

내진성능평가를 위한 비선형 직접스펙트럼법의 특성

The Properties of a Nonlinear Direct Spectrum Method for Estimating the Seismic Performance

강 병 두* 김 재 응**
Kang, Pyeong Doo Kim, Jae Ung

국문요약

성능에 기초한 설계법에서는 비선형 응답산정이 필수적이며, 이를 위한 방법으로는 비선형 시각이력해석법, 비선형 정적해석법, 비선형 효과를 고려한 등가선형해석법 등이 있다. 일부 규준에서는 pushover 곡선으로부터 작성한 성능스펙트럼과 선형 응답스펙트럼으로부터 작성한 요구스펙트럼으로 이루어진 능력스펙트럼법을 제안하고 있다. 이 방법은 개념적으로는 간단하나 반복과정이 요구되며, 부정확한 결과를 산출하는 경우가 많다. 이에 따라 시행착오적인 등가선형 스펙트럼대신 비선형 스펙트럼을 사용하는 방법들에 대한 연구들이 진행되고 있다. 비선형 요구스펙트럼은 표준적 선형 설계스펙트럼으로부터 결정될 수 있으며, 이 방법은 등가선형의 경우보다는 계산과정이 대폭 줄어들기는 하나 아직도 다소의 연산과정이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 다자유도계의 구조물에 대한 pushover 곡선으로부터 구조물의 진동주기와 항복강도를 구한 다음, 일련의 계산과정을 거치지 않고도, 직접적으로 비선형 최대응답을 구할 수 있는 비선형 직접스펙트럼법(NDSM)을 제시하고, 집중질량계의 MDF(다자유도계) 모델에 대해 다양한 지진기록과 제하강성저하지수를 변수로 하여 NDSM의 적용성과 신뢰성을 평가하고자 한다. 본 연구의 결론은 다음과 같다. 1) 다자유도계 구조물에 대한 비선형 직접스펙트럼법에 의한 최대변위 응답은 비선형 시각이력해석법에 의한 응답과 거의 일치하므로 실용적인 방법으로 사료된다. 2) 비선형 직접스펙트럼법과 비선형 시각이력해석에 의해 산정된 최상층 변위 결과를 비교하면, 항복후강성계수가 0.1, MAD(modal adaptive distribution)에 의한 수평정적하중분포, 그리고 제하강성저하지수가 0.2~0.3일 때 평균오차가 가장 줄어드는 것으로 나타났다.

주요어 : 비선형 직접스펙트럼법, 능력스펙트럼법, 비선형 정적해석, 비선형 시각이력해석, 제하강성저하지수, 연성비, 오차

ABSTRACT

It has been recognized that the damage control must become a more explicit design consideration. In an effort to develop design methods based on performance it is clear that the evaluation of the nonlinear response is required. The methods available to the design engineer today are nonlinear time history analyses, monotonic static nonlinear analyses, or equivalent static analyses with simulated nonlinear influences. Some building codes propose the capacity spectrum method based on the nonlinear static analysis(pushover analysis) to determine the earthquake-induced demand given by the structure pushover curve. These procedures are conceptually simple but iterative and time consuming with some errors. This paper presents a nonlinear direct spectrum method(NDSM) to evaluate seismic performance of structures, without iterative computations, given by the structural initial elastic period and yield strength from the pushover analysis, especially for MDF(multi degree of freedom) systems. The purpose of this paper is to investigate the accuracy and confidence of this method from a point of view of various earthquakes and unloading stiffness degradation parameters. The conclusions of this study are as follows: 1) NDSM is considered as practical method because the peak deformations of nonlinear system of MDF by NDSM are almost equal to the results of nonlinear time history analysis(NTHA) for various ground motions. 2) When the results of NDSM are compared with those of NTHA, mean of errors is the smallest in case of post-yielding stiffness factor 0.1, static force by MAD(modal adaptive distribution) and unloading stiffness degradation factor 0.2~0.3.

Key words : nonlinear direct spectrum method, capacity spectrum method, pushover analysis, nonlinear time history analysis, unloading stiffness degradation factor, ductility ratio, error

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

기존의 내진설계규준들에 의해 설계된 구조물들은 최근 발생된 Loma Prieta(1989) 지진, Northridge(1994) 지진, Kobe (1995) 지진 이후, 인명 피해방지라는 측면에서는 매우 적합 하였으나 경제적인 측면에서는 구조요소와 비구조요소의 손상으로 막대한 손실을 입었다. 이러한 사실로부터 미국과 일본을 비롯한 여러 나라에서는 구조물의 거동을 실제에 가깝게 추정할 수 있고, 성능을 예측할 수 있는 성능설계와 같은

개선된 규준이 필요하다는 공감대가 형성되었다. 이에 따라 큰 지진 발생시 구조물의 붕괴방지 뿐만 아니라 작은 지진에서도 기능수행을 만족시킬 수 있는 다단계 내진성능수준 (multi-level performance level)인 이른바 성능에 기초한 설계법(performance-based seismic design)의 도입 필요성이 대두되었다. 이와 같은 구조물의 성능에 기초한 설계에서는 비선형 응답산정이 필수적이며, 이를 위한 방법으로는 비선형 시각이력해석법, 비선형 정적해석법, 등가선형해석법 등이 있다. 그러나, 정확성과 실용성의 측면에서 보다 약산적 방법이 요구되고 있으며^{(1)-(4),(15)} 이에 따라 ATC-40(1996)⁽⁵⁾에서는 능력스펙트럼법(capacity spectrum method)을 제시하였고, FEMA-273(1997)⁽⁶⁾과 FEMA-356(2000)⁽⁷⁾에서는 변위계수법(displacement coefficient method)을 제시하였다. 이와 같은 약산적인 비선형 해석법은 복잡한 고유치해석이

* 경희원 · 거창전문대학 건축과 조교수, 박사수료(대표저자 : pdkang@kc.ac.kr)
** 동아대학교 건축학부 교수, 공학박사
본 논문에 대한 토의를 2002년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 6. 10 / 심사종료일 : 2002. 7. 23)

나 비선형 동적해석(비선형 시각이력해석)을 하지 않고, 간단히 비선형 정적해석(pushover analysis)만으로 지진에 의한 구조물의 비선형 최대응답을 평가하는 것을 목표로 한다. 이들 방법을 적용하기 위해서는 MDF 모델을 등가 SDF(equivalent SDF, 이후로는 ESDF) 모델로 치환하는 약산적인 모델링 방법과 탄성 혹은 개략적인 비선형 스펙트럼 등에 의한 요구스펙트럼(demand spectrum)을 작성하고 표현하기 위한 기술이 필요하다.

