

근사최적화 기법을 이용한 RC 빌딩의 구조 최적설계

Design Optimization of a RC Building Structure using an Approximate Optimization Technique

박 창 현* 안 희 재** 최 동 훈† 정 철 규***
Park, Chang-Hyun Ahn, Hee-Jae Choi, Dong-Hoon Jung, Cheul-Kyu

요 지

본 논문에서는 수직하중, 풍하중 및 지진하중에 의해 발생하는 변위 관련 구속조건을 만족하면서 RC(Reinforced Concrete) 빌딩 구조의 부피를 최소화하기 위한 설계문제를 정식화하였다. 구조해석 절차 자동화의 어려움으로 인해 실험 계획법과 근사화기법, 최적화기법을 이용한 근사모델기반 최적설계를 수행하였다. 특히, 만족할 만한 설계 결과를 얻을 때까지 설계변수의 범위와 구속조건을 조정하는 단계적 최적설계 방법을 제안하였다. 제안된 단계적 최적설계 방법을 통해 주어진 구속조건을 모두 만족하면서 RC 빌딩 구조의 부피를 초기 설계 대비 53.3% 감소시키는 결과를 얻음으로써 본 논문에서 보인 단계적 최적설계 방법의 타당성을 보였다.

핵심용어 : RC 빌딩, 수직하중, 풍하중, 지진하중, 구조해석, 실험계획법, 근사모델, 최적설계

Abstract

A design optimization problem was formulated to minimize the volume of an RC building structure while satisfying design constraints on structural displacements under vertical, wind and seismic loads. We employed metamodel-based design optimization using design of experiments, metamodeling and optimization algorithm to circumvent the difficulty of the automation of structural analysis procedure. Especially, we proposed a design approach of repetitive design optimizations by stages with changing the side constraint values on design variables and limit values on design constraints until a satisfactory design result was obtained. Using the proposed design approach, the volume of the RC building structure has been reduced by 53.3 % compared to the initial one while satisfying all the design constraints. This design result clearly shows the validity of the proposed design approach.

Keywords : RC building, vertical load, wind load, seismic load, structural analysis, design of experiments, meta-model, design optimization

1. 서 론

RC(Reinforced Concrete) 건축물은 우수한 압축강도를 가지면서 바람에 의한 진동이 적으며, 내화성과 내구성, 내수성이 좋은 구조물이다(McCormac, 1998).

이러한 RC 빌딩의 건축생애 전 과정을 볼 때 총 발생비용에서 건설비용이 가장 큰 부분을 차지하므로 그 상당 부분을 프로젝트의 기획 및 설계단계에서 절감해야 한다.

RC 빌딩에 대한 기존의 연구에서 비용을 최소화하기 위해 최적설계를 수행한 연구들은 다음과 같다.

Camp 등(2003)은 가로하중과 분산수직하중이 적용된 6층 짜리 RC 빌딩이 부재의 휨 조건을 만족하며 건설비용을 최소화할 수 있는 유전자 알고리즘 기법을 소개하고, 부재 단면적의 가로길이, 세로길이 및 면적 등의 정보가 포함된 7개의 셋을 설계변수로 정하였다. Lee 등(2003)은 수직하중과 가로지진하중이 작용하는 20층 빌딩의 건설비용을 최적화하기 위해

† 책임저자, 중신회원 · 한양대학교 기계공학부 교수
Tel: 02-2220-0443 ; Fax: 02-2291-4070
E-mail: dhchoi@hanyang.ac.kr

* 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정

** 한양대학교 대학원 기계공학과 석사과정

*** (주)일맥구조엔지니어링/연구소 소장

• 이 논문에 대한 토론을 2011년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2011년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

서 부재 설계 단면의 데이터베이스를 구성하였고, 유전자 알고리즘을 사용하여 구조 최적설계를 수행하였다. Chan 등(2004)은 수직하중과 2레벨의 지진하중이 작용하는 10층짜리 RC 빌딩의 건설비용을 최소화하기 위해서 최적화기준 알고리즘을 소개하였고, 부재단면적과 철근의 비율을 설계변수로 정하였다. Sahab 등(2005)은 등가골조법을 이용하여 1층과 4층 건물을 모델링하고, 철근의 숫자, 크기 및 기둥의 단면정보를 설계변수로 삼아 빌딩의 총 비용을 최소화하는 최적설계를 수행하였다. Zou 등(2007)은 중력과 두 종류의 지진하중을 받는 10층짜리 RC 빌딩의 비용을 최소화하기 위해서 콘크리트구조물의 성능위주기법이 포함된 최적화기법을 소개하였고, 부재 단면적의 크기와 철근의 비율 등의 정보가 포함된 40개의 셋을 설계변수로 정하였다. 광효경 등(2008)은 철근콘크리트 프레임 구조설계 문제에 직접탐색을 이용한 유전자 알고리즘을 적용하여 최적설계를 수행하였다. Atabay(2009)는 13층의 RC 빌딩의 전단벽 시스템에 대한 비용 최적화를 위해 유전자 알고리즘을 이용하여 구조 최적설계를 수행하였다. Gang 등(2009)은 많은 수의 설계변수를 가지고 다중하중이 작용하는 30층 건물의 건설비용 최적화를 위해 유전자 알고리즘과 Optimality Criteria의 장점을 가진 Hybride GA-OC기법을 제안하였다.

본 논문에서는 실제 RC 빌딩 설계에 적용되는 수직하중, 풍하중 및 지진하중에 의해 발생하는 변위를 제한조건으로 고려하여 RC 빌딩의 부피를 최소화하는 부재의 최적 단면적 결정을 주된 목적으로 한다. 기존에 수행된 연구들 보다 설계변수 선정 범위를 다양하게 하기 위해 선행된 연구(박창현 등, 2010) 결과를 바탕으로 부재의 위치와 특성을 고려하여 1514개의 부재를 91개 그룹으로 세분화 하였으며, 그룹화된 부재의 단면적이 비율을 설계변수로 선정하였다. RC 빌딩의 구조해석을 위해 건축분야 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/Gen을 사용하였으며, 상용 PIDO(Process Integration and Design Optimization) 툴인 PIANO(Process Integration, Automation and Optimization)에서 제공하는 실험계획법과 근사모델기법, 최적화기법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 또한 설계결과의 성능향상을 위해 설계변수 범위와 구속조건 허용값의 조정 방법을 보였다.

2. 설계대상

2.1 해석모델

설계대상 구조물은 그림 1과 같이 지상 8층, 지하 3층의 RC 빌딩이며, 1514개의 부재와 580개의 벽체로 구성된다. 구조해석을 위해 MIDAS/Gen을 사용하였으며, 하중조건은

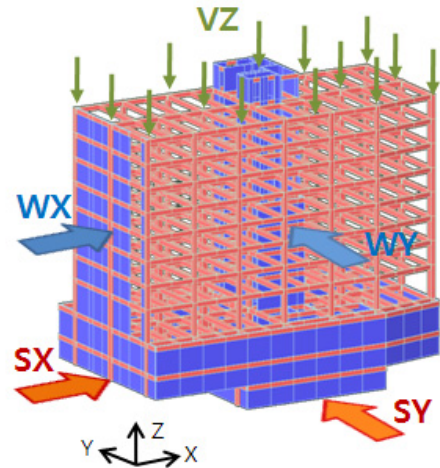


그림 1 RC 빌딩의 해석모델

수직하중(Z-directional Vertical load: VZ)과 X방향 풍하중(X-directional Wind load: WX), Y방향 풍하중(Y-directional Wind load: WY), X방향 지진하중(X-directional Seismic load: SX), Y방향 지진하중(Y-directional Seismic load: SY)의 조합으로 구성되고, 이는 한국건축표준기준(Korea Building code: KBC) 2005와 ACI 318-05 code를 기준으로 한다.

