

# 등가 에너지 개념을 이용한 비좌굴 가새골조의 내진설계

## Seismic Design of Buckling-Restrained Braced frame Using Equivalent Energy Concept

김진구\*                      최현훈\*\*                      원영섭\*\*\*  
Kim, Jin Koo                  Choi, Hyun Hoon                  Won, Yeong Seop

### 국문요약

본 연구에서는 등가 에너지 개념에 근거하여 비좌굴 가새골조의 간편한 내진설계방법을 제안하였다. 단자유도계로 치환된 구조물의 지진 입력에너지를 응답 스펙트럼으로부터 구한 후, 탄성에너지와 소성에너지를 등가 에너지 개념을 이용하여 산정한다. 이렇게 구한 소성에너지를 분배비에 따라 각 층에 분배하고, 모든 소성에너지는 가새에 의하여 소산된다고 가정하여 각 가새의 단면적을 산정할 수 있다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 3층, 6층, 20층 가새골조를 제안된 방법으로 주어진 목표변위를 만족하도록 설계하고, 인공지진을 이용하여 결과를 검증하였다. 해석결과에 의하면 저층 건물의 최상층 변위는 비교적 목표변위를 만족하였으나, 20층 건물의 최상층 변위는 목표변위보다 매우 작아 가새가 과다하게 설계된 것으로 나타났다.

**주요어** : 등가 에너지 개념, 비좌굴 가새, 소성에너지, 내진설계

### ABSTRACT

This study proposed a convenient seismic design procedure for buckling-restrained braced frames based on the equivalent energy concept. The design process begins with the computation of input energy from response spectrum. Then the elastic energy and plastic energy are computed based on the equal energy concept. The computed plastic energy is distributed to each story along energy distribution ratio and the cross-sectional area of each brace is computed so that all the plastic energy is dissipated by the brace. The proposed procedure was applied to the design of three-, six-, and twenty-story steel frames with buckling-restrained braces, and artificial earthquake records were used for verification of the proposed method. According to analysis results, top story displacements of the low-rise structure satisfies the given target displacement however that of the twenty-story structure was much smaller than the given target displacement.

**Key words** : equivalent energy concept, buckling-restrained brace, hysteretic energy, seismic design

## 1. 서 론

건물의 사용연한 동안에 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물의 거동을 보다 정확하게 예측하고, 구조물의 성능을 보장하도록 하는 성능에 기초한 내진설계(performance based seismic design)에 대한 연구가 최근 활발하게 이루어지고 있다. 성능에 기초한 내진설계의 방법론으로 구조물에 손상을 가져오는 비탄성 거동까지 고려한 변위 설계법(displacement based design)은 Priestley와 Kowalsky<sup>(1)</sup>, Chopra와 Goel<sup>(2)</sup> 등 다수의 연구자들에 의해 활발한 연구가 수행되어 체계적인 설계 절차가 제안되었다. 그러나 최대 응답만을 설계변수로 하여 지진의 지속시간 동안 누적되는 입력에너지 및 그에 따른 손상을 고려하지 못한다는 단점이 있다.

지진의 지속시간 동안 입력되는 총 에너지와 그에 따른 구조물의 비탄성 거동에 의하여 소산되는 이력에너지를 이용하여 구조물을 설계하는 에너지 설계법(energy based design)은 성능설계를 위한 합리적인 방법으로 평가받고 있다. 에너지에 기초한 내진설계 방법은 지반운동에 의해 구조

물에 입력되는 에너지 보다 구조물의 에너지 소산능력이 크도록 설계하며, 1956년 Housner<sup>(3)</sup>에 의하여 제안된 이후 최근 많은 연구가 진행되고 있다. Riddell과 Garcia<sup>(4)</sup>, Wong과 Pang<sup>(5)</sup>은 입력에너지와 이력에너지에 대한 스펙트럼을 제시하였으며, Uang과 Bertero<sup>(6)</sup>는 다층 구조물의 층별 이력에너지와 구조 요소별 에너지에 대한 연구결과를 발표하였다. Leger와 Dussault<sup>(7)</sup>는 감쇠가 다층 구조물의 에너지 소산에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였고 Estes와 Anderson<sup>(8)</sup>은 다자유도계에서 층별 이력에너지 요구에 대한 연구 결과를 발표하였다. 에너지 개념을 이용한 내진설계에 있어서는 Akbas 등<sup>(9)</sup>이 보 단부의 누적된 소성변형을 고려하여 이력에너지 요구를 만족하는 철골 모멘트골조를 설계하는 방법에 대한 연구를 수행하였으며, Leelataviwat 등<sup>(10)</sup>은 등가 에너지 개념을 이용한 철골 모멘트골조의 설계법을 제시하였고, Chou와 Uang<sup>(11)</sup>은 모드별 pushover해석을 이용하여 이력에너지 요구를 산정한 다음 다층 철골 모멘트골조의 설계에 적용하였다. 이러한 일련의 연구는 모두 모멘트골조에 국한되어 적용되었으며, 다른 구조방식의 구조물에 대한 체계적인 연구는 아직 미미한 상태이다.

본 연구에서는 등가 에너지 개념을 비좌굴 가새골조(buckling-restrained braced frame, 이하 BRBF)의 성능설계에 적용하였다. 단자유도계로 치환된 구조물의 지진 입력에너지를 응

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수(대표저자 : jinkoo@yurim.skku.ac.kr)

\*\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

\*\*\* 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2003. 3. 21 / 심사종료일 : 2003. 5. 26)

답 스펙트럼으로부터 산정한 후, 탄성에너지와 소성에너지를 등가 에너지 개념을 이용하여 산정하였다. 이렇게 구한 소성에너지를 에너지비에 따라 각 층에 분배하고, 모든 소성에너지가 비좌굴 가새에 의하여 소산된다고 가정하여 각 가새의 단면적을 산정하였다. 제안된 방법을 검증하기 위하여 3층, 6층, 20층 가새골조를 제안된 방법으로 주어진 목표변위를 만족하도록 설계하고, 설계스펙트럼에 부합되도록 생성한 인공지진을 이용하여 결과를 검증하였다.

