신뢰성 기반 강건 최적화를 이용한 자동채염기의 확률론적 구조설계

Probabilistic Structure Design of Automatic Salt Collector Using Reliability Based Robust Optimization

송창용1*

Chang Yong Song^{1*}

Abstract>

This paper deals with identification of probabilistic design using reliability based robust optimization in structure design of automatic salt collector. The thickness sizing variables of main structure member in the automatic salt collector were considered the random design variables including the uncertainty of corrosion that would be an inevitable hazardousness in the saltern work environment. The probabilistic constraint functions were selected from the strength performances of the automatic salt collector. The reliability based robust optimum design problem was formulated such that the random design variables were determined by minimizing the weight of the automatic salt collector subject to the probabilistic strength performance constraints evaluating from reliability analysis. Mean value reliability method and adaptive importance sampling method were applied to the reliability evaluation in the reliability based robust optimization. The three sigma level quality was considered robustness in side constraints. The probabilistic optimum design results according to the reliability analysis methods were compared to deterministic optimum design results. The reliability based robust optimization using the mean value reliability method showed the most rational results for the probabilistic optimum structure design of the automatic salt collector.

Keywords : Reliability Based Robust Optimization, Probabilistic Structure Design, Mean Value Reliability Method, Adaptive Importance Sampling Method, Automatic Salt Collector

1* 정회원, 교신저자, 목포대학교 조선해양공학과, 교수, 1* Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo 공학박사, E-mail: cysong@mokpo.ac.kr National University

KS(IC

800 한국산업융합학회 논문집 제23권 제5호

1. 서 론

최근 해양수산기자재산업은 향후 식량자원 확보 와 관련된 중요 미래산업 중 하나로 보고되고 있 고, 수산자원의 안정적 확보를 위해 세계적으로 관련 산업육성이 강화되고 있다[1]. 해양수산기자 재 산업의 시장규모는 최근 지속적으로 증가추세 이지만, 국내 해양수산기자재의 국산화와 자동화 비율은 매우 낮은 수준이고, 전체 시장규모 대비 수입 의존도가 높은 상황이다. 채염기는 노동력 의존도가 높은 해양염전작업의 특성을 개선하기 위해 자동화 전환이 시급한 해양수산기계 중 하나 이다. 해양채염 및 이송작업의 안전성 확보와 단 위 채염결정지 면적 당 생산량 증대를 위해 최근 전동구동방식 자동채염기의 국산화 개발이 시작되 고 있다. 자동채염기와 같이 관련된 국내외 설계 규정이 마련되어 있지 않은 새로운 장비의 구조설 계 안전성은 실제 작업조건이 반영된 설계하중조 건 산정과 이를 적용한 구조해석을 통해 평가되어 오고 있다. 그러나 기존의 품질문제에 대한 신뢰 성 평가 데이터가 충분하지 않는 자동채염기와 같 은 기계구조의 설계안전도를 설계단계에서 합리적 인 수준으로 결정하기 위해서는 신뢰성과 강건성 을 융합하여 설계인자의 불확실성을 고려한 확률 론적 구조 설계의 구현이 필요하다.

해양기계장비의 설계안전도와 관련하여 다수의 확률론적 설계 응용 연구가 수행되어 오고 있다. Christopher and Masoud[2]는 복합재료 잠수 구 조체의 확률론적 설계를 구현하기 위해 파라메트 릭 불확실성을 고려한 신뢰성 기반 설계 최적화를 수행하였다. Song et al.[3]은 부유식 생산저장하 역 설비의 라이저 부가물에 대한 신뢰성 기반 설 계최적화를 위해 제한조건 가용성 이동최소자승 근사모델을 개발하여 설계위험도를 최소화할 수 있는 확률론적 최적설계안을 제시하였다. Bai et al.[4]은 경량 해저 파이프라인의 신뢰성해석을 위 해 유한요소해석과 반응표면법을 이용하여 몬테카 를로 시뮬레이션을 수행하였다. Yin et al.[5]는 심해장비 해수유압펌프의 밸브 포트 판의 신뢰성 해석과 민감도평가를 위해 비확률적 신뢰성 모델 을 개발하였다. Park et al.[6]은 항해 통신용 레 이더 마스트의 진동문제를 해결하기 위해 통계적 설계실험방법을 이용하여 공진을 회피할 수 있는 설계방안을 탐색하였다. Sung et al.[7]은 심해광 물 채광을 개발된 심해저 파일럿 로봇의 설계 신 뢰도를 확보하기 위해 Verification & Validation 기법을 이용하였다.

