

# 좌굴이 방지된 가새가 설치된 철골조 건물의 에너지 요구량

## Energy Demand in Steel Structures with Buckling Restrained Braces

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

### 국문요약

본 연구에서는 지진하중에 의하여 철골 모멘트저항골조(MRF)와 좌굴이 방지된 가새골조(BRBF) 그리고 힌지로 접합된 좌굴이 방지된 가새골조(HBRBF) 에서 발생하는 총별 이력에너지의 분포에 대하여 고찰하였다. 예제 구조물의 에너지 요구량을 산정하기 위하여 다른 지반조건에서 계측된 60개의 지진기록을 사용하였다. 해석결과에 따르면 MRF와 BRBF에서의 이력에너지는 밑면에서 최대가 되고 상부층으로 갈수록 점진적으로 감소하여, 상부층에서는 부재의 이력거동이 거의 발생하지 않았다. 그러나 HBRBF에서의 총별 이력에너지는 구조물의 높이에 따라 상대적으로 균등하게 분포하였으며, 이러한 경우 손상이 한 층에 집중적으로 발생하지 않아 다른 시스템에 비하여 보다 바람직하다고 할 수 있다. 연암 지반, 연약한 토사, 단층 근처의 지반조건에 따른 에너지의 분포형태는 거의 동일하게 나타났다.

주요어 : 이력에너지 요구, 좌굴이 방지된 가새, 비탄성 거동, 에너지 분포

### ABSTRACT

In this study, a story-wise distribution of hysteretic energy in steel moment resisting frame(MRF), buckling restrained braced frames(BRBF), and hinge-connected framed structures with buckling restrained braces(HBRBF) subjected to various earthquake ground excitations was investigated. Sixty earthquake ground motions recorded in different soil conditions were used to compute the energy demand in model structures. According to analysis results, the hysteretic energy in MRF and BRBF turned out to be the maximum at the base and monotonically diminishes with increasing height. However the story-wise distribution of hysteretic energy in HBRBF was relatively uniform over the height of the structure. In this case damage is not concentrated in a single story, and therefore it is considered to be more desirable than other systems. The story-wise energy distribution pattern under three different soil types turned out to be approximately the same.

**Key words :** hysteretic energy demand, buckling restrained brace, inelastic behavior, energy distribution

## 1. 서 론

지진으로 인한 구조물의 손상은 반드시 지진력이나 변위 응답의 최대값에 비례하여 발생하는 것이 아니라 최대응답보다 작지만 누적되는 비탄성 변형에 의한 영향도 상당한 비중을 차지한다. 그러나 현행 내진설계 기준은 설계변수로 최대 지진력이나 최대 허용변위 등을 규정하고 있을 뿐 이력특성을 가진 지진하중에 의해 누적된 손상을 고려하지 않고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 에너지 개념을 이용한 설계방법이 활발하게 연구되고 있다. Housner<sup>(1)</sup>에 의해서 입력에너지는 구조물의 속도응답에 비례한다는 연구결과가 발표된 이후 많은 연구자들에 의하여 구조물에 입력되는 에너지와 소산되는 에너지에 대한 연구가 수행되었으며<sup>(2-4)</sup>, 이러한 연구의 대부분은 단자유도계 시스템에 국한되었다. Akbas 등<sup>(5)</sup>은 철골 모멘트저항골조 접합부의 실험결과를 바탕으로 누적된 소성 회전량(cumulative plastic rotation)을 산정한 다음 입력 에너지를 보 양단의 누적된 소성거동에 의하여 소산하도록 하는 설계법을 제시하였다. 그들의 연구에서는 소산되는 에너지는 상부층에서 하부층으로 갈수록 선형으로 증가한다고 가정하였다. Estes 등<sup>(6)</sup>은 다층

철골 모멘트저항골조에서 각 층별 이력에너지 요구량과 등가 단자유도계와 다자유도계의 에너지 요구량에 대한 비교 연구를 수행하였다. 이러한 기존의 연구들은 모두 모멘트저항골조에 국한하여 수행되었다.

좌굴이 방지된 가새(buckling restrained brace, 이하 BRB)<sup>(7)</sup>는 가새의 좌굴을 방지하여 안정적인 이력거동에 의하여 많은 에너지를 소산한다.<sup>(8),(9)</sup> 본 연구에서는 먼저 저층과 중층 모멘트골조에서의 지진에 의한 이력 에너지 분포 상황을 검토하고, BRB가 설치된 구조물의 이력에너지 분포와 비교하였다. 이러한 연구를 통하여 누적된 손상을 포함한 구조물의 거동을 보다 합리적으로 예측하고 에너지에 근거한 설계법에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 에너지 방정식

지진하중을 받는 비선형 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.<sup>(10)</sup>

\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

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

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2003. 1. 16 / 심사종료일 : 2003. 3. 26)

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

첫 번째 항은 지반에 대한 상대운동과 관련된 질량의 운동 에너지(kinetic energy,  $E_k$ )를 나타내고, 두 번째 항은 점성 감쇠에 의하여 소산되는 감쇠에너지(damping energy,  $E_d$ )를 나타낸다. 세 번째 항은 회복 가능한 탄성변형에너지(recoverable elastic strain energy,  $E_s$ )와 회복 불가능한 이력에너지(irrecoverable hysteretic energy,  $E_h$ )로 구성된 구조물에 흡수된 에너지(absorbed energy,  $E_a$ )이다. 그리고 우변 항은 지진에 의해 구조물에 입력되는 입력에너지(input energy,  $E_i$ )를 나타낸다. 이러한 에너지 관계를 정리하면 다음 식과 같다.

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

그림 1은 주기가 1.0초이고 탄성강도에 대한 항복강도의 비 0.4, 감쇠비 5%인 비선형 단자유도계 구조물의 El Centro (NS)지진에 대한 에너지 시간이력을 나타낸다. 비선형 구조물의 경우 대부분의 입력에너지가 감쇠에너지와 이력거동에 의한 이력에너지로 소산함을 알 수 있다.