## 2. 등가 에너지 개념

등가 에너지 개념은 Newmark와 Hall<sup>(12)</sup> 등의 연구자들에 의해 비탄성 시스템의 목표 변위연성비에 해당하는 비탄성 응답스펙트럼을 선형 응답 스펙트럼으로부터 얻고자 하는 시도에 의해 사용되었다. 이 개념은 그림 1(a)에 나타난 것과 같이 최대 목표변위( $u_m$ )에서 비탄성 구조물의 이력거동에 의한 에너지( $E_e + E_p$ )는 등가 탄성시스템에 저장되는 에너지( $E_i$ )와 같다는 것으로 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_i = E_e + E_p \quad (1)$$

$$E_i = \frac{1}{2} u_e V_e \quad (2)$$

$$E_e = \frac{1}{2} u_y V_y, \quad E_p = V_y(u_m - u_y) \quad (3)$$

그러나 등가 에너지 개념은 단주기 구조물에 비교적 정확하게 적용되며, 장주기 영역에서는 비탄성 구조물과 등가 선형 탄성구조물의 최대변위가 같다는 등변위 개념이 적용되는 것으로 알려져 있다. 즉 등가 에너지 개념은 그림 2에서와 같이 비교적 주기가 짧은 구간에서 적용이 가능하다. 이 구간의 특징은 가속도 스펙트럼 증가 부분이고 비탄성 변위가 탄성 변위보다 크게 나타나는 구간이다. 이보다 주기가 긴 구간에서는 가속도 스펙트럼에서 가속도가 감소하는 구간으로 그림 1(b)와 같은 등변위 구간이다.

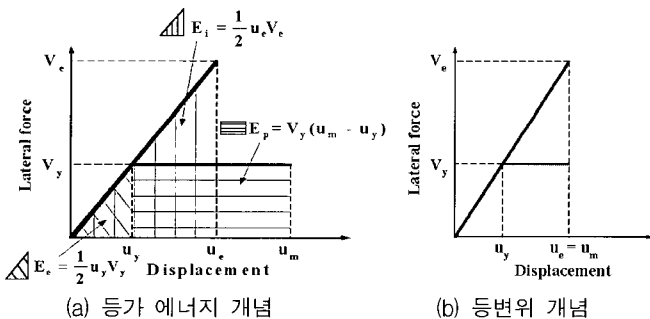


그림 1 비탄성 변위와 등가 탄성변위의 관계

## 3. 비좌굴 가새가 설치된 손상방지 가새골조

### 3.1 비좌굴 가새의 특성

일반적인 가새의 경우 그림 3과 같이 압축력을 받으면 좌

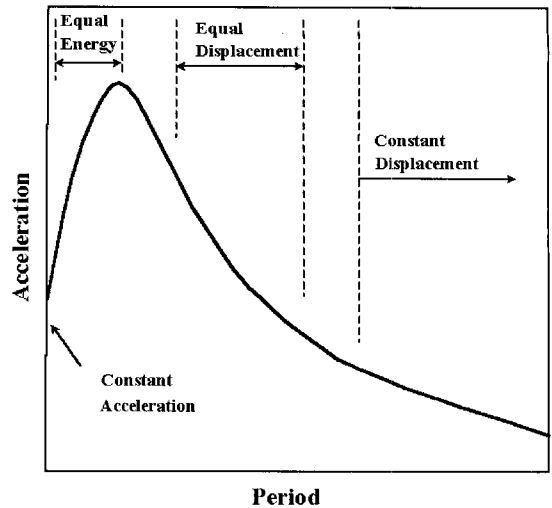


그림 2 응답스펙트럼의 각 구간별 특성

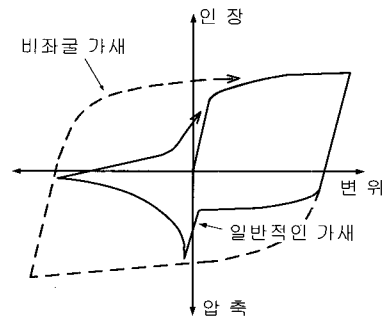


그림 3 가새의 이력거동그림

굴이 발생하여 저항력이 급격하게 감소하고 이력거동도 불안정하게 된다. 반면 비좌굴 가새는 철골 중심부재를 철골튜브 속에 배치하고 콘크리트 등으로 충전하여 가새의 좌굴을 방지한 것으로 안정적인 이력거동에 의하여 많은 에너지를 소산한다. 가새가 설치된 구조물의 에너지 소산은 가새의 이력거동에 따라 크게 달라지기 때문에 이력거동이 안정적인 비좌굴 가새를 설치함으로써 그림 4와 같이 일반적인 가새골조보다 전체 시스템의 에너지 소산능력은 증가시키고 주요 구조부재의 변형은 줄어들게 할 수 있다.

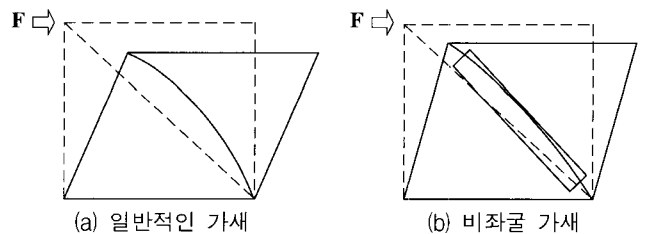


그림 4 횡력에 대한 가새골조의 거동

### 3.2 손상방지 비좌굴 가새골조

그림 5는 손상방지 비좌굴 가새골조 시스템(damage tolerant buckling restrained braced frame system)의 개념을 나타내며, 힌지로 연결되어 중력하중에 저항하는 주 구조체와 비좌굴 가새로 이루어진 횡력저항 시스템이 결합된 형태이다. 보와

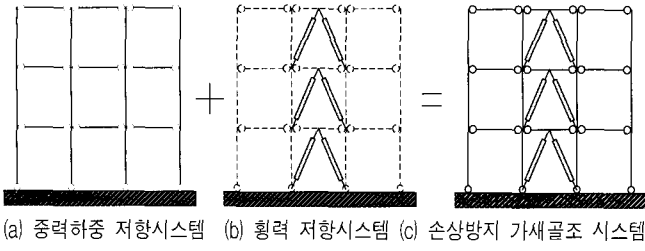


그림 5 손상방지 비좌굴 가새골조 시스템의 구성

기둥은 힌지로 연결되어 있으므로 소성힌지가 전혀 발생하지 않으며, 지진에 의해 입력되는 에너지의 대부분은 가새의 이력거동에 의하여 소산된다. 따라서 모든 손상은 가새에 집중하게 되고 중력하중을 분담하지 않는 손상된 가새는 쉽게 교체가 가능하므로 지진 이후 구조물의 관리 및 보수보강에 큰 이점이 있다.

#### 4. 설계 절차

본 연구에서 제안하는 등가 에너지 개념을 이용한 손상방지 비좌굴 가새골조의 설계절차는 다음과 같다.

##### Step 1. 목표변위( $D_m$ ) 결정

구조물의 성능수준을 결정하고 성능수준에 해당하는 목표변위를 결정하기 위하여 본 연구에서는 표 1과 같이 한국 지진공학회의 「내진설계기준연구II」<sup>(13)</sup>에서 제시하고 있는 거동한계를 이용하였다.

