J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea, 29(6)
pp.555~562, December, 2016
https://doi.org/10.7734/COSEIK.2016.29.6.555

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

Zipper를 가진 역V형 가새골조의 다목적 최적내진설계기법

오 병 관[1] · 박 효 선[1] · 최 세 운[2†]

[1]연세대학교 건축공학과, [2]대구가톨릭대학교 건축학부

Member Sizing Optimization for Seismic Design of the Inverted V-braced Steel Frames with Suspended Zipper Strut

Byung-Kwan Oh[1], Hyo-Seon Park[1] and Se-Woon Choi[2†]

[1]*Department of Architectural Engineering, Yonsei Univ., Seoul, 06285, Korea*
[2]*Department of Architecture, Catholic Univ. of Daegu, Gyeongsan, 38430, Korea*

Abstract

Seismic design of braced frames that simultaneously considers economic issues and structural performance represents a rather complicated engineering problem, and therefore, a systematic and well-established methodology is needed. This study proposes a multi-objective seismic design method for an inverted V-braced frame with suspended zipper struts that uses the non-dominated sorting genetic algorithm-II(NSGA-II). The structural weight and the maximum inter-story drift ratio as the objective functions are simultaneously minimized to optimize the cost and seismic performance of the structure. To investigate which of strength- and performance-based design criteria for braced frames is the critical design condition, the constraint conditions on the two design methods are simultaneously considered (i.e. the constraint conditions based on the strength and plastic deformation of members). The linear static analysis method and the nonlinear static analysis method are adopted to check the strength- and plastic deformation-based design constraints, respectively. The proposed optimal method are applied to three- and six-story steel frame examples, and the solutions improved for the considered objective functions were found.

Keywords : *optimization, seismic desgin, inverted V-braced frames with suspended zipper, NSGA-II*

1. 서 론

1990년대까지 널리 사용된 내진설계철학은 인명피해 방지와 붕괴 방지에 초점을 두었다. 이는 설계코드에서 주어진 조건에 따라 건물을 설계하면 구조물의 붕괴방지를 보장한다는 것을 의미한다. 실제로 미국에서 이러한 코드에 따라 설계된 건물 중 지진 발생 시 붕괴된 사례는 적었다(Burn, 2002). 그러나 노스리지 지진(1994), 고베 지진(1995) 등에서 입은 피해 분석 결과, 구조물의 붕괴는 방지되었지만, 구조물의 손상 비용이 막대해서 붕괴 방지뿐 아니라 구조물의 손상을 감소시킬 수 있는 기존 내진설계방법의 변환이 요구되었다.

이러한 배경 속에서 성능기반내진설계법(performance based seismic design, PBSD)이 활발히 연구되었다(Ghobarah, 2001; Priestley, 2000). PBSD는 일반적으로 비선형해석을 통해 구조물의 거동을 예측하고, 변위에 기반한 정량적인 성능기준을 제시한다. 이에 따라 건축주와 엔지니어는 자신들이 원하는 성능을 만족시키는 구조물을 PBSD를 통해 얻을 수 있다.

PBSD는 건물의 내진성능을 평가하기 위해 부재의 소성변형각, 층간변위율 등과 같은 변형값에 대하여 정량화된 조건을 이용하는데, 이는 구조물의 소성거동을 직접적으로 고려해야 함을 의미한다. 그러나 구조물의 소성거동은 탄성거동과는 다르게 거동 중에 발생하는 소성힌지 등에 의해서 하중 전달 흐름이 바뀌게 되는 복잡한 특성을 가지고 있어서 엔지니어의 경험과 직관에 의해 구조물의 거동 특성을 정확히 예측하기가 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고, 실무에서 PBSD을 수행하기 위해서는 엔지니어의 경험과 직관에 의존한 시행착오방식을

† Corresponding author:
Tel: +82-53-850-2736; E-mail: watercloud@cu.ac.kr
Received October 25 2016; Revised November 22 2016;
Accepted November 29 2016
©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사용할 수 밖에 없다. 이는 경험 및 지식 부족, 효율성 및 경제성 저하 등의 문제를 발생시킨다.

이러한 이유로 최적화기법을 이용한 성능기반 최적내진설계에 관한 연구가 활발히 진행되었다(Frangiadakis *et al.*, 2006a; 2008). 이 연구들은 콘크리트 및 철골 모멘트골조에 대하여 수행되었지만, 대부분의 연구가 구조물의 구조물량을 최소화하는 연구에 한정되어 있다. 이는 구조물의 초기 건설비용은 감소시킬 수 있지만, 구조물의 성능이 저하되는 문제를 발생시킬 수 있다. 구조물의 성능 저하는 생애기간 동안의 보수, 보강 비용을 증가시켜, 구조물 전체 생애주기비용은 증가할 수가 있다.

