

# 실험계획법을 이용한 해양플랜트 플로트오버 설치 작업용 능동형 DSF의 구조설계 민감도 해석

김훈관<sup>1</sup>, 송창용<sup>2\*</sup>, 이강수<sup>3</sup>

<sup>1</sup>목포대학교 조선해양공학과 학생, <sup>2</sup>목포대학교 조선해양공학과 교수, <sup>3</sup>선박해양플랜트연구소 책임연구원

## Structure Design Sensitivity Analysis of Active Type DSF for Offshore Plant Float-over Installation Using Design of Experiments

Hun-Gwan Kim<sup>1</sup>, Chang Yong Song<sup>2\*</sup>, Kangsu Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Student, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

<sup>3</sup>Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

**요약** 본 연구에서는 해양플랜트의 플로트오버 설치작업을 위해 개발된 능동형 갑판 지지 프레임 (Deck support frame, DSF)의 구조설계에 대해 다양한 실험계획법을 이용한 민감도해석의 비교연구를 수행하였다. 능동형 DSF의 주요 구조부재의 두께 치수 변수는 설계인자로 고려하였고, 응답치는 중량과 강도성능으로부터 선정하였다. 민감도해석의 비교연구에 사용한 실험계획법은 직교배열설계법, Box-Behnken 설계법 그리고 Latin hypercube 설계법이다. 실험계획법의 설계공간 탐색의 근사화 성능을 평가하기 위해 반응표면법을 각 실험계획법 별로 생성하여 근사화 정확도 특성을 검토하였다. 또한 최상설계안의 결과로부터 실험계획법의 특성에 따른 수치계산 비용, 중량감소 효과 등과 같은 설계향상 효과를 비교하였다. 능동형 DSF의 구조설계에 대해 직교배열설계법이 가장 향상된 결과를 나타내었다.

**주제어** : 능동형 DSF, 실험계획법, 민감도해석, 직교배열설계법, 최상설계안

**Abstract** The paper deals with comparative study on sensitivity analysis using various methods regarding to design of experiments for structure design of an active type DSF (Deck support frame) that was developed for float-over installation of offshore plant. The thickness sizing variables of structure member of the active type DSF were considered the design factors. The output responses were defined from the weight and the strength performances. Various methods such as orthogonal array design, Box-Behnken design, and Latin hypercube design were applied to the comparative study. In order to evaluate the approximation performance of the design space exploration according to the design of experiments, response surface method was generated for each design of experiment, and the accuracy characteristics of the approximation were reviewed. The design enhancement results such as numerical costs, weight minimization, etc. via the design of experiment methods were compared to the results of the best design. The orthogonal array design method represented the most improved results for the structure design of the active type DSF.

**Key Words** : Active type DSF, Design of experiments, Sensitivity analysis, Orthogonal array design, Best design case

\*This research was supported by a grant from the National R&D Project of "Development of Core Installation Technologies for Float-over and Dual Crane Methods" funded by Ministry of Oceans and Fisheries, and a study on the "Future Transportation Equipment Development of Regional Innovation Platform" Project, supported by the Ministry of Education and National Research Foundation of Korea.

\*Corresponding Author : Chang Yong Song(cysong@mokpo.ac.kr)

## 1. 서론

최근 해양플랜트의 대형화 및 고중량화로 인해 수만 톤 이상 규모의 상부구조물(Topside)을 안벽으로부터 설치 대상 해양플랫폼까지 안전하게 해상에서 이동하고 설치할 수 있는 플로트오버(Float-over) 공법의 개발과 이를 위한 부가구조물의 설계 기술개발이 중요도가 높아지고 있다. 이러한 부가 구조물 중 플로트오버 설치작업중 고중량의 상부구조물을 안전하게 지지하기 위한 갑판지지프레임(Deck support frame, DSF)은 작업운용 조건이 고려된 선급규정 설계하중을 반영하여 설계되어야 한다. DSF는 구조설계상의 안전성 확보와 함께 DSF가 탑재되는 이송 선박의 안전한 운동성능과 충분한 부력의 확보를 위해 중량저감 설계가 매우 중요하다.

민감도해석과 최적설계기법을 응용하여 해양구조물의 설계 안전도를 향상시키기 위한 연구가 제한적으로 수행되어 오고 있다. FPSO 플레어 시스템에 설치되는 파이프라인의 서포트 중량 최소화를 위해 강도 제한조건을 만족하도록 진화알고리즘을 응용한 설계 최적화를 수행하였다[1]. 설계위험도를 최소화할 수 있는 최적 설계안이 FPSO 라이저 부가물의 신뢰성 기반 설계최적화를 위해 보수적 근사모델인 제한조건 가용성 이동 최소자승법을 응용하여 적용되었다[2]. 해양자동채염기의 구조설계에 대해 가장 효율적인 최적설계 결과를 탐색하기 위해 다양한 메타모델을 이용한 근사최적화 기법이 응용되었다 [3]. 함정용 탄성마운트의 응력 및 동특성을 고려한 최적배치 설계를 구현하기 위해 유전 알고리즘이 응용되었다[4]. 항해통신용 레이더 마스트의 공진문제 해결을 위해 실험계획법이 공진 영역을 회피할 수 있는 설계방안의 탐색을 위해 응용되었다[5].

