

역V형 특수중심가새골조의 최적내진설계 모델 개발

Development of Optimal Seismic Design Model for Inverted V-type Special Concentrically Braced Frames

최 세 운* 양 회 진** 박 효 선†
Choi, Se-Woon Yang, Hee-Jin Park, Hyo-Seon

요 지

여러 연구자들에 의해 최적화 알고리즘을 이용한 최적내진설계에 관한 연구가 컴퓨터의 발달과 더불어 활발히 이루어져 왔다. 하지만 지금까지의 최적내진설계에 관한 연구는 대부분 모멘트저항골조를 대상구조물로 한 연구였다. 가새골조는 모멘트저항골조와 더불어 대표적인 횡력저항시스템이기 때문에 가새골조의 최적내진설계기법 개발을 통해 경제적이며 효율적인 설계가이드라인을 제시할 수 있다면 실무에 미치는 파급효과는 클 것이라 판단된다. 본 논문에서는 가새의 좌굴을 고려한 역V형 특수중심가새골조의 최적내진설계 알고리즘을 제안하고자 한다. 제안된 알고리즘은 구조물의 물량과 에너지 소산량을 목적함수로 설정하고, 강도조건 및 층간변위 조건등의 제약조건으로 설정한다. 알고리즘의 검증을 위해 2D 3층, 9층 역V형 특수중심가새골조 예제를 적용한다.

핵심용어 : 가새골조, 최적 내진설계, 좌굴, 역V형 특수중심가새골조, 연성

Abstract

Many researchers have studied on the optimal seismic design with the development of the computer. So far the application structure of most researches on the optimal seismic design was almost the moment resisting frame. Because the braced frames are the representative lateral load resisting system with the moment resisting frames, it is estimated that the effect on the practice will be great if it can be provided a design guideline through the development of optimal seismic design model for the braced frames. The purpose of this study is to propose the optimal seismic design model for the inverted V-type special concentrically braced frames considering the buckling of braces. The objective functions of this are to minimize the structural weight and maximize the total dissipated energy of the structure and the constraints of this are the strength conditions for the column, beam, brace and inter-story drifts condition. To verify the proposed model, it is applied to 2D steel concentrically braced frames of 3-story and 9-story.

Keywords : braced frames, optimal seismic design, buckling, inverted V-type special concentrically braced frames, ductility

1. 서 론

중저층 건물의 구조설계는 고층건물과 달리 일반적으로 지진 하중에 의해서 지배된다. 건축구조 설계기준 및 해설(KBC 2005)에서 내진설계는 구조물의 비탄성거동을 허용하여 감소된 설계지진하중을 사용할 수 있도록 하고 있다. 지진발생시 구조물이 탄성 상태를 유지하도록 설계하기 위해선 큰 설계지

진하중을 고려할 수 밖에 없다. 이렇게 되면 부재 단면크기가 증가하여 비경제적이며, 비효율적인 설계가 되기 때문에 KBC2005의 내진설계는 구조물의 연성거동을 통해 입력되는 지진에너지를 소산시킬 수 있도록 하고 있다. 또한 구조물의 연성능력을 통해 설계지진보다 큰 지진이 발생하더라도 갑작스런 붕괴를 방지할 수 있도록 하고 있다. 이와 같이 구조물의 연성능력 확보는 내진설계에 있어 중요한 기술이다.

† 책임저자, 종신회원 · 연세대학교 건축학과 교수
Tel: 02-2123-2794 ; Fax: 02-365-4668
E-mail: hspark@yonsei.ac.kr

* 정회원 · 연세대학교 건축공학과 박사과정

** 호남대학교 건축학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

일반적인 내진설계에서 구조물의 연성능력은 반응수정계수를 통해 반영되며, 이 반응수정계수는 선택된 횡력저항시스템 종류에 따라 일정한 값을 배정하게 된다. 실무에서 내진설계는 일반적으로 내진기준에서 제시하는 이 반응수정값을 그대로 반영하여 구조설계가 이루어진다. 하지만 구조물의 연성능력은 같은 횡력저항시스템이며 강도조건을 만족한다할지라도 부재 단면설계에 따라 각기 다른 연성능력을 가져 원하는 수준의 연성능력을 확보하지 못할 수도 있다. 또한 실무에서의 내진설계는 엔지니어의 경험과 직관에 의존하기 때문에 엔지니어의 능력에 따라 구조물의 성능이 좌우되는 경향을 가진다. 즉 엔지니어의 경험과 직관에 의존하는 기존의 내진설계방법으로는 경제성과 합리성을 보장할 수 없다.

이러한 이유로 지금까지 최적화 알고리즘을 이용한 최적내진설계에 관한 연구가 컴퓨터의 발달과 더불어 활발히 이루어져 왔다. 하지만 지금까지의 최적내진설계에 관한 연구는 Ganzerli 등(2000), Liu 등(2005), Xu 등(2006) 등 여러 연구자에 의해 이루어져 왔지만 대부분 모멘트저항골조를 대상구조물로 한 연구이거나 가새골조를 대상구조물로 하더라도 가새의 좌굴로 인한 구조물의 비선형 거동을 고려하지 않은 연구(Moghaddam 등, 2005)였다. 가새골조는 모멘트저항골조와 더불어 대표적인 횡력저항시스템이기 때문에 가새골조를 대상구조물로 하는 최적내진설계기법을 개발하고 이를 통해 보다 더 경제적이면서 효율적인 설계 가이드라인을 제시할 수 있다면 구조실무에 미치는 경제적, 기술적 파급효과는 클 것이라 판단된다. 또한 가새의 좌굴은 지진발생시 가새구조물의 거동을 결정짓는 중요한 요소이기 때문에 가새골조의 최적내진설계의 경우 가새의 좌굴을 고려할 필요가 있다.

