

이력에너지 스펙트럼을 이용한 비좌굴 가새골조의 내진설계

Energy-Based Seismic Design of Buckling-Restrained Braced Frame Using Hysteretic Energy Spectrum

최 현 훈* 김 진 구**
Choi, Hyun Hoon Kim, Jin Koo

국문요약

본 연구에서는 단자유도계 시스템에서 작성한 이력에너지 스펙트럼과 누적된 변위 연성비 스펙트럼을 이용하여 비좌굴 가새골조의 내진설계법을 제안하였다. 먼저 목표 연성비에 해당하는 이력에너지 스펙트럼과 누적된 연성비 스펙트럼을 작성하였다. 주어진 목표 변위를 만족하기 위하여 필요한 가새의 단면적은 이력에너지 요구량과 가새에 의하여 소산된 누적 소성에너지를 같다고 하여 산정하였다. 스펙트럼을 작성하고 설계절차의 유효성을 검증하기 위하여 20개의 지진기록을 이용하였다. 제안된 방법에 따라 설계된 3층과 8층 비좌굴 가새골조의 해석결과에 따르면 최상층 변위의 평균값이 성능 목표 변위에 잘 부합됨을 알 수 있다. 또한 층간변위는 구조물 높이에 따라 비교적 일정하였는데 이것은 손상 분포가 일정하기 때문에 바람직하다. 그러므로 제안된 에너지 설계법은 기존 강도설계법의 대안으로 비좌굴 가새골조의 신뢰할만한 설계법이라고 할 수 있다.

주요어 : 이력에너지 스펙트럼, 비좌굴 가새, 누적된 연성도, 성능에 기초한 내진설계

ABSTRACT

In this study seismic design procedure for buckling-restrained braced frame systems was proposed using hysteretic energy spectrum and accumulated ductility spectrum constructed from single degree of freedom systems. The hysteretic energy spectra and accumulated ductility spectra corresponding to target ductility ratio were constructed first. The cross-sectional area of braces required to meet a given target displacement was obtained by equating the hysteretic energy demand to the accumulated plastic energy dissipated by braces. Twenty earthquake records were utilized to construct the spectra and to verify the validity of the design procedure. According to analysis results of three- and eight-story buckling-restrained braced frame structures designed using the proposed method, the mean values for the top story displacement correspond well with the given performance target displacements. Also, the inter-story drifts turned out to be relatively uniform over the structure height, which is desirable because uniform inter-story drifts indicate uniform damage distribution. Therefore it was concluded that the proposed energy-based method could be a reliable alternative to conventional strength-based design procedure for structures with buckling-restrained braces.

Key words : hysteretic energy spectrum, buckling-restrained brace, accumulated ductility, performance-based seismic design

1. 서 론

현행 내진설계 기준에서 규정하고 있는 최대 지진력이나 최대 허용변위 등은 단조(monotonic)하중 조건에서 구조물의 거동을 파악할 수 있는 지표가 될 수 있으나, 지진과 같은 이력특성을 가진 불규칙한 하중에 의해 발생하는 누적된 손상은 고려할 수 없다. 또한 설계 지진하중이 작용할 때 구조물의 비탄성 거동에 의하여 지진 에너지를 소산하도록 설계를 하고 있어, 소성변형에 의한 손상이 발생하여 막대한 경제적 손실을 가져올 수 있다. 이러한 현행 설계기준의 단점은 지난 Loma Prieta 지진(1989), Northridge 지진(1994), 효고현 남부 지진(1995)에 의해 발생한 구조물의 손상에서 확인할 수 있었다.

에너지에 기초한 내진설계는 지반운동에 의해 입력되는 에너지(demand)보다 구조물의 에너지 수용능력(capacity)이

크도록 설계하는 방법으로, 최근 단계별 지진하중에 대하여 구조물의 거동을 보다 잘 예측하고, 구조물의 성능을 명확하게 보장하도록 하는 성능에 기초한 내진설계의 방법론으로 에너지를 이용한 내진설계에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 지진에 의해 입력되는 에너지와 구조물에서 소산되는 에너지를 설계에 반영하기 위하여 Riddell과 Garcia⁽¹⁾, Wong과 Pang⁽²⁾은 입력에너지와 이력에너지에 대한 스펙트럼을 제시하였으며, Estes와 Anderson⁽³⁾은 다자유도계에서 층별 이력에너지 요구량에 대한 연구 결과를 발표하였다. 또 Akbas 등⁽⁴⁾은 보 단부의 누적된 소성변형을 고려하여 이력에너지 요구를 만족하는 설계절차를 제안하였으며, Leelataviwat 등⁽⁵⁾은 등가에너지 개념을 이용한 철골모멘트골조의 설계법에 대한 연구결과를 발표하였고, Chou와 Uang⁽⁶⁾은 모드별 pushover해석을 이용하여 이력에너지 요구량을 산정하여 다층 철골모멘트골조의 설계에 적용하였다. 이러한 일련의 연구는 모두 철골모멘트골조에 국한하여 적용되었다.

