

비탄성 응답스펙트럼에 대한 완만한 곡선형 이력거동의 영향

Effect of Smooth Hysteretic Behavior for Inelastic Response Spectra

송종걸¹⁾

Song, Jong Keol

국문 요약 >> 실제 구조요소나 구조시스템의 비선형응답은 단순화된 형태의 분할선형 이력모델 보다는 완만한 곡선이력모델로 나타내는 것이 보다 정확하다. 본 논문에서는 완만한 곡선이력거동을 적용한 일정연성도 비탄성 응답스펙트럼을 작성하는 방법을 제시하였다. 가속도, 변위 및 입력에너지에 대한 비탄성 응답스펙트럼에 대한 곡선형이력거동의 완만한 정도의 영향을 평가하였다. 해석결과로부터 곡선형이력거동의 완만도가 증가할수록 비탄성 응답스펙트럼은 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

주요어 완만한 곡선이력거동, 분할선형거동, 비탄성 응답스펙트럼, 일정연성도

ABSTRACT >> The actual hysteretic behavior of structural elements and systems is closer to smooth hysteretic behavior than piece-wise linear behavior. This paper presents a methodology for computing the constant-ductility inelastic response spectra for smooth hysteretic behaviors. The effect of the hysteretic smoothness on the inelastic response spectra for acceleration, displacement, and input energy is evaluated. The results indicate that increasing smoothness in the hysteretic behavior decreases the inelastic response spectra.

Key words Smooth hysteretic behavior, Piece-wise linear behavior, Inelastic response spectra, Constant-ductility

1. 서론

현재까지 구조물의 비탄성 거동을 평가하기 위하여 사용되는 이력모델은 단순화된 형태의 분할선형 이력모델(Piecewise Linear Hysteretic Model)이 대부분이다. 분할선형 이력모델은 모델링 하기가 간편하고 수치해석을 위한 프로그래밍이 간단하기 때문에 현재까지 대부분의 비선형 동적해석 프로그램에서 널리 사용되고 있다. 그러나 실제 구조물의 비선형 이력특성은 완만한 곡선형태의 이력거동을 보이기 때문에 분할선형 이력모델 보다는 완만한 곡선이력모델(Smooth Hysteretic Model)을 사용하는 것이 구조물의 거동을 정확하게 모사하는데 유리할 것이다.

내진설계의 목적으로 구조물의 비탄성 지진응답을 효과적으로 나타내는 방법으로는 구조물의 주기에 대하여 최대

응답을 나타내는 방법인 비탄성 응답스펙트럼이 널리 사용된다. 비탄성 응답스펙트럼은 성능-기반 내진설계기법 중에서 최근에 많은 연구가 진행되고 있는 역량스펙트럼방법(Capacity Spectrum Method)에서 지진 요구도를 산정하는데 사용된다. 지진요구도가 지진하중의 크기를 나타내고 지진하중의 불확실성이 구조물의 내진성능을 나타내는 역량곡선(Capacity curve)보다 크기 때문에 정확한 지진요구도의 평가가 역량스펙트럼방법에서 구조물의 최대응답을 의미하는 성능점(Performance Point)을 정확하게 평가하는데 중요한 역할을 할 것이다.

본 연구의 목적은 비탄성 응답스펙트럼에 대한 완만한 곡선이력거동의 영향을 평가하는 것이다. 이를 위하여 완만한 곡선이력거동을 구현하기 위하여 Bouc-Wen 모델¹⁾을 사용하였으며 곡선이력거동의 완만한 정도를 변수로 하여 비탄성 응답스펙트럼을 작성하고 완만한 곡선이력거동의 영향을 평가하였다. 비탄성 응답스펙트럼에서 비탄성 거동의 정도는 연성도가 2에서 8의 값을 가지는 다양한 연성도에 대하여 평가하였다. 해석결과로부터 곡선이력거동에서 완만한 정도가 클수록 비탄성 응답스펙트럼을 작게 평가함을 알 수 있다.

¹⁾ 정희원·강원대학교 토목공학과 부교수
(대표저자: songj@kangwon.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 6. 4 / 수정일 1차 : 2009. 11. 15, 2차 : 2009.11.18 / 게재확정일 : 2009. 11. 18)

2. 완만한 곡선이력거동을 적용한 비탄성 응답스펙트럼 작성

2.1 완만한 곡선이력거동의 비탄성 단자유도 시스템

지진하중에 대한 비탄성 단자유도계의 거동을 다음 식 (1)과 같은 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{r}(t) + c\dot{r}(t) + R(r(t), \dot{r}(t)) = -m\ddot{w}(t) \quad (1)$$

여기서, $r(t)$ 는 질량(m)의 밑면에 대한 상대변위이며 c 는 점성감쇠계수를 나타낸다. $R(r(t), \dot{r}(t))$ 는 비탄성 저항력을 나타낸다. $\ddot{w}(t)$ 는 지진가속도를 나타낸다. R_y 는 항복력을 나타내며 r_y 는 항복변위를 나타낸다. 강성 k 는 R_y/r_y 로 서 구할 수 있다. 연성도 응답 $\mu(t)$ 를 $r(t)/r_y$ 로 정의하고 식 (1)을 mr_y 로 나눈 후 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega_n\dot{\mu}(t) + \frac{R(r(t), \dot{r}(t))}{mr_y} = -\frac{\ddot{w}(t)}{r_y} \quad (2)$$

정규화된 저항력 $z(t)$ 를 $R(t)/R_y$ 의 비로서 정의하여 식 (2)의 왼쪽에서 세번째 항을 정리하여 나타내면 다음 식 (3)과 같다.

$$\frac{R(t)}{mr_y} = \frac{R_y z(t)}{mr_y} = \frac{kr_y z(t)}{mr_y} = \omega_n^2 z(t) \quad (3)$$

구조물의 자중에 대한 항복력의 비를 항복강도계수(Yield Strength Coefficient) C_y 로 정의하여 정리하면 다음 식 (4)와 같다.