이러한 점을 극복하고자 초기 구조물량 최소화를 포함한 2개 이상의 목적함수를 고려한 성능기반 다목적 최적내진설계에 관한 연구가 진행되었다(Liu *et al.*, 2005; Zou *et al.*, 2007). 이 연구들은 초기 물량을 최소화하는 목적함수뿐 아니라, 구조성능에 기반한 생애주기비용 최소화, 시공성을 향상시키기 위해 사용되는 철골 단면 종류 수의 최소화, 최대 층간변위율의 최소화 등이 동시에 목적함수로 고려되었다. 그러나 이 연구들은 모멘트골조만을 대상 구조물로 한정하였다.

모멘트골조와 더불어 대표적인 횡력저항시스템인 가새골조를 대상으로 하여 최적구조설계기법을 제시한 연구로는 Moghaddam 등(2005)이 있다. 그러나 이 연구는 선형해석만을 수행하였으며 PBSD에서의 주요 고려 대상인 비선형거동이 고려되지 않았다.

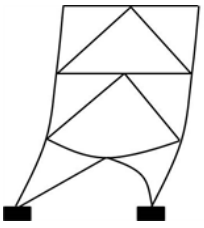
본 연구는 Zipper를 가진 가새골조에 대한 다목적 최적내진설계기법을 제시한다. 본 연구에서는 구조물량과 고려한 지진하중에 대하여 발생하는 최대층간변위율을 최소화하는 2개의 목적함수를 사용하여 구조물의 경제성뿐 아니라 내진성능을 동시에 향상시키도록 한다. 제약조건으로는 네 가지의 조건을 사용한다. 첫째, 시공성을 고려하기 위해 수직으로 연속된 기둥에 대한 단면적 제약조건을 사용한다. 둘째, 기존 강도기반 설계과정을 고려하기 위해 선형정적해석을 수행하고 각 부재의 강도를 검토한다. 셋째, 지진하중에 대한 구조물의 층간변위율 제약조건을 사용한다. 넷째, 성능설계조건과 기존 강도기반 설계조건 중 어느 설계조건이 지배적인 설계조건으로 제약하는지 확인하기 위해 비선형정적해석을 수행하고 부재의 변형조건을 사용한다. 다목적 최적화 기법인 Nondominated Sorting Genetic Algorithm(NSGA-II)(Deb *et al.*, 2002)을 사용하여 고려한 제약조건을 만족시키면서 최적의 설계안을 얻을 수 있도록 하는 자동화된 설계기법을 제시한다. 제안한 기법의 검증을 위해 3층, 6층 예제(Sabelli, 2000)를 사용한다. 예제 적용을 통해 얻은 최적해와 초기설계안의 제약율 및 목적함수 값을 비교하였으며, 비선형정적해석을 통해 내진성능을 평가한다.

2. Zipper를 가진 역V형 중심가새골조

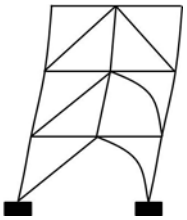
가새골조는 기본적으로 가새와 기둥의 축강성을 이용하여 횡력에 저항하는 구조시스템으로써, 모멘트골조에 비하여 물량절감효과를 얻을 수 있다(Brueau *et al.*, 1997). 이러한 이유 때문에 가새골조는 1990년대 중반 이후 미국 캘리포니아에서 새롭게 건설된 상업건물의 약 40%를 차지하는 것으로 나타났다(Uriz, 2005). 대표적인 가새골조에는 역V형 중심가새골조가 있다. 이는 단순한 디자인과 스팬 중앙부의 시야확보 등의 이유 때문에 널리 사용된다.

역V형 중심가새골조에 횡하중이 작용하면 같은 층의 압축가새와 인장가새에 동일한 크기의 인장력과 압축력이 발생하게 되어 횡하중에 저항하게 된다. 그러나 작용하는 횡하중이 점차 증가하여 압축가새가 부담하는 하중이 최대로 부담할 수 있는 좌굴하중보다 크게 되면 해당 가새에서는 좌굴이 발생하게 되고 이에 따라 인장가새와 부담하는 하중 차이가 발생하여 가새가 연결된 보 중앙부에서는 불균형 하중이 발생하게 된다. 이 불균형 하중을 보가 부담할 수 없으면 보 중앙부에서는 소성힌지가 발생하게 되어, Fig. 1(a)와 같이 특정 층에서 변형이 집중되는 연약층 현상이 발생되는 문제를 가진다.