표 1 성능수준에 따른 시스템의 설계거동한계

시스템 상태	성능수준			
	완전기능수행	기능수행	인명안전	붕괴방지
전체건물 피해상태	무시할 정도	경미함	보통	심함
허용층간변위	<0.2% +/-	<0.5% +/-	<1.5% +/-	<2.5% +/-

##### Step 2. 전체 입력에너지( $E_i$ ) 산정

지진에 의해 구조물에 입력되는 에너지는 Housner<sup>(3)</sup>에 의해 제안된 다음 식을 이용하여 구한다.

$$E_i = \frac{1}{2} MS_v^2 = \frac{Wga^2 T^2}{8\pi^2} \quad (4)$$

여기서  $M$ 과  $W$ 는 다자유도계의 1차 진동모드와 관련된 질량과 중량이고,  $S_v$ 는 탄성 설계스펙트럼상의 속도,  $g$ 는 중력 가속도,  $a$ 는 탄성 설계스펙트럼상의 가속도를 중력 가속도로 나눈 값이다. 손상방지 가새골조의 경우 접합부가 힌지로 연결되어 있기 때문에 일반 가새골조보다 주기가 길다. 따라서 UBC-97의 주기산정식에 1.5배한 다음 식을 사용하여 최초주기를 가정하였다.

$$T = 1.5 \times 0.0488h^{3/4} \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 구조물의 전체 높이( $m$ )를 나타낸다.

##### Step 3. 항복 밀면전단력( $V_y$ ) 산정

Step 1에서 결정한 목표변위( $D_m$ )는 다자유도계의 값이므로 식 (6)과 같이 1차 모드를 이용하여 등가 단자유도계의 목표변위( $d_m$ )로 변환한다. 식 (6)에서  $\Gamma_1$ 은 1차 모드 참여 계수,  $\phi_{11}$ 은 다자유도계에서 최상층의 1차 모드 형상계수이다. 식 (7)의  $E_i$ 에 식 (4)에서 산정된 값을 대입하여  $V_y$ 를 산정한다.

$$d_m = \frac{D_m}{\Gamma_1 \phi_{11}} \quad (6)$$

$$V_y = \frac{E_i}{\left(d_m - \frac{V_y T^2}{8\pi^2 M}\right)} \quad (7)$$

##### Step 4. 전체 소성에너지( $E_p^*$ ) 산정

Step 3에서 산정한  $V_y$  값을 식 (8)에 대입하여 탄성에너지( $E_e$ )를 구한다. 소성에너지는 식 (1)에 따라  $E_i$ 에서  $E_e$ 를 제외한 나머지 에너지량을 말하며 이것을 정리하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_e = \frac{1}{2} M \left( \frac{TV_y g}{2\pi W} \right)^2 \quad (8)$$

$$E_p = E_i - E_e = \frac{WT^2 g}{8\pi^2} \left( a^2 - \left( \frac{V_y}{W} \right)^2 \right) \quad (9)$$

여기서  $E_p$ 는 다자유도계의 1차 진동모드에 대응하는 등가 단자유도계의 값이므로  $E_{p, MDOF} / E_{p, ESDOF}$ 를 이용하여 다자유도계에 대응하는 전체 소성에너지( $E_p^*$ )로 변환할 수 있으며 아래와 같이 표현된다.

$$E_p^* = (E_{p, MDOF} / E_{p, ESDOF}) \times E_p \quad (10)$$

##### Step 5. 전체 소성에너지의 층별 분배

Estes와 Anderson<sup>(8)</sup>의 다층 철골 모멘트골조에서 층별 소성에너지 요구량에 대한 연구결과에 의하면 지진에 의한 소성에너지의 층별 분포가 최하부층으로부터 상부층으로 갈수록 작아지는 삼각형 형태를 보이고 있다. Akbas 등<sup>(9)</sup>은 소성에너지의 층별 분배를 하부층에서 상부층으로 갈수록 작아지는 삼각형 또는 사다리꼴의 형태로 가정하였다.

본 연구에서는 실제 발생하는 층별 소성에너지 분포를 반영하기 위해 계측된 지진을 이용한 비선형 시간이력해석을 수행하여 각 층별 에너지 분배비를 산정하였다.

##### Step 6. 층별 비좌굴 가새의 단면적( $A_{bi}$ ) 산정

층별로 분배된 소성에너지와 층별 비좌굴 가새의 비탄성 거동에 의해 소산하는 소성에너지의 양을 같다고 가정하면

식 (11a)와 같은 관계가 성립한다. 여기서 비좌굴 가새는 항복이후의 강성이 없는 완전 탄소성거동을 한다고 가정하였다. 식 (11a)를 그 층에 필요한 비좌굴 가새의 단면적에 대하여 정리하면 식 (11b)와 같다. 식 (11)에서  $E_{pi}^*$ 는 임의의 층에 분배된 소성에너지,  $F_{by}$ 는 비좌굴 가새의 항복하중을 나타내며  $A_{bi}$ ,  $L_{bi}$ ,  $\theta_i$ 는 각각 그 층의 비좌굴 가새 단면적, 비좌굴 가새의 길이 그리고 가새와 보 사이의 각을 말한다.  $\sigma_{by}$ 는 비좌굴 가새의 항복응력,  $E_b$ 는 비좌굴 가새의 탄성계수이다.  $u_{bm}$ 은 비좌굴 가새의 최대 횡변위로 그 층의 층간변위 한계에 해당하며,  $u_y$ 는 비좌굴 가새의 항복변위이다.

$$E_{pi}^* = F_{by}(u_{bm} - u_y) = A_{bi}\sigma_{by}\left(u_{bm} - \frac{L_{bi}\sigma_{by}}{E_b \cos \theta_i}\right) \quad (11a)$$

$$A_{bi} = \frac{E_{pi}^*}{\sigma_{by}\left(u_{bm} - \frac{L_{bi}\sigma_{by}}{E_b \cos \theta_i}\right)} \quad (11b)$$

산정된 단면적을 가진 비좌굴 가새를 구조물에 설치하고 고유치 해석(eigenvalue analysis)을 통하여 주기를 산정한 다음 Step 2~Step 6의 과정을 주기가 수렴할 때까지 반복 수행한다. 여기서 두 번째 반복 과정부터는 고유치 해석을 통하여 얻은 주기를 이용하여 전체 입력에너지를 산정한다.

