

# 근사화 기법 기반 해양구조물의 설계 최적화

## Design Optimization of an Offshore Structure based on Approximation Techniques

심 천 식\* · 송 창 용\*\*

Shim, Chun-Sik · Song, Chang Yong

### 요 약

본 논문에서는 해양작업 상태의 하중조건을 고려한 부유식 원유생산 저장 하역 장치에 설치된 라이저 보강구조의 강도설계에 관련하여 다양한 근사화 기법 기반 설계 최적화 및 그 성능을 비교하고자 한다. 설계 최적화 문제는 하중조건별 구조강도의 제한조건 하에서 중량을 최소화하여 설계변수인 구조 부재치수가 결정되도록 정식화 된다. 비교 연구를 위해 사용된 근사화 기법은 반응표면법 기반 순차적 근사최적화(RBSAO), 크리깅 기반 순차적 근사최적화(KBSAO), 그리고 개선된 이동최소자승법(MLSMM) 기반 근사최적화 기법인 CF-MLSMM와 Post-MLSMM이다. 본 연구에 적용한 MLSMM 기반 근사최적화 기법들은 제한조건의 가용성을 보장할 수 있도록 새롭게 개발되었다. 다양한 근사화 모델 기반 설계 최적화 기법에 의한 결과는 설계 해의 개선 및 수렴속도 등의 수치적 성능을 기준으로 실제 비근사 설계최적화 결과와 비교검토 하였다.

**keywords** : 반응표면법 기반 순차적 근사최적화, 크리깅 기반 순차적 근사최적화, 이동최소자승법, 제한조건 가용성

### 1. 서 론

본 논문에서는 해양작업 상태의 하중조건 하에서 부유식 원유생산 저장 하역 장치에 설치된 라이저 보강구조의 강도설계에 관한 다양한 근사화기법 기반 설계최적화의 비교 연구를 수행하였다. 비교 연구를 위해 고려된 근사 최적화 기법은 반응표면법 기반 순차적 근사최적화(RBSAO), 크리깅 기반 순차적 근사최적화(KBSAO), CF-MLSMM, Post-MLSMM이다. CF-MLSMM과 Post-MLSMM에 대해서는 MLSMM 회귀 근사모델을 이용하여 새롭게 개발된 코드가 사용되었다. 설계문제는 하중조건별 구조응력의 제한조건 하에서 중량을 최소화하여 설계변수인 구조 부재치수가 결정되도록 정식화 하였다. 하중조건별 구조응력의 산출을 위해서 범용 FEA 프로그램인 NASTRAN(MSC Software, 2008)을 사용하였다. 각각의 근사최적화 기법의 결과는 수치적인 최적화 성능과 관련하여 일반적인 MLSMM 근사최적화 및 실제 비근사최적화 결과와의 비교검토를 수행하였다.

### 2. 근사화 기법 이론

본 연구에서는 회귀적 방법으로 생성한 RSM, MLSMM, CF-MLSMM 근사모델과 보간적 방법으로 생성한

\* 정희원 · 목포대학교 조선공학과 교수 csshim@mokpo.ac.kr

\*\* 정희원 · 목포대학교 해양시스템공학과 교수 cysong@mokpo.ac.kr

크리깅 근사모형을 이용하여 근사최적화를 수행하였으며, 개선된 MLSM 근사모형인 CF-MLSM 및 Post-MLSM에 대해서만 간략히 설명한다. 목적함수를 최소화하거나 최대화하는 최적설계 결과는 제한조건함수를 만족하지 못하면 사용될 수 없으며, 특히 근사모형 기반 최적설계에서는 실제 제한조건함수의 만족여부가 매우 중요하다. CF-MLSM은 근사모형 기반 최적화 과정상에서 비등가 제한조건의 가용성을 보장하기 위하여 고안되었으며, 다음과 같이 정식화 된다(Song 등, 2009; Song 등, 2011).

$$\text{minimize } \frac{1}{2} A_C^T (Z^T Z) A_C - A_C^T (Z^T \tilde{g}_M) \quad (1)$$

subject to  $Z_U^V A_C - \Gamma_U^V \leq 0$  (for upper limit),  $\Gamma_L^V - Z_L^V A_C \leq 0$  (for lower limit)

