관련하여 통계적 방법을 이용한 연구가 일부 수행되었다. FPSO(Flaoting Production Storage & Offloading)의 플레어 시스템용 파이프라인 서포트의 최소중량설계를 위해 진화알고리즘을 적용하여 강도 제한조건을 만족하도록 최적화를 수행하였다[1]. FPSO 라이저 장치의 신뢰성 기반 설계 최적화를 위해 보수적 근사모델인 제한조건 가용성 이동최소자승법이 설계위험도를 최소화하기 위해 적용되었다[2]. 고압용 사중편심형 밸브의 설계 안전도 평가를 위해 설계파라미터 분석과 시팅 토크의 응답함수에 대한 분산분석이 수행되었다[3]. 함정용 탄성마운트의 강도와 동특성을 고려한 배치설계 최적화를 위해 유전 알고리즘이 응용되었다[4]. 상선에 장착되는 항해통신용 레이더 마스트에 대해 주기관의 기진력에 의한 공진문제의 해결과 중량감소설계를 위해 실험계획법이 응용되었다[5].

본 연구에서는 해양플랜트 플로트오버 공법을 위해 개발된 수동형 DSF의 구조성능 민감도 분석과 최소중량설계를 위해 직교배열실험 방법 기반 구조설계 민감도평가와 다양한 메타모델을 적용하여 설계공간의 근사화 특성을 고찰하였다. 직교배열실험과 같은 통계적 기법을 새로운 형식의 구조시스템 설계과정에서 응용하면 설계공간 탐색을 효율적으로 수행할 수 있고, 최적설계 방안을 용이하게 도출할 수 있다. 수동형 DSF의 초기설계에 대한 구조안전성을 평가하기 위해 선급 규정에 따른 설계하중조건을 산정하였으며, 유한요소법(Finite Element Method, FEM) 기반 3차원 구조해석모델을 생성하였고, 구조해석 결과로부터 설계하중조건 별 구조성능을 검토하였다. FEM 모델과 구조해석 결과는 직교배열실험과 연동하였으며, 설계인자는 주요 구조부재의 두께 치수를 적용하였고, 성능 응답함수는 중량과 설계하중조건 별로 산출된 응력을 적용하였다. 민감도평가는 직교배열실험 결과를 이용하여 설계인자 별 성능 응답함수에게 대한 영향도를 정량적으로 평가하였고, 모든 설계하중조건에서 허용응력을 만족하면서 중량을 최소화할 수 있는 최적 설계조합을 탐색하였다. 직교배열실험의 결과로부터 체비쇼프 직교 다항식(Chebyshev Orthogonal Polynomial, COP), 크리깅 모델(Kriging), 반응표면법(Response Surface Method, RSM) 그리고 방사기저함수 기반 신경망(Radial Basis Function based Neural network, RBFN)과 같은 다양한 메타모델을 생성하였다. 메타모델별로 설계공간을 근사화할 수 있는 정확도를 분석하여 직교배열실험 결과의 적합성을 검증하였다. 수동형 DSF의 설계공간에 대해 RBFN이 가장 높은 정확도로 근사화할 수 있는 것으로 나타났다.

2. 수동형 DSF의 구조해석

DSF는 건조된 상부구조물의 운반 및 설치를 목적으로 해양플랜트 설치 선박 (Deck Transportation Vessel, DTV)의 갑판에 장착되는 구조 시스템이다. 본 연구에서 고려된 수동형 DSF는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 20,000톤급 상부구조물의 운반 및 설치를 위해 개발되었으며, DSF의 중앙부에 상부구조물 설치 시 높이를 미세하게 조절하기 위한 갑판지지 장치(Deck Support Unit, DSU)를 내장할 수 있도록 고안되었다. Fig. 1의 (a)에 보인 바와 같이 플로트오버 공법에서 상부구조물은 DTV의 무게중심부에 연결된 수동형 DSF 상에 탑재되어 해양유전에 미리 설치된 해양플랫폼에 설치된다. Fig. 1의 (b)에 나타난 것처럼 수동형 DSF는 중앙부에 DSU가 탑재되고, 폭 14m와 높이 6m로 설계되었다. 또한, DTV에는 고중량의 상부구조물로 인한 DTV 갑판의 과도한 변형을 방지할 수 있도록 폭 40m의 Grillage가 장착되고, Grillage의 상면에 수동형 DSF가 탑재된다. 수동형 DSF의 초기설계에 대한 구조 안전성을 평가하기 위해 먼저 실

제 작동조건과 관련된 선급규정을 적용하여 설계하중조건을 산정하였다. 구조성능 평가는 FEM 기반 3차원 구조해석모델을 생성하고, 설계하중조건과 경계조건을 구조해석모델에 적용하여 구조해석 결과를 산출한 후에 각각의 설계하중조건 별 최대 응력을 검토하는 순서로 수행하였다.

2.1 Design load cases

수동형 DSF의 구조성능평가를 위한 설계하중조건은 해양설치 및 운반과 관련된 선급규정을 적용하여 Table 1과 같이 구성하였다[6-9].