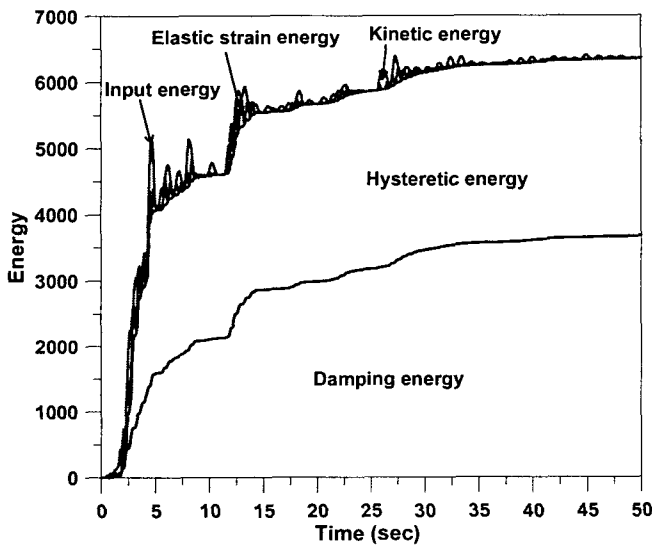


그림 1 단자유도계의 에너지 시간이력

### 3. 좌굴이 방지된 가새골조 시스템

BRB는 큰 지진하중을 받을 때 중심 철골부재가 전체 혹은 국부적인 좌굴이 발생하지 않고 큰 비탄성 변형이 발생하도록 그림 2와 같이 중심부의 철골부재 주위를 강관과 콘크리트로 보강한 것으로 이전의 연구에 의하면 매우 안정적으로 많은 에너지를 소산시킴을 알 수 있다.<sup>(7),(9)</sup>

BRB가 설치된 구조물의 힘-변위 관계는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. BRB가 설치된 시스템의 항복하중  $F_{y1}$ 과  $F_{y2}$ 는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{y1} = F_{by} + K_s u_{by}, \quad F_{y2} = F_{by} \left(1 + \beta \frac{u_{sy}}{u_{by}} - \beta\right) + F_{sy} \quad (4)$$

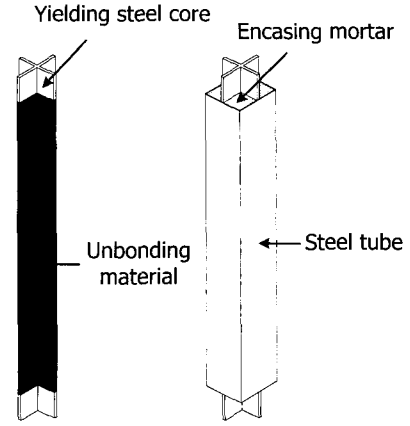


그림 2 BRB의 형상

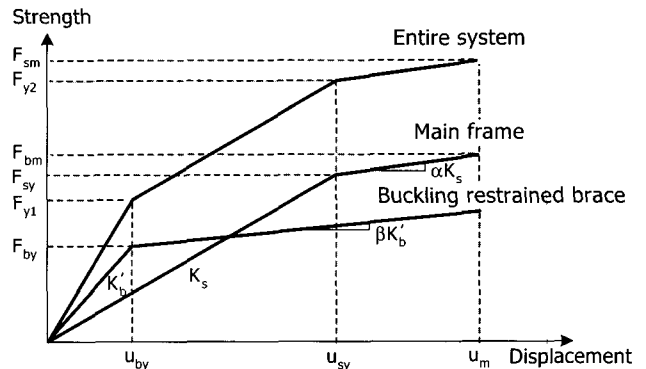


그림 3 BRB가 설치된 구조물의 힘-변위 관계

여기서  $F_{sy}$ ,  $u_{sy}$  그리고  $K_s$ 는 각각 구조물의 항복강도, 항복 변위 그리고 횡강성을 나타낸다. 그리고  $F_{by}$ 와  $u_{by}$ ,  $\beta$ 는 BRB의 항복강도와 항복변위, 항복후 강성비를 나타낸다. BRB의 횡방향 강성( $K'_b$ )은 다음 식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$K'_b = K_b \cos^2 \theta = \frac{A_b E_b}{L_b} \cos^2 \theta \quad (5)$$

여기서  $K_b$ 는 BRB의 축방향 강성이고,  $A_b$ 와  $E_b$ 는 BRB의 단면적과 탄성계수를 나타낸다. 또한  $L_b$ 는 BRB의 좌굴이 구속된 부분의 길이를,  $\theta$ 는 설치된 가새와 보 사이의 각을 나타낸다. 따라서 주어진 구조물의 층강성과 강성비를 이용하면 필요한 가새의 단면적을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_b = \frac{K_b L_b}{E_b} = \frac{K'_b L_b}{E_b \cos^2 \theta} = \frac{(S_r K_s) L_b}{E_b \cos^2 \theta} \quad (6)$$

여기서  $S_r$ 은 가새의 횡방향 강성과 구조물의 강성비이다.

### 4. 예제 구조물과 지진하중

다층 구조물의 층별 이력에너지 분포 형태를 파악하기 위하여 비탄성 동적해석 프로그램인 DRAIN-2D<sup>(11)</sup>를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 예제 구조물은 그림 4에 나타난 바와 같이 3경간 3층, 8층, 20층의 철골 모멘트저항골조(MRF), 좌굴이 방지된 가새골조(BRBF), 같은 구조물의

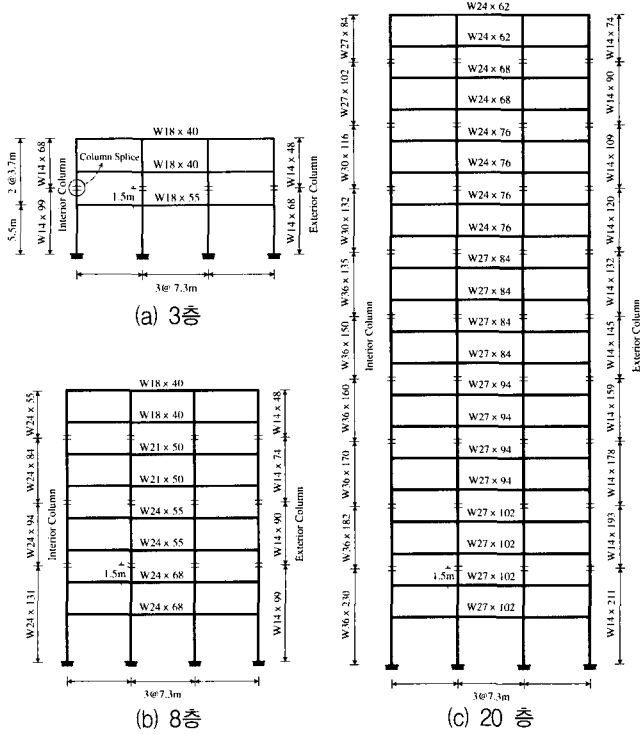


그림 4 예제 구조물

보 양단과 1층 기둥을 힌지로 접합한 힌지접합 가새골조 (HBRBF) 등 모두 9개이다. 각 예제구조물의 경간은 7.3m이고, 1층의 층고는 5.5m, 2층 이후의 층고는 모두 3.7m이다. 모든 층의 무게는 156.8tonf이고 구조물의 감쇠비는 2%로 가정하였다. 가새의 단면적은 표 1과 같고 모드별 주기, 질량참여계수와 모드 참여계수는 표 2와 같다.