$$C_y = \frac{R_y}{mg} = \frac{kr_y}{mg} = \frac{\omega_n^2 r_y}{g} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 식 (2)를 정리하면 다음 식 (5)와 같다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega_n\dot{\mu}(t) + \omega_n^2 z(t) = -\frac{\omega_n^2}{C_y g} \ddot{w}(t) \quad (5)$$

여기서, Bouc-Wen 모델⁽¹⁾을 이용하여 정규화된 저항력 $z(t)$ 를 다음의 비선형 미분방정식에 의해 종속적인 거동을 하도록 나타내면 다음 식 (6)과 같다.

$$\dot{z}(t) = [1 - |z(t)|^p \operatorname{sgn}(\dot{\mu}(t)z(t))] \dot{\mu}(t) \quad (6)$$

여기서, p 는 곡선이력거동의 완만한 정도를 조절하는 변수이다. p 가 작은 값을 가지면 탄성에서 항복후 강성으로 완만하게 곡선의 형태의 강성이 변하는 천이구간이 커지며, p 가 큰 값을 가질수록 천이구간이 작아지며 이선형(Bilinear)

모델과 유사하게 된다. 만약에 $\dot{\mu}(t)z(t)$ 가 양의 값을 가지면 $\operatorname{sgn}(\dot{\mu}(t)z(t))$ 는 1이며 이외의 경우에는 $\operatorname{sgn}(\dot{\mu}(t)z(t))$ 은 -1이다.

비탄성 저항력이 항복후 강성 ak 을 가진다면 식 (5)는 다음 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\ddot{\mu}(t) + 2\xi\omega_n\dot{\mu}(t) + \omega_n^2((1-\alpha)z(t) + \alpha\mu(t)) = -\frac{\omega_n^2}{C_y g} \ddot{w}(t) \quad (7)$$

특정한 고유진동수, $\sqrt{R_y/(mr_y)}$ 와 감쇠비 $c/2\sqrt{mR_y/r_y}$ 를 가진 구조물에 대하여 최대 지진가속도를 2배로 하고 항복강도계수도 동시에 2배로 한다면 동일한 연성도 응답이 구해진다.

2.2 수치해석 알고리즘

식 (6)과 식 (7)의 해는 수치적인 방법에 의해 구하였으며, 본 연구에 사용한 수치적인 방법은 이 식들을 증분의 형태로 나타내어 동적변수들을 최종적으로는 변위, 속도, 가속도의 응답으로 전환하여 매 시간스텝마다 계산하였다. 속도와 가속도의 증분은 변위의 증분으로부터 구하였으며 현재 스텝의 속도와 가속도 값을 구하기 위하여 뉴마크 베타(Newmark- β) 방법이 적용되었다. 식 (6)이 비선형이기 때문에 매 시간스텝에서의 변위증분을 계산하기 위하여는 뉴턴 반복법(Newton Iteration)이 적용되었다. 변위증분이 계산이 되면 속도 증분은 뉴마크 베타방법에 의해 계산되며, 다음 스텝의 변위와 가속도의 응답이 현재 스텝의 변위와 속도응답에 각각 변위증분과 속도증분을 더하여 구한다. 다음 스텝의 가속도 응답은 식 (7)의 동적 평형방정식으로부터 계산하였다.

2.3 일정연성도 비탄성 응답스펙트럼의 작성

일정연성도 응답스펙트럼(Constant-Ductility Response Spectrum)은 다양한 주기 T_n 을 가진 구조물의 응답이 일정한 최대연성도를 가지도록 한 응답스펙트럼이다. 지진공학 분야에서 비탄성 거동의 정도를 나타내는 변수로 연성도가 가장 널리 사용되고 있기 때문에 비탄성 응답스펙트럼도 일반적으로 일정 연성도에 대하여 나타내는 것이 가장 일반적이다. 최대연성도가 모든 주기에 대하여 동일하도록 하기 위해서는 구조시스템의 항복강도계수 C_y 가 주기에 따라서 적절하게 선택되도록 하여야 한다. 일반적으로 항복강도계수가 작아지면 연성도는 증가하고 항복강도계수가 증가하면 연성도는 감소하는 경향을 나타내지만, 지진하중의 특성에 따라서는 예외적으로 특정한 주기범위에서는 반대의 경향을 나타내기도 한다. 일정연성도 응답스펙트럼이 만족되도록

항복강도계수 C_y 를 선정하기 위하여 분할법(Bisection)과 뉴턴 반복법을 적용한 시행오차법을 적용하였다.

2.4 변위, 가속도 및 입력에너지 응답스펙트럼

비탄성 응답스펙트럼에 대한 완만한 이력곡선거동의 영향을 분석하기 위하여 변위, 가속도, 입력에너지에 대하여 응답스펙트럼을 계산하여 평가하였다.

변위 응답스펙트럼 $r_{max}(T_n, \xi, r_y)$ 및 가속도 응답스펙트럼 $A_{max}(T_n, \xi, r_y)$ 은 식 (7)로 부터 구한 연성도 응답 $\mu(t)$ 와 $\ddot{\mu}(t)$ 를 이용하여 다음 식 (8) 및 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$r_{max}(T_n, \xi, r_y) = \max[\mu(t)r_y] \quad (8)$$

$$A_{max}(T_n, \xi, r_y) = \max[\ddot{\mu}(t)r_y + \ddot{w}(t)] \quad (9)$$

입력에너지 응답스펙트럼은 식 (1)을 상대변위에 대하여 적분하여 구한 에너지 방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다. 식 (1)을 상대변위에 대하여 적분하면 다음 식 (10)과 같은 지진에너지 방정식이 된다.

$$\int m\ddot{r}_a(t)dr + \int c\dot{r}(t)dr + \int R(r(t), \dot{r}(t))dr = 0 \quad (10)$$