본 연구에서는 설계단계에서 자동채염기의 구조 설계에 대한 확률론적 최적설계를 구현하기 위해 신뢰성해석과 강건설계 방법을 융합한 신뢰성기반 강건 최적화(Reliability based robust optimization, RBRO)를 수행하였다. 해양염전 작업환경으로 인 해 발생할 수 있는 부식을 불확실성으로 고려하여 자동채염기의 주요 구조부재의 두께치수는 랜덤변 수(Random variable)로 고려하였으며, 강도성능은 확률제한조건함수(Probabilistic constraint function) 로 적용하였다. 강도성능은 실제 자동채염기의 작 동조건을 반영한 하중경계조건을 적용하여 유한요 소해석(Finite element analysis, FEA)을 기반으로 최대응력을 산출하여 평가하였다. RBRO 설계 문 제는 신뢰성해석으로부터 강도성능의 확률제한조 건을 만족하면서 중량을 최소화할 수 있는 랜덤설 계변수를 결정하도록 정식화하였다. 또한 강건성 은 부제약조건 상에 3 시그마 수준을 적용하였다. 본 연구에서는 자동채염기의 확률론적 최적설계에 적합한 신뢰성해석 방법을 검토하기 위해 RBRO 과정에서 평균점 신뢰성해석 방법(Mean value reliability method, MVRM)과 적합중요도 샘플링 방법 (Adaptive importance sampling method, AISM)의 신뢰성해석 기법을 각각 적용하여 최적

KS(IC

신뢰성 기반 강건 최적화를 이용한 자동채염기의 확률론적 구조설계 801

설계 수렴결과, 수치계산 특성, 그리고 신뢰확률 결과를 비교하였다. 또한 결정론적 최적화를 수행 하여 RBRO로부터 산출된 확률론적 최적화 결과 의 특성을 검토하였다. 본 논문은 2장에서 FEA 기반 강도성능 평가 내용을 정리하였고, 3장에서 는 RBRO, MVRM, 그리고 AISM에 대한 간략한 이론적 배경과 RBRO의 결과비교 내용을 기술하 였으며, 마지막으로 결론에서 전체 연구내용을 정 리였다.

2. 구조설계의 강도성능 평가

자동채염기의 시스템 구성과 구조해석 모델은 그림 1에 나타내었다.



(a) system configuration



Fig. 1 System configuration and FEA model

그림 1(a)에 나타나 있는 것처럼 자동채염기는 채염작업의 자동화를 위한 Salt collector와 Towing unit 시스템, 구동력 전달용 Drive & power 시 스템, 채집된 소금의 이송을 위한 Rail frame, 그 리고 기계구성품의 장착과 하중 지지를 위한 프레 임 구조로 구성되어 있다. 신뢰성 기반 강건 최적 화에서 고려된 주요 구조의 FEA 모델링 및 초기 설계 두께치수는 그림 1(b)에 나타나 있다. FEA 모델의 구조부재는 쉘(shell) 요소로 생성되었고, 각 기계구성품의 중량은 집중질량 요소를 사용하 여 구현하였으며, 각 구조부재의 연결과 집중질량 및 설계하중의 적용을 위해 강체연결요소(rigid link)를 사용하였다. Main frame, Rail frame, Collector frame 그리고 Bracket의 초기설계 두 께치수는 각각 5.0 mm, 1.5~2.5 mm, 0.8 mm, 그리고 3.7 mm로 적용되어 있다. FEA 모델의 요 소 수와 절점 수는 각각 112,896개와 114,431개 이며, 재료 물성치는 밀도 8,000 kg/m³, 탄성계수 193 GPa, 프와송 비(Poisson's ratio) 0.29, 그리 고 항복강도 215 MPa인 오스테나이트계 스테인 레스 강재(SUS316) 이다.