본 논문에서는 가새의 좌굴을 고려한 역V형 특수중심가새골조의 최적내진설계 모델을 제안하고자 한다. 제안된 모델은 구조물의 물량과 에너지 소산량을 목적함수로 설정하고, 강도조건 및 층간변위 조건을 제약조건으로 설정함으로써 경제적이면서 뛰어난 연성능력을 가지는 설계안을 유도할 수 있도록 한다. 알고리즘의 검증을 위해 2D 3층, 9층 역V형 특수중심가새골조 예제를 적용한다. 예제 적용을 통해 얻게 되는 가능해(Feasible Solution)의 제약율 등의 분석을 통해 가능해가 가지는 특징을 파악한다.

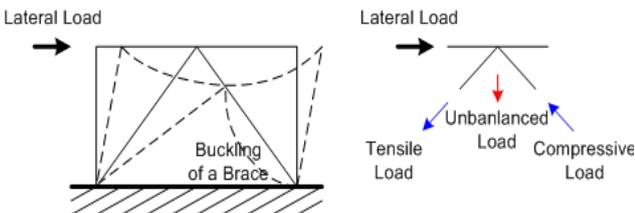


그림 1 역V형 중심가새골조의 횡거동 특성

2. 가새골조

가새골조는 지진하중, 풍하중 등과 같은 횡하중에 대하여 가새와 기둥의 축강성을 통하여 저항하는 횡력저항시스템이다. 이 시스템은 모멘트저항골조에 비하여 물량 절감효과를 얻으면서 횡변위를 제어하는데 효과적이기 때문에 강진지역에서 널리 쓰인다(Bruneau 등, 1997). 그러나 가새골조는 모멘트저항골조보다 연성능력이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이것은 가새의 좌굴로 인하여 에너지소산 능력이 떨어지기 때문이다. 이렇게 가새골조는 연성능력이 떨어지기 때문에 ASCE 7-05(Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures)에서는 내진설계분류에 따라 가새골조의 높이 제한을 두고 있다. 한편으로 가새의 좌굴로 인한 단점을 극복하고자 강관 내를 콘크리트 등으로 충전하여 좌굴이 방지되는 가새 BRB(Buckling Restrained Brace)를 사용하기도 한다.

Seismic Provisions for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 341-05)에서 가새골조는 중심가새골조(Centrally Braced Frames), 편심가새골조(Eccentrically Braced Frames) 등으로 분류할 수 있으며, 본 논문에서 사용한 역V형 가새골조는 X형, K형 가새골조와 더불어 대표적인 중심가새골조 형태 중 하나이다. 중심가새골조는 보, 집합부 설계에 따라 특수중심가새골조(Special Centrally Braced Frames), 보통중심가새골조(Ordinary Centrally Braced Frames) 등으로 분류하며, 반응수정계수값으로 각각 6, 3.25를 사용한다.

역V형 중심가새골조는 그림 1과 같이 횡하중의 작용을 통해 압축가새에서 좌굴이 발생하게 되면 인장가새와 압축가새에 작용하는 축력의 불균형으로 인하여 가새가 연결된 보에 불균형 하중이 발생하고, 이로 인하여 보 중앙부분에서 소성힌지가 발생할 수가 있다. 보에서 소성힌지가 발생하면 횡저항 능력이 매우 떨어지게 되기 때문에 특정 층에서 변형이 집중될 수 있는 단점을 가진다. 이런 이유때문에 AISC 341-05의 역V형 특수중심가새골조의 내진설계는 이러한 불균형하중을 추가로 고려하여 보 중앙 부분이 소성힌지가 발생하지 않게 설계하고, 이를 통해 연성능력을 확보하도록 제안하고 있다.

3. 구조 최적화를 위한 정식화

최적화는 주어진 제한조건을 만족시키면서 목적함수를 최소화 또는 최대화시키도록 설계변수의 값을 조절함으로써 설계하고자 하는 시스템의 성능을 향상시키는 기술이다. 일반

적인 경우에는 한 개의 목적함수를 가지지만, 실제 현실적인 문제에서는 상충되는 두 개 이상의 목적함수를 동시에 고려할 필요가 있으며 이를 다목적 최적화라 한다. 최적내진설계 분야에서 다목적 알고리즘을 이용한 연구는 Liu 등(2005), Alimoradi 등(2004), Fragiadakis 등(2006) 등과 같이 활발히 연구되고 있다.

다목적 최적화 방법에는 일부 목적함수를 제약식으로 변환하는 방법, 각 목적함수값에 가중치를 부여하는 방법, 파레토(Pareto)에 기반한 방법 등이 있다. 이 중 일부 목적을 제약식으로 변환하는 방법은 제약율의 한계 범위를 결정하는데 어려움이 있으며, 가중치를 이용하는 방법은 각 가중치마다 한 개의 해만 얻을 수 밖에 없기 때문에 여러 개의 가중치를 적용하기 위해선 여러 번의 반복실행이 필요하다. 이러한 이유로 파레토에 기반한 방법이 널리 사용된다. 본 연구에서는 파레토에 기반한 Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II(NSGA-II)을 이용한다(Deb 등, 2002).

3.1 목적함수

본 논문에서는 두 가지의 목적함수를 사용한다. 첫 번째 목적함수는 경제성을 고려하기 위해서 모멘트골조의 구조물량을 최소화하는 것이며, 두 번째 목적함수는 비선형정적해석을 통해 얻게 되는 Push-over곡선을 통해 계산되는 구조물의 소산에너지량이 최대가 되도록 하는 것이다. 구조물의 소산에너지량은 구조물의 연성능력을 나타내는 평가요소이다. 이것을 첫 번째 목적함수와 함께 사용하는 이유는 구조물량을 효과적으로 사용하면서 동시에 내진설계에서 중요하게 여기는 연성능력을 향상시키도록 하기 위해서이다. 만약, 단순히 구조물량을 최소화하는 한 개의 목적함수만 사용할 경우에는 구조물량은 줄어들지만 이에 따른 구조물의 성능은 보장할 수가 없기 때문이다(Khatib 등, 1988). 첫 번째 목적함수는 식 (1)과 같이 정의하며, 두 번째 목적함수는 식 (2)와 같이 정의한다.

