

해양자동채염기의 최소중량설계를 위한 메타모델 기반 근사최적화

송창용

목포대학교 조선해양공학과 교수

Approximate Optimization Based on Meta-model for Weight Minimization Design of Ocean Automatic Salt Collector

Chang Yong Song

Professor, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National University

요약 본 논문에서는 해양자동채염기의 구조중량 최소화를 위해 구조설계에 대한 메타모델 기반 근사최적화를 수행하였다. 구조해석은 해양자동채염기의 초기설계에 대한 강도성능을 평가하기 위해 유한요소법을 이용하여 수행하였다. 구조해석에서는 설계하중조건에 대한 강도성능을 평가하였다. 최적설계문제는 강도성능 제한조건을 만족하면서 중량을 최소화할 수 있는 구조두께의 설계변수를 결정하도록 정식화하였다. 근사최적화에는 반응표면법, 크리깅 모델 및 체비쇼프 직교 다항식의 메타모델을 사용하였다. 수치계산 특성을 검토하기 위해 근사최적화 결과는 비근사최적화 결과와 비교하였다. 근사최적화에 사용된 메타모델 중 체비쇼프 직교 다항식이 해양자동채염기의 구조설계에 가장 적합한 최적설계 결과를 나타내었다.

주제어 : 근사최적화, 메타모델, 해양자동채염기, 유한요소해석, 체비쇼프 직교 다항식

Abstract In this paper, the meta-model based approximate optimization was carried out for the structure design of an ocean automatic salt collector in order to minimize the structure weight. The structural analysis was performed by using the finite element method to evaluate the strength performance of the ocean automatic salt collector in its initial design. In the structural analysis, it was evaluated the strength performance of the design load conditions. The optimum design problem was formulated so that design variables of main structure thickness would be determined by minimizing the structure weight subject to strength performance constraints. The meta-models used in the approximate optimization were the response surface method, Kriging model, and Chebyshev orthogonal polynomials. Regarding to the numerical characteristics, the solution results from approximate optimization techniques were compared to the results of non-approximate optimization. The Chebyshev orthogonal polynomials among the meta-models used in the approximate optimization showed the most appropriate optimum design results for the structure design of the ocean automatic salt collector.

Key Words : Approximate Optimization, Meta-model, Ocean Automatic Salt Collector, Finite Element Analysis, Chebyshev orthogonal polynomials

1. 서론

해양수산 기자재산업은 미래의 식량자원과 관련하여 중요한 기계산업 분야 중 하나로 보고되고 있다[1]. 최근 해양채염작업의 효율성을 높이고 채염결정지의 단

위 면적 당 생산량을 향상시키기 위해 전동구동력을 이용한 해양자동채염기(ocean automatic salt collector)의 개발이 착수되었다. 그러나 해양수산기자재 성능검증에 필요한 설계규정이 없기 때문에 해양자동채염기처럼 신규 개발된 해양수산기자재의 구조설계 경쟁력을 높이기

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

위해 구조성능 안전성을 만족하면서 동시에 최소중량을 구현할 수 있는 설계 최적화가 필요하다.

해양기자재의 메타모델과 최적설계 탐색과 관련된 다양한 연구가 수행되었다. Song et al.[2]은 FPSO 라이저 부가물의 설계위험도를 최소화하기 위해 보수적 근사모델인 제한조건 가용성 이동최소자승법을 이용한 신뢰성 기반 설계최적화를 수행하였다. Park et al.[3]은 FPSO 플래어 시스템용 파이프라인 설계규정에서 제시된 강도 제한조건을 만족하면서 서포트의 설계 중량을 최소화하기 위해 진화 알고리즘을 이용한 최적설계를 수행하였다. Ji et al.[4]은 유전알고리즘을 이용하여 합정용 탄성마운트의 응력 및 동특성을 제한조건을 만족할 수 있는 최적배치 설계를 탐색하였다. Park et al.[5]은 실험계획법을 이용하여 대형상선의 주기관 상용 운전 영역에서 레이더 마스트의 공진문제를 해결하기 위한 최적설계 조건을 탐색하였다. Byun and Jo[6]는 MCS(Modulation Coding and Scheme) 예측 모델을 이용하여 수중 통신 환경에 적합한 머신러닝 기술의 응용 방법을 제안하였다. Chael[7]는 외력에 의해 전 기저항이 변화하는 스트레인게이지를 로드셀에 부착한 전자저울에 대한 다량의 측정 데이터를 다항식 회귀분석에 적용하여 전 측정 구간에서 정확도가 향상된 질량 추정 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 저자가 수행하였던 해양자동채염기의 초기설계 구조 안전성의 검토에 대한 유한요소법(finite element method, FEM) 기반의 구조해석과 메타모델 비교연구 결과[8]를 확장하여 해양자동채염기의 구조설계에 대해 가장 효율적인 최적설계 결과를 탐색하기 위해 다양한 메타모델(meta-model)을 이용한 근사최적화(approximate optimization)를 수행하였다. 메타모델이 실제 설계문제에서 활용되기 위해서는 근사최적화나 신뢰성해석에서의 적합성 분석이 반드시 필요하기 때문에 본 연구에서는 메타모델 특성에 따른 근사최적화해석의 효율성과 적합성을 검토하였다. 위상 최적화는 FEM 모델을 기반으로 연속체 구조의 기하학적 형상을 설계변수로 적용하기 때문에 유한요소의 소멸과 재생을 통해 중량을 최소화하는 반면, 근사최적화는 수리적 설계변수의 변동을 통해 중량 최소화를 구현한다. 해양자동채염기의 초기설계에 대한 구조 안전성을 평가하기 위해 실제 작동조건을 반영한 설계하중조건을 산정하고, FEM을 이용한 3차원 구조해석모델을

