

# 지진하중 특성에 따른 구조물의 에너지 요구량

## Seismic Energy Demand of Structures Depending on Characteristics of Earthquakes

최 현 훈\*  
Choi, Hyunhoon

김 진 구\*\*  
Kim, Jinkoo

### ABSTRACT

In this study the influences of ground motion characteristics and structural properties on energy demands were evaluated using 100 earthquake ground motions recorded in different soil conditions, and the results were compared with those of previous works. Results show that ductility ratios and the site conditions have significant influence on input energy. The ratio of hysteretic to input energy is considerably influenced by the ductility ratio and damping ratio, while site condition has minor effects.

### 1. 서 론

구조물의 사용연한 동안 발생 가능한 여러 단계의 지진에 대해 구조물의 성능을 보다 명확하게 예측하고 이를 설계에 반영하고자 SEAOC Vision 2000 위원회에서 발간한 “성능에 기초한 내진공학”에 대한 보고서<sup>(1)</sup>에서는 성능에 기초한 내진설계의 방법론 중 하나로 에너지를 이용한 내진설계에 대한 개념적인 절차와 그 장단점을 소개하였다. 이후 이러한 상위개념의 내진설계 방법을 실제 구조물의 내진설계에 적용하기 위한 에너지를 이용한 상세한 내진설계에 대한 연구<sup>(2-4)</sup>가 수행되었다. 에너지를 이용한 내진설계는 1980년대부터 본격적으로 지진에 의해 구조물에 입력되는 에너지와 구조물에서 소산되는 에너지에 대한 다양한 연구가 수행되었다.<sup>(5-9)</sup> 그러나 연구자들에 따라 유사한 결과를 보인 경우도 있지만 경우에 따라서는 서로 상반된 결과를 보이는 경우도 있다. 특히 에너지를 이용한 내진설계의 주요 변수인 입력에너지, 이력에너지와 입력에너지에 대한 이력에너지비에 대한 산정방법과 이에 대한 주요 영향인자에 대하여 연구자들의 일치된 합의가 이루어지지 않았다. 이것은 해석에 사용된 지진기록의 개수와 특성, 그리고 개별 지진에서 구한 결과와 여러 가지 지진의 평균값으로 산정한 결과의 차이로 인하여 발생하는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 지반조건, 지진하중의 크기와 같은 지진하중의 특성과 구조물의 주기, 변위연성비, 감쇠비, 항복후 강성비가 에너지 요구에 미치는 영향에 대하여 해석을 수행하여 기존 연구결과와 비교하였다. 연구 결과의 보편성과 타당성을 확보하기 위해서는 충분히 많은 지진기록이 필요하며, 본 연구에서는 SAC Steel Project<sup>(10)</sup>에서 사용된 100개의 지진기록을 사용하였다.

\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사과정

\*\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 부교수

## 2. 상대에너지와 절대에너지

에너지 관계식은 구조물의 기초는 지반에 고정되어 있다고 가정하고 각 질량에 가해지는 등가 지진하중에 의한 구조물의 상대변위에 기초한 상대에너지(그림 1(a))와 지반의 변위 ( $x_g$ )와 구조물의 상대변위 ( $x$ )를 더한 절대변위 ( $x_t$ )를 이용한 절대에너지가 있다 (그림 1(b)).