본 연구에서는 완전탄소성(elastic-perfectly plastic) 거동을 하는 단자유도계 시스템에 대하여 20개의 서로 다른 지진을 이용하여 작성한 이력에너지 스펙트럼을 이용하여, 좌

* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

** 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수(대표저자 : jinkoo@yurim.skku.ac.kr)
본 논문에 대한 토의를 2003년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2003. 4. 11 / 심사종료일 : 2003. 7. 11)

굴이 방지된 비좌굴 가새가 설치된 골조(buckling-restrained braced frame)의 내진설계방법에 대하여 연구하였다. 비좌굴 가새는 철골 중심부재를 철골튜브 속에 배치하고 콘크리트 등으로 충전하여 가새의 좌굴을 방지한 것으로 안정적인 이력거동에 의하여 많은 에너지를 소산한다. 제안된 설계절차에 따라 설계된 3층과 8층 철골 비좌굴 가새골조의 동적 해석을 수행하고, 목표변위와 비교하여 제안된 방법의 적합성을 검증하였다.

2. 에너지 방정식

지진하중을 받는 비탄성 단자유도계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + f_s(x, \dot{x}) = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서 m , c , $f_s(x, \dot{x})$ 는 구조물의 질량, 감쇠, 복원력을 나타내고, \ddot{x}_g 는 지반의 가속도를 나타낸다. 식 (1)을 상대변위 x 에 대하여 적분하면 다음과 같은 에너지 방정식을 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\int m\dot{x}dx + \int c\dot{x}dx + \int f_s(x, \dot{x})dx = - \int m\ddot{x}_g dx \quad (2)$$

식 (2)에서 첫 번째 항은 지반에 대한 상대운동과 관련된 질량의 운동에너지(E_k)를 나타내고, 두 번째 항은 점성감쇠에 의하여 소산되는 감쇠에너지(E_d)를 나타낸다. 세 번째 항은 탄성변형에너지(E_s)와 이력에너지(E_h)로 구성된 구조물에 흡수된 에너지(E_a)이다. 그리고 우변 항은 지진에 의해 구조물에 입력되는 입력에너지(E_i)를 나타낸다. 이러한 에너지 관계를 정리하면 다음 식과 같다.

$$E_k + E_d + E_s + E_h = E_i \quad (3)$$

여기서 $dx = \dot{x}dt$ 의 관계를 이용하면 식 (3)의 각 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_k = \int m\dot{x}dx = \int m \frac{d\dot{x}}{dt} dx = \int m\dot{x}d\dot{x} = \frac{1}{2} m\dot{x}^2 \quad (4a)$$

$$E_d = \int c\dot{x}dx = \int c\dot{x}^2 dt \quad (4b)$$

$$E_s = \frac{f_s^2}{2k}, \quad E_h = \int f_s(x, \dot{x})dx - E_s \quad (4c)$$

식 (3)에서 운동에너지와 탄성변형에너지의 에너지량은 다른 두 에너지에 비하여 매우 작고, 지반운동이 끝나면 사라지기 때문에 식 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_d + E_h = E_i \quad (5)$$

이 중 이력에너지는 골조의 이력거동에 의하여 발생하기 때문에 구조물의 설계에 있어서 더 의미 있는 값이라 할 수 있

다. Akbas 등⁽⁴⁾의 연구에 의하면 지진하중의 크기가 작은 경우에는 대부분의 입력에너지가 감쇠에너지로 소산되지만 일정 크기 이상의 지진하중에 대하여는 입력에너지의 대부분이 이력에너지로 소산됨을 알 수 있다.

3. 이력에너지 스펙트럼

Akbas 등⁽⁴⁾은 설계 대상 구조물을 현행 기준에 따라 설계한 후 지진에 의한 이력에너지를 산정하고, 이를 이용하여 모멘트골조의 설계를 수행하였다. 그러나 재설계된 구조물에 대하여 이력에너지를 다시 산정하여야 하는 불편함이 있으며, 여러 번의 반복 작업이 필요하다. 이러한 단점은 이력에너지 스펙트럼을 이용함으로써 해결할 수 있다. 이력에너지 스펙트럼은 다음과 같은 절차에 의하여 작성할 수 있다.