이들 방법 중, ATC-40에서는 비선형 정적해석의 밀면전 단력과 최상층변위의 관계를 이용한 능력스펙트럼(capacity spectrum)과 등가감쇠를 이용한 요구스펙트럼(demand spectrum)으로 이루어진 선형 능력스펙트럼법을 제안하고 있는데, 개념적으로는 간단하나 반복계산과정이 요구되며 부정확한 결과가 산출되는 경우가 많다. 따라서 시행착오적인 등가선형 요구스펙트럼대신 비선형 요구스펙트럼을 사용하는 방법들에 대한 연구들⁽⁹⁾⁻⁽¹⁰⁾이 진행되고 있다. 비선형 요구스펙트럼은 표준적 선형 설계스펙트럼으로부터 결정될 수 있고, 이 방법은 등가선형의 경우보다는 계산과정이 대폭 줄어들기는 하나 아직도 다소의 연산과정이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 비선형 정적해석에 의한 pushover 곡선으로부터 구조물의 항복강도와 진동주기를 구한 다음, 일련의 계산과정을 거치지 않고 직접적으로 다자유도계의 비선형 최대응답을 구할 수 있는 비선형 직접스펙트럼법(nonlinear direct spectrum method, 이후로는 NDSM)을 제시하고, 집중질량계 MDF 모델에 대하여 다양한 지진기록과 해석조건들(제하강성저하지수 등)을 변수로 하여 NDSM의 적용성과 신뢰성을 평가하고자 한다.

1.2 연구방법 및 내용

NDSM의 적용성과 신뢰성을 검토하기 위한 해석모델로는 세 가지의 기본진동주기($T_1 = 0.3, 0.8, 2.0\text{sec}$)와 각각의 기본진동주기에 대해 세 가지의 연성비($\mu = 2, 4, 8$)를 갖는 집중질량계의 2차원 MDF 모델을 고려하기로 한다.

해석모델의 층항복전단력은 진동주기와 연성비에 대해 비선형 가속도응답스펙트럼을 사용하여 산정한다. 각 MDF 모델에 대해 비선형 정적해석을 수행한 후 변수변환을 통해 ESDF에 대한 유사가속도-최대변위($A-D$) 관계를 결정 한 후, ESDF의 기본진동주기(T_n)와 유사항복가속도(A_y/g)를 산정한다. 또한 각 지진기록에 대한 비선형 가속도응답스펙트럼($A_y/g-T_n$)으로부터 연성비(μ)를 결정하고 ESDF에 대한 비선형 최대변위(D)를 산정한 후 모드참여계수(Γ_1)를 이용하여 실제구조물인 MDF의 비선형 최대응답(U_N)을 추정한다. 비선형 가속도응답스펙트럼을 결정하기 위해 사용된 프로그램은 USEE⁽¹¹⁾이고, 비선형 해석에 사용된 프로그램은 CANNY⁽¹²⁾이다.

비선형 정적해석에 필요한 골격곡선은 이선형으로 가정 하였으며, 작용수평하중의 분포는 고차모드의 영향을 고려할 수 있는 방법으로 결정하였다. 비선형 동적해석의 이력곡

선은 강성저하형 이선형으로써 제하강성저하지수(unloading stiffness degradation factor)를 변화하면서 해석을 수행하였다. 감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용하였으며, 강성변화의 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다. 또한 입력지진동으로는 모두 8가지의 지진기록을 고려하고 적분시간 간격은 0.005sec 이하가 되도록 하였다.

집중질량계 MDF 모델에 대하여 다양한 지진기록과 해석 조건들을 변수로 하여 비선형 동적해석인 비선형 시각이력 해석(nonlinear time history analysis, 이후로는 NTHA)을 수행한다. 이 해석결과와 NDSM에 의한 비선형 응답결과를 비교·검토하여 NDSM의 적용성과 신뢰성의 특성을 평가하고자 한다.

2. 비선형 직접스펙트럼법(NDSM)

선형 능력스펙트럼법에 비하여 보다 간단하게 비선형 구조물의 최대 지진요구(seismic demand)를 산정하는 NDSM 해석과정 중, 비선형 정적해석(pushover analysis)에서 수평하중에는 고차모드의 영향이 고려되고 횡력분포 자체는 변화하지 않는다는 가정을 따르며, 수행과정은 다음과 같다.

2.1 다자유도계(MDF:비선형 정적해석)

실제구조물(그림 1(a))에 대하여 가정된 수평지진력 F 의 횡력분포로써 F 의 크기를 계속해서 증가시켜 비선형 정적 해석을 수행한다. 밀면전단력 V_b 와 최상층변위 U_N 의 관계를 곡선으로 나타내면 그림 1(b)와 같은 V_b-U_N 곡선(pushover curve)이 되며, 탄성 범위를 넘어서면 이 곡선의 기울기가 급격히 감소하면서 항복현상이 나타난다.