## 5. $E_{p,MDOF}/E_{p,ESDOF}$ 와 층별 에너지 분배비 산정

### 5.1 등가 단자유도계 변환 방법

$E_{p,MDOF}/E_{p,ESDOF}$ 를 산정하기 위해 ATC-40<sup>(14)</sup>에서 제시하는 1차 모드만을 고려한 방법을 이용하여 다자유도계를 등가 단자유도계로 변환하였다. 먼저 다층 건물에 식 (12)와 같이 층지진 하중을 1차 모드 형상으로 분배하고 비선형 정

적해석(pushover)을 수행하여 밀면 전단력( $V$ )에 대한 최상층 변위( $\Delta_i$ )의 곡선을 구한다. 이러한 곡선을 등가 단자유도 시스템의 힘-변위 곡선으로 변환하기 위하여 식 (13)의 관계를 이용한다.

$$F_i = \frac{m_i \phi_{i1}}{\sum m_i \phi_{i1}} V \quad (12)$$

$$S_f = \frac{V_b}{M_1^*} \quad S_d = \frac{\Delta_i}{\Gamma_1 \phi_{i1}} \quad (13)$$

여기서  $F_i$ ,  $m_i$ ,  $\phi_{i1}$ ,  $\phi_{i1}$ ,  $V$ 는  $i$ 층의 층 지진하중, 층 질량, 1차 모드에서  $i$ 층과 최상층의 모드 형상계수와 설계 밀면 전단력을 나타낸다.  $M_1^*$ 와  $\Gamma_1$ 은 1차 모드에 대한 유효 모드 질량과 모드 참여계수이다.

### 5.2 해석모델과 지진하중

해석 모델은 3경간 3층, 6층, 20층의 역V형 가새가 설치된 손상방지 비좌굴 가새 골조이다. 각 모델의 경간은 7.3m 이고, 1층의 층고는 5.5m, 2층 이상의 층고는 모두 3.7m이다. 모든 층의 무게는 156.8tonf이고 구조물의 감쇠비는 5%로 가정하였다. 각 해석 모델의 비좌굴 가새 단면적과 보와 기둥 부재의 크기는 각각 그림 6과 7과 같다. 각 구조물의 1차 모드 형상은 그림 8과 같고 모드별 주기, 질량 참여 계수와 모드별 참여계수는 표 2와 같다.

해석에 사용한 지진하중은 SAC steel project에서 제시하는 LA지역의 연암 지반(soft rock site)에서 계측된 50년에 발생확률이 10%인 20개 지진의 평균 응답 스펙트럼의 최대지반가속도가 0.4g가 되도록 각 지진을 scaling한 것이다. 그림 9는 사용된 지진파의 응답 스펙트럼을 나타내는 것으로 다양한 특성을 가진 지반기록이 반영되었음을 알 수 있다.

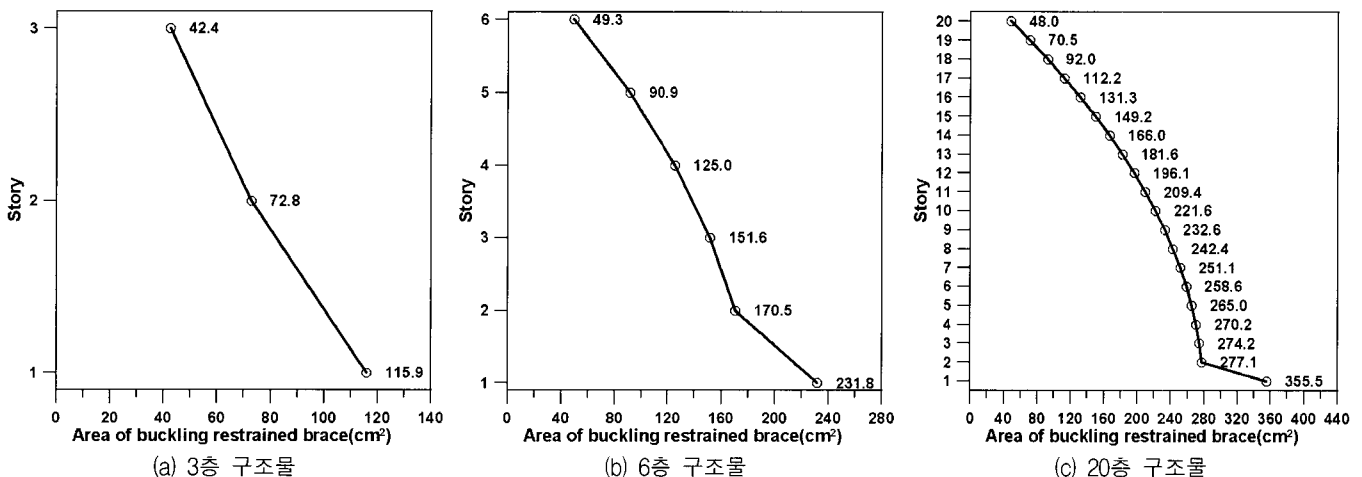


그림 6 층별 비좌굴 가새의 단면적

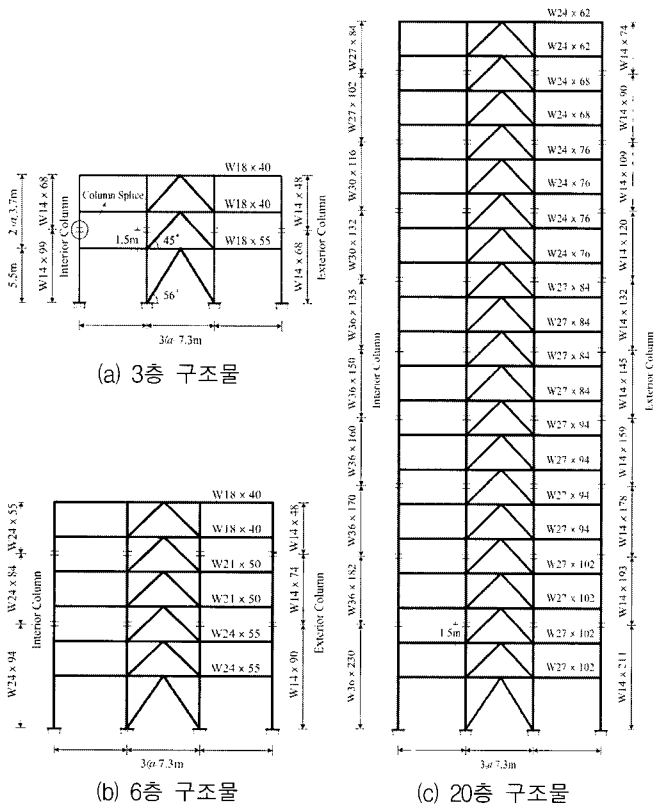


그림 7 예제 구조물

표 2 예제 구조물의 동적 특성

동적특성		층수		
		3층	6층	20층
주기 (초)	1차 모드	0.527	0.728	3.640
	2차 모드	0.174	0.272	0.881
질량 참여계수	1차 모드	0.909	0.814	0.641
	2차 모드	0.082	0.141	0.224