- Step 1. 목표 변위 연성비(μ_i) 결정
- Step 2. 성능수준에 부합되는 지진하중 및 단자유도계의 탄성 주기 산정
- Step 3. 등가 단자유도계의 탄성강도(f_e), 비탄성 시스템의 항복강도(f_y)와 항복변위(u_y) 산정

선택한 주기를 이용하여 그림 1과 같이 구조물의 탄성 강성(k)을 산정하고, 이를 이용하여 등가 단자유도계 시스템의 탄성강도를 산정한 다음, 식 (6)에 의하여 비탄성 시스템의 항복강도를 산정한다.

$$f_y = f_e - \Delta f \quad (6)$$

여기서 Δf 는 탄성강도를 줄이기 위한 증분값이다. 항복변위 u_y 는 다음 식에 의하여 결정한다.

$$u_y = f_y / k \quad (7)$$

- Step 4. 최대변위(u_m) 산정

비탄성 단자유도계에 대한 비선형 시간이력해석을 수행하여 최대변위를 구한다.

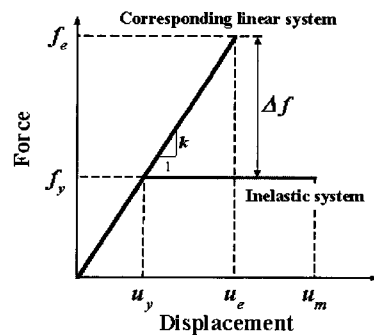


그림 1 비탄성 시스템과 등가 단자유도계 시스템의 힘-변위 관계

- Step 5. 변위 연성비(μ) 계산

산정된 최대변위와 항복변위를 이용하여 비탄성 시스템의 변위 연성비를 계산한다.

$$\mu = \frac{u_m}{u_y} \quad (8)$$

Step 6. 목표 연성비 만족여부 판별 및 이력에너지 산정

Step 5에서 구한 변위 연성비(μ)가 Step 1에서 설정한 목표 변위 연성비(μ_t)와 같아지면 이력에너지(E_h)를 산정한다. 만약 허용 오차 범위를 만족하지 못하면 Step 3에서 Δf 를 증가시키고 이후의 과정을 반복 수행한다. 이러한 일련의 과정을 통하여 구한 이력에너지 스펙트럼은 그림 2와 같다. 여기서 사용한 지진하중은 SAC Steel project⁽⁸⁾에서 제시하고 있는 연암지반(soft rock site)에서 50년에 발생확률이 10%인 20개 지진기록을 사용하였다. 각 지진기록에 대하여 여러 목표 연성비별로 작성된 스펙트럼의 평균값을 나타내었다.

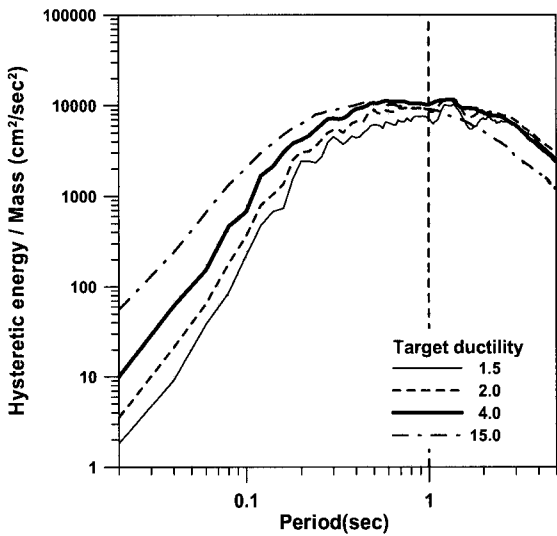


그림 2 이력에너지 스펙트럼

작성된 스펙트럼을 보면 주기가 1초 이하인 구간에서는 목표 변위 연성비가 증가할수록 이력에너지 요구량도 증가하지만 1초 이상에서는 목표 연성비가 커질수록 이력에너지 요구량이 감소함을 알 수 있다. 특히 목표연성비가 증가할수록 이러한 역전현상이 더 짧은 주기에서 발생함을 알 수 있다. 이것은 아래 그림 3에서 볼 수 있듯이 주기가 짧은 구조물에서는 연성비가 커질수록 이력면적이 커지지만 주기가 긴 경우는 연성비가 커질수록 오히려 이력면적이 감소하기 때문이다. 결국 주기가 긴 구조물인 경우 목표 변위 연성비가 증가할수록 이력에너지는 오히려 감소하게 된다.

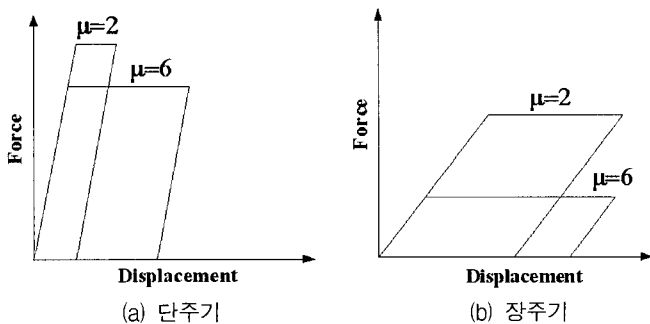


그림 3 주기와 연성비에 따른 이력면적

4. 제안된 설계절차

이력에너지 스펙트럼을 이용한 비좌굴 가새골조의 설계절차는 다음과 같다. 여기서 지진에 의해 입력되는 에너지는 모두 비좌굴 가새에 의하여 소산되고, 주요 구조 부재는 탄성 상태를 유지한다고 가정하였다. 이것은 1층 기둥의 밑면과 보-기둥 집합부를 힌지로 처리함으로써 충족할 수 있다.⁽⁹⁾