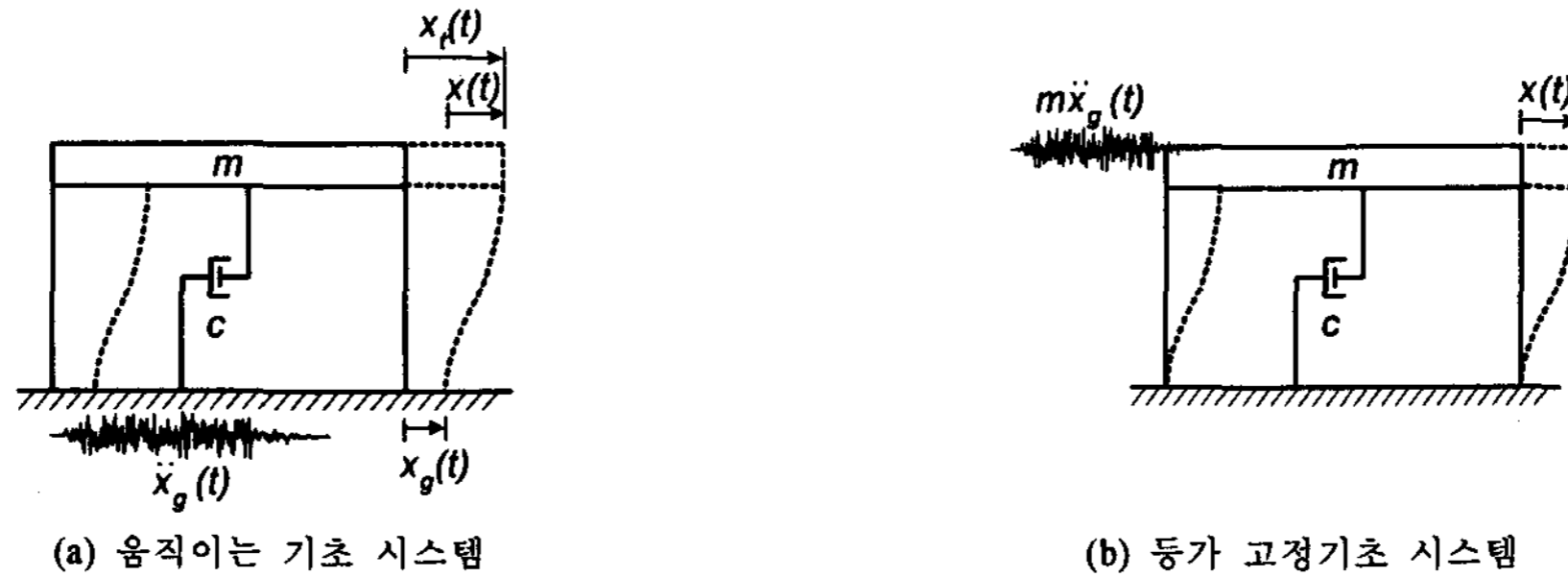


그림 1. 지진하중을 받는 단자유도 시스템

Uang과 Bertero<sup>(6)</sup>는 두 에너지를 비교한 다음 단주기 영역에서 구조물의 강체병진운동을 반영할 수 있는 절대에너지가 물리적으로 더 의미 있는 에너지라고 주장하였고, Chopra<sup>(11)</sup>는 구조물의 내력은 상대변위와 상대속도를 이용하여 계산되기 때문에 상대에너지가 절대에너지보다 중요한 응답이라고 주장하였다. 가장 단순한 형태인 사각형 펄스(pulse)와 사인파 하중에 대한 단자유도계 구조물의 절대에너지와 상대에너지를 비교·분석한 Bruneau와 Wang<sup>(12)</sup>의 연구결과에 따르면 절대에너지는 하중의 입력이 끝난 다음에도 입력에너지의 변동(fluctuation)이 발생하는 문제점이 있고 공학적 관점에서 상대에너지가 더 의미있다고 결론지었다. 이러한 두 에너지의 차이는 입력에너지와 운동에너지에서 발생한다. 그러나 절대와 상대에너지 모두 지진하중의 입력이 끝나는 부분에서는 전체 에너지양이 같아진다. 또한 Uang과 Bertero<sup>(6)</sup>의 연구결과에 의하면 주기가 0.3 ~ 5.0초 구간에서 두 입력에너지는 거의 같다. 에너지를 이용한 내진설계에서는 무엇보다도 구조부재의 이력 거동에 의한 이력에너지가 주요 설계변수이고 이력에너지는 상대변위에 근거하여 계산되기 때문에 절대와 상대에너지와 같은 산정방법에 영향을 받지 않는다. 따라서 본 연구에서는 상대에너지를 기준으로 지진하중과 구조물의 특성에 따른 에너지 변화를 살펴보았다.

## 3. 해석에 사용된 지진하중

해석에 사용된 지진하중은 SAC Steel Project에서 제시하고 있는 지진기록<sup>(10)</sup>을 사용하였다. 강진 지역인 LA 지역의 단단한 토사(stiff soil) 지반, 연약한 토사(soft soil) 지반, 단층 근처(near fault) 지반과, 약진지역인 Boston 지역의 단단한 토사 지반과 연약한 토사 지반에서, 50년에 발생확률이 10%인 각 지반별 20개씩 모두 100개의 지진기록을 이용하여 해석을 수행하였다. 그림 2와 3에 나타난 각 지진의 응답스펙트럼을 살펴보면 다양한 특성을 가진 지진기록이 반영되었음을 알 수 있다.

