

# 지반 운동과 구조물 특성에 따른 구조물의 에너지 요구량

## Seismic Energy Demand of Structures Depending on Ground Motion Characteristics and Structural Properties

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

### 국문요약

에너지 설계법은 지진에 의해 누적된 손상과 구조물의 이력거동에 의한 영향을 직접적으로 고려할 수 있기 때문에 현행 내진설계 기준보다 더 합리적이다. 그러나 지반운동과 구조물 특성에 따른 에너지 응답에 대한 관련 연구자들의 합의가 아직 도출되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 에너지 요구에 대한 지진하중과 구조물 특성의 영향을 다른 지반조건에서 계측된 100개의 지진기록을 이용하여 평가하고 기존 연구결과와 비교하였다. 해석 결과에 따르면 연성비와 지반조건은 입력에너지에 상당한 영향을 주는 것으로 나타났다. 입력에너지에 대한 이력에너지비는 연성비, 감쇠비와 강한 지진파의 지속시간에 많은 영향을 받았지만 지반조건에 따른 변화는 작았다.

주요어 : 입력에너지, 입력에너지에 대한 이력에너지비, 지반조건, 강한 지진파 지속시간

### ABSTRACT

The energy-based seismic design method is more rational in comparison with current seismic design code in that it can directly account for the effects of cumulative damage by earthquake and hysteretic behavior of the structure. However there are research results that don't reach a consensus depending on the ground motion characteristic and structural properties. For that reason 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 obtained were compared with those of previous works. Results show that ductility ratios and site conditions have significant influence on input energy. The results show that the ratio of hysteretic to input energy is considerably influenced by the ductility ratio, damping ratio, and strong motion duration, while the effect of site condition is insignificant.

Key words : input energy, the ratio of hysteretic to input energy, site condition, strong motion duration

## 1. 서 론

지진으로 인한 구조물의 손상은 반드시 지진력이나 변위 응답의 최대값에 비례하여 발생하는 것이 아니라 최대 응답보다 작지만 누적되는 비탄성 변형에 의한 영향도 상당한 비중을 차지한다. 그러나 현행 내진설계 기준은 설계 변수로 최대 지진력이나 최대 허용 변위 등을 규정하고 있고 반응수정계수를 사용함으로써 각 구조요소의 이력특성을 간접적으로 반영하고 있을 뿐 지진하중에 의한 누적된 손상은 고려하지 않고 있다.

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 1956년 Housner<sup>(5)</sup>의 연구결과가 발표된 이후 지진에 의해 구조물에 입력되는 에너지와 구조물 특성에 따른 에너지 소산 현상에 대하여 대부분의 연구가 진행되었다. Zahrah와 Hall<sup>(6)</sup>은 8개의 지진기록을 이용하여 이 선형 거동을 하는 구조물의 입력에너지와 이력에너지의 변화에 변위연성비, 감쇠비와 항복 후 강성비의 영향은 작다고 보고하였다. Uang과 Bertero<sup>(7)</sup>는 절대 에너지와 상대 에너지의 차이점을 비교·분석하였고 다층 구조물의 층별 이력에너지와 구조 요소별 에너지에 대한 연구결과를 발표하였다. 5개의 다른 지진에서 계측된 모두 40개의 지진하중에 대한 입력에너지와 이력에너지를 구한 Fajfar와 Vidic의 연구결과<sup>(8)</sup>에 따르면 변위연성비가 커질수록 입력에너지와 입력에너지에 대한 이력에너지는 작아지고 또한 지진에 따라 입력에너지와 이력에너지비의 변화가 컸다. 강한 지진파의 지속 시간이 에너지 요구에 미치는 영향에 대한 Rahnama와 Manuel<sup>(9)</sup>의 연구결과에 따르면 강한 지진파의 지속 시간이 증가할수록 입력에너지와 이력에너지가 증가하였지만 입력에너지에 대한 이력에너지의 크기에는 영향을 미치지 않았다. Decanini와 Mollaioli<sup>(10)</sup>는 지반조건, 구조물의 이력모델과 변위연성비에 따른 입력에너지에 대한 이력에너지비의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

이와 같이 1980년대 이후 지진에 의해 구조물에 입력되

\* 학생회원 · 성균관대학교 건축공학과, 박사수로

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

본 논문에 대한 토의를 2005년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 3. 24 / 심사종료일 : 2005. 4. 12)

는 에너지와 구조물에서 소산되는 에너지에 대한 다양한 연구가 수행되었다. 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 지반 조건, 지진하중의 크기, 강한 지진파의 지속 시간(strong motion duration)과 같은 지진하중의 특성과 구조물의 주기, 변위연성비(최대 변위/항복 변위), 감쇠비, 항복 후 강성비(항복 후 강성/탄성 강성)가 에너지 요구에 미치는 영향에 대하여 해석을 수행하여 기존 연구결과와 비교하였다. 연구결과와 보편성과 타당성을 확보하기 위해서는 충분히 많은 지진기록이 필요하며, 본 연구에서는 SAC Steel Project<sup>(11)</sup>에서 사용된 100개의 지진기록을 사용하였다.

## 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>(12)</sup>

$$\int_0^x m\ddot{x}dx + \int_0^x c\dot{x}dx + \int_0^x f_s(x, \dot{x})dx = -\int_0^x m\ddot{x}_g dx \quad (2)$$

수치적분을 간편하게 수행하기 위하여  $dx = \dot{x}dt$ 의 관계를 이용하여 식(2)를 시간에 대하여 나타낼 수 있다.