여기서, $\ddot{r}_a(t) = \ddot{r}(t) + \ddot{w}(t)$

식 (10)의 첫째항의 dr 을 $dr_a - dw$ 로 교체하고 정리하여 나타내면 다음 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \int m\ddot{r}_a(t)dr &= \int m\ddot{r}_a(t)(dr_a - dw) \quad (11) \\ &= \int m\frac{d\dot{r}_a(t)}{dt}dr_a - \int m\ddot{r}_a(t)dw = \frac{m(\dot{r}_a(t))^2}{2} - \int m\ddot{r}_a(t)dw \end{aligned}$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하고 정리하면 다음 식 (12)와 같다.

$$\frac{m(\dot{r}_a(t))^2}{2} + \int c\dot{r}(t)dr + \int R(r(t), \dot{r}(t))dr = \int m\ddot{r}_a(t)dw \quad (12)$$

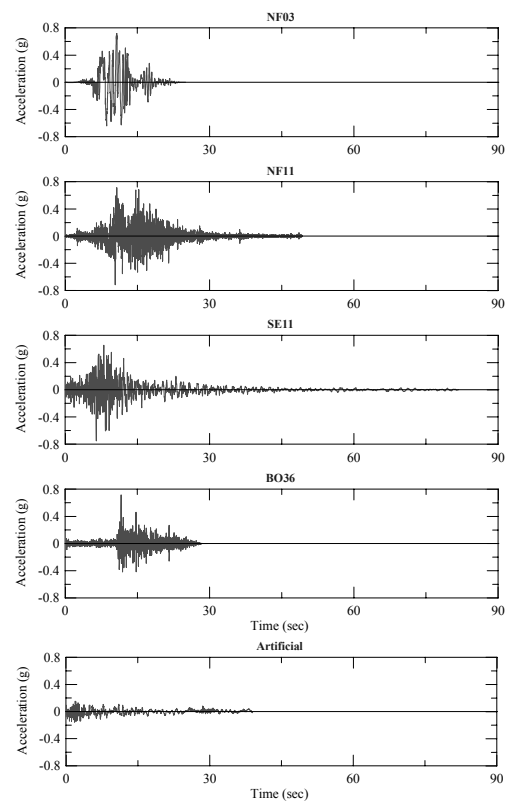
식 (12)에서 좌측변의 첫째항이 운동에너지(Kinetic Energy), 둘째항이 감쇠에너지(Damping Energy), 셋째항이 비탄성

변형에너지(Hysteretic Energy)를 나타낸다. 오른쪽 항은 좌측 항에 나타난 세가지 에너지항의 합으로써 입력에너지(Input Energy, E_I)를 나타내며 수치해석을 위한 식으로 정리하며 나타내면 다음 식 (13)과 같다

$$\begin{aligned} E_I &= \int m\ddot{r}_a(t)dw = \int m\ddot{r}_a(t)\dot{w}(t)dt \\ &= \int m(\ddot{r}(t) + \ddot{w}(t))\dot{w}(t)dt \quad (13) \end{aligned}$$

3. 완만한 곡선이력모델을 이용한 비탄성 응답스펙트럼의 평가

비탄성 응답스펙트럼에 대하여 완만한 곡선이력모델의 영향을 평가하기 위하여 사용한 지진가속도 기록의 특성은 표 1과 그림 1에 나타난 바와 같다. 지진가속도 기록은 인터넷 웹



〈그림 1〉 해석에 사용한 지진가속도

〈표 1〉 지진가속도 기록의 특성

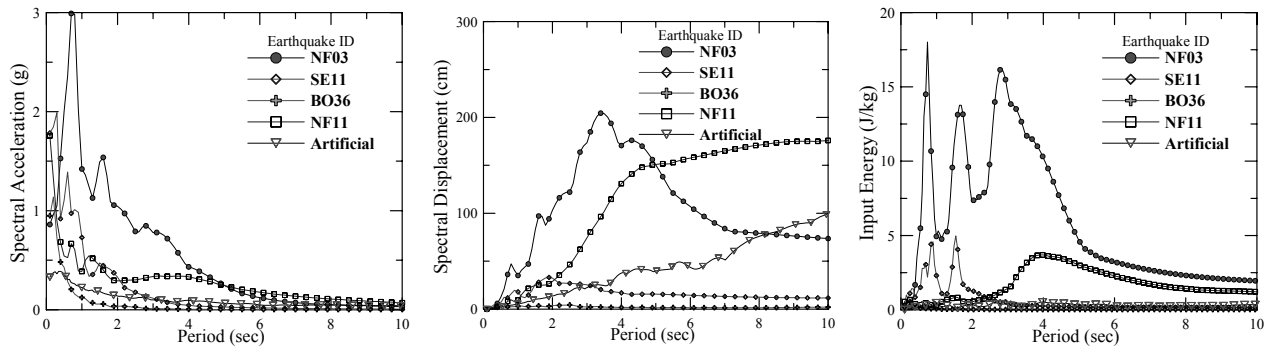
Near-fault, Far-fault or Artificial	Earthquake ID	Earthquake	Magnitude	Distance(km)	PGA(cm/sec ²)	PGV(cm/sec)
Near-fault	NF03	Loma Prieta, 1989, Los Gatos	7	3.5	703.84	172.84
	NF11	Landers, 1992	7.3	1.1	699.62	136.04
Far-fault	SE11	Puget Sound, Wa., Olympia, 1949	7.1	80	737.82	52.35
	BO36	Saguenay, 1988	5.9	98	699.90	16.44
Artificial Earthquake	Artificial	-	-	-	151.03	101.19

사이트(http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/)⁽²⁾ 으로부터 지진가속도 기록 중 근거리 지진(NF03, NF11) 2개와 원거리 지진(SE11, BO36) 2개를 선정하여 사용하였다. 그리고 도로교 설계기준의 설계스펙트럼에 대응하는 인공지진을 1개 작성하여 사용하였다. 일반적으로 근거리 지진, 원거리 지진, 인공지진의 특성이 다르므로 완전한 곡선형 이력거동의 비탄성 응답스펙트럼의 비교를 위하여 선정하였다.