해석에 사용된 지진하중은 SAC steel project에서 제시하고 있는 지진기록<sup>(12)</sup>을 사용하였다. 이 project에서는 LA지역의 연암 지반(soft rock), 연약한 토사 지반(soft soil), 단층 근처 (near fault)에서 50년에 발생확률이 10%인 각 지반별로 20개의 지진을 제시하고 있다. 그림 5에 나타난 각 지진의 응답스펙트럼을 살펴보면 다양한 특성을 가진 지진기록이 반영되었음을 알 수 있다.

### 5. 이력에너지 분포

해석모델의 각 층별 이력에너지 요구량을 파악하기 위하여 DRAIN-2D+<sup>(11)</sup>를 이용하여 비선형 시간이력해석을 수행

표 1 좌굴이 방지된 가새가 설치된 구조물의 가새 단면적(cm<sup>2</sup>)

(a) 3층 구조물		(c) 20층 구조물	
층	가새면적	층	가새면적
3	29.4	20	19.2
2	50.4	19	28.3
1	80.3	18	36.8
		17	44.9
		16	52.5
		15	59.7
		14	66.5
		13	72.7
		12	78.5
		11	83.8
		10	88.6
		9	93.0
		8	97.0
		7	100.5
		6	103.5
		5	106.0
		4	108.1
		3	109.7
		2	110.9
		1	142.3

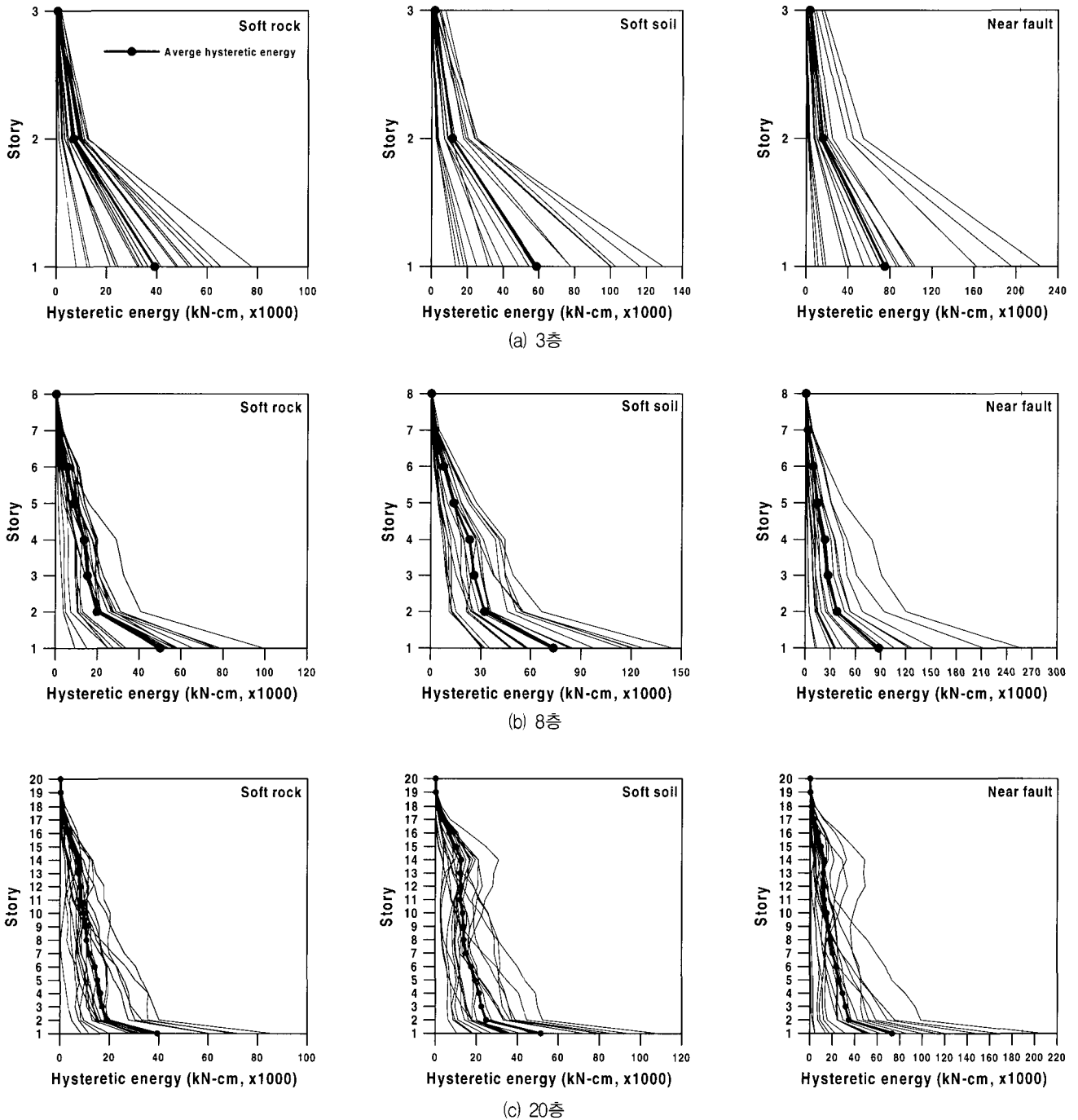
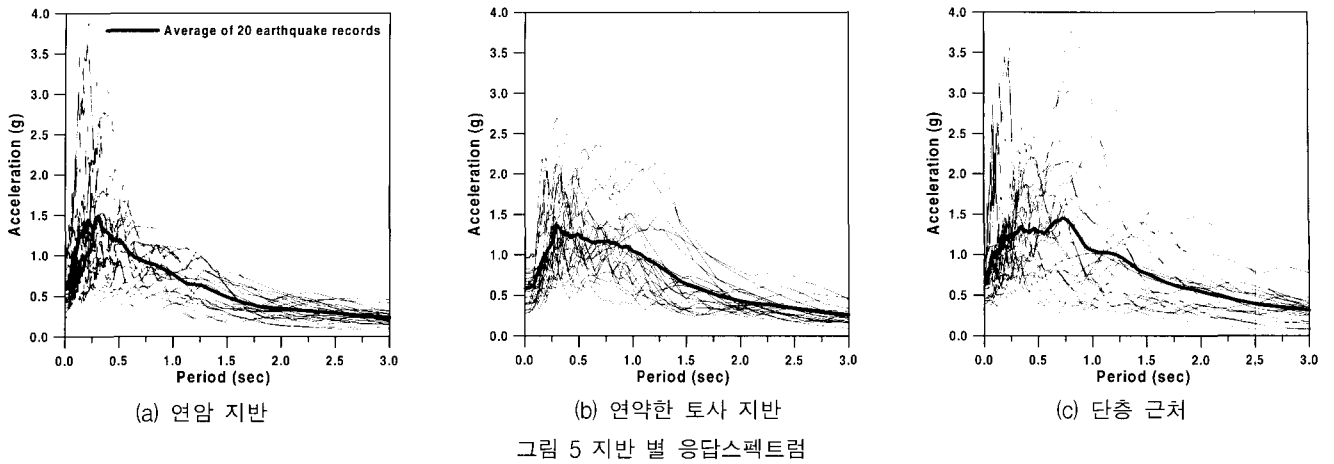
하였다. 보와 기둥의 단부에서만 소성힌지가 발생하고, 항복 후 강성비는 초기강성의 2%이며, BRB는 인장과 압축에서의 항복용력이 같은 이선형 거동을 하며 항복 이후의 강성은 없는 것으로 가정하였다.