Khatib 등(1988)은 이러한 문제를 해결하고자 Fig. 1(b)와 같은 가새가 연결된 보 중앙부 사이에 Zipper strut를 추가로 설치하는 새로운 가새골조를 제안하였다. 이 Zipper strut는 가새의 좌굴로 인해 발생한 불균형 하중을 해당 층의



(a) Inverted V-type concentrically braced frames



(b) Inverted V-type concentrically braced frames with suspended zipper strut

Fig. 1 Comparison of collapse mechanisms of two kinds of braced frames

위층에 전달시키는 역할을 한다. 이는 구조물에 추가적인 강도 및 연성 능력을 부여하여 연약층과 같은 구조물의 취성 파괴를 방지하는 효과를 가진다. 이 새로운 가새 시스템은 아직까지 명확한 설계방법이 주어지지 않은 상황이며, 몇몇 연구자들에 의해 설계 방법론 및 거동특성에 대한 연구가 진행되고 있다(Yang *et al*., 2008a; 2008b).

3. 최적내진설계기법

3.1 목적함수

본 연구에서는 구조물의 경제성 뿐 아니라 구조성능을 고려하기 위해 2개의 목적함수를 사용한다. 첫 번째 목적함수는 구조물의 경제적 설계를 이루고자 식 (1)과 같이 구조물의 초기 구조물량을 최소화하기 위한 것이다. 구조물의 물량을 최소화하면 초기 건설단계에서의 비용은 감소하지만, 구조 성능이 떨어져 완공 이후 유지관리단계에서 보수, 보강 비용이 증가할 수 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 초기 물량뿐 아니라 구조 성능도 최적화 과정에서 고려한다. 최대층간변위율은 구조물의 내진성능을 평가하는데 사용되는 대표적인 지표 중의 하나이다(Liu *et al*., 2005; Moghaddam *et al*., 2005). 본 연구에서는 구조물의 성능을 향상시키기 위해 최대층간변위율이 최소가 되도록 하는 식 (2)와 같은 목적함수를 사용한다.

$$Minimize\ f_1 = \sum_{i=1}^{m} \rho_i A_i l_i \tag{1}$$

$$Minimize\ f_2 = \triangle_{\max} \tag{2}$$

식 (1)과 (2)에서 ρ_i, A_i와 l_i는 i번째 부재의 단위 중량, 단면적과 길이이며, m와 $\triangle_{\max}$는 부재의 총 개수와 비선형 정적해석을 통해 얻게 되는 최대 층간변위율을 의미한다.

3.2 제약조건

본 연구에서는 총 8개의 제약조건을 사용하였다. 첫 번째 제약조건은 시공성을 고려하기 위해 식 (3)과 같이 수직으로 연속된 기둥의 단면적 중 아래 기둥의 단면적이 위 기둥의 단면적보다 크거나 같도록 하는 제약조건을 사용한다. 그리고 일반적으로 고려되는 강도설계기준을 고려하기 위해 식 (4)~(6)과 같은 기둥, 보, 가새의 강도 설계 조건과 식 (7)과 같은 층간변위율 조건을 사용한다. 그리고 성능기반 내진설계를 위해 식 (8)~(10)과 같은 기둥, 보, 가새의 변형 설계 조건을 사용한다.

$$c_1 = \frac{A_{c,j}^{i+1}}{A_{c,j}^{i}} \le 1.0 \tag{3}$$

$$c_2 = \frac{R_c^i}{D_c^i} \le 1.0 \tag{4}$$

$$c_3 = \frac{R_b^i}{D_b^i} \le 1.0 \tag{5}$$

$$c_4 = \frac{R_{br}^i}{D_{br}^i} \le 1.0 \tag{6}$$

$$c_5 = \frac{\triangle}{\triangle_a} \le 1.0 \tag{7}$$

$$c_6 = \frac{\delta_c^i}{\delta_{c,a}^i} \le 1.0 \tag{8}$$

$$c_7 = \frac{\delta_b^i}{\delta_{b,a}^i} \le 1.0 \tag{9}$$

$$c_8 = \frac{\delta_{br}^i}{\delta_{br,a}^i} \le 1.0 \tag{10}$$

식 (3)에서 $A_{c,j}^i$는 j번째 기둥열에서 i번째 층의 단면적이다. 식 (4)에서 R_c^i와 D_c^i는 i번째 기둥 부재의 요구강도와 설계강도이다. 식 (5)에서 R_b^i와 D_b^i는 i번째 보 부재의 요구강도와 설계강도이다. 식 (6)에서 R_{br}^i와 D_{br}^i는 i번째 가새 부재의 요구강도와 설계강도이다. 식 (7)에서 $\triangle$와 $\triangle_a$는 변위증폭계수를 고려한 구조물이 가지는 최대 층간변위율과 허용 층간변위율이다. 식 (8)에서 δ_c^i와 $\delta_{c,a}^i$는 i번째 기둥 부재의 요구변형량과 허용변형량이다. 식 (9)에서 δ_b^i와 $\delta_{b,a}^i$는 i번째 보 부재의 요구변형량과 허용변형량이다. 식 (10)에서 δ_{br}^i와 $\delta_{br,a}^i$는 i번째 가새 부재의 요구변형량과 허용변형량을 의미한다. 식 (4)~(6)에서 부재의 요구강도는 선형정적해석을 통해 얻은 부재력을 이용하여 계산된다. 한편, 식 (7)의 $\triangle$은 선형정적해석을 통해 얻게 되기 때문에, 비선형 정적해석을 통해 얻게 되는 식 (2)의 $\triangle_{\max}$과 구별된다. 식 (8)~(10)에서 사용되는 부재의 요구변형량은 비선형정적해석을 통해 얻게 된다.