본 연구에서는 20,000톤 규모 상부구조물의 안전한 해상 이동과 설치작업을 실현하기 위한 플로트오버 공법과 관련하여 새롭게 개발된 능동형 DSF의 설계안전도를 검토하고, 중량감소 설계개선안을 효율적으로 도출하기 위해 다수의 실험계획법(Design of experiments, DOE)을 적용한 최상 설계안을 탐색하였다. 또한 능동형 DSF의 주요 구조부재에 대한 민감도 해석을 수행하고, DOE 특성에 따른 민감도 결과를 비교하였다. 능동형 DSF의 초기설계 상태에서 강도성능 평가는 유한요소법(Finite element method, FEM)을 기반으로 구조해석모델을 생성하여 수행하였다. 능동형 DSF의 실제

작동조건이 고려된 선급규정 하중조건을 산정하여 구조해석모델에 적용하고, 각 하중조건 별 강도성능을 평가하였다. 능동형 DSF의 초기 구조설계 개선을 위해 DOE를 이용하여 강도성능에 대한 주요 설계부재의 영향도 분석과 중량을 감소하면서 허용응력을 만족할 수 있는 설계개선안을 탐색하였다. DOE 기반 설계개선 방안 도출은 직교배열설계법(Orthogonal array design, OAD), Box-Behnken 설계법(Box-Behnken design, BBD) 그리고 Latin hypercube 설계법(Latin hypercube design, LHCD)의 3가지 방법을 적용하여 민감도 결과를 분석하고, 설계개선특성과 수치계산 비용을 고려하여 능동형 DSF의 구조설계에 가장 적합한 DOE 방법을 탐색하는 형태로 수행하였다. 본 연구에서 적용한 DOE 기반 능동형 DSF의 설계개선안 탐색과 주요 구조부재 민감도 분석결과의 적합성을 검증하기 위해 DOE 방법 별로 반응표면법(Response surface method, RSM)을 이용한 근사모델링을 수행하고, 각각의 DOE 방법으로부터 생성된 RSM의 설계공간 탐색 정확도를 검토하였다.

## 2. 초기설계 구조해석

DSF는 상부구조물의 이송 및 설치를 목적으로 해양플랜트 설치 선박 (Deck transportation vessel, DTV)의 갑판에 장착되는 해양 기자재이다. 본 연구에서 고려된 능동형 DSF는 20,000톤급 상부구조물의 이송 및 설치를 위해 개발되었으며, DSF의 중앙부에 상부구조물 설치 시 높이를 미세하게 조절하기 위한 유압 실린더(Topside mating cylinder, TMC)를 내장할 수 있도록 고안되었다. 능동형 DSF의 초기설계에 대한 구조 안전성을 평가하기 위해 우선 실제 작동조건과 관련된 선급규정을 적용하여 설계하중조건을 산정하였다. 구조설계 성능 평가는 FEM을 이용한 3차원 구조해석 모델을 생성하고, 설계하중조건과 경계조건을 구조해석 모델에 적용하여 구조해석 결과를 산출하였으며, 이를 통해 각각의 설계하중조건에서 최대응력을 검토하는 순서로 수행하였다.

### 2.1 설계하중조건 산정

능동형 DSF의 구조성능평가를 위한 설계하중조건은 해양설치작업 (Offshore installation operation)

과 관련된 선급규정을 반영하여 Table 1과 같이 4가지 조건으로 구성하였다[6~9]. Table 1에 나타난 것처럼 설계하중조건은 건조가 완료된 상부구조물을 능동형 DSF에 탑재하고 DTV로 이동하는 작업상태를 반영한 Weighing(LC1), Initial(LC2), 그리고 Skidding(LC3) 조건으로 구성된 Load-out 작업조건과 상부구조물 및 능동형 DSF를 탑재한 DTV가 해양플랫폼으로 이동하는 작업상태인 Transport(LC4) 조건으로 구성하였다. LC1은 능동형 DSF가 고중량의 상부구조물을 안전하게 탑재할 수 있는지를 확인하기 위해 상부구조물 중량지지 보 구조 (Topside weighing beam) 부분을 고정하여 상부구조물의 중량 하중을 적용하는 조건이다. LC2는 Load-out 작업 전에 Weighing 검토가 완료된 후 상부구조물의 무게중심을 고려하여 능동형 DSF에 상부구조물을 연결하는 조건이다. LC3는 상부구조물의 연결이 완료된 능동형 DSF를 DTV에 이동하는 조건이다. LC4는 상부구조물을 연결한 능동형 DSF를 DTV의 Grillage에 탑재하고 고박하여 이송하는 조건이다.

**Table 1. Design load case for structure analysis**

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

Table 1에 나타난 설계하중조건은 능동형 DSF의 구조해석을 위한 하중조건으로 사용하였다. LC1의 하중 및 경계조건은 상부구조물의 중량을 하중으로 환산하여 무게중심 위치에서 중력방향으로 적용하였고, 상부구조물 중량지지 보 구조의 고정부 상에 병진방향 자유도를 구속하여 고려하였다. LC2의 하중 및 경계조건은 상부구조물 중량의 하중을 무게중심 위치에서 중력방향으로 적용하였고, 능동형 DSF의 하단부 표면에 병진방향 자유도를 구속하여 고려하였다. LC3의 하중조건은 상부구조물 중량과 Load-out 장비의 하중을 무게중심 위치에서 중력방향으로 적용하고, Strand jack의 유압작동력을 Load-out 방향으로 적용하였다. 또한 선급규칙에 규정된 다음의 식과 같은 Static skidding force ( $F_s$ )을 Load-out 방향의 반대방향으로 적용하였다[6,8].