2.2 등가다자유도계(ESDF)

2.2.1 능력스펙트럼(capacity spectrum : A-D format)

V_b-U_N 관계에 따른 pushover곡선으로부터 식 (1)~(4)의 변수변환을 통해 ESDF 모델에 대한 그림 1(c)와 같은 $A-D$ 양식으로 바꾸면 능력스펙트럼이 구해진다.

$$A = \frac{V_b}{M_1^*} \tag{1}$$

$$D = \frac{U_N}{\Gamma_1 \phi_M} \tag{2}$$

$$M_1^* = \frac{(\phi_1^T m \mathbf{1})^2}{\phi_1^T m \phi_1} = \frac{(\sum m_j \phi_{j1})^2}{\sum m_j \phi_{j1}^2} \tag{3}$$

$$\Gamma_1 = \frac{\phi_1^T m \mathbf{1}}{\phi_1^T m \phi_1} = \frac{\sum m_j \phi_{j1}}{\sum m_j \phi_{j1}^2} \tag{4}$$

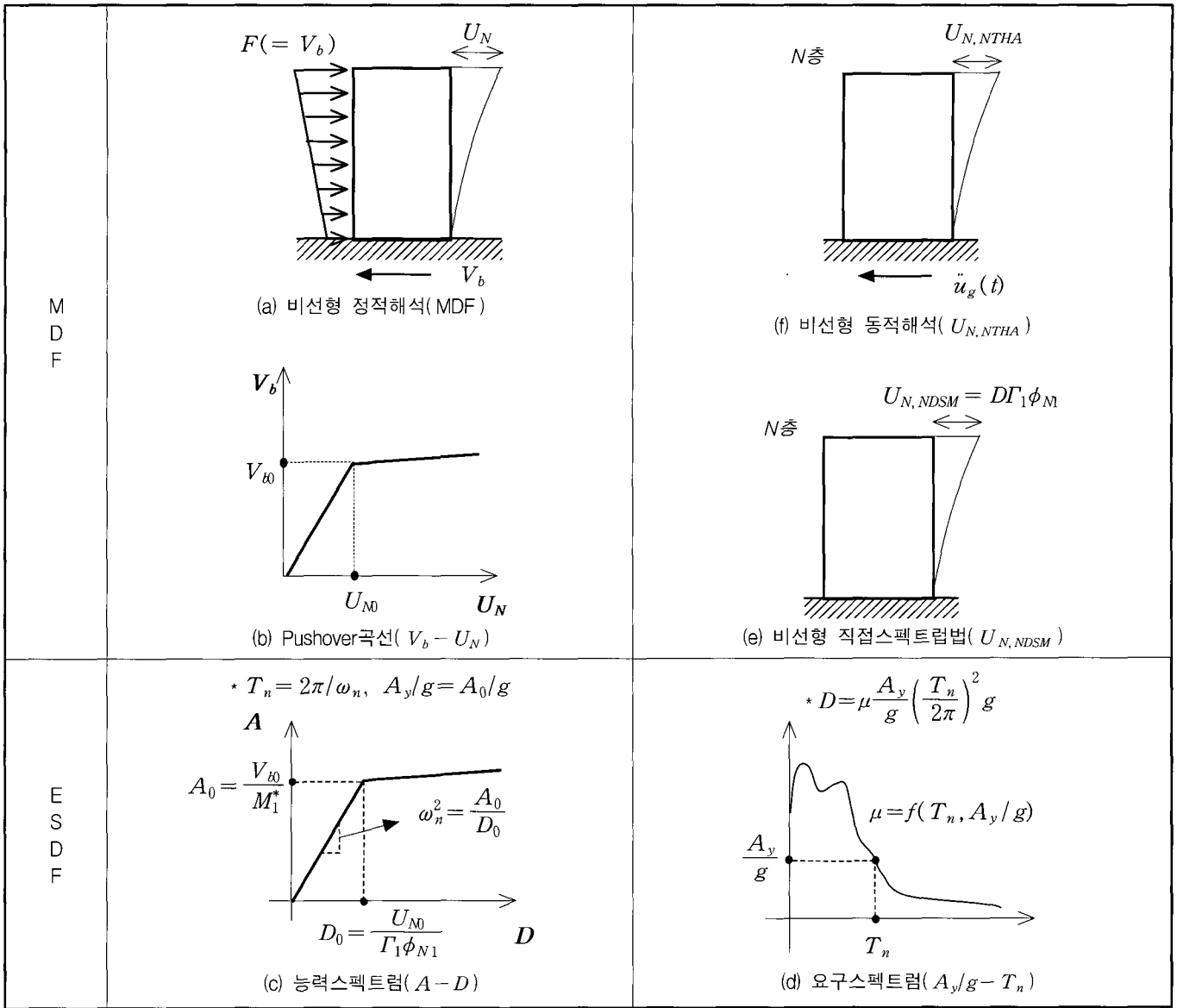


그림 1 NDSM의 해석과정

여기서,

- A : 유사가속도(pseudo acceleration)
- D : 최대변위(peak deformation)
- V_b : 밀면전단력
- U_N : 최상층변위
- Γ_1 : 기본모드의 모드참여계수
- M_1^* : 기본모드의 유효질량
- m : 질량행렬
- m_j : j 층 바닥의 질량
- $\mathbf{1}$: 단위벡터
- ϕ_1 : 기본모드벡터
- ϕ_{j1} : 기본모드의 j 층 요소
- ϕ_{N1} : 기본모드의 최상층 요소
- N : 전체 층수

2.2.2 요구스펙트럼(demand spectrum : $A_y/g - T_n$ formant)

지진동에 대한 비선형 가속도응답스펙트럼을 $A_y/g - T_n$

(비선형 유사가속도-기본진동주기)의 함수로 나타내면 그림 1(d)와 같은 요구스펙트럼이 된다. 비선형 시각이력해석에 사용된 모든 입력지진동에 대해 각각 비선형 가속도응답스펙트럼을 작성하였으며, 그림 2는 대표적으로 Loma Prieta(LP89SARA) 지진($\zeta=5\%$, $\ddot{u}_{g\max}=0.504g$)에 대해 작성된 요구스펙트럼의 예이다.