3.3 알고리즘

위에서 정식화된 최적화 문제를 풀기위해 본 연구에서는 유전자알고리즘을 사용한다. 유전자알고리즘은 목적함수나 제약함수를 미분없이 선별(selection), 교차(crossover), 돌연변이

(mutation) 등과 같은 유전연산자(genetic operators)에 의해 최적해를 찾는 휴리스틱 기법이다. 이는 탁월한 탐색 능력과 용이한 구현 능력 때문에 다양한 엔지니어링 문제에 적용되어 왔다(Choi *et al*., 2010; Park and Choi, 2016).

제시된 최적내진설계기법의 흐름도는 Fig. 2와 같다. 먼저, 구조물의 해석 및 설계, 유전자 알고리즘에 관한 파라미터들을 입력하고, 개체로 이루어지는 모집단을 초기화한다. 개체는 후보 설계안을 의미한다. 따라서 초기 모집단을 초기화하는 것은 모집단의 크기만큼의 후보 설계안을 생성하는 것을 의미한다.

본 연구에서 설계변수는 부재의 단면성능이며 이는 난수발생기(random number generator)를 이용하여 고려된 설계변수의 범위 내에서 초기화한다. 모집단 내의 각 개체는 배정된 설계변수 값에 따라 구조물을 모델링하고, 선형정적해석과 비선형정적해석을 수행한다. 설계변수의 값과 구조해석결과를 이용하여 목적함수와 제약조건을 평가한다. 모집단 내의 모든 개체에 대한 목적함수와 제약조건 평가가 완료된 후, 각 개체의 목적함수 값과 제약율을 이용하여 개체들을 정렬시킨다. 그리고 나서 종료조건을 검토한다. 만약 종료조건을 만족시키지 않으면, 유전연산자를 이용하여 모집단 내의 개체들을 수정하고, 위의 과정을 종료조건을 만족시킬 때까지 반복한다.

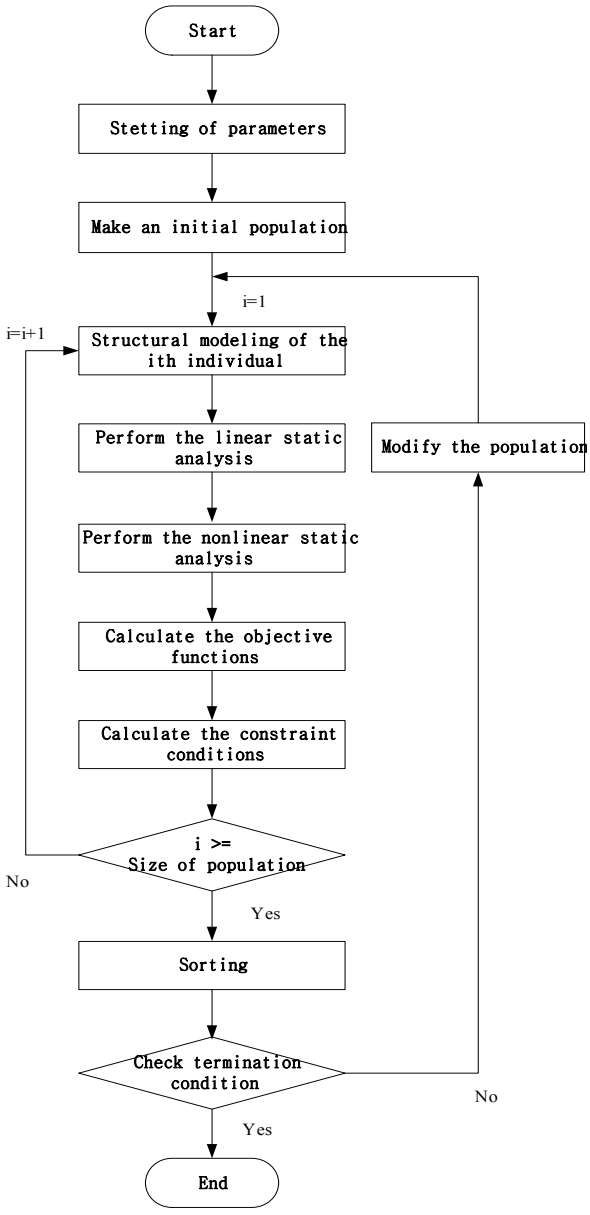
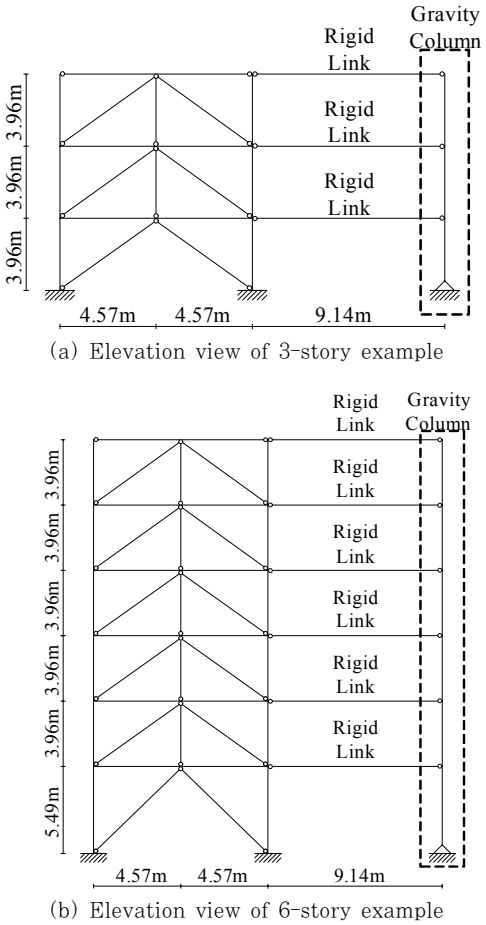