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

where

$\mu_{ud}$  : Upper bound design fiction coefficient

$W$  : Topside weight

$W_{eq}$  : Loadout equipment weight

$P_s$  : Inertial load occurring during break-out

LC3의 경계조건은 능동형 DSF의 하단부 표면에 병진방향 자유도를 구속하여 고려하였다. LC4의 하중조건은 상부구조물 중량의 하중을 무게중심 위치에서 중력방향으로 적용하고, DTV의 운동해석[10]을 통해 산출된 방향 별 운동 가속도를 관성하중으로 고려하여 적용하였다. LC4의 경계조건은 능동형 DSF가 DTV에 탑재된 상태를 고려하기 위해 능동형 DSF와 Grillage가 접하는 부분에 접촉조건(Contact condition)을 적용하였고, 능동형 DSF를 DTV 갑판에 고박하는 8개의 Steel tension wire를 1-D Rigid link 요소로 각각 이상화하고 병진방향 자유도를 구속하였다. 구조성능 평가를 위한 허용응력은 해양구조물설계에 적용되는 사용응력 설계법[11]을 적용하여 재료 항복응력의 85%로 고려하였다.

## 2.2 FEM 기반 구조해석

20,000 톤급 상부구조물을 해양 플랫폼에 플로트오버 방법으로 설치하기 위해 설계된 능동형 DSF의 구조성능을 평가하기 위해 FEM 기반 구조해석을 수행하였다. 능동형 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. 재료의 허용응력은 선급규정에 따라 재료 항복응력의 85%를 기준으로 SM490YB재질은 301.75 MPa, API 5L X52재질은 318.75 MPa로 각각 산정되었다. 구조해석은 범용 유한요소해석 소프트웨어인 ABAQUS/Implicit[12]를 사용하여 수행하였다.

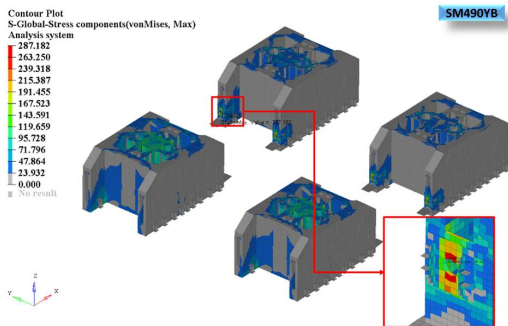
**Table 2. Material property**

Contents	SM490YB	API 5L X52
Elastic modulus ( $N/mm^2$ )	206000	208000
Poisson's ratio	0.3	0.3
Density ( $N-s^2/mm^4$ )	7.85e-9	7.85e-9
Yield Strength (MPa)	335	375

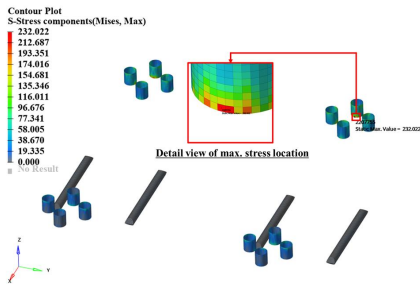
구조해석 결과는 von-Mises응력을 이용하여 Table 3에 정리하여 나타내었으며, 응력분포 결과는 LC3에 대해서 대표적으로 Fig. 1에 나타내었다. Table 3에 나타난 것처럼 모든 설계하중 조건에서 능동형 DSF의 최대응력치는 재질의 허용항복응력 수준을 만족하는 것으로 나타났다. 전체적인 응력 수준은 SM490YB 재질의 구조부재가 AP I5 LX52 재질의 구조부재 보다 높게 나타났다. 설계하중조건 중 LC3의 응력 수준이 가장 높게 나타났으며, SM490YB 재질의 구조부재의 최대응력은 허용응력치의 95%에 근접하였다. Fig. 1에 나타난 것처럼 LC3 조건에서 능동형 DSF의 최대 응력은 SM490YB 재질의 구조부재 중 Strand jack mount part의 내부 보강부재에서 발생하였다. API-5L-X52 재질의 구조부재의 최대응력은 Cylinder guide tube 부재의 하단부에서 발생하였다.

Table 3. Structure analysis results of initial design

Load cases	Max. stress [MPa]		Safety check
	SM490YB	API 5L X52	
LC1	258.047	1.753	OK
LC2	188.027	169.535	OK
LC3	287.182	232.022	OK
LC4	166.615	120.489	OK



(a) Stress contour results of SM490YB parts



(b) Stress contour results of API 5L X52 parts

Fig. 1. LC3 stress contours for initial design

### 3. DOE 기반 구조설계 민감도해석

능동형 DSF의 구조설계 민감도해석과 관련하여 본 연구에서는 DOE를 이용하여 강도성능에 대해 주요 설계부재의 영향도를 분석하고, 허용응력을 만족하면서 최대의 중량감소를 이룰 수 있는 설계개선안을 탐색하였다. DOE 기반 구조설계 민감도해석은 OAD, BBD, LHCD의 3가지 방법을 적용하여 구조부재별 강도성능과 중량에 대한 민감도를 분석하고, 능동형 DSF의 구조설계에 가장 적합한 DOE 방법을 고찰하는 형태로 수행하였다. 3장에서는 사용된 DOE 방법에 대해 간략히 정리하였고, 각각의 DOE 방법을 이용하여 능동형 DSF의 구조설계의 중량감소 설계개선안 탐색과 강도성능과 중량에 대한 설계 민감도 평가를 수행하였다. 또한 본 연구에서 적용한 DOE 방법 기반 능동형 DSF의 중량감소 개선설계안 탐색과 주요 구조부재 민감도 분석 결과의 적합성을 검증하기 위해 DOE 방법 별로 RSM을 이용한 근사모델링을 수행하고, 각각의 DOE방법으로부터 생성된 RSM의 설계공간 탐색 정확도를 검토하였다.