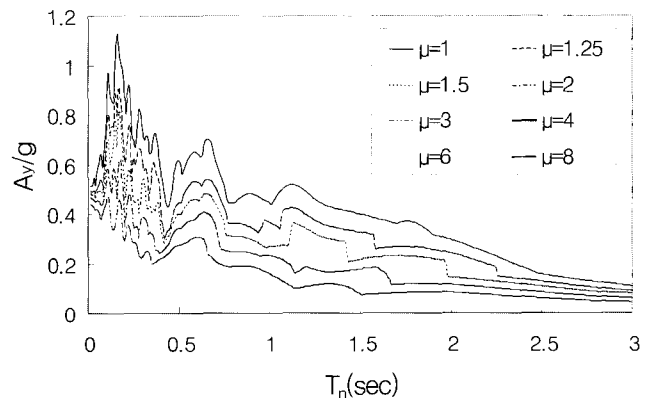


그림 2 요구스펙트럼($\zeta=5\%$, $\ddot{u}_{g\max}=0.504g$, Loma Prieta(LP89SARA))

2.2.3 성능점(performance point)

연성비 μ 는 능력스펙트럼에서 산정된 ESDF의 동적특성 T_u 와 비선형 유사가속도 A_y/g (그림 1(c))의 함수로써 그림 1(d) 혹은 그림 2의 요구스펙트럼으로부터 산정할 수 있다. 얻어진 연성비 μ 로부터 ESDF의 비선형 변위는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$D = \mu \frac{A_y}{g} \left(\frac{T_u}{2\pi} \right)^2 g \quad (5)$$

2.3 다자유도계(MDF:비선형 최대응답)

최종적으로 실제구조물인 MDF의 비선형 최대응답 $U_{N,NDSM}$ 은 그림 1(e)와 같이 식 (6)으로 추정할 수 있으며, 이를 그림 1(f)의 NTHA 응답결과 $U_{N,NTHA}$ 와 비교·검토한다.

$$U_{N,NDSM} = D \Gamma_1 \phi_m \quad (6)$$

3. 비선형해석

3.1 기본가정

비선형 정적해석 및 비선형 동적해석은 CANNY⁽¹²⁾를 사용하여 수행하기로 한다. 비선형 직접스펙트럼법의 적용성과 신뢰성을 평가하기 위하여 모델은 집중질량계(lumped mass system)의 2차원 MDF 해석모델을 고려하였다. 해석모델은 기초 위에 고정되어 있고 P- Δ 효과는 고려하지 않았다.

3.2 골격곡선 및 이력곡선

본 연구에서 사용한 골격곡선(skeleton curve)은 이선형(bilinear)을 사용하였으며, 항복후강성(K_y)은 식 (7)을 따르며, 이력곡선(hysteresis rule)은 그림 3과 같은 강성저하형 이선형(degrading bilinear) 이력곡선으로써 제하(除荷, unloading)와 재하(再荷, reloading) 강성(K_u)은 식 (8)을 따르도록 하였다.⁽¹²⁾ 항복후 강성계수(post-yielding stiffness factor)인 β 는 0.1로 가정하였으며, 제하강성저하시수(unloading stiffness degradation factor)인 γ 는 0.0에서 0.5까지 0.1씩 증가시키면서 NTHA를 수행하였다.

$$K_y = \beta K_0 \quad (7)$$

$$K_u = K_0 \left(\frac{d_y - d'_y}{d_m - d'_m} \right)^\gamma \quad (8)$$

여기서,

- K_0 : 초기강성
- β : 항복후 강성계수
- d_y, d'_y : 항복변위
- d_m, d'_m : 항복후 최대변위 ($d_m \geq d_y, d'_m \geq d'_y$)
- γ : 제하강성저하시수

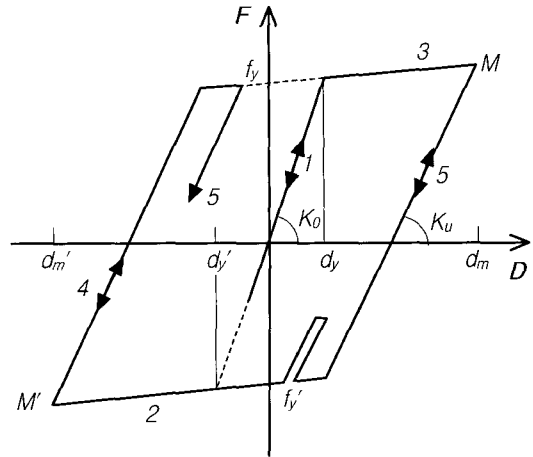


그림 3 강성저하형 이선형 이력곡선

3.3 비선형 정적해석(pushover analysis)

비선형 정적해석은 수평층지진력 F 의 고정된 분포 가정 아래 F 의 크기를 증가시키면서 해석하는 방법이다. 이 해석법으로부터 구조물과 부재의 항복상태를 확인할 수 있고, 밀면전단력 V_b 와 최상층변위 U_N 의 관계를 구할 수 있다. 작용수평하중 분포는 고차모드의 영향을 고려할 수 있는 modal adaptive distribution(이후로는 MAD)⁽¹³⁾ 방법을 따랐으며, MAD 방법에 의한 작용수평하중은 식 (9)와 같다.

$$F_j = \frac{m_j \left[\sum_{i=1}^p (\phi_{ji} \Gamma_i)^2 \right]^{1/2}}{\sum_{l=1}^N m_l \left[\sum_{i=1}^p (\phi_{li} \Gamma_i)^2 \right]^{1/2}} V_b \quad (9)$$

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{ji}^2} \quad (10)$$

여기서,

- F_j : j 층의 수평하중
- N : 전체층수
- p : 고려하는 모드의 수
- ϕ_{ji} : i 차 모드의 j 층 요소
- Γ_i : i 차 모드의 모드참여계수
- m_j : j 층 바닥의 질량
- V_b : 밀면전단력

해석에서 하중 증분은 각 층의 강성변화가 급격히 일어나지 않도록 수평력의 크기 단계별로 증분량을 조절하면서 증가시켰다.

3.4 비선형 시각이력해석(NTHA)

비선형 시각이력해석에서 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법으로는 Newmark β 법($\beta=0.25, \gamma=0.5$)을 사용하였다.