Fig. 2 Flow-chart of proposed algorithm

4. 예제 적용

4.1 예제 개요

본 연구에서 제시한 다목적 최적 내진설계 알고리즘을 검증하기 위해 Fig. 3과 같은 Sabelli(2000)이 사용한 Zipper strut가 있는 3층, 6층 역V형 중심가새골조를 선택하고, Sabelli(2000)의 설계조건과 해석 모델링 조건을 참고하여



(a) Elevation view of 3-story example

(b) Elevation view of 6-story example

Fig. 3 Example structures

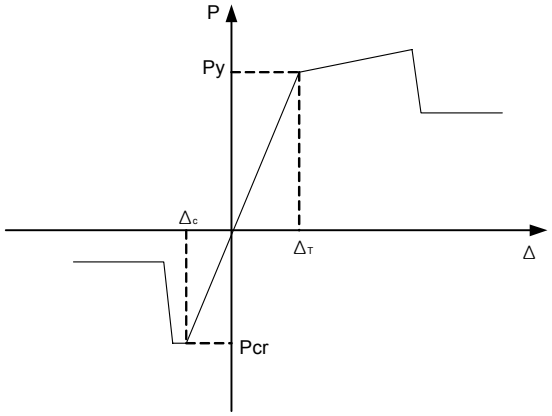


Fig. 4 Brace modeling

연구를 수행하였다. 예제 모델은 SAC Bechmark 3층, 9층 모델을 수정하여 만든 것으로 질량 및 하중 조건 등의 자세한 사항은 Gupta와 Krawinkler(1999)를 참고하였다. 가새 골조의 구조설계에서 기둥과 보의 접합부는 핀접합으로 되어 있다고 가정하지만, 최상층을 제외한 모든 층의 기둥과 보의 접합부에는 가새 연결에 따른 거셋플레이트가 설치되어 접합부의 회전거동을 제약하기 때문에 기둥-보 접합부를 강접합으로 가정하고 해석을 수행하였다. 그리고 P-△효과를 고려하기 위하여 rigid link와 gravity column을 추가하여 해석을 수행하였다. 강도설계 및 성능설계를 위해 OpenSees를 이용하여 선형정적해석과 비선형정적해석을 수행하였다. 기둥과 보는 이선형거동을 하도록 모델링하며, 가새는 FEMA 356을 참고하여 Fig. 4와 같이 거동하도록 모델링하였다. 가새의 인장과 압축거동은 각각 항복강도(Py)와 좌굴강도(Pcr)에 의해 지배된다. 기둥, 보, 가새의 요소모델은 선형정적해석 및 비선형정적해석을 위해 각각 elasticBeamColumn과 nonlinear BeamColumn를 사용하였다.