2.2 초기 설계값에서의 해석결과

하중조건에 의한 초기모델의 해석결과 분석을 위해 수직하중에 의한 변위와 X 및 Y방향 풍하중에 의한 최대변위, X 및 Y방향 지진하중에 의한 최대변위비를 계산하였다. 수직하중에 의한 변위는 변위 측정을 위해 선정한 10개 수평 부재의 수직방향 변위로서, 허용되는 기준값은 $L/480$ 으로 계산된다. 여기서 L 은 선택된 수평 부재의 길이이며, 실제 길이는 10m이다. X 및 Y방향 풍하중에 의한 최대변위는 해석 후 계산되는 전체 부재에서의 최대 변위이며, 기준값은 $H/500$ 으로 계산된다. 여기서 H 는 1층에서부터 지붕 층까지 높이를 의미하며, 실제 높이는 30.2m이다. X 및 Y방향 지진하중에 의한 최대변위비는 MD/SH 로 계산되며, 구조물의 기준값인 0.015를 적용하였다. 여기서 MD 는 지진하중에 의해 발생하는 최대변위이며, SH 는 최대변위가 발생한 층간 높이로서 실제 층간 높이는 3.6m이다.

초기 설계값에서의 해석결과를 기준값과 비교하여 표 1에 나타내었다. 그 결과, 각 하중에 의한 변위 해석결과가 기준값보다 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 초기모델이 주어진 하중에서 안정된 상태임을 나타내는 동시에 부재가 과도하게 설계되었음을 의미한다. 따라서 본 논문에서 선정한 구

표 1 초기 설계값에서의 해석결과

응답 항목	초기값	기준값
부재의 부피	1983.32m ³	-
수직하중에 의한 최대변위	0.0093m	0.0210m
X방향 풍하중에 의한 최대변위	0.0042m	0.0604m
Y방향 풍하중에 의한 최대변위	0.0119m	0.0604m
X방향 지진하중에 의한 최대변위비	0.0025	0.0150
Y방향 지진하중에 의한 최대변위비	0.0046	0.0150

조물의 경우 부재의 단면적을 감소시켜 전체 부재의 부피를 줄이고, 이를 통해 부재의 재료비를 절감 할 수 있는 문제임을 알 수 있다.

3. 설계문제

일반적으로 구조설계 시 부재단면치수의 감소에 따라 단면적과 단면2차 모멘트가 감소하여 부재내력이 감소하게 된다. 따라서 본 연구에서는 소요내력을 만족하는 단면을 선정 한 후 사용성 검토를 수행하여 최종 단면을 선정하기로 한다. 이를 위해 변형률 적합조건, 휨강도 및 압축강도를 만족하도록 구조설계 기준에 따라 해석모델을 검토하였고, MIDAS/Gen 해석 결과를 바탕으로 하중조합의 경우에 따라 최대 응력에 대해 단면 내 철근 배근이 가능하도록 1차적 제한치를 선정하였다. 이후 사용성 검토를 수행하기 위해 다음과 같은 설

계조건을 정립하였다.

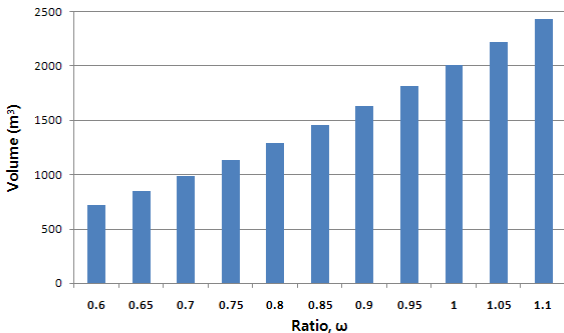
3.1 설계 요구사항

RC 빌딩 부재의 재료비를 최소화하기 위한 설계 요구사항은 다음과 같다.

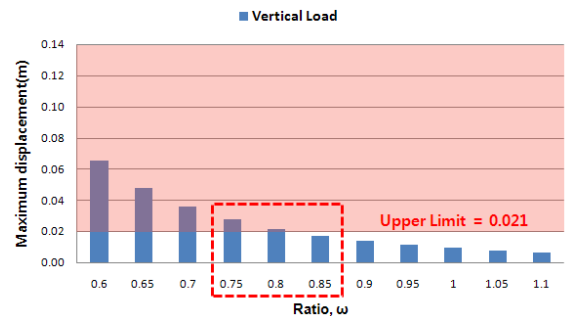
- 1) 부재의 재료비를 최소화하기 위해 전체 부재의 부피는 최소화되어야 한다.
- 2) 수직하중에 의해 발생하는 변위는 기준값보다 작아야 한다.
- 3) X 및 Y방향 풍하중에 의해 발생하는 최대변위는 각각 기준값보다 작아야 한다.
- 4) X 및 Y방향 지진하중에 의해 발생하는 최대변위비는 각각 기준값보다 작아야 한다.

3.2 설계변수

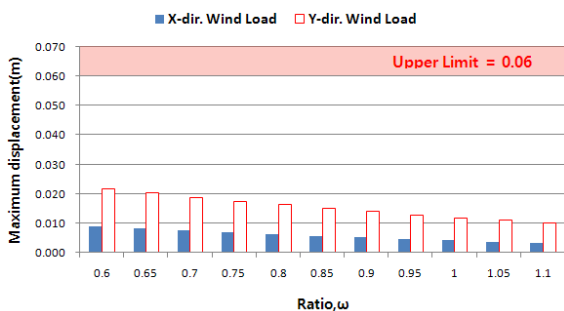
본 논문에서는 구조물의 형상과 부재의 길이 변경 없이 부재의 부피를 최소화하고자 한다. 이를 위해 식(1)과 같이 개별 부재의 기본 단면 형상을 유지할 수 있도록 부재 단면의 가로 길이(B)와 세로 길이(H)를 동시에 변경할 수 있는 부재의 단면길이비율(ω)을 설계변수로 선정하였으며, 효율적인 최적설계를 위해 1514개의 부재를 구조 특성에 따라 91개의 그룹으로 세분화하여 나누었다.



(a) 부재의 부피



(b) 수직하중에 의한 최대변위



(c) 풍하중에 의한 최대변위



(d) 지진하중에 의한 최대변위비

그림 2 파라메트릭 스터디 결과

$$A_i = (B_i \omega_i)(H_i \omega_i)$$

$$V_i = A_i L_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, 91 \quad (1)$$

여기서, A_i , V_i 및 L_i 는 각각 i 번째 부재 그룹의 단면적, 부피 및 길이이다.