여기서  $A_C$ 는 제한조건함수의 가용성을 보장하는 근사계수이며,  $\tilde{g}_M$ 은 MLSM 근사모형이다.  $Z_U^V$ 와  $Z_L^V$ 는 각각 상한 및 하한과 관련된 비등가 제한조건함수에서 가용성이 위배된 데이터에 대한 기저행렬이고,  $\Gamma_U^V$ 와  $\Gamma_L^V$ 는 실제 제한조건함수에 관해서 위배된 데이터의 집합이며, 랜덤 샘플링 영역에서 검출된다. 식 (1)에 대한 제한조건 최적화문제를 풀게 되면 근사계수  $A_C$ 를 구할 수 있고 다음과 같은 CF-MLSM 근사모형을 정의할 수 있다.

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

상기 식의 CF-MLSM 근사모형은 랜덤 샘플링에 의해서 생성된 테스트 영역에서 구속조건 가용성이 전체 설계영역에서 만족할 때까지 반복적으로 평가되어 업데이트 된다. Post-MLSM은 식 (1)의 가용성 정식화를 일반적인 MLSM 근사최적화가 종료된 후에 적용되며, 위배 데이터 집합에는 최종적으로 비가용인 것으로 판정된 최적해만 고려된다.

### 3. 해양구조물의 근사최적설계

#### 3.1 최적설계 정식화

근사화 모델 기반 설계 최적화 기법의 비교를 위해서 사용된 설계문제는 대표적인 해양구조물 중에 하나인 FPSO의 라이저 보강구조이다. 본 최적설계에서 고려된 FEA 모델 형상과 구조강도 성능에 관한 설계변수로 고려한 부재의 두께에 관해서는 그림 1에 나타나 있으며, 초기 설계상태에 대한 FEA 검토결과는 5가지 하중조합 조건에 대해서 최대응력을 산출하여 표 1에 정리하였다.

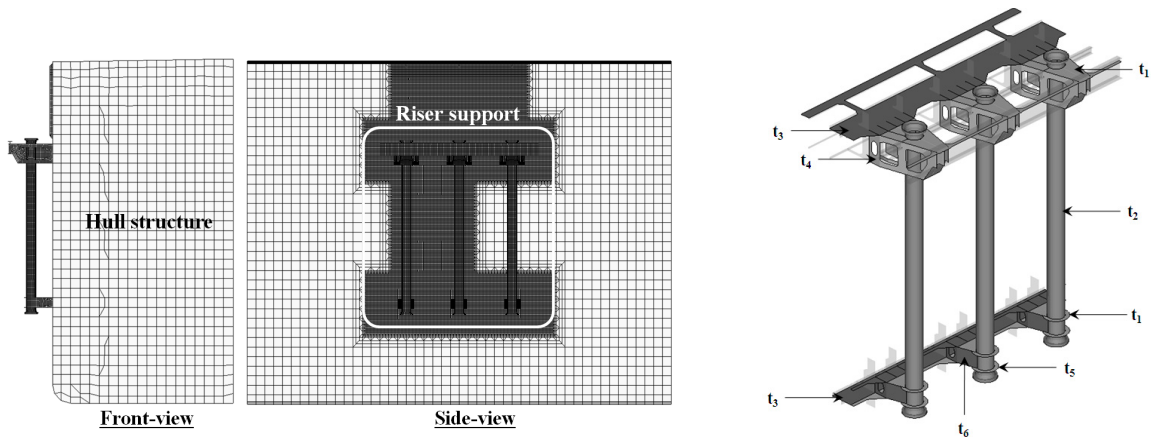


그림 1 FPSO 라이저 보강구조의 FEA 모델(좌) 및 설계변수(우)

표 1 초기 설계에서의 구조강도 성능

| Specification          | Value   | Load Condition |
|------------------------|---|----------------|
| Weight (ton)           | 148.9   |                |
| von Mises stress (MPa) | 124.7   | Operating      |
| von Mises stress (MPa) | 146.8   | Extreme        |
| von Mises stress (MPa) | 102.9   | Damaged        |
| von Mises stress (MPa) | 175.5   | OLFC           |
| von Mises stress (MPa) | 286.7   | Installation   |
| Initial design (mm)    | $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6 = 20, 30, 22, 14, 24, 15$ |                |