#### 3.1 DOE 이론

OAD는 인자(Factor)의 수가 많은 실험에서 주효과(Main effect)와 여러 인자 사이의 교호작용(Interaction)을 도출하고, 민감도가 낮은 인자들의 교호작용과 고차의 교호작용에 대한 정보를 소거하여 시험횟수를 줄인 직교배열표(Orthogonal array table, OAT)를 이용한 DOE 방법이다. OAT에는 2, 3, 4, 5 수준계와 혼합 수준계가 있으며, 2 수준계와 3 수준계가 주로 사용되며, 본 연구에서는 다음과 같은 3 수준계의 OAT를 사용하였다[13].

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

여기서  $m$ 은 2 이상의 정수이며  $3^m$ 은 실험의 크기,  $(3^m - 1)/2$ 는 OAT의 열의 수를 나타낸다.

BBD는 실험공간 상의 구석점(Corner point)을 실험에 사용하지 않는 특성이 있으며, 전체 실험공간에서 중심점(Center points)과 구석점을 제외한 다면체 모서리 중심점을 사용함으로써 경제적으로 DOE를 수행할 수 있다. BBD는 계량인자이고 3 수준이면 2차 회귀

방정식 산출과 최적조건 탐색에 장점이 있다. 독립변수가  $k$ 인 경우, BBD는 적은 수의 실험점으로 직교블록을 용이하게 생성할 수 있으며, 이를 인용하여 2차 회귀방정식을 구할 수 있다[14,15].

LHCD는 전체의 표본공간에 관심 있는 공간의 표본이 추출되도록 각각의 확률변수의 범위를  $k$ 개의 범위로 나눈 후 각 구간에서 중복되지 않도록  $k$ 개를 추출하는 방법이다 [16]. 모든 실험영역을 반복 없이 고려할 수 있고 실험을 비교적 적게 하여 시간과 비용을 줄일 수 있다.

### 3.2 구조설계 민감도해석 결과 비교

DOE 특성에 따른 능동형 DSF의 구조설계 민감도해석을 위해 능동형 DSF의 주요 구조부재 두께 치수를 3 수준 설계인자(Design factor)로 설정하였고, Table 1과 3에 나타난 설계하중조건 별 최대응력과 중량은 응답함수(Output response)로 설정하였다. Fig. 2에 나타난 것처럼 설계인자의 상한과 하한 수준은 능동형 DSF의 초기설계의  $\pm 20\%$  이내에서 생산 및 제조가 가능한 범위로 설정하였다.

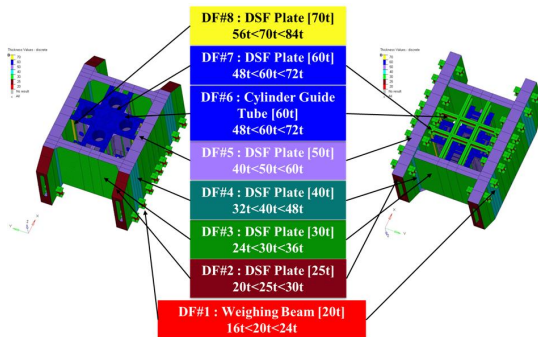


Fig. 2. Design factors and their range for active type DSF

Fig. 2과 같이 설계인자는 8개의 두께 별 주요 구조부재에 대해 3 수준으로 변동범위를 설정하였다. OAD의 경우 243회의 실험행렬을 구성하였고, BBD의 경우 113회의 실험행렬을 구성하였으며, LHCD의 경우 200회의 실험행렬을 각각 구성하였다. Table 4~6에는 각각의 DOE 방법으로 구성된 실험행렬과 실험행렬상의 설계인자 변동에 따라 구조해석을 통해 산출된 응답함수의 결과를 정리하였다.

Table 4. DOE run table of OAD

Design factors [mm]								
Run	DF#1	DF#2	DF#3	DF#4	DF#5	DF#6	DF#7	DF#8
1	16	20	24	32	40	48	48	56
2	16	20	24	32	50	60	60	70
3	16	20	24	32	60	72	72	84
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
241	24	30	36	48	40	72	60	70
242	24	30	36	48	50	48	72	84
243	24	30	36	48	60	60	48	56
Output responses [Mass: Ton; Stress: MPa]								
Run	Mass	LC1 Stress	LC2 Stress	LC3 Stress	LC4 Stress			
1	1,379.0	327.7	234.9	345.1	189.8			
2	1,501.9	327.7	209.7	307.6	168.6			
3	1,625.9	327.7	191.1	280.7	153.5			
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			
241	1,862.2	211.3	180.3	255.5	141.4			
242	1,944.4	211.3	197.1	272.8	143.3			
243	1,971.1	211.3	191.4	282.9	155.9			