이용하여 각 설계하중조건 별 강도성능을 평가하였다. 최적설계문제는 설계하중조건 별 강도성능의 제한조건을 모두 만족하면서 전체 구조중량이 최소화되도록 구조부재 두께의 설계변수를 결정하도록 정식화하였다. 근사최적화는 반응표면법(response surface method, RSM), 크리깅모델(Kriging model), 그리고 체비쇼프 직교다항식(Chebyshev orthogonal polynomials, COP)의 3가지 모델을 적용하여 최적설계 결과를 탐색하였고, 메타모델 특성에 따른 최적화 결과를 비교하였다. 메타모델 특성에 따른 근사최적화 방법의 결과는 실제 비근사최적화의 결과와 비교하였고, 최적설계 특성과 수치계산 비용을 고려하여 해양자동채염기 구조설계에 가장 적합한 근사최적화 방법을 고찰하는 형태로 수행하였다. 본 연구에서 사용한 메타모델 중 COP 기반의 근사최적화 방법이 해양자동채염기의 구조설계에 대해 가장 효율적인 최적설계 결과를 나타내었다. 본 연구에서 수행한 근사최적화해석 결과를 실제 설계에 활용하게 되면 다양한 설계변수의 변경에 대해 구조성능 결과 검토 시 매우 높은 수치계산 효율성으로 최적설계 결과를 도출할 수 있기 때문에 설계비용을 최소화할 수 있다. 또한, 다양한 메타모델을 대상으로 가장 효율적인 메타모델과 최적화해석의 융합방법을 검토함으로써 해양자동채염기 구조설계에 적합한 근사최적화 방법을 제시할 수 있었다.

2. 초기설계 구조안전성 평가

해양자동채염기의 초기설계에 대한 구조 안전성을 평가하기 위해 장비의 주요 특성을 검토하고, 실제 작동조건을 반영한 설계하중조건을 산정하였다. 구조설계 성능평가는 FEM을 이용한 3차원 구조해석모델을 생성하였고, 구조해석을 통해 각각의 설계하중조건에서 최대응력과 변위량을 주요 구조파트 별로 검토하여 강도성능을 평가하였다.

2.1 설계하중조건

해양채염의 작업 효율성을 높이고 채염결정지의 단위 면적 당 생산량을 향상시키기 위해 전기모터 구동력을 적용하여 채염작업의 자동화율을 높일 수 있도록 개발된 해양자동채염기의 전체 시스템 구성은 Fig. 1에 나타내었다.

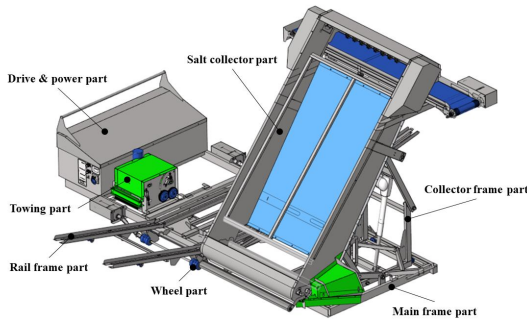


Fig. 1. System assembly configuration

Fig. 1에 보인 것처럼 해양자동채염기의 주요 기능품은 채염작업을 자동화할 수 있는 Salt collector part와 Towing part, 전기모터의 구동력 전달을 위한 Drive & power part, 그리고 채집된 소금을 이송하기 위한 Rail frame part와 Wheel part로 구성되어 있다. 해양자동채염기에 부착되는 기능품과 작동 시 발생하는 하중 지지를 위한 Collector frame, Rail frame 및 Main frame 등의 구조설계가 적용되어 있다. 해양자동채염기의 주요치수와 시스템 특성치는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Main particulars[8]

Main dimensions	Length	3.4 m
	Breadth	3.2 m
	Height	2.1 m
System specifications	Max. salt collecting capacity	0.7 ton
	Max. towing capacity	490 N
	Operation speed	6 m/min
	Brake	Belt type

구조해석을 통해 해양자동채염기의 구조설계 안전성을 검토하기 위한 설계 하중조건은 해양자동채염기 운용과 관련하여 가장 가혹한 작동 상태를 반영할 수 있도록 최대 적재조건(LC1), 최대 적재조건 하에서의 운전조건(LC2) 및 급격한 정지조건(LC3)을 각각 선정하였으며, Table 2에 설계하중조건 별 하중 부하의 조합을 정리하여 나타내었다. Table 2에 보여진 것처럼 설계하중조건은 각 하중조건 별로 해양자동채염기에 발생할 수 있는 하중을 조합하는 형태로 구성하였다. 설계하중조건 중 LC1에서는 기능품 중량이 각각의 무게

중심과 장착 위치가 반영되어 적용되었으며, 전체 해양자동채염기의 중량을 고려하기 위해 중력가속도에 의한 관성하중을 적용하였고, 최대 채염적재량은 해양자동채염기의 중앙부 Rail frame의 상면에 압력으로 분포하였다. LC2에서는 LC1의 모든 하중과 더불어 최대 견인력(max. towing capacity)과 운전 시 발생하는 가속도를 운전방향으로 적용하였다. LC3는 LC2에서의 최대 견인력을 제외하고 급격한 작동 중지 상태를 반영하기 위해 운전 시의 가속도를 반대 방향으로 적용하였다.

