

다목적 최적화 기법을 이용한 편심가새골조의 역량설계

홍윤수¹·유은종^{2†}

¹한양대학교 건축공학부 박사과정, ²한양대학교 건축공학부 교수

Capacity Design of Eccentrically Braced Frame Using Multiobjective Optimization Technique

Yun-Su Hong¹ and Eunjong Yu^{2†}

¹Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 04763, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 04763, Korea

Abstract

The structural design of the steel eccentrically braced frame (EBF) was developed and analyzed in this study through multiobjective optimization (MOO). For the optimal design, NSGA-II which is one of the genetic algorithms was utilized. The amount of structure and interfloor displacement were selected as the objective functions of the MOO. The constraints include strength ratio and rotation angle of the link, which are required by structural standards and have forms of the penalty function such that the values of the objective functions increase drastically when a condition is violated. The regulations in the code provision for the EBF system are based on the concept of capacity design, that is, only the link members are allowed to yield, whereas the remaining members are intended to withstand the member forces within their elastic ranges. However, although the pareto front obtained from MOO satisfies the regulations in the code provision, the actual nonlinear behavior shows that the plastic deformation is concentrated in the link member of a certain story, resulting in the formation of a soft story, which violates the capacity design concept in the design code. To address this problem, another constraint based on the Eurocode was added to ensure that the maximum values of the shear overstrength factors of all links did not exceed 1.25 times the minimum values. When this constraint was added, it was observed that the resulting pareto front complied with both the design regulations and capacity design concept. Ratios of the link length to beam span ranged from 10% to 14%, which was within the category of shear links. The overall design is dominated by the constraint on the link's overstrength factor ratio. Design characteristics required by the design code, such as interstory drift and member strength ratios, were conservatively compared to the allowable values.

Keywords : multiobjective optimization, eccentrically braced frame, genetic algorithm, capacity design

1. 서론

편심가새골조(EBF)는 크게 링크, 가새, 기둥, 링크외부보로 구성되며, 가새 배치에 따라 K형, V형, D형, Y형 등 여러 형태를 가질 수 있다. 편심가새골조 시스템에서는 링크가 항복이 허용되는 유일한 부재이며, 나머지는 링크 항복 시 발생하는 부재력을 탄성상태에서 저항하도록 요구된다. 편심가새골조는 모멘트골조(MRF)와 중심가새골조(CBF)의 특성을 고루 갖춘 지진력 저항시스템이다. 가새에 의해 모멘트저항골조보다 높은 강성과 강도를 확보할 수 있고, 링크의 소성거동으로 인해

중심가새골조보다 높은 연성과 에너지소산능력을 가지고 있다. 다양한 관점에서 편심가새골조의 내진성능을 검증하거나 성능이 뛰어난 응용 시스템 개발에 관한 연구는 지금도 활발히 수행되고 있다(Azad and Topkaya, 2017).

편심가새골조 시스템의 설계를 위해 최적화 기법을 적용한 사례는 흔치 않으나, 관련 연구성과를 요약하면 다음과 같다. Mohammadi와 Sharghi(2014)은 Uniform deformation theory를 개발하여 시스템이 균일한 변형상태에 도달하기 위해 부재 강도를 단계적으로 변화시킴으로써 최소 물량으로도 구조적 손상이 적은 설계안을 도출하였다. Gong 등(2013)은 편심가새골

[†]Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-4311; E-mail: eunjongyu@hanyang.ac.kr

Received October 5 2020; Revised October 12 2020;

Accepted October 13 2020

© 2020 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.

조의 다목적 최적화 설계를 위해 유전 알고리즘을 활용하였으며 구조물량 및 지진입력 에너지를 최소화하는 동시에 역량설계의 원리에 따라 링크의 소산에너지 비율을 높이고자 하였다. 그 후 비선형 정적해석을 수행하여 최적해의 연성도를 평가하였다. Ohsaki와 Nakajima(2010)은 메타휴리스틱 알고리즘의 일종인 Tabu search를 활용하여 결정변수인 링크길이와 웨브스티프너의 위치 및 두께를 최적화하였다. 이때 Abaqus 해석프로그램을 사용하여 링크 파괴 시점을 기준으로 정적주기하중에 의한 소산에너지를 극대화하고자 하였다. Kaveh 등(2013)은 구조물의 공사비용, 구조적 및 비구조적 손상을 최소화하고자 다목적 최적화를 수행하였다. 그 과정에서 비선형 시간이력 해석의 결과를 빠르고 정밀하게 추정하기 위해 인공신경망 이론을 도입하였다.