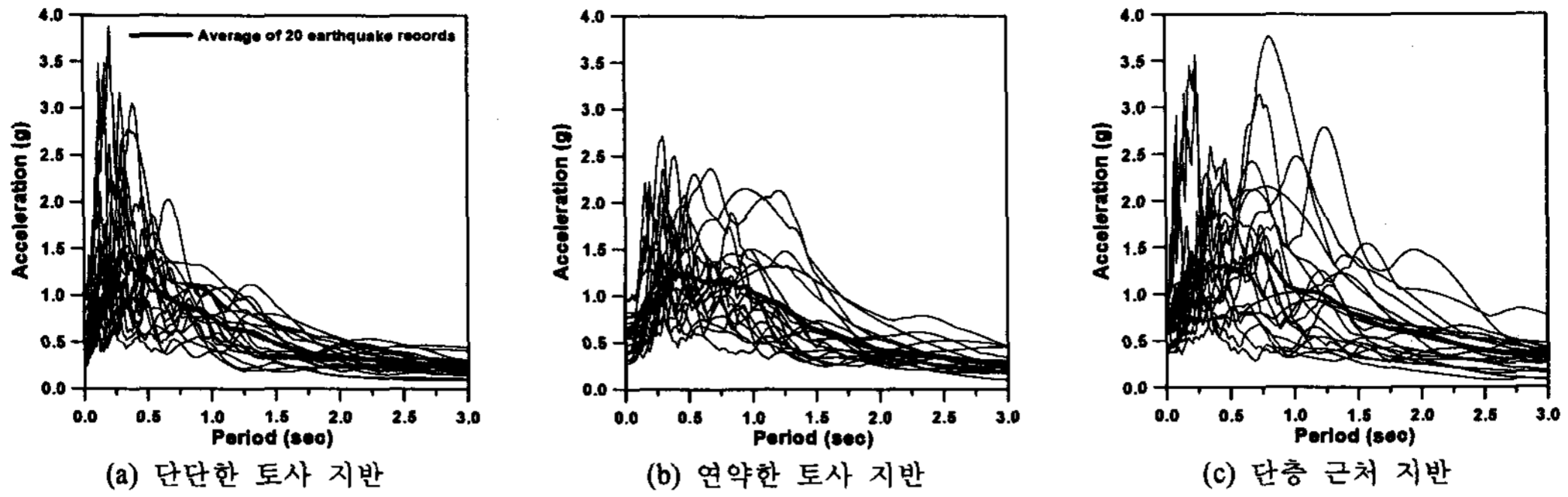


그림 2. LA 지역의 지반조건별 응답스펙트럼

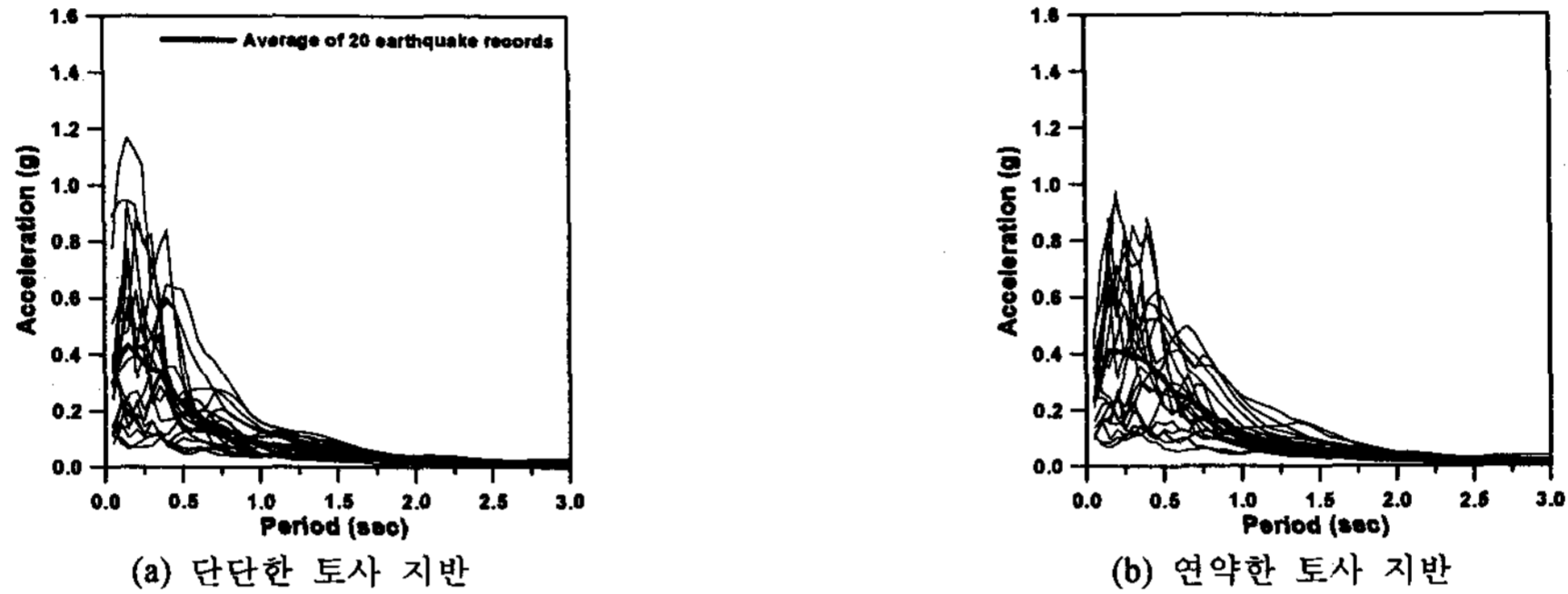


그림 3. Boston 지역의 지반조건별 응답스펙트럼

#### 4. 지반조건과 구조물 특성에 따른 에너지 변화

에너지를 이용한 내진설계에서 중요한 설계변수는 지진하중에 의해 구조물에 입력되는 에너지와 구조물의 이력거동에 의해 소산되는 이력에너지이다. 본 연구에서는 Mahin과 Lin<sup>(13)</sup>이 개발한 단자유도계 시스템의 비탄성 시간이력해석 프로그램인 NONSPEC을 수정하여 입력에너지와 소산되는 에너지를 구하였다. 해석에 사용된 구조물은 항복 후 강성이 없고( $\alpha=0$ ) 이선형 이력거동을 하는 단자유도계 시스템으로 주기 간격은 0.05초 간격으로 5초까지 전체 100개 시스템이다. 에너지 응답은 지반조건별로 20개 지진에 대하여 시간이력해석을 수행하여 평균응답을 나타내었다.

##### 4.1 입력에너지와 이력에너지

Zahrah와 Hall<sup>(5)</sup>은 8개 지진기록을 이용하여 변위연성비( $\mu$ )에 따라 입력에너지의 변화는 거의 없다고 보고하였고 Uang과 Bertero<sup>(6)</sup>도 El Centro(1940, N00E) 지진과 San Salvador(1986, N90E) 지진에 대한 절대입력에너지는  $\mu$ 의 영향이 매우 작다는 결론을 내렸다. 이외에도 유사한 연구결과들이 몇몇 연구자들에 의해 발표되었다.<sup>(14-15)</sup> 그러나 40개 지진하중으로부터 평균 입력에너지를 구한 Fajfar와 Vidic의 연구결과<sup>(7)</sup>에 따르면 주기가 0.4초보다 긴 주기영역에서는 변위연성비( $\mu$ )가 커지면 입력에너지는 작아지고 반면 이보다 짧은 주기영역에서는 중·장주기 영역보다 영향이 작았지만  $\mu$ 가 커질수록 입력에너지가 증가하였다. 또한 Decanini와 Mollaioli<sup>(9)</sup>의 해석결과에 의하면 단주기 부분을 제외하고 입력에너지에 대한  $\mu$ 의 영향이 컸고 Khashae 등<sup>(16)</sup>은 강한 지진파의 지속시간이 긴 지진과 10개와 짧은 지진과 10개의 지진하중에 대한 개별 시간이력해석결과를 보면 두 부류의 지진과 모두 최대 응답이 발생하는 주기 부근에서  $\mu$ 가 커질수록 입력에너지가 감소하였다. 이렇듯 입력에너지에 대한 변위연성비의 영향은 개별 지진하중에 대한 해석결과에서는 그 영

향이 매우 작거나 없는 경우도 있고,<sup>(5-6)(14-15)</sup> 반대로  $\mu$ 의 변화에 따라 입력에너지가 많이 변하는 경우도 있다.<sup>(9)(16)</sup> 이러한 개별 지진에 대한 해석은 지진하중의 특성에 따른 응답변화를 분석하는데 의미가 있지만, 에너지를 이용한 내진설계를 위한 설계를 위한 입력에너지를 산정할 때는 오히려 고려한 지역에서 발생 가능한 많은 수의 지진하중들의 평균응답이 구하는 것이 더 설계변수로써 적합할 것으로 사료된다.

그림 4와 5는 변위연성비( $\mu$ )에 따른 단위 질량에 대한 입력에너지의 변화를 나타낸 것으로, LA 지역 지진의 경우 대략 주기가 1.5초까지 입력에너지가 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보이고 있는데, 주기가 약 0.5초 보다 작은 경우에는  $\mu$ 의 영향이 거의 없으나, 그 이후에는  $\mu$ 가 증가할수록 입력에너지는 작아지는 것으로 나타났다. Boston 지역 지진의 경우도 주기가 0.5초 부근까지 입력에너지가 증가하다가 다시 감소하였다.  $\mu$ 에 따른 입력에너지의 감소 폭은 강진지역보다 약진지역이 작게 나타났는데, Boston 지역의 경우 대략 주기가 2초 이상에서는  $\mu$ 에 따른 입력에너지의 변화가 급격히 작아짐을 알 수 있다. 지반조건별로 입력에너지의 크기는 단단한 토사 지반의 에너지가 가장 작았고 단층 근처 지반의 입력에너지가 가장 컸다. 이것은 가속도의 크기는 단단한 토사 지반이 컸지만  $\mu=4.0$ 에 대한 상대속도를 나타낸 그림 6을 보면 단층 근처 지반의 지진파는 충격과 성분이 강하여 다른 지반보다 속도응답이 크기 때문에 입력에너지도 크다.