FPSO 라이저 보강구조의 최적설계 정식화는 표 1에 나타난 5가지 하중조건에 대한 구조강도성능 제한 조건 하에서 중량이 최소화되도록 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{minimize } W = W(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6) \tag{3}$$

$$\text{subject to } g_1 = \text{operating stress} \leq 207 \text{MPa} \tag{4}$$

$$g_2 = \text{extreme stress} \leq 207 \text{MPa} \tag{5}$$

$$g_3 = \text{damaged stress} \leq 207 \text{MPa} \tag{6}$$

$$g_4 = \text{OLFC stress} \leq 207 \text{MPa} \tag{7}$$

$$g_5 = \text{installation stress} \leq 312 \text{MPa} \tag{8}$$

where  $12.0 \leq t_1 \leq 28.0$  (mm);  $22.0 \leq t_2 \leq 38.0$  (mm);  $14.0 \leq t_3 \leq 30.0$  (mm);

$10.0 \leq t_4 \leq 18.0$  (mm);  $16.0 \leq t_5 \leq 32.0$  (mm);  $9.0 \leq t_6 \leq 21.0$  (mm)

식 (4)~(8)의 비등가 제한조건에 적용된 상한치는 해양구조물에 관한 선급 규정 허용설계응력을 기준으로 설정되었으며, OLFC와 설치조건의 응력은 다른 하중조건 대비 제한조건 상한치에 근접해있기 때문에 최적설계 해를 구하는 과정에서 제한조건이 위배되지 않도록 하는 것이 중요하다.

### 3.2 근사최적설계 결과

FPSO 라이저 보강구조의 최적화 정식화 과정에서 정의된 설계영역에 대해서 RBSAO, KBSAO, MLSM, CF-MLSM 및 Post-MLSM 기법을 적용하여 근사최적해 결과를 산출하였고, 모든 최적화 수렴결과는 실제 값과의 검증을 위해 FEA를 이용하여 재산출 하였다. 근사최적화 결과의 정확도 비교를 위해 FEA 기반의 비근사최적화로 부터 최적해를 도출하였다. 최적화 결과는 표 2에 나타난 것처럼 일반적인 MLSM 기반 근사최적화 결과는 가장 좋은 중량감소 결과를 보여주지만, 실제 OLFC와 설치조건에 대한 구조강도 제한조건에 대해서 가용성을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 근사모델을 직접적으로 일반적인 최적화알고리즘에 적용할 경우 실제 제한조건함수의 비선형적 특성으로 인하여 근사모델 기반 최적해가 가용성 영역 밖에 존재할 수 있음을 의미한다(Song 등, 2009; Song 등, 2011). 따라서, 이러한 근사 최적설계 결과는 실제 성능 제한조건을 만족할 수 없기 때문에 현실적으로 설계해로 사용할 수 없는 문제점을 가지고 있다. 표 2에서 RBSAO와 KBSAO 기반 근사최적설계 결과는 OLFC와 설치조건에 대한 구조강도 제한조건에 활성화 된 것으로 나타난 반면, CF-MLSM과 Post-MLSM를 적용한 경우의 최적 설계해는 상대적으로 보수적인 결과를 나타내었다. 특히, CF-MLSM을 적용한 경우에는 전체 최적화 반복 계산 과정에서 제한조건 가용성을 모두 보장하도록 고안되었기 때문에 가장 보수적인 설계결과를 나타내었다. 모든 최적화 결과에 대해서 최적화 계산비용을 비교하였으며, 근사최적화 기법 중에 CF-MLSM이 가장 높은 계산비용이 소요되었고, KBSAO가 가장 낮은 비용이 소요되었다. 개선된 MLSM 기반 근사최적화 기법인

CF-MLSM과 Post-MLSM에서 높은 계산비용이 소요되는 것은 근사모델 생성 과정에서 반복적으로 많은 DOE 계산이 필요하기 때문이며, 특히 CF-MLSM은 모든 최적화 계산과정 중에 가용성 검증과정을 거치기 때문에 가장 높은 계산비용이 필요하였다.