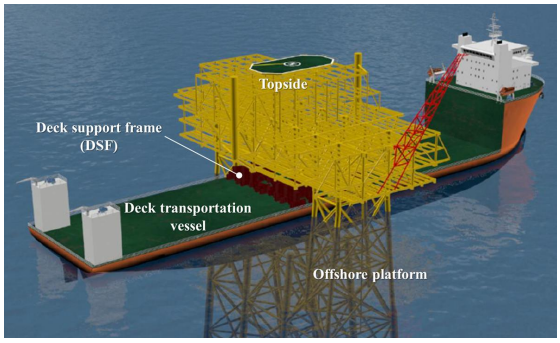
Table 1에 나타난 것처럼 설계하중조건은 설치가 완료된 상부구조물을 수동형 DSF에 장착하고 DTV로 이동하는 작업조건인 Weighing(LC1), Initial(LC2) 및 Skidding(LC3)의 3가지 Load-out 조건과 상부구조물 및 수동형 DSF를 설치한 DTV가 해양플랫폼으로 이동하는 조건인 Transport(LC4)로 구성하였다. LC1은 수동형 DSF가 고중량의 상부구조물을 안전하게 탑재할 수 있는지를 평가하기 위해 상부구조물 중량지지 보 구조 (Topside weighing beam) 부분을 고정하고 상부구조물의 중량을 하중으로 적용하는 조건이다.

LC2는 Load-out 작업 전에 Weighing 분석이 완료된 후 상부구조물의 무게중심을 고려하여 수동형 DSF에 상부구조물이 부착된 상태에서 구조 안전성을 평가하는 조건이다. LC3는 상부구조물의 연결이 완료된 수동형 DSF를 DTV에 이송하는 조건이다.

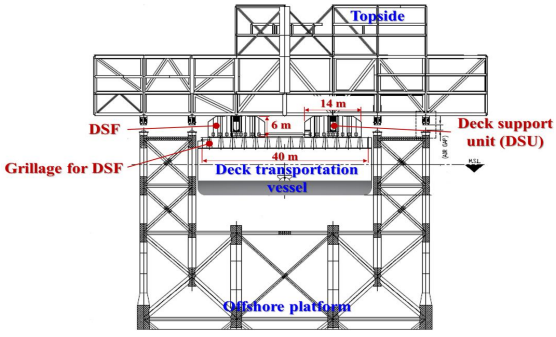
LC4는 상부구조물을 부착한 수동형 DSF를 DTV의 Grillage에 장착 및 고박하여 해상에서 이동하는 조건이다. Table 1에 정리된 설계하중조건은 구조해석을 위한 하중조건으로 사용하였으며, 적용된 하중 및 경계조건은 Fig. 2에 상세히 나타내었다.

Table 1 Design load cases

Operation conditions	Design load cases	References to rule & guidance
Load-out	LC1 - weighing LC2 - initial LC3 - skidding	- Guidelines for load-outs - Load transfer operations
Transportation	LC4 - transport	- Guidelines for marine transportation - Offshore installation operations

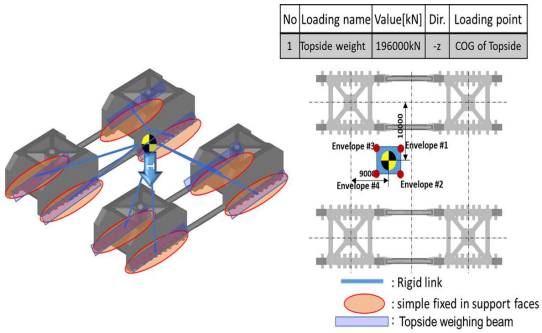


(a) ISO view



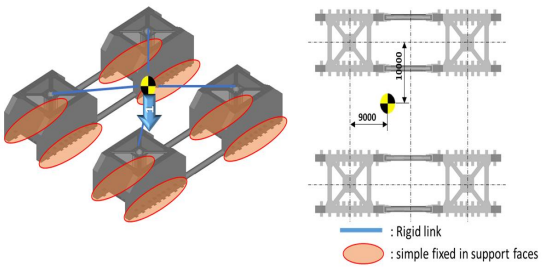
(a) Front view

Fig. 1 Topside mating procedure via float-over installation with passive type DSF



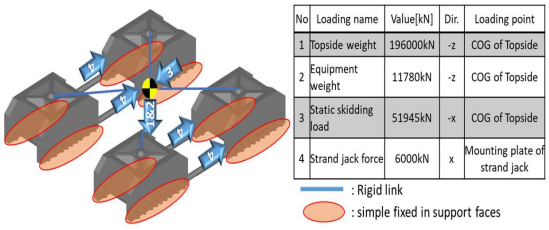
(a) LC1 - weighing

No	Loading name	Value[kN]	Dir.	Loading point
1	Topside weight	196000kN	-z	COG of Topside



(b) LC2 – initial

No	Loading name	Value[kN]	Dir.	Loading point
1	Topside weight	196000kN	-z	COG of Topside
2	Equipment weight	11780kN	-z	COG of Topside
3	Static skidding load	51945kN	-x	COG of Topside
4	Strand jack force	6000kN	x	Mounting plate of strand jack