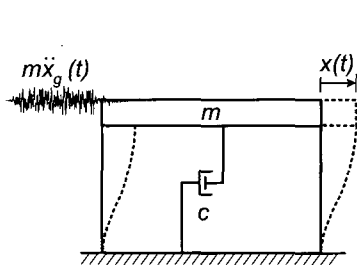
$$\int_0^t m\ddot{x}\dot{x}dt + \int_0^t c(\dot{x})^2dt + \int_0^t f_s(x, \dot{x})\dot{x}dt = -\int_0^t m\ddot{x}_g \dot{x}dt \quad (3)$$

첫 번째 항은 지반에 대한 상대 운동과 관련된 질량의 운동에너지(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 탄성 변형에너지(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. 여기서 입력에너지의 일부분은 운동에너지와 탄성 변형에너지의 형태로 구조물에 일시적으로 저장되지만 지진에 의한 운동이 끝나면 이러한 에너지들은 사라진다. 반면 구조물의 거동에 의해 소산되는 감쇠에너지와 이력에너지는 운동의 지속 시간 동안 누적된 값으로 운동의 끝에서 입력되는 에너지의 대부분은 이 두 에너지에 의해 소산된다. 식(2) 또는 (3)의 에너지 관계를 정리하면 다음 식과 같다.

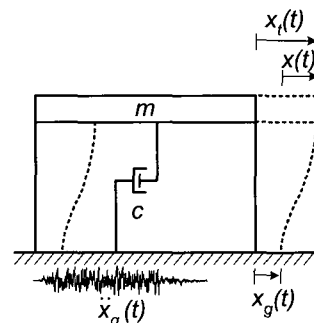
$$E_k + E_d + E_s + E_h = E_i \quad (4)$$

위의 에너지 관계식은 구조물의 기초는 지반에 고정되어 있다고 가정하고 각 질량에 가해지는 등가 지진하중에 의한 구조물의 상대 변위에 기초한 상대 에너지이다(그림 1(a)). 또한 절대 에너지는 지반의 변위( $x_g$ )와 구조물의 상대 변위( $x$ )를 더한 절대 변위( $x_t$ )를 이용하여 구한다(그림 1(b)).

Uang과 Bertero<sup>(7)</sup>는 두 에너지를 비교한 다음 단주기 영역에서 구조물의 강체 병진운동을 반영할 수 있는 절대 에너지가 물리적으로 더 의미 있는 에너지라고 주장하였고, Chopra<sup>(12)</sup>는 구조물의 내력은 상대 변위와 상대 속도를 이용하여 계산되기 때문에 상대 에너지가 절대에너지보다 중요한 응답이라고 주장하였다. 가장 단순한 형태인 사각형 펄스(pulse)와 사인파 하중에 대한 단자유도계 구조



(a) 등가 고정기초 시스템



(b) 움직이는 기초 시스템

그림 1 지진하중을 받는 단자유도 시스템

물의 절대 에너지와 상대 에너지를 비교·분석한 Bruneau와 Wang<sup>(13)</sup>은 절대 에너지를 하중의 입력이 끝난 다음에도 입력에너지의 변동(fluctuation)이 발생하는 문제점이 있고 공학적 관점에서 상대 에너지가 더 의미 있다고 결론지었다. 이러한 두 에너지의 차이는 입력에너지와 운동 에너지에서 발생한다. 그러나 절대와 상대 에너지 모두 지진하중의 입력이 끝나는 부분에서는 전체 에너지양이 같아진다. 또한 Uang과 Bertero<sup>(7)</sup>의 연구결과에 의하면 주기가 0.3~5.0초 구간에서 두 입력에너지는 거의 같다. 에너지를 이용한 내진설계에서는 무엇보다도 구조 부재의 이력 거동에 의한 이력에너지가 주요 설계변수이고 이력에너지는 상대 변위에 근거하여 계산되기 때문에 절대와 상대 에너지와 같은 산정방법에 영향을 받지 않는다. 따라서 본 연구에서는 등가 고정기초 시스템(그림 1(a))에서 구한 상대 에너지를 기준으로 지진하중과 구조물의 특성에 따른 에너지 변화를 살펴보았다.

### 3. 해석에 사용된 지진하중

해석에 사용된 지진하중은 SAC Steel Project에서 제시하고 있는 지진기록<sup>(11)</sup>을 사용하였다. 강진 지역인 LA 지역의 단단한 토사(stiff soil) 지반, 연약한 토사(soft soil) 지반, 단층 근처(near fault) 지반과, 약진 지역인

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.

지진하중을 받는 구조물의 손상을 평가하기 위해서는 입력되는 지진의 전체 시간보다 강한 지진파가 지속되는 시간이 더 중요하다. 이러한 강한 지진파의 지속 시간( $t_{sd}$ )은 Trifunac와 Brady<sup>(14)</sup>가 제안한 식(5)와 같은 방법을 이용하여 구하였다.

$$t_{sd} = t_{0.95} - t_{0.05} \quad (5)$$

여기서  $t_{0.05}$ 와  $t_{0.95}$ 는 다음과 같은 Arias intensity( $I_A$ )의 값이 각각 전체의 5%와 95%에 도달했을 때의 시간을 나타낸다:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_{td}} \ddot{x}_g^2(t) dt \quad (6)$$

위 식에서  $t_{td}$ 는 지진파의 전체 지속 시간이고  $g$ 와  $\ddot{x}_g$ 는 중력 가속도와 지반 가속도이다. 각 지반 조건별 지진파의 전체 지속 시간과 강한 지진파의 지속 시간은 표 1, 표 2와 같다.  $t_{sd}$ 에 따른 에너지 응답의 변화를 살펴보기