강도성능평가를 위한 하중조건은 표 1에 정리 하였으며, 가장 가혹한 작동상태를 고려하기 위해 시스템 중량과 작동하중 상태를 조합하여 최대 적 재조건(Loading, LC1), 최대 적재조건 하에서의 운전조건(Operating, LC2), 그리고 정지조건(Braking, LC3)으로 산정하였다. 표 1에서 관성하중(inertial load)은 중력방향, 작동조건 가속도는 이송방향, 그리고 정지조건 가속도는 이송방향과 반대방향으 로 각각 적용하였다. 경계조건은 Rail frame 하부 에 장착된 각각 Wheel의 주행방향의 회전자유도 를 제외한 나머지 자유도를 모두 구속하여 적용하 였다. 802 한국산업융합학회 논문집 제23권 제5호

Table	1.	Design	load	cases
-------	----	--------	------	-------

	Load cases			
Design loads	Loading [LC1]	Operating [LC2]	Braking [LC3]	
Salt collector weight (0.2 ton)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
Drive & power part weight (0.23 ton)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
Towing part weight (0.07 ton)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
Wheel part weight (0.03 ton)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
Inertial load (1.0 G)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
Max. salt collecting capacity (0.7 ton)	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
Max. towing capacity (490 N)	-	\checkmark	-	
Acceleration at operating (1.25 G)	-	\checkmark	-	
Acceleration at braking (-1.25 G)	-	-	\checkmark	

구조해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 Abaqus/ Implicit[8]를 이용하여 하중조건 별 최대응력(Max. von-Mises stress)을 산출하였고, 재료 항복응력을 기준으로 구조안전도를 평가하였다. 구조안전도 기준은 하중조건 별 최대응력이 재료항복강도의 85%인 183 MPa 이하인 경우에 적절한 것으로 판정하였다[9]. FEA 기반 강도성능 평가결과는 표 2에 정리하여 나타내었다.

Ta	ble	2.	Strength	performance	results
----	-----	----	----------	-------------	---------

Structure	Max. vor	Safety		
part	LC1	LC2	LC3	check
Overall structure	166.2	149.2	173.8	OK
Main frame	166.2	142.0	164.2	OK
Rail frame	151.7	149.2	155.5	OK
Collector frame	51.0	55.4	54.1	OK
Bracket	159.9	139.7	173.8	OK

표 2에 나타난 것처럼 모든 하중조건에서 구조 안전도 기준을 만족하는 것으로 나타났고, LC3의 Bracket part에서 발생한 최대응력치가 가장 높게 나타났다. 하중조건 별 최대응력이 발생되는 구조 부재는 LC1에서 Main frame part, LC2에서 Rail frame part, 그리고 LC3에서 Bracket part로 각각 나타났으며, 모든 하중조건에서 Collector frame part의 응력수준이 가장 낮게 나타났다. 응력분포 결과는 대표적으로 LC3에 대해 그림 2에 나타내었다.



Fig. 2 Stress contour results of LC3 [unit: MPa]

그림 2에 보여진 것처럼 LC3에서 최대응력은 중앙부의 Bracket 부재에서 발생하였다. 강도성능 평가 결과로부터 구조설계의 구조안전도는 기준 이하를 만족하고 있지만, LC3에서 안전여유치가 5% 미만으로 성능한계치에 가까운 상태이기 때문 에 자동채염기의 중량감소 최적회를 위해서는 설 계인자의 불확실성을 고려한 확률론적 최적설계가 필요한 것으로 판단되었다.