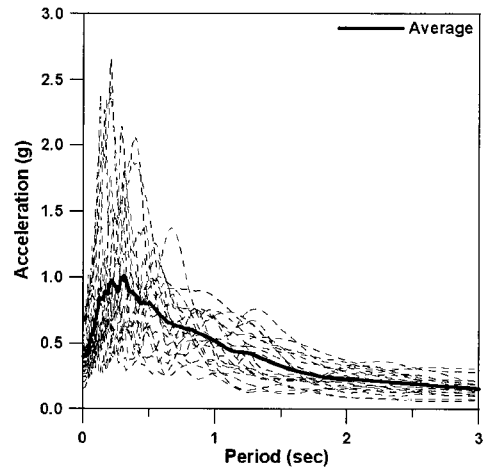


그림 9 각 지진의 응답 스펙트럼

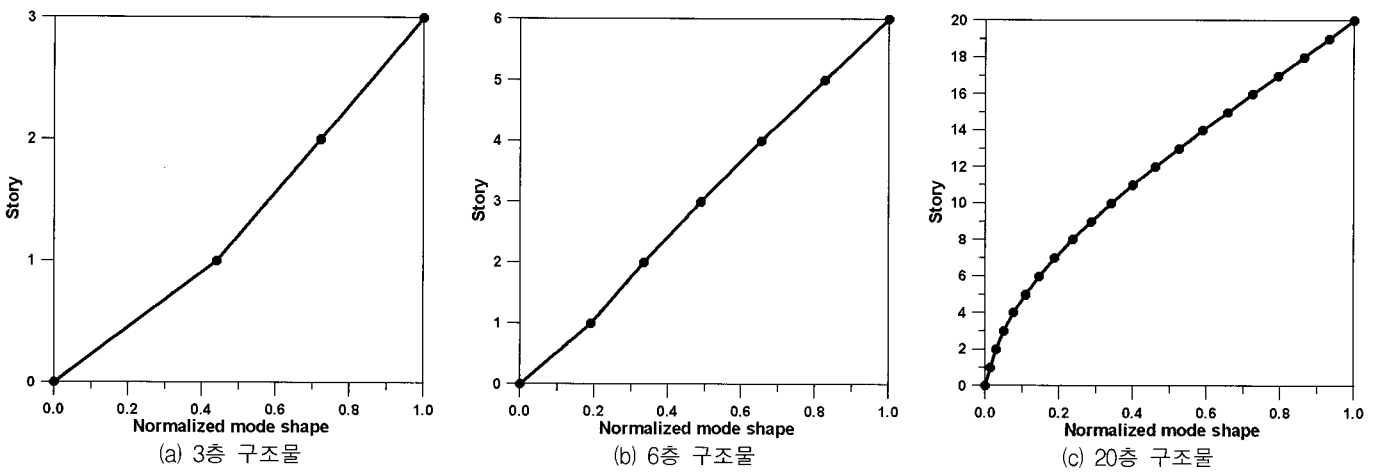


그림 8 각 구조물의 1차 모드 형상

### 5.3 층별 에너지 분배비 산정

해석 모델의 각 층별 소성에너지 요구량을 파악하기 위하여 DRAIN-2D+(15)를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 보와 기둥의 단부에서만 소성힌지가 발생하고 항복후 강성비는 초기 강성의 2%로 하였다. 비좌굴 가새는 인장과 압축에서의 항복응력이 같은 이선형 거동을 하며 항복 이후의 강성은 없는 것으로 가정하였다. 각 층별 소성에너지는 보와 기둥 그리고 비좌굴 가새의 소성에너지의 합으로 나타내었다. 소성에너지의 층별 분포 형상과 이것을 이용하여 산정한 층별 소성에너지의 분배비는 그림 10, 그림 11과 같으

며 그림 12에서 알 수 있듯이 비좌굴 가새골조의 보와 기둥에서는 소성에너지가 거의 발생하지 않고 가새의 이력거동에 의하여 대부분의 소성에너지가 발생함을 알 수 있다.

에너지 분포형상을 보면 최상층에서 소성에너지가 거의 발생하지 않는 일반 가새골조에 비하여 손상방지 비좌굴 가새골조의 경우는 그림 11과 같이 층별로 보다 균등하게 분포되며 최상층에서도 소성에너지가 발생함을 알 수 있다. 특히 20층 비좌굴 가새골조의 경우 고차모드와 캔틸레버 변형형상의 영향으로 하부층에서 상부층으로 갈수록 소성에너지가 감소하다가 상부층에서 다시 증가하고 최상층에 가서는 다시 약간 감소하는 형태의 에너지 분포를 보인다.