Table 2. Design load cases[8]

Design loads	Load cases		
	Loading [LC1]	Operating [LC2]	Braking [LC3]
Salt collector weight	√	√	√
Drive & power part weight	√	√	√
Towing part weight	√	√	√
Wheel part weight	√	√	√
Inertial load	√	√	√
Max. salt collecting capacity	√	√	√
Max. towing capacity	-	√	-
Acceleration at operating	-	√	-
Acceleration at braking	-	-	√

2.2 FEM 기반 구조강도 성능평가

해양자동채염기의 구조설계에 대한 강도성능을 평가하기 위해 Main frame, Rail frame 및 Collector frame 등과 같은 구조와 부품 중량과 설계하중을 적용할 수 있는 연결부 등을 고려하여 유한요소모델을 구성하였다. Fig. 2에는 전체 유한요소모델과 파트 별 형상 및 두께치수를 나타내었다.

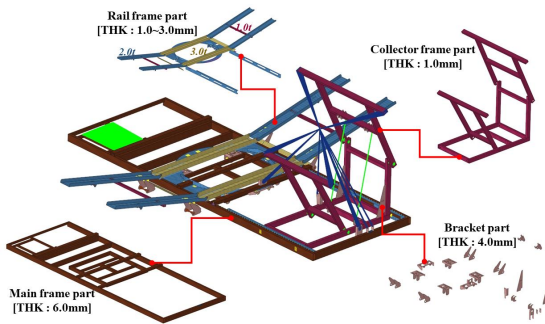


Fig. 2. Finite element model[8]

Fig. 2에 보여진 것처럼 Main frame part, Rail frame part, Collector frame part 그리고 Bracket part와 같은 주요 구조부재의 두께치수는 각각 6.0 mm, 1.0~3.0 mm, 1.0 mm, 그리고 4.0 mm로 각각 설계되었다. 유한요소모델의 요소의 종류는 주요 구조부재의 형상에 대해 셸(shell) 요소를 사용하였고, 기능품의 중량에 대해 집중질량 요소를 적용하였다. 구조부재의 연결과 기능품 중량 및 설계하중의 적용부는 강제연결요소(rigid link)를 적용하였다. 유한요소모델에 사용된 절점의 수와 요소의 수는 각각 114,431개와 112,896개이다. 재료는 오스테나이트계 스테인리스 강재(SUS304L)이며, 재료 특성치는 탄성계수 193 GPa, 밀도 8,000 kg/m³, 프와송 비(Poisson's ratio) 0.29, 그리고 항복강도 215 MPa이다. 구조해석에 사용되는 하중 및 경계조건은 Table 2의 설계하중조건과 Wheel part의 주행 방향인 회전자유도를 제외한 모든 자유도를 제한하여 적용하였다. 구조해석은 상용 FEM 프로그램인 Abaqus/implicit[9]를 사용하였으며, 각각의 설계하중조건 별로 응력, 변위, 그리고 재료의 항복강도를 고려한 구조안전성을 평가하였다. 구조안전성은 설계하중조건 별 최대응력이 재료의 항복강도 85%인 182.8 MPa 이하를 만족할 경우 적절한 것으로 평가하였다[10]. 해양자동채염기의 FEM을 이용한 강도성능 평가결과는 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3에 보여진 것처럼 모든 설계하중조건에서 최대 응력치가 재료의 허용항복응력 수준을 만족하였고, 설계하중 조건 중에 정지조건인 LC3가 가장 가혹한 조건으로 나타났다. 최대응력 발생위치는 LC1에서 Bracket part, LC2에서 Rail frame part, 그리고 LC3에서 Bracket part로 각각 나타났다. 응력과 변위분포 결과는 대표적으로 LC3에 대해 Fig. 3에 나타내었다.

Table 3. Max. von-Mises stress & displacement results

Structure part	Max. von-Mises stress [MPa] / Max. displacement [mm]			Allowable stress [MPa]
	LC1	LC2	LC3	
Overall structure	149.9 / 9.9	130.6 / 9.8	173.8 / 10.1	182.8
Main frame	142.7 / 6.9	127.3 / 6.9	142.5 / 7.1	182.8
Rail frame	137.0 / 6.7	130.6 / 6.6	142.0 / 6.8	182.8
Collector frame	45.5 / 9.9	47.1 / 9.8	49.9 / 10.1	182.8
Bracket	150.0 / 7.1	128.7 / 7.0	173.8 / 7.3	182.8