단면길이비율을 설계변수로 선정한 이유는 다음과 같다. 일반적으로 부재의 처짐과 휨응력에 부재의 가로 길이보다는 세로 길이가 긴 것이 유리하지만 실제 구조물단면 감소 시 부재의 세로 길이는 층고 및 공사비 증가에 직접적인 요인이 된다. 따라서 가로 길이를 키우더라도 세로 길이를 감소시켜야 하는 건축적 요구를 반영하여 가로 길이와 세로 길이를 동시에 변경할 수 있는 단면길이비율을 설계변수로 선정하였다.

2.2절에서 밝혔듯이 초기 설계값에서 각 하중에 의한 변위들이 기준값을 만족하였으므로, 효율적인 최적설계를 위해 설계변수들의 적절한 상한값과 하한값을 지정하여야 한다. 따라서 설계변수에 대한 응답의 전역적 특성을 파악하기 위해 그림 2와 같이 초기값(Ratio 1)을 기준으로 전체 설계변수들을 0.6에서 1.1까지 변화시키는 파라메트릭 스테디(Parametric study)를 수행하였다.

파라메트릭 스테디 결과, 부재의 부피는 그림 2(a)와 같이 단면길이비율이 줄어들수록 감소하는 경향을 보인다. 수직하중에 대한 최대변위는 그림 2(b)와 같이 Ratio 0.75에서는 기준값을 위배하지만 Ratio 0.85에서는 만족함을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대변위와 지진하중에 의한 최대변위비도 각각 그림 2(c)와 그림 2(d)와 같이 전체범위에서 만족함을 알 수 있다. 따라서 최적설계를 위한 설계변수의 하한값과 상한값은 수직하중에 의한 최대변위 결과에 따라 각각 0.75와 0.85로 결정하고, 초기값은 중간값인 0.8로 설정한다.

3.3 설계문제 정식화

설계 요구사항과 설계변수를 바탕으로 최적설계 문제를 정식화하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} && \omega_i, && i = 1, 2, 3, \dots, 91 \\ & \text{to minimize} && \sum_{i=1}^{91} V_i \\ & \text{subject to} && \delta_j^{VZ} \leq \delta_{allow}^{VZ}, && j = 1, 2, 3, \dots, 10 \\ & && \delta_{max}^{WX} \leq \delta_{allow}^{WX} \\ & && \delta_{max}^{WY} \leq \delta_{allow}^{WY} \\ & && R_{max}^{SX} \leq R_{allow}^{SX} \\ & && R_{max}^{SY} \leq R_{allow}^{SY} \\ & && 0.75 \leq \omega_i \leq 0.85 \end{aligned}$$

여기서, ω_i 는 설계변수인 i 번째 그룹화한 부재의 단면길이비율을, V_i 는 i 번째 그룹화한 부재의 부피를 의미한다. δ_j^{VZ} 는 수직하중에 의한 j 번째 부재의 변위를, δ_{max}^{WX} 와 δ_{max}^{WY} 는 각각 X 및 Y방향 풍하중에 의한 최대변위를, R_{max}^{SX} 와 R_{max}^{SY} 는 각각 X 및 Y방향 지진하중에 의한 최대변위비를 의미한다. 또한 δ_{allow}^{VZ} , δ_{allow}^{WX} , δ_{allow}^{WY} , R_{allow}^{SX} 및 R_{allow}^{SY} 는 각각 다섯 가지 하중에 대한 변위관련 허용값을 나타낸다.

4. 최적화 전략

반복과정이 필요한 최적설계에서 효율적인 설계를 위해 해석절차의 자동화가 구현되어야 한다. 하지만 MIDAS/Gen의 프로그램 내부구조 특성상 해석절차의 자동화가 불가능하기 때문에 본 연구에서는 그림 3과 같이 PIANo에서 제공하는 실험계획법(Design of Experiments; DOE)을 사용하여 실험계획을 세우고, 그에 따라 MIDAS/Gen을 이용하여 구조해석을 수행한 후, PIANo 상에서 전산실험 결과를 이용하여 근사모델을 생성하였으며, PIANo에서 제공하는 최적화기법을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

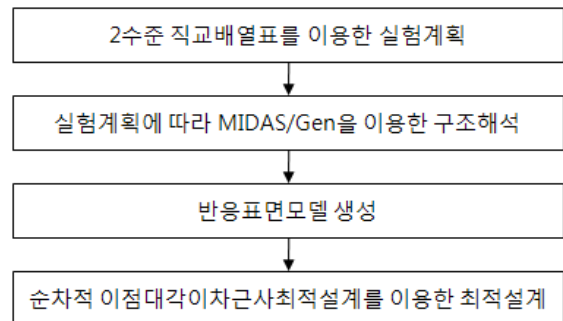


그림 3 설계 순서도

4.1 실험계획법

PIANo에서 제공하는 실험계획법 중의 하나인 2수준 직교 배열표(Orthogonal Array; OA) $L_{184}(2^{92})$ 를 사용하여 184개의 실험점을 생성하였으며, 실험계획에 따라 MIDAS/Gen을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 설계변수의 수준을 2수준으로 선정한 이유는 그림 2에서와 같이 파라메트릭 스테디 결과분석을 통해 설계변수의 범위를 실질적으로 줄였고, 해당 설계변수 구간에서 반응값이 보이는 경향성을 미루어 보아 선형모델로도 충분히 근사화 할 수 있기 때문이다.

4.2 근사화기법

표 2 근사모델의 예측성능 평가

응답 항목	R_{adj}^2
부재의 부피	1.000
수직하중에 의한 옥상층의 최대변위	0.999
수직하중에 의한 8층의 최대변위	0.987
수직하중에 의한 7층의 최대변위	0.994
수직하중에 의한 6층의 최대변위	0.995
수직하중에 의한 5층의 최대변위	0.994
수직하중에 의한 4층의 최대변위	0.992
수직하중에 의한 3층의 최대변위	0.995
수직하중에 의한 2층의 최대변위	0.999
수직하중에 의한 1층의 최대변위	0.985
수직하중에 의한 지하 1층의 최대변위	0.943
X방향 풍하중에 의한 최대변위	0.996
Y방향 풍하중에 의한 최대변위	0.998
X방향 지진하중에 의한 최대변위비	0.825
Y방향 지진하중에 의한 최대변위비	0.937

근사모델 기법은 관심영역 또는 전체영역 내에서 실제 해석모델의 반응값과 변수값의 관계를 근사화한 근사모델을 생성하여 해석비용이 많이 소요되는 실제 해석모델을 대체하기 위한 방법으로 통계, 수학 및 다양한 공학분야 등에서 개발되어 왔다.

실험계획에 따른 구조해석 결과로부터 부재의 부피와 다섯 가지 하중에 의한 최대변위 및 최대변위비에 대해 PIANO에서 제공하는 근사모델인 반응표면모델(Response Surface Model: RSM)을 선형근사모델(Linear Approximate Model)로 각각 생성하였다.