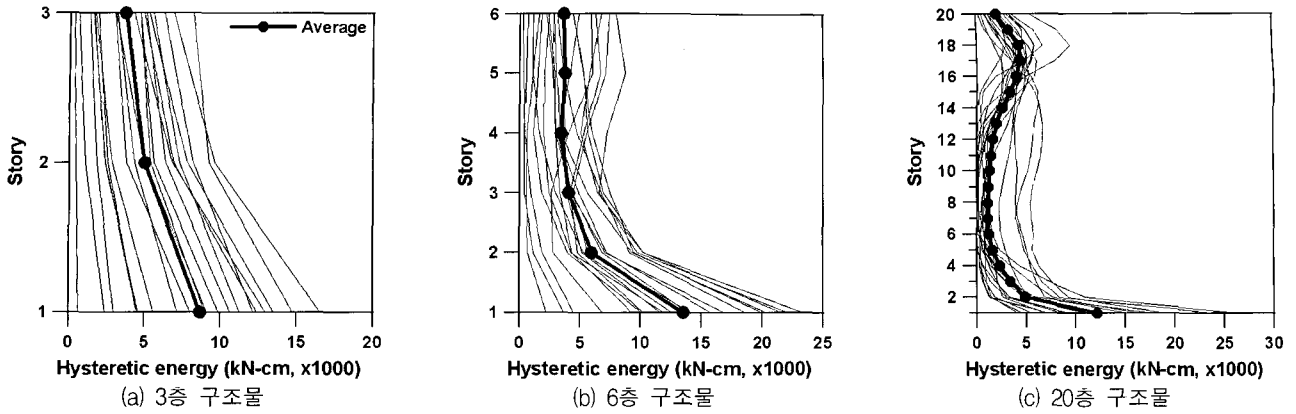


그림 10 층별 소성에너지 분포

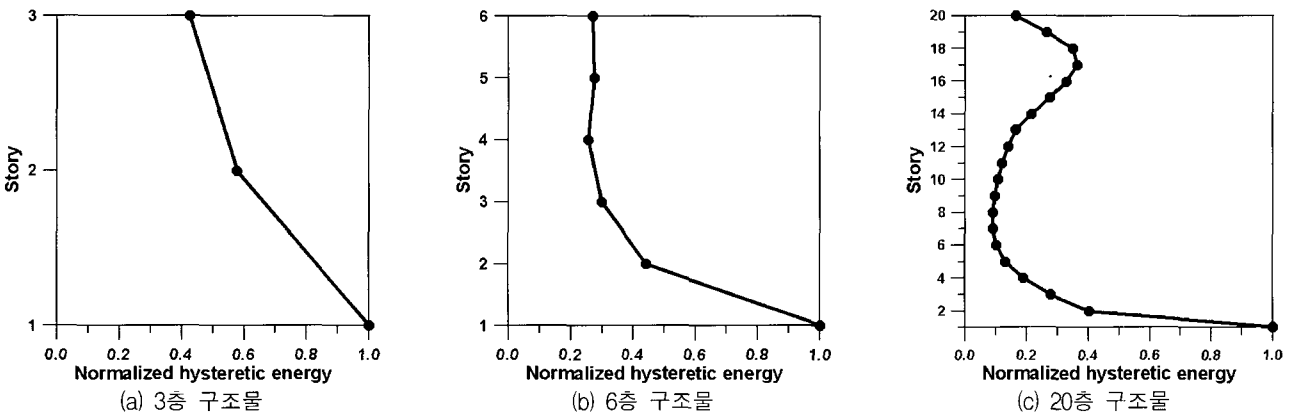


그림 11 층별 소성에너지 분배비

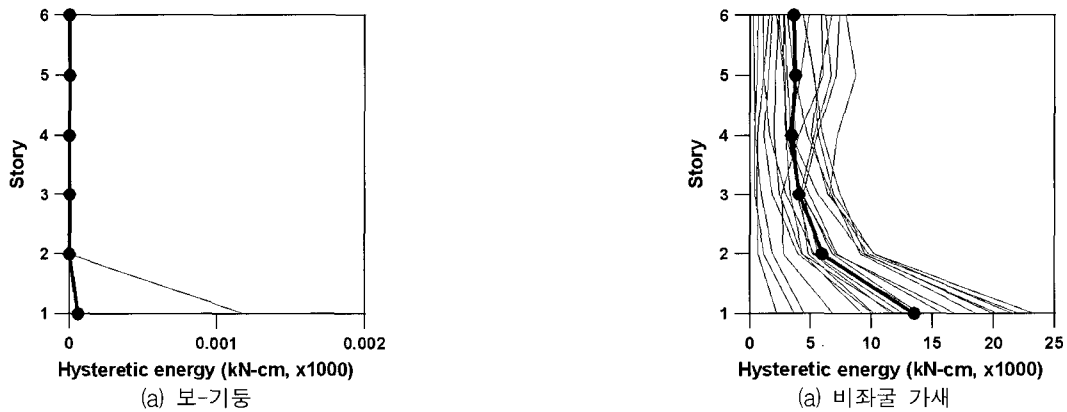


그림 12 보-기둥과 비좌굴 가새의 소성에너지 분포(6층 구조물)

#### 5.4 $E_{p, MDOF} / E_{p, ESDOF}$ 산정

$E_{p, MDOF} / E_{p, ESDOF}$  를 구하기 위해 다자유도계를 5.1절의 방법을 이용하여 등가의 단자유도계로 변환하였다. 변환된 등가 단자유도계의 특성은 표 3과 같다.

등가 단자유도계의 시간이력해석은 Nonspec<sup>(16)</sup>을 이용하여 수행하였고 그림 13과 14는 입력에너지비와 소성에너지비를 나타낸다. 입력에너지비와 소성에너지비의 평균 에너지비는 그림 15와 같은데 3층과 6층의 경우는 등가 단자유도계가 다자유도계의 에너지를 7~9% 정도 과대평가하는 반면 20층의 경우는 등가 단자유도계가 다자유도계의 에너지를 과소평가하며 각 지진에 대한 에너지비의 편차도 매우 크게 나타났다.

표 3 등가 단자유도계의 특성

동적특성	3층	6층	20층
주기(초)	0.515	0.739	3.618
질량 참여율(%)	90.9	81.4	64.1
초기상성(kN/cm)	635.2	554.3	60.6