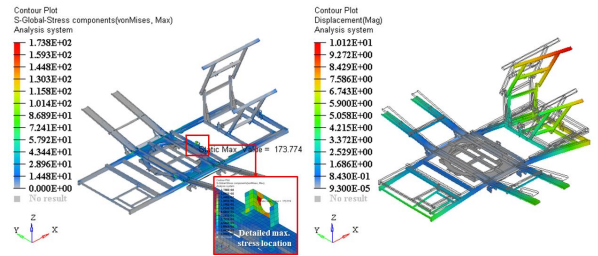


Fig. 3. Stress (left, MPa) and displacement (right, mm) contour results for LC3

Fig. 3에 보여진 것처럼 LC3에서 최대응력은 중앙부 상단에 위치한 Bracket에서 발생하였고, 최대변위는 Collector frame part의 처짐으로 나타났다. Table 3과 Fig. 3에 보여진 것처럼 초기 설계부재 치수로 산출된 LC3의 최대응력은 재료항복응력 허용치인 182.8 MPa의 강도성능 상한 값에 근접된 것으로 나타났다. 따라서 본 해양자동채염기의 구조설계에서는 LC3의 강도성능 조건을 만족하면서 최소중량을 구현하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

3. 해양자동채염기의 최적설계

본 연구에서는 메타모델 기반 근사최적화 방법을 이용하여 해양자동채염기의 구조설계에 대해 효율적인 최적설계안을 도출하고자 하였다. 근사최적화를 위한 메타모델은 RSM, Kriging, 그리고 COP의 3가지 모델을 적용하였다. 최적설계문제 정식화는 설계하중조건 별 최대항복응력 허용치 이하의 강도성능 제한조건을 모두 만족하면서 구조중량을 최소화할 수 있는 주요 구조부재의 두께치수 설계변수를 결정하도록 구성하였다.

메타모델 특성에 따른 근사최적화 결과를 검토하고, 실제 비근사최적화의 결과와의 비교를 통해 해양자동채염기 구조설계에 가장 적합한 근사최적화 방법을 고찰하였다. 비근사최적화는 일반적인 제한조건 최적화 문제에 사용되는 순차적 근사최적화(sequential approximate optimization, SAO)[11]을 이용하였다. 본 연구에서 고려된 메타모델 생성과 최적화해석은 상용 프로세스 자동화 및 설계탐색 프로그램인 ISIGHT[12]를 이용하였다.

3.1 메타모델 이론

근사최적화에 이용되는 메타모델은 설계영역에서 제한조건함수 및 목적함수와 같은 응답함수의 반응특성을 높은 정확도로 추정하기 위해 생성되며 최적화해석 과정에 적용되어 수렴성 및 수치계산 효율을 향상시킬 수 있다[13]. 메타모델은 다항식 형태의 회귀적 방법(regressive method)이나 설계영역을 확률적 방법으로 탐색하는 보간적 방법(interpolative method)을 이용하여 생성되는데, 본 연구에서는 RSM과 COP의 회귀적 방법과 Kriging의 보간적 방법의 3가지 메타모델을 이용하여 근사최적화를 수행하였으며, 본 절에서는 3가지 메타모델에 대해 간략히 설명하였다.

RSM은 최소자승방법으로부터 이차다항식의 회귀모델로 다음과 같이 정의된다[14].

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

실험계획법으로 산출되는 실험점으로부터 실제 응답벡터인 g 와 k 개의 기저 변수로 정의되는 행렬 Z 가 주어지면 g 와 Z 의 관계식은 다음과 같이 정리된다.

$$g = ZA_R + e \quad (2)$$

랜덤오차인 벡터 e 가 최소화되도록 RSM의 근사계수 벡터 A_R 을 구하기 위해 최소자승함수를 적용하여 메타모델의 근사계수를 적용하면 회귀 메타모델을 구할 수 있다.

Kriging 메타모델은 근사화 대상인 설계공간함수의 전역특성을 표현하는 전역모델과 실제함수와 전역모델과의 편차(deviation)인 국부모델의 합으로 정의된다[15].

$$\tilde{g}(x)_K = Z(x)^T A_K + E(x) \quad (3)$$

여기서 $A_K = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}^T$ 는 미지의 계수벡터

이고, $Z(x) = \{z_1(x), z_2(x), \dots, z_p(x)\}^T$ 는 설계변수 $x \in E^{n_d}$ 로 정의되는 전역모델 벡터이다. $E(x)$ 는 독립적인 정규분포로 가정하며, n 개의 실험점으로부터 얻은 응답벡터는 다음과 같이 정의한다.

$$g = [g(x^1), g(x^2), \dots, g(x^n)]^T \quad (4)$$

$E(x)$ 는 공간적 상관관계이며 통상 가우스상관함수가 적용되고, 다음과 같이 정의된다.

$$E(\theta, x^i, x^j) = \exp \left[- \sum_{k=1}^{n_d} \theta_k (x^i - x^j)^2 \right] \quad (5)$$

여기서 $\theta, x \in E^{n_d}$ 이고, 상관행렬은 대각요소가 1인 양정행렬(positive definite matrix)이다. 상관계수 θ 는 우량함수(likelihood function)를 최대화하는 최우량추정과정(maximum likelihood estimation)으로부터 최대 확률의 상관계수로 추정된다.

2차 다항회귀모델의 COP 메타모델은 Chebyshev 직교다항식 $P_n(x)$ 을 이용하여 다음과 같이 표현된다[16].

$$\tilde{g}(x)_C = b_0 + b_1 p_1(x)^2 + b_2 p_2(x) \quad (6)$$

$$+ b_3 \left[p_1(x)^3 - \frac{3a^2 - 7}{20} p_1(x)h^2 \right] + b_n p_n(x) + \dots$$

where

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

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

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

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

여기서 \bar{x} 는 설계변수의 평균치, a 는 수준수, h 는 수준간격계수이며, 차수 n 은 수준수 a 보다 작아야 하고, 각 설계변수의 최대차수는 $a-1$ 이 된다. b 는 근사계수이며 다음의 식으로 정의된다.

$$b_0 = \overline{g_C} \quad (7)$$

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

3.2 최적설계 정식화

본 연구에서 고려한 해양자동채염기의 구조설계 최적화를 위한 설계변수와 설계변수의 범위는 Fig. 4에 정리하여 나타내었다.