$$\text{Minimize } f_1 = \sum_{i=1}^m \rho_i A_i l_i \quad (1)$$

$$\text{Maximize } f_2 = \text{Area}_{\text{pushover}} \quad (2)$$

여기서, ρ_i 는 i 번째 부재의 단위 중량, A_i 는 i 번째 부재의 단면적, l_i 는 i 번째 부재의 길이, m 은 모멘트골조를 이루는 부재의 총 개수, $\text{Area}_{\text{pushover}}$ 는 비선형해석을 통해 얻게 되는 최상층 횡변위-밀면전단력 그래프를 통해 계산되는 면적, 즉 구조물의 에너지 소산량을 의미한다.

3.2 제약조건

본 연구에서는 총 6가지의 제약조건을 사용한다. KBC 2005, ANSI/AISC 341-05 등 일반적인 내진설계에서 기본적으로 사용되는 조건을 고려하기 위해 기둥, 보, 가새의 강도제약, 층간변위 제약을 고려한다. 여기서 층간변위 제약은 일반 내진설계에서 적용하는 탄성해석을 통해 얻은 층간변위값을 이용하여 평가한다. 다섯 번째 제약조건은 구조물량의 한계값을 설정하여 구조물량을 제한하는 것이다. 3.1절에서 목적함수로 구조물량을 최소화하고 소산에너지량을 최대화하는 것으로 설정하였다. 일반적으로 구조물량이 증가하면 소산에너지량 역시 증가하는 경향을 가진다. 따라서 최적화 알고리즘에서 구조물량에 대한 제한을 두지 않으면 소산에너지량 뿐만 아니라 구조물량 역시 증가하여 비경제적인 설계안을 얻을 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 이유로 구조물량을 제한하는 제약조건을 사용한다. 여섯 번째 제약조건은 기둥의 시공성을 고려하기 위하여 수직으로 연속된 기둥의 단면적 제약을 사용한다. 즉, 수직으로 연속된 기둥에서 아래 기둥의 단면적은 위 기둥의 단면적보다 크거나 같아야 한다는 제약이다. 만약 횡하중에 대하여 가새와 기둥의 축강성으로 저항하는 가새골조에서 기둥 연속성 제약조건을 사용하지 않는다면 가새 좌굴 등의 이유로 위에 위치한 기둥의 단면이 아래에 위치한 기둥보다 커지는 경우가 발생할 수도 있다. 그래서 본 연구에서는 기둥의 연속성 제약조건을 여섯 번째 제약조건으로 사용한다. 지금까지 설명한 여섯 가지 제약조건은 식 (3)~(8)와 같이 정의할 수 있다.

$$c_1 = \frac{\sigma_c^j}{\sigma_{c,a}^j} \leq 1.0 \quad j=1 \text{ to } N_c \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{\sigma_b^j}{\sigma_{b,a}^j} \leq 1.0 \quad j=1 \text{ to } N_b \quad (4)$$

$$c_3 = \frac{\sigma_{br}^j}{\sigma_{br,a}^j} \leq 1.0 \quad j=1 \text{ to } N_{br} \quad (5)$$

$$c_4 = \frac{\Delta}{\Delta_a} \leq 1.0 \quad (6)$$

$$c_5 = \frac{W}{W_a} \leq 1.0 \quad (7)$$

$$c_6 = \frac{A_c^{i+1}}{A_c^i} \leq 1.0 \quad i=1 \text{ to } N_{\text{story}} - 1 \quad (8)$$

여기서, σ_c^j 는 j 번째 기둥 부재의 요구응력, $\sigma_{c,a}^j$ 는 j 번째 기둥 부재의 허용응력, N_c 는 기둥의 개수, σ_b^j 는 j 번째 보 부재의 요구응력, $\sigma_{b,a}^j$ 는 j 번째 보 부재의 허용응력, N_b 는 보의

개수, σ_{br}^j 는 j 번째 가새 부재의 요구응력, $\sigma_{br,a}^j$ 는 j 번째 가새 부재의 허용응력, N_{br} 는 가새의 개수, Δ 는 변위증폭계수를 고려한 구조물이 가지는 최대 층간변위율, Δ_a 는 허용층간변위율, W 는 설계안의 구조물량, W_a 는 허용 구조물량, A_c^{i+1} 와 A_c^i 는 각각 수직적으로 연속된 $(i+1)$ 층, i 층 기둥 부재의 단면적, N_{story} 는 전체 층수를 의미한다.

4. 예제적용

본 연구에서 김진구 등(2004), Kim 등(2005)이 사용한 3층, 9층 역V형 특수가새골조 예제를 사용하였다. 이 예제의 평면은 그림 2와 같이 가운데 경간에 가새가 설치된 3경

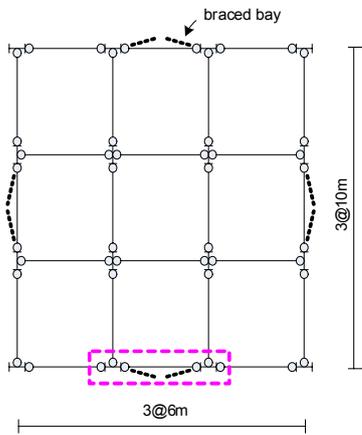
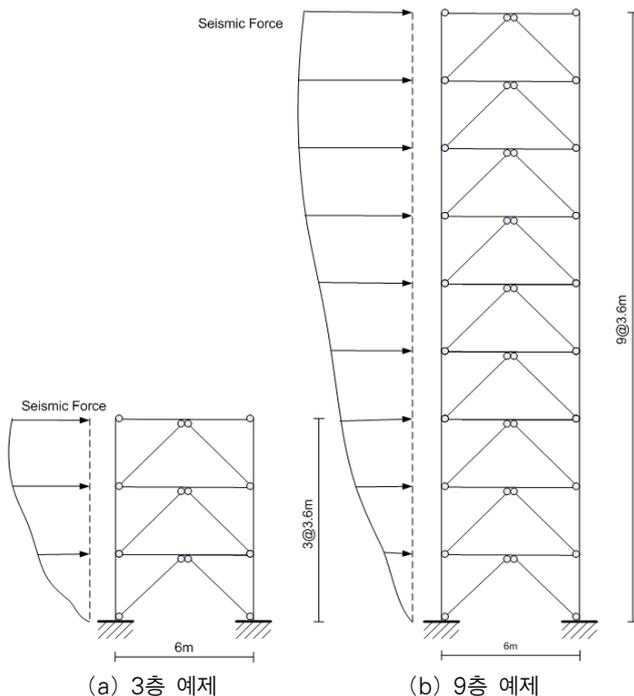