편심가새골조 시스템은 링크부재의 상대적인 길이에 따라 구조물의 강성 및 고유주기 뿐만 아니라 지진저항 매커니즘이 달라지므로 다양한 형태의 설계안이 있을 수 있다. 본 연구에서는 철골편심가새골조 시스템을 대상으로 다목적 최적화 기법을 통해 설계를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 최적화 알고리즘으로는 빠른 비지배해 정렬과 파레토 보존 전략을 특징으로 하는 NSGA-II를 활용하였다. 제약조건으로는 구조기준에서 요구하는 내력비, 링크의 회전각 등을 포함하였으며, 각 항목을 위반할수록 목적함수의 값을 크게 증가시키는 벌금함수의 형태를 가지고 있다. 편심가새골조의 설계규정은 링크부재만 항복이 허용되며 나머지 부재는 링크 항복 시 발생하는 부재력을 탄성상태에서 견디도록 의도한 역량설계법에 기초한다. 그러나 비선형 해석결과 최적화를 통해 도출된 결과 중 일부는 구조기준의 설계조항을 만족하지만 특정층 링크에 소성변형이 집중되어 연약층을 형성함으로써 기준에서 의도하는 역량설계의 원칙을 위배하는 결과도 발생하였다. 이를 해결하기 위해 모든 링크의 전단 초과강도계수 중 최대값이 최소값의 1.25배를 넘지 않도록 하는 제약조건을 추가하였다. 새로운 제약조건을 추가함에 따라 결과물인 파레토 프론트의 해들은 설계기준과 역량설계의 원칙 모두를 준수하는 것으로 나타났다. 본 연구는 비선형 정적해석 또는 동적해석에 기반한 기존 연구(Gong et al., 2013; Kaveh et al., 2013; Mohammadi and Sharghi, 2014)와 달리 선형 정적해석을 기반으로 최적화 설계를 수행한다. 구조물의 안정적인 비탄성거동은 링크 초과강도 계수에 관한 제약을 통해 달성할 수 있다.

2. 편심가새골조의 설계절차

편심가새골조 설계절차의 핵심은 역량설계법(Capacity design)에 기초하여 링크가 전단에 대한 초과강도를 발휘할 때 다른

부재들은 탄성거동 하도록 하는 것이다. 역량설계법에 의한 부재력은 소성상태의 링크를 기준으로 정적평형식으로 구하거나 탄성해석 결과를 증폭시켜 얻을 수 있다(Becker and Ishler, 1996; Bruneau et al., 2011). 이에 따라 부재마다 적절한 단면이 결정되었다면, 구조물의 층간변위비와 링크 회전각이 허용되는 수준인지 확인해야 한다.

힘의 정적평형 원리에 의해 링크에 전단과 휨이 함께 작용할 경우 전단항복과 휨항복이 동시에 발생하기 위한 링크의 길이는 $2M_p/V_p$ 가 된다. 그러나 Popov 등(1992)의 연구에 의하면 링크는 그 길이가 $1.6M_p/V_p$ 보다 작으면 전단항복하며, $2.6M_p/V_p$ 보다 크면 휨항복하는 것으로 알려져 있다. 만약 길이가 두 값 사이일 때는 전단과 휨 조합에 의한 항복이 발생한다(Fig. 1). 전단항복하는 링크, 즉 전단링크는 여러 연구결과로부터 편심가새골조의 강성, 강도, 연성측면에서 성능이 우수한 것으로 나타나 다른 링크에 비해 선호된다(Azad and Topkaya, 2017).

링크의 소요 회전각은 편심가새골조 시스템을 소성 전단변형하는 강체로 가정하였을 때 설계층간변위가 발생한 상태에서 링크와 링크외부부가 이루는 소성 각변화를 의미하며 링크가 수평배치된 경우 식 (1)과 같이 구할 수 있다(Fig. 2).

$$\gamma_p = \frac{L}{e} \frac{\delta_p}{h} = \frac{L}{e} \theta_p \tag{1}$$

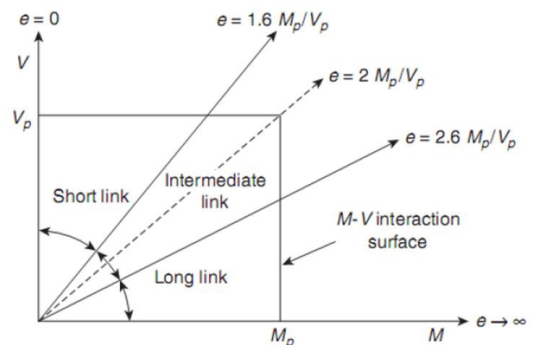


Fig. 1 Link classification (Bruneau et al., 2011)

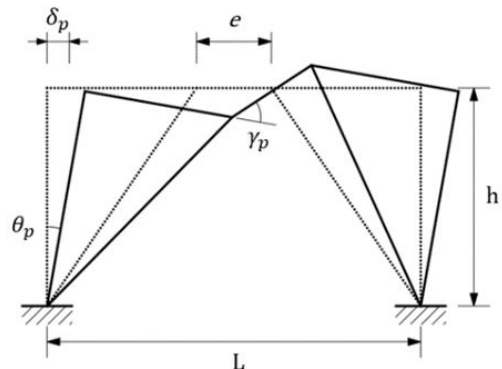


Fig. 2 Plastic rotation of the link

여기서, γ_p 는 링크의 소성회전각, δ_p 는 소성층간변위, θ_p 는 소성층간변위비, L 은 보경간, e 는 링크길이, h 는 층고이다.

한편 링크의 단부에는 웨브스티프너가 요구되는데 이는 링크의 전단력을 인근의 연결부재에 전달함과 동시에 링크 웨브의 국부좌굴을 방지하는 역할을 한다. 또한, 링크가 과도한 항복 및 불안정성으로 조기 파괴되는 것을 방지하고자 중간스티프너가 추가 배치될 수 있다. 설계기준(AISC, 2010)에서는 링크의 판폭두께비, 전단강도, 길이, 소성회전각, 스티프너 설계 등의 사항을 규정하고 있다.