본 논문에서는 생성한 반응표면모델의 예측성능을 평가하기 위한 기준으로 R_{adj}^2 (Adjusted R-square)를 선정하였다. R_{adj}^2 는 다른 근사모델 평가기법과는 달리 정확도의 척도를 제공하며, R_{adj}^2 값이 1에 가까울수록 근사모델의 예측성능이 우수함을 의미한다(Myers 등, 2002).

생성한 반응표면모델의 예측성능 평가결과를 표 2에 나타내었다. 대부분의 응답 항목들의 R_{adj}^2 가 1에 근접하지만, 지진하중에 관련한 응답항목의 R_{adj}^2 는 상대적으로 낮음을 볼 수 있다. 하지만 그림 2(d)에서와 같이 지진하중에 관련한 응답항목은 민감하지 않은 구속조건이기 때문에 어느 정도의 정확도 차이를 허용하도록 한다. 결론적으로 본 논문에서 생성한 반응표면모델들의 예측성능이 전반적으로 우수함을 알 수 있다.

4.3 최적화기법

근사모델을 이용한 최적설계를 수행하기 위해 PIANO에

서 제공하는 최적화기법 중 하나인 순차적 이점대각이차근사최적설계(Sequential Two-point Diagonal Quadratic Approximate Optimization; STDQAO)를 사용하였다. 순차적 이점대각이차근사최적설계는 반복적인 최적화 과정에서 생성되는 민감도 정보를 근사화에 재활용하는 순차적 근사 최적설계기법이다. 특히, 전통적인 기울기 기반 최적설계기법에 비해 적은 해석 횟수를 필요로 하며, 민감도를 정확하게 계산할 수 있는 경우에는 빠르면서 강건한 수렴성을 보인다(Kim 등, 2008).

5. 최적설계 결과

반응표면모델과 순차적 이점대각이차근사최적설계를 이용하여 RC 빌딩의 부재의 부피 최소화를 위한 최적설계를 수행한 결과, 주어진 구속조건을 모두 만족하면서 정상 수렴하였다.

근사모델을 이용한 최적설계(AO_pred)를 통해 목적함수인 부재 부피는 그림 4(a)와 같이 초기값(Baseline) 대비 43.07% 감소한 1144.9m³이었다. 또한 최적 설계변수값에서 부재 부피의 실제 해석값(AO_act)은 1144.5m³으로서 근사모델과 0.02%의 오차를 가진다. 따라서 부재 부피에 대한 근사모델의 예측성능이 우수함을 알 수 있다.

수직하중에 의한 수직방향의 최대변위는 선정된 10개의 수평 부재에서 각각 측정되지만 편의를 위해 10개의 최대변위 중 변위값이 가장 큰 값을 그림 4(b)에 나타내었다. 근사모델의 예측성능이 우수함을 알 수 있으며, 실제 해석값은 초기값에 비해 175.7% 증가한 0.0204m지만 허용값인 0.021m를 만족한다.

X 및 Y방향 풍하중에 의한 최대변위의 경우 그림 4(c)와 같이 근사모델의 예측성능이 우수함을 알 수 있으며, 실제 해석값은 초기값에 비해 각각 66.6%와 47.1% 증가한 0.007m와 0.0175m지만 허용값인 0.06m를 각각 만족한다.

X 및 Y방향 지진하중에 의한 최대변위비의 경우 그림 4(d)와 같이 근사모델의 예측성능이 우수함을 알 수 있으며, 실제 해석값은 초기값에 비해 각각 20%와 19.6% 증가한 0.003과 0.0055지만 허용값인 0.015를 각각 만족한다.

설계변수의 초기값과 최적값을 그림 5에 비교하였다. 전체 91개 설계변수 중 80개의 설계변수가 단면적이 최소화 되도록 하한값으로 결정되었고, 9개 설계변수는 초기값 또는 초기값과 하한값의 중간값으로 결정되었으며, 설계변수 ω_{74} 와 ω_{78} 만이 초기값과 상한값의 중간값으로 결정되었다.