그림 2 본 연구에서 사용한 예제 평면



(a) 3층 예제 (b) 9층 예제
그림 3 본 연구에서 사용한 예제 입면

간의 평면을 가지고 있다. 그림에 나타난 것처럼 보와 기둥의 접합을 핀접합으로 하여 모든 횡하중을 가새가 부담하도록 되어 있다. 이러한 이유로 본 연구에서는 그림 2에서 빨간 사각형 점선으로 표시가 가새 경간에 대해서만 그림 3과 같이 모델링하여 최적화 알고리즘에 반영하였다.

본 연구에서는 ASCE 7-05, ANSI/AISC 360-05, ANSI/AISC 341-05 등을 이용하여 하중조합, 층간변위조건, 강도설계조건 등을 결정하고, 여기서 고려한 하중조합은 총 3가지로 식 (9)~(11)과 같다.

$$1.4D \tag{9}$$

$$1.2D+1.6L \tag{10}$$

$$1.2D\pm 1.0E+1.0L \tag{11}$$

여기서, D 는 고정하중, L 은 적재하중, E 는 지진하중을 의미한다. 본 연구에서 사용한 고정하중과 적재하중은 각각 4.90kN/m^2 , 2.45kN/m^2 으로 사용하였으며, 지진하중은 ASCE 7-05에서 제안하고 있는 등가횡하중(Equivalent Lateral Force) 산정과정을 이용하여 산정하였다.

구조해석은 지진해석 프로그램 OpenSees(2006)를 이용한다. 정적비탄성해석에서 사용한 횡하중분포는 정적탄성해석에서 사용한 지진하중의 층별 비율을 적용하여 최상층 노드를 기준으로 변위제어를 한다. 이 때 목표변위는 FEMA 356에서 제시하고 붕괴방지수준(Collapse Prevention Level)인 최대층간변위율 2.0%를 참고하여 구조물 높이의 2.0%를 목표변위로 설정한다. 가새골조의 구조해석에서 가새의 거동은 전체 구조물의 거동을 결정짓는 주요 요소이기 때문에 가새의 모델링을 어떻게 하느냐는 중요하다. 가새 모델에는 Marshall 모형과 같은 현상학적인 모형(Phenomenological model)과 Ikeda 등(1984)이 제안한 개선된 물리적 가새 모형(Refined

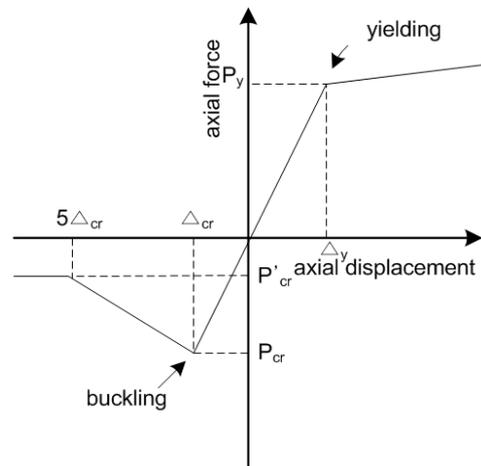


그림 4 가새의 힘-변위 모델

표 1 기둥, 보, 가새 DB(3층예제)

기둥	보	가새
W10x100	W30x477	W10x100
W10x88	W30x391	W10x88
W10x77	W30x326	W10x77
W10x68	W30x292	W10x68
W8x67	W30x261	W8x67
W8x58	W30x235	W8x58
W8x48	W30x211	W8x48
W8x40	W30x191	W8x40
W8x35	W30x173	W8x35
W8x31	W30x148	W8x31
W8x28	W30x132	W8x28
W8x24	W30x124	W8x24
W8x21	W30x116	W8x21
W8x18	W30x108	W8x18
W8x15	W30x99	W8x15
W8x13	W30x90	W8x13

Physical Brace Model) 등이 있다. 본 연구에서는 예제를 참조한 Kim 등(2005)의 연구에서 사용된 그림 4와 같은 가새 모델을 사용하였다. 비선형해석시 내부 기둥의 P-Δ 효과를 고려하기 위해 가상 기둥(dummy column)을 추가 모델링 하였다.

4.1 3층 예제

3층 예제에서 사용한 설계변수는 기둥 3개, 보 3개, 가새 3개 등으로 설정하여 총별로 각기 다른 단면을 가질 수 있도록 하였다. 기둥, 보, 가새의 DB는 표 1과 같이 각각 16개 씩 설정하여 각 설계변수가 DB 내 임의의 단면을 가질 수 있도록 하였다.