Step 1. 목표변위 연성비의 결정

각 층에 설치된 비좌굴 가새의 항복변위는 식 (9)를 이용하여 산정한다. 여기서 θ 는 보에 대한 가새의 기울기를 나타내고, L_b , E_b 와 σ_{by} 는 비좌굴 가새의 길이, 탄성계수, 항복응력이다.

$$u_{by} = \frac{1}{\cos \theta} \frac{L_b}{E_b} \sigma_{by} \quad (9)$$

각 성능수준에 해당하는 목표(충간)변위 u_t 를 결정하면 구조물의 목표 변위 연성비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_t = \frac{u_t}{u_{by}} \quad (10)$$

Step 2. 구조물 주기의 산정

초기 설계단계에서 구조물의 고유주기(T)는 적절히 가정하여야 하며, 본 연구에서는 다음과 같이 건축물 하중기준⁽¹⁰⁾에 제시된 식을 사용하였다

$$T = 0.0488h^{(3/4)} \quad (11)$$

Step 3. 이력에너지 스펙트럼 작성

3장의 절차에 따라 목표 변위 연성비에 해당하는 이력에너지 스펙트럼을 작성한다.

Step 4. 누적된 연성비 스펙트럼 작성

이력에너지 스펙트럼은 구조물의 이력거동을 기반으로 하여 작성한다. 따라서 이러한 이력에너지 스펙트럼을 이용하여 구조물을 설계하기 위해서는 지진하중이 작용하는 동안 누적된 소성 변위를 나타내는 누적 연성비(accumulated ductility)가 필요하다. 여기서 누적된 연성비는 그림 4와 같이 각 이력거동에서 발생하는 연성비를 더한 것이다. 이력에너지 스펙트럼 작성에 사용된 동일한 20개 지진기록을 이용하여 작성한 누적된 연성비 스펙트럼은 그림 5와 같으며, 주기가 0.1초 이후부터는 누적된 연성비가 비교적 일정함을 알 수 있다. University of California at Berkeley에서 수행된 비좌굴 가새 부재에 대한 실험결과⁽¹¹⁾에 따르면 비좌굴 가새의 누적된 소성 변형비는 매우 크며(표 1), 특히 지진하중(upper bound earthquake)에 의하여 요구되는 연성비 요구보다 실제 부재의 능력은 매우 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 그림 5에서와 같이 목표 변위 연성비 15에 해당하는 누적된 변위 연성비 20~70은 충분히 수용할 수 있는 값으로 사료된다.

Step 5. 비좌굴 가새의 단면적 산정

지진하중에 의한 이력에너지 요구량과 각 층별 비좌굴 가새의 이력거동에 의하여 소산되는 에너지가 같도록 가새의 단면적을 산정한다. 요구되는 에너지와 소산되는 에너지의

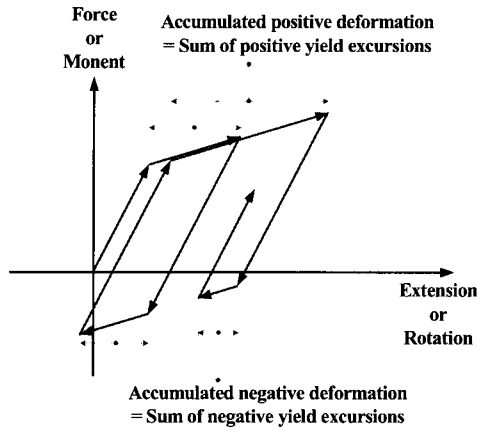


그림 4 누적된 변형

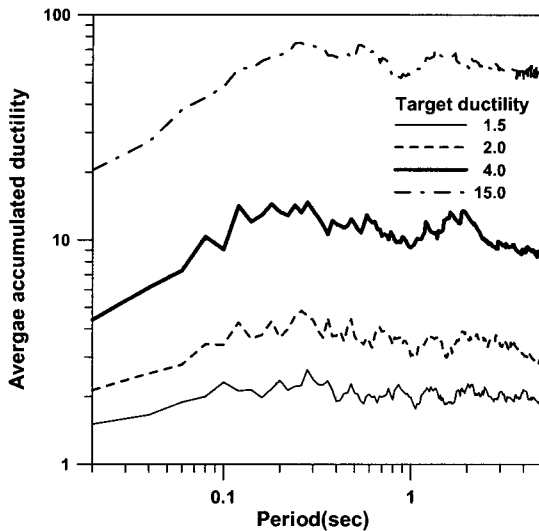


그림 5 누적된 연성도 스펙트럼

관계식은 식 (12a)와 같고 이를 1층 가새 단면적(A_{b1})에 대한 각 층별 가새 단면적의 비를 나타낸 식 (12b)를 고려하여 1층 가새 단면적에 대하여 정리하면 식 (12c)와 같이 산정할 수 있다.