각 층별 이력에너지는 MRF의 경우는 해당 층의 기둥과 보에서 소산된 에너지를 더하였고, BRBF의 경우는 보와 기둥 그리고 그 층의 좌굴 방지 가새의 이력에너지의 합으로 나타내었다. 모델의 각 층에서 소산된 이력에너지는 그림 6~8에 나타내었다. 점선은 각 지진하중에 대한 결과의 평균값을 나타낸다.

MRF와 BRBF, HBRBF 모두 연암 지반에서 단층 지반으로 갈수록 전체적인 이력에너지 요구량은 증가함을 알 수 있다. 높이에 따른 이력에너지 분포를 보면 MRF는 그림 6과 같이 2층부터 상부층으로 갈수록 대략 선형적으로 작아지지만 1층에서의 이력에너지는 상당히 많이 증가한다.

표 2 예제 구조물의 동적특성

유형		모멘트 골조			좌굴 방지 가새골조			힌지접합 좌굴 방지 가새골조		
		3층	8층	20층	3층	8층	20층	3층	8층	20층
주기 (초)	1차 모드	0.454	1.168	2.705	0.318	0.747	2.015	0.449	0.987	3.721
	2차 모드	0.138	0.420	0.946	0.108	0.275	0.652	0.155	0.361	0.942
질량 참여계수	1차 모드	0.931	0.829	0.771	0.924	0.809	0.719	0.908	0.790	0.648
	2차 모드	0.061	0.116	0.132	0.066	0.133	0.169	0.082	0.152	0.224
모드 참여계수	1차 모드	1.219	1.348	1.391	1.232	1.388	1.451	1.261	1.429	1.522
	2차 모드	0.302	0.509	0.581	0.307	0.562	0.686	0.334	0.615	0.812



MRF의 경우 내진설계기준에서는 일반적으로 강기둥 약보(strong column weak beam)의 구조물 형식을 권장하고 있는데, 이러한 개념에 의하면 상부층의 보와 1층 기둥의 밀면에 소성변형이 집중됨을 알 수 있다. 이것은 8층 MRF의 보와 기둥에서 발생한 층별 이력에너지지를 나타낸 그림 9를 보면 더욱 명확하게 알 수 있다. 기둥의 경우 상부층에서 발생한 이력에너지지는 무시할 정도로 작지만 1층에서 많은 이력에너지가 발생함을 알 수 있다. 보에서는 이력에너지가 삼각형 형태로 분포되는데, 입력된 에너지가 일부층(특히 저층)에 집중됨으로써 그 층에 심각한 손상을 발생시킨다.

보-기둥 접합부가 강접인 BRBF의 경우 전체시스템의 높이

에 따른 이력에너지의 분포를 보면 MRF와 비슷한 분포형태를 보이고 있다. 그러나 20층의 경우 MRF와 다르게 5층에서 14층까지는 각 층별 이력에너지 요구량이 거의 균등하게 나타났다. 각 구조요소의 에너지 분담을 나타낸 그림 10을 보면 보-기둥과 BRB가 비슷하게 에너지를 소산함을 알 수 있다. 이것은 pushover 해석에 의한 밀면전단력과 최상층 변위의 곡선(그림 12)을 보면 보-기둥과 BRB 시스템의 횡방향 강성이 거의 같기 때문인 것으로 사료된다.