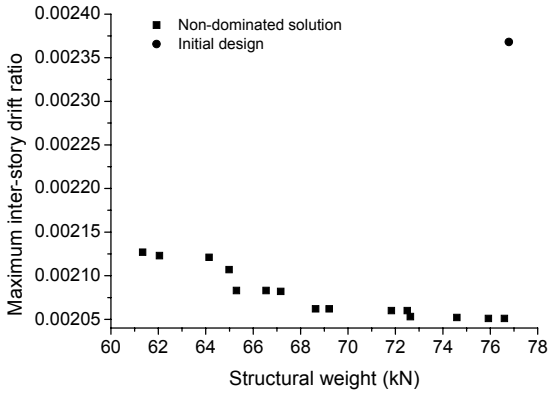
본 연구에서는 강도조건을 검토하기 위해 2475년 재현주기(2%/50년)의 2/3수준의 설계스펙트럼을 사용하며, 변형조건을 검토하기 위해 50%/50년의 지진위험수준을 고려하고 비선형정적해석을 통해 목표변위를 계산한다. 비선형정적해석의 절차는 FEMA 356의 변위계수법(displacement coefficient method, DCM)를 사용하였다. 강도제약조건으로는 ASCE 7-05를 참고하여 하중 조합 1.4D.L., 1.2D.L.+1.6L.L, 0.2D.L.±1.0E.Q.+0.5L.L., 0.9D.L.±1.0E.Q.를 고려하여 각 부재에 대한 강도제약을 평가하였다. 층간변위제약 조건으로는 선형정적해석을 통해 얻은 최대 층간변위에 중요도계수와 변위 증폭계수를 곱한 값이 허용 층간변위를 넘지 않도록 제약조건을 사용하였다. 본 연구에서는 IBC 2003을 이용하여 강도 및 변위제약 조건을 평가하였다. 성능기반 제약조건으로는 FEMA 356의 즉시거주 성능수준을 이용하여 부재별 변형 체크를 하도록 설정하였다.

NSGA-II의 파라미터는 한 모집단의 개체수 40개, 교차율 0.6, 돌연변이율 0.03으로 설정하였고, 종료조건은 최소 세대수가 40이상인 조건 하에서 비지배 해의 변화율이 3% 이하가 되거나 세대수가 100이 되면 종료하도록 하였다.

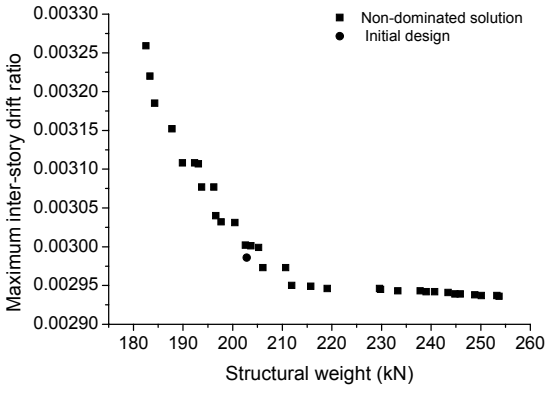
본 연구에서 사용한 설계변수는 부재 단면 성능이며, 기둥, 보, 가새 단면이 선택할 수 있는 단면 개수는 각각 16개로 설정하였다. 또한 부재 종류별로 그룹핑을 실시하여 같은 그룹에 있는 부재들은 같은 단면을 가지도록 하였다. 3층 예제에서는 각 층별로 그룹핑을 설정하였고, 6층 예제에서는 2층 간격으로 그룹핑을 설정하여 2가지 예제 모두 기둥 3가지, 보 3가지, 가새 3가지 등 총 9개의 설계변수를 사용하였다.

4.2 결과 및 분석

3층과 6층 예제 적용 결과, Fig. 5와 같은 최적해를 얻을 수 있었다. 목적함수로 사용된 물량 및 구조성능(최대 층간변위율)은 반비례 관계를 가지는 것을 확인할 수 있다. 팬티엄 4 3.0GHz 및 RAM 1.0GB인 컴퓨터를 이용하여 3층과 6층에 대한 최적해를 얻기 위해 소요된 시간은 각각 12,201초와



(a) 3-story example



(b) 6-story example

Fig. 5 Distributions of optimal solutions

Table 1 Results of multi-objective functions and constraint conditions

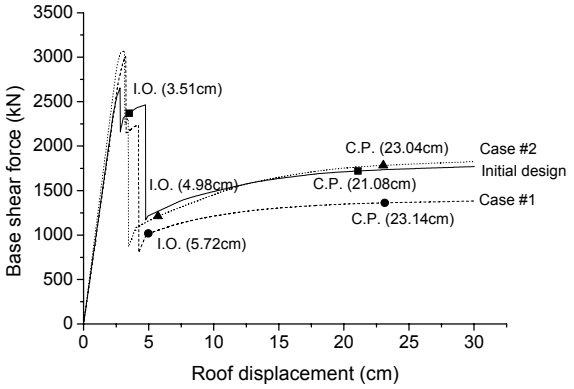
Equation	3-story			6-story		
	Initial design	Case #1	Case #2	Initial design	Case #1	Case #2
(1)	76.79	61.33	76.6	202.84	182.53	253.73
(2)	0.00237	0.0021	0.0021	0.00299	0.00326	0.00294
(3)	1	1	1	1	1	1
(4)	0.4	0.51	0.38	0.52	0.58	0.58
(5)	0.1	0.15	0.15	0.13	0.13	0.14
(6)	0.74	0.64	0.65	0.95	0.88	0.89
(7)	0.37	0.35	0.31	0.57	0.66	0.56
(8)	0	0	0	0	0	0
(9)	0.62	0.94	0.94	0.73	0.86	0.86
(10)	0.92	0.74	0.78	1	0.77	0.95

56,188초이었다. 이 중에서 3층과 6층에 대한 비선형정적해석을 수행하는데 소요된 시간은 각각 11,343초(93%)와 55,051초(98%)으로 나타났다.