신뢰성 기반 강건 최적화를 이용한 자동채염기의 확률론적 구조설계 803

3. 신뢰성 기반 강건 최적화

3.1 이론적 배경

RBRO의 정식화는 다음의 식과 같이 정의된다 [10-11].

$$\begin{array}{ll} \textit{Minimize} & f(\mu_y(x), \sigma_y(x)) \\ \textit{s.t.} & G_i(\mu_y(x), \sigma_y(x)) \leq 0 \\ & x_L + n\sigma_x \leq \mu_x \leq x_U - n\sigma_x \end{array} \tag{1}$$

여기서 f는 목적함수, G는 확률제한조건함수, μ는 평균, σ는 표준편차, x_L은 설계하한, x_U는 설계상한, 그리고 n은 시그마 수준이다. RBRO는 식 (1)과 같이 설계변수의 불확실성과 품질목표치 인 시그마 수준을 고려하여 확률제한조건함수와 강 건성 부제약조건을 만족하면서 목적함수를 최소화 할 수 있는 설계해를 탐색하는 방법이다. 최적설 계해 탐색 제한조건 최적화 문제에 사용되는 순차 적 근사최적화(sequential approximate optimization, SAO)[12]을 이용하였다. 확률제한조건함수는 신뢰 성해석을 통해 평가되는데, 본 연구에서는 MVRM 과 AISM을 각각 적용하였다.

MVRM은 테일러급수전개를 이용하여 확률제한 조건함수에 대한 평균과 표준편차를 근사적으로 산출하는 방법이며, 테일러급수전개 방법에 따라 신뢰성해석의 정확도가 달라진다. MVRM에서 신 뢰지수는 다음의 식과 같이 계산된다[13].

$$\beta = \frac{\mu_x}{\sigma_x} \tag{2}$$

식 (2)로부터 계산된 신뢰지수를 다음의 식 에 대입하면 파괴확률(p_f)과 신뢰확률(R)을 산출할 수 있다.

$$p_f = \Phi(-\beta) \tag{3}$$

$$R = P\{G > 0\} = 1 - p_f \tag{4}$$

여기서 Φ는 표준정규분포함수이다.

AISM은 Fig. 3에 보여진 것처럼 제한조건함수 에 대한 파괴영역이 주곡률을 이용한 2차 다항식 으로 근사화된다[14].



Fig. 3 Concept of AISM[14]

AISM에서 곡률 값은 파괴영역에 존재하는 샘플 수를 기반으로 파괴영역을 포함하도록 반복적으로 업데이트된다.

3.2 RBRO 결과 고찰

자동채염기의 구조설계에 대한 RBRO의 정식화 는 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{array}{ll} \text{Minimize} & W(\mu_y(X_i), \sigma_y(X_i)), \ i = 1, 2, 3, 4, 5 & (5) \\ \text{s.t.} \ G_j(\mu_y(X_i), \sigma_y(X_i)) \leq 183 MPa, \ j = 1, 2, 3 \\ & 3.0 + 3\sigma_{X_1} \leq \mu_{X_1} \leq 7.0 - 3\sigma_{X_1} \\ & 1.0 + 3\sigma_{X_2} \leq \mu_{X_2} \leq 3.0 - 3\sigma_{X_2} \\ & 1.5 + 3\sigma_{X_3} \leq \mu_{X_3} \leq 4.0 - 3\sigma_{X_3} \\ & 0.6 + 3\sigma_{X_4} \leq \mu_{X_4} \leq 1.2 - 3\sigma_{X_4} \\ & 2.0 + 3\sigma_{X_1} \leq \mu_{X_2} \leq 5.0 - 3\sigma_{X_1} \end{array}$$

식 (5)에 나타난 있는 것처럼 본 연구에서는 부 제약조건 상에 신뢰확률 99.73%인 ±3 시그마 수 준의 강건성을 적용하였다. 또한 자동채염기 구조

804 한국산업융합학회 논문집 제23권 제5호

설계인자에 대한 불확실성 요소로 해양염전에 사 용되는 기계장비임을 고려하여 부식을 적용하였 고, 랜덤변수 설정사항은 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Definition of random variables