감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용하여 해석을 수행하였으며, Rayleigh 감쇠는 식 (11)과 같이 구조물의 동적해석에 사용되는 감쇠행렬 c 가 질량행렬 m 과 강성행렬 k 에 비례한다는 가정 아래 질량과 강성에 비례하는 상수 a_0, a_1 를 사용한다. 해석모델에 대해 고유치해석을 수행하여 얻어진 1차모드와 2차모드의 진동수 (ω_1, ω_2)와 가정된 감쇠비(ζ)를 식 (12), (13)에 대입하면 감쇠계수 a_0, a_1 을 구할 수 있다.

$$c = a_0 m + a_1 k \quad (11)$$

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad (12)$$

$$a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (13)$$

4. 해석모델 및 분석

4.1 입력지진동

비선형 시각이력해석에 사용된 입력지진동은 표 1과 같은 8가지로써 최대지반가속도(PGA)와 지속시간(Dura.)은 각각 표에 나타난 바와 같다. 입력된 지진이력 데이터에 대한 적분시간 간격은 모두 0.005sec 이하가 되도록 하였다.

4.2 해석모델의 제반구조특성

NDSM의 적용성과 신뢰성을 검토하기 위한 모델로써 그림 4와 같은 집중질량계의 2차원 MDF 모델을 사용하였다. 해석모델로는 8개 지진(표 1)과 세 가지의 기본진동주기 ($T_1=0.3, 0.8, 2.0$ sec)와 세 가지의 연성비($\mu=2, 4, 8$)를 갖는 모델들을 고려하기로 한다. 해석모델 중 Loma Prieta (LP89SARA) 지진과 $T_1=0.8$ sec, $\mu=4$ 에 대한 구조 조건⁽¹⁴⁾

표 1 입력지진동

Identifier (Earthquake)	Mag.	Station (Data)	Component	PGA (g)	Dura. (sec)
NR94CENT (Northridge)	$M_w=6.7$	Century City (94.1.17)	N360	0.221	59.98
TB78TABS (Tabas)	$M_L=7.4$	Tabas (78.9.16)	N344	0.937	49.98
LN92JOSH (Landers)	$M_S=7.5$	Joshua Tree (92.6.28)	N360	0.274	79.98
IV79BRWY (Imperial Valley)	$M_L=6.6$	Brawley Municipal Airport(79.10.15)	N315	0.221	37.88
LP89SARA (Loma Prieta)	$M_S=7.1$	Saratoga-Aloha Ave.(89.10.17)	N360	0.504	40.00
NR94NWHL (Northridge)	$M_w=6.7$	Newhall-LA County Fire Station(94.1.17)	N360	0.589	59.98
TO68HACH (Tokachi-oki)	$M_w=8.2$	Hachinohe Harbor (68.5.16)	N360	0.229	36.00
KC52TAFT (Kern County)	$M_w=7.5$	Taft Lincoln School Tunnel(52.7.21)	S69E	0.179	54.46

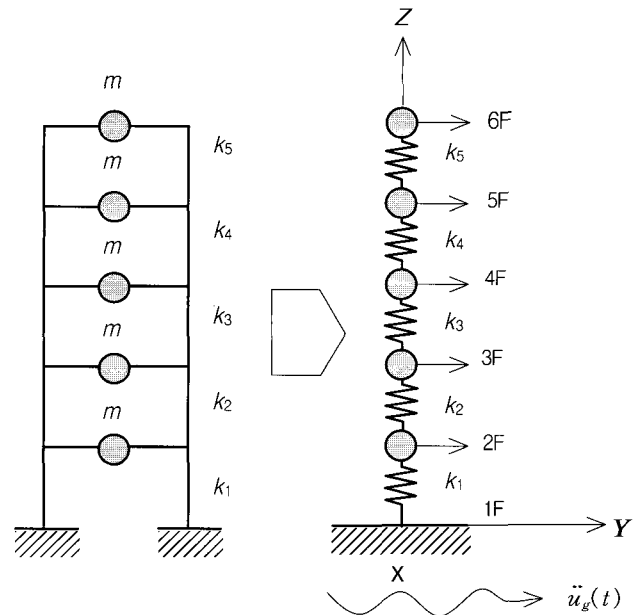


그림 4 해석예제 구조물

의 산정과정을 예시하면 아래와 같다.

4.2.1 층강성 및 층항복전단력

표 2에서

- ① w_j : 층중량
균일 층중량으로 가정한다. 즉, $w_j=100$ kips ($j=1\sim5$)으로
로써, 층중량은 500kips이고, 층질량(m_j)은 w_j/g 가 된다.
- ② F_j : 층횡력
UBC(1997) 횡력분포를 따르기로 한다.
- ③ V_j : 층전단력
횡력분포 F_j 에 따라 층전단력 $V_j(=\sum F_j)$ 를 산정한다.
- ④ k_j : 층강성
모든 층의 층간변위 Δ_j 는 등분포(전체 변위는 선형분포)
로 가정한다. $\Delta_j = \Delta (j=1\sim5)$ 이므로 층강성 $k_j = V_j/\Delta_j$
 $= V_j/\Delta$ 가 되고, 결국 미지수는 k_1 한 개가 된다. 기본
진동주기 $T_1=0.8$ sec가 되도록 시행착오적으로 k_1 을 구
하면, $k_1=234.90$ kips/in가 된다.
- ⑤ k_j/k_1 에 따라 $k_2\sim k_5$ 산정한다.
- ⑥ F_{jv} : 층항복횡력
진동주기 T_i 와 연성비 $\mu=4$ 에 대한 비선형 응답스펙트럼
($\zeta=0\%$)으로부터 유사항복가속도 A_y 를 산정하면 응답스
펙트럼법(선형 : MIDAS 등)에 따라 각 모드에 대한 층횡
력을 구할 수 있다. 전체모드($i=1\sim5$)에 대하여 합성
(SRSS)하면 연성비 $\mu=4$ 에 대한 층항복횡력 F_{jv} 가 구해
질 수 있다.
- ⑦ V_{jv} : 층항복전단력
위에서 구한 F_{jv} 로부터 $V_{jv}(=\sum F_{jv})$ 를 산정하고, 이러한
층항복전단력들에 의해 각 층의 층간변위들이 항복에 도달
하는 것으로 가정한다. 이상의 결과를 종합하면 표 2와 같다.