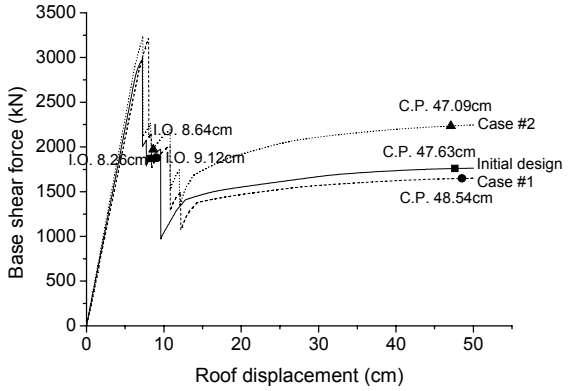
3층 예제의 경우, 본 연구에서 제안한 최적설계모델을 통해 초기 설계안보다 물량 및 구조성능(최대 층간변위율)이 동시에 향상된 다수의 설계안을 얻을 수 있었다. 그러나 6층의 경우, 초기 설계안과 비교하면, 제시된 최적화 기법은 물량 및 최대 층간변위율을 동시에 향상된 설계안을 제시하지 못하였다. 이것은 Table 1에 나타난 것처럼 6층 초기설계안은 6층 최적해의 설계지배조건인 식 (10)의 가새 소성변형제약율이 1.0이기 때문이라고 판단된다. 한편 제시된 최적화 기법은 물량 혹은 층간변위율을 감소시키는 다수의 설계안을 제시하였다.

Fig. 5에 나타난 최적해 중에 가장 가벼운 설계안(Case #1)과 가장 무거운 설계안(Case #2)을 각 예제에 대하여 선정하고 이에 대한 목적함수값과 제약율을 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타난 것처럼 보와 가새의 소성변형조건이 지배적 설계조건으로 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

위에서 언급한 각 설계안에 대한 푸쉬오버 그래프를 Fig. 6에 나타내었으며, FEMA 356에서 제시하고 있는 층간변위율에 근거한 즉시거주수준(I.O.)과 붕괴방지수준(C.P.)을 표시하였다. 이는 각 성능수준에 해당한 층간변위율이 발생하는 시점을 의미하며, 해당 성능을 만족한다는 것을 의미하지는 않는다. 3층과 6층 예제 모두 초기 거동은 비슷하게 나타났으나, 가새의 좌굴로 인한 강도 저하 이후의 거동은 상이하게 나타났다. Fig. 6(a)에 나타난 것처럼 3층 Case #1, 2는 초기 설계안보다 I.O. 및 C.P. 수준이 더 큰 변형에서 발생하는 것으로 나타났다. 한편 6층 초기 설계안과 6층 Case #1, 2 설계안은 Fig. 6(b)에 나타난 것처럼 비슷한 변형상태에서 I.O.와 C.P. 성능수준을 가지는 것으로 나타났다.



(a) 3-story example



(b) 6-story example

Fig. 6 Pushover graphs

5. 결 론

본 연구에서는 Zipper를 가진 역V형 중심가새골조의 다목적 최적 성능기반 내진설계법을 제안하였으며, Sabelli (2000)이 사용한 Zipper가 있는 3층, 6층 중심 가새 골조에 대하여 적용하였다.

초기설계안과 비교하였을 때, 물량 혹은 성능(최대층간변위율)이 향상된 다수의 설계안을 얻을 수 있었다. 최적해의 제약율을 분석한 결과, 3층 예제의 경우 보의 변형 제약조건이 가장 지배적으로 나타났다. 6층 예제의 경우 가새 강도조건, 가새 변형 제약조건 등이 가장 지배적으로 영향을 준 것으로 나타났다. 한편, 강도조건보다는 변형조건에 대한 제약율이 크게 나타났다. 이는 본 연구에서 고려된 범위 내에서 변형제약조건이 강도제약조건보다 지배적 설계요소로 작용한 것을 의미한다.

제시된 최적설계기법은 반복적인 구조해석을 요구하기 때문에 3층과 6층에 대한 최적해를 얻기 위해 소요된 시간은 각각 12,201초와 56,188초이었다. 이 중에서 3층과 6층에 대한 비선형정적해석을 수행하는데 소요된 시간은 각각

11,343초(93%)와 55,051초(98%)으로 나타났다. 이와 같은 이유는 구조물의 강성과 강도가 저하되는 건물에 대한 FEMA 356의 DCM에 의한 목표변위는 초기에 가정하는 총 횡변위량에 따라 변동하게 되기 때문이다. 따라서 수렴하는 초기 횡변형량 설정값을 찾기 위해서는 반복적인 해석이 필요하다. 제시된 기법의 소요시간을 감소시키기 위해서는 병렬 컴퓨팅해석과 같은 기법이 요구되며, 강도 및 강성이 저하되는 구조물에 대한 목표변위를 손쉽게 정할 수 있는 기법 개발이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2014R1A1A2059874).