Random variable	RSD	Distribution type	Design variable	Mean
X_1	10 %	Normal	t_1	5.0 mm
X_2	10 %	Normal	t_2	1.5 mm
X_3	10 %	Normal	t ₃	2.5 mm
X_4	10 %	Normal	t4	0.8 mm
X5	10 %	Normal	t5	3.7 mm

표 3에 정리된 바와 같이 평균치는 그림 1(b) 에 나타난 초기설계 두께로 설정하였으며, 상대 표준 편차(relative standard deviation, RSD)는 기존의 오스테나이트계 스테인레스 강재의 부식특 성에 대한 실험연구결과[15]를 참조하여 10 %로 설정하였고, 확률분포함수는 정규분포(Normal distribution)를 따르는 것으로 정의하였다. 본 연 구에서는 정상 작동상태를 기준으로 부식을 고려 한 강도성능의 변동성을 검토하기 때문에 정규분 포로 정의하였다. 확률제한조건함수는 3가지 강도 평가를 위한 하중조건에 대해 구조안전도 기준인 183 MPa 이하로 설정하였고, 신뢰성해석은 MVRM과 AISM을 각각 적용하였다. RBRO를 이 용한 확률론적 최적설계의 특성을 비교하기 위해 결정론적 최적화를 수행하였으며, 결정론적 최적 화의 정식화는 다음과 같다.

Minimize $W(t_i), i = 1, 2, 3, 4, 5$	(6)
s.t. $g_j(t_i) \le 183MPa, \ j = 1, 2, 3$	
$3.0 \le t_1 \le 7.0$	
$1.0\leq t_2 \leq 3.0$	
$1.5 \le t_3 \le 4.0$	
$0.6 \leq t_4 \leq 1.2$	
$2.0 \le t_5 \le 5.0$	

식 (6)에 나타난 것처럼 결정론적 최적화에서는 정식화과정에 신뢰성과 강건성을 모두 제외하고 SAO를 이용한 최적설계를 탐색하도록 하였다. 신 뢰성해석 방법에 따른 RBRO의 확률론적 최적설 계 결과는 결정론적 최적설계의 결과와 비교하여 표 4와 5에 나타내었다.

Table 4. Comparison of design optimum [unit: mm]

Method	t 1	t 2	ξ	4	t 5
	(σ)	(σ)	(σ)	(σ)	(σ)
RBRO with	4.5	1.4	2.0	0.8	3.6
MVRM	(3.1)	(3.0)	(3.0)	(3.0)	(4.6)
RBRO with	4.5	1.4	2.5	1.0	3.0
AISM	(3.1)	(3.0)	(3.6)	(5.3)	(3.1)
Deterministic optimization	3.7	1.0	2.3	0.6	2.0

Table 5. Comparison of objective and constraint functions

Mathad	Constraints [MPa]			Obj.	# of
Method	LC1	LC2	LC3	[kg]	FE ¹⁾
RBRO with MVRM	172.40	147.49	169.85	169.25	1,213
RBRO with AISM	165.85	144.13	168.82	170.05	7,502
Deterministic optimization	182.73	166.90	160.11	136.26	74

1) FE: function evaluation

표 4와 5에 나타난 것처럼 결정론적 최적설계 결과 대비 MVRM과 AISM을 이용한 RBRO의 결 과는 모두 보수적인 설계결과를 나타내었다. 초기 설계의 중량인 187 kg을 기준으로 결정론적 최적 설계는 27%의 중량감소 결과를 나타낸 반면, MVRM을 이용한 RBRO의 결과는 9.5%, AISM을 이용한 RBRO의 결과는 9.1%의 중량감소 결과를 각각 나타내었다. 제한조건함수는 결정론적 최적 설계에서 LC1의 결과가 구조안전도 기준의 한계 치에 근접하여 나타난 반면, MVRM과 AISM을 이 용한 RBRO의 결과는 모두 7% 이상의 여유치를 확보하는 것으로 나타났다. AISM을 적용한 경우 가 MVRM의 결과보다 좀 더 보수적인 설계결과 를 나타내었고, 설계변수 *t*,과 *t*₂의 결과는 동일한 반면, 설계변수 *t*5부터 *t*5의 확률론적 최적설계의 특성에서 차이가 발생한 것으로 나타났다. AISM 을 적용한 경우의 시그마 수준은 MVRM 대비 *t*5 와 *t*에서 20%와 77% 증가한 반면, *t*5에서는 33% 감소하는 특성을 나타내었다. 이를 통해 RBRO의 신뢰성해석 방법에 따라 최종 수렴된 확률론적 최 적설계변수 별 강건성에 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 수치계산 비용은 함수평가횟수를 기준으