Table 5. DOE run table of BBD

Design factors [mm]								
Run	DF#1	DF#2	DF#3	DF#4	DF#5	DF#6	DF#7	DF#8
1	16	20	30	40	50	60	60	70
2	16	30	30	40	50	60	60	70
3	24	20	30	40	50	60	60	70
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
111	20	25	30	40	50	60	72	56
112	20	25	30	40	50	60	72	84
113	20	25	30	40	50	60	60	70
Output responses [Mass: Ton; Stress: MPa]								
Run	Mass	LC1 Stress	LC2 Stress	LC3 Stress	LC4 Stress			
1	1,699.4	319.0	188.3	278.3	153.1			
2	1,709.2	319.0	188.2	278.0	153.0			
3	1,718.6	217.0	188.3	278.4	153.2			
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			
111	1,737.7	258.0	203.3	300.5	165.3			
112	1,746.0	258.1	172.1	254.7	140.1			
113	1,713.9	258.1	188.3	287.2	153.1			

Table 6. DOE run table of LHCD

Design factors [mm]								
Run	DF#1	DF#2	DF#3	DF#4	DF#5	DF#6	DF#7	DF#8
1	16	25	32	33	44	50	61	59
2	16	20	25	34	59	59	57	69
3	16	29	34	40	46	57	65	58
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
198	24	21	28	46	43	67	66	71
199	24	26	36	33	47	72	49	61
200	24	22	27	45	55	60	56	58
Output responses [Mass: Ton; Stress: MPa]								
Run	Mass	LC1 Stress	LC2 Stress	LC3 Stress	LC4 Stress			
1	1,650.9	315.0	208.8	197.7	164.2			
2	1,617.5	352.2	205.5	300.9	164.8			
3	1,780.6	310.3	194.4	286.2	158.0			
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮			
198	1,688.5	219.4	186.5	275.8	151.8			
199	1,771.7	211.8	191.5	285.5	157.6			
200	1,697.0	220.4	211.7	310.4	170.3			

Table 4-6에 정리된 결과의 모든 설계하중조건에서 최대응력치가 각 재료의 허용항복응력인 SM490YB 재질의 구조부재에서 301.75 MPa과 API 5L X52 재질의 구조부재에서 318.75 MPa 이하를 만족하는 설계조합을 탐색하였다. 허용항복응력을 만족하는 설계조합 중 중량이 가장 적게 산출된 설계조합을 최상설계안(Best design case)으로 선정하여 Table 7에 정리하여 나타내었다. Table 7에 나타낸 바와 같이 모든 DOE 방법에서 최상 설계안은 설계하중조건에 대해 모두 최대응력치가 허용항복응력을 만족하였고, BBD와 LHCD는 초기설계 대비 최대응력치의 변동 경향성이 유사한 반면, OAD는 LC1과 LC3에서 다른 DOE 방법과 달리 최대응력치가 초기설계 대비 감소하는 변동 특성을 나타내었다. 본 연구에서 고려한 능동형 DSF의 구조설계에 대한 각각의 DOE 방법에서 OAD가 중량 감소율이 14.7%로 BBD나 LHCD보다 우수한 것으로 나타났고, LHCD의 중량감소율이 10.8%로 가장 낮게 산출되었다. 수치계산 비용인 DOE의 실험횟수는 OAD가 가장 높지만, 중량감소율과 설계하중조건 별 응력결과를 고려했을 때 OAD가 중량감소를 위한 능동형 DSF의 구조설계 개선안 도출에 가장 효율적인 방법임을 알 수 있다.

Table 7. Best design cases for active type DSF

		Initial design	Best design case		
			OAD	BBD	LHCD
Design factors [mm]	DF#1	20	24	20	20
	DF#2	25	20	25	22
	DF#3	30	24	24	25
	DF#4	40	32	40	17
	DF#5	50	40	40	43
	DF#6	60	72	60	49
	DF#7	60	60	60	49
	DF#8	70	84	70	92
Output response [Mass: Ton, Stress: MPa]	Mass	1,713.9	1,461.5 (↓14.7%)	1,494.8 (↓12.8%)	1,529.2 (↓10.8%)
	LC1 Stress	258.05	222.6 (↓13.7%)	264.8 (↑2.6%)	265.8 (↑13.0%)
	LC2 Stress	188.03	210.5 (↑11.9%)	204.5 (↓8.8%)	212.4 (↑13%)
	LC3 Stress	287.18	284.548 (↓0.9%)	300.7 (↑4.7%)	296.8 (↑3.3%)
	LC4 Stress	166.62	156.4 (↓6.0%)	165.3 (↑0.8%)	161.5 (↓3.1%)

최상 설계안의 응력분포 결과는 OAD 결과로부터 산출된 LC3에 대해서 대표적으로 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 1과 Fig. 3의 결과를 비교해 보면, 최대 응력치가 최상설계안에서 초기설계 대비 SM490YB 재질의 구조부재는 0.9%, AP I5 LX52 재질의 구조부재는 4.6%로 각각 감소되었다. 최대 응력 발생 위치도 Strand jack mount part의 내부 보강부재에서 Main frame part 하부로 이동하였다.