$$E_h \times \sum_{i=1}^N m_i = \sum_{j=1}^N F_{yj} u_{yj} (\mu_a - 1) = (\mu_a - 1) \sum_{j=1}^N A_{bj} \sigma_{by} \frac{L_{bj} \sigma_{by}}{E_b} \quad (12a)$$

$$A_{bj} = \alpha_j A_{b1} \quad (12b)$$

$$A_{b1} = \frac{E_h \sum_{i=1}^N m_i}{(\mu_a - 1) \sum_{j=1}^N \alpha_j \sigma_{by} \frac{L_{bj} \sigma_{by}}{E_b}} \quad (12c)$$

여기서, E_h , m_i , F_{yj} , u_{yj} 와 μ_a 는 이력에너지 스펙트럼에서 구한 구조물의 주기에 해당하는 이력에너지, i 층의 질량, j 층의 항복강도와 항복변위, 누적된 변위 연성비를 나타낸다. 또 A_{bj} 와 L_{bj} 는 각각 j 층의 비좌굴 가새 단면적과 가새의 길이를 나타내고 σ_{by} , E_b 는 비좌굴 가새의 항복응력, 비좌굴 가새의 탄성계수를 나타낸다. α_j 는 층별 에너지 분배비 (distribution ratio)를 나타낸다. 이러한 방법으로 설계된 비좌굴 가새를 설치하고 고유치 해석(eigenvalue analysis)을 통하여 주기를 산정한 다음, 고유주기가 수렴할 때까지 Step 3~5의 과정을 반복 수행한다.

5. 설계방법의 적용

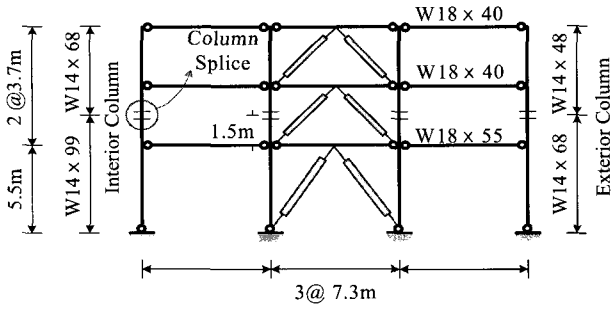
5.1 예제 구조물과 지진하중

예제 구조물은 그림 6에 나타낸 바와 같이 가운데 경간에 비좌굴 V가새가 설치된 3경간 3층, 8층의 철골조 구조물이다. 경간은 7.3m, 1층의 층고는 5.5m, 2층 이상의 층고는 3.7m로

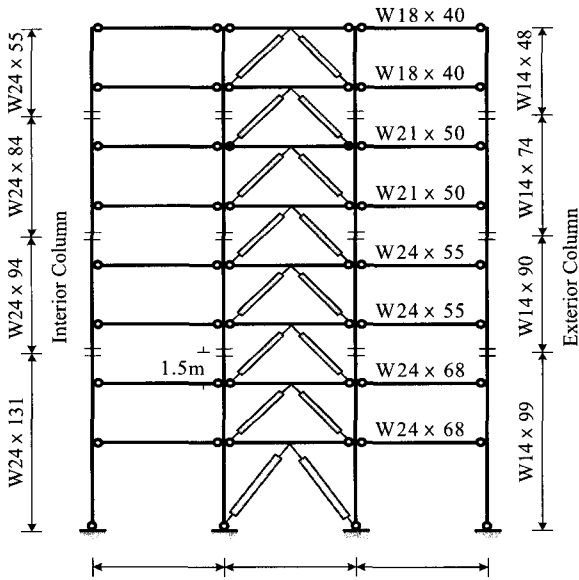
표 1 비좌굴 가새 부재의 누적된 소성 연성비⁽¹¹⁾

Specimen	Test Description	Maximum Ductility	Cumulative Plastic Ductility	Total CPD For brace
UC Davis Plant and Environmental Science Building(Spring 1999)				
99-1	SAC basic loading history	10.0	243.5	323.8
	SAC near-field protocol	20.0	80.3	
99-2	SAC basic loading history	10.0	243.5	879
	Low-cycle fatigue tests	10.0	636.5	
99-3	SAC basic loading history	10.0	243.5	278.7
	Displacement derived from Sylmar motion	2.35	8.68.6	
	Displacement derived from El Centro motion	8.30	26.6	
Kaiser Santa Clara Medical Center(Fall 2000)				
00-11	OSHPD brace loading history	15.0	345.4	1045
	Low cycle fatigue test	6.7	699.6	
00-12	OSHPD brace loading history	15.0	345.4	537.7
	Record derived from Design Basis Earthquake	3.49	54.3	
	Record derived from Upper Bound Earthquake	7.26	138.0	