두 번째 목적함수를 평가하는데 필요한 구조물의 소산에너지량은 FEMA 356에서 제시하는 붕괴방지수준(Collapse

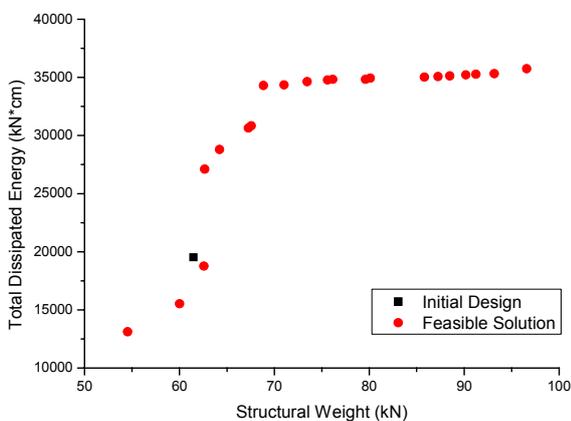


그림 5 초기설계안과 가능해의 목적함수 분포(3층예제)

Prevention Level)인 최대층간변위율이 2.0%이 발생할 때까지 비선형정적해석을 수행하고, 이를 통해 얻은 푸쉬오버(Pushover)곡선의 밑면적을 계산한다.

3장에서 설명한 기법을 3층 예제에 적용한 결과 표 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 40개의 크기를 가지는 모집단에서 총 21개의 가능해를 얻었다. 가능해의 목적함수를 비교하기 위해 각 가능해의 두 목적함수의 분포를 그림 5에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 물량(f_1)이 증가할수록 소산에너지량(f_2)은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 70kN 이상의 물량을 가지는 가능해의 경우 물량 증가에 따른 소산에너지량의 증가 효과가 작은 것으로 나타났다. 한편 물량 62kN 전후의 가능해를 비교하였을 경우 소산에너지량의 차이는 상당히 큰 것으로 나타났다. 즉 물량을 작게할 경우 에너지 소산능력이 갑작스럽게 떨어지는 경향이 나타났다. 따라서 이러한 3층 예제 결과를 근거로 판단할때 62kN-70kN 내의 물량을 가진 가능해가 효과적인 내진성능을 가지고 있다고 판단된다. 표 2에서 가능해 제약조건 값을 보면 보의 강도제약(c_2)이 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 즉, 3층 중심가새골조 예제에 대하여 최적내진설계기법을 적용할 경우 보의 강도제약이 가장 지배적 설계조건으로 작용하는 것으로 나타났다. 이것은 중심가새골조의 내진설계의 경우 가새의 좌굴로 인한 불균형 하중을 보가 추가로 부담해야 하

표 2 목적함수와 제약조건의 결과값(3층예제)

설계안	목적함수		제약조건						
	f_1	f_2	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	
초기설계안	61.46	19523	0.38	0.96	0.55	0.11	0.50	1.00	
가능해	#1	54.55	13110	0.69	0.93	0.95	0.16	0.44	0.87
	#2	60.01	15527	0.69	0.93	0.94	0.15	0.49	0.84
	#3	62.58	18767	0.54	0.76	0.90	0.12	0.51	0.73
	#4	62.66	27097	0.66	1.00	0.62	0.15	0.51	0.84
	#5	64.23	28785	0.67	1.00	0.51	0.14	0.52	0.74
	#6	67.28	30632	0.32	0.89	0.61	0.11	0.55	0.75
	#7	67.56	30831	0.37	0.89	0.62	0.11	0.55	0.71
	#8	68.85	34306	0.36	1.00	0.51	0.11	0.56	0.61
	#9	71.03	34358	0.36	1.00	0.51	0.11	0.58	0.61
	#10	73.46	34631	0.36	1.00	0.51	0.11	0.60	0.63
	#11	75.62	34779	0.36	0.89	0.51	0.10	0.62	0.78
	#12	76.15	34824	0.36	1.00	0.51	0.10	0.62	0.78
	#13	79.61	34827	0.35	0.79	0.51	0.09	0.62	0.54
	#14	80.11	34928	0.44	0.79	0.50	0.10	0.65	1.00
	#15	85.81	35028	0.31	0.99	0.50	0.10	0.70	0.74
	#16	87.25	35070	0.36	0.74	0.51	0.11	0.71	0.61
	#17	88.49	35134	0.36	0.88	0.51	0.10	0.72	0.78
	#18	90.18	35209	0.34	0.88	0.51	0.09	0.73	0.54
	#19	91.25	35274	0.36	0.88	0.51	0.11	0.74	0.74
	#20	93.17	35316	0.37	1.00	0.51	0.10	0.76	1.00
	#21	96.60	35748	0.11	0.88	0.50	0.08	0.79	0.68

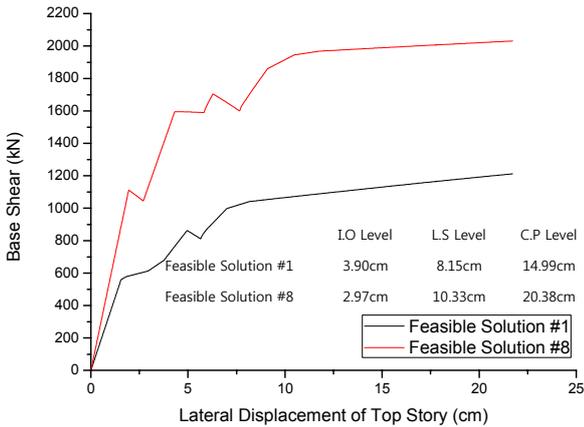


그림 6 두 가능해의 푸쉬오버곡선 비교(3층예제)

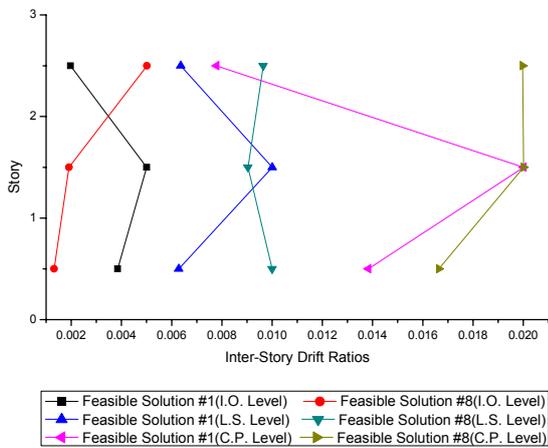


그림 7 두 가능해의 층간변위를 분포 비교(3층예제)

기 때문이라고 판단된다.