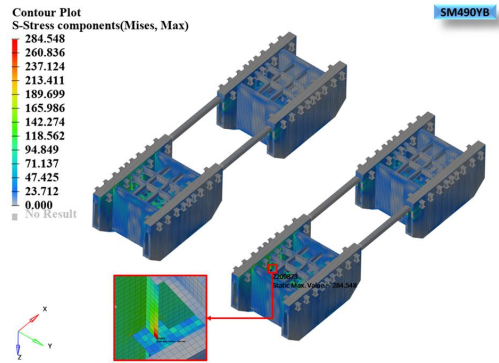


Fig. 3. LC3 stress contours for enhanced design

OAD, BBD 그리고 LHCD의 DOE 방법에 따른 설계인자 별 응답함수의 정량적 주영향도(Main effect)를 분석하여 Table 8에 정리하여 나타내었다. 주 영향도 분석은 설계인자 수준의 변동에 따라 관측된 응답함수의 평균 변화량, 즉 민감도를 보여주는 지표로서 각각의 설계인자에서 산출된 영향도의 크기에 비례하여 해당 설계인자의 응답함수에 대한 중요도가 높다고 할 수 있다. Table 8에 정리된 것처럼 중량에 대한 주 영향도는 모든 DOE 방법에서 거의 동일한 수준으로 나타났다. LC1의 최대 응력치에 대해서는 DF#1과 DF#3의 영향도가 높게 나타났고, LC2 ~ LC4의 최대 응력치에서는 DF#3과 DF#8의 영향도가 높게 나타났다. 최대응력치에 대한 BBD의 DF#1, DF#3, 그리고 DF#8의 영향도는 다른 DOE방법보다 다소 높게 나타나는 특성을 보였다. 이와 같이 다양한 DOE 방법을 적용한 최상설계안 탐색연구를 통해 능동형 DSF의 구조설계 강도성능 평가에서 OAD가 가장 효율적인 탐색 방법임을 확인하였으며, DF#1, DF#3, 그리고 DF#8의 부재가 강도 설계상 가장 중요하게 고려해야하는 구조부재로 나타났다.



Table 8. Main effect results

Contents		DF#1 [%]	DF#2 [%]	DF#3 [%]	DF#4 [%]	DF#5 [%]	DF#6 [%]	DF#7 [%]	DF#8 [%]
Mass	OAD	2.90	1.50	42.3	16.6	23.10	4.10	8.30	1.20
	BBD	2.86	1.46	42.31	16.62	23.07	4.06	8.33	1.20
	LHCD	2.86	1.46	42.31	16.62	23.06	4.06	8.33	1.20
LC1. stress	OAD	72.0	0.02	10.56	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
	BBD	72.32	0.02	10.19	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
	LHCD	69.43	0.03	10.02	0.11	0.03	0.04	0.10	0.06
LC2 stress	OAD	0.38	1.80	10.45	2.668	8.47	6.62	2.59	12.95
	BBD	0.03	0.03	13.36	3.34	3.51	6.43	2.68	14.78
	LHCD	0.23	0.17	9.56	2.35	4.37	5.92	2.22	11.32
LC3 stress	OAD	0.37	2.30	14.74	4.28	5.15	4.37	3.42	19.52
	BBD	0.04	0.17	22.06	6.58	2.24	3.94	4.53	26.24
	LHCD	0.51	0.07	14.25	4.10	3.12	3.89	3.08	17.71
LC4 stress	OAD	0.62	1.73	16.98	5.08	4.35	2.70	4.20	22.81
	BBD	0.06	0.18	25.48	8.00	2.76	2.70	5.57	31.94
	LHCD	0.38	0.06	17.45	5.36	3.10	3.19	3.84	22.47

3.3 근사모델링을 통한 DOE 적합성 검토

근사모델(Approximate model)은 일반적으로 DOE로부터 생성되기 때문에 생성된 근사모델의 정확도를 정량적으로 검토하여 DOE의 실험횟수, 설계인자의 수준, DOE 방법의 선정 등과 같은 전체적인 DOE 수행방법의 적합성을 검증할 수 있다. 3.2절에서 수행된 다양한 DOE 방법을 이용한 능동형 DSF의 최상설계안 탐색과 주요 구조부재 민감도해석 결과의 적합성을 검증하기 위해 DOE 방법 별로 RSM을 이용한 근사모델링을 수행하고, 각각의 DOE방법으로부터 생성된 RSM의 설계공간 탐색 정확도를 검토하였다. 최소 자승 방법을 이용하면 이차 다항식 형태의 회귀모델인 RSM은 다음과 같이 정의된다[17].

$$g = A_0 + \sum_{i=1}^k A_i Z_i + \sum_{i=1}^k A_{ii} Z_i^2 + \sum_{i < j < k} A_{ij} Z_i Z_j + e \quad (3)$$

본 연구에서 사용한 OAD, BBD, 그리고 LHCD와 같은 DOE으로부터 적용된  $n$ 개의 실험점을 이용하여 실제 응답벡터  $g$ 와  $k$ 개의 기저 변수로 정의되는 행렬  $Z$ 가 설정되면  $g$ 와  $Z$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$g = Z A_R + e \quad (4)$$

랜덤오차인 벡터  $e$ 를 최소화하고 미지의 RSM 근사계수 벡터  $A_R$ 의 추정을 위해 최소 자승 함수가 식 (5)와 같이 적용된다.

$$A_R = (Z^T Z)^{-1} Z^T g \quad (5)$$

식 (5)에서 산출된 근사계수를 적용하게 되면 이차 회귀 근사모델은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\bar{g}(x)_R = a_0^r + \sum_{i=1}^k a_i^r x_i + \sum_{i=1}^k a_{ii}^r x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k a_{ij}^r x_i x_j \quad (6)$$

식 (6)의 RSM 근사모델은 OAD, BBD 그리고 LHCD와 같은 DOE의 결과를 이용하여 응답함수 별로 생성된다. Fig. 4에는 RSM 근사모델 결과 중 OAD를 이용하여 최대응력이 발생한 응답함수인 LC3에 대해 주 영향도가 높은 설계 인자인 DF#3과 DF#8의 반응표면 결과를 대표적으로 나타내었다.