동일하다. 모든 층의 무게는 156.8tonf이고 구조물의 감쇠비는 2%로 가정하였다. 보의 양단과 1층 기둥의 밑면은 힌지로 연결하였으며, 이러한 경우 이전 연구결과에 의하면 기둥과 보에는 소성힌지가 발생하지 않으며, 지진에 의해 입력되는 에너지의 대부분은 가새의 이력거동에 의하여 소산된다.⁽⁹⁾ 이력에너지 스펙트럼을 작성하기 위하여 사용한 지진하중은 SAC Steel project⁽⁸⁾에 제시한 LA 지역에서 50년에 발생확률이 10%인 연암지반의 20개 지진기록을 사용하였다. 각 지진기록의 응답스펙트럼은 그림 7과 같다.



(a) 3층 구조물



(b) 8층 구조물

그림 6 예제 구조물

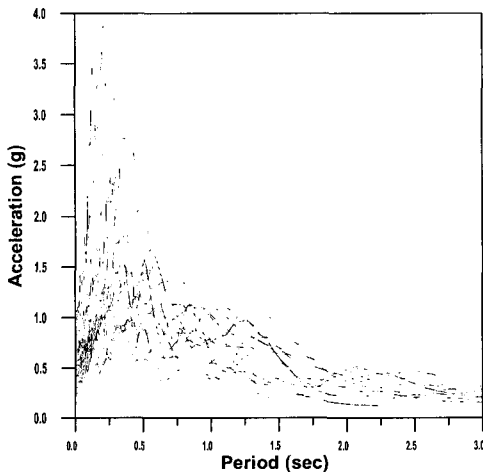


그림 7 각 지진기록의 응답스펙트럼(5% 감쇠비)

5.2 제안된 절차를 이용한 비좌굴 가새의 설계

층별 이력에너지 분포비(α_i)는 그림 8에서와 같이 비좌굴 가새가 설치된 다층 구조물의 비선형 시간이력해석을 통하여 각 층별 이력에너지 분포형태를 구한 기존의 연구결과⁽⁹⁾에 따른 층별 에너지 분배비(Type-1)와 Akbas 등⁽⁴⁾이 연구에서 이용하였던 하부층에서 상부층으로 갈수록 줄어드는 삼각형 분배비(Type-2) 두 가지를 이용하였다.

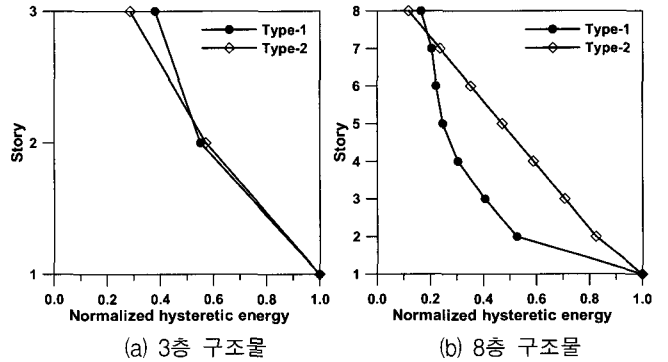


그림 8 층별 이력에너지 분배비

예제 구조물의 허용 층간변위는 층고의 1.5%로 가정하고 식 (9)와 (10)을 이용하여 목표 변위 연성비를 산정하였다. 여기서 산정된 목표 변위 연성비는 3층 구조물의 경우 14.8이고 8층 구조물은 15.1이다. 따라서 본 연구에서는 두 값에 가장 가까운 연성비 15에 대하여 이력에너지 스펙트럼과 누적된 연성비 스펙트럼을 작성하여 해석에 이용하였다.

작성된 스펙트럼을 이용하여 4장에서 제시한 설계절차에 따라 필요한 가새의 단면적을 산정하였다. 이러한 절차에 따라 3층 예제 구조물(Type-1)의 비좌굴 가새 단면적을 산정하는 과정은 표 2와 같고 에너지 분배비에 따른 각 예제구조물의 가새 단면적은 표 3과 같다. 표 2에서 가새의 단면적은 그 층에 설치된 V가새의 한쪽 단면을 나타내고 표 3의 단면적은 층에 설치된 가새의 전체 단면적이다.

