

# 지진하중에 의한 구조물의 비선형 거동 예측

## Prediction of Nonlinear Seismic Response

김 희 중<sup>1)</sup>  
*Kim, Hee Joong*

**ABSTRACT :** The structural members under seismic loading actually show inelastic behavior, so the inelastic responses should be calculated for the seismic design of structures or estimating the structural damage level. Although direct time history analysis may calculate the exact dynamic nonlinear responses for given ground motions, this approach involves a high computational cost and long period. Therefore, it should be developed the approach to estimate nonlinear responses for the practical purpose.

The artificial earthquake accelerograms were generated to obtain the smoothed responses spectra, and the samples of generated accelerogram for each seismic event was used to examine average nonlinear response spectra. The stabilized response spectra for each earthquake event was used to evaluate the effects of various yield strength ratios, damping values and nonlinear hysteretic models. The approach, which can simply predict the nonlinear seismic responses of structures, was shown in this study.

### 1. 서 론

최근 많은 연구가 있었음에도 불구하고, 지진에 의한 구조물의 동적 반응을 구조물의 형식, 재료의 극한강도 및 지반운동의 복잡성 등으로 정확히 예측하기란 어려운 것이다. 일반적으로 각 구조물의 중요성에 따라 시간이력해석법으로 선형 및 비선형 동적 거동이 계산되어 왔으나, 그 방법은 많은 시간과 경비가 요구되기 때문에 일반 구조물의 동적 거동은 응답 spectrum을 이용하여 추정되고

있다.<sup>1-3)</sup> 그러나 많은 구조물들은 지진하중이 발생하는 동안 구조물의 연성으로 인하여 비선형 거동을 보이고 있으며 기존 응답 spectrum으로써는 정확한 비선형 거동을 추정하는 것은 한계가 있다.

또한 내진 설계 spectrum은 여러 지역에서 기록된 지진파의 최대 지반 가속도를 일정한 수준으로 정규화하여 얻어진 평탄한 spectrum을 사용하고 있으나, 기록된 하나의 지진파는 그 지역에서 발생한 하나의 확률변수인 것으로 가정할 수 있을

1) 계명대학교 토목공학과 조교수

것이다. 따라서 지진에 의한 구조물의 거동은 각 지역의 지진파 특성이 포함된 많은 수의 지진파를 입력시켜서 얻어진 응답으로 결정하는 것이 타당할 것이다.

지진하중에 의한 구조물의 비선형 거동은, 각 구조물의 구조방식과 재료의 특성에 따른 감쇠율(Damping value)과 초기 항복강도(Initial Yield Strength)등에 영향을 받으며, 응답은 구조물에 발생하는 최대 변위와 최대 변위를 초기 항복변위로 나누어진 값인 변위연성도(Displacement Ductility), 혹은 비선형 거동에 의해서 소산되는 소성에너지(Dissipated Hysteretic Energy) 등으로써 측정되고 있다. 반복하중에 의한 부재의 비선형거동을 측정하기 위하여 결정되어야 하는 하중-변위 곡선의 형식은 각각 다른 목적에 의해 실행된 실험을 통하여 얻어진 결과에 의하여 여러 가지 모델이 제안되고 있다.<sup>2,4)</sup>

구조물의 비선형 거동은 입력될 지진파의 특성, 비선형 이력거동 모델 및 감쇠율과 초기 항복강도비에 따라 많은 차이를 보인다. 그러므로 본 연구에서는 제안된 여러가지 비선형 하중-변위 곡선들 중에서 보편 타당성이 있고 각 구조재료의 특성을 만족할 수 있는 것을 선택하여, 작성된 인공지진파를 구조물에 입력시킴으로써 얻어지는 소성변위량과 소산될 소성에너지량으로부터 하중-변위 곡선 모델의 특성을 비교 분석하였다. 감쇠율과 초기 항복강도비의 변화에 따른 비선형 거동의 변화를 통계적으로 처리함으로써 비선형 거동을 간단히 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

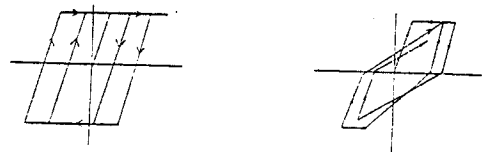
## 2. 비선형 동적 해석

### 2.1 비선형 하중-변위 곡선

부재의 실제 거동에 근접한 하중-변위 곡선을 사용하여 동하중에 의한 응답을 정확히 예측하는 연구가 진행되어 왔으며, 하중의 조건을 고려한 실험의 중요한 결과와 제안된 여러가지 비선형 하중-변위 이력곡선에 대한 고찰은 Banon<sup>5)</sup>과

Roufaiel<sup>6)</sup> 등에 의해서 이루어졌다.

일반적인 조건에서 비선형 거동을 해석하는 것이 본 연구의 목적이므로 그림 1과 같이 비교적 간단하고 구조재료의 특성을 나타낼 수 있는 elasto-plastic model과 stiffness degrading model을 사용하였다. 탄소성곡선은 동적해석 연구에서 가장 널리 사용되고 있기 때문에 다른 연구자의 결과와 비교할 수 있을 것이다. stiffness degrading model은 하중이 반복되는 동안 소성변형 후 강성이 저하되는 현상을 고려한 것이다. Clough가 처음 제안한 stiffness degrading model에서는 처음 항복이후 선형의 경로가 항상 전번의 최대 항복변위점으로 향하기 때문에 작은 진폭의 반복하중에서 불완전한 hysteretic loop가 발생되어 다른 결과를 초래할 우려가 있다. Riddel과 Newmark<sup>7)</sup>은 이러한 점을 보완한 수정된 stiffness degrading model을 제안하여, 본 연구에서는 이 model을 사용하였다.



(a)Elasto-Plastic system (b)Stiffness Degrading System

Fig. 1 Nonlinear Hysteretic Model

### 2.2 구조물의 강도 특성

비선형 응답 spectrum은 횡축으로 구조물의 고유진동수 혹은 주기와 종축으로는 변위연성도 혹은 항복강도로서 표시되고 있다. 어떠한 비선형 하중-변위 곡선을 사용하여 구조물의 동적 응답을 구하기 위하여는 구조물의 강도 특성인 감쇠율과 초기 항복변위(혹은 강도)등 최소한 2개의 요소는 가정되어야 한다.

선형 및 비선형 거동에서 구조물에 입력된 energy는 감쇠효과에 의해서 소산 된다는 것은 잘 알려져 있으며, ATC<sup>1)</sup> 등 설계시방서에서는 구조물의 형식에 따른 감쇠율을 추천하고 있다.

Newmark와 Hall<sup>9)</sup>은 구조물의 형식과 조건 및 응력 정도에 따라서 최소 0.1%에서 최대 20%를 설계에 반영하는 것을 제안하고 있다. 또한 Newmark<sup>8)</sup> 등은 감쇠율의 대수함수로 탄성 설계 spectrum을 작성하는 증폭계수를 보였다. 본 연구에서는 일반 구조물에 적용될 수 있는 6개(1, 2, 5, 7, 10 및 15%)의 감쇠율을 사용하였다.

또한 항복강도비( $Y$ )를 초기 항복강도( $R_y$ )와 구조물 자중( $W$ )의 비율, 즉  $Y=R_y/W$ 로써 표현하면 항복변위는 직접적으로 구해질 수 있으며 항복강도비는 구조물의 비선형 설계시 설계 횡하중의 결정에 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 내진 설계에서 널리 사용되고 있는 UBC<sup>9)</sup>에서 요구되는 설계저부전단력은 식 (1)과 같다.

$$V = \frac{ZICW}{R_w} \quad (1)$$

이 식에서 일반 구조물에 해당할 수 있는  $C=2.75$ ,  $R_w=4$ ,  $I=1.0$  및 가능한 지역계수( $Z$ )를 적용하고 초기 항복강도와 요구되는 저부전단력이 같다고 가정하여 8개의 항복강도비(0.05, 0.07, 0.1, 0.13, 0.15, 0.2, 0.25 및 0.3)를 본 연구에서 사용하였다.

### 2.3 응답 지수

동적하중에 의한 구조물의 탄성 거동은 전 진동 시간 동안의 응답이력보다 하나의 수치인 절대 최대 변위로 측정되고 있다. 비선형 거동에서는 절대 최대 변위를 구조물의 초기 항복변위로 나눈 값으로 정의되는 최대 변위연성도( $\mu$ )가 널리 사용되고 있다. 최대 변위연성도는 강한 충격하중 조건에서는 구조물의 비선형 거동에 대한 좋은 지표가 되지만, 지진하중과 같은 반복하중에 의해서 소성변형이 누적되는 비선형 hysteretic system에서는 충분한 정보를 얻을 수 없을 것이다.

누적되는 소성변형에 의한 손상은 구조물에 전달되는 에너지를 사용함으로써 필요한 정보를 얻는 방법이 오래동안 연구되어 왔다. 지진이 발생하는 동안 구조물에 입력되는 전 에너지는 진동이

끝나면 입력된 에너지는 모두 소산되며, 여기에서 소성변형에 의해서 소산되는 hysteretic energy,  $E_h(t)$ ,는 누적된 총량으로 표시되는 것보다 정규화함으로써 더 유용하게 비선형 거동의 특성을 규명할 수 있다.<sup>10)</sup> normalized hysteretic energy( $E_{nh}$ )는 식 (2)로 정의될 수 있으며 이 값은 만일 구조물이 소성변위가 일어나지 않을 경우에도 1.0이 될 것이다.

$$E_{nh} = \left( \frac{E_h}{R_y U_y} \right) + 1.0 \quad (2)$$

여기서  $R_y$ 는 초기 항복강도이고  $U_y$ 는 초기 항복 변위이다.

### 2.4 입력될 지진하중

구조물에 입력될 인공지진파를 작성하기 위하여 실제 기록된 지진중에서 비교적 강진에 속하는 것을 수집하였으며, 표 1에서 보이는 것과 같이 수집된 지진파들은 진도가 5.4에서 7.7, 최대 지반가속도는 모두 0.15g를 상회하고 있다. 넓은 범위의 지진파 특성을 비교하기 위하여 Nahanni 지진은 북미 대륙의 동부에서 발생한 것으로 지역적 특성을 고려하였으며, El Centro와 Parkfield 등의 지진파들은 많은 연구에서 사용되었으므로 본 연구의 결과를 비교할 수 있어 선택하였다.

시간영역이나 주파수영역에서 인공지진파를 작성하는 것은 각각 특성이 있으나 ARMA model은 시간영역에서 기록된 지진파로부터 직접 변수들을 구할 수 있는 장점이 있다. 기록된 지진파의 특성을 포함하는 인공지진파의 작성기법은 많은 연구가 있어 왔으나, 여기에서는 지진파의 크기와 주파수특성을 분리 진행한 Ellis와 Cakmak<sup>11)</sup>이 제시한 ARMA model을 사용하여 기록된 지진파에서 각각 20개의 인공지진파를 작성하였으며 완전한 spectrum을 얻기 위하여 응답의 평균값으로서 구조물의 비선형 거동 특성을 규명하였다.

### 3. 해석 및 결과 분석

#### 3.1 하중-변위 곡선의 효과

그림 2는 감쇠율 5%와 항복강도비 0.05, 0.1, 및 0.2를 갖는 구조물에 두 가지의 하중-변위 모델을 사용한 경우 평균 변위 연성도 spectrum이고, 그림 3은 정규화된 hysteretic energy spectrum이다. stiffness degrading model을 사용한 평균 응답 spectrum이 탄소성 모델보다 조금더 완만하고 안정된 응답을 보였으나 전체 진동주기 구간에서 연성도의 큰 차이는 보이지 않았다.

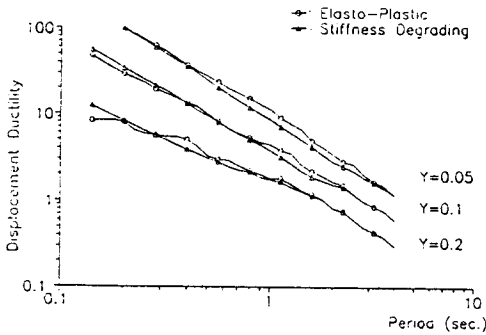


Fig. 2 Displacement Ductility

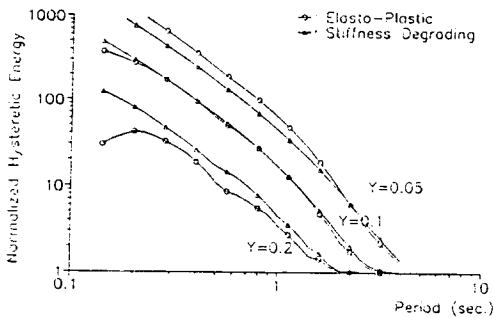


Fig. 3 Normalized Hysteretic Energy

normalized hysteretic energy는 항복강도비에 따라서 큰 차이를 보였으며, 낮은 항복강도비를 갖는 구조물의 경우 탄소성 모델을 사용한 응답이 크게 나타났다. 높은 항복강도비의 경우는 항복주기가 감소하고 소성변위 시간은 길어지므로 stiffness degrading model을 사용한 hysteretic

energy가 더 크게 나타났다. 그러므로 누적되는 소성에너지를 동적거동의 특성을 규명하거나 손상도 측정등에 고려할 경우는 강성모델의 선택에 주의를 해야할 것이다.

일반적으로 구조물의 비선형 동적거동은 변위 연성도로써 나타내고 있으며, 설계시방서에서도 변위연성도를 고려하고 있어 이후의 연구에서는 탄소성 모델에 의한 변위연성도만을 사용한 구조물의 동적응답을 비교 검토하였다.

#### 3.2 항복강도비 효과

구조물의 비선형거동은 초기 항복변위 혹은 강도에 직접적으로 영향을 받고 있으므로, 초기 항복강도의 선택은 비선형 해석에서 가장 중요한 요소이다. 그림 4는 감쇠율 5%와 탄소성 모델의 구조물에 *El-Centro* 지진파를 적용하였을 때, 항복강도비의 변화에 따른 변위연성도를 보여주고 있다. 항복강도비의 효과는 높은 진동주기의 구간보다는 낮은 고유진동주기의 구간에서 더 크게 나타나고 있다. 예를들면, *El-Centro* 지진의 경우 고유진동주기 0.25, 0.5, 1.0, 및 2.0초에서 항복강도비가 0.1에서 0.2로 증가할 때 변위연성도는 각각 74.6%, 67.4%, 58.9% 및 50%로 감소하였다.

그림 5는 고유진동주기 1.0초에 대한 항복강도비와 여러가지 감쇠율에 따른 변위연성도를 전대수방안지에 나타내었다. 그림과 같이 응답 스펙트럼의 값들은 항복강도비와 대수척도에서 거의 선형적으로 변함을 알 수가 있다. 이러한 결과는 모든 고유진동주기와 감쇠율의 경우에서도 관찰되었다. 그러므로 감쇠율과 고유진동주기가 주어진 구조물에서 변위연성도는 항복강도비( $Y$ )의 대수값에 따른 선형식으로 추정될 수 있을 것이며, 다음 식 (3)과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$\log(\mu)|_{T,\beta} = A_Y + B_Y \log(Y) \quad (3)$$

여기서 계수  $A_Y$  및  $B_Y$ 는 각 지진파에 의한 진동주기( $T$ ) 및 감쇠율( $\beta$ )로써 표시될 것이다.

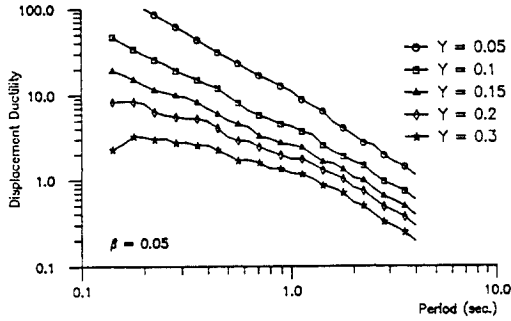


Fig. 4 Effect of Yield Strength Ratio

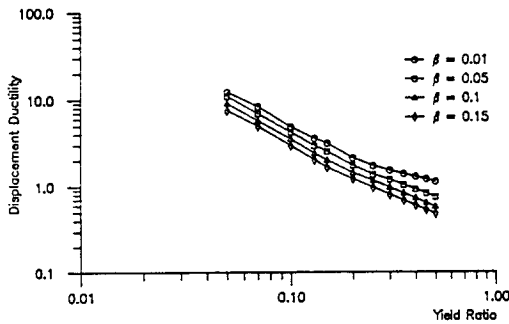


Fig. 5 Effect of Yield Strength Ratio for T=1.0sec.

### 3.3 감쇠율 효과

그림 6은 *El-Centro* 지진의 경우 감쇠율이 1, 5, 10 및 15% 일때 평균 응답 스펙트럼을 나타내었으며, 감쇠율이 증가함에 따라 평균응답은 미소하게 감소함을 알 수 있다. 동적 거동에 대한 항복강도비의 효과와 비교하면 감쇠율의 효과는 비교적 적게 나타나고 있다. 전체 지진의 경우 감쇠율이 2%에서 10%로 변할 때 고유진동주기 0.25, 0.5, 1.0 및 2.0초에서 응답들의 평균 감소율은 각각 8, 33.7, 24.7 및 23.3%로 측정되었다.

*Newmark*와 *Hall*은 구조물의 응답 스펙트럼을 지반운동의 값으로 증감하여 작성하는 것을 제안하였으며, 증폭계수는 지반 가속도, 속도 및 변위 영역에서 2% 감쇠율에는 각각 3.66, 2.92 및 2.42 이고 10% 감쇠율에는 1.99, 1.84 및 1.69를 제안하였다. 이것들은 감쇠율이 2%에서 10%로 변할 때 구조물의 응답이 45.6, 37 및 30.2%로 변함을 보이

고 있다. *Riddell*<sup>[2]</sup>은 탄소성 모델을 사용하여 감쇠율이 2%에서 10%로 증가할 때 평균 응답이 20% 감소하는 것을 보였다. 비록 *Newmark*와 *Hall*은 구조물이 탄성체로 가정하였고 *Riddell*은 변위 연성도를 10으로 제한한 것이지만, 본 연구의 결과와 비교하면 *Newmark*와 *Hall*은 감쇠율의 효과를 과대평가하고 *Riddell*은 과소평가한 것이라 할 수 있다.

그림 7에서는 구조물의 고유진동주기 1.0초에서 여러가지 항복강도비에 따른 평균 응답 스펙트럼을 감쇠율의 변수로 나타내었다. 평균 응답의 대수값은 감쇠율이 증가함에 따라 선형적으로 감소함을 보여주고 있다. 그러므로 고유진동주기와 항복강도비가 주어진 구조물 응답의 대수값은 감쇠율의 함수로 다음 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\log(\mu)|_{T,Y} = A_{\beta} + B_{\beta} \beta \quad (4)$$

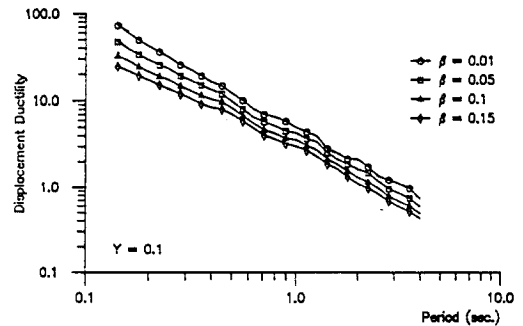


Fig. 6 Effect of Damping Ratio

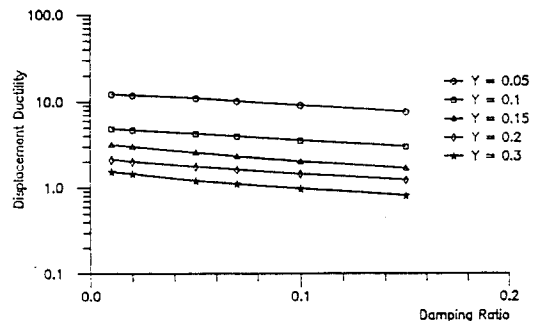


Fig. 7 Effect of Damping Ratio for T=1.0sec.

여기에서 계수  $A_\beta$  및  $B_\beta$ 는 진동주기( $T$ ) 및 항복강도비( $Y$ )에 의한 것이다.

#### 4. 응답 spectrum의 예측

지진하중에 의한 비선형 응답과 구조물의 고유진동주기는 전대수방안지에서 거의 모든 경우에 선형적인 관계가 보였다. 그러므로 임의의 지진파와 구조물의 특성이 주어질 때 비선형 응답은 전대수방안지에서 선형 회귀분석을 통하여 추정될 수 있을 것이며, 구조물의 변위연성도는 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$\log(\mu)|_{\beta, Y} = A_i + B_i \log(T) \quad (5)$$

여기서  $A_i$ 와  $B_i$ 는 감쇠율과 항복강도비의 함수로 나타나는 계수이며,  $A_i$ 는 진동주기  $T=1.0$ 초에 해당하는 선형의 절편이고  $B_i$ 는 기울기이다.

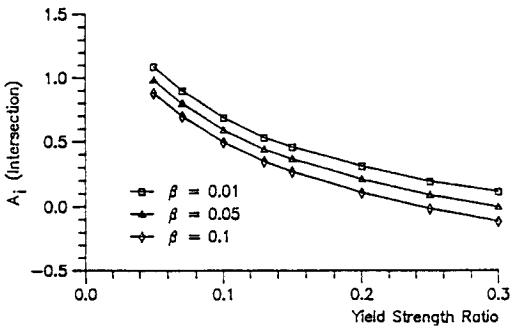


Fig. 8 Intersection versus Yield Strength Ratio

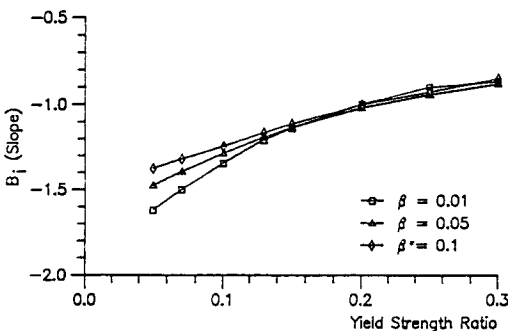


Fig. 9 Slope versus Yield Strength Ratio

항복강도비의 효과를 측정하기 위하여 감쇠율 1, 5 및 10% 경우의 변위연성도 스펙트럼의 절편 ( $A_i$ ) 및 기울기( $B_i$ )와 항복강도비의 관계를 각각 그림 8과 9에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 항복강도비가 증가함에 따라 절편은 비선형적으로 감소하며, 수치적 평가에 의하면 절편과 기울기는 항복강도비에 거의 대수적인 것을 알 수 있었다.

감쇠율의 효과를 측정하기 위하여 그림 10과 11은 항복강도비 0.1, 0.15, 0.2 및 0.3에서 감쇠율의 증가에 따른 절편과 기울기의 변화를 나타내었다. 그림에서 모든 항복강도비에 대하여 감쇠율과 응답 스펙트럼의 절편 및 기울기가 선형적인 관계임을 알 수 있었다.

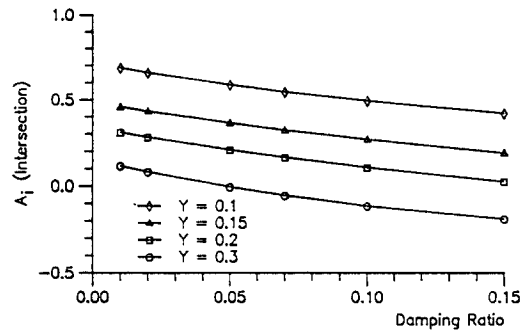


Fig. 10 Intersection versus Damping Ratio

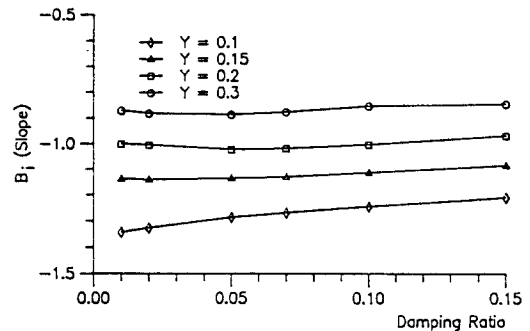


Fig. 11 Slope versus Damping Ratio

항복강도비와 감쇠율의 효과에 대한 결과로부터 평균 응답 스펙트럼의 절편과 기울기는 각 지

진파의 특성에 따라 다른 값으로 주어질 것이며 다음 식 (6)으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} A_i &= A_n + a_1 \log(Y/0.1) + a_2(\beta - 0.05) \\ B_i &= B_n + b_1 \log(Y/0.1) + b_2(\beta - 0.05) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $A_n$ 와  $B_n$ 는 일반적으로 구조물에 적용되는 감쇠율 5%와 항복강도비 0.1에 대한 절편 및 기울기의 기준치로 가정하였으며, 본 연구에서 구한 각 지진파의 기준치는 표 1에 수록하였다. 위의 식을 사용하여 각각의 지진 경우에서 항복강도비와 감쇠율의 효과가 미치는 절편 및 기울기의 계수인  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  및  $b_2$ 를 최소자승법으로 구하였으며, 전체적인 계수들의 평균치는  $a_1 = -1.18$ ,  $a_2 = -1.79$ ,  $b_1 = 0.64$  및  $b_2 = 1.3$ 으로 나타났다. 이 계수들을 사용하여 비선형 응답을 추정할 수 있는 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\log(\mu) = A_i + B_i \log(T) \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_i &= A_n - 1.18 \log(Y/0.1) - 1.79(\beta - 0.05) \\ B_i &= B_n + 0.64 \log(Y/0.1) + 1.3(\beta - 0.05) \end{aligned} \text{이다.}$$

추정된 비선형 응답에 대한 회귀분석을 검증하기 위하여 작성된 인공지진파의 평균 응답 스펙트럼과 추정된 응답 스펙트럼을 고유진동주기 0.14초에서 3.98초 구간에서 비교하였다. 그림 12는 감쇠율 5%의 구조물에 대한 응답 스펙트럼을 보였으며, 추정된 응답이 전체 고유진동주기 구간에서 항복강도비가 0.2와 0.3에서 6% 정도 크게 나타났다. 한편, Whittier 지진의 경우 각각 18.8%와 28.8% 정도 적게 나타나는 경우도 있었다. 그림 13은 항복강도비 0.1의 경우 감쇠율 2, 5 및 10%에 대한 추정치와 평균치를 비교하였으다. 감쇠율 2, 5, 및 10%에 대하여 El-Centro 지진 경우 예측된 응답과 평균 응답은 각각 7.5, 3.1 및 2.1%를 보였으며, Whittier 경우 각각 5.7, 1.7 및 18.9%의 차이를

보였다. 또한 전체 지진의 경우에서 평균 8.8%의 오차를 보였다.

표 1. 절편 및 기울기의 기준치

Event	Intersection ( $A_n$ )	Slope ( $B_n$ )
El-Centro	0.589	-1.285
Parkfield	0.861	-1.463
Nahanni	0.878	-1.439
Alaska	0.007	-1.094
San Salvador	0.940	-1.584
Whittier	0.187	-1.782
Pacoima	1.061	-1.578
Eureka	0.644	-1.298
Kern County	0.319	-1.047

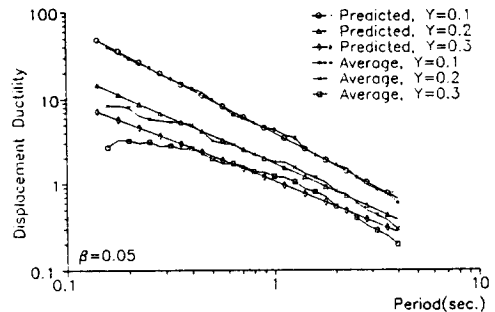


Fig. 12 Predicted and Average Spectra for  $\beta=0.05$

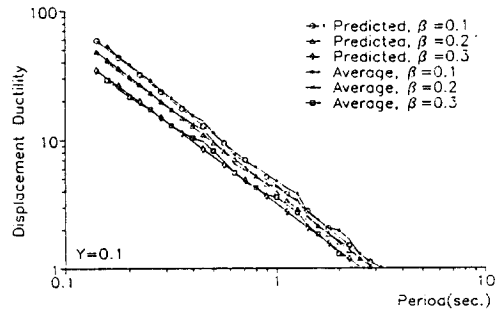


Fig. 13 Predicted and Average Spectra for  $Y=0.1$

## 5. 결 론

본 연구의 결과는 지진 발생후 구조물의 비선형 거동에 의한 변위연성도를 간단히 측정하는 기법

의 개발에 기여할 수 있을 것이며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

하중-변위 곡선의 선택에 따른 평균 변위연성도는 큰 차이를 보이지 않았으며, **stiffness degrading model**을 사용한 평균 응답 스펙트럼이 조금 더 완만한 경향을 보였다. 항복강도비의 증가에 따라서 평균 변위연성도는 대수적으로 감소하였으며, 감쇠율의 변화에 의한 평균 변위연성도는 선형적으로 증감되었다. 또한 감쇠율이 구조물의 동적반응에 미치는 영향을 분석한 결과, **Newmark**와 **Hall**은 과대 평가되었고 **Riddell**은 과소평가한 것으로 나타났다.

전대수방안지에서 구조물의 진동주기와 비선형 응답을 선형적으로 가정한다면, 선형의 절편과 기울기는 항복강도비에 대하여는 거의 대수적인 관계를 보였고, 감쇠율에 대하여는 거의 선형적인 관계를 보였다. 각 구조물의 특성인 감쇠율과 항복강도비가 주어진다면, 지진하중에 의한 비선형 응답은 식 (7)로 추정될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원(과제번호 923-1300-003-1)에 의한 것으로, 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Applied Technology Council, "Evaluating the Seismic Resistance of Existing Building", ATC Publication, ATC-14, 1987.
2. Lin, J., and Mahin, S. A., "Effect of Inelastic Behavior on The Analysis and Design of Earthquake Resistant Structures", UBC/EERI-85/08, 1985.
3. Newmark, N. M. and Hall, W. J., "Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities",

- Proc. of the 4th WCEE, Chile, Vol. II, 1969, pp. 37-49.
4. Iwan, W. D., and Gates, N. C., "The Effective Period and Damping of a Class of Hysteretic Structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 7, 1979, pp. 199-211.
5. Banon, H., Biggs, J. M. and Irvine, H. M., "Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames", J. St. Div., ASCE, Vol. 107, No. ST9, 1981, pp. 1713-1729.
6. Roufaiel, M. and Meyer, C., "Analysis of Damaged Concrete Frame Building", Technical Report No. NSF-CEE-81-21359-1, Columbia Univ, 1983.
7. Riddell, R. , and Newmark, N. M., "Force-Deformation Models for Nonlinear Analyses", J. St. Div., ASCE, Vol. 105, No. ST12, 1979, pp. 2773-2778.
8. Newmark, N. M., Blume, J. A., and Kapur, K. K., "Seismic Design Spectra for Nuclear Power Plant", J. Pow. Div., ASCE, Vol. 99, No. PO2, 1973, pp. 287-303.
9. Uniform Building Code, 1988 Edition, Internatioal Conference of Building Officials, Whittier, Calif.
10. Zarah, T. F., "Seismic Energy Absortion in Simple Structure", Ph. D. Thesis, UILU-ENG-82, 1982.
11. Ellis, G. w., and Cakmak, A. S., "Modeling Earthquake Ground Motions in Seismically Active Regions Using Parametric Time Series Methods", NCEER-87-0014, SUNY, Buffalo, NY, 1987.
12. Riddell, R., "Effect of Damping and Type of Material Nonlinearity on Earthquake Response", Proc. of the 7th W. C. on E. E., Turkey, 1980, pp. 495-504.