(c) LC3 – static skidding

Fig. 2 Load and boundary conditions

Table 1 및 Fig. 2에 정리한 바와 같이 LC1의 하중 및 경계조건은 상부구조물의 중량을 하중으로 적용하여 무게중심에서 중력방향으로 적용하였고, 상부구조물의 중량지지 보 구조 고정부 상에 병진방향 자유도를 구속하였다. LC2의 하중 및 경계조건은 상부구조물 중량의 하중을 무게중심에서 중력방향으로 적용하였고, 수동형 DSF의 하단부 표면상에 병진방향 자유도를 구속하였다. LC3의 하중 조건은 상부구조물 중량과 Load-out 장비의 하중을 무게중심에서 중력방향으로 적용하고, Strand jack의 유압작동력을 Load-out 방향으로 고려하였다. 또한, 선급규칙에 제시된 다음의 식과 같은 Static skidding force (F_s)을 Load-out 방향의 반대방향으로 적용하였다[6,8].

$$F_s = \mu_{ud,s}(W + W_{eq}) + P_s \quad (1)$$

where

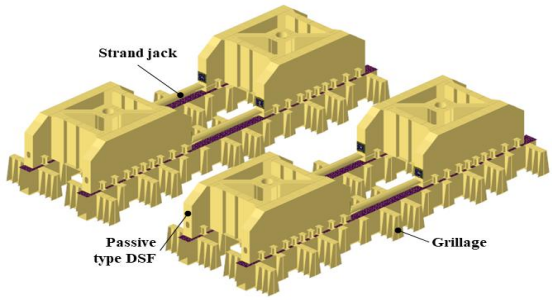
$\mu_{ud,s}$: static upper bound design friction coefficient (0.3)

W : topside weight

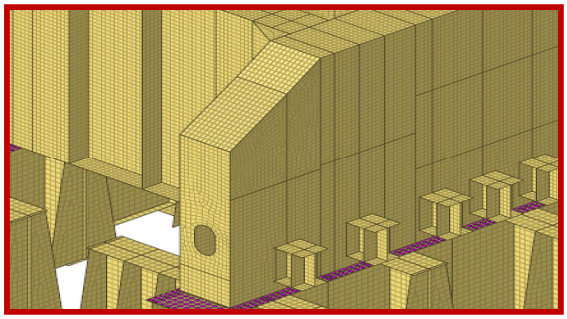
W_{eq} : load-out equipment weight

P_s : inertial load or environmental load occurring during break-out

LC3의 경계조건은 수동형 DSF의 하단부 표면상에 병진방향 자유도를 구속하였다. LC4의 하중조건은 상부구조물 중량의 하중을 무게중심에서 중력방향으로 적용하고, DTV의 운동해석[10]을 통해 산정된 방향 별 운동 가속도를 관성하중으로 적용하였다. LC4의 경계조건은 수동형 DSF가 DTV에 설치된 상태를 고려하기 위해 수동형 DSF와 Grillage가 만나는 부분에 접촉조건(Contact condition)을 적용하였고, 수동형 DSF를 DTV 갑판에 고정하는 8개의 Steel tension wire를 1차원 강체 요소로 이상화하고 병진방향 자유도를 구속하였다. 구조성능 평가를 위한 허용응력은 해양구조물설계에 적용되는 사용응력 설계법[11]을 적용하여 재료 항복응력의 85%로 산정하였다.



(a) Overall view



(b) Detail view of mesh model

Fig. 3 FEM model of passive type DSF

2.2 Structure Analysis Results

수동형 DSF의 구조성능은 FEM 기반의 구조해석을 통해 평가하였다. Fig. 3에 나타내 것처럼 LC4 조건을 기준으로 수동형 DSF의 유한요소해석 모델은 717,452개의 요소와 654,452개의 절점으로 구성되었고, 주요 구조부재는 3 절점 및 4 절점 감차 적분 Shell 요소로, 하중적용부와 고박용 Steel tension wire는 Kinematic coupling constraint로 각각 모델링하였다.

DSF의 고박을 위해 사용되는 Steel tension wire는 고강도 강재 체인이고 변형이 거의 없도록 계류장치를 사용하여 인장상태를 유지하기 때문에 유한요소모델에서는 Kinematic coupling constraint로 이상화하였다. 수동형 DSF의 구조부재 중 Tube 형상 부재는 API-5L-X52의 재질이 적용되었고, 그 외의 모든 부재는 SM490YB 재질이 적용되었다. 재질에 따른 특성치는 Table 2에 정리하여 나타내었다.

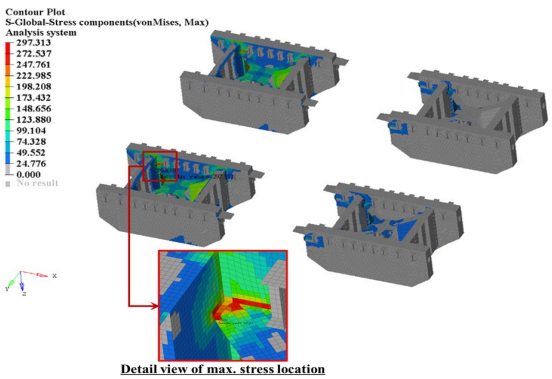
허용응력은 선급규정에 따라 재료 항복응력의 85%를 기준으로 SM490YB 재질은 301.75MPa, API 5L X52 재질은 318.75MPa로 각각 산정하였다. 구조해석은 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS/Implicit[12]를 사용하여 수행하였다. 구조해석 결과는 von-Mises 응력을 기준으로 Table 3에 정리하였다. Table 3에 나타난 것처럼 수동형 DSF의 최대응력은 모든 설계하중조건에서 선급규정의 허용응력을 만족하였다. SM490YB 재질의 구조부재의 경우 전체적인 응력 수준이 API-5L-X52 재질의 구조부재보다 높게 나타났다. 수동형 DSF의 최대응력수준은 LC3에서 297.3MPa로 나타났으며, 허용응력의 한계상태에 매우 가깝기 때문에 설계시 주의가 필요한 설계하중조건으로 나타났다. 응력분포결과는 LC3에 대해서 대표적으로 Fig. 4에 나타내었다.