### 6. 제안된 설계 방법의 적용 및 평가

#### 6.1 비좌굴 가새의 단면적 산정

설계 대상 구조물의 목표 성능수준은 인명 안전수준으로 정하고 UBC-97의 탄성 설계스펙트럼( $C_a=0.35, C_v=0.5$ )을

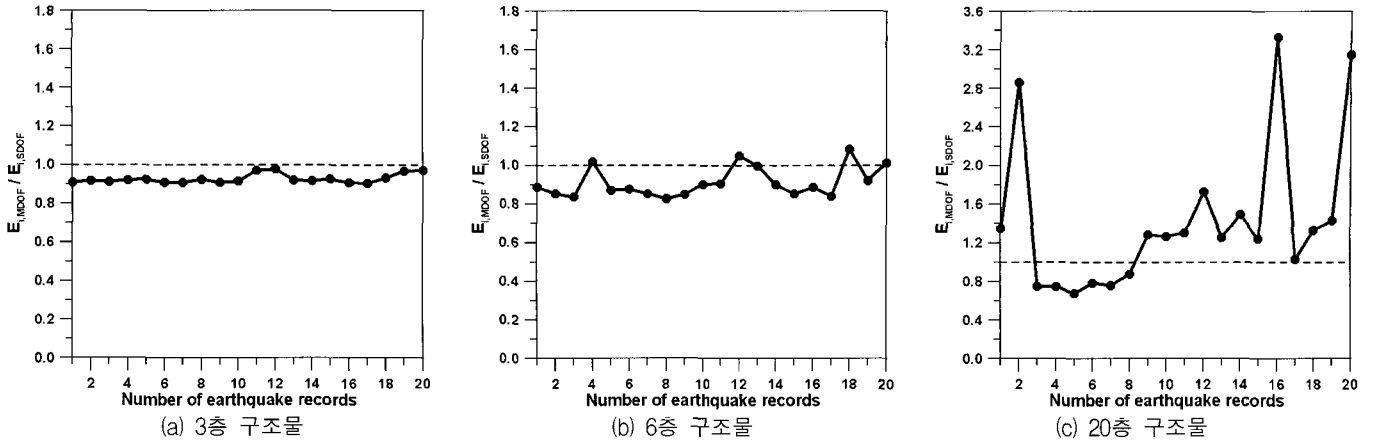


그림 13 입력에너지비

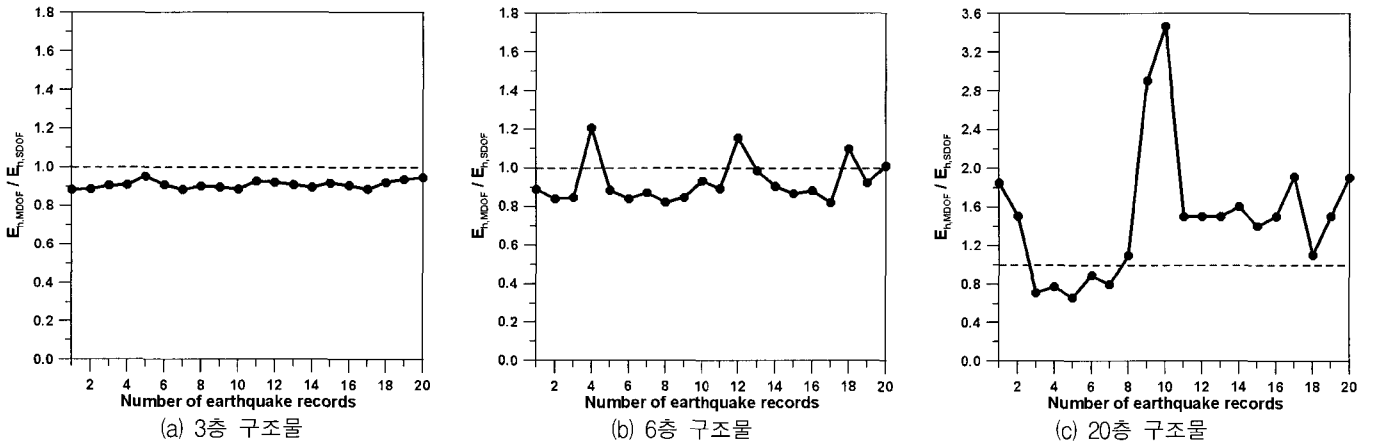


그림 14 소성에너지비

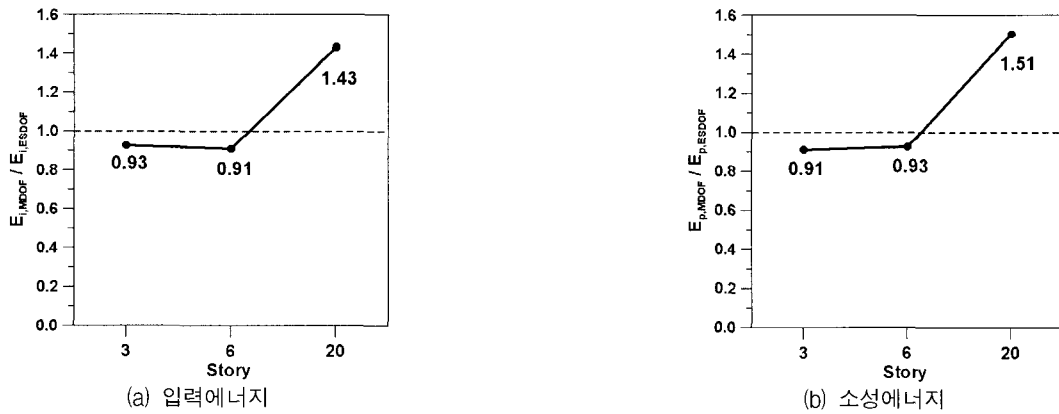


그림 15 평균 에너지비

이용하여 비좌굴 가새의 단면적을 산정하였다. 설계는 4장에서 제안된 절차에 따라 식 (5)를 이용하여 구조물의 최초주기를 산정한 다음, 주기에 해당하는 가속도 값을 그림 16의 탄성 설계스펙트럼으로부터 구하고, 식 (11b)를 이용하여 가새의 단면적을 산정한다. 산정된 가새를 구조물에 설치하고 고유치 해석을 통하여 주기를 산정한 다음 이 주기를 최초 가정주기와 비교하여 주기가 일정한 값에 수렴할 때까지 일련의 과정을 반복하게 된다. 이러한 일련의 과정을 정리하면 표 4와 같고 각 예제 구조물의 층별 비좌굴 가새의 단면적과 동적특성은 각각 표 5, 표 6과 같다.

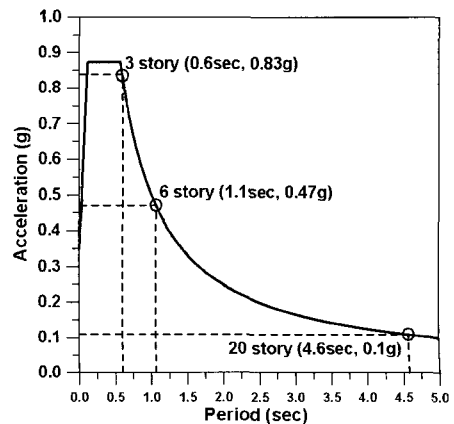


그림 16 각 구조물의 가속도값 산정

표 4 3층 구조물의 가새 단면적 산정과정

	1st trial	2nd trial	...	5th trial
T(sec)	0.495	0.689	...	0.597
a(g)	0.873	0.726	...	0.838
Total brace area(cm <sup>2</sup> )	141.7	184.6	...	190.3

표 5 층별 비좌굴 가새의 단면적(cm<sup>2</sup>)

(a) 3층 구조물

층	가새면적
3	48.3
2	65.7
1	76.3

(c) 20층 구조물

층	가새면적
20	55.9
19	89.9
18	118.0
17	122.5
16	110.6
15	92.4
14	73.2
13	55.9
12	47.3
11	40.4
10	36.2
9	32.0
8	29.8
7	29.7
6	34.5
5	44.0
4	63.7
3	94.0
2	136.2
1	227.1

(b) 6층 구조물

층	가새면적
6	43.4
5	44.5
4	41.4
3	48.2
2	71.5
1	108.6

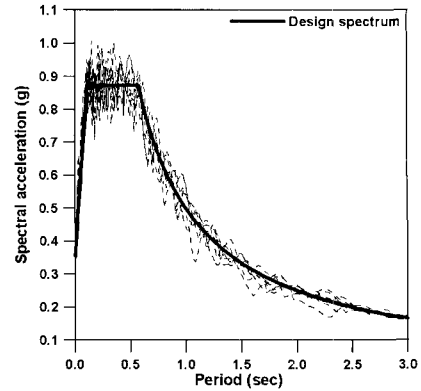
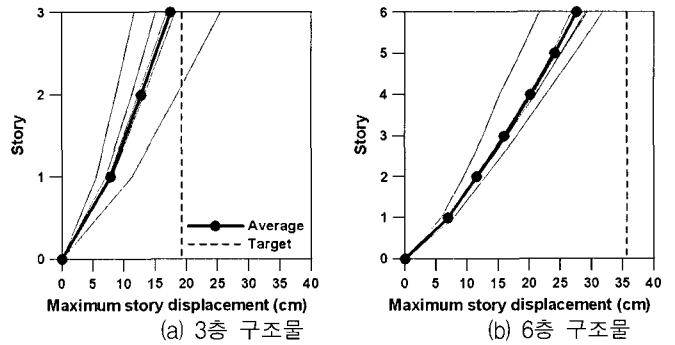
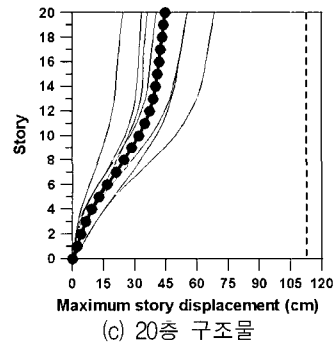