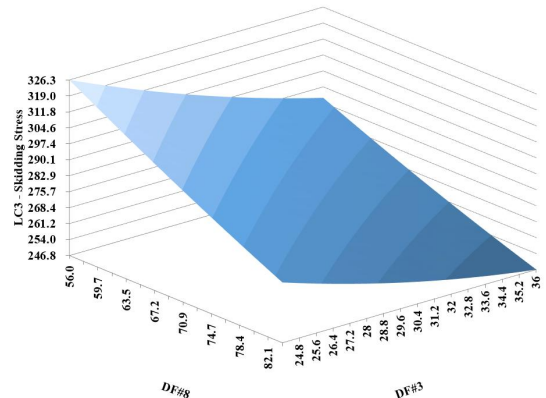


Fig. 4. Response surface result for LC3 from OAD

Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 LC3 응답함수인 von-Mises 응력의 비선형적 설계공간을 이차 회귀 근사모델인 RSM이 효과적으로 근사화한 것을 알 수 있다. 각각의 DOE 방법으로부터 산출된 근사모델의 정확도는 식 (7)과 같은  $R^2$ 값으로 판별하였다

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (t_i - y_i)^2}{\sum (t_i - \bar{t}_i)^2} \quad (7)$$

where,

$t_i$ : actual value

$y_i$ : prediction value from approximate model

$\bar{t}_i$ : actual value average

$R^2$ 값이 1.0으로 산출되면 근사모델의 예측치가 설정된 설계범위에서 실제 결과와 완전히 일치하는 것을 의미한다. 각각의 DOE 방법으로부터 응답함수 별로 추정된 RSM의 예측 정확도 결과는 Table 9에 나타내었다. Table 9에 나타낸 바와 같이 증량의 근사모델 정확도는 모든 DOE방법에서 실제값과 차이가 없는 1.0으로 나타났고, 각각의 설계하중조건 별 응답함수에 대한 근사모델의 정확도는 OAD의 경우 LC2에 대해서 최대 8.1%의 오차를 보였으며, BBD와 LHCD의 경우 13%와 7.9%의 오차율로 나타났다. 응답함수 별로 근사된 RSM 정확도의 평균치는 모든 DOE 방법에서 약 95%의 높은 정확도를 보였으며, OAD에서 가장 높은 정확도를 보였다.

Table 9. Comparison of RSM accuracy

DOE type	$R^2$ value					
	Mass	LC1	LC2	LC3	LC4	Avg.
OAD	1.000	0.999	0.919	0.946	0.960	0.956
BBD	1.000	0.999	0.870	0.935	0.983	0.947
LHCD	1.000	0.999	0.921	0.927	0.962	0.952

따라서 본 연구에서 능동형 DSF의 증량감소 설계안 탐색과 구조설계 민감도해석을 위해 사용한 설계인자의 수준, DOE의 실험횟수, DOE 방법 선정 등과 같은 전반적인 DOE 방법이 합리적으로 수행된 것으로 고찰되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 능동형 DSF의 구조설계 안전도를 확보할 수 있는 증량감소 설계안을 효율적으로 도출하기 위해 다양한 DOE 방법을 적용한 최상설계안 탐색과 주요 구조부재의 민감도해석을 수행하고, DOE특성에 따른 결과를 비교하였다. 다음과 같이 본 연구를 통한 주요 연구결과를 정리하였다.

능동형 DSF의 초기 설계단계에 대해 FEM 기반 구조해석을 통해 선급규정 설계하중조건에 대한 구조성능을 평가하였고, 모든 설계하중 조건에서 능동형 DSF의 최대응력치는 재질의 허용항복응력 수준을 만족하는 것으로 나타났으며, 설계하중조건 중 LC3의 응력수준이 가장 높게 나타났다.

DOE 특성에 따른 능동형 DSF의 구조설계 민감도해

석을 위해 능동형 DSF의 주요 구조부재 두께 치수를 3 수준 설계인자로 설정하였고, 설계하중조건 별 최대응력과 증량은 응답함수로 설정하였다. OAD, BBD 그리고 LHCD의 3가지 DOE방법에서 최상설계안은 모든 설계하중조건 대한 최대응력치가 허용응력을 만족하면서 증량이 감소되는 효과를 보였다. 그중 OAD가 증량 감소율이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 수치계산 비용인 DOE의 실험횟수는 OAD가 가장 높지만, 증량 감소율과 설계하중조건 별 응력결과를 고려했을 때 OAD가 능동형 DSF의 증량감소 구조설계 개선안 도출에 가장 효율적인 방법으로 나타났다.