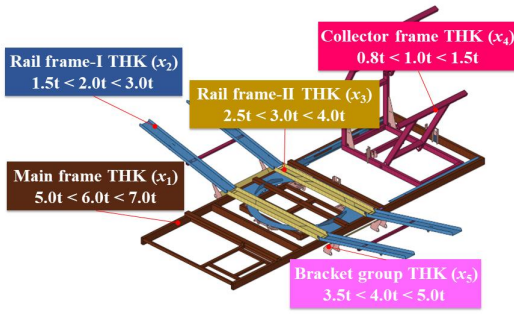


Fig. 4. Design variables and ranges

Fig. 4에 나타난 바와 같이 설계변수는 Main frame part의 두께(x_1), Rail frame-I part의 두께(x_2), Rail frame-II part의 두께(x_3), Collector frame part의 두께(x_4), 그리고 Bracket group part의 두께(x_5)의 5개 설계변수를 고려하였고, 설계변수의 하한치와 상한치는 해양자동채염기의 제작 및 생산이 가능한 범위를 고려하였고, 최적화 과정에서 메타모델의 정확도를 유지하기 위해 메타모델의 생성에 적용된 실험계획법의 변동 수준 내에서 설정하였다[8]. 최적설계정식화는 강도성능 제한조건을 만족하면서 최소중량이 구현되도록 다음과 같이 구성하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \\ & W = W(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \end{aligned} \quad (8)$$

Subject to

$$\begin{aligned} g_1(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) &= LC1 \text{ stress} \leq 182.8 \text{ MPa} \\ g_2(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) &= LC2 \text{ stress} \leq 182.8 \text{ MPa} \\ g_3(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) &= LC3 \text{ stress} \leq 182.8 \text{ MPa} \\ 5.0 &\leq x_1 \leq 7.0 \text{ [mm]} \\ 1.5 &\leq x_2 \leq 3.0 \text{ [mm]} \\ 2.5 &\leq x_3 \leq 4.0 \text{ [mm]} \\ 0.8 &\leq x_4 \leq 1.5 \text{ [mm]} \\ 3.5 &\leq x_5 \leq 5.0 \text{ [mm]} \end{aligned}$$

식 (8)에서의 제한조건에 적용된 상한값은 해양자동채염기의 구조안전에 관한 설계성능 목표치로서 재료항복응력 허용치인 182.8 MPa를 고려하였다. Table 3에 나타난 바와 같이, 설계변수의 초기 값으로부터 계산된 LC3의 응력은 설계성능의 상한 값에 근접되어 있기 때문에 본 해양자동채염기의 설계문제에서는 LC3의 응력 제한조건을 만족하면서 최소중량을 구현하는 것이 중요하다.

3.3 근사최적화 과정

해양자동채염기의 설계문제에 대한 메타모델 특성에 따른 근사최적화의 비교연구를 위하여 다음과 같은 과정을 통하여 근사최적화를 수행하였다.

- 1) 메타모델 생성을 위한 실험계획법(Design of Experiments, DOE)은 직교배열설계(orthogonal array design, OAD)를 사용하여 실험행렬을 구성하고, Abaqus/implicit를 이용한 FEM 구조해석을 수행하여 메타모델링의 실험데이터를 생성
- 2) 1) 항의 FEM 구조해석 기반 실험데이터로부터 식 (8)의 응답함수인 목적함수 및 제한조건에 대한 RSM, Kriging 및 COP의 메타모델을 생성
- 3) 2) 항의 각각의 메타모델을 이용하여 SAO 방법을 사용하여 최적해 탐색
- 4) 각 근사최적해의 가용성(feasibility) 검증에 대한 최적 수렴해에 대한 FEM 구조해석을 수행
- 5) 실제 비근사최적화를 수행하고 근사최적화의 최적 설계 특성과 수치계산 비용을 비교