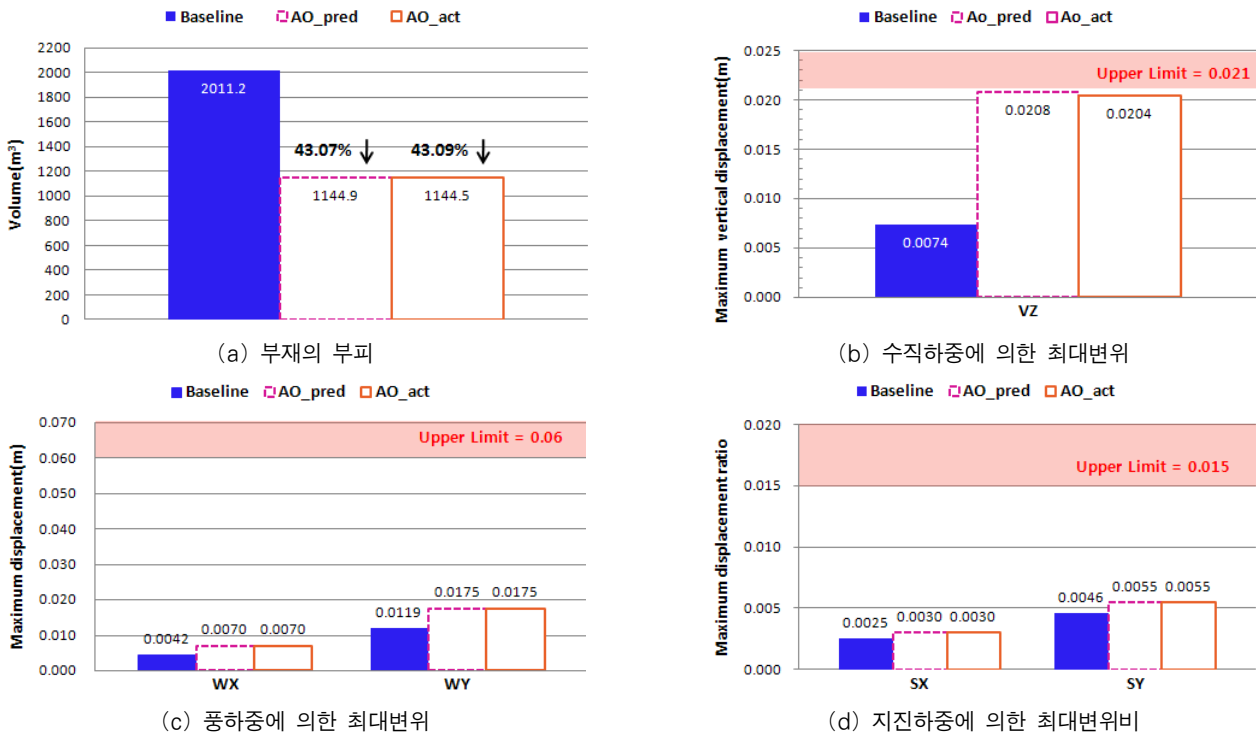


그림 4 최적설계 결과 비교

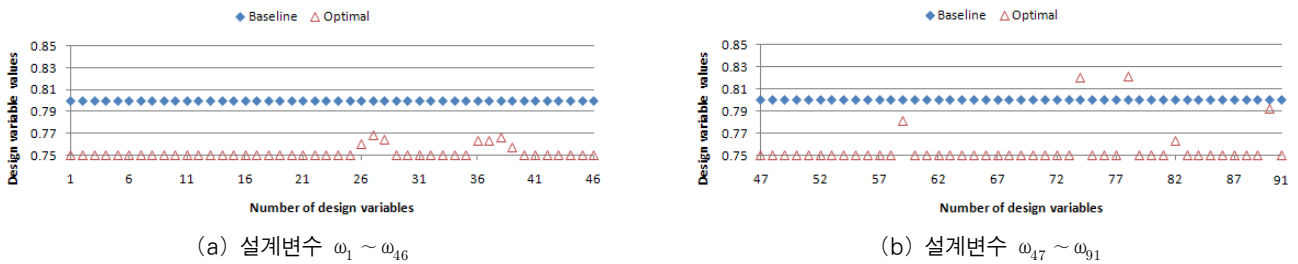


그림 5 설계변수 변화 비교

6. 성능향상을 위한 제한값의 조정

본 장에서는 5장에서 수행한 최적설계 결과의 성능향상을 위해 설계변수의 하한값과 구속조건의 허용값을 조정하였으며, 적용 결과는 다음과 같다.

6.1 설계변수의 하한값 조정

5장에서 수행한 최적설계 결과, 그림 5와 같이 대부분의 설계변수 값들이 하한값인 0.75로 결정된 것을 알 수 있다. 이는 대부분의 설계변수들이 더 낮은 값을 가질 수 있으며, 이로서 부재의 부피를 좀 더 감소시킬 수 있음을 의미한다. 따라서 본 장에서는 설계변수의 하한값을 조정하여 새로운 근사모델을 생성하고 이를 이용하여 최적설계를 수행하도록 한다.

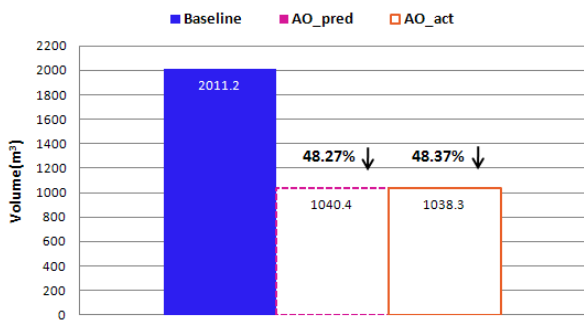
6.1.1 설계변수의 하한값이 0.7일 경우

설계변수의 하한값을 0.75에서 0.7로 변경하여 4장에서 소개한 설계절차에 따라 최적설계를 수행한 결과, 주어진 구속조건을 모두 만족하면서 정상 수렴하였다.

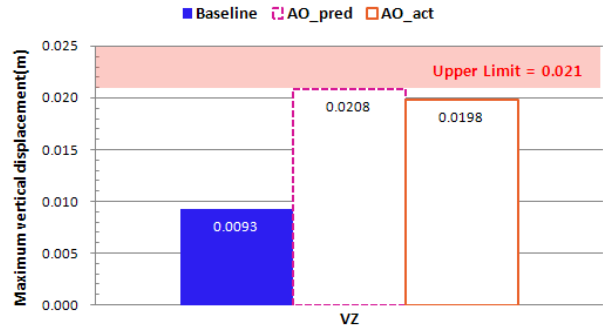
목적함수인 부재의 부피는 그림 6(a)와 같이 실제 해석값이 초기값에 비해 48.37% 감소한 1038.3m³이고, 이는 설계변수의 하한값이 0.75인 최적설계 결과보다 부피가 4.47% 더 감소한 것이다.

수직하중에 의한 최대변위의 경우 그림 6(b)와 같이 실제 해석값이 0.0198m이었지만 허용값인 0.021m를 만족한다. X 및 Y방향 풍하중에 의한 최대변위의 경우 그림 6(c)와 같이 실제 해석값이 허용값인 0.06m를 만족한다. X 및 Y방향 지진하중에 의한 최대변위비의 경우 실제 해석값이 그림 6(d)와 같이 허용값인 0.015를 만족한다.

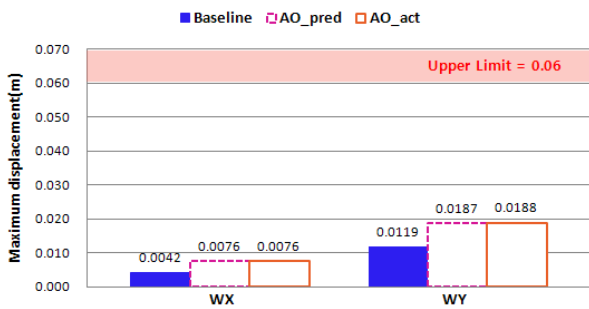
설계변수의 초기값과 최적값을 그림 7에 비교하였다. 설계



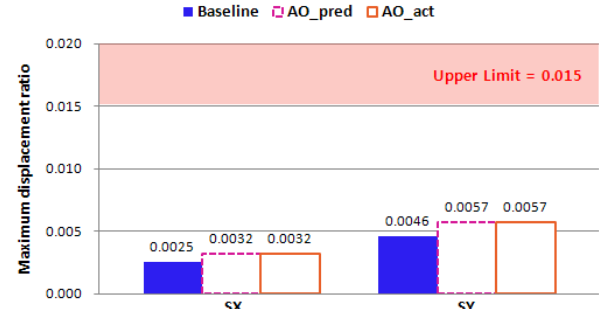
(a) 부재의 부피



(b) 수직하중에 의한 최대변위

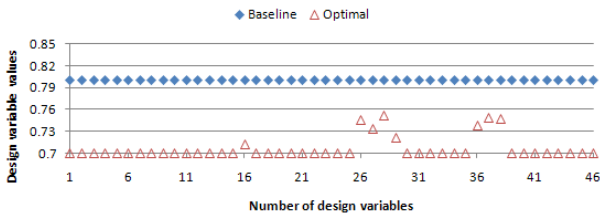


(c) 풍하중에 의한 최대변위

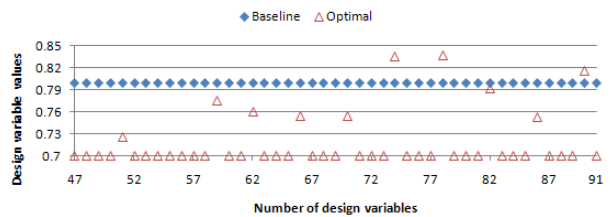


(d) 지진하중에 의한 최대변위비

그림 6 설계변수의 하한값이 0.7일 경우의 최적설계 결과 비교



(a) 설계변수 $\omega_1 \sim \omega_{46}$



(b) 설계변수 $\omega_{47} \sim \omega_{91}$

그림 7 설계변수의 하한값이 0.7일 경우의 설계변수 변화 비교

변수 하한값이 0.75인 최적설계 결과보다 설계변수의 분포가 다양해졌으나 여전히 91개 설계변수 중에서 73개의 설계변수가 하한값 0.7로 결정되었으므로 이 경우에도 많은 수의 설계변수들이 0.7보다 더 낮은 값을 가질 가능성이 있다.