21개의 가능해 중에서 두 개의 설계안을 선택하여 내진성능을 비교하였다. 설계안의 선택 기준은 소산에너지 밀도 (Dissipated Energy Density, 이하 D.E.D)가 가장 큰 것과 가장 작은 것을 선택하였다. 여기서 소산에너지 밀도는 식 (12)과 같이 소산에너지량(f_1)에 구조물의 무게로 나눈 값으로 정의하였다.

$$D.E.D = \frac{\text{Total Dissipated Energy of the Structure}}{\text{Weight of the Structure}} \quad (12)$$

계산 결과, 소산에너지 밀도가 가장 큰 것은 가능해 #8, 가장 작은 것은 가능해 #1으로 나타났다. 그림 6에 두 설계안의 푸쉬오버곡선을 비교하였다. 가능해 #8의 초기강성과 항복강도는 가능해 #1의 그것보다 모두 큰 것으로 나타났다.

또한 최대층간변위를 분석하여 FEMA 356에서 제시하고 있는 성능수준을 초과하는 시점을 비교한 결과, L.S.수준과 C.P.수준에 대하여 가능해 #8이 가능해 #1보다 더 큰

표 3 두 가능해의 좌굴 및 소성힌지 발생 시점 비교(3층예제)

가능해 #1		가능해 #8	
최상층 횡변위 (cm)	위치	최상층 횡변위 (cm)	위치
1.55	2층 압축가새	1.94	3층 압축가새
1.82	1층 압축가새	4.32	1층 압축가새
4.95	3층 압축가새	5.93	1층 오른쪽 기둥 i단
7.01	2층 인장가새	6.27	2층 압축가새
8.14	1층 인장가새	9.11	1, 3층 인장가새
10.30	1층 오른쪽 기둥 i단	10.45	2층 인장가새
		15.82	1층 왼쪽 기둥 i단

표 4 본 연구에서 사용한 9층 DB

기둥	보	가새
W14x211	W27x539	W10x100
W14x193	W27x448	W10x88
W14x176	W27x368	W10x77
W14x159	W27x307	W10x68
W14x145	W27x258	W8x67
W14x132	W27x235	W8x58
W14x120	W27x217	W8x48
W14x109	W27x194	W8x40
W14x99	W27x178	W8x35
W14x82	W27x161	W8x31
W14x74	W27x146	W8x28
W14x61	W27x129	W8x24
W14x48	W27x114	W8x21
W14x38	W27x102	W8x18
W14x34	W27x94	W8x15
W14x30	W27x84	W8x13

변형에서 초과하는 것으로 나타났다. 이것은 그림 7에 나타난 것처럼 가능해 #1의 층간변위를 분포는 가능해 #8의 경우보다 특정 층에서 집중되는 경향을 가지는 것으로 나타났다. C.P.수준에서 가능해 #1의 층간변위를 분포를 보면 3층의 층간변위율보다 1, 2층의 층간변위율이 집중되는 것으로 나타났다. 이러한 이유로 가능해 #1의 내진성능이 상대적으로 떨어졌다고 판단된다. 두 가능해가 각 C.P.수준에 이르렀을 때까지 발생한 좌굴 및 소성힌지의 발생 순서와 위치를 표 3에 정리하였다. 비교결과, 가능해 #1은 좌굴 및 소성힌지의 분포가 고르게 나타난 가능해 #8과 달리 3층 인장가새에서 소성힌지가 발생하지 않았다. 이러한 이유로 가능해 #1의 3층 층간변위율이 작게 나타났고, 이에 반해 가능해 #8의 층간변위율 분포는 고르게 나타났다고 판단된다.

4.2 9층 예제

9층 예제에서 사용한 설계변수는 기둥 3개, 보 3개, 가새 3개 등으로 설정하여 각 3개층 마다 각기 다른 단면을 가질

표 5 목적함수와 제약조건의 결과값(9층예제)

설계안	목적함수		제약조건						
	f_1	f_2	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	
초기설계안	297.66	60187	0.76	0.92	0.93	0.55	0.50	0.62	
가 능 해	#1	280.15	57791	0.88	0.93	0.93	0.60	0.47	0.75
	#2	287.40	58343	0.75	0.93	0.94	0.56	0.48	0.62
	#3	296.21	60756	0.97	0.92	0.94	0.64	0.50	0.82
	#4	304.81	61414	0.97	0.92	0.94	0.64	0.51	0.82
	#5	321.22	85794	0.78	0.96	0.94	0.64	0.54	0.52
	#6	326.71	86145	0.77	0.96	0.94	0.61	0.55	0.47
	#7	337.67	86915	0.77	0.96	0.94	0.57	0.57	0.39
	#8	363.94	87497	0.72	0.86	0.93	0.52	0.61	0.75
	#9	372.44	88089	0.72	0.86	0.93	0.50	0.63	0.90
	#10	377.78	88242	0.77	0.92	0.94	0.61	0.63	0.47
	#11	388.78	89795	0.76	0.95	0.94	0.45	0.65	0.92
	#12	414.92	107501	0.91	0.86	0.61	0.59	0.70	1.00
	#13	416.16	110789	0.91	0.86	0.60	0.58	0.70	1.00
	#14	440.53	120869	0.83	0.98	0.58	0.53	0.74	0.91
	#15	461.89	125669	0.76	0.98	0.58	0.49	0.78	1.00
	#16	462.29	137374	0.76	0.98	0.54	0.53	0.78	0.83
	#17	462.89	139463	0.82	0.96	0.49	0.54	0.78	0.91
	#18	494.07	142477	0.82	0.98	0.48	0.57	0.83	0.75
	#19	554.99	143063	0.65	0.98	0.49	0.44	0.93	0.69

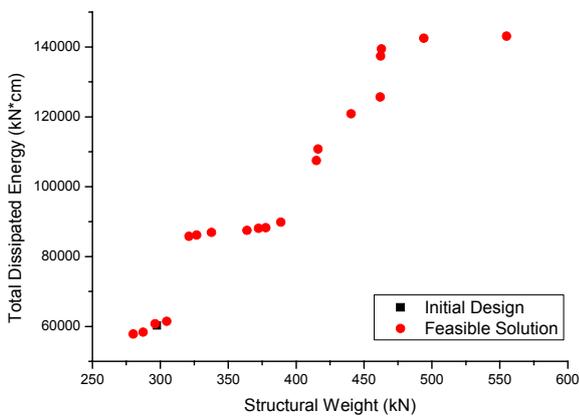


그림 8 초기설계안과 가능해의 목적함수 분포(9층예제)

수 있도록 하였다. 기둥, 보, 가새의 DB는 표 4와 같이 각각 16개씩 설정하여 각 설계변수가 DB 내 임의의 단면을 가질 수 있도록 하였다. 그 이외의 조건과 적용 방법은 3층 예제의 경우와 동일하다.

9층 예제에 적용한 결과 표 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 가능해의 목적함수를 비교하기 위해 각 가능해의 두 목적함수의 분포를 그림 8에 나타내었다. 그림에 나타난 것처럼 물량(f_1)이 증가할 수록 소산에너지량(f_2)은 증가하는 것으로 나타났다. 400kN-475kN의 물량을 가지는 가능해의 경우 물량 증가에 따른 에너지소산능력이 효과적으로 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 그 밖의 물량을 가진 가능해의

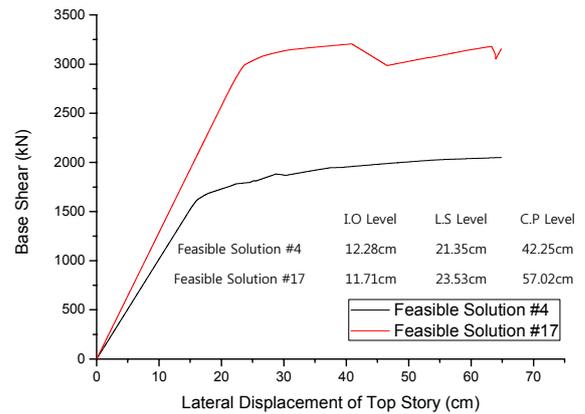


그림 9 두 가능해의 푸쉬오버곡선 비교(9층예제)

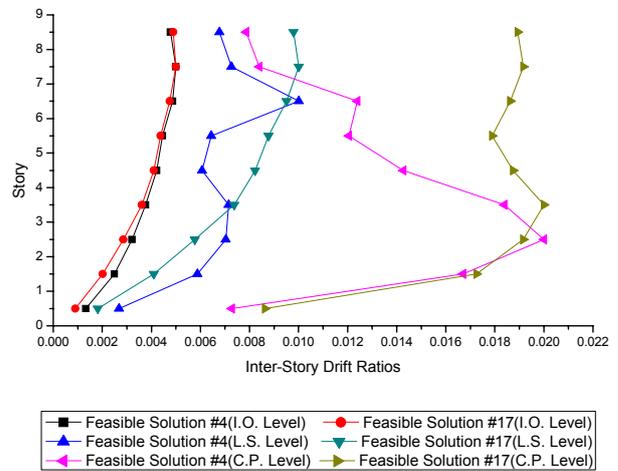


그림 10 두 가능해의 층간변위를 분포 비교(9층예제)

경우 물량 증가에 따른 에너지소산능력의 증가 효과는 작은 것으로 나타났다. 표 5에서 가능해 제약조건 값을 보면 기둥, 보, 가새의 강도제약(c_1, c_2, c_3)이 가장 큰 값을 가지는 것으로 나타났다. 즉, 9층 중심가새골조 예제에 대하여 최적 내진설계기법을 적용할 경우 기둥, 보, 가새의 강도제약이 가장 지배적 설계조건으로 작용하는 것으로 나타났다.

3층 예제의 경우처럼 가능해 중에서 소산에너지 밀도가 가장 큰 것과 가장 작은 것을 선택하여 내진성능을 비교하였다. 소산에너지 밀도가 가장 큰 것은 가능해 #17, 가장 작은 것은 가능해 #4으로 나타났다.

그림 9에 두 설계안의 푸쉬오버곡선을 비교하였다. 가능해 #17의 초기강성과 항복강도는 가능해 #4의 그것보다 모두 큰 것으로 나타났다. 또한 최대층간변위를 분석하여 FEMA 356에서 제시하고 있는 성능수준을 초과하는 시점을 비교한 결과, L.S.수준과 C.P.수준에 대하여 가능해 #17이 가능해 #4보다 더 큰 변형에서 초과하는 것으로 나타났다.