1)항의 DOE 과정에서 사용된 OAD[16]에서는 3수준 직교배열표가 적용되었으며, Fig. 4에 나타난 설계변수의 하한치, 초기치 및 상한치를 고려하였고, 총 81회의 실험행렬을 구성하였다. 본 연구의 설계문제에 대해 산출된 RSM 메타모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x)_{R-LC1} &= 556.4 + 45.2x_1 + 8.7x_2 - 164.8x_3 \\ &\quad - 24.7x_4 - 16.7x_5 - 0.9x_1^2 + 3.9x_2^2 + 16.5x_3^2 \\ &\quad + 2.0x_4^2 + 1.3x_5^2 - 0.5x_1x_2 - 5.7x_1x_3 - 1.4x_1x_4 \\ &\quad + 0.9x_1x_5 - 2.8x_2x_3 - 1.4x_2x_4 + 0.6x_2x_5 + 3.9x_3x_4 \\ &\quad + 0.9x_3x_5 - 1.6x_4x_5 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x)_{R-LC2} &= 577.3 + 30.9x_1 + 10.1x_2 - 176.9x_3 \\ &\quad - 29.9x_4 - 12.0x_5 - 0.9x_1^2 + 1.5x_2^2 + 17.9x_3^2 \\ &\quad + 2.3x_4^2 + 0.9x_5^2 - 2.8x_1x_2 - 5.8x_1x_3 - 1.2x_1x_4 \\ &\quad + 0.2x_1x_5 - 0.4x_2x_3 + 1.0x_2x_5 + 3.4x_3x_4 \\ &\quad + 1.3x_3x_5 - 1.3x_4x_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x)_{R-LC3} &= 470.4 + 91.5x_1 + 19.9x_2 - 175.9x_3 \\ &\quad - 25.7x_4 - 14.1x_5 - 4.9x_1^2 + 1.1x_2^2 + 19.1x_3^2 \\ &\quad + 1.7x_4^2 + 0.9x_5^2 - 0.3x_1x_2 - 7.9x_1x_3 - 0.9x_1x_4 \\ &\quad + 0.5x_1x_5 - 2.8x_2x_3 - 2.6x_2x_4 + 2.2x_2x_5 + 4.4x_3x_4 \\ &\quad + 0.5x_3x_5 - 1.2x_4x_5 \end{aligned}$$

Kriging 메타모델의 상관계수는 다음의 표와 같다.

Table 4. Correlation coefficient of Kriging meta-model

Responses	Correlation coefficients				
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
$\tilde{g}(x)_{K-LC1}$	0.51	0.37	2.00	0.27	0.74
$\tilde{g}(x)_{K-LC2}$	0.47	0.42	1.99	0.22	0.85
$\tilde{g}(x)_{K-LC3}$	0.33	0.38	1.99	0.40	0.84

또한 COP 메타모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x)_{C-LC1} = & 240.2 + 12.7p_1(x) + 5.1p_2(x) \\ & - 51.4p_3(x) - 9.3p_4(x) - 3.6p_5(x) - 0.9p_6(x) \\ & + 3.9p_7(x) + 16.5p_8(x) + 2.0p_9(x) + 1.3p_{10}(x) \\ & - 0.5p_{11}(x) - 5.7p_{12}(x) - 1.4p_{13}(x) + 0.9p_{14}(x) \\ & - 2.7p_{15}(x) - 1.4p_{16}(x) + 0.6p_{17}(x) + 3.9p_{18}(x) \\ & + 0.9p_{19}(x) - 1.6p_{20}(x) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x)_{C-LC2} = & 221.4 + 10.4p_1(x) + 8.1p_2(x) \\ & - 48.1p_3(x) - 9.6p_4(x) - 1.9p_5(x) + 0.9p_6(x) \\ & + 1.5p_7(x) + 17.9p_8(x) + 2.3p_9(x) + 0.9p_{10}(x) \\ & - 2.8p_{11}(x) - 5.8p_{12}(x) - 1.2p_{13}(x) + 0.2p_{14}(x) \\ & + 0.4p_{15}(x) - 0.03p_{16}(x) + 1.0p_{17}(x) + 3.4p_{18}(x) \\ & + 1.3p_{19}(x) - 1.3p_{20}(x) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{g}(x)_{C-LC3} = & 259.1 + 15.6p_1(x) + 10.4p_2(x) \\ & - 52.9p_3(x) - 9.3p_4(x) - 3.3p_5(x) - 4.9p_6(x) \\ & + 1.0p_7(x) + 19.1p_8(x) + 1.7p_9(x) + 0.9p_{10}(x) \\ & - 0.3p_{11}(x) - 7.9p_{12}(x) - 0.9p_{13}(x) + 0.5p_{14}(x) \\ & - 2.9p_{15}(x) - 2.6p_{16}(x) + 2.2p_{17}(x) + 4.4p_{18}(x) \\ & + 0.5p_{19}(x) - 1.2p_{20}(x) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} p_1(x) &= x_1 - 4.3; p_2(x) = x_2 - 1.5; p_3(x) = x_3 - 3.3; \\ p_4(x) &= x_4 - 3.7; p_5(x) = (x_5 - 4.3); \\ p_6(x) &= (x_1 - 4.3)^2 - 1.5; p_7(x) = (x_2 - 1.5)^2 - 0.17; \\ p_8(x) &= (x_3 - 3.3)^2 - 3.4; p_9(x) = (x_4 - 3.7)^2 - 2.7; \\ p_{10}(x) &= (x_5 - 4.3)^2 - 1.5; p_{11}(x) = (x_1 - 4.3)(x_2 - 1.5); \\ p_{12}(x) &= (x_1 - 4.3)(x_3 - 3.3); p_{13}(x) = (x_1 - 4.3)(x_4 - 3.7); \\ p_{14}(x) &= (x_1 - 4.3)(x_5 - 4.3); p_{15}(x) = (x_2 - 1.5)(x_3 - 3.3); \\ p_{16}(x) &= (x_2 - 1.5)(x_4 - 3.7); p_{17}(x) = (x_2 - 1.5)(x_5 - 4.3); \\ p_{18}(x) &= (x_3 - 3.3)(x_4 - 3.7); p_{19}(x) = (x_3 - 3.3)(x_5 - 4.3); \\ p_{20}(x) &= (x_4 - 3.7)(x_5 - 4.3); \end{aligned}$$

3)항의 메타모델을 이용한 근사최적화에 적용된 SAO는 최적해의 수렴성을 순차적으로 확인하여 최적 계산 수행 여부를 반복적으로 결정하는 방법이며, 이 방법에서는 이동거리의 결정을 통해 근사화가 과도화 되는 것을 방지하기 위한 이동한계전략을 사용한다.