링크를 제외한 기둥, 가새, 링크외부보의 설계부재력은 역량설계법의 원리에 따라 링크가 전단 초과강도를 발휘할 때를 기준으로 산정된다. 여기서, 초과강도는 링크가 항복 이후 변형경화 상태인 경우로, 기대강도에 변형경화계수 1.25(I형 단면)를 곱한 값으로 산정한다(식 (2)). 설계 규정에 따르면 링크 외부보와 기둥 설계를 위한 링크의 변형경화계수를 1.1로 저감시키는 것이 가능하다. 그러나 본 연구에서는 모든 링크의 동시 항복 가능성을 고려하므로 기둥에 대해 식 (2)의 계수를 그대로 적용하였다.

$$\Omega_s = \frac{1.25R_y V_{n,link}}{V_{Elink}} \tag{2}$$

여기서, Ω_s 는 링크의 전단 초과강도계수, R_y 는 재료 초과강도 계수, $V_{n,link}$ 는 링크의 공칭 전단강도, V_{Elink} 는 지진하중에 의해 링크에 발생하는 전단력이다.

역량설계법으로 구한 지진하중은 고정하중, 활하중에 의한 부재력과 계수조합되어 소요 부재력으로 산출된다. 이 후 해당 설계강도와 비교하여 링크를 제외한 부재들이 탄성상태임을 확인해야 한다.

3. 다목적 최적화

3.1 목적함수

대부분의 공학설계에서는 주어진 제약을 만족하면서 제품 또는 시스템 성능의 개선과 함께 비용의 절감을 추구한다. 다목적 최적화에서는 이처럼 이율배반적인 2개 이상의 성능을 동시에 극대화한다. 다양한 다목적 최적화기법이 제안되어 있으나, 본 연구에서는 자연계 생물의 진화과정을 모방한 유전 알고리즘인 NSGA-II(Deb *et al.*, 2002)를 활용하였다.

본 연구에서 다목적 최적화를 위한 목적함수로는 구조물량과 층간변위를 선택하였다. 이들은 구조공학 분야에서 대표적으로 고려되는 속성으로 이율배반성이 높다. 구조물량의 최소화는 건설과정과 관련한 경제성에 영향을 미치는 직접적인 인

자이며, 시공성 및 환경성과도 관련이 있다. 반면, 층간변위는 구조물의 횡강성 뿐만 아니라 비구조재 및 링크의 손상정도에 대한 지표가 될 수 있다. 부재들이 경량화되거나 링크가 길수록 층간변위는 증가하나 구조물량은 감소하는 경향을 보인다. 구조설계 시 최적안은 최소의 구조물량으로 설계기준에서 요구하는 규정을 만족하는 것이다. 이를 위해 단일 목적함수를 사용하는 최적화를 시도할 수 있다. 이 경우 단 하나의 최적해가 산출되지만, 이는 특정 성능에 극단적으로 치우쳐 실효성이 떨어질 가능성이 있다. 만약 이율배반적 관계의 두 목적함수를 활용하면 최소 물량부터 최저 층간변위에 이르는 다양한 해가 실행가능한 범위에서 산출되므로 후보들 중 최종 설계안을 선택할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서 다목적 최적화를 위한 첫 번째 목적함수는 구조부재 전체의 구조물량으로 식 (3)과 같이 기둥, 보, 가새 등 주요부재와 링크스티프너의 무게 총합으로 정의하였다.

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^N \rho A_i L_i + \sum_{j=1}^{N_{stf}} \rho V_{stf,j} \tag{3}$$

여기서, N 는 부재 개수, ρ 는 재료 밀도, A_i 는 부재 단면적, L_i 는 부재 길이, N_{stf} 는 링크스티프너의 개수, $V_{stf,j}$ 는 개별 스티프너의 부피이다.

두 번째 목적함수는 층간변위에 관한 함수로, 각 층 설계층간변위비 벡터의 2차 노름(L2 norm)으로 정의하였다.

$$\min f_2 = \sqrt{\sum_{k=1}^{N_s} \left(\frac{\delta_{d,k}}{h} \right)^2} \tag{4}$$

여기서, $\delta_{d,k}$ 는 k 층 설계층간변위, N_s 는 구조물 층수이다.

3.2 제약조건

NSGA-II 알고리즘은 비제약(unconstrained) 최적화함수이므로, 제약조건을 반영하기 위해 비가능해에 벌금을 부과하는 방법을 채택하였다. 본 연구에서 벌금함수는 목적함수에 직접 곱해지며, 식 (5)와 같이 위반하는 항목의 수가 많을수록 큰 값이 나오는 형태로 정의하였다. 매우 적은 벌금을 받은 비가능해가 비지배해 집단에 포함되는 것을 막기 위해 벌금값은 정수로 올림하였다. 만약 주어진 제약조건들을 하나도 위반하지 않을 경우 벌금함수는 1이 된다.

$$F_p = \left[\prod_{m=1}^{N_p} \max \left[\frac{P_m}{P_{c,m}}, 1.0 \right] \right] \tag{5}$$

여기서, N_p 는 문제에서 고려한 제약조건 수, P_m 는 m 번째 항목의 평가값, $P_{c,m}$ 은 m 번째 제약조건 허용치이다. 「 1」는 괄호 안의 값보다 작지 않은 최소 정수를 구하는 연산자이다. 편심가새골조 설계 시 기준에서 요구하고 있는 제한사항 즉, 제약들은 아래와 같이 정리된다.