이것은 그림 10에 나타난 것처럼 가능해 #4의 층간변위를

표 6 두 가능해의 좌굴 및 소성힌지 발생 시점 비교(9층예제)

가능해 #4		가능해 #17	
최상층 횡변위(cm)	위치	최상층 횡변위(cm)	위치
15.20	2층 압축가새	23.18	4층 압축가새
15.98	3층 압축가새	23.71	1층 왼쪽 기둥 i,j단
16.22	7층 압축가새	25.41	2층 압축가새
17.28	1층 압축가새	26.62	3층 압축가새
17.89	4층 압축가새	28.80	5층 압축가새
22.34	5층 압축가새	30.45	1층 오른쪽 기둥 j단
24.28	3층 인장가새	30.86	1층 오른쪽 기둥 i단
25.26	2층 인장가새	40.89	1층 압축가새
28.74	6층 압축가새	X	
28.75	1층 오른쪽 기둥 i단		
28.79	4층 인장가새		
30.70	1층 왼쪽 기둥 i단		
37.44	5층 인장가새		
38.42	1층 인장가새		

분포는 가능해 #17의 경우보다 특정 층에서 집중되는 경향을 가지는 것으로 나타났기 때문이다. C.P.수준에서 가능해 #4의 층간변위를 분포를 보면 2, 3, 4층의 층간변위율이 다른 층의 층간변위율보다 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이러한 이유로 가능해 #1의 내진성능이 상대적으로 떨어졌다고 판단된다. 두 가능해가 각 C.P.수준에 이르렀을 때까지 발생한 좌굴 및 소성힌지의 발생 순서와 위치를 표 6에 정리하였다. 가능해 #4의 2, 3, 4층의 인장가새와 압축가새는 다른 층의 그것들 보다 상대적으로 일찍 좌굴과 소성힌지가 발생하였다. 이로 인해 C.P.수준에서 가능해 #4의 층간변위율 분포 중 2, 3, 4층의 층간변위율이 상대적으로 큰 값을 가지게 되었다고 판단된다. 한편 가능해 #17의 경우에는 모든 층의 인장가새에서 소성힌지가 발생하지 않아 층별 변형이 상대적으로 고르게 나타났다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 역V형 특수중심가새골조에 대한 최적내진 설계기법을 제안하였다. 이 기법은 강도, 층간변형 등 내진설계조건과 기둥의 연속성 등의 제약조건을 만족시키면서 구조물의 물량을 최소화하고, 동시에 구조물의 에너지소산능력은 최대화하도록 한다. 3층, 9층 예제 적용을 통해 아래와 같은 결과를 얻었다.

- (1) 예제 적용을 통해 얻은 가능해들의 두 목적함수 분포를 확인한 결과, 구조물의 물량이 증가할수록 에너지소산능력이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 특정 범위 내에서만 물량 증가에 따른 에너지소산능력의

증가 효과가 뚜렷하게 나타났으며, 그 이외에서는 물량 증가에 따른 에너지소산능력의 증가효과는 크지 않았다.

- (2) 보의 강도제약율은 3층, 9층 예제 모두에서 90%가 넘는 제약율을 나타내었다. 이것은 특수중심가새골조의 경우 가새의 좌굴로 인한 불균형 하중을 추가로 부담해야 하기 때문이라고 판단된다.
- (3) 각 예제에서 두 개씩의 설계안을 선택하여 내진성능을 비교한 결과, 가새의 거동이 구조물의 비선형특성을 좌우하는 것으로 나타났으며, 가새의 제약율이 상대적으로 작을수록 고른 층간변형 분포를 보여 상대적으로 큰 에너지소산능력을 가지는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 특정 연구 개발사업 국가지정연구실 사업의 연구비 지원에 의한 결과의 일부입니다. 과제번호 : 2005-01504

참 고 문 헌

김진구, 남광희 (2004) 역V형 특수가새골조의 반응수정계수, 한국지진공학회 논문집, 8(1), pp.29~37.

대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준 및 해설 (KBC 2005), 대한건축학회.

AISC (2005) ANSI/AISC 341-05 Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, In: Chicago, I.L.

AISC (2005) ANSI/AISC 360-05 Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, In: Chicago, I.L.

Arzhang Alimordi. (2004) Probabilistic Performance-Based Seismic Design Automation of Nonlinear Steel Structures Using Genetic Algorithms, Ph.D. thesis, University of Memphis.

ASCE (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, SEI/ASCE Standard No. 7-05 (ASCE 7-05), ASCE.

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

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

- DC.
- Fragiadakis, M., Lagaros, N.D., Papadrakakis, M.** (2006) Performance-Based Multiobjective Optimum Design of Steel Structures Considering Life-Cycle Cost. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 32, pp.1~11.
- Ganzerli, S., Pantelides, C.P., Reaveley, L.D.** (2000) Performance-Based Design using Structural Optimization. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (29), pp.1677~1690.
- Ibrahim F. Khatib, Stephen A. Mahin, Karl S. Pister** (1988) Seismic Behavior of Concentrically Braced Steel Frames, EERC Report, UCB/EERC-88/01, Berkeley.
- Kim, J.K., Choi, H.H.** (2005) Response Modification Factors of Chevron-Braced Frames, *Engineering Structures*, 27, pp.285~300.
- Kiyohiro Ikeda, Stephen A. Mahin** (1984) A Refined Physical Theory Model for Predicting the Seismic Behavior of Braced Steel Frames, EERC Report, UCB/EERC-84/12, Berkeley.
- Kiyohiro Ikeda, Stephen A. Mahin, Stavros N. Dermitzakis** (1984) Phenomenological Modeling of Steel Braces under Cyclic Loading, EERC Report, UCB/EERC-84/09, Berkeley.
- Michel Bruneau, Chia-Ming Uang, Andrew Whittaker** (1997) Ductile Design of Steel Structures, McGraw-Hill, USA.
- Min Liu, Scott A. Burns, Wen, Y.K.** (2005) Multiobjective Optimization for Performance-Based Seismic Design of Steel Moment Frame Structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, (34), pp.289~306.
- Moghaddam, H., Hajirasouliha, I., Doostan, A.** (2005) Optimum Seismic Design of Concentrically Braced Steel Frames: Concepts and Design Procedures, *Journal of Constructional Steel Research*, (61), pp.151~166.
- Silvia A.K., Frank Mckenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves** (2006) Openses Command Language Manual, Open System for Earthquake Engineering Simulation(OpenSees).
- Xu, Lei., Gong, Y., Grierson, D. E.,** (2006) Seismic Design Optimization of Steel Building Frameworks, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 132(2), pp.277~286.

- 논문접수일 2009년11월12일
- 논문심사일 2009년11월25일
- 게재확정일 2009년12월21일