3.4 근사최적화 결과 및 고찰

해양자동채염기의 근사최적설계 정식화 과정에서 RSM, Kriging 및 COP 메타모델을 각각 적용하여 근사최적해 결과를 도출하였다. 또한, 메타모델 특성에 따른 근사최적화 결과의 효율성을 비교하기 위해 FEM 구조해석을 통해 비근사최적화해를 도출하여 근사최적해의 결과와 비교하였다. 실제 값과의 검증을 위해 근사최적화의 수렴결과는 FEM 구조해석으로부터 재산출하였다. 최적화 결과는 Table 5에 설계변수 최적점, 목적함수인 중량감소, 제한조건 가용성 만족 여부, 그리고 근사화 함수평가횟수(number of function evaluations, NFE)에 대해 정리하여 나타내었고, 목적함수의 최적화 수렴결과는 Fig. 5에 도시하였다.

Table 5. Comparative results of approximate optimization

Method	Optimum [mm]	Objective [kg]	Approximate constraints [MPa]	Actual constraints [MPa]	NFE
RSM	$x_1 = 5.0$ $x_2 = 1.5$ $x_3 = 2.5$ $x_4 = 0.8$ $x_5 = 3.5$	185.9	$g_1 = 156.0$ $g_2 = 134.2$ $g_3 = 164.8$	$g_1 = 165.5$ $g_2 = 148.6$ $g_3 = 183.1^{1)}$	77
Kriging	$x_1 = 6.0$ $x_2 = 2.0$ $x_3 = 3.0$ $x_4 = 0.9$ $x_5 = 4.0$	222.5	$g_1 = 158.9$ $g_2 = 141.0$ $g_3 = 182.8$	$g_1 = 148.6$ $g_2 = 129.1$ $g_3 = 171.9$	269
COP	$x_1 = 5.0$ $x_2 = 2.0$ $x_3 = 3.2$ $x_4 = 0.8$ $x_5 = 4.0$	213.5	$g_1 = 148.6$ $g_2 = 126.7$ $g_3 = 164.4$	$g_1 = 167.8$ $g_2 = 150.2$ $g_3 = 177.3$	117
FEM (Non-approximate)	$x_1 = 5.0$ $x_2 = 1.5$ $x_3 = 2.5$ $x_4 = 0.8$ $x_5 = 3.7$	186.5	-	$g_1 = 174.1$ $g_2 = 157.0$ $g_3 = 182.8^{2)}$	-

1) Infeasible constraint, 2) Active constraint

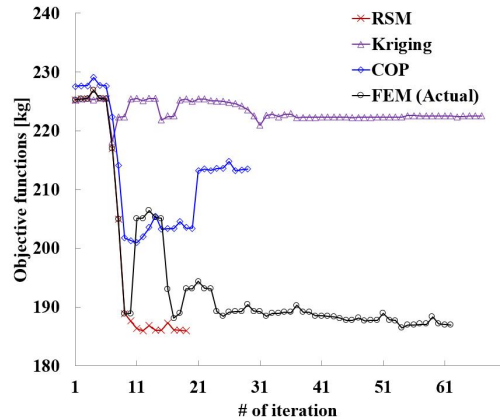


Fig. 5. Iteration history of objective functions

Table 5와 Fig. 5에 보여진 것처럼, RSM을 이용한 근사최적화 결과는 가장 많은 중량감소와 빠른 최적화 수렴결과를 나타냈지만, 정지조건인 LC3의 응력이 실제 제한조건 평가에서 위배된 가용성(infeasible constraint)의 결과가 나타났다. 이러한 현상은 메타모델의 특성에 따라 나타날 수 있으며, 제한조건함수의 비선형 특성 때문에 근사 최적해가 가용성 영역 밖에 존재할 수 있음을 의미한다[17]. 따라서 이와 같은 근사 최적설계는 제한조건을 위배하기 때문에 실제 설계에 적용할 수 없다. FEM 구조해석 기반의 비근사최적화에서는 본 해양자동채염기의 설계 문제에서 가장 중요한 설계성능 제한조건인 LC3의 상한치에 활성화(active constraint)되는 결과를 나타내었다. Kriging과 COP의 경우, RSM 결과 대비 중량감소 효과가 낮지만, 모든 설계강도성능 제한조건을 만족하는 결과를 나타내었다. 또한, LC3 제한조건에 대해 제한조건 상한치에 활성화된 FEM 구조해석 기반의 비근사최적화 결과 대비하여 Kriging과 COP의 근사최적화 결과는 각각 6%와 3% 정도 가용성 영역 내에 분포하는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 설계나 제조상의 불확실성에 대해 구조 안전성을 향상시키는 효과를 가져오게 된다. 함수평가횟수와 목적함수 수렴결과를 고려해 볼 때 해양자동채염기의 근사최적설계에서는 COP의 결과가 Kriging 보다 우수한 것으로 평가되었다.