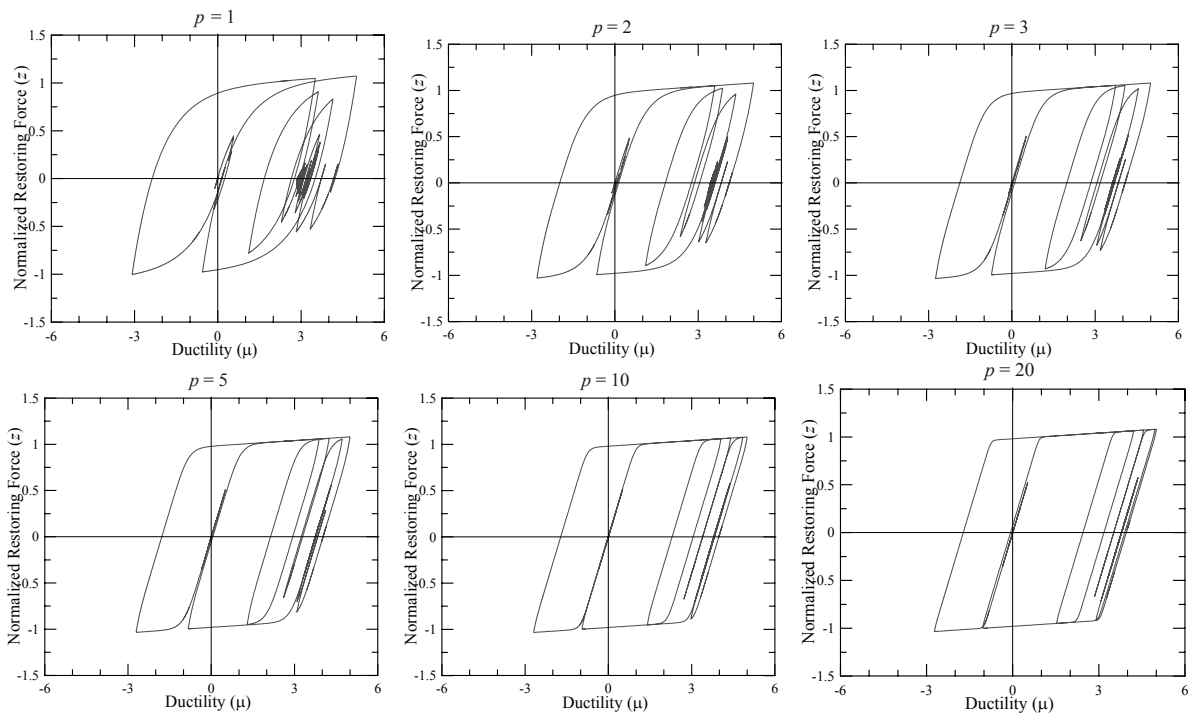
표 1로부터 2개의 근거리 지진과 2개의 원거리 지진은 최대지반가속도(PGA)가 대략 0.7g에 가까운 값을 나타내지만 최대지반속도는 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 3배에서 10배정도 크다는 것을 알 수 있다. 인공지진은 최대가속도는 실제지진에 비하여 작지만 최대속도는 근거리와 원거리 지진의 중간정도의 값을 나타낸다. 입력지진의 특성을 나타내기 위하여 그림 2에 가속도, 변위와 입력에너지

지에 대하여 탄성응답스펙트럼을 작성하여 나타내었다. 특히 변위 응답스펙트럼의 경우에 근거리 지진과 원거리 지진의 차이가 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 구조물의 손상은 변위응답의 크기와 비례하는 관계를 나타낼 것이므로 비슷한 최대지반가속도이더라도 근거리 지진이 원거리 지진에 비하여 손상정도가 크게 나타난다고 할 수 있다.

식 (6)에 나타난 곡선이력거동의 완전한 정도를 조절하는 계수 p 가 각각 1, 2, 3, 5, 10, 20인 경우에 대하여 비탄성 힘-변위 이력관계를 근거리지진인 NF03에 대하여 비교하여 그림 3에 나타내었다. 여기서 최대변위 연성도는 5, 항복 후 강성비 α 는 0.02, 감쇠비가 5%, 구조물의 주기는 1초인 경우에 대하여 분석하였다. 본 연구에서 항복변위(r_y)는 완만도에 상관없이 동일하게 적용된다. 그림 3의 완만도에 따른 힘-변위 관계에서도 잘 나타난 바와 같이 완만도에 상



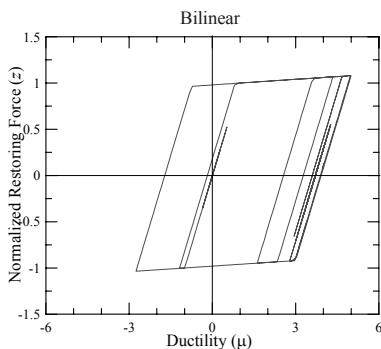
〈그림 2〉 입력지진에 대한 탄성응답스펙트럼($\xi=5\%$)



〈그림 3〉 NF03 지진가속도에 대한 곡선형 이력거동의 완만도 조절계수 (p)의 영향 (주기 $T_n=1.0$ sec, 최대변위연성도 $\mu=5$, 항복후 강성비 $\alpha=0.02$, 감쇠비 $\xi=0.05$ 를 적용한 경우)