링크의 강도, 길이, 소성회전각: 구조기준에서는 링크 설계 시 축력비에 따른 링크의 최대 길이, 링크길이에 따른 한계 회전각을 Table 1과 같이 규정하고 있다(AISC, 2010).

내력비: 모든 부재는 극한하중에서 안전하게 거동하기 위해 강도조건을 만족해야 한다. 기준의 규정에 따라 링크는 전단력에 대해, 링크를 제외한 주요부재들은 축력 및 모멘트의 조합에 대해 내력비를 산정하고 그 값이 1.0을 초과하지 않도록 제한하였다(ANSI, 2016).

시공성: 수직으로 연속되는 기둥부재의 경우 하부기둥의 단면 규격은 상부기둥보다 커야 한다.

세장비 및 판폭두께비: 부재의 좌굴 및 국부좌굴 방지를 위해 기준에 제시된 세장비 및 판폭두께비 규정을 만족해야 한다(AISC, 2010; ANSI, 2016).

Table 1 Design constraints of links

Items	Details
Strength	-Nominal shear strength $V_n = \min\left(V_p, \frac{2M_p}{e}\right)$
	-In case of $V_n = V_p$,
	when $\frac{P_u}{P_y} \leq 0.15$, $V_p = 0.6F_yA_w$
	when $\frac{P_u}{P_y} > 0.15$, $V_p = 0.6F_yA_w \sqrt{1 - \left(\frac{P_u}{P_y}\right)^2}$
	-In case of $V_n = \frac{2M_p}{e}$,
when $\frac{P_u}{P_y} \leq 0.15$, $M_p = F_yZ$	
when $\frac{P_u}{P_y} > 0.15$, $M_p = F_yZ \left(\frac{1 - P_u/P_y}{0.85}\right)$	
herein, $P_y = F_yA_g$	
Length	-If $\frac{P_u}{P_y} > 0.15$, there are no limits
	-If $\frac{P_u}{P_y} > 0.15$, the limits are as follows
	when $\rho' \leq 0.5$, link length $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$
	when $\rho' > 0.5$, link length $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p} (1.15 - 0.3\rho')$
	herein, $\rho' = \frac{P_u/P_y}{V_u/V_y}$, $P_y = F_yA_g$, $V_y = 0.6F_yA_w$
Plastic rotation	-If $e \leq 1.6 \frac{M_p}{V_p}$, limit rotation $\gamma_{lim} = 0.08 rad$
	-If $e \geq 2.6 \frac{M_p}{V_p}$, limit rotation $\gamma_{lim} = 0.02 rad$
	-Otherwise, linear interpolation

층간변위비: 중요도별로 규정된 허용 층간변위비를 초과할 수 없다(ASCE, 2016).

4. 예제 건물

4.1 예제 건물의 개요 및 다목적 최적화

예제 건물은 Fig. 3과 같이 5층 3경간의 평면구조물로 좌우 경간에 편심가새가 배치되어 있다. 경간은 6m이며 층고는 3.5m이다. 예제 건물은 서울 소재의 업무시설로 가정하였으며, 이에 따라 유효설계지반가속도 0.176g, 중요도 계수 1.0이 적용되었다.

3절의 다목적 최적화 설계절차는 Matlab과 Opensees를 연동시켜 구현하였으며, 이를 예제 건물에 적용하였다. Matlab은 NSGA-II에 기반한 최적화알고리즘에 의해 결정변수(즉, 구조부재의 단면과 링크의 길이)를 생성하고 등가정적지진하중을 발생시킨다. Opensees는 지진하중이 포함된 하중조합에 대해 P-Δ 효과가 고려된 선형해석을 수행하고 해석결과는 Matlab에서 목적함수 및 제약조건을 평가하여 새로운 설계안을 도출하기 위해 사용된다. 이러한 과정은 최적화의 종료조건(최대 세대수)을 만족할 때까지 반복된다.

4.2 비선형 해석

위의 절차에 의해 도출된 파레토 프론트에 대해 비선형해석을 수행하여 비선형응답을 평가하였다. 편심가새골조 시스템이 역량설계법에 따라 설계되었다면 링크를 제외한 다른 부재들은 탄성상태일 것이므로, 링크요소에만 비선형 거동을 가정하는 경계비선형해석의 형태로 비선형해석을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 중앙부는 탄성거동하고 단부에 소성힌지를 가