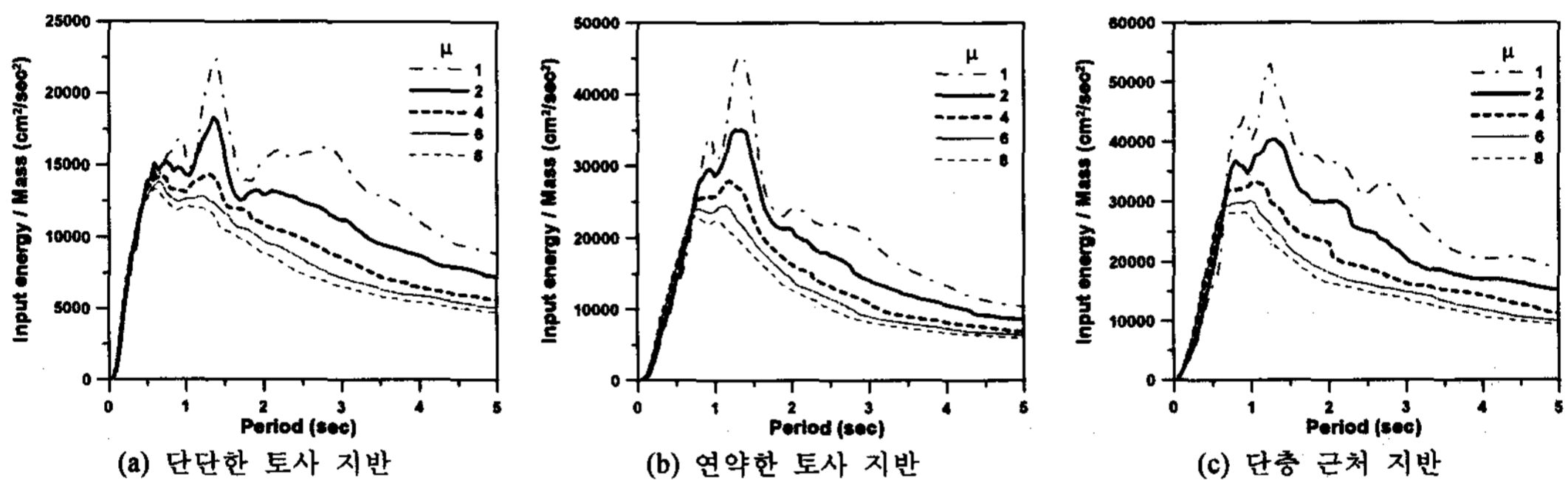


그림 4. LA 지역의 지반조건별 입력에너지 스펙트럼

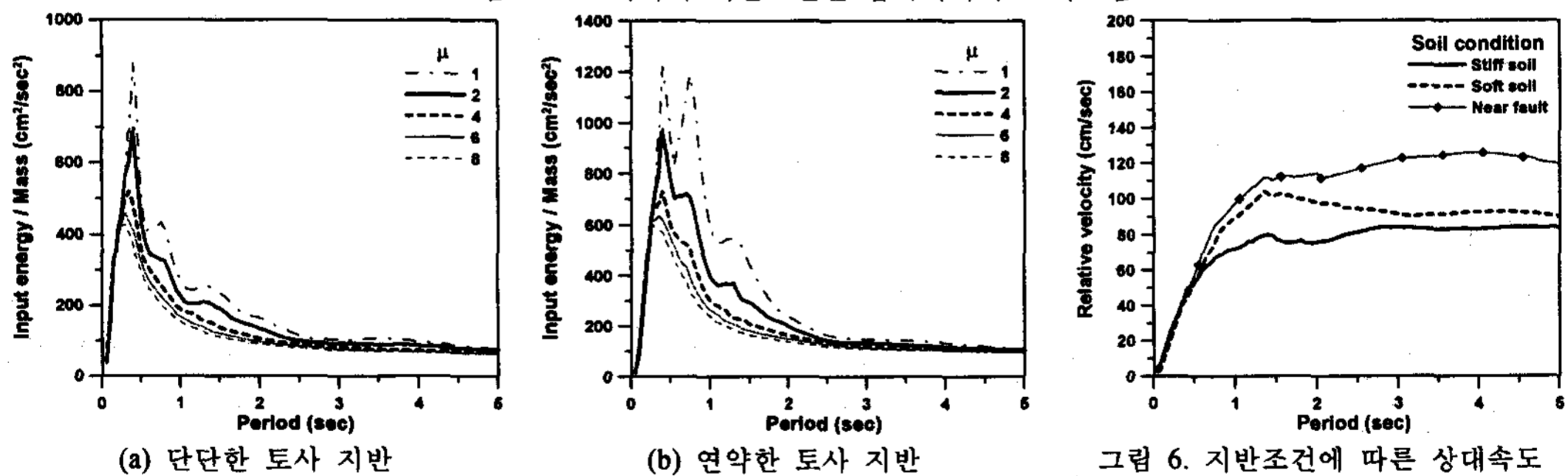


그림 5. Boston 지역의 지반조건별 입력에너지 스펙트럼

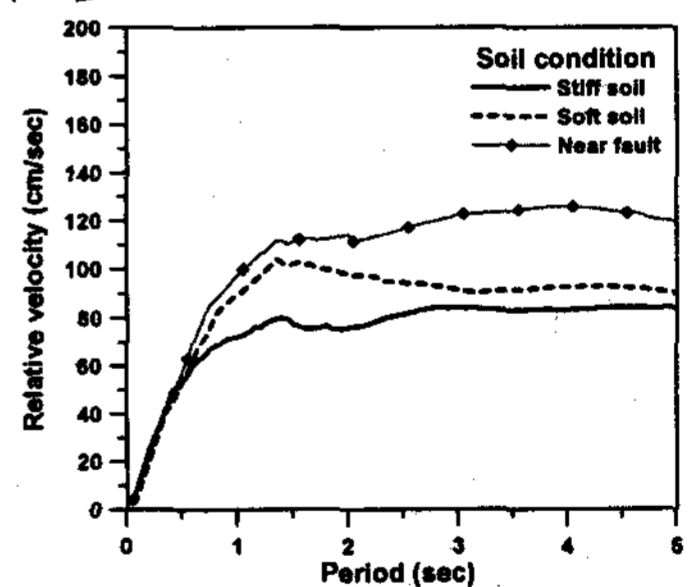
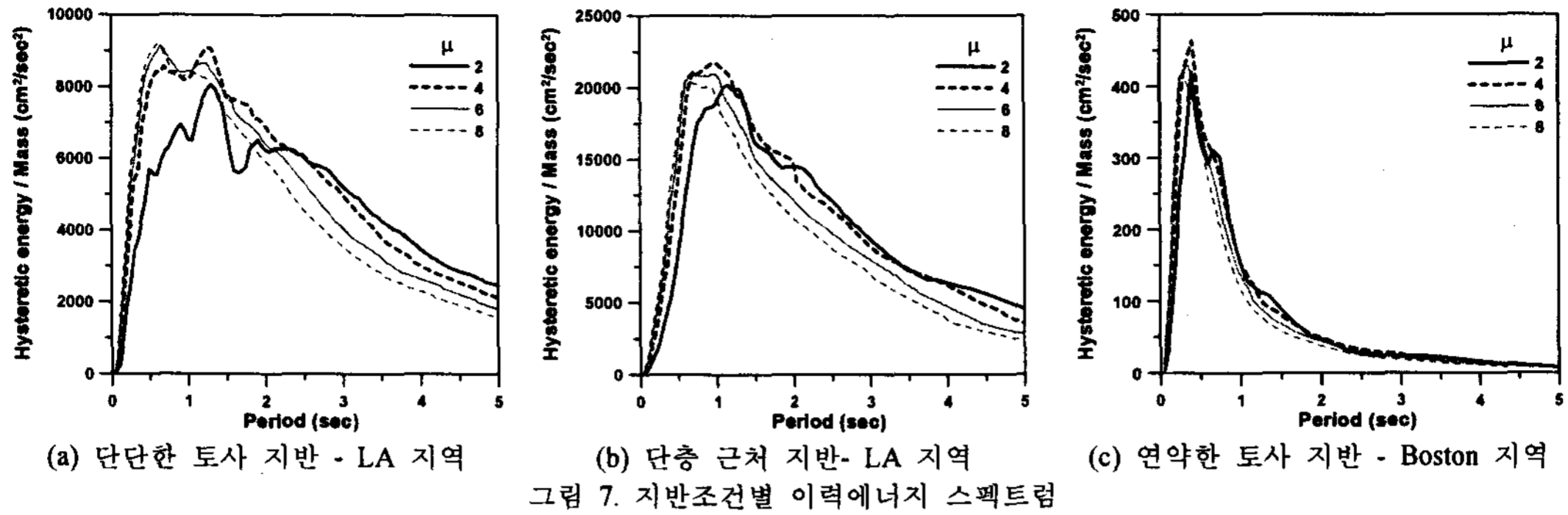


그림 6. 지반조건에 따른 상대속도 (LA 지역,  $\mu=4.0$ )

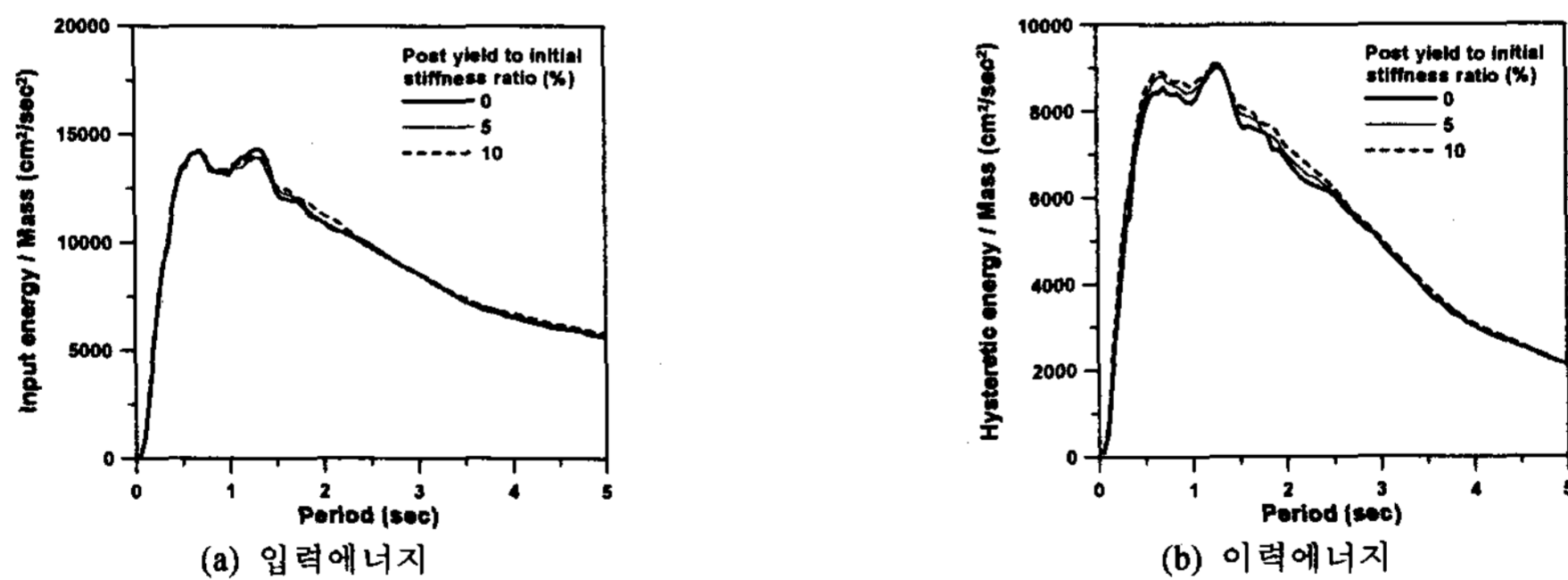
이력에너지는 지반조건이나 강진지역과 약진지역에 관계없이 유사한 형태를 보였다(그림 7). 이력에너지 스펙트럼을 보면 LA 지역의 스펙트럼은 주기가 1초 부근에서 Boston 지역의 스펙트럼은 대략 0.5초를 기준으로 이 주기보다 짧은 주기 영역에서는 변위연성비( $\mu$ )가 증가할수록 이력에너지 요구량도 증가하였지만, 이보다 긴 주기영역에서는 반대의 경향을 보였다. 이러한 역전현상은 목표 변위연성비가 증가할수록 더 짧은 주기에서 발생하였다. 이것은 주기가 짧은 구조물에서는  $\mu$ 가 커질수록 이력면적이 커지지만 주기가 긴 경우에는  $\mu$ 가 커질수록 오히려 이력면적이 감소하