HBRBF의 층별 이력에너지 분포는 그림 8에 나타난 바와 같이 MRF나 BRBF에 비하여 층별로 보다 균등하게 분포됨을 알 수 있다. 특이한 것은 20층 HBRBF의 경우 하부층에서 상부층으로 갈수록 이력에너지가 감소하다가 상부층에

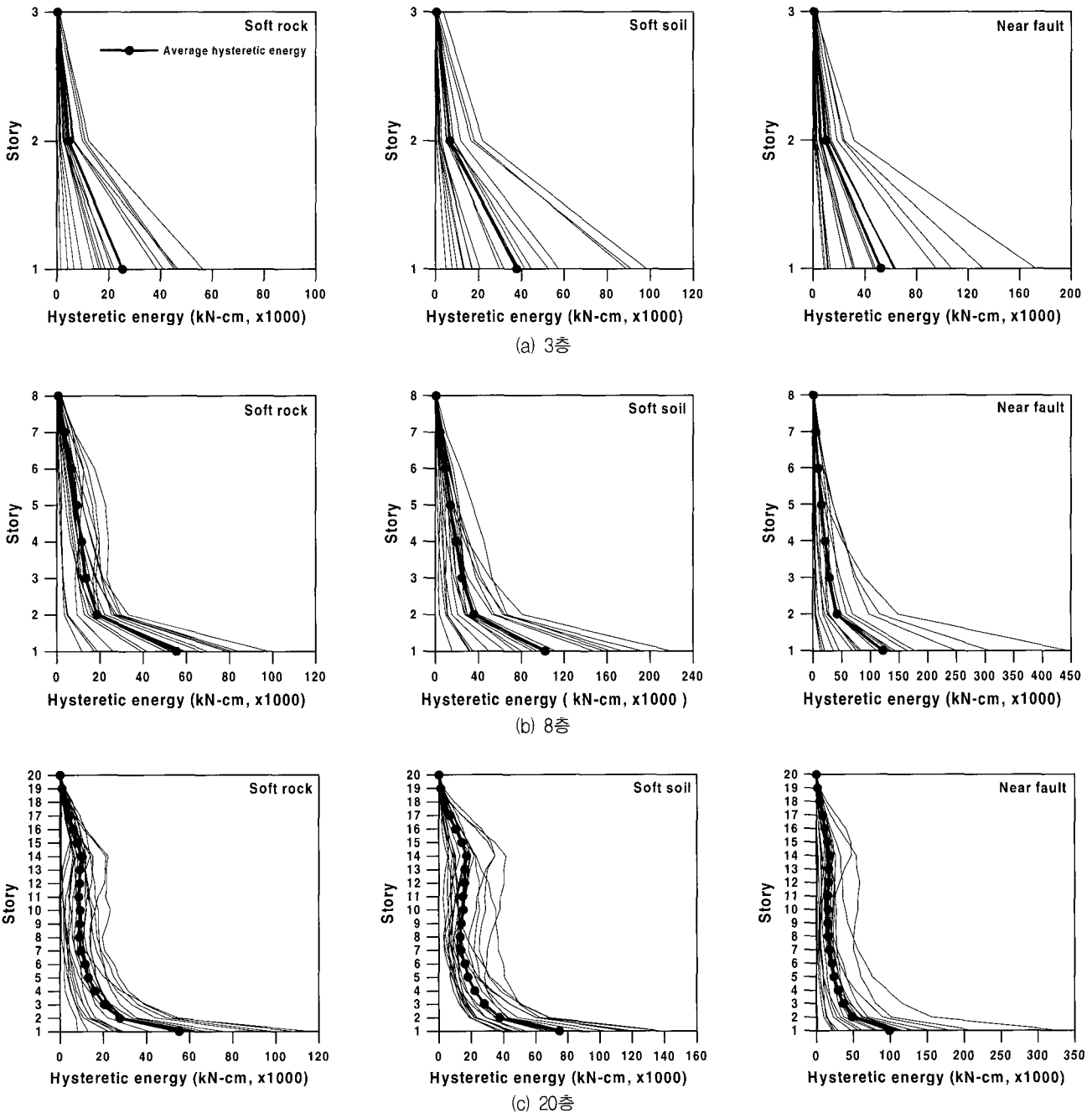


그림 7 좌굴 방지 가새골조 구조물의 층별 이력에너지 분포

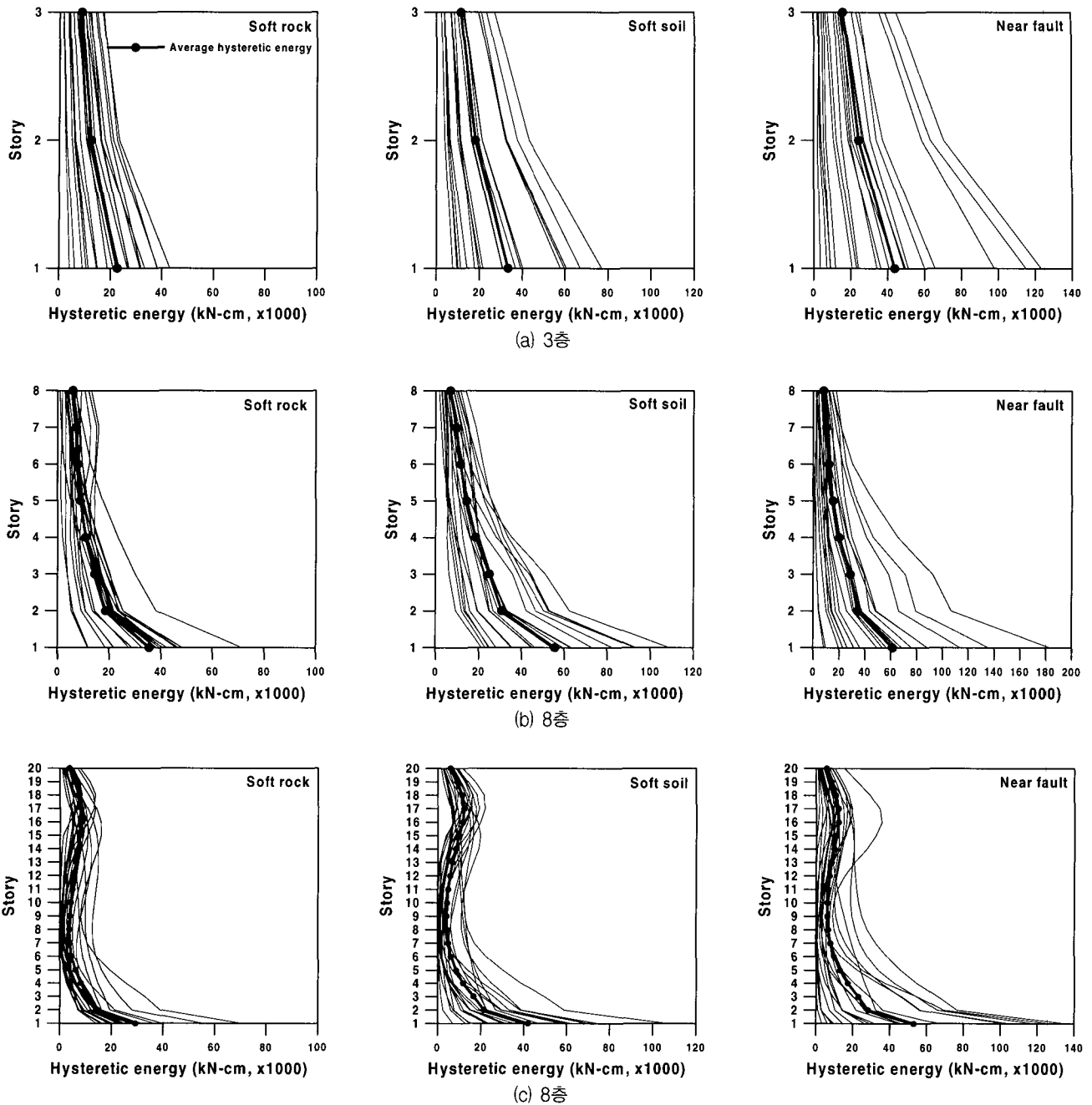


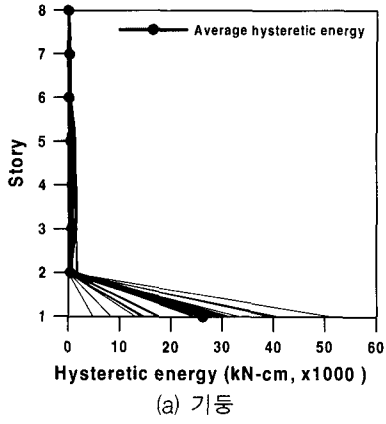
그림 8 힌지접합 좌굴 방지 가새골조 구조물의 층별 이력에너지 분포

서 다시 증가하고 있다. 이러한 현상은 표 2에 나타난 예제 구조물의 동적특성을 보면 20층 HBRBF의 1차 모드 질량 참여율은 64.8%이고 2차 모드 질량참여율은 22.4%로 구조물의 거동이 2차 모드에 의해 많은 영향을 받음을 알 수 있다.

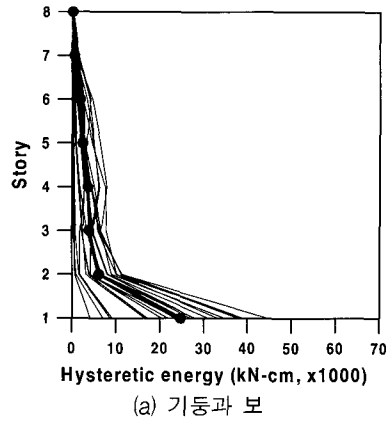
또한 20층 구조물의 1차 모드형상을 나타낸 그림 13에서 볼 수 있듯이 HBRBF의 모드형상은 다른 시스템과는 달리 캔틸레버 모드와 유사하므로, 상부층에서 층간변위가 크게 나타난다. 따라서 고차 모드의 영향과 캔틸레버 모드의 변형으로 인하여 이력에너지 분포가 중간층에서는 작아졌다가 상부층에서 다시 증가되는 현상이 발생한 것으로 사료된다. 기둥과 보 그리고 BRB에서 발생한 이력에너지를 나타낸 그림 11에 따르면 대부분의 손상은 BRB에 집중되어 발생함을