그림 17 설계스펙트럼과 인공지진의 응답 스펙트럼



(a) 3층 구조물

(b) 6층 구조물

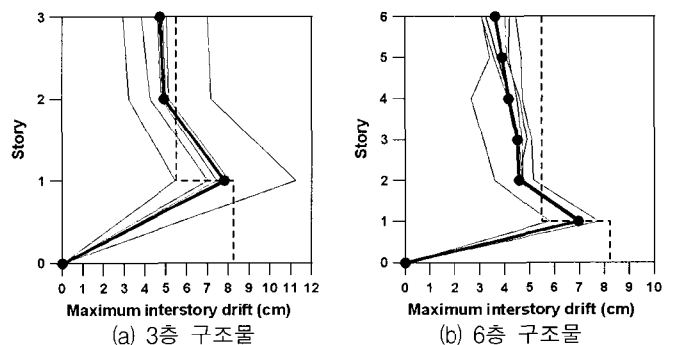


(c) 20층 구조물

그림 18 설계된 구조물의 최대 층변위

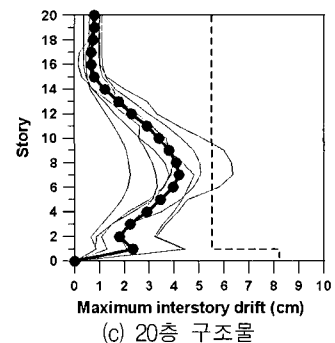
표 6 설계된 구조물의 동적특성

동적특성	층수			
	3층	6층	20층	
주기 (초)	1차 모드	0.597	1.062	4.569
	2차 모드	0.177	0.356	1.210
질량 참여계수	1차 모드	0.937	0.835	0.698
	2차 모드	0.055	0.127	0.153



(a) 3층 구조물

(b) 6층 구조물



(c) 20층 구조물

그림 19 설계된 구조물의 최대 층간변위

## 6.2 등가 에너지를 이용한 설계법의 적합성 평가

본 연구에서 제안한 등가 에너지 개념을 이용한 설계방법의 적합성을 확인하기 위하여 설계응답스펙트럼에 부합되는 인공지진을 SIMQKE<sup>(17)</sup>를 이용하여 7개 생성하였다. 생성된 인공지진의 응답스펙트럼을 보면 설계스펙트럼과 잘 부합되는 것을 알 수 있다(그림 17). DRAIN-2D+<sup>(15)</sup>를 이용한 시간 이력해석 결과를 나타낸 그림 18과 19를 보면 3층 구조물의 최상층 변위와 층간 변위는 목표변위와 비교적 근접한 결과를 얻었다. 그러나 6층과 20층 모델의 경우 최대변위는 목표 변위보다 각각 22%와 60%정도 작게 발생하였다. 이것은 등가



에너지 개념을 이용한 설계방법이 저층 구조물에는 비교적 정확하게 적용되나, 중고층 구조물에는 매우 안전측으로 설계가 됨을 알 수 있다. 3장에서 기술한 바와 같이 등변위 개념이 적용되는 장주기 구조물에 등가 에너지 개념을 적용하여 설계하면 입력되는 에너지를 과대평가하게 되고, 따라서 비좌굴 가새의 단면적도 필요 이상으로 커져서 목표변위보다 과다하게 제어되는 것으로 사료된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 최대 목표변위에서 비탄성 구조물의 이력 거동에 의한 에너지는 등가 탄성 시스템의 에너지와 같다는 등가 에너지 개념을 이용하여 손상방지 비좌굴 가새골조의 설계방법을 제시하였다. 제안된 절차에 따라 3층, 6층, 20층의 예제 구조물을 설계하고 수행한 시간이력해석 결과에 따르면 등가 에너지 개념을 이용한 설계법을 저층 구조물에 적용하는 것은 적절하지만 중층 이상의 구조물에 적용하였을 때는 매우 안전측으로 거동함을 알 수 있다. 이는 철골모멘트 골조에 대한 이전 연구자들<sup>(10)</sup>의 연구결과와 비슷한 경향을 보였다. 즉 예제 구조물의 변위응답을 보면 저층인 3층 구조물은 목표변위에 근접한 층변위와 층간변위를 보였지만 건물의 높이가 높아질수록 층변위와 층간변위가 목표변위에서 멀어지며 과다제어 되는 것을 알 수 있다. 이것은 단주기 구조물의 경우는 등가 에너지 개념이 적용되지만 장주기 구조물의 경우에는 등변위 개념이 적용되기 때문이다. 주기가 길거나 변위연성비가 큰 구조물의 설계에 등가 에너지 개념을 적용하면 입력에너지를 과대평가하여 필요한 비좌굴 가새의 단면적보다 큰 단면적이 산정되기 때문에 구조물의 변위가 과다 제어 된다. 따라서 본 연구에서 제안된 등가 에너지를 이용한 설계법은 저층의 비좌굴 가새골조의 설계에 보다 적합한 것으로 사료된다.

## 감사의 글

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

## 참 고 문 헌

1. Priestley, M. J. N., and Kowalsky, M. J., "Direct displacement-based seismic design of concrete buildings," *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, Vol. 33, No. 4, 2000, pp. 421-444.
2. Chopra, A. K. and Goel, R. K., "Direct displacement-based design: Use of inelastic vs. elastic design spectra," *Earthquake Spectra*, Vol. 17, No. 1, 2001, pp. 47-64.
3. Housner, George, "Limit design of structures to resist earthquakes," *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, California, 1956.

4. 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.
5. 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.
6. Uang, C. M. and Bertero, V. V., "Use of energy as a design criterion in earthquake-resistant design," Report No. UCB/EERC-88/18, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, 1988.
7. Léger, P. and Dussault, S., "Seismic-energy dissipation in MDOF structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1251-1269.
8. Estes, K. R. and Anderson, J. C. "Hysteretic energy demands in multistory buildings," *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 2002.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Newmark, N. M. and Hall, W. J., *Earthquake spectra and design*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California, 1982.
13. 한국지진공학회, 내진설계기준연구 (II), 1997.
14. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," ATC-40, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
15. 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.
16. Mahin, S. A. and Lin, J., *Inelastic response spectra for single degree of freedom systems*, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983.
17. Vanmarcke, E. H. and Gasparini, D. A., *A program for artificial motion generation, user's manual and documentation*, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976.