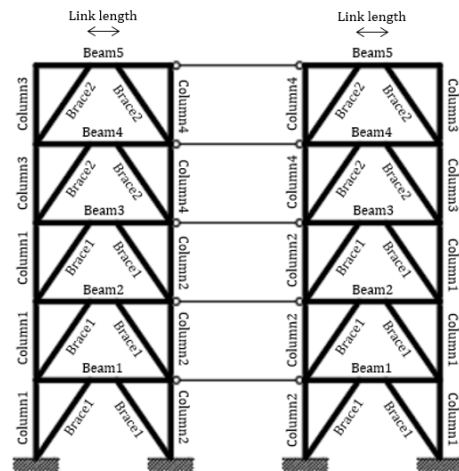


Fig. 3 Example building

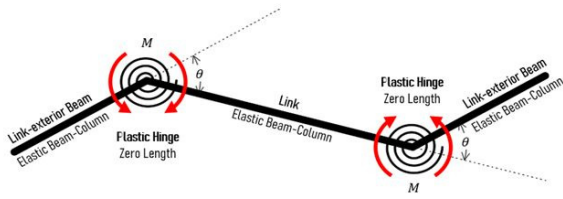


Fig. 4 Link modeling for nonlinear analysis

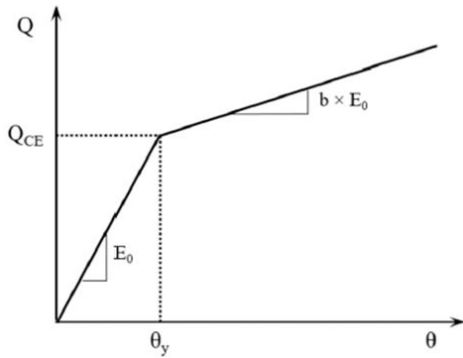


Fig. 5 Plastic hinge model of links(Fathali and Vaez, 2020)

지고 있는 Fathali와 Vaez(2020)의 링크요소를 사용하여 모델링하였다(Fig. 4). 링크의 기대강도는 링크 길이에 따라 전단력과 모멘트 중 지배되는 강도로 산정된다. 여기서 단부의 소성 한지는 Fig. 5와 같은 이선형 모델로 정의되며, 탄성강성은 전

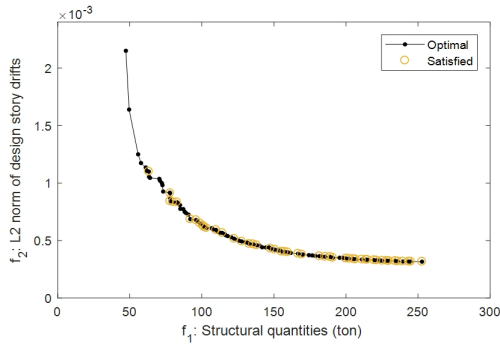
단 및 휨강성의 직렬조합으로, 항복후강성은 탄성강성의 3%로 하였다. 비선형 해석결과에서 링크의 소성 회전각은 소요 회전각에서 항복 회전각을 빼 값으로 산정할 수 있다. 이를 Table 1의 한계 회전각과 비교하여 해당 링크요소의 파괴여부를 판단하였다.

5. 최적화 결과 분석

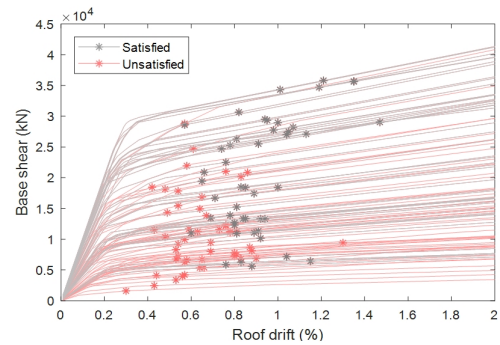
5.1 최적해 산출 및 비탄성 응답 분석

다목적 최적화를 통해 총 98개의 최적해가 구해졌으며, 이들에 비선형 해석을 수행하고 그 결과로부터 비탄성 거동을 분석하였다. 구조물이 안정적으로 비탄성 거동하기 위해서는 한계상태, 즉, 구조물의 임의층에서 층간변위가 허용층간변위에 도달할 때 혹은 임의의 링크 회전각이 한계 회전각에 도달하는 시점에서 모든 링크요소는 항복상태이어야 하며, 링크를 제외한 나머지 부재들은 탄성상태이어야 한다.

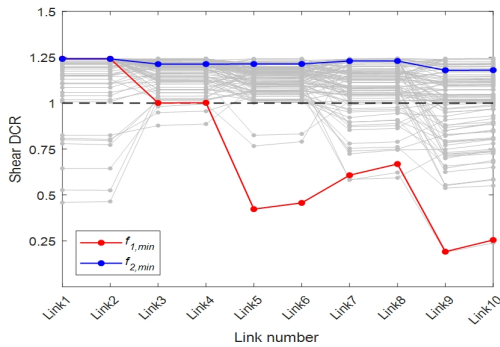
Fig. 6은 최적해 및 각 최적해의 비선형 응답을 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 최적해들을 2차원의 목적함수 공간상에 나타낸 것이다. 여기서, 노란색 원은 앞서 언급한 안정적인 비탄성 거동을 위한 조건, 즉 모든 링크요소는 항복상태이어야 하며, 링크를 제외한 나머지 부재들은 탄성상태인 조건을 만족한 경우이다. Fig. 6(b)는 각 최적해가 반영된 구조물의 Pushover 곡선



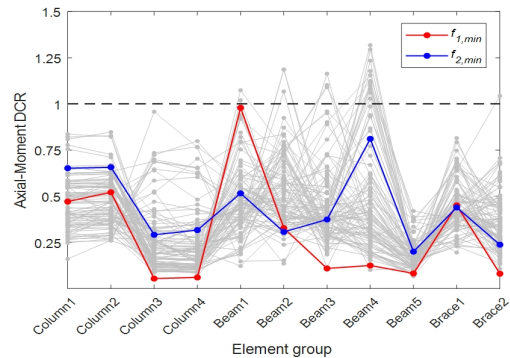
(a) Pareto front



(b) Pushover curve



(c) Shear DCR of links



(d) Axial-moment DCR of the element groups

Fig. 6 Pareto front without constraint about link overstrength factor

으로 검은 실선은 안정적인 비탄성 거동을 위한 조건이 모두 충족된 경우이며 붉은 실선은 그렇지 못한 경우이다. 그래프 상의 별 표시는 링크 회전각이 한계상태에 도달한 시점을 나타낸다. 여기서, 일부 해는 푸시오버곡선의 기울기가 완전히 감소하기도 전에 극한점이 형성된 것으로부터 구조물의 안정적인 비탄성 거동을 위한 링크의 동시 항복조건이 성립되지 못함을 알 수 있다.

Fig. 6(c)와 (d)는 각각 링크의 최소 내력비와 그 외부재그룹의 최대 내력비를 나타낸 그래프이다. 그래프에서 빨간색 선과 파란색 선은 각각 최소 구조물량 해와 최소 층간변위 해를 표시한 것이다. Fig. 6(c)에서는 내력비가 1 이하인 해가 존재하여 모든 링크의 항복 전에 일부 링크가 한계상태에 도달한 경우를 보여주고, Fig. 6(d)에서는 일부 부재의 내력비가 1을 초과하여 탄성범위를 벗어나므로 역량설계법의 가정을 위배한 사실을 알 수 있다.

5.2 링크 초과강도계수 제한

기존 연구(Whittaker *et al.*, 1987)에 따르면 편심가새골조가 설계기준의 규정을 만족하는 경우에도 소성변형이 일부 링크에 집중되어 연약층을 형성할 수 있는 것으로 보고되고 있다. Popov 등(1992)은 이러한 현상의 원인이 링크 강도의 부적절한 분배에 있다고 분석하였다. 즉, 층별로 소성변형을 고르게 분포시키기 위해 모든 링크는 균일한 내력비(CDR)를 가져야 한다고 주장하였다. 이때 링크의 설계 전단력 대비 극한강도의 비율로 정의되는 초과강도계수는 편심가새골조에서 내진 응답의 효율성을 나타내는 지표로 활용될 수 있다. AISC나 KBC에서는 요구되지 않으나 Eurocode 8에서는 링크의 초과강도계수비를 1.25 이하로 제한하도록 하고 있다(Bosco and Rossi, 2009). 본 연구에서는 이를 근거로 링크의 동시 항복을 위해 모든 링크의 최소값에 대한 초과강도계수 비율이 1.25를

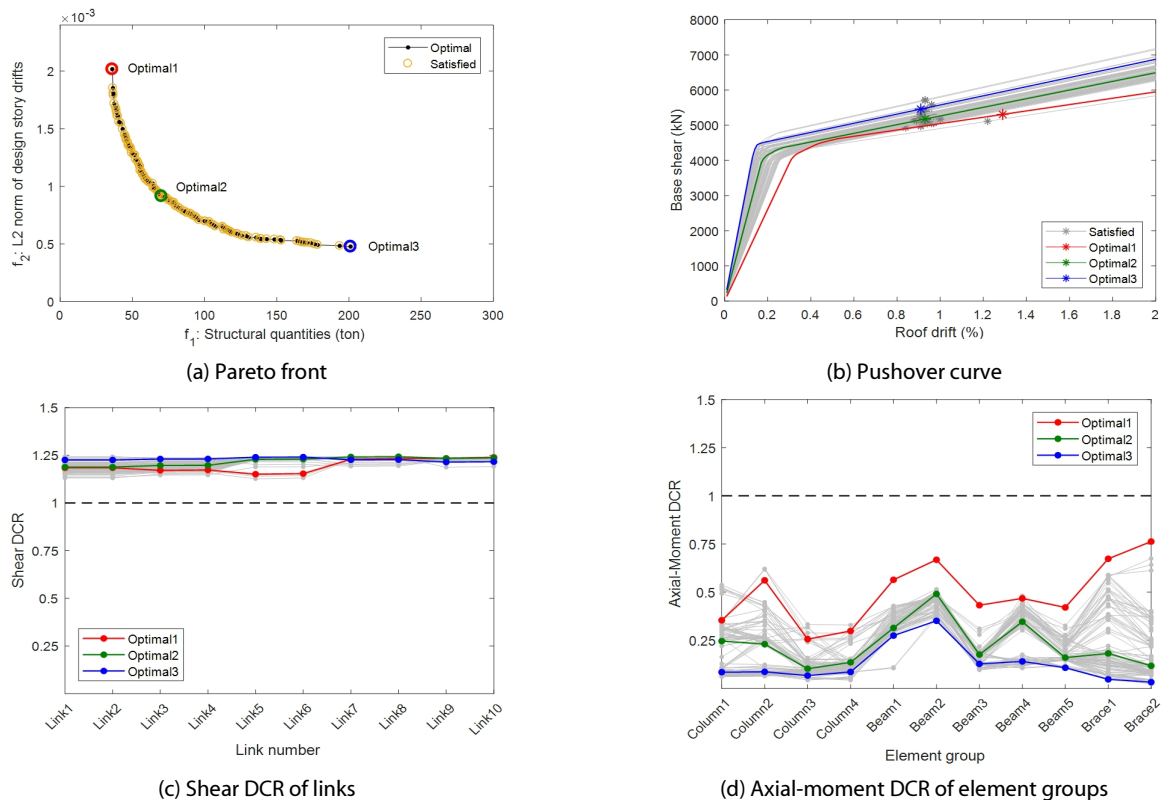


Fig. 7 Pareto front with constraint about link overstrength factor

Table 2 Mechanical properties of the optimal solutions

Solution	Quantities of structural members(ton)	Maximum story drift(%)	Ratio of Link length to Beam	Ultimate strength (kN)	Initial stiffness (kN/mm)	Displacement Ductility (δ_u/δ_y)	Dissipated energy (kJ)
Optimal1	36.08	0.11(4th)	0.14	5307.60	74.61	3.78	924.95
Optimal2	70.06	0.05(4th)	0.10	5175.87	132.08	5.04	664.14
Optimal3	201.14	0.02(5th)	0.10	5459.05	181.23	6.48	696.92

초과하지 않도록 식 (6)과 같은 제약조건을 추가하였다.

$$\frac{\Omega_{s,i}}{\Omega_{s,\min}} \leq 1.25 \quad (6)$$

여기서, $\Omega_{s,i}$ 는 i 번째 링크의 전단 초과강도계수, $\Omega_{s,\min}$ 는 모든 링크의 전단 초과강도계수 중 최소값을 의미한다.

링크 초과강도계수에 대한 제약식을 추가한 경우, 최적해 및 비선형 해석의 결과는 Fig. 7(a), (b)와 같다. 빨간색 선과 파란색 선은 각각 최소 물량해(Optimal1), 최소 층간변위해(Optimal3)를 나타내며, 초록색 선은 두 목적함수 중 어느 쪽에도 치우치지 않는 해이다. 총 100개의 최적해가 확보되었으며, 이들은 모두 링크의 회전각으로 지배되는 한계상태에서 항복조건뿐만 아니라 탄성조건도 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 균일한 초과강도계수로 인해 모든 링크가 연달아 항복함으로써 링크로부터 제한된 크기의 하중이 인근 부재들로 재분배되었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7(c), (d)는 링크 및 다른 부재들의 내력비를 비교한 그래프이다. 링크는 한계상태에서 기대강도의 1.10~1.25배에 달하는 초과강도를 발휘하고 있으나, 다른 탄성 부재들은 소요강도에 비해 상당히 보수적으로 설계되었다.

모든 최적해의 링크는 그 경간비가 10~14% 정도로 짧아 전단링크의 범주에 해당하였다. Optimal1은 기둥 및 가새부재에 작은 단면이 사용되고 상대적으로 링크 길이가 증가하여 구조물의 층간변위비가 크게 나타났다. Table 2는 최적해의 성능 및 비선형 응답을 나타낸다. 극한강도, 변위연성도, 에너지소산량은 Pushover 해석결과에서 한계상태를 기준으로 산정된 값이다.

전체적으로 설계안은 링크의 초과강도계수비가 가장 지배적인 제약이며, 구조기준의 층간변위와 내력비 등 항목에서 허용치에 비해 매우 보수적으로 설계되었다. Optimal1의 경우, 다른 최적해와 비교할 때 매우 낮은 구조물량을 보유함에도 극한강도는 유사하였으며 한계상태가 가장 큰 변위에서 발생하였다. 이 해는 특히 초기강성이 낮지만 극한점의 높은 변위로 인해 구조물의 붕괴시점까지 소산에너지도 가장 큰 것으로 나타났다.

6. 결론

편심가새골조 시스템은 유일한 항복부재인 링크 설계에 따라 구조적 특성이 변화한다. 링크 길이에 의해 구조물의 강성 및 고유주기 뿐만 아니라 지진저항 매커니즘이 달라지므로 다양한 형태의 설계안이 있을 수 있다. 본 연구에서는 다목적 최적화 기법을 사용하여 편심가새골조의 최적화 설계를 시도하였다. 다양한 설계안을 효과적으로 도출하기 위해 구조물량과 층간변위라는 두 개의 이율배반적인 목적함수를 적용하고, 층

간변위비와 판폭두께비 등 설계기준의 요구사항들은 벌금함수의 형태로 고려하는 다목적 최적화 기법을 정식화하였다.

5층의 예제건물을 대상으로 다목적 최적설계를 수행한 후 비선형 해석을 통해 개별 설계안의 구조거동을 분석하였다. 검토 결과, 기준의 요구사항을 만족함에도 불구하고 지진하중에 대해 링크의 강도배분이 적절치 않은 경우 일부 링크에 소성변형이 집중되어 연약층 형성과 같은 구조물의 국부 파괴로 이어짐을 알 수 있었다. 이를 해결하기 위해 링크의 초과강도계수(Overstrength factor) 제약을 반영하여 일련의 설계절차를 보완하였다. 최적설계가 적용된 예제건물을 대상으로 링크 초과강도계수의 제약 유무에 따른 내진응답을 비교하고, 대표적인 해들의 성능을 평가하였다. 새로운 제약조건을 추가함에 따라 결과물인 파레토 프론트의 해들은 설계기준과 역량설계의 원칙 모두를 준수하는 것으로 나타났다. 모든 설계안에서 보 경간에 대한 링크의 길이비는 전단링크의 범주에 해당하는 10~14%였다. 전체적으로 설계안들은 링크의 초과강도 계수비가 가장 지배적인 제약으로 작용하였으며, 구조기준의 요구사항 중 층간변위와 내력비 등의 항목에서 허용치에 비해 매우 보수적으로 설계되었다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 극한재난대응 기반기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2020-MOIS31-013).

References

- AISC, A. (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*.
 ANSI, B. (2016) AISC 360-16, *Specification for Structural Steel Buildings*, Chicago AISC.
 ASCE (2016) *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE Standard ASCE/SEI 7-16 Reston, VA.
 Azad, S.K., Topkaya, C. (2017) A Review of Research on Steel Eccentrically Braced Frames, *J. Constr. Steel Res.*, 128, pp.53~73.
 Becker, R., Ishler, M. (1996) *Seismic Design Practice for Eccentrically Braced Frames*, Structural Steel Educational Council, p.27.
 Bosco, M., Rossi, P.P. (2009) Seismic Behaviour of Eccentrically Braced Frames, *Eng. Struct.*, 31(3), pp.664~674.
 Bruneau, M., Uang, C.M., Sabelli, S.R. (2011) *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw Hill Professional.
 Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T.A.M.T. (2002) A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, 6(2), pp.182~197.

- Fathali, M.A., Vaez, S.R.H.** (2020) Optimum Performance-based Design of Eccentrically Braced Frames, *Eng. Struct.*, 202, p.109857.
- Gong, Y., Xue, Y., Xu, L.** (2013) Optimal Capacity Design of Eccentrically Braced Steel Frameworks using Nonlinear Response History Analysis, *Eng. Struct.*, 48, pp.28~36.
- Kaveh, A., Shojaei, I., Gholipour, Y., Rahami, H.** (2013) Seismic Design of Steel Frames using Multi-Objective Optimization, *Struct. Eng. & Mech.*, 45(2), pp.211~232.
- Mohammadi, R.K., Sharghi, A.H.** (2014) On the Optimum Performance-based Design of Eccentrically Braced Frames, *Steel & Compos. Struct.*, 16(4), pp.357~374.
- Ohsaki, M., Nakajima, T.** (2010) Optimization of Energy Dissipation Property of Eccentrically Braced Steel Frames, *In 9th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization*, Shizuoka, Japan.
- Popov, E.P., Ricles, J.M., Kasai, K.** (1992) Methodology for Optimum EBF Link Design, *In Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, pp.3983~3988.
- Whittaker, A.S., Uang, C.M., Bertero, V.V.** (1987) *Earthquake Simulation Tests and Associated Studies of a 0.3-Scale Model of a Six-Story Eccentrically Braced Steel Structure*, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.

요 지

본 연구에서는 철골편심가새골조 시스템을 대상으로 다목적최적화기법을 통해 설계를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 최적화 설계를 위해 유전 알고리즘의 일종인 NSGA-II를 활용하였다. 여기서, 목적함수는 이율배반적 관계를 갖는 구조물량과 층간변위로 하여 최소화되고, 제약조건에는 구조기준에서 요구하는 내력비, 링크의 회전각 등을 포함하였다. 제약조건은 최적화 알고리즘 내에서 각 항목을 위반할수록 목적함수 값을 크게 증가시키는 벌금함수의 형태를 가지고 있다. 설계기준에서 EBF 시스템의 설계규정은 링크 부재만 항복이 허용되며 나머지 부재는 링크 항복 시 발생하는 부재력을 탄성상태에서 견디도록 의도한 역량설계법에 기초한다. 그러나 최적화를 통해 도출된 결과 중 일부는 구조기준의 설계조항은 만족하지만 특정층 링크에 소성변형이 집중되어 연약층을 형성함으로써 기준에서 의도하는 역량설계의 원칙을 위배하는 결과가 나타났다. 이를 해결하기 위해 모든 링크의 전단 초과강도계수 중 최대값이 최소값의 1.25배를 넘지 않도록 하는 제약식을 추가하였다. 새로운 제약식을 추가한 경우 모든 최적해는 설계기준과 역량설계의 원칙을 준수하는 것으로 나타났다. 모든 설계안에서 보 경간에 대한 링크의 길이비는 전단링크의 범주에 해당하는 10% ~ 14%였다. 전체적으로 설계안들은 링크의 초과강도 계수비가 가장 지배적인 제약으로 작용하였으며, 구조기준의 요구사항 중 층간변위와 내력비 등의 항목에서 허용치에 비해 매우 보수적으로 설계되었다.

핵심용어 : 다목적 최적화, 편심가새골조, 유전 알고리즘, 역량설계법