기 때문이다. 따라서 주기가 긴 구조물인 경우 목표 변위연성비가 증가할수록 이력에너지는 오히려 감소하게 된다.

변위연성비가 아닌 사이클 변위연성비( $\mu_c$ )에 따른 이력 에너지를 구한 Manfredi<sup>(17)</sup>의 연구결과에 의하면 전체 주기영역에 대하여  $\mu_c$ 가 커질수록 이력에너지는 증가하였다.  $\mu_c$ 는 양의  $\mu^+$ 와 음의  $\mu^-$ 의 합에서 1을 뺀 값으로 전체 이력곡선의 연성비를 나타내는데, 이는 한쪽 방향으로 치우친 이력거동도 반영할 수 있지만 설계단계에서는 이러한 사이클 변위연성비보다 어느 한 방향에서 발생한 최대 변위연성비( $\mu$ )가 더 의미 있는 변수라고 사료된다.

항복 후 강성비( $\alpha$ )에 따른 입력에너지와 이력에너지의 변화를 살펴보기 위하여  $\alpha=0, 0.05, 0.1$ 인 구조물에 대하여  $\mu=4.0$ 에 대한 에너지를 구하였다. 해석결과에 따르면 그림 8과 같이 항복 후 강성비는 입력에너지와 이력에너지 모두에 별다른 영향이 없었다. 이런 결과는 항복 후 강성비가 에너지 응답에 영향이 매우 적다는 Zahrah와 Hall<sup>(5)</sup>의 연구결과와 단단한 토사 지반과 경암 지반에 대하여 입력에너지에 대한 구조물의 이력모델의 영향은 적다는 결과<sup>(9)</sup>와 유사하였다. 그러나  $\alpha$ 를 0에서 0.75까지 변화시키면서 에너지의 변화를 분석한 Nakashima 등<sup>(15)</sup>은  $\alpha$ 가 작은 경우는 거의 영향이 없지만  $\alpha=0.75$ 인 경우 다른 항복 후 강성비를 가진 구조물에 비하여 최대 에너지가 발생하는 부근에서 에너지가 커진다고 보고하였다.



#### 4.2 입력에너지에 대한 이력에너지비

에너지를 이용한 내진설계에서는 주요 구조부재의 이력거동에 의해 소산되는 이력 에너지를 직접 구하는 방법과 입력 에너지를 산정한 다음 입력 에너지에 대한 이력 에너지의 비 ( $E_h/E_i$ )를 곱하여 산정하는 방법을 이용하고 있다.  $E_h/E_i$  스펙트럼을 이용하면 입력 에너지 중 이력거동에 의해

소산되는 에너지에 구조물과 지진하중의 특성이 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있다. 해석 결과에 따르면  $E_h/E_i$ 는 그림 9와 같이 변위연성비가 증가할수록 커지고 주기가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.  $E_h/E_i$ 비는 중·단주기에서 대략 그 한계 값은 0.7이었다. 이 비가 더 이상 증가하지 않는 것은 입력에너지가 이력에너지 뿐만 아니라 구조물의 감쇠에 의한 감쇠에너지로도 소산되기 때문이다. 강진지역인 LA 지역의 지진에 대한  $E_h/E_i$ 비는 2.5초 정도까지 일정한 값을 유지하다가 주기가 더 길어지면 감소하였지만, 약진지역(Boston 지역)의 경우는 약 1초 이후 급격하게 감소하였다. 또한 감소하는 영역(장주기)에서는 변위연성비의 영향이 상대적으로 작았다. 이 영역에서는 이력에너지 요구량이 작기 때문에 구조물의 이력거동에 의해 에너지를 소산시키는 것은 비효율적임을 알 수 있으며, 이러한 특성은 특히 약진지역에서 더 두드러졌다.

지반조건별  $E_h/E_i$ 비를 비교한 그림 10에 따르면 구조물의 손상이 큰 경우( $\mu=6$ )와 작은 경우( $\mu=2$ ) 모두 대략 주기가 3초인 구간까지 각 지반조건에 따른  $E_h/E_i$ 비가 유사하고 3초 이후에는 단층 근처 지반의  $E_h/E_i$ 비가 다른 두 지반의  $E_h/E_i$ 비보다 작아지고 주기가 길어짐에 따라 그 차이는 더 커졌다. 그러나 여러 지반에서 측정된 20개 지진하중에 대한 상대에너지를 이용하여 Khashaei 등<sup>(16)</sup>이 구한 평균  $E_h/E_i$ 비에 따르면  $\mu$ 가 2에서 5로 변하더라도 전체 주기구간(0~5초)에 걸쳐  $E_h/E_i$ 비는 일정하였다. 이는 지반조건에 따라 지진하중을 분류하지 않고 암반에서 연약한 토사 지반까지 측정된 지진기록의 평균을 이용하였기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Decanini와 Mollaioli<sup>(9)</sup>의 연구결과에 따르면 변위연성비와 지반조건은  $E_h/E_i$ 비의 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 대략 주기가 0.7초를 기준으로 이보다 짧은 주기에서는 단단한 토사와 경암 지반(S1)에서 연약한 토사 지반(S3)으로 갈수록  $E_h/E_i$ 비가 작아졌지만 이보다 큰 주기에서는 반대의 경향을 보였다.