여러 해석모델 중에서 Loma Prieta(LP89SARA) 및 Northridge (NR84NWHL) 지진에 대한 층항복전단력 V_{jy} 를 나타내면 표 3과 같다.

표 2 구조물의 제반구조특성($T_1=0.8\text{sec}$, $\mu=4$, LP89SARA)

j (층)	① w_j (kips)	② F_j (V_b)	③ V_j (V_b)	④ k_j/k_1	⑤ k_j (kips/in)	⑥ F_{jy} (kips)	⑦ V_{jy} (kips)
1	100	0.063	1.000	1.000	234.90	5.99	74.06
2	100	0.126	0.937	0.937	220.12	10.01	68.07
3	100	0.189	0.811	0.811	190.55	13.43	58.06
4	100	0.252	0.622	0.622	146.20	17.53	44.63
5	100	0.371	0.371	0.371	87.08	27.10	27.10

표 3 층항복전단력(V_{jy} : kips)

T_1 (sec)	기본 모드 벡터	LP89SARA			NR94NWHL		
		μ			μ		
		2	4	8	2	4	8
0.3	1.00	174.61	98.44	74.49	506.54	266.92	220.49
	2.00	159.87	90.52	68.39	471.11	247.81	204.53
	2.98	135.94	77.31	58.39	402.33	211.62	174.62
	3.93	105.32	59.23	44.89	301.59	159.19	131.59
	4.82	65.63	35.83	27.43	168.94	90.36	75.17
0.8	1.00	114.55	74.06	48.24	301.59	130.73	71.46
	1.99	105.27	68.07	44.42	277.16	118.42	62.79
	2.97	90.04	58.06	37.99	235.84	100.54	52.72
	3.93	69.14	44.63	29.07	181.37	79.56	44.58
	4.81	41.96	27.10	17.41	110.52	52.44	33.29
2.0	1.00	57.24	31.34	15.60	92.12	50.77	29.37
	2.00	51.73	28.02	13.54	78.72	44.46	26.02
	2.98	44.42	24.02	11.61	68.31	39.32	23.08
	3.93	34.86	19.29	9.87	58.71	31.91	18.57
	4.82	23.07	13.37	7.55	46.67	23.30	13.00

표 5 비선형 직접스펙트럼해석 결과(LP89SARA, unit : kips, in, sec)

T_1	μ	2			4			8		
		V_{b0}	U_{N0}	$U_{N,NTHA}^*$	V_{b0}	U_{N0}	$U_{N,NTHA}$	V_{b0}	U_{N0}	$U_{N,NTHA}$
0.3		169.1	0.47	-0.90	97.9	0.27	0.78	73.9	0.21	1.05
		A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$	A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$	A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$
		0.41	0.29	0.87	0.24	0.29	0.79	0.18	0.29	1.16
0.8		114.5	2.26	4.01	74.0	1.46	4.71	48.2	0.95	5.83
		A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$	A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$	A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$
		0.28	0.79	3.99	0.18	0.79	4.78	0.12	0.79	6.09
2.0		56.9	7.04	11.93	30.8	3.81	12.51	14.9	1.84	11.39
		A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$	A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$	A_y/g	T_n	$U_{N,NDSM}$
		0.14	1.97	13.17	0.07	1.97	13.10	0.04	1.97	11.90

* 단, $U_{N,NTHA}$ 만은 비선형 시각이력해석(NTHA) 결과이며, 제하강성저하시수는 0.3이다.

4.2.2 감쇠

대표적인 구조물인 $T_1=0.8\text{sec}$ 모델(표 2)에 대한 탄성해석을 통하여 진동수를 구하면, $\omega_1=7.85\text{rad/sec}$, $\omega_2=19.62\text{rad/sec}$ 가 된다. 감쇠비가 1, 2차 모드에서 $\zeta=5\%$ 라 할 때, 식 (12), 식 (13)에 따라 a_0 와 a_1 을 구할 수 있다. 다른 해석모델들 ($T_1=0.3, 2.0\text{sec}$)에 대해서도 이와 동일한 방식으로 진동수와 감쇠계수를 구하여 정리하면 표 4와 같다.

표 4 구조물의 주요 진동특성($\zeta=5\%$)

$T_1(\text{sec})$	0.30	0.80	2.00
$T_2(\text{sec})$	0.12	0.32	0.80
$\omega_1(\text{rad/sec})$	20.93	7.85	3.14
$\omega_2(\text{rad/sec})$	52.32	19.62	7.85
a_0	1.495193	0.560623	0.224229
a_1	0.001365	0.003641	0.009103

4.3 해석결과 및 분석

Loma Prieta(LP89SARA) 지진에 대해서 다양한 해석모델들을 NDSM과 NTHA로 해석한 결과를 정리하면 표 5와 같다. 표의 비선형 직접스펙트럼해석결과 중, ESHF로 추정된 기본진동주기(T_n)는 실제구조물인 MDF의 기본진동주기(T_1)와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

그림 5는 8가지 지진기록에 대하여 NDSM(2장)과 NTHA로 산정된 최상층 최대변위의 오차율을 제하강성저하시수(식 (8)) 값의 함수로 나타낸 것으로서, 표 5는 그림 5(e)의 일부($\gamma=0.3$ 인 경우)를 나타낸다. 그리고 그림 6은 그림 5의 해석결과를 진동주기와 연성비의 관점으로 살펴보기 위해 NDSM과 NTHA($\gamma=0.3$)의 해석오차율을 비교한 것이다. 그림 5와 6에서의 오차는 식 (14)에 의해 산정된 것이다.