Table 2 Material properties

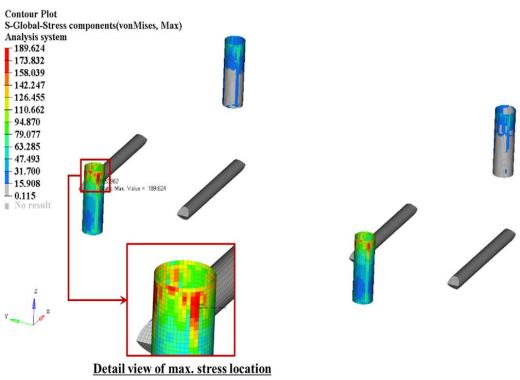
Material properties	SM490YB	API-5L-X52
Elastic modulus [N/mm^2]	206,000	208,000
Poisson's ratio	0.3	0.3
Density [N-s^2/mm^4]	7.85E-9	7.85E-9
Yield strength [MPa]	355	375

Table 3 Structure analysis results

Design load cases	Max. stress [MPa]		Structure safety
	SM490YB	API-5L-X52	
LC1	244.023	0.952	OK
LC2	194.926	120.139	OK
LC3	297.313	189.624	OK
LC4	153.521	103.403	OK



(a) Structure member of SM490YB



(b) Tube member of API-5L-X52

Fig. 4 Stress contour results of LC3

Fig. 4에 나타난 것처럼 LC3 조건에서 수동형 DSF의 최대 응력은 SM490YB 재질의 구조부재 중 하단부의 내부 연결부재에서 발생하였다. API-5L-X52 재질의 구조부재의 최대응력은 SM490YB 재질의 구조부재의 최대응력이 발생한 위치에 연결된 Tube 부재에서 발생하였다.

3. 구조설계 민감도 평가

구조설계 민감도해석에서는 직교배열실험 방법을 이용하여 수동형 DSF의 초기설계의 구조성능 및 중량에 대한 구조설계의 영향도를 분석하고, 허용응력을 초과하지 않으면서 중량이 최소화되는 설계인자의 최적조합을 탐색하였다. 직교배열실험 방법은 설계인자의 응답함수에 대한 주효과(Main effect)와 설계인자 간의 교호작용(Interaction)을 분석하고, 영향도가 낮은 설계인자 간의 교호작용과 고차 교호효과의 정보를 제거하여 실험횟수를 줄이는 실험계획법이다[13]. 본 연구에서는 다음의 식과 같은 3 수준계의 실험을 수행하였다.

$$L_{3^m}\left[3^{(3^m-1)/2}\right] \tag{2}$$

여기서 m은 2 이상의 정수이며 3^m은 실험의 크기, $(3^m-1)/2$는 직교배열실험에서 열의 수를 나타낸다. 수동형 DSF의 구조설계 영향도 평가를 위해 수동형 DSF의 주요 구조부재 두께 치수를 3 수준 설계인자(Design Factor, DF)로 정의하였고, Table 3에 나타난 설계하중조건 별 최대응력과 중량을 응답함수(Output response)로 설정하였다. 설계인자의 상·하한 수준은 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5와 같이 설계인자와 범위는 초기설계를 기준으로 하한과 상한의 3수준으로 설정하였다. 직교배열표는 Table 4에 나타낸 것처럼 설계인자 배치를 위한 별도의 정보를 사용하지 않고, 3수준의 변동에 따른 주효과와 교호작용이 적절히 산출될 수 있는 설계인자 배치설정 방법[13]에 따라 총 243회의 직교배열 실험행렬을 구성하였다.

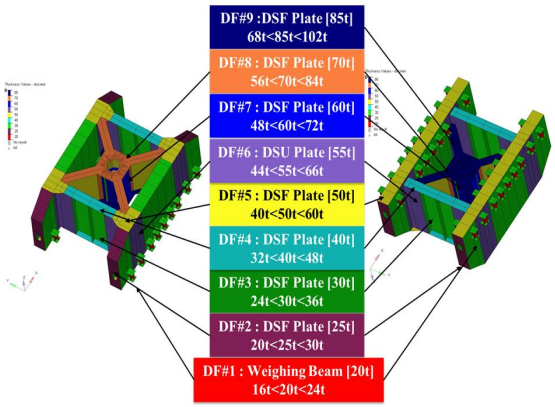


Fig. 5. Design factors and their level

Table 5 Orthogonal array experiment matrix

Design factors [mm]									
Run	DF#1	DF#2	DF#3	DF#4	DF#5	DF#6	DF#7	DF#8	DF#9
1	16	20	24	32	40	44	48	56	68
2	16	20	24	32	50	55	60	70	85
3	16	20	24	32	60	66	72	84	102
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
241	24	30	36	48	40	66	60	70	68
242	24	30	36	48	50	44	72	84	85
243	24	30	36	48	60	55	48	56	102