4. 결론

본 연구에서는 저자가 수행하였던 기존의 연구결과 [8]를 확장하여 해양자동채염기의 구조설계에 대해 가장 효율적인 최적설계 결과를 탐색하기 위해 다양한 메타모델을 이용한 근사최적화를 수행하였다. 메타모델이 실제 설계문제에서 활용되기 위해서는 근사최적화나 신뢰성해석에서의 적합성 분석이 반드시 필요하기 때문에 메타모델 특성에 따른 근사최적화해석의 효율성과 적합성을 검토하였고, 해양채염기 구조설계에 가장 적합한 메타모델과 근사최적화해석 융합방법을 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 초기설계의 구조 안전성을 평가에서 실제 작동조건인 최대 적재조건, 최대 적재조건 상태에서의 운전조건 및 급격한 정지조건을 고려한 설계하중조건을 산정하였고, FEM 기반 3차원 구조해석모델을 이용한 강도성능 평가결과로부터 모든 설계하중조건에서 최대 응력

치가 재료의 허용항복응력 수준을 만족하였고, 설계하중조건 중에 정지조건이 가장 가혹한 조건으로 나타났으며, 해양자동채염기의 구조설계에서는 정지조건인 강도성능 조건을 만족하면서 중량을 최소화하는 것이 중요한 것으로 검토되었다.

- 2) 최적설계문제는 설계하중조건 별 강도성능의 제한조건을 모두 만족하면서 최소 구조중량을 구현할 수 있는 주요 구조부재 두개의 설계변수를 결정하도록 정식화하였으며, 근사최적화는 RSM, Kriging, 그리고 COP의 3가지 방법을 적용하여 최적설계 결과를 탐색하였고, 메타모델 특성에 따른 근사최적화 결과의 효율성을 비교하기 위해 FEM 구조해석 기반의 비근사최적화를 통해 최적해를 도출하여 근사최적화 결과와 비교하였다.

- 3) RSM 기반 근사최적화 결과는 가장 좋은 중량감소와 빠른 최적화 수렴결과를 나타냈지만, 정지조건인 실제 제한조건 평가에서 위배된 가용성을 나타낸 반면, Kriging과 COP는 RSM 결과 대비 중량감소 효과가 낮지만 모든 설계강도성능 제한조건을 만족하는 결과를 나타내었다.

- 4) 함수평가횟수와 목적함수 수렴결과로부터 본 연구에서 고려한 해양자동채염기의 구조설계에 대한 근사최적설계에서는 COP 기반의 근사최적화 방법이 가장 효율적인 최적설계 결과를 나타내었다.

- 5) RSM, Kriging, 그리고 COP와 같은 다양한 메타모델을 최적 설계 과정에 융합하여 가장 효율적인 메타모델과 최적화해석의 융합방법을 검토함으로써 해양자동채염기 구조설계에 적합한 근사최적화 방법을 제시할 수 있었다.

근사최적화 기법은 높은 수치계산량이 요구되는 다분야 최적화나 확률론적 최적화에 활용도가 높으며, 향후 본 연구의 결과를 확장하여 신뢰성 기반 최적설계와 같은 확률론적 최적화 연구를 수행 예정이다.

REFERENCES

- [1] Korea Maritime Institute. (2019). *KMI Trend Analysis - Vol. 161*. Seoul.
- [2] C. Y. Song, J. Lee & J. 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] 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/SNAK.2011.48.4.325
- [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] J. H. Byun & O. Jo. (2020). Machine Learning-based MCS Prediction Models for Link Adaptation in Underwater Networks, *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(5), 1-7.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.05.001
- [7] G. S. Chae. (2019). A Study of the Nonlinear Characteristics Improvement for a Electronic Scale using Multiple Regression Analysis, *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(6), 1-6.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.6.001
- [8] C. Y. Song & D. J. Lee. (2020). A Comparative Study on Surrogate Models and Sensitivity Analysis for Structure Design of Automatic Salt Collector Using Orthogonal Array Experiment, *Journal of Convergence for Information Technology*, 10(7), 138-146.
DOI : 10.22156/CS4SMB.2020.10.07.138
- [9] Simulia. (2018). *Abaqus User Manual*. Simulia.
- [10] DNV-GL. (2015). *Structural Design of Offshore Units WSD Method*, DET NORSKE VERITAS, 90.
- [11] R. T. Haftka & Z. Gürdal. (1991). *Elements of Structural Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
DOI : 10.1007/978-94-011-2550-5
- [12] Simulia. (2018). *ISIGHT User Manual*. Simulia.
- [13] 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
- [14] S. K. Cho, H. Byun & T. H. Lee. (2009). Selection Method of Global Model And Correlation Coefficients for Kriging Metamodel. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, 33(3), 813-818.
DOI : 10.3795/KSME-A.2009.33.8.813
- [15] S. H. Baek, H. S. Kim & D. S. Han. (2011). Structural Optimization of Variable Swash Plate for Automotive Compressor Using Orthogonal Polynomials. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A*, 35(10), 1273-1279.
DOI : 10.3795/KSME-A.2011.35.10.1273
- [16] S. H. Park. (2012). *Design of Experiments*, Minyoung Publishing, Seoul.
- [17] C. Y. Song & J. Lee. (2011). A Realization of Constraint Feasibility in a Moving Least Squares Response Surface Based Approximate Optimization. *Computational Optimization and Applications*, 50(1), 163-188.
DOI : 10.1007/s10589-009-9312-z

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