산정된 가새 단면적을 보면 3층 모델에 있어서 두 가지 층별 에너지 분배비를 이용한 결과가 유사하게 나타났으나, 8층 모델인 경우 Type-1 분배방법에 따라 가새의 면적을 층별로 분배하였을 때 가새 면적의 총합이 더 작게 나타났다. 제안된 절차에 따라 산정된 단면적을 가진 구조물이 성능목표를 만족하는지 검토하기 위하여 동일한 20개의 지진을 이용하여 시간이력해석을 수행하였다.

표 2 3층 예제구조물의 비좌굴 가새 단면적 산정과정

Trial	1	2	3	4
Period(sec)	0.330	0.536	0.519	0.517
E_n /Mass (cm ² /sec ²)	9432.9	10399.4	10495.2	10495.2
μ_a	70.84	73.21	73.26	73.26
A_{B1} (cm ²)	57.90	61.74	62.27	62.27
A_{B2} (cm ²)	31.90	34.01	34.30	34.30
A_{B3} (cm ²)	21.98	23.44	23.64	23.64

표 3 에너지 분배비에 따른 예제구조물의 층별 비좌굴 가새 단면적 (단위 : cm²)

Story	3층		8층	
	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2
8	-	-	30.46	19.64
7	-	-	37.71	39.28
6	-	-	41.07	58.92
5	-	-	45.80	78.56
4	-	-	56.29	98.21
3	47.27	36.81	75.06	117.85
2	68.60	73.61	97.25	137.49
1	124.54	128.82	185.23	166.95
합계	240.41	239.23	568.88	716.90

해석은 비선형 시간이력해석 프로그램인 DRAIN-2D+(12)를 이용하여 수행하였다. 보와 기둥의 단부에서만 소성힌지가 발생하고 항복후 강성비는 초기 강성의 2%로 하였다. 비좌굴 가새는 인장과 압축에서의 항복용력이 같은 이선형 거동을 하며 항복 이후의 강성은 없는 것으로 가정하였다.

시간이력해석 결과를 나타낸 그림 9~11을 보면 최상층 변위의 평균값이 3층 구조물의 경우 분배방법에 따라 각각 20.2cm (Type-1), 19.5cm (Type-2)로 목표 변위인 19.2cm와의 오차가 5.2%와 1.6%로 만족할 수준이라고 할 수 있다. 또한 8층 모델의 경우 최상층 변위가 44.8cm (Type-1), 40.2cm (Type-2)로 목표변위(46.6cm)보다 작은 변위가 발생하였음을 알 수 있다.

3층 구조물의 경우 분배방법에 따라 산정된 단면적과 발생한 최상층 변위가 유사하였다. 그러나 8층 구조물의 경우 삼각형 분배비(Type-2)를 이용한 경우 층별 에너지비에 따라 산정된 단면적이 26%정도 컸지만, 변위는 Type-2에 비하여 9.8%의 제어효과를 보였다.

층간 변위의 경우 3층과 8층 구조물 모두 목표 층간변위인 층고의 1.5%를 만족하였고 모든 층에서 일정하였다. 즉 이것은 모든 층에 손상이 균등하게 발생함을 의미한다. 여기서 주목할 만한 것은 Type-1에 따라 이력에너지를 분배한 경우 발생한 층별 이력에너지를 보면 그림 8과 같은 형태를 보이는데 Type-2에 따라 분배한 경우는 Type-1과 Type-2 분포의 중간 형태를 보이고 있다.