알 수 있다. 또한 이력에너지도 1층을 제외한 모든 층에서 거의 일정하게 발생하는 것을 볼 수 있다.

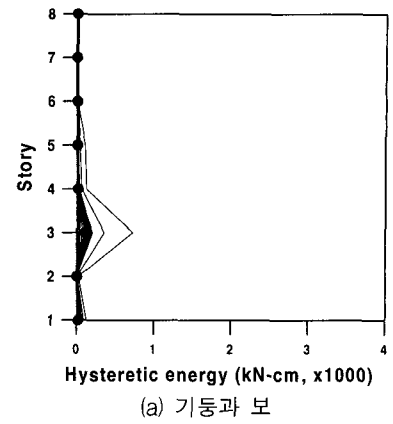
지반 특성에 따른 이력에너지의 분포 형태를 살펴보기 위하여 모든 경우에 대하여 1층의 이력에너지를 기준으로 나타내었다. 그림 14~16에 따르면 지반 조건에 따른 평균 이력에너지의 분포형태는 큰 변화를 보이지 않는다. MRF와 BRBF는 1층에서의 이력에너지요구가 급격하게 증가하지만 HBRBF는 두 시스템에 비하여 변화량이 작았다. 구조형식과 지반조건에 따라 각 예제구조물의 전체 이력에너지의 정량적인 변화를 알아보기 위하여 각 층에서 연암지반의 MRF를 기준으로 그 비를 표 3에 나타내었다. 같은 구조 시스템에서는 연암지반에서 단층지반으로 갈수록 전체 이력에너지가 증가함을 알 수 있다.



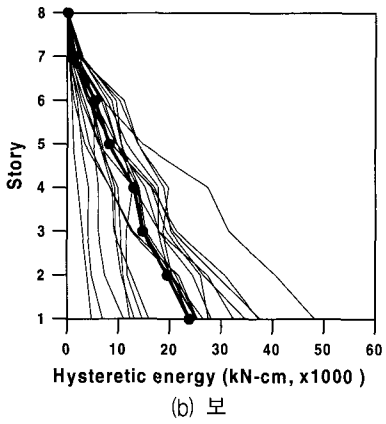
(a) 기둥



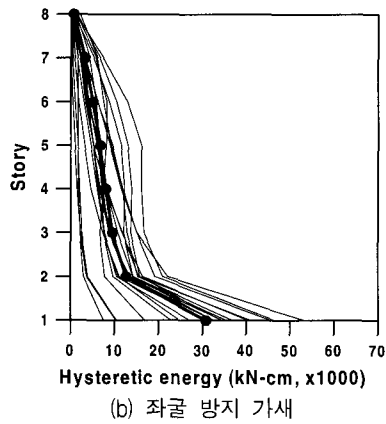
(a) 기둥과 보



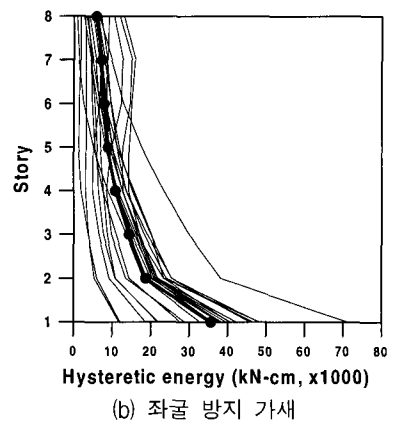
(a) 기둥과 보



(b) 보



(b) 좌굴 방지 가새



(b) 좌굴 방지 가새

그림 9 기둥과 보의 이력에너지 분포 (MRF, 연암지반)