구조설계의 민감도해석으로부터 증량에 대한 주영향도는 모든 DOE 방법에서 거의 동일한 수준으로 나타났으며, LC1의 최대 응력치에 대해서는 DF#1과 DF#3의 영향도가 높게 나타났고, LC2 ~ LC4의 최대 응력치에서는 DF#3과 DF#8의 영향도가 높게 나타났다.

RSM을 이용한 DOE 방법의 적합도 평가로부터 응답함수 별로 근사된 RSM 정확도의 평균치는 모든 DOE 방법에서 약 95%의 높은 정확도를 보였고, OAD를 적용한 경우가 가장 높게 나타났으며, 본 연구에서 능동형 DSF의 증량감소 설계안 탐색과 구조설계 민감도해석을 위해 사용한 설계인자의 수준, DOE의 실험 횟수, DOE 방법 선정 등과 같은 전반적인 DOE 방법이 합리적으로 수행된 것으로 확인되었다.

본 연구에서 수행된 DOE 이론을 이용한 설계탐색 방법은 새로운 공법 및 부가 구조물 개발이 빈번하게 요구되는 해양기자재의 설계 성능 향상에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

#### REFERENCES

- [1] J. M. Park, C. H. Park, T. S. Kim, & D. H. Choi. (2011). Optimal Determination of Pipe Support Types in Flare System for Minimizing Support Cost. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), 325-329. DOI: 10.3744/STNAK.2011.48.4.325
- [2] C. Y. Song, J. Lee & J. M. Choung. (2011). Reliability-based Design Optimization of an FPSO Riser Support Using Moving Least Squares Response Surface Meta-models. *Ocean Engineering*, 38(1), 304-318. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2010.11.001
- [3] C. Y. Song. (2021). Approximate Optimization



Based on Meta-model for Weight Minimization Design of Ocean Automatic Salt Collector. *Journal of Convergence for Information Technology*, 11(1), 109-117.  
DOI: 10.22156/CS4SMB.2021.11.01.109

- [4] Y. J. Ji, J. S. Kwak, H. Y. Lee, & S. C. Kim. (2015). 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*, 52(4), 298-304.  
DOI: 10.3744/SNAK.2015.52.4.298
- [5] J. H. Park, D. Lee, J. W. Yang, & C. Y. Song. (2019). Design Enhancement to Avoid Radar Mast Resonance in Large Ship using Design of Experiments. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 33(1), 50-60.  
DOI: 10.26748/KSOE.2018.088
- [6] DNV-GL. (2012). *Load Transfer Operations*, Det Norske Veritas.
- [7] DNV-GL. (2013). *Offshore Installation Operations*, Det Norske Veritas.
- [8] GL. (2015). *Guidelines for Marine Transportations*, GL Nobel Denton, 36.
- [9] GL. (2015). *Guidelines for Load-outs*, GL Nobel Denton, 13.
- [10] H. S. Kim, B. W. Kim, D. Jung & H. G. Sung. (2017). Numerical Study for Topside Effect on Behavior of Deck Transportation Vessel and Seafastening Structure, *Proceedings of OCEANS 2017*, Aberdeen.
- [11] DNV-GL. (2015). *Structural Design of Offshore Units WSD Method*, Det Norske Veritas.
- [12] Simulia. (2018). *Abaqus User Manual*. Simulia.
- [13] S. H. Park. (2012). *Design of Experiments*, Seoul : Minyoung Publishing.
- [14] G. E. P. Box & D. W. Behnken. (1960). Some New Three Level Designs for the Study of Quantitative Variables. *Technometrics*, 2(4), 455-475
- [15] Y. Kim, P. W. Park, K. Y. Park & J. C. Ryu. (2015). Optimization of Arc Brazing Process Parameters for Exhaust System Parts Using Box-Behnken Design of Experiment. *Journal of Welding and Joining*, 33(2), 23-31.  
DOI: 10.5781/JWJ.2015.33.2.23
- [16] K. K. Lee & S. H. Han. (2012). Optimization of Wind Turbine pitch Controller by Neural Network Model Based on Latin Hypercube, *Trans. of the Korean Soc. of Mech. Eng.*, A36(9), 1065-1071.

DOI: 10.3795/KSME-A.2012.36.9.1065

- [17] C. Y. Song & J. Lee. (2010). Comparative Study of Approximate Optimization Techniques in CAE-Based Structural Design. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, 34(11), 1603-1611.  
DOI: 10.3795/KSME-A.2010.34.11.1603

김 훈 관(Hun-Gwan Kim)

[학생회원]



- 2021년 2월 : 목포대학교 조선해양 공학과(공학사)
- 2021년 3월 ~ 현재 : 목포대학교 대학원 조선해양공학과 석사과정
- 관심분야 : 최적설계, 구조해석
- E-Mail : uyt231@naver.com

송 창 용(Chang Yong Song)

[정회원]



- 2010년 2월 : 연세대학교 기계공학과(공학박사)
- 2010년 9월 ~ 현재 : 목포대학교 조선해양공학과 교수
- 관심분야: 최적설계, 신뢰성해석, 구조해석
- E-Mail : cysong@mokpo.ac.kr

이 강 수(Kangsue Lee)

[정회원]



- 2009년 2월 : 인하대학교 조선해양 공학과(공학박사)
- 2013년 1월 ~ 현재 : 선박해양플랜트연구소 책임연구원
- 관심분야 : 구조해석, 진동해석
- E-Mail : klee@kriso.re.kr