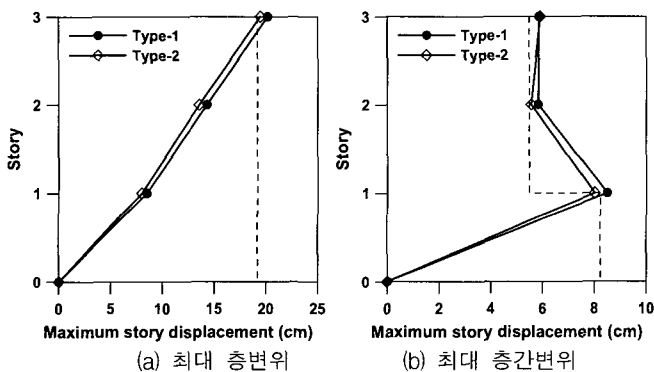


그림 9 3층 구조물의 변위 응답

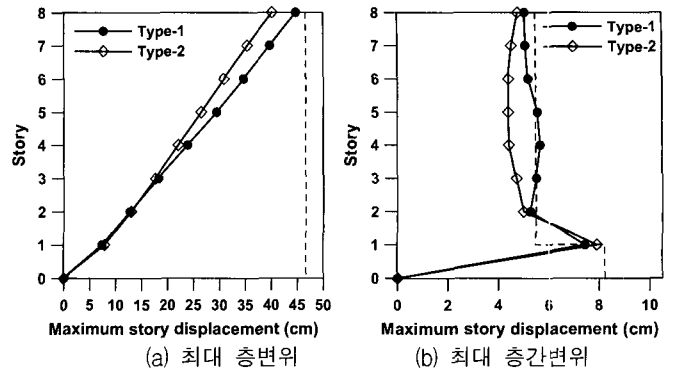


그림 10 8층 구조물의 변위 응답

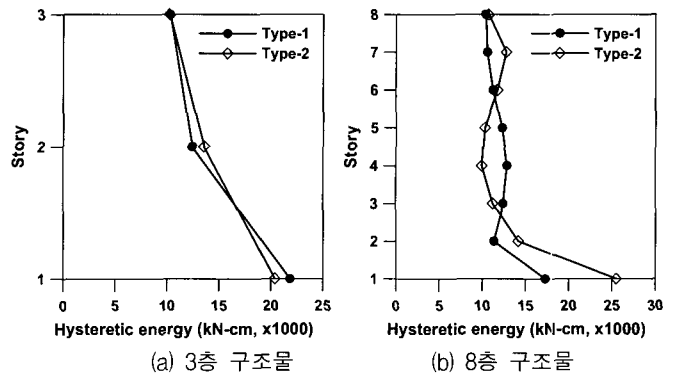


그림 11 층별 이력에너지 분포

6. 결 론

본 연구에서는 단자유도계 시스템을 이용하여 작성한 이력에너지 스펙트럼과 누적된 변위 연성비 스펙트럼을 이용한 비좌굴 가새의 내진설계 방법에 대하여 연구하였다. 제안된 방법은 지진하중의 이력특성을 반영하였기 때문에 탄성 해석에 근거한 기존 설계법과 일방향 이력거동에 근거한 다른 성능설계법보다 구조물의 비탄성거동을 보다 명확하게 반영할 것으로 사료된다. 제안된 절차에 따라 설계된 비좌굴 가새가 설치된 3층과 8층 예제 구조물의 시간이력해석에 의한 변위 응답을 보면 두 구조물 모두 목표 변위를 만족하였다. 또한 층간변위도 모든 층에 걸쳐서 일정하게 발생하여 층간변위에 따른 층별 손상이 비교적 균등하게 발생함을 알 수 있다. 제안된 설계법에서 가새의 단면적을 각 층별로 분배하는 방법을 층별 이력에너지 분배비(Type-1)와 상부층에서 하부층으로 갈수록 작아지는 삼각형 분배비(Type-2)를 이용하였다. 이러한 분배방법에 따른 8층 구조물의 결과를 보면 Type-2를 이용한 경우 Type-1의 경우보다 단면적이 26%정도 컸지만, 변위는 Type-2에 비하여 9.8%의 제어효과를 보였다. 따라서 이력에너지 분배비를 이용하는 것이 보다 효과적이라고 할 수 있다. 이상의 결과를 종합하면 본 연구에서 제안한 이력에너지 스펙트럼을 이용한 방법은 기존의 강도설계법을 이용한 비좌굴 가새골조 설계법에 비하여 성능수준을 만족하기 위한 보다 효과적인 설계법으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단 협동연구지원사업(KRF-2002-042-D00129) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Riddell, R. and Garcia, J. E., "Hysteretic energy spectrum and damage control," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 12, 2001, pp. 1791-1816.
2. Wong, K. K. F. and Pang, M., "Generation and application of energy density spectra," *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 2002.
3. Estes, K. R. and Anderson, J. C., "Hysteretic energy demands in multistory buildings," *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 2002.
4. Akbas, B., Shen, J., and Hao, H., "Energy approach in performance-based seismic design of steel moment resisting frames for basic safety objective," *The Structural Design of Tall Buildings*, Vol. 10, 2001, pp. 193-217.
5. Leelataviwat, S., Goel, S. C., and Stojadinović, B., "Energy-based seismic design of structures using yield mechanism and target drift," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 8, 2002, pp. 1046-1054.
6. Chou, C. C. and Uang, C. M., "A procedure for evaluating seismic energy demand of framed structures," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, No. 2, 2003, pp. 229-244.
7. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.
8. Somerville, P., Smith, H., Puriyamurthala, S., and Sun, J., "Development of Ground Motion Time Histories for Phase 2 of the FEMA/SAC Steel Project," SAC Joint Venture, SAC/BD-97/04, 1997.
9. 최현훈, 김진구, "좌굴이 방지된 가새가 설치된 철골조 건물의 에너지 요구량", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 2호, 2003, pp. 29-37.
10. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 2000.
11. Black, C., Makris, N., and Aiken, I., "Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained braces," Report No. PEER-2002/08, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 2002.
12. Tsai, K. C. and Li, J. W., DRAIN2D+, "A general purpose computer program for static and dynamic analyses of inelastic 2D structures supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R86-07, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997.