Fig. 4 Convergence results of objective function



Fig. 5 Convergence results of constraint function

로 비교하였으며, AISM을 적용한 경우가 가장 높 게 나타났다. 이러한 수치계산 비용의 차이가 발 생하는 원인은 AISM 경우 수렴과정에서 발생된 모든 함수평가에서 파괴영역의 탐색을 위한 신뢰 성해석 수행 시 다수의 샘플을 분포시키는 반면, MVRM은 샘플링 없이 테일러급수 전개를 통한 근사적 평가만 수행하기 때문이다. 최적화수렴 특 성의 결과는 목적함수와 제한조건함수 중 대표적 으로 LC1에 대해 비교하여 그림 4와 5에 각각 정리하였다.

그림 4와 5에 나타난 것처럼 RBRO의 최적화 수렴특성은 결정론적 최적화의 수렴특성과 비교하 면 큰 차이를 나타내는데, 이는 RBRO은 최적화 수렴과정 중 신뢰성해석이 적용되기 때문으로 파 악된다. MVRM과 AISM의 특성을 비교해 보면, 목적함수와 제한조건함수의 전체 수렴과정에서 AISM이 MVRM보다 보수적인 결과를 나타내었고, 제한조건함수에서 좀 더 보수적인 수렴 특성을 보 였다. 또한 수렴과정에서 AISM의 변동성 MVRM 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 AISM이 각 수렴단계 별로 신뢰성해석에서 샘플링 횟수가 증가함에 따라 설계영역 검토 영역이 넓어 졌기 때문을 볼 수 있다. 결정론적 최적화에서는 설계변수의 불확성이 고려되지 않았기 때문에 최 적설계점에서 LC1의 제한조건함수 특성이 구조안 전도 한계치에 활성화되는 것으로 나타났다. 중량 감소율과 수치계산 비용을 고려하면 MVRM을 적 용한 RBRO 방법이 자동채염기의 확률론적 최적 설계에 가장 적합한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 설계단계에서 자동채염기의 구조 설계에 대한 확률론적 최적설계의 구현을 위해 MVRM과 AISM의 신뢰성해석을 이용하여 RBRO 806 한국산업융합학회 논문집 제23권 제5호