관없이 항복변위는 탄성거동의 직선구간과 항복후의 비탄성 거동의 직선 구간을 직선으로 연장하여 나타낼 경우에 두 직선의 교차하는 점이 항복점이 되므로 완만도에 관계없이 항복변위가 동일하게 적용된다. 그림 3으로부터 계수 p 가 작을수록 이력거동은 곡선거동의 완만정도가 증가하며 p 가 증가할수록 이선형(Bilinear) 거동에 가까워짐을 알 수 있다. p 가 10보다 큰 경우에는 이선형 거동에 근접함을 알 수 있다. 완만한 곡선이력거동을 이선형 거동과 비교하기 위하여는 Bispec 프로그램⁽³⁾을 이용하여 이선형 거동을 해석하였으며 그림 3에 나타낸 동일한 조건(주기 $T_n = 1.0$ sec, 최대변위연성도 $\mu = 5$, 항복후 강성비 $\alpha=0.02$, 감쇠비 $\xi = 0.05$ 를 적용한 경우)에 대하여 이선형 모델을 의한 이력거동을 그림 4에 비교하여 나타내었다. 그림 4의 이선형 거동과 그림 3의 p 가 20인 곡선형 이력거동이 완벽하게 동일한 이력거동을 나타내지는 않지만 유사한 이력거동을 나타냄을 알 수 있다. 본 연구에서는 곡선형 이력거동의 완만도에 따른 비탄성 응답스펙트럼의 영향을 비교하기 위하여 완만도 조절계수 p 는 1, 2, 5와 10을 선택하여 적용하였다.

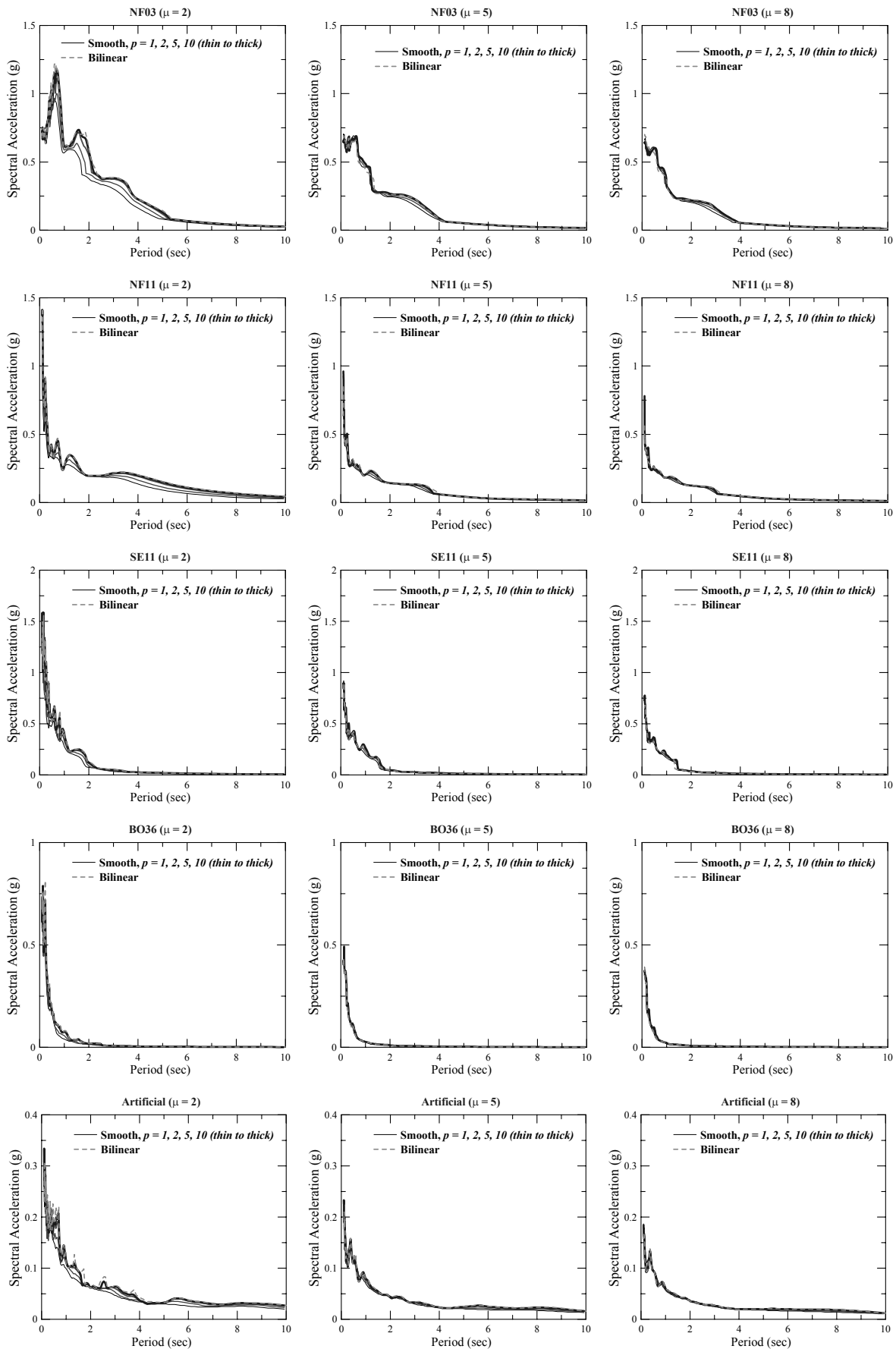
2개의 근거리 지진, 2개의 원거리 지진과 1개의 인공지진에 대하여 다양한 완만도 조절계수 ($p=1, 2, 5, 10$)의 곡선형 이력거동과 이선형 거동에 의한 가속도 응답스펙트럼을 비교하여 그림 5에 나타내었다. 근거리 지진에 대해서 완만한 곡선형 이력거동에 의한 가속도 응답스펙트럼이 이선형 거동의 가속도 응답스펙트럼보다는 작게 나타남을 알 수 있다. 완만도 조절계수가 작을수록 즉, 곡선형 이력거동의 완만도가 증가할수록 가속도 응답스펙트럼은 이선형 거동의 가속도 응답스펙트럼에 비해 작게 평가함을 알 수 있다. 또한 연성도가 작을수록 이러한 경향은 크게 나타남을 알 수 있다. 원거리 지진과 인공지진에 대해서는 이러한 완만도에 대한 가속도 응답스펙트럼의 차이가 근거리 지진에 비해서는 작게 나타난다.