References

Bruneau, M., Uang, C.M., Whittaker, A. (1997) *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw-Hill, USA.

Burns, S.A. (2002) *Recent Advancements in Opmtimal Structural Design*, ASCE.

Choi, S.W., Yang, H.J., Park, H.S. (2010) Development of Optimal Seismic Design Model for Inverted V-type Special Concentrically Braced Frames, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 23, pp.111~120.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, 6(2), pp.182~197.

FEMA 356 (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC.

Fragiadakis, M., Lagaros, N.D., Papadrakakis, M. (2006a) Performance Based Multiobjective Optimum Design of Steel Structures Considering Life Cycle Cost, *Struct. & Multidiscip. Optim.*, 32, pp.1~11.

Fragiadakis, M., Lagaros, N.D., Papadrakakis, M. (2006b) Performance Based Earthquake Engineering using Structural Optimisation Tools, *Int. J. Reliab. & Saf.*, 1, pp.59~76.

Fragiadakis, M., Papadrakakis, M. (2008) Performance Based Optimum Seismic Design of Reinforced Concrete Structures, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 37, pp.825~844.

Ghobarah, A. (2001) Performance Based Design in Earthquake Engineering: State of Development, *Eng. Struct.*, 23, pp.878~884.

Gupta, A., Krawinkler, H. (1999) *Seismic Demands for Performance Evaluation of Steel Moment Resisting Rrame Structures, The John A. Blume Earthquake Engineering Center*, Report No. 132, Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, California.

Khatib, I.F., Mahin, S.A., Pister, K.S. (1988) *Seismic Behavior of Concentrically Braced Steel Frames*, EERC Report, UCB/EERC-88/01, Berkeley.

Liu, M., Burns, S.A., Wen, Y.K. (2005) Multiobjective Optimization for Performance Based Seismic Design of Steel Moment Frame Structures, *Earthq. Eng. & Struct. Dyn.*, 34, pp.289~306.

Moghaddam, H., Hajirasouliha, I., Doostan, A. (2005) Optimum Seismic Design of Concentrically Braced Steel Frames: Concepts and Design Procedures, *J. Construct. Steel Res.*, 61, pp.151~166.

OpenSees http://opensees.berkeley.edu/index.php

Park, H.S., Choi, S.W. (2016) Genetic Algorithm Based Optimal Seismic Design Method for Inducing the Beam-Hinge Mechanism of Steel Moment Frames, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 29, pp.253~260.

Priestley, M.J.N. (2000) *Performance Based Seismic Design*, 12WCEE, San Diego.

Sabelli, R. (2000) *Research on Improving the Design and Analysis of Earthquake Resistant Steel Braced Frames*, FEMA/EERI.

Uriz, P. (2005) *Towards Earthquake Resistant Design of Concentrically Braced Steel Frames*, Ph.D. Dissertation, Civil and Environmental Engineering, University of California, Berkeley.

Yang, C.S, Leon, R.T., DesRoches, R. (2008a) Design and Behavior of Zipper Braced Frames, *Eng. Struct.*, 30, pp.1092~1100.

Yang, C.S, Leon, R.T., DesRoches, R. (2008b) Pushover Response of a Braced Frame with Suspended Zipper Struts, *J. Struct. Eng.*, 134(10), pp.1619~1626.

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.

요 지

본 논문에서는 Nondominated sorting genetic algorithm-II(NSGA-II)를 이용한 Zipper를 가진 역V형 중심가새골조의 다목적 최적내진설계기법을 제시한다. 부재의 단면성능을 설계변수로 사용하는 제시된 최적화기법은 내진설계를 위해 부재의 강도조건, 구조물의 층간변위조건, 부재의 변형조건 등을 만족시키면서 구조물의 물량과 구조물의 최대 층간변위율을 동시에 최소화하는 문제로 정식화된다. 구조물의 물량과 최대 층간변위율을 최소화하는 이유는 구조물의 비용과 성능을 각각 최적화하기 위해서 이다. 선형 정적해석을 통해 구조물의 강도 및 층간변위 제약 조건을 검토하며, 비선형 정적해석을 통해 구조물의 변형 조건 및 내진성능을 평가한다. 제안된 기법을 검증하기 위해 3층과 6층 Zipper를 가진 역V형 중심가새골조 예제를 사용한다. 이를 통해 얻은 설계안을 초기 설계안과 비교분석하여 제안된 기법의 적용성을 확인한다.

핵심용어 : 구조최적화, 내진설계, Zipper를 가진 역V형 중심가새골조, NSGA-II