6.1.2 설계변수의 하한값이 0.6일 경우

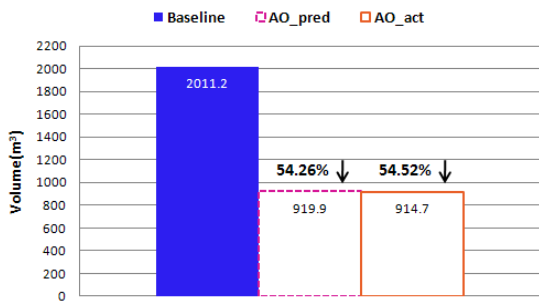
설계변수의 하한값을 0.7로 변경한 6.1.1절의 결과보다 좀 더 향상된 결과를 얻기 위해 설계변수의 하한값을 0.6으로 변경하여 최적설계를 수행한 결과, 주어진 구속조건을 모두 만족하면서 정상 수렴하였다.

목적함수인 부재의 부피는 그림 8(a)와 같이 실제 해석값이 초기값에 비해 54.52%가 감소한 914.7m³이고, 이는 설계변수의 하한값이 0.7인 최적설계 결과보다 부피가 6.15% 더 감소한 결과이다.

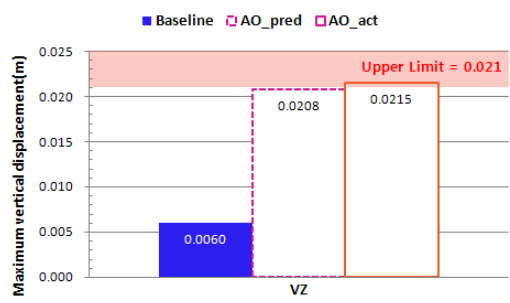
수직하중에 의한 최대변위의 경우 그림 8(b)와 같이 근사

모델을 이용한 최적설계 결과는 허용값을 만족하였으나, 실제 해석값은 0.0215m로서 허용값인 0.021m를 2.4% 위배한다. 이러한 원인으로서는 그림 2(b)와 같이 설계변수 구간이 0.75에서부터 0.85일 때는 수직하중에 의한 최대변위를 선행으로 근사할 수 있지만 설계변수의 하한값이 0.6으로 변경됨에 따라 수직하중에 의한 최대변위가 비선형적인 경향을 보여 선형근사함수의 예측성능이 나빠졌기 때문이다. 실제로 그림 8(b)에서 보이는 수직하중에 의한 지하 1층의 최대변위의 R_{adj}^2 는 0.876이었다. 풍하중에 의한 최대변위와 지진하중에 의한 최대변위비의 경우 그림 8(c)와 그림 8(d) 같이 각각의 허용값을 만족한다.

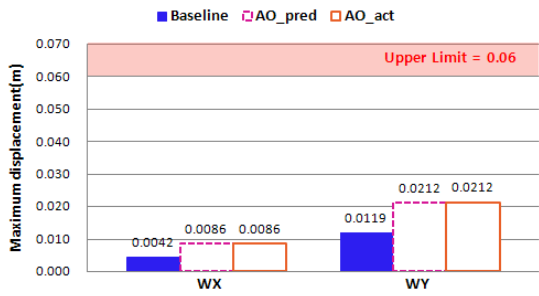
설계변수의 초기값과 최적값을 그림 9에 비교하였다. 전체 91개 설계변수 중 36개의 설계변수가 설계범위 내에서 고루 분포되고 56개의 설계변수가 하한값으로 결정되었다. 이러한 경우 여전히 56개의 설계변수가 더 낮은 값을 가질 수도 있



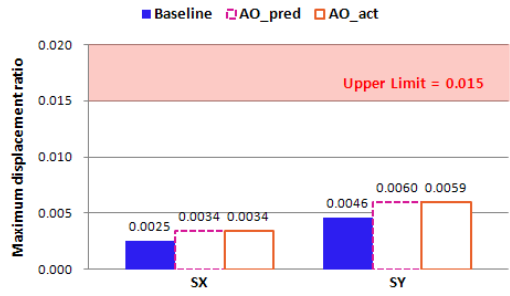
(a) 부재의 부피



(b) 수직하중에 의한 최대변위

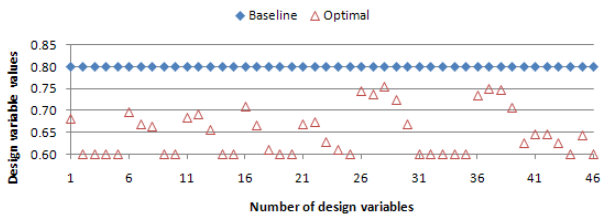


(c) 풍하중에 의한 최대변위

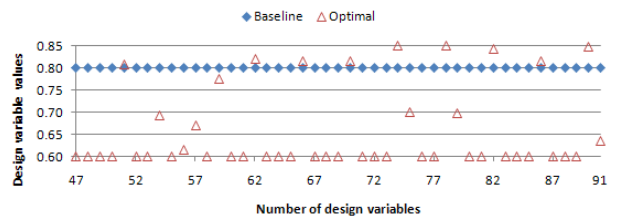


(d) 지진하중에 의한 최대변위비

그림 8 설계변수의 하한값이 0.6일 경우의 최적설계 결과 비교



(a) 설계변수 $\omega_1 \sim \omega_{46}$



(b) 설계변수 $\omega_{47} \sim \omega_{91}$

그림 9 설계변수의 하한값이 0.6일 경우의 설계변수 변화 비교

지만 수직하중의 실제 최대변위값이 허용값을 위배하였으므로 부재의 부피를 최소화하기 위해 설계변수의 하한값을 더 이상 낮추는 것은 성능향상에 있어 무리가 있다고 판단된다.

6.2 구속조건의 허용값 조정

6.1.2절에서 부재의 부피를 최소화 하는 설계결과를 얻었지만 그림 8(b)와 같이 수직하중에 의한 실제 최대변위가 허용값을 위배하였다. 이러한 경우 근사모델의 정확도를 높여 문제를 해결할 수도 있지만 6.1.2절의 근사모델을 그대로 사용하면서 민감한 구속조건의 허용값을 조정함으로써도 문제를 해결할 수 있다.

6.2.1 수직하중에 의한 최대변위의 허용값이 0.02일 경우

수직하중에 의한 최대변위의 허용값을 0.021에서 0.02로 변경하여 최적설계를 수행한 결과, 주어진 구속조건을 모두

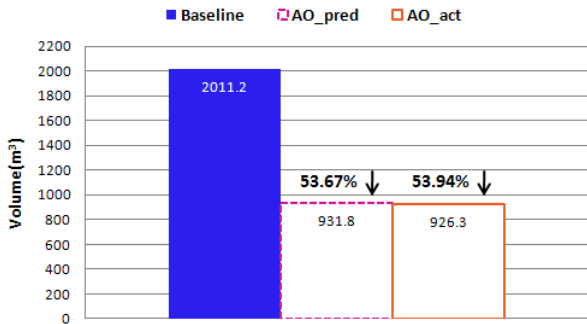
만족하면서 정상 수렴하였다.