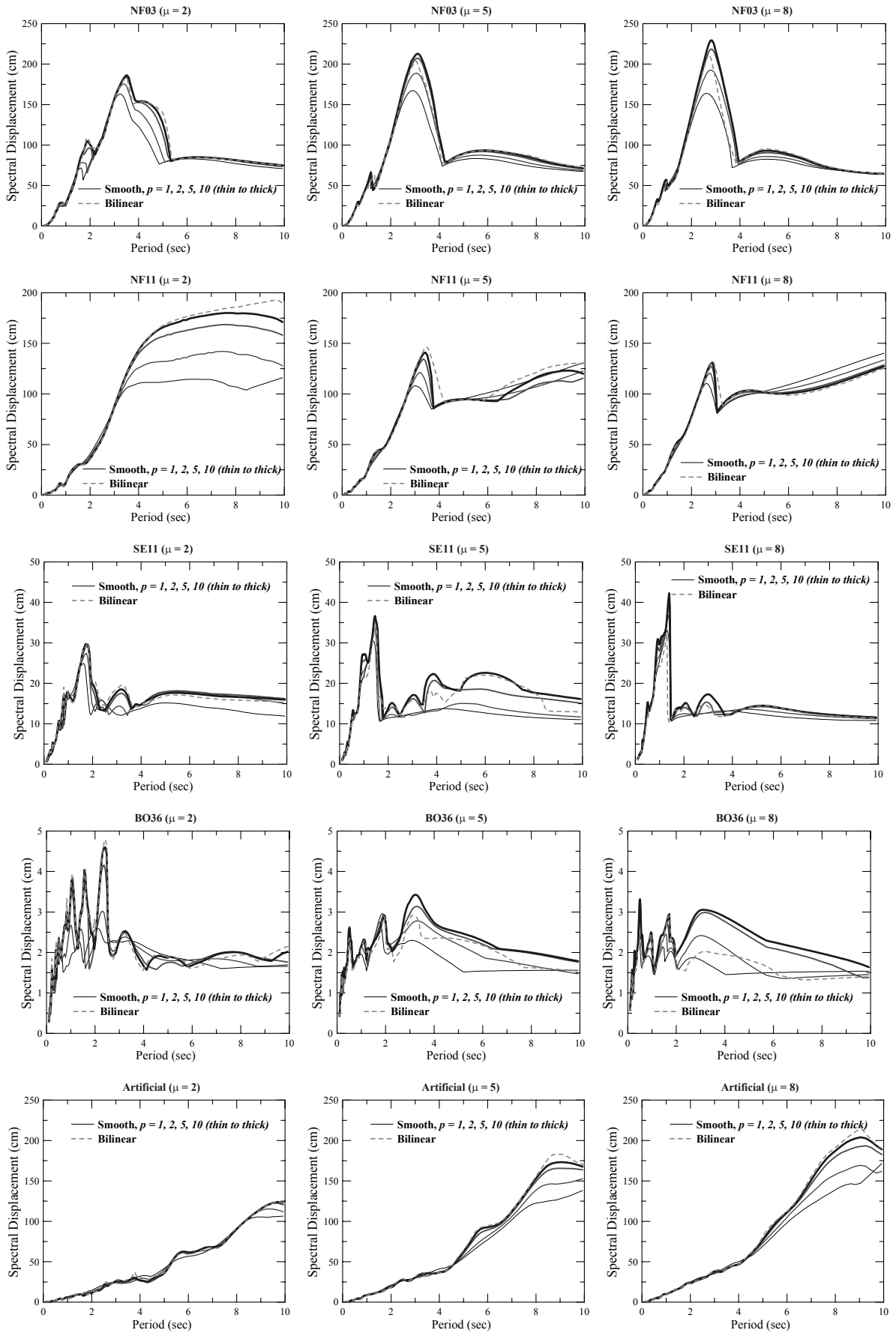
〈그림 4〉 NF03 지진가속도에 대한 이선형(bilinear) 모델에 대한 힘-변위 (주기 $T_n=1.0$ sec, 최대변위연성도 $\mu=5$, 항복후 강성비 $\alpha=0.02$, 감쇠비 $\xi=0.05$ 를 적용한 경우)

다양한 완만도 조절계수 ($p=1, 2, 5, 10$)의 곡선형 이력거동과 이선형 거동에 의한 변위 응답스펙트럼을 비교하여 그림 6에 나타내었다. 곡선형 이력거동의 완만도가 변위 응답스펙트럼의 경우에는 가속도 응답스펙트럼의 경우보다 민감하게 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 구조물의 비탄성 거동시에 항복후의 구조물의 강도는 일정하거나 약간만 변화하지만 변위는 비탄성 거동의 정도에 따라서 강도의 변화에 비하여 큰 폭으로 변화하는 특성이 있다. 이와 같이 구조물의 강도에 관련 있는 가속도 응답스펙트럼보다는 변위 응답스펙트럼이 비탄성 거동의 정도에 민감하다고 판단된다. 그러므로 비탄성 응답스펙트럼에 대한 완만도의 영향도 이와 같은 이유로 가속도 응답 보다는 변위응답에 보다 민감하게 나타나는 것으로 판단된다. NF11 지진에 대하여 연성도가 2인 경우에 구조물의 주기가 3초 이상인 변위 응답스펙트럼은 곡선형 이력거동의 완만도의 영향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으며 p 가 1인 경우가 p 가 10인 경우에 비하여 변위응답스펙트럼이 대략 40% 정도 감소하여 나타남을 알 수 있다. 원거리 지진인 BO36 지진에 대하여 연성도가 2인 경우와 SE11 지진에 대하여 연성도가 5와 8인 경우를 통하여 곡선형 이력거동의 완만도가 증가할수록 변위응답스펙트럼의 불규칙적으로 변동하는 응답특성이 완만한 응답특성으로 변하게 함을 알 수 있다. 그리고 실제지진 기록인 근거리 지진과 원거리 지진에 대해서는 곡선이력거동의 완만도는 구조물의 주기가 1초 이상인 장주기 영역에서 주로 영향을 주며 완만도 조절계수 p 가 작아질수록 변위 응답스펙트럼은 대체적으로 작아지지만 특정주기 영역에서는 반대의 경향도 부분적으로 발생함을 알 수 있다. 인공지진에 대해서는 구조물의 주기가 5초 이상인 장주기 영역에서 비탄성 변위스펙트럼에 대한 완만도의 영향이 두드러짐을 알 수 있다.