그림 10 기둥-보와 BRB의 이력에너지 분포 (BRBF, 연암지반)

그림 11 기둥-보와 BRB의 이력에너지 분포 (HBRBF, 연암지반)

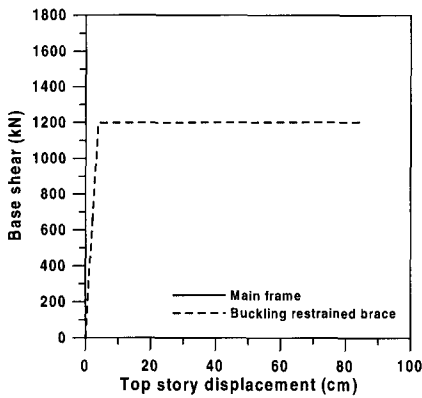


그림 12 최상층 변위와 밀면전단력 곡선(8층, BRBF)

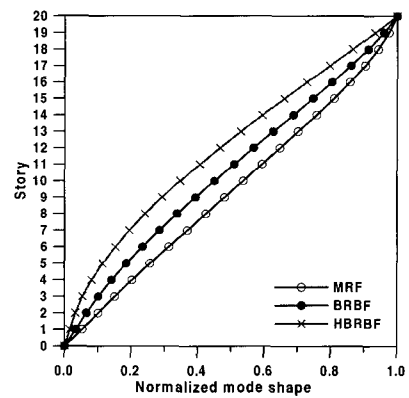
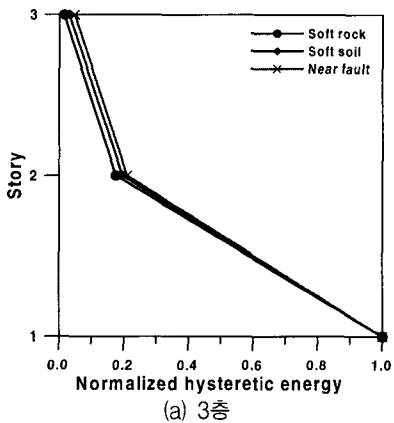
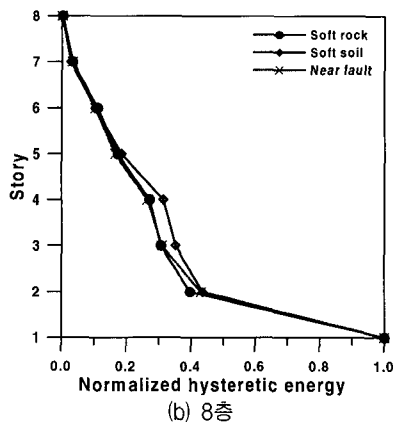


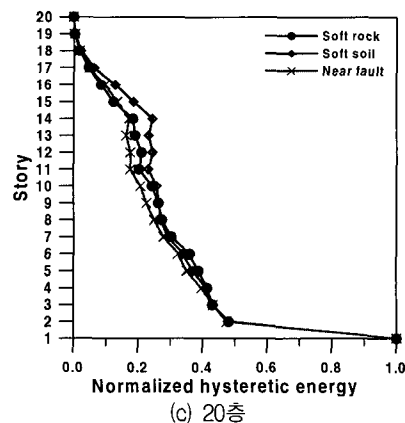
그림 13 20층 구조물의 1차모드형상



(a) 3층



(b) 8층



(c) 20층

그림 14 모멘트골조의 지반에 따른 평균 이력에너지의 분배비

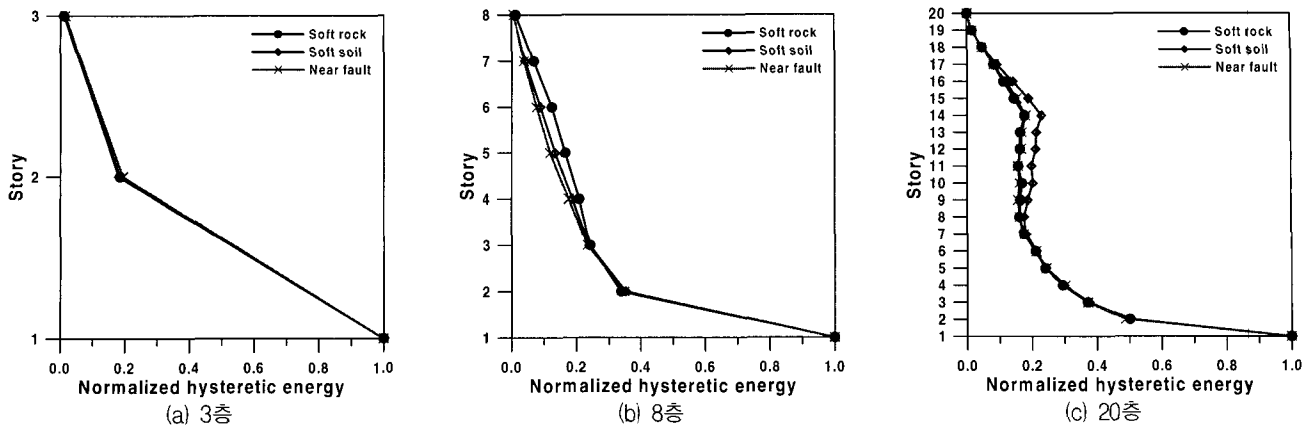


그림 15 좌굴 방지 가새골조의 지반에 따른 평균 이력에너지의 분배비

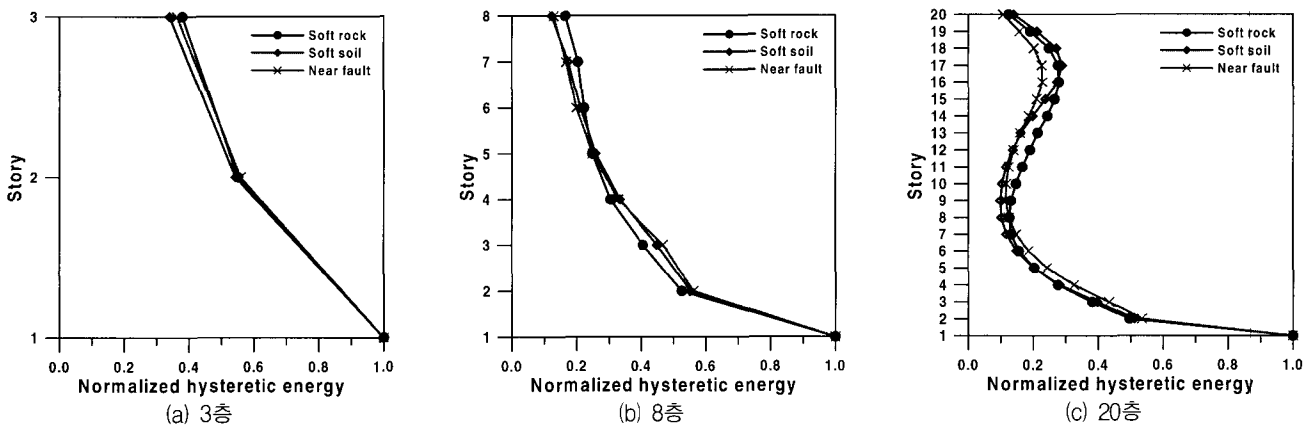


그림 16 힌지접합 좌굴 방지 가새골조의 지반에 따른 평균 이력에너지의 분배비

표 3 구조형식과 지반조건에 따른 구조물의 전체 이력에너지(kN-cm, x1000)

층		3층			8층			20층		
구조형식	지반조건	Soft rock	Soft soil	Near fault	Soft rock	Soft soil	Near fault	Soft rock	Soft soil	Near fault
MRF	Sum	46.69	72.20	94.53	115.02	178.23	202.74	205.62	282.01	360.59
	Ratio	1.000	1.546	2.024	1.000	1.550	1.763	1.000	1.372	1.754
BRBF	Sum	30.18	45.03	63.29	119.46	208.96	243.18	240.01	353.30	430.73
	Ratio	0.646	0.964	1.355	1.039	1.817	2.114	1.167	1.718	2.095
HBRBF	Sum	43.87	62.82	84.29	109.45	173.03	190.77	153.80	209.42	262.96
	Ratio	0.939	1.345	1.805	0.952	1.504	1.659	0.748	1.018	1.279

## 6. 결 론

구조물의 이력에너지 소산에 대한 기존 연구는 대부분 단자유도계에 국한되었으며, 다층 건물의 층별로 소산되는 에너지는 단순히 선형으로 분포한다고 가정하는 것이 일반적인 방법이다. 본 연구에서는 보다 정확한 층별 이력에너지 분포 형상을 파악하기 위하여 철골 모멘트저항골조, 좌굴 방지 가새골조, 보와 기둥이 힌지로 접합된 힌지접합 좌굴 방지 가새골조의 지반 조건에 따른 층별 이력에너지 분포 형상에 대하여 연구하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 모멘트저항골조의 경우 이력에너지는 상부층으로 갈수록 줄어드는 삼각형 형태를 보였고 상부층에서는 이력거동

이 거의 일어나지 않았다. 보-기둥 접합부가 강접인 좌굴 방지 가새골조의 경우 모멘트저항골조와 비슷한 분포 형태를 보이고 있다. 그러나 20층의 경우 모멘트저항골조와 다르게 5층에서 14층까지는 각 층별 이력에너지 요구량이 거의 균등하게 나타났다. 힌지접합 좌굴 방지 가새골조는 구조물 전체에 걸쳐 비교적 균등하게 이력에너지가 발생하였다.

2) 모멘트저항골조는 저층, 중층과 고층 구조물에서 모두 비슷한 분포 양상을 보였는데 20층 힌지접합 좌굴 방지 가새골조는 중간층에서 이력에너지가 줄었다가 상부층에서 다시 증가하였다. 이는 고차모드의 영향 때문인 것으로 사료된다.

3) 연암 지반, 연약한 토사 지반, 단층 근처의 지반 조건에



따른 이력에너지 분포를 살펴보면 세 가지 구조시스템 모두 지반 조건에 관계없이 비슷한 분포양상을 보였다.

이상의 결과를 요약하면 힌지접합 가새골조가 보다 효과적으로 지진에너지를 소산함을 알 수 있다. 본 연구의 결과는 에너지를 이용한 부재설계에 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 본 연구는 층별로 시스템별로 모두 9개의 예제 구조물을 이용하였기 때문에 일반적인 결과를 이끌어 내는데는 충분하지 않다고 판단된다. 따라서 추후에 좀 더 다양한 구조물에 대한 해석을 통하여 일반적인 에너지 분포형태에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00025-0) 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- Housner and George, "Limit design of structures to resist earthquakes," *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*, Berkeley, California, 1956.
- Zahrah, T. and Hall, J., "Earthquake energy absorption in SDOF structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, No. 8, 1984, pp. 1757-1772.
- 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.
- Chou, C. C. and Uang, C. M., "Evaluation of site specific energy demand for building structures," *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 2002.
- 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.
- Estes, K. R. and Anderson, J. C., "Hysteretic energy demands in multistory buildings," *Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 2002.
- Clark, P. W., Aiken, I. D., Tajirian, F. F., Kasai, K., Ko, E., and Kimura, I., "Design procedures for buildings incorporating hysteretic damping devices," *Int. Post SmIRT Conf. Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibrations of Structures*, Cheju, South Korea, 1999.
- Huang, Y. H., Wada, A., Sugihara, H., Narikawa, M., Takeuchi, T., and Iwata, M., "Seismic performance of moment resistant steel frame with hysteretic damper," *Proceedings of the Third International Conference STESSA*, Montreal, Canada, 2000.
- Yamaguchi, M., Yamada, S., Wada, A., Ogihara, M., Narikawa, M., Takeuchi, T., and Maeda, Y., "Earthquake resistant performance of moment resistant steel frames with damper," *Proceedings of the Third International Conference STESSA*, Montreal, Canada, 2000.
- Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995.
- 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/R8607, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 1997.
- 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.