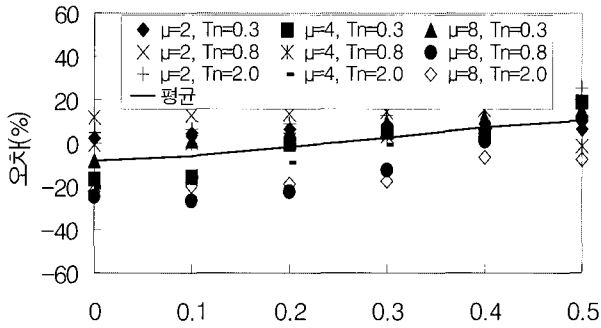
$$\text{오차}(\%) = \frac{(U_{N,NTHA} - U_{N,NDSM})}{U_{N,NTHA}} \times 100 \quad (14)$$

여기서,

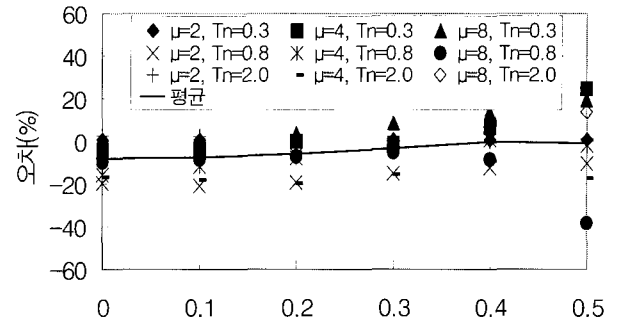
$$U_{N,NTHA} : \text{NTHA에 의한 최상층의 최대변위} \\ = |U_N(t)|_{\max}$$

$U_{N,NDSM}$: NDSM에 의한 최상층의 최대변위

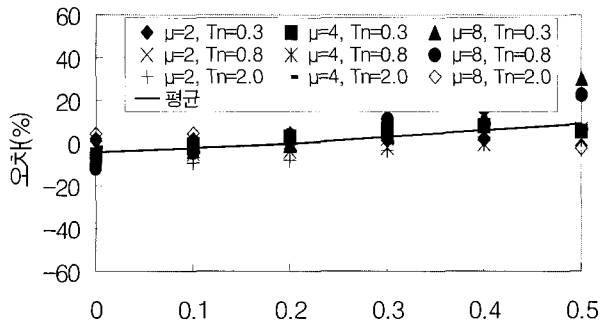
그림 5를 살펴보면, 8가지 지진기록에 대해 대부분 20% 이내의 오차를 나타내고 있다. 그림에서 굵은 실선(평균오차)은 모든 기본진동주기와 연성비에 대한 오차들의 평균을 나타낸 것으로 평균오차는 제하강성저하시수(γ)의 값이 증



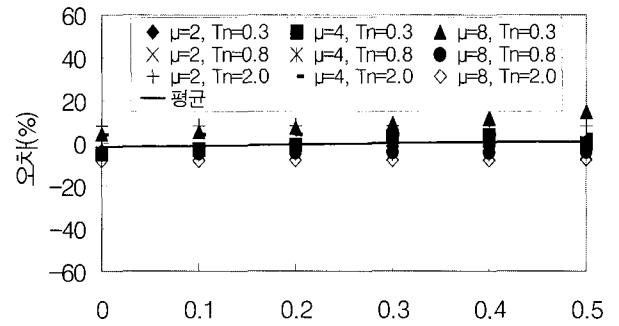
(a) NR94CENT



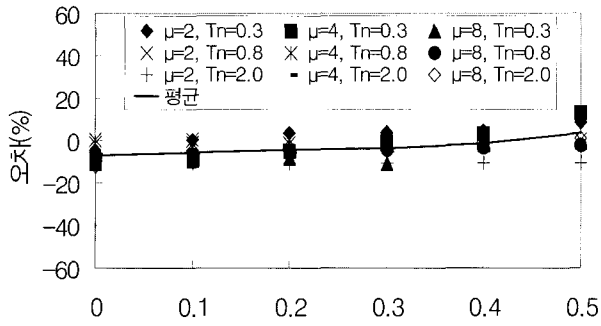
(b) TB78TABS



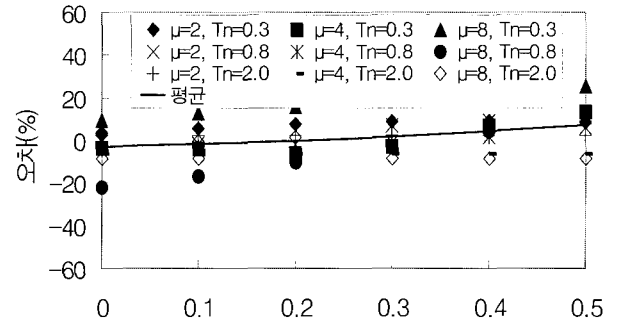
(c) LN92JOSH



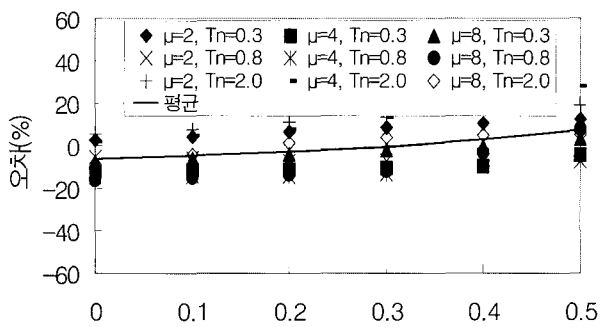
(d) IV79BRWY



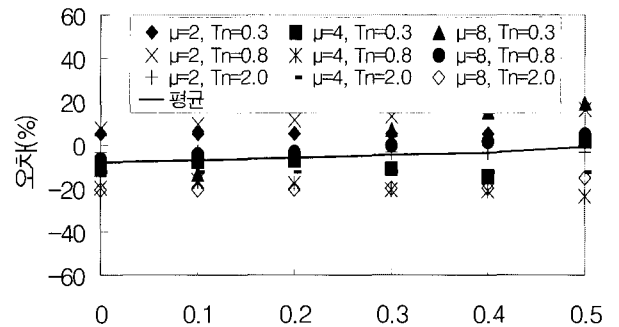
(e) LP89SARA



(f) NR94NWHL



(g) TO68HACH



(h) KC52TAFT

그림 5 NDSM과 NTHA의 오차비교

가할수록 NTHA의 값이 증대되며, 8가지 지진기록의 모든 모델에 대해 10% 이내에 있다. 특히 대부분의 지진동(그림 5(b), (c), (d), (f), (g))에 대해서 제하강성저하지수가 0.2~0.3일 때 평균오차가 영에 가까운 값을 나타내고 있다.