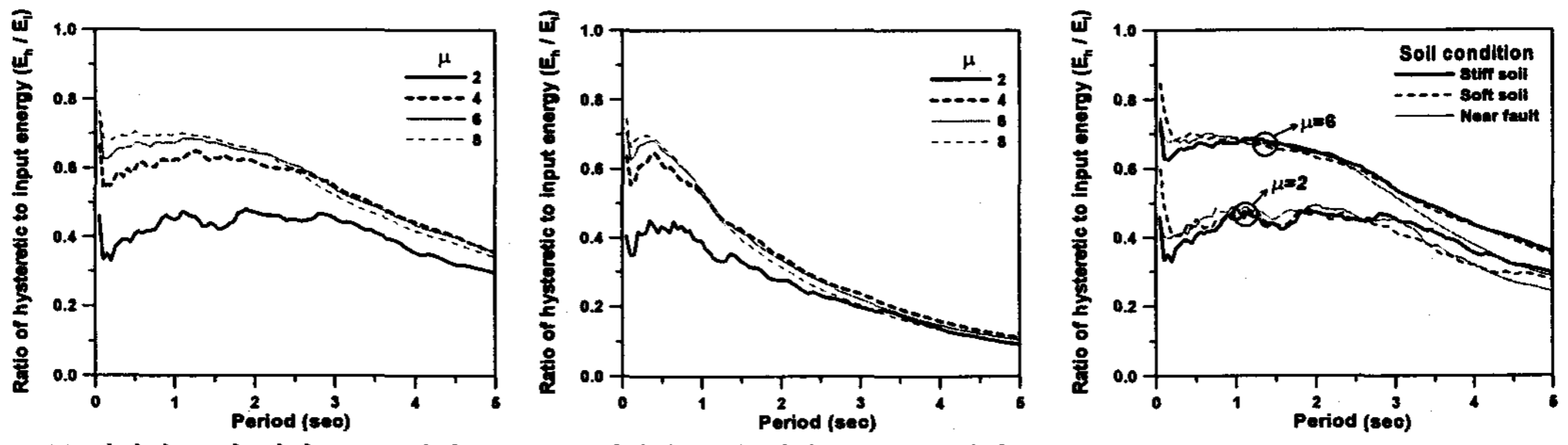


그림 9. 지반조건, 지역별 입력에너지에 대한 이력에너지비  
그림 10. 지반조건에 따른 입력에너지에 대한 이력에너지비 (LA 지역)

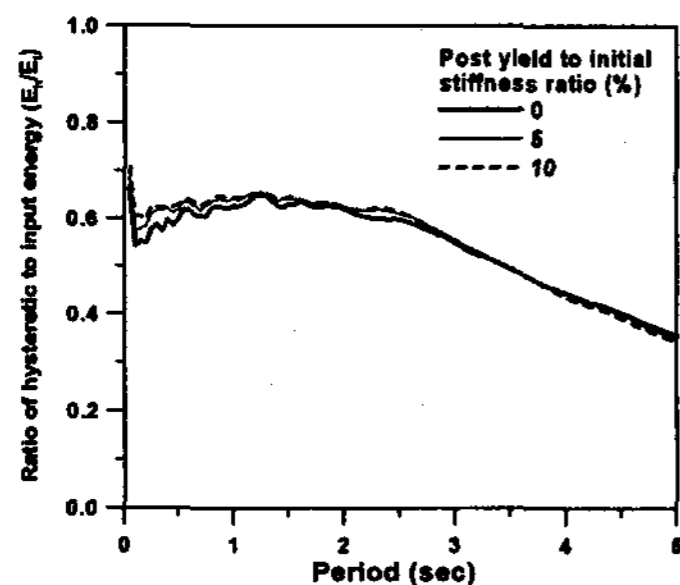


그림 11. 항복 후 강성비에 따른 에너지비의 변화 (LA 지역,  $\mu=4.0$ )

그림 11은 LA 지역의 단단한 토사 지반의 지진하중에 대하여 항복 후 강성비의 영향을 나타낸 것으로, 입력에너지와 이력에너지에 대한 결과와 같이  $E_h/E_i$ 비도 항복 후 강성비의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 이와 같이  $E_h/E_i$ 비 스펙트럼은 지반조건에 관계없이, 그리고 중간 주기까지 일정한 값을 가지기 때문에, 비교적 안정적인 설계변수로 에너지를 이용한 내진설계에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

### 4.3 감쇠비에 따른 응답변화

Zahrah와 Hall<sup>(5)</sup>은 탄성과 비탄성 시스템의 입력에너지에 대한 감쇠비의 영향은 매우 작거나 거의 없다고 보고하였다. 하지만 Khashae 등<sup>(16)</sup>은 개별 지진에 대하여 0~40%의 감쇠비의 영향을 분석하였으며, 5%보다 작은 감쇠비에서는 그 영향이 작았지만 그 이상의 큰 감쇠비에 대해서 응답의 감소효과가 크다고 결론을 내렸다. 본 연구의 결과에 따르면 각 에너지 응답에 대한 감쇠비의 영향은 예상대로 감쇠비가 증가할수록 이력에너지와  $E_h/E_i$  비는 감소하였다(그림 12). 이러한 감쇠비의 영향은 전체 주기 중 최대응답이 발생하는 주기 부근에서 가장 큰 것으로 나타났다. 최대에너지 응답이 발생한 주기부근에서는 연약지반의 경우 감쇠비가 10%로 증가할 때 입력에너지가 6.7% 감소하였고, 감쇠비가 20%로 증가하면 15.6%의 에너지가 감소하였다. 그러나 이러한 주기영역보다 큰 1.5초 이상에서는 감쇠비가 증가할수록 입력에너지는 증가하였다. 이러한 현상은 감쇠비가 증가할수록 응답이 줄어드는 가속도응답스펙트럼의 변화와 다른 특성을 나타내었다.

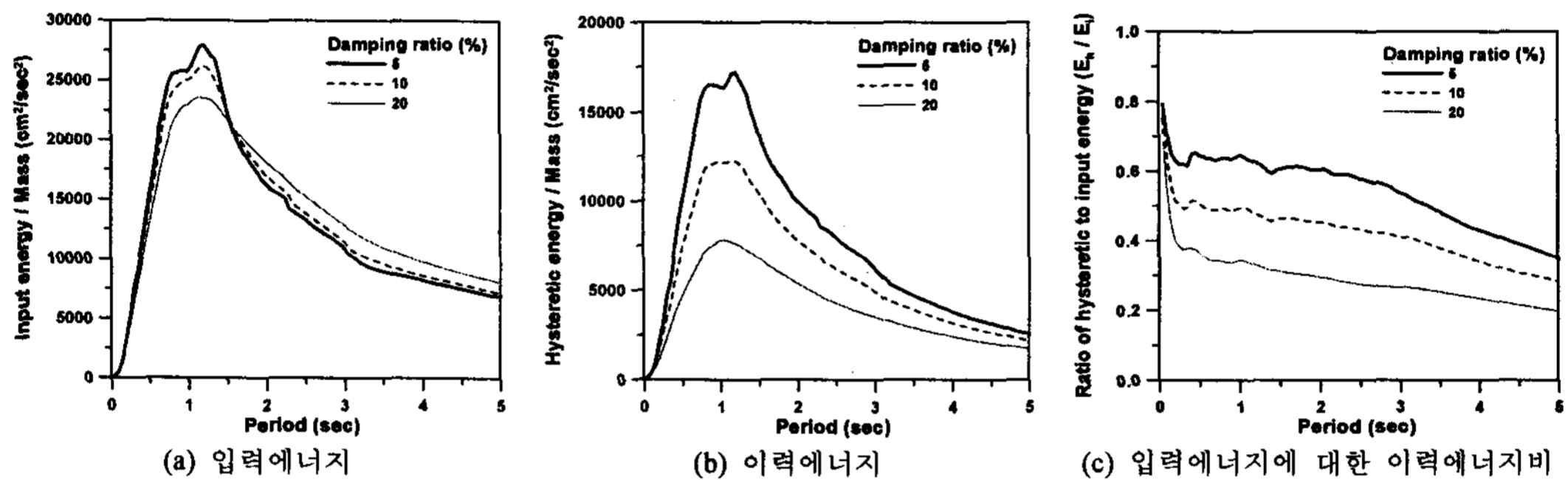


그림 12. 감쇠비에 따른 에너지 응답 변화 (LA 지역 연약한 토사 지반,  $\mu=4$ )

### 5. 결론

에너지를 이용한 내진설계는 기존 강도설계의 문제점을 개선하고 구조물의 지진거동을 명확하게 반영할 수 있는 방법으로 간주되고 있지만, 아직 지진하중에 의해 구조물에 입력되는 에너지와 구조물의 거동에 의해 소산되는 에너지에 대한 연구자들 사이에 합의가 도출되지 않은 부분도 있다. 따라서 본 연구에서는 지반조건, 지진하중의 크기와 같은 지진하중의 특성과 구조물의 주기, 변위연성비, 감쇠비, 항복 후 강성비가 에너지 요구에 미치는 영향에 대하여 해석을 수행하여 기존 연구결과와 비교·분석 하였다.

연구 결과에 따르면 지진하중에 의해 구조물에 입력되는 에너지는 단단한 토사 지반에서 단층 근처 지반으로 갈수록 커지고 변위연성비가 커질수록 작아지는 경향을 보였다. 그러나 입력에너지에 변위연성비의 영향이 매우 작거나 없다는 기존의 연구 결과는 대부분 작은 수의 지진하중에 대하여 개별 지진의 시간이력해석에 의한 결과이며, 구조물의 설계를 위해서는 그 지역에서 발생 가능한 여러 개 지진하중의 평균응답이 더 의미 있다는 것을 고려하면 본 연구의 결과가 좀더 타당한 것으로 사료된다. 입력에너지에 대한 이력에너지의 비는 변위연성비가 커질수록 증가하고, 중·장 주기 구조물에서는 그 영향이 작은 것으로 나타났다. 또한 지반조건에 따라 큰 변화를 보이지 않고 중간주기까지는 일정한 값을 나타내기 때문에 비교적 안정적인 설계지표로 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 에너지 응답에 대한 감쇠비의 영향은 감쇠비가 증가할수록 이력에너지와 입력에너지에 대한 이력에너지의 비가 현저하게 감소하였다. 그러나 입력에너지는 최대응답 주변에서 감소하고 장주기에서는 감쇠비가 증가할수록 입력에너지가 증가하였다.

## 감사의 글

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

## 참고문헌

1. SEAOC, "Performance based seismic engineering of buildings," SEAOC Vision 2000 Committee, Structural Engineers Association of California, California, 1995.
2. 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.
3. 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.
4. Kim, J., Choi, H., and Chung L., "Energy-Based Seismic Design of Structures with Buckling-Restrained Braces," *Steel and Composite Structures*, Vol. 4, No. 6, 2004, pp. 437~452.
5. Zahrah, T. and Hall, J., "Earthquake energy absorption in SDOF structures," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 110, No. 8, 1984, pp. 1757-1772.
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. Fajfar, P. and Vidic, T., "Consistent inelastic design spectra: Hysteretic and input energy," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, No. 5, 1994, pp. 523-537.
8. Rahnema, M. and Manuel, L., "The effect of strong motion duration on seismic demands," *Proceeding of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico, 1996.
9. Decanini, L. D. and Mollaioli, F., "An energy-based methodology for the assessment of seismic demand," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 21, No. 2, 2001, pp. 113-137.
10. 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.
11. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, 1995.
12. Bruneau, M. and Wang, N., "Some aspects of energy methods for the inelastic seismic response of ductile SDOF structures," *Engineering Structures*, Vol. 18, No. 1, 1996, pp.1-12.
13. Mahin, S.A. and Lin, J., "Inelastic response spectra for single degree of freedom systems," Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983.
14. Akiyama, H., *Earthquake-resistant limit-state design for buildings*, University of Tokyo Press, Japan, 1985.
15. Nakashima, M., Saburi, K., and Tsuji, B., "Energy input and dissipation behaviour of structures with hysteretic dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, No. 5, 1996, pp. 483-496.
16. Khashae, P., Mohraz, B., Sadek, F., Lew, H.S., and Gross, J.L., "Distribution of earthquake input energy in structures," Report No. NISTIR 6903, National Institute of Standards and Technology, Washington, 2003.
17. Manfredi, G., "Evaluation of seismic energy demand," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 4, 2001, pp. 485-499.