목적함수인 부재의 부피는 그림 10(a)와 같이 실제 해석값이 초기값에 비해 53.94%가 감소한 926.3m³이고, 이는 허용값을 낮추기 전보다 부피가 0.58% 증가한 것이지만 큰 차이는 보이지 않는다.

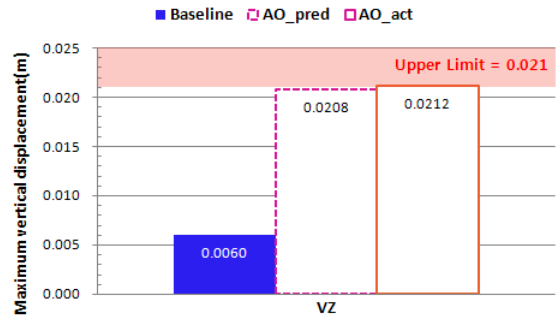
수직하중에 의한 최대변위의 경우 그림 10(b)와 같이 실제 해석값이 0.0212m로서 허용값 0.02m를 위배하고 기준값 0.021m 또한 0.95% 위배한다. 하지만 이 위배량은 허용값 변경 전 위배량(2.4%)보다 감소한 것으로서 구속조건 허용값 조정에 따른 결과임을 알 수 있다. 풍하중에 의한 최대변위와 지진하중에 의한 최대변위비의 경우 그림 10(c)와 그림 10(d) 같이 각각의 허용값을 만족한다.

6.2.2 수직하중에 의한 최대변위의 허용값이 0.019일 경우

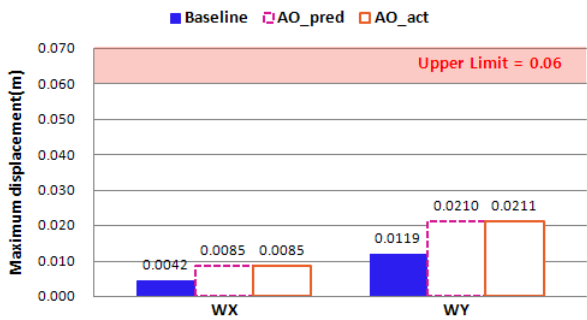
6.1.2절과 같이 수직하중에 의한 최대변위의 허용값을 0.02로 변경하여 최적설계를 수행한 결과, 수직하중에 의한



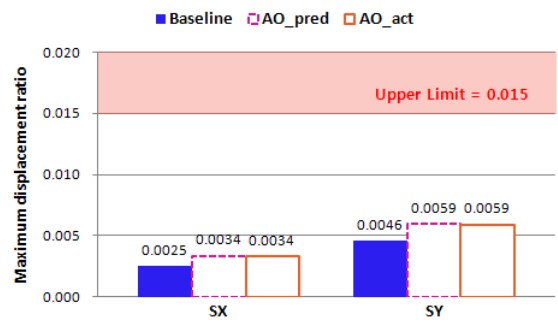
(a) 부재의 부피



(b) 수직하중에 의한 최대변위



(c) 풍하중에 의한 최대변위



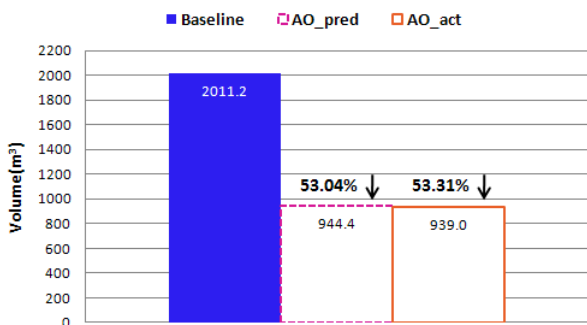
(d) 지진하중에 의한 최대변위비

그림 10 수직하중에 의한 최대변위의 허용값이 0.02일 경우의 최적설계 결과 비교

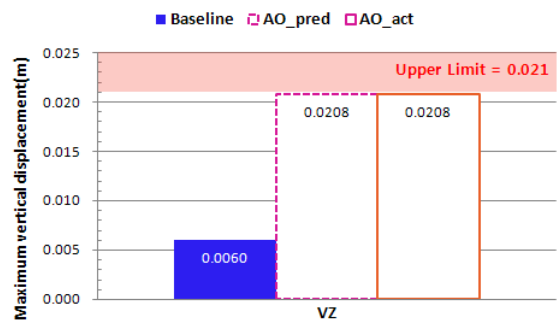
최대변위가 0.0212m로서 허용값 변경 전보다 0.0003m의 변위를 줄일 수 있었다. 하지만 여전히 기준값을 위배하기 때문에 성능향상을 위해 허용값을 0.019로 변경하여 최적설계를 수행하였다.

목적함수인 부재의 부피는 그림 11(a)와 같이 실제 해석

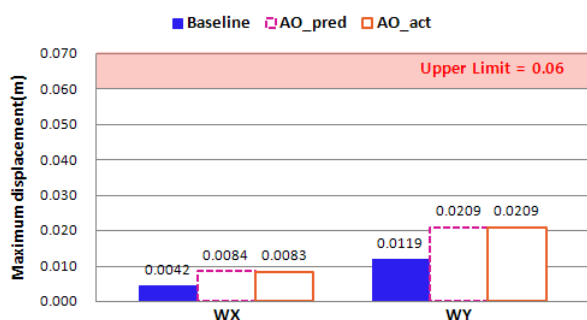
값이 초기값에 비해 53.31% 감소한 939m³이다. 이는 허용값을 변경하기 전보다 부피가 1.2% 증가한 것이며, 허용값이 0.02일 때보다는 부피가 0.63% 증가한 값이다. 하지만 허용값 변경에 따른 목적함수의 변화는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.