제하강성저하지수의 값이 0.3인 경우의 그림 6을 살펴보면, 대부분의 해석모델과 지진동에 대해 10% 이하의 오차를 나타내고 있고, 기본진동주기가 길어지고 연성비가 증가할수록 오차가 다소 증가하는 경향을 보인다.

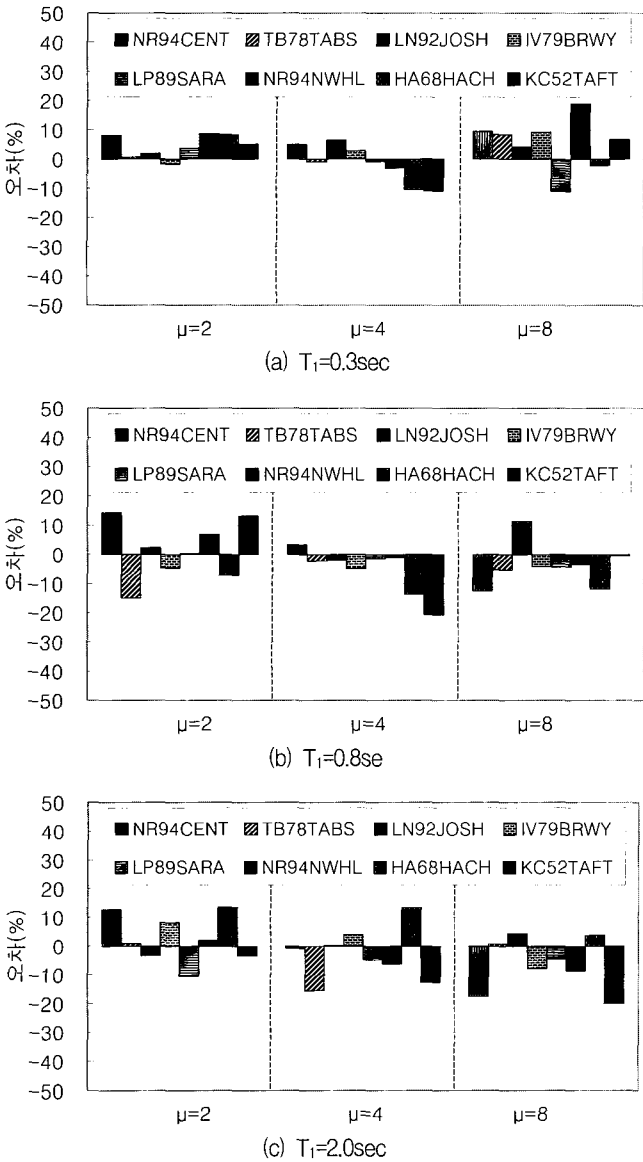


그림 6 기본진동주기와 연성비에 따른 오차비교(γ=0.3)

5. 결 론

능력스펙트럼과 선형 요구스펙트럼에 바탕을 둔 선형 능력스펙트럼법은 개념적으로는 간단하나 반복 계산과정이 요구되며, 부정확한 결과가 산출되는 경우가 많다. 이에 따라 해석법의 정확성을 개선하기 위한 방법의 하나로써, 선형 스펙트럼대신 비선형 스펙트럼을 이용하는 방식들이 제시되고 있으나, 아직 다소의 계산과정이 요구된다.

본 연구에서는 보다 간편하고 정확성이 높은 비선형 직접스펙트럼법(NDSM)을 제시하고, 그 적용성과 신뢰성을 다양한 지진과 해석변수들의 관점에서 검토·연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비선형 직접스펙트럼법에서는 능력스펙트럼으로부터 T_n (또는 ω_n)과 A_y/g 을 간단히 구하면, 추가적 연산과정 없이 비선형 가속도응답스펙트럼으로부터 비선형 최대응답을 직접 구할 수 있으므로 실용적인 방법으로 사료된다.
- 2) 비선형 직접스펙트럼법으로 산정된 비선형 최대응답을 비선형 시각이력해석 응답과 비교한 결과, 일부 모델에서는 다소 큰 오차를 보이기는 하나, 대부분의 모델에서 10%이하의 오차를 나타내었다.
- 3) 비선형 직접스펙트럼법과 비선형 시각이력해석에 의해 산정된 최상층 변위 결과를 비교하면, 항복후강성계수가 0.1, MAD 방법에 의한 수평정적하중 분포 그리고 제하강성저하지수가 0.2~0.3일 때 평균오차가 가장 줄어드는 것으로 나타났다.
- 4) 비선형 정적해석(pushover analysis)에 의한 능력곡선으로부터 얻어진 기본진동주기가 정산해에 거의 근접하므로 비선형 정적해석의 신뢰성을 확인할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Chopra, A. K., "Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures : SDF systems," Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of Berkeley, Berkeley, 1999, p. 67.
2. Freeman, S. A., "Development and use of capacity spectrum method," *Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, CD-ROM, Oakland, Calif. : EERI, 1998.
3. Paret, T. F., Sasaki, K. K., Eilbeck, D. H., and Freeman, S. A., "Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects," *11th World Conference on Earthquake Engineering*, Acapulco, Mexico, 1996, Paper No. 966.
4. Bommer, J. J. and Elnashai, A. S., "Displacement spectra for seismic design," *J. Earthquake Engng.*, Vol. 3, 1999, pp. 1-32.
5. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," Report ATC-40, 1996. 11, p. 316.
6. FEMA-273, "NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings," Report No. FEMA-273, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1997. 5, p. 439.
7. FEMA-356, "Prestandard and commentary for the seismic

- rehabilitation of buildings," Report No. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 2000. 11, p. 490.
8. Fajfar, P., "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra," *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 979-993.
 9. