

## 보수적 근사모델을 적용한 신뢰성 기반 강건 최적설계 방법

심형민\* · 송창용\*\* · 이종수\* · 최하영\*\*\*

\*연세대학교 기계공학부

\*\*목포대학교 해양시스템공학과

\*\*\*한국철도기술연구원 고속철도연구본부

## Study of Reliability-Based Robust Design Optimization Using Conservative Approximate Meta-Models

Hyoung Min Sim\*, Chang Yong Song\*\*, Jongsoo Lee\* and Ha-Young Choi\*\*\*

\*Dep't of Mechanical Engineering, Graduate School, Yonsei University, Seoul, Korea

\*\*Dep't of Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Korea

\*\*\*High-speed Railroad Systems Research Center, KRRI, Uiwang 437-757, Korea

**KEY WORDS:** Reliability based design optimization 신뢰성 기반 최적설계, Robust optimization 강건 최적화, Reliability based robust design optimization 신뢰성 기반 강건 최적설계, Conservative approximation 보수적 근사화

**ABSTRACT:** The methods of robust design optimization (RDO) and reliability-based robust design optimization (RBRDO) were implemented in the present study. RBRDO is an integrated method that accounts for the design robustness of an objective function and for the reliability of constraints. The objective function in RBRDO is expressed in terms of the mean and standard deviation of an original objective function. Thus, a multi-objective formulation is employed. The regressive approximate models are generated via the moving least squares method (MLSM) and constraint-feasible moving least squares method (CF-MLSM), which make it possible to realize the feasibility regardless of the multimodality/nonlinearity of the constraint function during the approximate optimization processes. The regression model based RBRDO is newly devised and its numerical characteristics are explored using the design of an actively controlled ten bar truss structure.

### 1. 서 론

강건 최적설계(Robust design optimization, RDO)는 설계 과정에서 변동을 유발하는 원인을 감소시키기 보다는 민감도를 감소시켜 성능의 변동을 줄이는 설계 기법으로써 목적함수의 강건성과 제한조건의 강건성을 동시에 고려한다(Sandgren and Cameron, 2002). 신뢰성 기반 최적설계(Reliability based design optimization, RBDO)는 신뢰지수를 고려한 제한조건에 대해서 목적함수를 최소화하여 확률론적 최적설계를 수행하는 방법이다(Youn and Choi, 2004). 신뢰성 기반 최적설계는 설계자가 만족하는 신뢰도를 제한조건으로 사용함으로써 불확실성의 고려를 통한 제한조건의 설계안전도를 높일 수 있다.

조선과 해양공학 분야에서는 극지 및 심해 에너지 자원개발 가속화에 따른 극한의 환경에 적용 가능한 제품설계를 효과적으로 수행함에 있어 재료비 절감 및 시스템 안전성을 만족할 수 있

도록 설계 불확실성을 고려한 확률론적 최적설계와 근사모델 적용 연구에 대한 필요성이 증가하고 있다. Lee et al.(2003)은 항만 구조물의 설계 불확실성을 고려한 해안의 경사식 방파제의 최적단면설계를 위하여 부분 안전계수 기반 신뢰함수식을 적용하여 기존의 설계와 비교연구를 수행하였다. Ryu et al.(2007)은 선체 곡판의 롤 굽힘가공의 공정변수들을 고찰하고 차별적 진화 방법을 이용하고 목적형상을 다항식 형태의 전개 가능 곡면의 근사모델을 생성하여 각 공정변수 산출 활용방안을 제시하였다. Joung et al.(2005)은 심해용 무인잠수정의 내압용기에 대한 신뢰성 기반 최적설계를 위해 파괴확률을 산정하고 제작과 관련하여 보강재 유무에 따른 설계특성을 연구하였다. Song et al.(2011)은 FPSO(Floating production storage offloading unit)의 라이저 지지구조의 신뢰성 최적설계를 위해 다양한 근사모델과 신뢰성 이론을 적용한 비교 연구를 수행하였다. 기존 연구에서는 이러한 강건 최적설계와 신뢰성 기반 최적설계의 각각의 방법으로 구

Received 15 October 2012, revised 28 November 2012, accepted 28 November 2012

Corresponding author Ha-Young Choi : +82-31-460-5332, hychoi@krii.re.kr

© 2012, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KSME 2011 in Daegu.

조물에 대한 최적설계를 진행해왔다. 그러나 강건설계에서는 어느 정도의 신뢰도를 확보하였는지를 판단할 수 있는 기준이 없고, 신뢰성 기반 최적설계에서는 제한 조건에 대한 강건성은 확보되지 않지만 목적함수에 대한 강건성을 고려할 수 없는 어려움이 있다.

본 논문에서는 목적함수에 대하여 강건성을 고려하는 동시에 제한조건에 대해서는 설계자가 원하는 신뢰도를 이용하여 강건성을 얻을 수 있도록 하는 신뢰성 기반 강건 최적설계(Reliability based robust design optimization, RBRDO)를 수치적 비용을 줄이기 위한 회귀적 근사모형을 사용하여 수행할 수 있는 이론적 방법론을 개발한다. 고안된 RBRDO 이론의 검증과 관련하여 수치계산 결과의 비교를 위해 공학 예제로 많이 사용되는 능동제어 구조설계(Actively controlled structure ten bar truss)에 대해 강건설계와 신뢰성 기반 강건설계의 두 가지 방법을 적용하였으며 근사모형은 이동최소자승법(Moving least squares method, MLSM) (Breitkopf et al., 2002)과 이동최소자승법을 기반으로 고안된 CF-MLSM(Constraint-feasible moving least squares method)을 이용하였다. CF-MLSM은 가용성 테스트를 도입하여 근사 모델의 후처리 단계에서 제한조건의 가용성을 보장함으로써 비가용 영역이 생성되는 것을 방지하는 방법이다 (Song and Lee, 2009). 본 논문에서 수행된 이론적 연구방법은 강건설계 기법을 통해서 평균과 표준편차의 효과를 목적함수에서 고려하고 신뢰성 해석 기법을 통해서 제한조건함수의 신뢰도를 고려함으로써 공학적 설계에서 발생할 수 있는 다양한 형태의 불확실성을 고려한 보수적인 설계가 구현되도록 하였다. 또한 강건설계와 신뢰성 해석에서 요구되는 방대한 수치계산량을 근사모형을 적용함으로써 좀 더 경제적인 설계방법을 구현하고자 하였다.

## 2. 강건 최적설계

목적함수 및 제한조건에 대한 강건성은 다음과 같이 정의할 수 있다. 목적함수의 강건성은 설계변수  $x_i$ 가  $x_i - \Delta x_i$ 와  $x_i + \Delta x_i$  사이에 존재할 때 목적함수의 값 및 변동을 최소화 시키는 것이며 제한조건의 강건성은 설계변수  $x_i$ 가  $x_i - \Delta x_i$ 와  $x_i + \Delta x_i$  사이에 존재할 때 제한조건이 항상 만족하도록 가용성을 보장하는 것을 말한다.

본 논문에서는 공차의 영향과 더불어 외부 변수의 변동에 대한 영향을 고려하여 강건설계를 진행한다. 최적화는 순차 이차 계획법(Sequential quadratic programming, SQP)(Büskens, 2000; Arora, 2004)을 이용하여 진행하였다.

### 2.1 목적함수의 강건성

설계변수의 변동이 생기면 목적함수에도 변동을 가지게 된다. 목적함수를 최소화하는 동시에 성능의 변동이 적은 해를 구하기 위하여 식(1)과 같은 다중 목적함수로 나타낸다(Lee and Park, 2001).

$$\phi(\vec{x}) = w \times \mu_f + (1-w) \times \sigma_f \quad (0 \leq w \leq 1) \quad (1)$$

여기서  $\mu_f$ 와  $\sigma_f$ 는 목적함수의 평균과 표준편차를 의미한다.

$w$ 는 가중치로써 설계 변수의 변화에 따른 목적함수의 최소화 및 산포도의 중요도에 따라 결정되는 값이다. 평균과 표준편차는 테일러급수를 이용하여 근사화시키며 식(2), (3)과 같다.

$$\mu_f = f(x_i) \quad (2)$$

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_x^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (3)$$

여기서  $f(x)$ 는 식(1)의 다중 목적함수에 적용될 일반화된 목적함수 혹은 성능함수를 나타낸다.

### 2.2 구속조건의 강건성

설계변수의 변동에 따른 제한조건의 변동을 고려하기 위해 제한조건함수를 다음과 같이 나타낸다.

$$g = g_j + \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial g_j}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (4)$$

$\frac{\partial g_j}{\partial x_i}$ 는  $i$ 번째 제한조건함수의  $i$ 번째 설계 변수에 대한 구배를 표시하며 절대값은 벌칙항이 부호에 상관없이 양의 값을 갖도록 하기 위함이다. 그러나 이러한 보수적인 제한조건을 이용해도 공차에 의해 비가용 영역이 존재할 가능성이 있다. 따라서 벌칙항에 벌칙계수를  $k_j$ 를 고려함으로써 식(4)를 보완하여 식(5)로 나타내며 통상적으로 1.5~2의 값을 사용한다(Lee and Park, 2001).

$$g = g_j + k_j \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial g_j}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (5)$$

## 3. 신뢰성 기반 강건 최적설계

신뢰성 기반 강건 최적설계는 목적함수에 강건성을 부여하고 제한조건에 대하여 신뢰성 해석을 수행한다. 신뢰성 해석에는 신뢰도 지수 접근 방법(Reliability index approach, RIA)과 목표 성능값 접근 방법(Performance measure approach, PMA)이 있으며(Tu et al., 1999), 본 논문에서는 목표 성능값 접근 방법을 이용하였다. 목적함수의 강건성은 식(1)과 같으며 다음과 같이 정의한다.

$$\text{minimize } \phi(x) = w \frac{\mu_f}{\mu_f^*} + (1-w) \frac{\sigma_f}{\sigma_f^*} \quad (0 \leq w \leq 1) \quad (6)$$

$$\text{subject to } P[G(X) \leq 0] \leq P_f$$

여기서  $\mu_f^*$ ,  $\sigma_f^*$ 는 각각 평균 및 표준편차만을 고려하여 산출된 최적함수 값을 의미한다.

$G(X) = 0$ 은 한계상태함수로써 파괴표면을 나타낸다. 확률제한조건은 식(6)과 같이 설계자가 요구하는 파괴확률보다 작거나 같다고 정의할 수 있으며 제한조건에 대한 확률 밀도함수를 다중 적분함으로써 다음과 같이 계산할 수 있다(Chun and Min, 2005).

$$P_f = F_G(0) = P[G(X) \leq 0] \quad (7)$$

$$= \int \dots \int_{G(X) \leq 0} f_X(X) dX_1 \dots dX_n$$

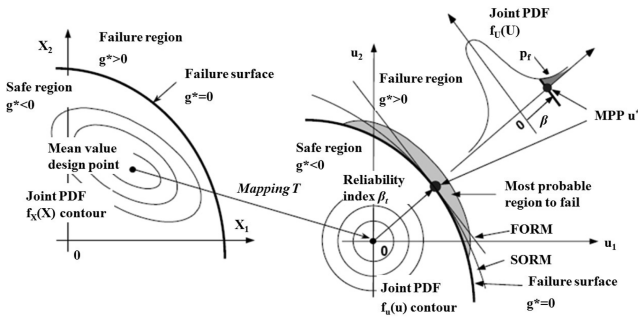


Fig. 1 Performance measure approach (PMA)

$F_G(X)$ 는 누적 분포 함수이고  $f_X(X)$ 는 확률 변수의 결합 확률 밀도 함수이며,  $X$ 는 시스템변수이다.

목표 성능값 접근 방법(Performance measure approach, PMA)은 설계자가 요구하는 파괴확률을 제한조건인 누적분포함수의 역함수를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$g^* = F_g^{-1}[\Phi(-\beta_i)] \leq 0 \quad (8)$$

여기서  $g^*$ 는 목표 신뢰성 지수  $\beta_i$ 에 대한 목표 성능값이라고 한다. 목표 성능값을 찾는 문제는 Fig. 1과 같이 표준 정규분포 공간상에서 주어진 목표 신뢰성 지수만큼의 거리를 만족하며 한계상태 함수 값을 최소화하는 Inverse MPP(Most probable point)를 구하는 최적화 문제를 통하여 구할 수 있으며, 이를 이용하여 신뢰성 기반 최적설계를 수행하는 방법을 목표 성능값 접근방법이라고 한다.

$$\begin{aligned} &\text{minimize } G(x, u) \\ &\text{subject to } \|u\| = \beta_i \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $G$ 는 확률 성능치,  $\beta$ 는 신뢰성 지수,  $x$ 는 비정규분포의 확률변수,  $u$ 는 표준정규분포의 확률변수이다.

## 4. 근사모델

### 4.1 이동최소자승법(MLSM)

이동최소자승법은 반응표면법에서 파생된 모델로써 국부 설계영역들에서 일련의 반응표면을 생성하여 전체 설계영역의 근사모델에 가중함수를 적용하여 추정하는 방법이다. 실험계획법의 중심합성계획법을 이용하여  $x_i$ 와 관련된 실제 반응치  $g(x_i)$ 의 데이터가 산출되면 국부영역에서의 근사모델은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\tilde{g}_M = Z^T A_M \quad (10)$$

여기서  $Z$ 는 설계 변수이며 상첨자 T는 행렬계산을 위해 전치를 수행한 것이며,  $A_M$ 은 구하고자 하는 근사계수 벡터이며 오차  $I(A)$ 를 최소화하는 가중 최소 자승법을 이용하여 산출한다.

$$I(A) = \sum_{i=1}^n w_i (\|x_i - x\|) (Z^T(x_i - x) A_M - g(x_i))^2 \quad (11)$$

$w_i$ 는 가중함수이다. 식 (11)은 행렬형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I(A) = (Z A_M - g)^T W (Z A_M - g) \quad (12)$$

가중함수는 국부영역에서의 회귀모델들을 전체 영역에 대한 회귀모델로 구성하기 위한 함수로써 다음과 같은 형태를 일반적으로 사용한다.

$$w_i (\|x_i - x\|) = \exp\left(-\theta_i \sum_{i=1}^n (x_i - x)^2\right) \quad (13)$$

$\theta_i$ 는 근사모델의 추정오차를 최소화하기 위하여 조절할 수 있다. 식(12)와 (13)으로부터 산출된 근사계수를 적용하면 근사모델은 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\tilde{g}(x)_M = a_0^m + \sum_{i=1}^n a_i^m x_i + \sum_{i < j} a_{ij}^m x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii}^m x_i^2 \quad (14)$$

여기서  $a^m$ 는 MLSM에 대한 근사추정계수이며,  $n$ 은 근사추정계수의 수를 나타내고,  $m$ 은 MLSM 근사모델임을 나타내는 상첨자이다.

### 4.2 구속조건 가용성 근사모델(CF-MLSM)

CF-MLSM은 근사최적화 계산과정 중 비등가 제한조건인 가용성을 보장하기 위하여 고안되었으며, 다음과 같이 정식화된다 (Song and Lee, 2009).

$$\begin{aligned} &\text{minimize } \frac{1}{2} A_C^T (Z^T Z) A_C - A_C^T (Z^T \tilde{g}_M) \\ &\text{subject to } Z_U^V A_C - \Gamma_U^V \leq 0 \\ &\Gamma_L^V - Z_L^V A_C \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$A_C$ 는 제한조건 가용성을 보장하는 근사계수이고  $\tilde{g}_M$ 은 MLSM을 이용하여 산출된 근사모델이다.  $Z_U^V$ 와  $Z_L^V$ 는 각각 상한과 하한 비등가 제한조건에서 가용성이 위배된 데이터에 대한 행렬이며  $\Gamma_U^V$ 와  $\Gamma_L^V$ 는 실제 제한조건 함수에 대해서 위배된 데이터의 집합이다. 식(15)의 제한조건에 대한 최적화를 진행하여 산출한 근사계수를 적용한 근사모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{g}(x)_C = a_0^c + \sum_{i=1}^n a_i^c x_i + \sum_{i < j} a_{ij}^c x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{ii}^c x_i^2 \quad (16)$$

여기서  $a^c$ 는 CF-MLSM에 대한 근사추정계수이며,  $c$ 는 CF-MLSM 근사모델임을 나타내는 상첨자이다. 식(16)의 CF-MLSM은 제한조건인 가용성이 전 설계영역에서 만족할 때까지 반복적으로 평가되어 업데이트된다.

## 5. 능동제어 구조설계

본 논문에서 제안하는 신뢰성 기반 강건 최적설계의 효율성을 검증하기 위해서 능동제어 구조설계에 적용해 보았다. Fig. 2에서 보는바와 같이 구조물의 끝단에 힘이 가해질 때 무게를 경량화 최소화시키는 것이다. 제한조건은 제어기 중량, 정적 처짐, 동적 처짐, 정적 응력이다. 여기서 정적 처짐과 정적 응력은 정적구조해석을 통해서 산출하였으며, 동적처짐과 제어기 중량은 제어기 위치와 동적외력에 대한 운동방정식을 계산하여 산출하였

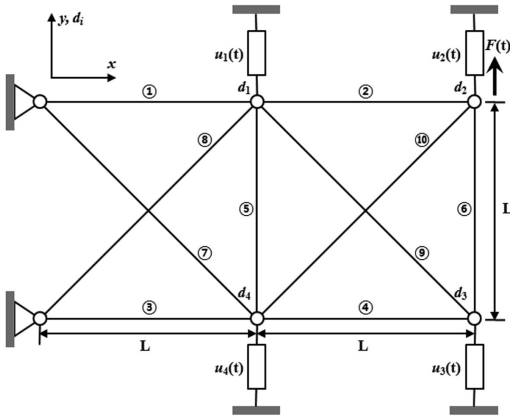


Fig. 2 Actively controlled ten-bar planar truss

Table 1 Analysis parameters

Notation	Description	Value
$E$ (psi)	Elastic modulus	$10.0 \times 10^6$
$\rho$ (lb/in <sup>3</sup> )	Mass density	0.1
$L$ (in)	Length of a truss member	360.0
$F(t)$ (t)	Applied loading	1,000.0

다. 이러한 응력과 정·동적 처짐에 대한 결과는 매트랩 코딩을 통해서 각각 산출하였으며, 최적설계 과정에서 제한조건함수로 고려하였다. 설계 변수는 각 트러스 부재의 단면적( $A_i$ )과 감쇠계수( $\alpha$ )이다(Lee and Hajela, 1997). 설계 파라미터는 Table 1과 같다.

5.1 강건 최적설계

트러스 구조물에 대한 강건 설계를 진행하기 위하여 식(17)과 같이 목적함수 및 제한조건함수를 정의한다.

minimize

$$Weight(A_i), i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$$

subject to

$$\begin{aligned} g_1(A_i, \alpha_i) &= \text{weight of controllers} \leq 25.0 \text{ lb} \\ g_2(A_i, \alpha_i) &= \text{static displacements} \leq 0.15 \text{ in} \\ g_3(A_i, \alpha_i) &= \text{dynamic displacements} \leq 0.1 \text{ in} \\ g_4(A_i, \alpha_i) &= \text{static stress} \leq 1,000.0 \text{ psi} \end{aligned} \quad (17)$$

$$A_i^L \leq A_i \leq A_i^U, \alpha_i^L \leq \alpha_i \leq \alpha_i^U$$

설계 변수의 범위는 Table 2와 같고, 최적설계를 진행하는 동시에 파라미터의 변동에 대한 강건 설계를 하기 위해 Table 3과 같이 탄성계수와 하중(Loading condition)의 변동을 고려하였다. 탄성계수 변동은 5%로 설정하였으며 하중의 변동은 10%로 설정하였다.

5.2 신뢰성 기반 강건 최적설계

신뢰성 해석을 위하여 각각의 제한조건에 대하여 신뢰도를

설정하였으며 식(18)과 같다.

minimize

$$Weight(A_i), i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$$

subject to

$$P[G_1(X_j) = g_1] \geq \text{reliability of } 61.79\% \quad (18)$$

$$P[G_2(X_j) = g_2] \geq \text{reliability of } 61.79\%$$

$$P[G_3(X_j) = g_3] \geq \text{reliability of } 61.79\%$$

$$P[G_4(X_j) = g_4] \geq \text{reliability of } 61.79\%$$

$$A_i^L \leq A_i \leq A_i^U, \alpha_i^L \leq \alpha_i \leq \alpha_i^U$$

각각의 제한조건에 대하여 신뢰도는 61.79%로 설정하여 설계를 진행하였다. 강건설계의 경우와 마찬가지로 설계 변수의 범위는 Table 2와 같다. Table 2에서의 설계 변수를 신뢰성 설계에 맞게 Table 4와 같이 표준 정규 분포의 형태를 나타내는 랜덤 변수의 형태로 바꾸어 신뢰성 설계를 진행하였다.

6. 강건설계 및 신뢰성 기반 강건설계 결과

Ten bar truss에 대하여 11개의 설계변수에 대한 공차를 고려하였으며 근사모형은 이동최소자승법 및 보수적 이동최소자승법을 이용하여 최적화를 진행하였다. 각각의 방법을 이용하여 적용한 근사 모델과 최적해를 도출하는 강건 최적설계 및 신뢰성 기반 강건 최적설계에 따른 설계 변수의 최적해는 Table 5에 나타내었다.

먼저 강건설계의 최적화 결과는 MLSM을 이용하여 강건 설계를 진행했을 경우 근사 모델에서는 제한조건을 만족하였으나 제어기 중량과 응력은 제한조건을 위배하는 것을 알 수 있다. 이

Table 2 Design variables

Design variable	Lower bound	Initial design	Upper bound
$A_1 \sim A_{10}$	1.0 in <sup>2</sup>	2.5 in <sup>2</sup>	4.1 in <sup>2</sup>
$\alpha$	0.05	0.08	0.12

Table 3 Parameter variation

Notation	Description	Nominal Value	Lower Value	Upper Value
$E$ (psi)	Elastic modulus	$10.0 \times 10^6$	$9.5 \times 10^6$	$10.5 \times 10^6$
$F(t)$ (t)	Applied loading	1,000.0	900	1,100

Table 4 Random variables

Random variable	Standard deviation	Distribution type	Design variable	Lower bound	Initial design	Upper bound
$X_1 \sim X_{10}$	0.1	Normal	$A_1 \sim A_{10}$	1.0 in <sup>2</sup>	2.5 in <sup>2</sup>	4.1 in <sup>2</sup>
$X_{11}$	0.1	Normal	$\alpha$	0.05	0.08	0.12

**Table 5** Comparative results of robust optimization

Method	Optimum	Objective	Approximate Constraints	Actual Constraints
RO with MLSM	$A_1=2.473in^2$	533.168lb	$g_1=23.228lb$ $g_2=0.1187in$ $g_3=0.0779in$ $g_4=770.945psi$	$g_1=32.371lb$ $g_2=0.1191in$ $g_3=0.0698in$ $g_4=1388.103psi$
	$A_2=1.000in^2$			
	$A_3=2.508in^2$			
	$A_4=1.000in^2$			
	$A_5=1.000in^2$			
	$A_6=1.000in^2$			
	$A_7=1.122in^2$			
	$A_8=1.000in^2$			
	$A_9=1.000in^2$			
	$A_{10}=1.000in^2$			
$\alpha =0.120$				
RO with CF-MLSM	$A_1=2.476in^2$	708.998lb	$g_1=22.984lb$ $g_2=0.0628in$ $g_3=0.0307in$ $g_4=811.099psi$	$g_1=23.053lb$ $g_2=0.0626in$ $g_3=0.0402in$ $g_4=799.442psi$
	$A_2=1.000in^2$			
	$A_3=2.970in^2$			
	$A_4=1.000in^2$			
	$A_5=1.000in^2$			
	$A_6=1.000in^2$			
	$A_7=3.219in^2$			
	$A_8=1.949in^2$			
	$A_9=1.000in^2$			
	$A_{10}=1.079in^2$			
$\alpha =0.120$				

**Table 6** Comparative results of RBDO

Method	Optimum	Objective	Approximate Constraints	Actual Constraints
RBDO with MLSM [61.79%]	$A_1=2.376in^2$	605.855lb	$g_1=16.710lb$ $g_2=0.0881in$ $g_3=0.0581in$ $g_4=607.383psi$	$g_1=26.833lb$ $g_2=0.0871in$ $g_3=0.0534in$ $g_4=870.242psi$
	$A_2=1.000in^2$			
	$A_3=2.778in^2$			
	$A_4=1.000in^2$			
	$A_5=1.000in^2$			
	$A_6=1.000in^2$			
	$A_7=2.427in^2$			
	$A_8=1.000in^2$			
	$A_9=1.000in^2$			
	$A_{10}=1.000in^2$			
$\alpha =0.120$				
RBDO with CF-MLSM [61.79%]	$A_1=2.875in^2$	825.057lb	$g_1=10.107lb$ $g_2=0.0451in$ $g_3=0.0432in$ $g_4=442.415psi$	$g_1=22.250lb$ $g_2=0.0526in$ $g_3=0.0334in$ $g_4=710.783psi$
	$A_2=1.000in^2$			
	$A_3=3.084in^2$			
	$A_4=1.000in^2$			
	$A_5=1.000in^2$			
	$A_6=1.000in^2$			
	$A_7=3.232in^2$			
	$A_8=2.743in^2$			
	$A_9=1.056in^2$			
	$A_{10}=2.133in^2$			
$\alpha =0.115$				

와는 반대로 CF-MLSM을 적용하였을 때 제한조건을 모두 만족하는 것을 볼 수 있으며 MLSM의 경우보다 목적함수의 값은 높아진 것을 확인할 수 있다. 이는 CF-MLSM 근사 모델이 각각의 제한조건을 위배하지 않도록 가용성을 보장해주고 있으므로 보수적인 해를 산출했다고 말할 수 있다.

**Table 7** Comparative results of RBRDO

Method	Optimum	Objective	Approximate Constraints	Actual Constraints
RBRDO with MLSM [61.79%]	$A_1=2.416in^2$	626.972lb	$g_1=15.1231lb$ $g_2=0.080in$ $g_3=0.0527in$ $g_4=569.380psi$	$g_1=25.817lb$ $g_2=0.0813in$ $g_3=0.0503in$ $g_4=835.310psi$
	$A_2=1.000in^2$			
	$A_3=2.860in^2$			
	$A_4=1.000in^2$			
	$A_5=1.000in^2$			
	$A_6=1.000in^2$			
	$A_7=2.670in^2$			
	$A_8=1.087in^2$			
	$A_9=1.000in^2$			
	$A_{10}=1.000in^2$			
$\alpha =0.120$				
RBRDO with CF-MLSM [61.79%]	$A_1=2.867in^2$	833.076lb	$g_1=21.500lb$ $g_2=0.0479in$ $g_3=0.0085in$ $g_4=685.623psi$	$g_1=22.297lb$ $g_2=0.0528in$ $g_3=0.0334in$ $g_4=719.880psi$
	$A_2=1.000in^2$			
	$A_3=3.060in^2$			
	$A_4=1.000in^2$			
	$A_5=1.000in^2$			
	$A_6=1.000in^2$			
	$A_7=3.252in^2$			
	$A_8=2.688in^2$			
	$A_9=1.000in^2$			
	$A_{10}=2.404in^2$			
$\alpha =0.1168$				

신뢰성 기반 최적설계에 적용한 근사 모델은 이동최소자승법(MLSM)과 제한조건 가용성 이동최소자승법(CF-MLSM) 두 가지를 이용하였으며 각각의 방법에 대한 결과를 비교하였다. Table 6에서 신뢰도를 61.79%로 설정하고 MLSM을 적용하여 신뢰성 기반 최적설계를 진행했을 경우 제어기 중량이 제한조건을 위배하는 것을 확인할 수 있다. 반면 CF-MLSM을 이용하여 신뢰성 기반 최적설계를 진행하였을 때에는 강건 최적설계와 마찬가지로 제한조건을 모두 만족하는 것을 볼 수 있다.

Table 7에서 신뢰도를 61.79%로 설정하고 MLSM과 CF-MLSM을 적용하여 신뢰성 기반 강건 최적설계를 진행하여 최적해를 산출하였다. MLSM을 적용하여 신뢰성 기반 강건 최적설계를 진행하였을 경우 제어기 중량이 제한조건을 위배하였으며, CF-MLSM을 이용하여 신뢰성 기반 강건 최적설계를 진행하였을 경우에는 모든 제한조건을 만족하는 최적해를 산출하였다. CF-MLSM을 적용하였을 경우 MLSM의 경우보다 목적함수의 값이 올라간 것을 확인할 수 있으며 이는 CF-MLSM 근사 모델이 각각의 제한조건을 위배하지 않도록 가용성을 보장해주고 있어 보수적인 해를 산출했다고 말할 수 있다. 신뢰성 기반 강건설계를 진행하였을 경우 목적함수 값이 강건설계를 진행한 경우보다 더 높게 나오는 경향을 보이고 있으므로 신뢰성 기반 강건설계가 조금 더 보수적으로 설계되었다고 할 수 있다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 근사모델 기반 강건 설계와 신뢰성 기반 강건 설계 이론을 새로이 고안하여 Ten bar truss 설계문제에 적용해

보고 결과에 대해 비교해보았다. 강건 최적설계의 경우 제한조건에 대한 벌칙 계수로 인하여 제한 조건에 대해 강건한 해를 얻었다. 또한 CF-MLSM을 사용하였을 경우 목적함수에 대하여 더욱 보수적인 설계해를 도출하였다. 신뢰성 기반 강건 최적설계의 경우 설계자가 요구하는 신뢰도를 만족해야 하는 조건으로 인해 강건 최적설계로 구한 목적함수 값보다 크게 나타난 것을 확인할 수 있으며 마찬가지로 CF-MLSM을 이용하였을 때, 더욱 보수적인 해를 얻은 것을 확인할 수 있다. 신뢰성을 기반으로 하는 설계의 경우 신뢰도를 높게 설정하게 되면 MLSM 근사모델의 경우도 제한조건을 만족하는 보수적인 최적해를 산출하는 것을 알 수 있다.

이처럼 본 논문에서 제안하는 신뢰성 기반 강건 설계를 공학 예제에 적용하면 제한조건을 위배하지 않는 최적해를 산출할 수 있음을 알 수 있으며, 추후 본 연구의 저자들은 다양한 설계 불확실성을 고려해야하는 실질적인 조건 및 해양공학 설계문제에 적용해 봄으로써 고안된 이론의 응용 가능성을 더욱 높일 수 있는 연구를 수행 예정이다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2011-0024829; 2012R1A1A1002897) 지원을 받아 수행되었으며, 2012년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터(RIC)에 의하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- Arora, J., 2004. Introduction to optimum design. 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.
- Breitkopf, P., Rassinoux, A., Villon, P., 2002. An introduction to moving least squares meshfree methods. *Revue Européenne des Eléments Finis* 11, 825-868.
- Büskensa, C., Maurer, H., 2000. SQP-methods for solving optimal control problems with control and state constraints: adjoint variables, sensitivity analysis and real-time control. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 120, 85-108.
- Chun, H.Y., Min, S., 2005. Comparative Studies of Reliability-Based Topology Optimization. *Proceedings of Fall Annual Meeting of KSME*, 812-817.
- Joung, T.H., Nho, I.S., Lee, J.H., Han, S.H., 2005. Design Optimization of a Deep-sea Pressure Vessel by Reliability Analysis. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(2), 40-46.
- Lee, D.H., Min, S.J., Kim, S.D., 2003. Optimal Design of Rubble Mound Breakwater Used by Partial Safety Factor Method. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 17(6), 23-31.
- Lee, J., Hajela, P., 1997. GAs in Decomposition Based Design-Subsystem Interactions Through Immune Network Simulation. *Structural Optimization*, 14, 248-255.
- Lee, K.H., Park, G.J., 2001. Robust Optimization Considering Tolerances of Design Variables. *Computers and Structures*, 79(1), 77-86.
- Ryu, C.H., Lee, J.H., Yoon, J.S., 2007. An Algorithm on Determination of Process Parameters for Roller Bending of Curved Shell Plates. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 44(5), 517-525.
- Sandgren, E., Cameron, T.M., 2002. Robust design optimization of structures through consideration of variation. *Computers and Structures*, 80, 1605-1613.
- Song, C.Y., Lee J., 2009. Strength Design of Knuckle Component Using Moving Least Squares Methods. *Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(8), 1019-1032.
- Song, C.Y., Lee J., Choung, J., 2011. Reliability-based design optimization of an FPSO riser support using moving least squares response surface meta-models. *Ocean Engineering*, 38, 304-318.
- Tu, J., Choi, K.K., Park, Y.H., 1999. A new study on reliability-based design optimization. *Journal of Mechanical Design*, 121(4), 557-564.
- Youn, B.D., Choi, K.K., 2004. A new response surface methodology for reliability-based design optimization. *Computers and Structures*, 82(2), 241-256.