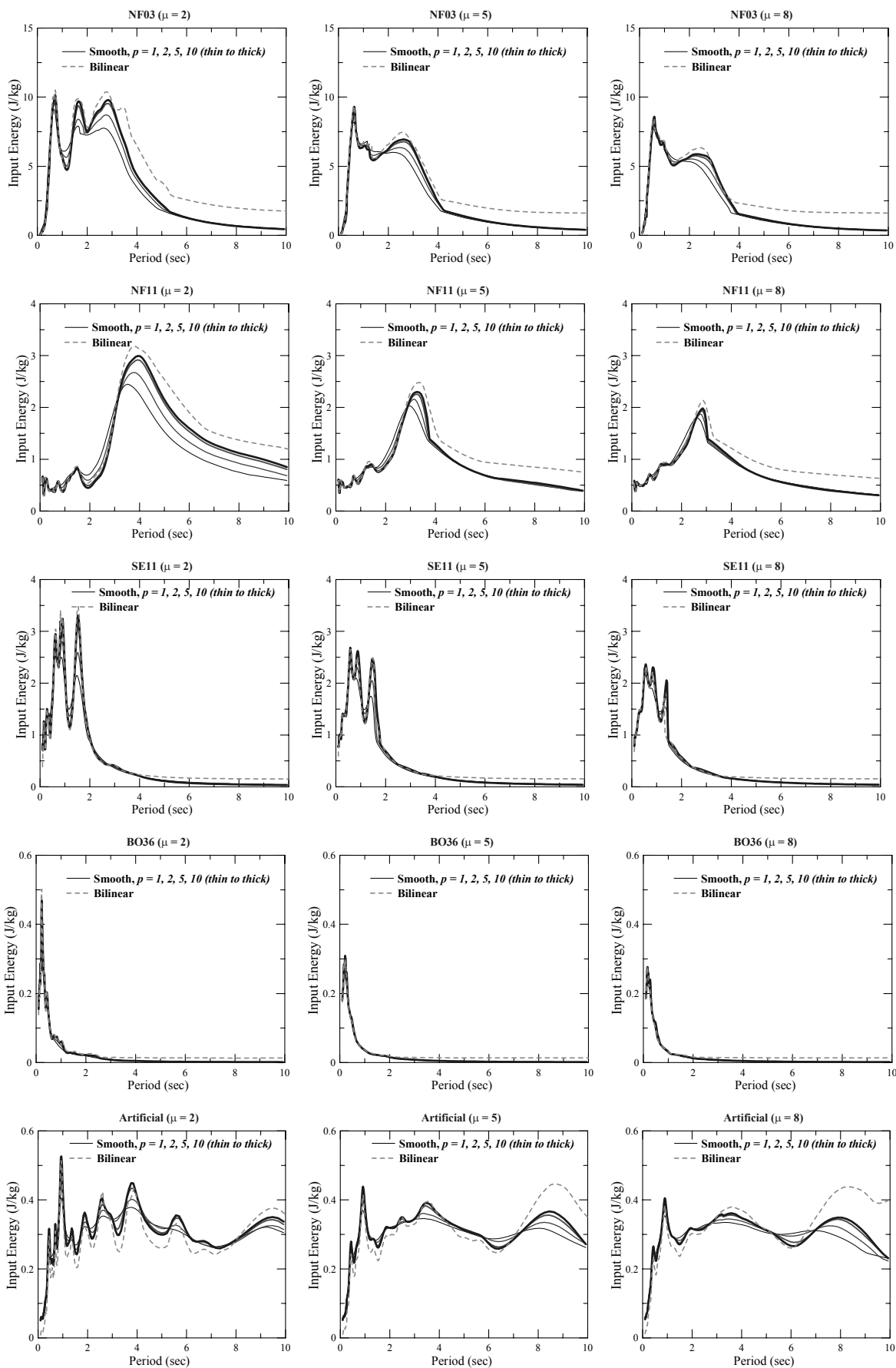
다양한 완만도 조절계수 ($p=1, 2, 5, 10$)의 곡선형 이력거동과 이선형 거동에 의한 입력에너지 응답스펙트럼을 비교하여 그림 7에 나타내었다. 그림 5와 그림 6에 나타난 가속도 및 변위응답스펙트럼의 경향과 비슷하게 완만한 곡선형 이력거동의 입력에너지 응답스펙트럼이 이선형 이력거동에 의한 입력에너지 응답스펙트럼보다 작게 나타나는 경향을 나타내며 완만도 정도가 커질수록 입력에너지 응답스펙트럼도 보다 작아짐을 알 수 있다. 그러나 예외적으로 인공지진의 대한 짧은 주기영역에서는 이선형 거동의 입력에너지 응답이 완만한 곡선형 응답보다 작게 나타나는 특성을 나타내고 있다. 인공지진의 경우에도 곡선형 이력거동의 경우에 완만도가 증가할수록 입력에너지 스펙트럼이 작게 나타나는 경향은 동일하게 나타난다. 그림 5와 그림 6에 나타



〈그림 5〉 다양한 완만도 조절계수 ($p=1, 2, 5, 10$)의 곡선형 이력거동과 이선형 거동에 의한 가속도 응답스펙트럼의 비교($\alpha=0$, $\xi=0.05$, $\mu=2, 5, 8$ 를 적용)



〈그림 6〉 다양한 완만도 조절계수 ($p=1, 2, 5, 10$)의 곡선형 이력거동과 이선형 거동에 의한 변위 응답스펙트럼의 비교($\alpha=0, \xi=0.05, \mu=2, 5, 8$ 를 적용)



〈그림 7〉 다양한 완만도 조절계수 ($p=1, 2, 5, 10$)의 곡선형 이력거동과 이선형 거동에 의한 입력에너지 응답스펙트럼의 비교 ($\alpha=0, \xi=0.05, \mu=2, 5, 8$ 를 적용)

낸 가속도 및 변위응답스펙트럼에서는 완만도 조절계수 p 가 10인 경우에는 이선형 거동의 경우와 큰 차이 없이 유사하였지만, 입력에너지 응답스펙트럼의 경우에는 주기가 3초 이상의 장주기 영역에서는 이선형 거동의 경우가 곡선형 이력거동에 비하여 약 1.1~2배 정도의 큰 응답을 나타냄을 알 수 있다. 이는 입력에너지 응답스펙트럼은 식 (13)에 나타낸 비와 같이 속도 및 변위 응답스펙트럼과는 달리 최대응답의 값인 아닌 지진발생 시간 동안의 누적된 응답이므로 이와 같은 차이를 나타내는 것으로 판단된다. 실제지진가속도 기록에 대해서는 3초 미만의 주기영역에서는 이선형 거동과 p 가 10인 곡선형 이력거동의 입력에너지 응답스펙트럼이 잘 일치하는 경향을 나타낸다.

그림 5, 6, 7의 결과를 종합하면 곡선형 이력거동의 완만도가 증가할수록(p 가 작을수록) 이선형 거동에 비하여 비탄성 응답스펙트럼을 전반적으로 작게 평가함을 알 수 있다. 실제적인 구조물의 거동이 이선형 거동보다는 완만한 곡선형 이력거동의 형태를 나타냄으로 곡선형 이력거동에 의한 비탄성 응답스펙트럼이 이선형 거동의 비탄성 응답스펙트럼보다는 정확한 결과를 나타낸다고 할 수 있다. 이선형 거동에 비해 실제구조물의 거동과 보다 유사한 완만한 곡선형 이력거동에 의한 비탄성 응답스펙트럼을 설계에 적용한다면 감소한 비탄성 응답스펙트럼을 적용하는 것이므로 구조부재의 강도를 작게 설계할 수 있으므로 경제적인 설계가 이루어지리라 판단된다. 그러나 사용한 지진가속도 기록이 제한적이므로 연구결과를 설계에 직접적으로 반영하기에는 아직 부족하다고 판단되며 추후 보다 많은 지진가속도에 대한 비탄성 응답스펙트럼의 평균응답을 구하는 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결론

실제적인 구조물의 거동이 기존의 이선형 이력거동에 비하여 완만한 곡선형 이력거동과 보다 유사하기 때문에 본 연구에서는 완만한 곡선형 이력거동을 이용한 비탄성 응답스펙트럼을 평가하는 방법을 제시하였다. 다양한 완만도를 가지는 곡선형 이력거동과 이선형 이력거동에 대한 가속도, 변위, 입력에너지에 대한 비탄성 응답스펙트럼을 비교, 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 곡선형 이력거동의 완만도가 증가할수록(완만도 조절계수 p 가 작을수록) 이선형 거동에 비하여 비탄성 응답스펙트럼을 대부분의 주기영역에서 전반적으로 작게 평가

한다. 그러나 특정주기영역에서는 부분적이기는 하지만 반대의 경향도 나타나기도 한다.

2. 완만한 곡선형 이력거동의 영향은 변위 응답스펙트럼의 경우가 가속도 및 입력에너지 응답스펙트럼에 비하여 크게 나타난다.
3. 이선형 거동에 비해 실제구조물의 거동과 보다 유사한 완만한 곡선형 이력거동에 의한 비탄성 응답스펙트럼을 설계에 적용한다면 감소한 비탄성 응답스펙트럼을 적용하는 것이므로 구조부재의 강도를 작게 설계할 수 있으므로 경제적인 설계가 이루어지리라 판단된다. 그러나 사용한 지진가속도 기록이 5개이므로 연구결과를 설계에 직접적으로 반영하기에는 아직 부족하다고 판단되며 추후 보다 많은 지진가속도에 대한 비탄성 응답스펙트럼의 평균응답을 구하는 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

2007년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였기에 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Peng, B.F., and Conte, J.P., "Statistical insight into constant-ductility design using a non-stationary earthquake ground motion model," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, 895-916, 1997.
2. http://nisee.berkeley.edu/data/strong_motion/sacsteel/.
3. Hachem MM. Bispec: a nonlinear spectral analysis program that performs bi-direction dynamic time-history analysis of pendulum system. University of California at Berkeley, (<http://www.ce.berkeley.edu/~hachem/bispec/>).
4. Mahin SA, Lin JP. Construction of inelastic response spectra for single-degree-of-freedom systems: computer program and applications. *Report UCB/EERC-83/17*, Earthquake Engineering Centre, University of California, Berkeley, CA., 1983.
5. Riddell R. Inelastic response spectrum: *early history*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 37, 1175-1183, 2008.
6. Sucuoğlu H, Dicleli M, Nurtuğ A. An analytical assessment of elastic and inelastic response spectra. *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 21, 386-395, 1994.
7. Reinhorn AM, Barron R, Valles RE, Sivaselvan MV. Nonlinear analysis program for inelastic spectra with degradation and deterioration of structural systems. University at Buffalo, SUNY, (<http://civil.eng.buffalo.edu/nspectra/>).