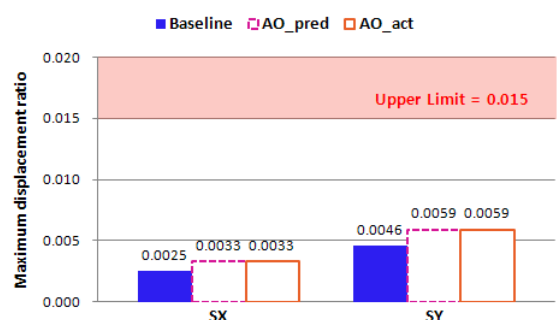
(a) 부재의 부피



(b) 수직하중에 의한 최대변위

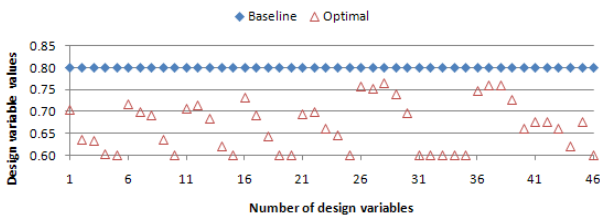


(c) 풍하중에 의한 최대변위

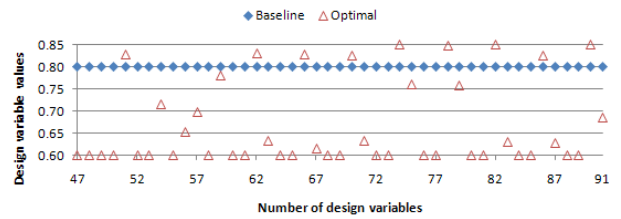


(d) 지진하중에 의한 최대변위비

그림 11 수직하중에 의한 최대변위의 허용값이 0.019일 경우의 최적설계 결과 비교

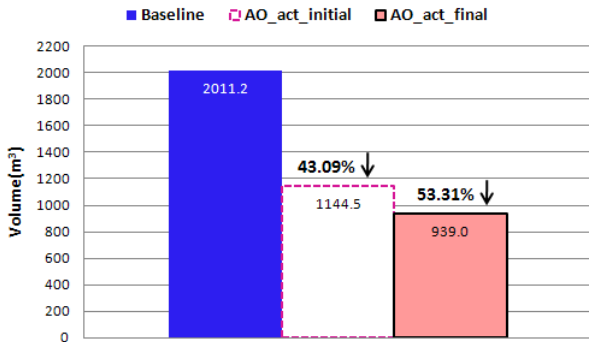


(a) 설계변수 $\omega_1 \sim \omega_{46}$

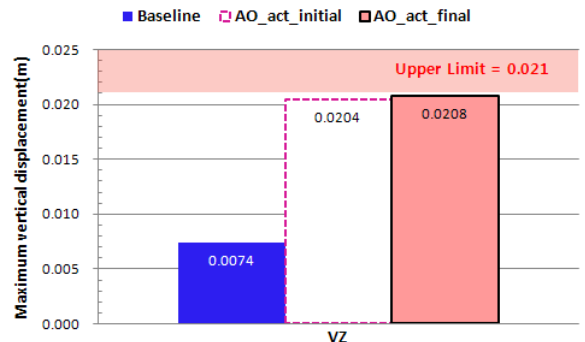


(b) 설계변수 $\omega_{47} \sim \omega_{91}$

그림 12 수직하중에 의한 최대변위의 허용값이 0.019일 경우의 설계변수 변화 비교



(a) 부재의 부피



(b) 수직하중에 의한 최대변위

그림 13 최종 최적설계 결과 비교

수직하중에 의한 최대변위의 경우 그림 11(b)와 같이 실제 해석값이 허용값 0.019m를 위배한 0.0208m이었지만, 규준값인 0.021m를 만족하므로 설계결과는 유효하다. 풍하중에 의한 최대변위와 지진하중에 의한 최대변위비의 경우 그림 11(c)와 그림 11(d) 같이 각각의 허용값을 만족한다.

설계변수의 초기값과 최적값을 그림 12에서 비교하였다. 전체 91개 설계변수 중 37개의 최적값만이 단면적을 최소화하도록 하한값으로 결정되었고, 나머지 설계변수들은 설계범위 내에 고루 분포되었다.

6.3 최종 최적설계 결과 비교

5장에서 최초로 수행한 최적설계 결과의 실제 해석값(AO_act_initial)과 6.2.2절에서 수행한 최종 최적설계 결과의 실제 해석값(AO_act_final)을 비교하였다. 그 결과, 그림 13과 같이 설계변수의 하한값과 민감한 구속조건인 수직하중에 의한 최대변위의 허용값을 조정해 최종 최적설계 결과가 해당 구속조건을 만족하면서 목적함수인 부재의 부피를 최소화 할 수 있음을 볼 수 있다.

7. 결 론

RC 빌딩 부재의 부피 최소화를 위한 최적설계의 결론은

다음과 같다.

- (1) 설계요구사항과 설계변수 그룹을 세분화하여 RC 빌딩 부재의 부피 최소화를 위한 설계문제를 정식화하였다.
- (2) 직교배열법에 따른 전산실험 결과를 바탕으로 반응표면모형을 생성하였으며, 순차적 이점대각이차근사최적설계를 이용하여 최적설계를 수행하였다. 그 결과, 주어진 구속조건을 모두 만족하면서 부재의 부피를 43.09% 감소할 수 있는 부재의 단면적을 도출하였다.
- (3) 설계결과의 성능향상을 위해 설계변수의 하한값 및 민감한 구속조건을 조정하는 단계적인 설계방법론 적용하였다. 그 결과, 하중조건에 따른 설계 규준값을 모두 만족하면서 부재의 부피를 53.31% 감소할 수 있는 최적의 부재 단면적을 도출하여 본 논문에서 보인 설계방법의 타당성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 ‘c-MES 설계지원 플랫폼 기술 개발’ 과제(10033162-2009-11) 및 2010년도 2단계 두뇌한국21사업 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 이 연구를 위하여 상용 PIDO 툴인 PIAo 소프트웨어를 제공한 (주)플레이맥스에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 곽효경, 김지은** (2008) 직접탐색을 이용한 유전자 알고리즘에 의한 RC프레임의 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 21(1), pp.21~34.
- 박창현, 안희재, 최동훈, 정철규** (2010) 중량 최소화를 위한 RC 빌딩의 구조 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 23(5), pp.501~507.
- Atabay, S.** (2009) Cost Optimization of Three-dimensional Beamless Reinforced Concrete Shear-wall Systems via Genetic Algorithm, *Expert Systems with Applications*, 36(2), pp.3555~3561.
- Camp, C.V., Pezeshk, S., Hansson, H.** (2003) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm, *J. Struct. Eng.*, 129(1), pp.105~115.
- Chan, C.M., Zou, X.K.** (2004) Elastic and Inelastic Drift Performance Optimization for Reinforced Concrete Buildings under Earthquake Loads, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 33, pp.929~950.
- Gang, Li, Haiyan, Lu, Xiang L.** (2009) A Hybrid Genetic Algorithm and Optimality Criteria Method for Optimum Design of RC Tall Buildings under Multi-load Cases, *Struct. Design Tall Spec. Build.*, 19(6), pp.656~678.
- Kim, J.R., Choi, D.H.** (2008) Enhanced Two-point Diagonal Quadratic Approximation Methods for Design Optimization, *Comput. Meth. Appl. Mech. Engrg.*, 197(6-8), pp.846~856.
- Lee, C., Ahn, J.** (2003) Flexural Design of Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm, *J. Struct. Eng.*, 132(6), pp.978~990.
- McCormac, J.C.** (1998) *Design of Reinforced Concrete, 4th Ed.*, Addison-Wesley Longman, Calif, pp.726.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C.** (2002) *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, WILEY, New York, p.31.
- Sahab, M.G., Ashour, A.F., Toropov, V.V.** (2005) Cost Optimization of Reinforced Concrete Flat Slab Buildings, *Eng. Struct.*, 27(3), pp.313~322.
- Zou, X.K., Chan, C.M., Li, G., Wang, Q.** (2007) Multiobjective Optimization for Performance-Based Design of Reinforced Concrete Frames, *J. Struct. Eng.*, 133(10), pp.1462~1474.

- 논문접수일 2010년 12월 28일
- 논문심사일
 - 1차 2010년 12월 31일
 - 2차 2011년 3월 2일
- 게재확정일 2011년 3월 3일