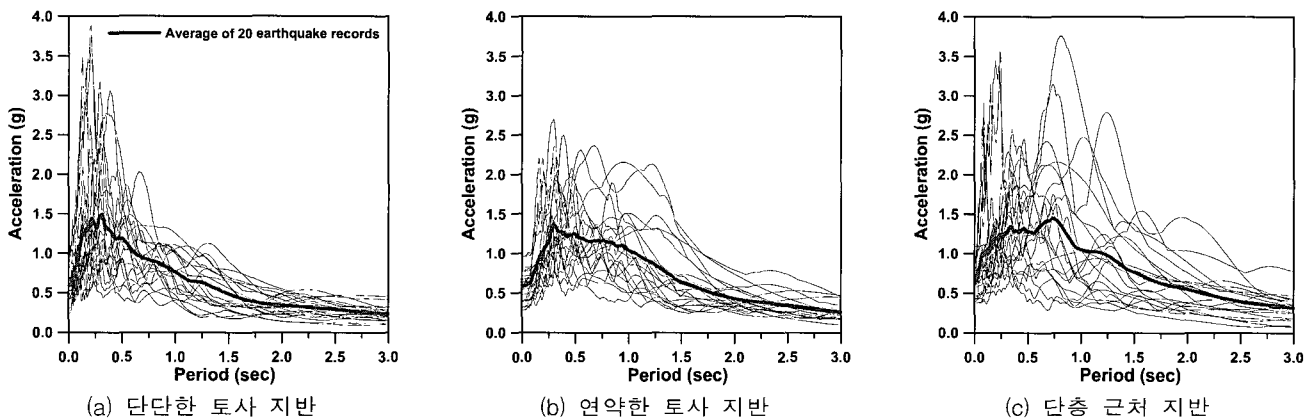


그림 2 LA 지역의 지반 조건별 응답스펙트럼

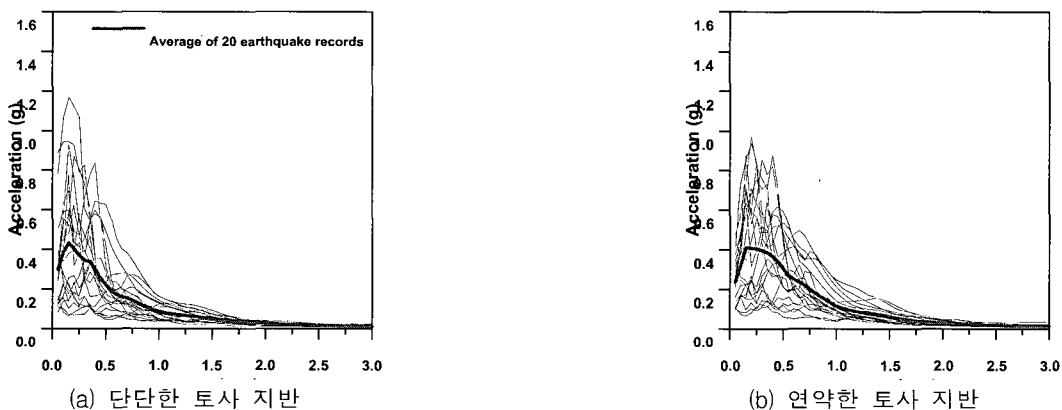


그림 3 Boston 지역의 지반 조건별 응답스펙트럼

위하여 지반 조건별로  $t_{sd}$ 가 긴 7개 지진파( $t_{long}$ )와 짧은 7개 지진파( $t_{short}$ )의 두 개 그룹으로 나누었다. 예를 들면 LA 지역의 단단한 토사 지반의  $t_{sd}$ 에 따른 분류는 다음과 같다.

- $t_{long}$  : 지진하중 번호 - 1, 2, 7, 8, 9, 10, 11번
- $t_{short}$  : 지진하중 번호 - 4, 12, 13, 14, 16, 18, 20번

#### 4. 지반 조건과 구조물 특성에 따른 에너지 변화

에너지를 이용한 내진설계에서 중요한 설계변수는 지진 하중에 의해 구조물에 입력되는 에너지와 구조물의 이력저동에 의해 소산되는 이력에너지이다. 본 연구에서는 Mahin과 Lin<sup>(15)</sup>이 개발한 단자유도계 시스템의 비탄성 시간이력 해석 프로그램인 NONSPEC을 수정하여 입력에너지와 소산되는 에너지를 구하였다. 해석에 사용된 구조물은 항복 후 강성이 없고( $\alpha=0$ ) 이선형 이력저동을 하는 단자유도계 시스템으로 주기 간격은 0.05초 간격으로 5초까지 전체 100개 시스템이다. 에너지 응답은 지반 조건별로 20개 지진에 대하여 시간이력해석을 수행하여 평균 응답을 나타내었다.

##### 4.1 입력에너지와 이력에너지

Zahrah와 Hall<sup>(6)</sup>은 8개 지진기록을 이용하여 변위연성비( $\mu$ =최대 변위/항복 변위)에 따라 입력에너지의 변화는 거의 없다고 보고하였고 Uang과 Bertero<sup>(7)</sup>도 El Centro (1940, N00E) 지진과 San Salvador(1986, N90E) 지진에 대한 절대 입력에너지는  $\mu$ 의 영향이 매우 작다는 결론

을 내렸다. 이외에도 유사한 연구결과들이 몇몇 연구자들에 의해 발표되었다.<sup>(16)-(17)</sup> 이들의연구결과를 바탕으로 최근 Cruz와 López<sup>(18)</sup>는 5개 주기와 각 주기별로 6단계의 강도가 다른 구조물에 대하여 입력에너지와 지진하중의 지속 시간과 같은 지반 운동 특성과 구조물의 기본 진동주기, 강도와 감쇠비의 구조물 변수를 고려한 정규화된 입력배수(normalized input power,  $N_p$ )를 이용하여 입력에너지에 대한 이력에너지의 비를 구하였다. 그러나 40개 지진하중으로부터 평균 입력에너지를 구한 Fajfar와 Vidic의 연구결과<sup>(8)</sup>에 따르면 주기가 0.4초보다 긴 주기 영역에서는 변위연성비( $\mu$ )가 커지면 입력에너지는 작아지고 반면 이보다 짧은 주기 영역에서는 중·장주기 영역보다 영향이 작았지만  $\mu$ 가 커질수록 입력에너지가 증가하였다. 또한 Decanini와 Mollaioli<sup>(10)</sup>의 해석결과에 의하면 단주기 부분을 제외하고 입력에너지에 대한  $\mu$ 의 영향이 컸고 Khashaee 등<sup>(19)</sup>은 강한 지진파의 지속 시간이 긴 지진과 10개와 짧은 지진과 10개의 지진하중에 대한 개별 시간이력해석 결과에서 두 부류의 지진과 모두 최대 응답이 발생하는 주기 부근에서  $\mu$ 가 커질수록 입력에너지가 감소하였다. 이렇듯 입력에너지에 대한 변위연성비의 영향은 개별 지진하중에 대한 해석결과에서는 그 영향이 매우 작거나 없는 경우도 있고,<sup>(6)-(7),(16)-(17)</sup> 반대로  $\mu$ 의 변화에 따라 입력에너지가 많이 변하는 경우도 있다.<sup>(10)(19)</sup> 이러한 개별 지진에 대한 해석은 지진하중의 특성에 따른 응답 변화를 분석하는데 의미가 있지만, 에너지를 이용한 내진설계를 위한 입력에너지를 산정할 때는 오히려 고려한 지역에서 발생 가능한 많은 수의 지진하중들의 평균 응답을 구하는 것이 설계변수로써 더 적합할 것으로 사료된다. 그림 4와

표 1 LA 지역의 지반 조건별 지진파의 전체 지속 시간 ( $t_{td}$ )과 강한 지진파 지속 시간 ( $t_{sd}$ )

지진하중 번호	단단한 토사		연약한 토사		단층 근처	
	$t_{td}$	$t_{sd}$	$t_{td}$	$t_{sd}$	$t_{td}$	$t_{sd}$
1	53.46	24.26	81.90	24.56	49.98	18.54
2	53.46	24.52	81.90	23.84	49.98	17.66
3	39.38	8.52	40.95	9.00	24.99	9.52
4	39.38	7.09	40.95	7.87	24.99	10.68
5	39.08	10.80	40.95	8.12	39.98	3.26
6	39.08	10.42	40.95	9.99	39.98	5.08
7	79.98	22.26	81.90	17.24	59.98	15.82
8	79.98	22.24	81.90	23.08	59.08	17.10
9	79.98	19.66	81.90	17.66	20.775	7.135
10	79.98	20.74	81.90	22.94	20.775	10.085
11	39.98	11.32	81.90	9.80	49.28	13.384
12	39.98	6.40	81.90	13.36	49.28	14.224
13	59.98	5.72	81.90	6.88	14.945	7.015
14	59.98	5.54	81.90	7.02	14.945	9.545
15	14.945	7.80	20.475	5.35	59.98	5.84
16	14.945	7.035	20.475	8.98	59.98	6.08
17	59.98	7.20	81.90	5.38	59.98	7.10
18	59.98	5.30	81.90	6.08	59.98	7.94
19	59.98	8.56	81.90	10.02	40.09	10.66
20	59.98	6.78	81.90	10.72	40.09	13.13

표 2 Boston 지역의 지반 조건별 지진파의 전체 지속 시간 ( $t_{td}$ )과 강한 지진파 지속 시간 ( $t_{sd}$ )

지진하중 번호	단단한 토사		연약한 토사	
	$t_{td}$	$t_{sd}$	$t_{td}$	$t_{sd}$
1	29.99	3.72	40.91	3.57
2	29.99	4.08	40.91	3.83
3	29.99	2.56	40.91	2.39
4	29.99	2.79	40.91	2.59
5	19.255	4.43	40.975	8.25
6	19.255	6.33	40.975	8.415
7	20.335	8.255	20.485	8.37
8	20.335	8.255	20.485	7.52
9	18.775	9.50	20.485	11.53
10	18.775	9.24	20.485	11.905
11	19.015	11.62	20.485	7.405
12	19.015	11.96	20.485	4.425
13	17.755	14.16	20.485	14.145
14	17.755	11.80	20.485	12.205
15	29.57	8.94	40.97	7.10
16	29.57	11.04	40.97	6.41
17	39.05	12.13	40.97	13.10
18	39.05	13.49	40.97	7.55
19	33.29	8.98	40.97	5.71
20	33.29	7.76	40.97	4.88

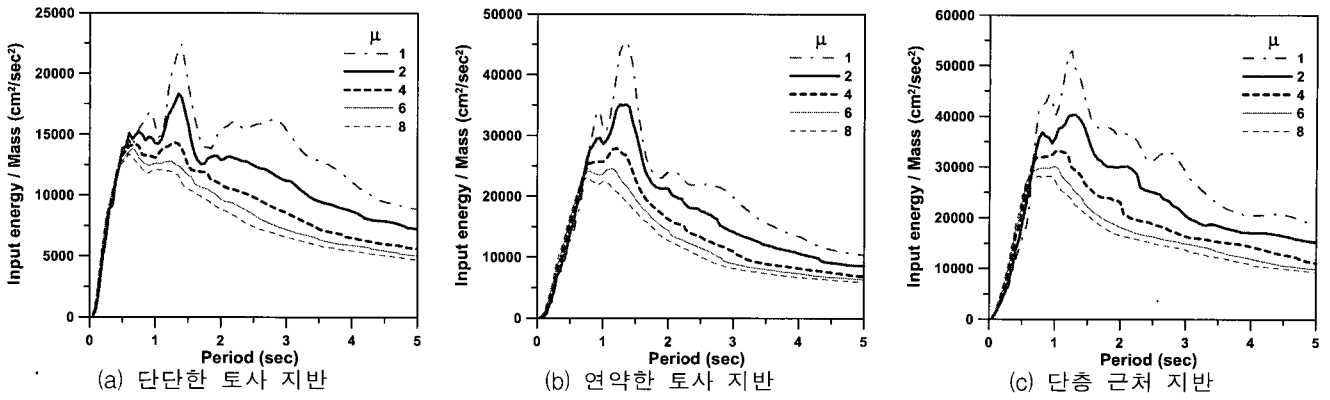


그림 4 LA 지역의 지반 조건별 입력에너지 스펙트럼

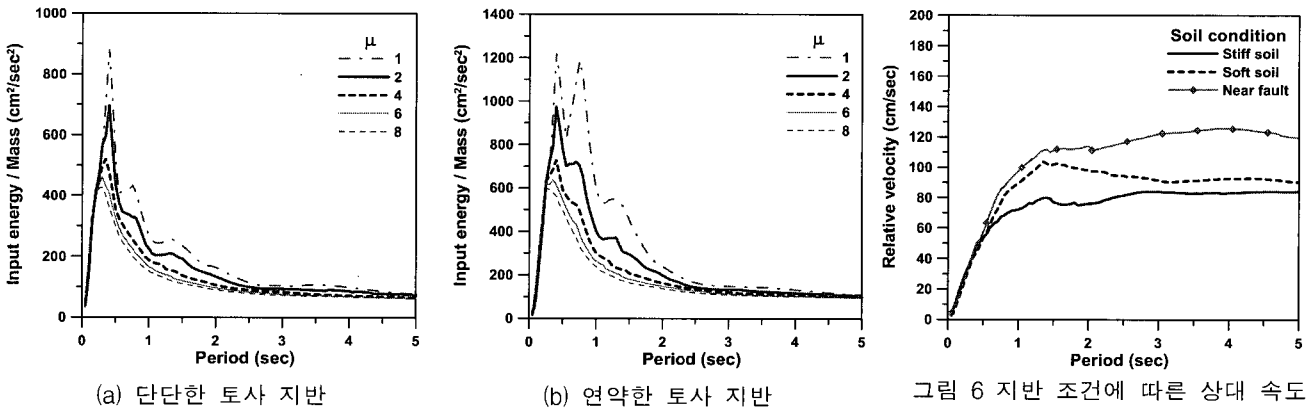


그림 5 Boston 지역의 지반 조건별 입력에너지 스펙트럼

그림 6 지반 조건에 따른 상대 속도 (LA 지역,  $\mu = 4.0$ )

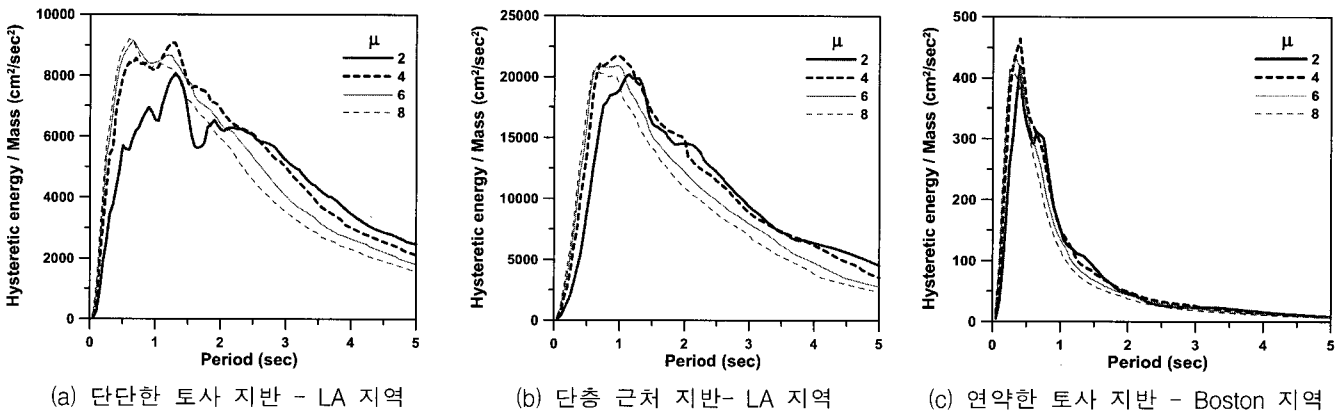


그림 7 지반 조건별 이력에너지 스펙트럼

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 강진 지역보다 약진 지역이 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 지진과는 충격과 성분이 강하여 다른 지반보다 속도응답이 크기 때문에 입력에너지도 크다.

이력에너지는 지반조건이나 강진 지역과 약진 지역에 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 주기 영역에서는 반대의 경향을 보였다. 이러한 역전 현상은 목표

변위연성비가 증가할수록 더 짧은 주기에서 발생하였다. 이것은 그림 8에서 볼 수 있듯이 주기가 짧은 구조물에서는  $\mu$ 가 커질수록 이력면적이 커지지만 주기가 긴 경우에는  $\mu$ 가 커질수록 오히려 이력면적이 감소하기 때문이다. 따라서 주기가 긴 구조물인 경우 목표 변위연성비가 증가할수록 이력에너지는 오히려 감소하게 된다.

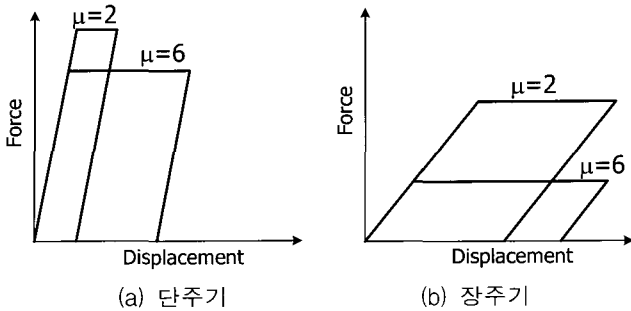


그림 8 주기와 연성비에 따른 이력면적

변위연성비가 아닌 사이클 변위연성비( $\mu_c$ )에 따른 이력 에너지를 구한 Manfredi<sup>(20)</sup>의 연구결과에 의하면 전체 주기 영역에 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 변수이다.

항복 후 강성비( $\alpha$ =항복 후 강성/초기 강성)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 9와 같이 항복 후 강성비는 입력에너지와 이력에너지 모두에 별다른 영향이 없었다. 이런 결과는 항복 후 강성비가 에너지 응답에 영향이 매우 적다는 Zahrah와 Hall<sup>(6)</sup>의 연구결과와 단단한 토사 지반과 경암 지반에 대하여 입력에너지에 대한 구조물의 이력모델의 영향은 적다는 결과<sup>(10)</sup>와 유사하였다. 그러나  $\alpha$ 를 0에서 0.75까지 변화시키면서 에너지의 변화를 분석

한 Nakashima 등<sup>(17)</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 이력 거동에 의해 소산되는 이력에너지를 직접 구하는 방법과 입력에너지를 산정한 다음 입력에너지에 대한 이력에너지의 비 ( $E_h/E_i$ )를 곱하여 산정하는 방법을 이용하고 있다.  $E_h/E_i$  스펙트럼을 이용하면 입력에너지 중 이력거동에 의해 소산되는 에너지에 구조물과 지진하중의 특성이 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있다. 해석 결과에 따르면  $E_h/E_i$ 는 그림 10과 같이 변위연성비가 증가할수록 커지고 주기가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.  $E_h/E_i$ 비는 중단주기에서 대략 그 한계 값은 0.7이었다. 이 비가 더 이상 증가하지 않는 것은 입력에너지가 이력에너지 뿐만 아니라 구조물의 감쇠에 의한 감쇠에너지로도 소산되기 때문이다. 강진 지역인 LA 지역의 지진에 대한  $E_h/E_i$ 비는 2.5초 정도까지 일정한 값을 유지하다가 주기가 더 길어지면 감소하였지만, 약진 지역(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 약진 지역에서 더 두드러졌다.

지반 조건별  $E_h/E_i$ 비를 비교한 그림 11에 따르면 구조물의 손상이 큰 경우( $\mu=6$ )와 작은 경우( $\mu=2$ ) 모두 대략 주기가 3초인 구간까지 각 지반 조건에 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 예측된 20개 지진하중에 대한 상대 에너지를 이용하여 Khashaee 등<sup>(19)</sup>이 구한 평균  $E_h/E_i$ 비에 따르면  $\mu$ 가 2에서 5로 변하더라

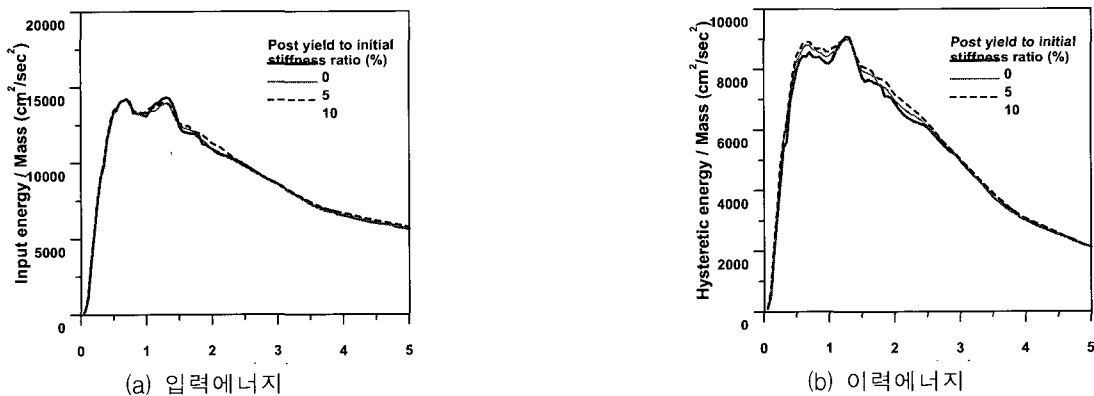
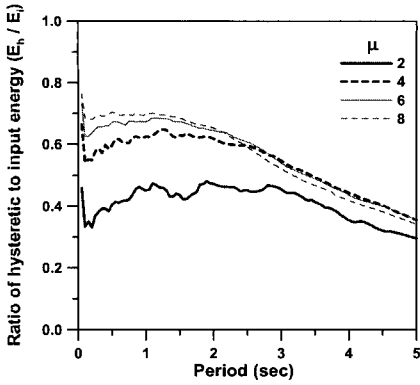
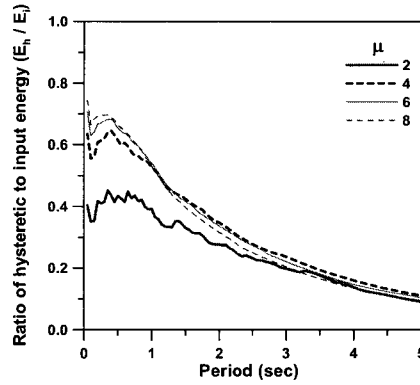


그림 9 항복 후 강성비에 따른 에너지 변화 (LA 지역,  $\mu=4.0$ )



(a) 단단한 토사 지반 - LA 지역



(b) 연약한 토사 지반 - Boston 지역

그림 10 지반 조건, 지역별 입력에너지에 대한 이력에너지비

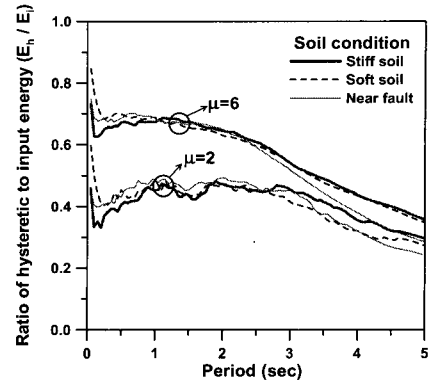
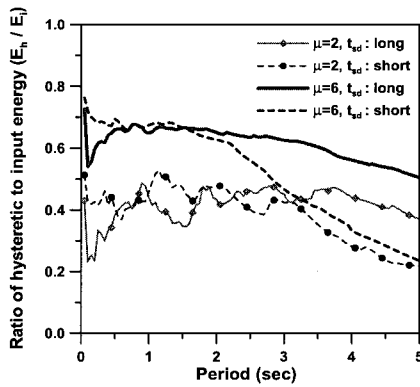
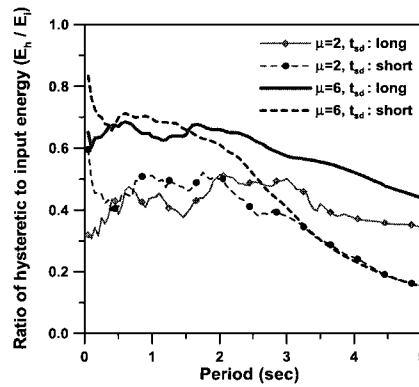


그림 11 지반 조건에 따른 입력에너지에 대한 이력에너지비 (LA 지역)



(a) 단단한 토사 지반



(b) 단층 근처 지반

그림 12 강한 지진과 지속 시간에 따른 에너지비 (LA 지역)

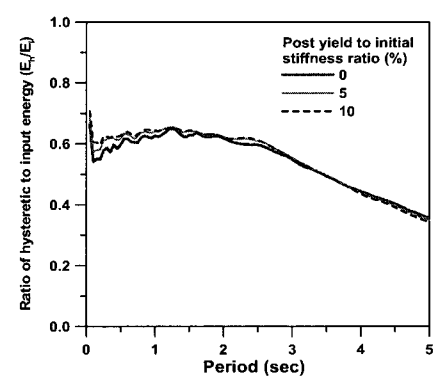


그림 13 항복 후 강성비에 따른 에너지비의 변화 (LA 지역,  $\mu=4.0$ )

도 전체 주기 구간(0~5초)에 걸쳐  $E_h/E_i$ 비는 일정하였다. 이는 지반 조건에 따라 지진하중을 분류하지 않고 암반에서 연약한 토사 지반까지 계속된 지진기록의 평균을 이용하였기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Decanini와 Mollaioli<sup>(10)</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.

강한 지진과 지속 시간에 따른 에너지비의 변화를 살펴보기 위하여 표 1과 2에 나타난 것과 같이 각 지반별로 지속시간( $t_{sd}$ )이 긴 7개의 지진파와 짧은 지진파 7개에 대하여 수행한 해석결과는 그림 12와 같다. 주기가 1.5초보다 짧은 영역에서는  $t_{sd}$ 에 관계없이 유사한  $E_h/E_i$ 비를 보였지만 이 주기 이상에서는  $t_{sd}$ 가 짧은 지진하중에 대하여  $E_h/E_i$ 비가 급격하게 감소하였다. 이것은  $t_{sd}$ 가 긴 경우 거의 모든 주기의 구조물에 대하여 일정한 손상을 가져오지만,  $t_{sd}$ 가 짧은 경우는 주기가 긴 구조물에는 큰 손상을 주지 않음을 의미한다. 따라서 에너지를 이용한 내진설계를 위한  $E_h/E_i$ 비 스펙트럼을 작성하기 위해서는 강한 지진파의 지속시간에 따라 각 주기별 구조물의 손상정도가

달라지기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

그림 13은 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 지반 조건에 관계없이, 그리고 중간 주기까지 일정한 값을 가지기 때문에, 비교적 안정적인 설계변수로 에너지를 이용한 내진설계에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 4.3 감쇠비에 따른 응답 변화

Zahrah와 Hall<sup>(6)</sup>은 탄성과 비탄성 시스템의 입력에너지에 대한 감쇠비의 영향은 매우 작거나 거의 없다고 보고하였다. 하지만 Khashae 등<sup>(19)</sup>은 개별 지진에 대하여 0~40%의 감쇠비의 영향을 분석하였으며, 5%보다 작은 감쇠비에서는 그 영향이 작았지만 그 이상의 큰 감쇠비에 대해서는 응답의 감소 효과가 크다고 결론을 내렸다. 본 연구의 결과에 따르면 각 에너지 응답에 대한 감쇠비의 영향은 예상대로 감쇠비가 증가할수록 이력에너지와  $E_h/E_i$ 비는 감소하였다(그림 14). 이러한 감쇠비의 영향은 전체 주기 중 최대 응답이 발생하는 주기 부근에서 가장 큰 것으로 나타났다. 최대 에너지 응답이 발생한 주기 부근에서

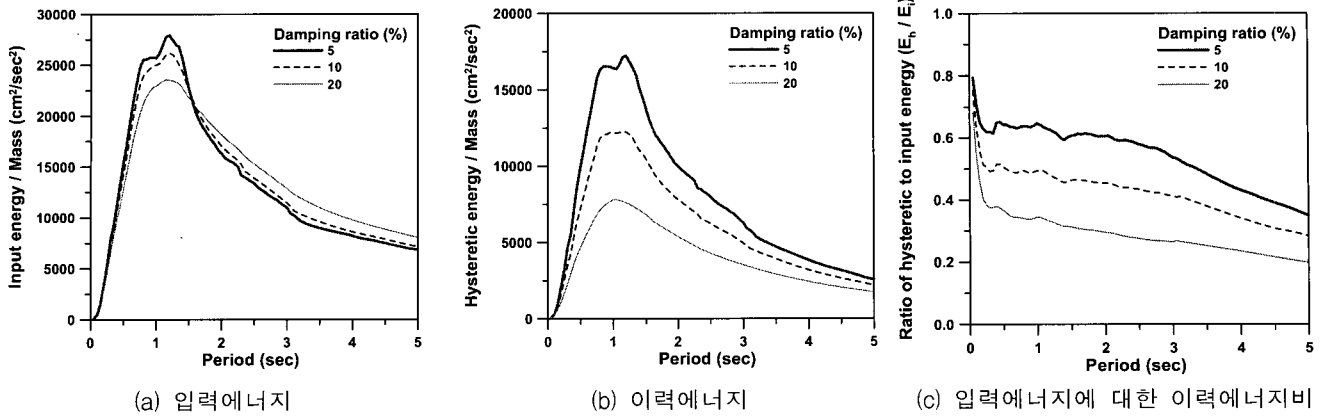


그림 14 감쇠비에 따른 에너지 응답 변화 (LA 지역 연약한 토사 지반,  $\mu=4.0$ )

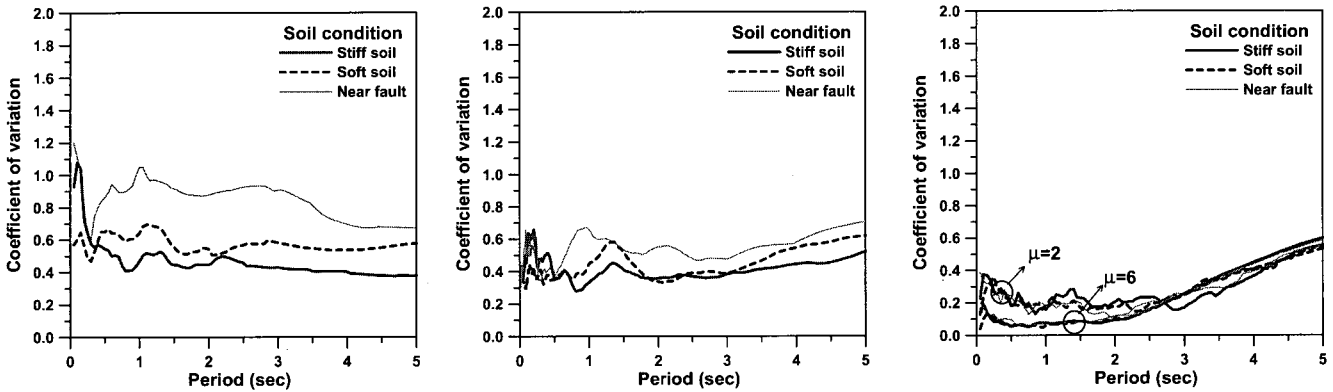


그림 15 지반조건에 따른 입력에너지 스펙트럼의 변동계수 (LA 지역,  $\mu=6.0$ )

그림 16 가속도 응답스펙트럼의 변동계수 (LA 지역, 5% 감쇠비)

그림 17 지반조건과  $\mu$ 에 따른  $E_h/E_i$  스펙트럼의 변동계수 (LA 지역)

는 연약 지반의 경우 감쇠비가 10%로 증가할 때 입력에너지가 6.7% 감소하였고, 감쇠비가 20%로 증가하면 15.6%의 에너지가 감소하였다. 그러나 이러한 주기 영역보다 큰 1.5초 이상에서는 감쇠비가 증가할수록 입력에너지는 증가하였다. 이러한 현상은 감쇠비가 증가할수록 응답이 줄어드는 가속도 응답스펙트럼의 변화와 다른 특성을 나타내었다.

각 지반조건별로 20개 지진하중에 대한 응답의 변동성을 살펴보기 위하여 표준편차를 평균값으로 나눈 변동계수 (coefficient of variation)를 구하였다. 입력에너지 스펙트럼의 변동계수를 나타낸 그림 15를 보면 주기가 0.3초 이하를 제외하고 전체 주기에 걸쳐 변동계수는 일정하다. 지반조건별 변화를 살펴보면 단단한 토사 지반에서 단층 근처로 갈수록 입력에너지의 변동이 매우 커짐을 알 수 있다. 비록 지반조건별 변동계수의 변화폭은 작았지만 이러한 현상은 그림 16과 같이 5% 감쇠비의 가속도 응답스펙트럼의 변화에서 확인할 수 있다. 그러나  $E_h/E_i$ 의 변동계수는 대략 2.5초까지 일정하고 다른 두 응답보다 지반조건에 대한 영향이 작았다(그림 17). 또한 변동계수의 크기도 다른 응답에 비하여 상대적으로 작고 변위연성비가 커질수록 변동계수도 작아지기 때문에 입력에너지나 가속도 응답보다 응답의 변화도 작은 안정적인 설계지표로 이용할 수 있다.

## 5. 결 론

에너지를 이용한 내진설계는 기존 현행설계법의 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 지반 조건, 지진하중의 크기, 강한 지진과의 지속 시간과 같은 지진하중의 특성과 구조물의 주기, 변위연성비, 감쇠비, 항복 후 강성비가 에너지 요구에 미치는 영향에 대하여 해석을 수행하여 기존 연구결과와 비교·분석 하였다.

연구결과에 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 연구결과는 대부분 작은 수의 지진하중에 대하여 개별 지진의 시간이력해석에 의한 결과이며, 구조물의 설계를 위해서는 그 지역에서 발생 가능한 여러 개 지진하중의 평균 응답이 더 의미 있다는 것을 고려하면 본 연구의 결과가 좀 더 타당한 것으로 사료된다. 입력에너지에 대한 이력에너지를 비는 변위연성비가 커질수록 증가하고, 중장 주기 구조물에서는 그 영향이 작은 것으로



나타났다. 또한 지반 조건에 따라 큰 변화를 보이지 않고 중간 주기까지는 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 최대 응답 주변에서 감소하고 장주기에서는 감쇠비가 증가할수록 입력에너지가 증가하였다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C04-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

- SEAOC, *Performance based seismic engineering of buildings*, SEAOC Vision 2000 Committee, Structural Engineers Association of California, California, 1995.
- 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.
- 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.
- 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.
- Housner, G., "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.
- 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.
- Rahnama, M. and Manuel, L., "The effect of strong motion duration on seismic demands," *Proceeding of the 11th World Conference on Earthquake Engineering*, Mexico, 1996.
- 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.
- 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.
- Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, 1995.
- 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.
- Trifunac, M.D. and Brady, A.G., "A study on the duration of strong earthquake ground motion," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 65, No. 3, 1975, pp. 581-626.
- Mahin, S.A. and Lin, J., "Inelastic response spectra for single degree of freedom systems," Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, 1983.
- Akiyama, H., *Earthquake-resistant limit-state design for buildings*, University of Tokyo Press, Japan, 1985.
- 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.
- Cruz, M.F. and López, O.A., "Plastic energy dissipated during an earthquake as a function of structural properties and ground motion characteristics," *Engineering Structures*, Vol. 22, No. 7, 2000, pp. 784-792.
- 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.
20. Manfredi, G., "Evaluation of seismic energy demand," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, No. 4, 2001, pp. 485-499.