표 2 근사최적설계 결과 비교

| 최적화방법         | 최적해 (mm)   | 목적함수 (Ton) | 실제 제한조건함수 (MPa)   | 근사최적화<br>함수평가(회) | 계산 소요시간 (초) | 구속조건 가용성   |
|---------------|--|------------|---|------------------|-------------|------------|
| FEA<br>(비근사화) | $t_1=18.5$<br>$t_2=26.1$<br>$t_3=17.5$<br>$t_4=13.1$<br>$t_5=23.7$<br>$t_6=14.8$ | 126.4      | $g_1=135.1$<br>$g_2=159.0$<br>$g_3=111.2$<br>$g_4=191.2$<br>$g_5=312.0$ | -                | 105,935     | Feasible   |
| RBSAO         | $t_1=19.2$<br>$t_2=22.5$<br>$t_3=16.5$<br>$t_4=10.5$<br>$t_5=23.6$<br>$t_6=11.3$ | 122.2      | $g_1=146.3$<br>$g_2=172.2$<br>$g_3=120.5$<br>$g_4=207.0$<br>$g_5=312.0$ | 2,479            | 99,144      | Feasible   |
| KBSAO         | $t_1=18.7$<br>$t_2=22.5$<br>$t_3=16.5$<br>$t_4=10.5$<br>$t_5=24.3$<br>$t_6=12.5$ | 122.0      | $g_1=145.4$<br>$g_2=172.6$<br>$g_3=120.2$<br>$g_4=207.0$<br>$g_5=312.0$ | 1,709            | 84,863      | Feasible   |
| MLSM          | $t_1=18.2$<br>$t_2=22.0$<br>$t_3=14.0$<br>$t_4=11.2$<br>$t_5=19.5$<br>$t_6=13.6$ | 120.5      | $g_1=153.6$<br>$g_2=180.9$<br>$g_3=126.1$<br>$g_4=218.8$<br>$g_5=321.0$ | 175              | 96,470      | Infeasible |
| CF-MLSM       | $t_1=18.8$<br>$t_2=22.0$<br>$t_3=15.5$<br>$t_4=13.5$<br>$t_5=23.7$<br>$t_6=14.9$ | 127.3      | $g_1=144.5$<br>$g_2=170.2$<br>$g_3=118.8$<br>$g_4=205.9$<br>$g_5=310.4$ | 175              | 729,709     | Feasible   |
| Post-MLSM     | $t_1=18.4$<br>$t_2=22.0$<br>$t_3=14.0$<br>$t_4=13.1$<br>$t_5=22.3$<br>$t_6=14.4$ | 122.4      | $g_1=147.8$<br>$g_2=174.1$<br>$g_3=121.5$<br>$g_4=206.7$<br>$g_5=311.8$ | 170              | 97,707      | Feasible   |

#### 4. 결 론

본 연구에서는 해양구조물 강도설계 하중조건 하에서 FPSO 라이저 보강구조의 구조설계에 관한 다양한 근사모델 기반 최적화 기법의 비교 연구를 수행하였다. 근사최적화 비교 연구를 위해 사용된 근사모델은 RSM, Kriging, MLSM, 그리고 개선된 MLSM인 CF-MLSM 및 Post-MLSM이며, 모든 근사최적화 결과는 FEA기반의 비근사최적화 결과와 비교하였다. 실제 해양구조물의 근사최적 설계 수행결과로부터 응력과 같은 물리적 특성이 제한조건의 성능함수로 고려되는 경우에는 일반적인 근사모델을 바로 최적화 계산에 적용하면 비가용적인 결과가 도출될 수 있음을 일반적인 MLSM 근사최적화 결과로부터 확인할 수 있었다. 반면, RBSAO, KBSAO, CF-MLSM 및 Post-MLSM과 같이 개선된 근사최적화 기법을 적용한 경우에는 최적화 성능, 계산비용 이나 수렴특성 등에 다소의 차이가 있으나, 계산 효율성의 장점과 최적설계해의 가용성을 만족할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

- MSC Software (2008) MSC.NASTRAN User's Manual Version 2008.
- Song, C.Y., Lee, J. (2009) Strength Design of Knuckle Component Using Moving Least Squares Response Surface Based Approximate Optimization Methods, *Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(8), pp.1019~1032.
- Song, C.Y., Lee, J., Chung, J (2011) Reliability-based Design Optimization of an FPSO Riser Support using Moving Least Squares Response Surface Meta-models, *Ocean Engineering*, 38(2-3), pp.304~318.