Output responses [Mass: Ton; Stress: MPa]					
Run	Mass	LC1 Stress	LC2 Stress	LC3 Stress	LC4 Stress
1	1,080.8	284.298	233.432	369.674	195.125
2	1,229.3	284.430	200.051	311.489	163.571
3	1,377.8	284.543	180.205	274.621	144.945
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
241	1,457.8	184.110	227.955	370.416	198.296
242	1,418.2	183.999	206.448	317.155	167.433
243	1,482.7	184.066	192.529	300.120	164.193

Table 4 Orthogonal array table

Run	a	b	ab	ab^2	c	ac	ac^2	bc	abc	ab^2c^2	bc^2	ab^2c	abc^2	d	…
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	…
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	…
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	…
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
241	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	…
242	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	…
243	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	…

a: DF#1, b: DF#2, c: DF#3, d: DF#4

또한 부적절한 교락효과가 직교배열표에 구성되었는지 여부를 확인하기 상용 프로그램인 iSIGHT[14]을 통해 검토하였으며, Table 4의 직교배열표는 상용 프로그램과 동일한 결과를 나타내었음을 확인하였다. 직교배열 실험행렬에서 설계인자의 변동에 따른 최대응력과 중량의 응답함수 결과는 Table 5에 정리하였다.

직교배열표 결과로부터 설계하중조건 별 최대응력 및 중량의 응답함수에 대한 설계인자의 정량적 영향도를 검토하기 위해 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 수행하였고, ANOVA의 주요 항목인 자유도(DoF), 제곱합(SS), 평균제곱(MS), 검정통계량(F), 및 유의확률(P)을 산출하여 Tables 6~10에 정리하여 나타내었다.

Table 6 ANOVA results of weight

Factor	DoF	SS	MS	F	P (%)
DF#1	2	7,325.9	3,662.9	4,127,115.5	0.3
DF#2	2	3,800.0	1,900.0	2,140,762.4	0.1
DF#3	2	1,457,455.6	728,727.8	821,073,824.1	56.7
DF#4	2	4,720.7	2,360.3	2,659,447.9	0.2
DF#5	2	383,016.7	191,508.3	215,776,713.3	14.9
DF#6	2	636,818.8	318,409.4	358,758,962.7	24.8
DF#7	2	33,322.1	16,661.1	18,772,401.2	1.3
DF#8	2	30,197.9	15,098.9	17,012,320.9	1.2
DF#9	2	13,704.3	6,852.2	7,720,482.4	0.5

Table 7 ANOVA results of LC1 stress

Factor	DoF	SS	MS	F	P (%)
DF#1	2	311,227.1	155,613.5	63,380.2	97.5
DF#2	2	0.0	0.0	Pooled	-
DF#3	2	7,343.7	3,671.8	1,495.5	2.3
DF#4	2	0.0	0.0	Pooled	-
DF#5	2	0.0	0.0	Pooled	-
DF#6	2	1.5	0.7	Pooled	-
DF#7	2	4.9	2.5	Pooled	-
DF#8	2	0.0	0.0	Pooled	-
DF#9	2	0.0	0.0	Pooled	-

Table 8 ANOVA results of LC2 stress

Factor	DoF	SS	MS	F	P (%)
DF#1	2	11.1	5.6	Pooled	-
DF#2	2	13.4	6.7	Pooled	-
DF#3	2	1114.4	557.2	22.5	2.1
DF#4	2	3.6	1.8	Pooled	-
DF#5	2	15849.2	7924.6	320.5	30.5
DF#6	2	19120.7	9560.3	386.6	36.9
DF#7	2	3.5	1.7	Pooled	-
DF#8	2	1115.4	557.7	22.6	2.1
DF#9	2	8799.9	4400.0	177.9	16.9

Table 9 ANOVA results of LC3 stress

Factor	DoF	SS	MS	F	P (%)
DF#1	2	326.5	163.2	Pooled	-
DF#2	2	469.0	234.5	Pooled	-
DF#3	2	4591.2	2295.6	22.9	3.1
DF#4	2	50.4	25.2	Pooled	-
DF#5	2	31827.0	15913.5	158.6	22.2
DF#6	2	15032.4	7516.2	74.9	10.4
DF#7	2	214.0	107.0	Pooled	-
DF#8	2	9099.0	4549.5	45.3	6.2
DF#9	2	58873.4	29436.7	293.4	41.1

Table 10 ANOVA results of LC4 stress

Factor	DoF	SS	MS	F	P (%)
DF#1	2	211.8	105.9	4.1	0.4
DF#2	2	260.2	130.1	5.1	0.5
DF#3	2	1145.1	572.6	22.2	2.6
DF#4	2	6.1	3.1	Pooled	-
DF#5	2	10406.6	5203.3	202.1	25.1
DF#6	2	2240.0	1120.0	43.5	5.3
DF#7	2	61.7	30.8	Pooled	-
DF#8	2	4191.0	2095.5	81.4	10.0
DF#9	2	16986.6	8493.3	329.8	41.0

중량 응답에 대한 ANOVA 결과는 Table 6에 나타난 것처럼 설계인자의 중요도, 즉 유의확률이 높은 설계인자는 DF#3, DF#6, DF#5, DF#7, DF#8, DF#9, DF#1, DF#4 그리고 DF#2의 순서로 나타났다. Table 7의 LC1에 대한 ANOVA 결과로부터 DF#1의 유의확률이 97.5%로 가장 높게 나타난 반면, 다른 설계인자의 영향도는 낮게 나타났다. 이러한 현상은 다른 설계하중조건과 다르게 LC1의 구속조건 위치가 상부구조물 중량지지 보 구조부이고, 이 부분에 응력이 집중되었기 때문이다. 검정통계량 F의 값 중 합동(Pooled)의 결과는 통계적 유의성이 없는 것을 의미한다. Table 8의 LC2에 대한 ANOVA 결과는 DF#6과 DF#5의 유의확률이 36.9%와 30.5%로 높게 나타났다. Table 9와 10의 LC3와 LC4에 대한 ANOVA 결과로부터 DF#9와 DF#5의 유의확률이 41.1%와 22.2%, 그리고 41.0%와 25.1%로 각각 동일한 순서로 나타났다. 이와 같이 민감도해석을 통해 DF#1, DF#5, DF#6 및 DF#9의 설계인자가 구조성능 응답에 가장 중요한 것으로 나타났고, DF#3, DF#7, DF#8은 중량대비 구조성능에 대한 영향도가 높지 않은 것으로 분석되었다.

Table 11 Optimum design factor & output response

Contents		Initial design	Optimum design
Design factor	DF#1 [mm]	20	20
	DF#2 [mm]	25	30
	DF#3 [mm]	30	24
	DF#4 [mm]	40	48
	DF#5 [mm]	50	40
	DF#6 [mm]	55	66
	DF#7 [mm]	60	48
	DF#8 [mm]	70	70
	DF#9 [mm]	85	102
Output response	Weight [Ton]	1341.1	1265.4
	LC1 stress [MPa]	244.02	229.08
	LC2 stress [MPa]	194.93	199.42
	LC3 stress [MPa]	297.31	298.6
	LC4 stress [MPa]	153.52	167.6

Table 5의 직교배열실험 결과 중 모든 설계하중 조건에서 각 재료의 허용항복응력인 SM490YB 재질에서 301.75MPa, API-5LX-52 재질에서 318.75MPa 이하이면서 중량이 최소화되는 설계인자의 최적 조합을 검토하였고, 초기설계와 비교하여 Table 11에 정리하였다. Table 11에 보인 바와 같이 설계인자의 최적 조합은 DF#2, DF#4, DF#6 및 DF#9는 상한 수준의 두께 치수로 증가하였고, DF#3, DF#5 및 DF#7은 하한 수준으로 두께 치수가 감소하였으며, DF#1과 DF#8은 초기설계로 유지되었다. 설계인자의 최적조합에서 응답함수 중 중량은 초기설계 대비 5.7% 감소하였다. LC1의 응력은 초기설계 대비 6.1% 감소한 반면, LC2, LC3 및 LC4의 응력은 2.3%, 0.4% 및 9.2%로 각각 증가하였지만 모두 허용응력을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 메타모델링 평가

메타모델은 통상 직교배열실험과 같은 실험계획법으로부터 생성된다. 따라서 실험계획법에서 수행된 실험의 횟수, 설계인자 수준, 실험계획 이론의 선정 등과 같은 전반적인 실험계획법의 적합성은 생성된 메타모델의 정확도를 검토하여 검증될 수 있다[15]. 한편 설계문제에 적합한 메타모델을 확보하면 높은 계산비용이 요구되는 최적화해석, 강건해석, 신뢰성해석 등에 적용하여 수치비용을 매우 낮출 수 있기 때문에 높은 정확도의 메타모델 생성은 설계공간 탐색연구에서 매우 중요하다. 수동형 DSF의 구조설계에 대한 직교배열실험 결과로부터 COP, Kriging, RSM 그리고 RBFN의 메타모델을 생성하였고, 메타모델링 결과의 정확도를 검토하여 직교배열실험 결과의 적합성을 검증하였다.

2차 회귀모델의 COP는 체비쇼프 직교다항식 $P_n(x)$을 이용하여 다음과 같이 정의된다[16].

$$\tilde{g}(x)_C = b_0 + b_1 p_1(x)^2 + b_2 p_2(x) + b_3\left[p_1(x)^3 - \frac{3a^2-7}{20} p_1(x) h^2\right] + b_n p_n(x) + \cdots \quad (3)$$

$$where$$

$$p_0(x) = 1, n = 0$$

$$p_1(x) = x - \bar{x}, n = 1$$

$$p_2(x) = (x-\bar{x})^2 - \frac{a^2-1}{12} h^2, n = 2$$

$$p_n(x) = p_{n-1}(x) p_1(x) - (n-1)^2 [a^2 - (n-1)^2] h^2 p_{n-1}(x) / [4(4(n-1)^{2-1})], n = 3, 4, 5, \cdots$$

여기서 $\bar{x}$는 설계변수의 평균치, a는 수준수, h는 수준 간격계수이다. b는 근사계수이며 다음의 식과 같다.

$$b_0 = \bar{g}_C \quad (4)$$

$$b_n = \frac{\sum_{k=1}^{a} p_n(x_k) g_{C_k}}{\sum_{k=1}^{a} p_n^2(x_k)}, k = 1, 2, \cdots, a$$

Kriging은 근사할 설계공간함수의 전체 모델과 실제 함수와 전체 모델 간의 편차에 해당하는 국부모델의 합으로 정의된다[17].

$$\tilde{g}(x)_K = Z(x)^T A_k + E(x) \quad (5)$$

여기서 A_K는 미지계수의 벡터이고, $Z(x)$는 전역모델 벡터이며, $E(x)$는 설계 데이터들의 공간적인 상관관

계로서 가우스(Guass) 상관함수로 정의된다.

RSM은 최소자승방법을 이용하여 다음의 2차 다항식 형태의 회귀모델로 표현된다[15].

$$g = A_0 + \sum_{i=1}^{k} A_i Z_i + \sum_{i=1}^{k} A_{ii} Z_i^2 + \sum\sum_{i<1}^{k} A_i Z_i Z_j + e \quad (6)$$

n개의 실험점으로부터 반응벡터 g와 k개의 기저변수로 정의되는 행렬 Z가 주어지면, g와 Z의 관계로부터 랜덤오차 벡터 e를 최소화하여 미지의 RSM 근사계수 벡터 A_R이 다음의 식으로부터 산출된다.

$$A_R = (Z^T Z)^{-1} Z^T g \quad (7)$$

상기의 식으로부터 계산된 근사계수를 적용하면 RSM 2차 회귀근사모델을 생성할 수 있다.

방사형 기저 함수 기반 신경망 모델인 RBFN은 산란된 다변량 데이터를 높은 정확도로 근사화하기 위해 개발되었다[18]. RBFN은 응답함수를 근사화하기 위해 유클리드 거리(Euclidean distance)를 이용하여 방사 대칭 함수의 선형조합을 사용한다. 신경망의 노드 집합 $x_1, \cdots, x_n \in \Omega \subset R^n$이 주어지면 RBFN의 기저함수는 다음과 같이 정의된다.

$$g_j(x) = \phi(\| x - x_j \|) \in R,\ j = 1, \cdots, n \quad (8)$$

여기서 ϕ는 멱 스플라인 기저함수이고, 놈(Norm) $\| x - x_j \|$는 유클리드 거리이다. 유클리드 거리를 사용하면 신경망의 입력층 데이터가 균일 클러스터로 분류된다. 멱 스플라인 기저함수는 다음과 같의 정의된다.

$$\phi = r^c \quad (9)$$

여기서 c는 양의 상수 값인 형상함수의 변수이다. 입력 데이터 $x_1, \cdots, x_n \in \Omega \subset R^n$에 대해 근사화할 응답 데이터 $y_1, \cdots, y_n \in \Omega \subset R^n$가 주어지면, RBFN 근사모델은 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{g}_{RBF}(x) = \sum_{j=1}^{n} \alpha_j g_j(x) + \alpha_{n+1} \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{n} \alpha_j g_j(x) + \alpha_{n+1} = y_i,\ i = 1, \cdots, n$$

여기서 α_j는 미지의 근사계수이다.

메타모델의 정확도는 식 (11)과 같은 R^2값으로 판별하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (t_i - y_i)^2}{\sum (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (11)$$

여기서 t_i는 실제 값, y_i는 메타모델로부터 추정된 예측 값, $\bar{t}_i$는 실제 값의 평균치를 의미한다. R^2값이 1.0인 경우 메타모델로부터 추정된 예측 값이 전체 설계공간 상의 실제 값과 정확히 일치하는 것을 의미한다. 본 연구에서는 메타모델의 정확도 추정을 위해 전체 직교배열 실험횟수의 10%에 해당하는 24회 검증실험 데이터를 설계인자의 변동수준 내에서 무작위로 생성하여 R^2 값의 산출을 위해 적용하였다. 각각의 메타모델로부터 산출된 응답치 별 정확도 분석결과는 Table 12에 정리하여 나타내었다. Table 12에 나타난 바와 같이 근사모델의 응답함수에 대한 R^2 정확도는 Kriging이 평균적으로 가장 낮게 나타났다. COP의 경우 평균적으로 0.891의 R^2 정확도를 나타냈지만, LC3에서 가장 낮은 정확도 결과가 나타났다.

RSM과 RBFN의 R^2 결과는 0.942와 0.965로 상대적으로 높게 나타났고, 본 연구에서 사용한 직교배열실험 방법이 수동형 DSF의 설계공간 분석에 적합한 것으로 검증되었다. 본 연구의 적용한 직교배열실험

Table 12 Comparison of meta-modeling results

Meta model	R^2 value					
	Mass	LC1	LC2	LC3	LC4	Avg.
COP	0.992	0.987	0.863	0.803	0.811	0.891
Kriging	0.871	0.897	0.821	0.853	0.807	0.850
RSM	0.998	0.957	0.911	0.927	0.916	0.942
RBFN	0.999	0.986	0.957	0.935	0.947	0.965

방법 기반의 메타모델 중 RBFN이 가장 높은 정확도로 수동형 DSF의 구조설계공간 탐색이 가능한 것으로 나타났으며, 최적화해석, 강건해석, 신뢰성해석 등에 활용되어 수치계산의 효율성을 향상시킬 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 해양플랜트 플로트오버 공법을 위해 개발된 수동형 DSF의 구조성능 민감도 분석과 최소중량설계를 위해 직교배열실험 방법 기반 구조설계 민감도평가와 다양한 메타모델을 적용하여 설계공간의 근사화 특성을 고찰하였다. 수동형 DSF의 구조 안전성을 평가하기 위해 선급 규정에 따른 설계하중조건을 산정하였고, FEM 기반 구조해석 결과로부터 설계하중조건 별 구조성능을 검토하였으며, 모든 설계하중조건에서 최대응력치는 재질의 허용항복응력을 만족하는 것으로 나타났다. 3수준 직교배열실험을 위해 설계인자는 주요 구조부재의 두께 치수를 적용하였고, 응답함수는 중량과 구조성능을 고려하였다. 민감도평가는 직교배열실험 결과를 이용하여 설계인자 별 응답함수에 대한 영향도를 정량적으로 평가하였고, 모든 설계하중조건에서 허용응력을 만족하면서 초기설계 대비 5.7%의 중량이 감소된 최상 설계조합을 탐색하였다. 직교배열실험 결과를 이용하여 COP, Kriging, RSM 그리고 RBFN의 메타모델 생성하였으며, 본 연구에서 사용한 직교배열실험 방법이 수동형 DSF의 설계공간 분석에 적합한 것으로 검증되었고, RBFN이 가장 높은 정확도로 수동형 DSF의 구조설계공간을 탐색할 수 있는 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 '해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발(PMS 4260)' 과제, 산업통상자원부 '산업전문인력역량강화사업'의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구(친환경스마트선박 R&D 전문인력양성사업, 과제번호:P0001968)과제, 그리고 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.

REFERENCES

1. Park, J. M., Park, C. H., Kim, T. S. and Choi, D. H., "Optimal Determination of Pipe Support Types in Flare System for Minimizing Support Cost," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 4, pp. 325-329, 2011.
2. Song, C. Y., Lee, J. and Choung, J. M., "Reliability-based Design Optimization of an FPSO Riser Support Using Moving Least Squares Response Surface Meta-models," Ocean Engineering, Vol. 38, No. 1, pp. 304-318, 2011.
3. Lee, D. M. and Kim, S. Y., "Sensitivity Analysis of Design Parameters for Quadruple Offset Butterfly Valve by Operating Torque," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 28, No. 2, pp. 160-166, 2014.
4. Ji, Y. J., Kwak, J. S., Lee, H. Y. and Kim, S. C., "Optimal Arrangement of Resilient Mount Installed on Frame Support Structure at Shipboard Equipment Under Shock Load," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 52, No. 4, pp. 298-304, 2015.
5. Park, J. H., Lee, D., Yang, J. W. and Song, C. Y., "Design Enhancement to Avoid Radar Mast Resonance in Large Ship Using Design of Experiments," Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 33, No. 1, pp. 50-60, 2019.
6. DNV-GL, Load Transfer Operations, Det Norske Veritas, 2012.
7. DNV-GL, Offshore installation Operations, Det Norske Veritas, 2013.
8. GL, Guidelines for Load-outs, GL Noble Denton, 2015.
9. GL, Guidelines for Marine Transportations, GL Noble Denton, 2015.
10. Kim, H. S., Kim, B. W., Jung, D. and Sung, H. G., "Numerical Study for Topside Effect on Behavior of Deck Transportation Vessel and Seafastening Structure," Proceedings of OCEANS, Aberdeen, 2017.

11. DNV-GL, Structural Design of Offshore Units WSD Method, Det Norske Veritas, 2015.
12. Simulia, Abaqus User Manual. Simulia, 2018.
13. Park, S. H., Design of Experiments, Minyoung Publishing, Seoul, 2012.
14. Simulia, iSIGHT User Manual. Simulia, 2018.
15. Song, C. Y. and Lee, J., “Comparative Study of Approximate Optimization Techniques in CAE-based Structural Design,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, Vol. 34, No. 11, pp. 1603-1611, 2010.
16. Baek, S. H., Kim, H. S. and Han, D. S., “Structural Optimization of Variable Swash Plate for Automotive Compressor Using Orthogonal Polynomials,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, Vol. 35, No. 10, pp. 1273-1279, 2011.
17. Cho, S. K., Byun, H. and Lee, T. H., “Selection Method of Global Model and Correlation Coefficients for Kriging Metamodel,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, Vol. 33, No. 3, pp. 813-818, 2009.
18. Dyn, N., Levin, D. and Rippa, S., “Numerical Procedures for Surface Fitting of Scattered Data by Radial Basis Functions,” SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, Vol. 7, No. 2, pp. 639–659, 1986.