를 수행하였고 결정론적 최적설계의 결과와 비교 하였다. 강도성능은 실제 자동채염기의 작동조건 을 반영한 하중경계조건을 적용하여 FEA를 기반 으로 최대응력을 산출하여 평가하였고, LC3의 하 중조건에서 산출된 최대응력이 성능한계치에 가까 운 상태이기 때문에 중량감소설계와 관련하여 설 계인자의 불확실성을 고려한 확률론적 최적설계가 필요한 것으로 판단되었다. 해양염전 작업환경으 로 인해 발생할 수 있는 부식을 불확실성으로 고 려하여 자동채염기의 주요 구조부재의 두께치수는 랜덤변수로 고려하였으며, 강도성능은 확률제한조 건함수로 적용하였다. RBRO 설계 문제는 신뢰성 해석으로부터 강도성능의 확률제한조건을 만족하 면서 중량을 최소화할 수 있는 랜덤설계변수를 결 정하도록 정식화하였고, 강건성은 부제약조건 상 에 3 시그마 수준을 적용하였다. MVRM과 AISM 을 이용한 RBRO의 결과는 강건성과 신뢰성을 최 적화 수렴과정에서 고려하기 때문에 결정론적 최 적설계 결과 대비 모두 보수적인 설계결과를 나타 내었고, 초기설계의 중량 기준으로 결정론적 최적 설계는 27%의 중량감소 결과를 나타낸 반면, MVRM 을 이용한 RBRO의 결과는 9.5%, AISM을 이용한 RBRO의 결과는 9.1%의 중량감소 결과를 각각 나 타내었다. 수치계산 비용은 AISM을 적용한 경우 에 파괴영역의 탐색을 위한 샘플링 횟수가 증가하 여 가장 높게 나타났다. 최적화 수렴특성과 관련 하여 목적함수와 제한조건함수의 전체 수렴과정에 서 AISM이 MVRM보다 보수적인 결과를 나타내었 고, 제한조건함수에서 좀 더 보수적인 수렴 특성 을 보였으며, 결정론적 최적화에서는 최적설계점 에서 LC1의 제한조건함수 특성이 구조안전도 한 계치에 활성화되는 것으로 나타났다. 중량감소율 과 수치계산 비용을 고려하면 MVRM을 적용한 RBRO 방법이 자동채염기의 확률론적 최적설계에 가장 적합한 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2020년도 과학기술정보통신부의 재 원으로 한국연구재단-현장맞춤형 이공계 인재양성 지원사업 (No. 2019H1D8A1105567)과 2020학년 도 MNU혁신사업 연구과제 지원에 의하여 연구되 었음.

참고문헌

- [1] Korea Maritime Institute(KMI), KMI Trend Analysis, 161, Seoul, (2019).
- [2] Christopher D. E. and Masoud R., "Integrated reliability and sizing optimization of a large composite structure," Marine Structures, vol. 22, no. 2, pp. 315-334, (2009).
- [3] Song, C. Y., Lee, J. and Choung, J., "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).
- [4] Bai, Y., Tang, J., Xu, W. and Ruan, W., "Reliability-based design of subsea light weight pipeline against lateral stability. Marine Structures," vol. 43, no. 1, pp. 107-124, (2015).
- [5] Yin, F., Nie, S., Ji, H. and Huang, Y., "Non-probabilistic reliability analysis and design optimization for valve-port plate pair of seawater hydraulic pump for underwater apparatus," Ocean Engineering, vol. 163, no. 1, pp. 337-347, (2018).
- [6] 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).
- [7] Sung, K. Y., Cho, S. G., Oh, J. W., Yeu, T. K., Hong, S. and Kim, H., "Application of Verification & Validation for Deepsea Mining

Robot Technology Development," Journal of The Korean Society of Industry Convergence, vol. 22, no. 6, pp. 689-702, (2019).

- [8] Simulia, Abaqus User Manual. Simulia, (2018).
- [9] DNV-GL, Structural design of offshore units WSD method, Det Norske Veritas, (2015).
- [10] Phadke, M. S., Quality Engineering using Robust Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, (1989).
- [11] Sim, H. M., Song, C. Y., Lee, J. and Choi, H., "Study of Reliability-Based Robust Design Optimization Using Conservative Approximate Meta-Models," Journal of Ocean Engineering and Technology, vol. 26, no. 6, pp. 80-85, (2012).
- [12] Haftka, R. T. and Gürdal, Z., Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1991).

- [13] Hsieh, C. C. and Oh, K. P., "MARS: A Computer-Based Method for Achieving Robust Systems," FISITA Conference, The Integration of Design and Manufacture, vol. 1, no. 1, pp. 115–120, (1992).
- [14] Wu, Y., "Computational Methods for Efficient Structural Reliability and Reliability Sensitivity Analysis," AIAA Journal, vol. 32, no. 8, pp. 1717–1723, (1994).
- [15] Han, J. W., and Park, Y.S., "Evaluation of Corrosion Characteristics of Pipeline Material (SUS316) for the Geothermal Power Plant," Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol. 24, no. 2, pp. 142-146, (2012).

(접수: 2020.08.11. 수정: 2020.09.15. 게재확정: 2020.09.16.)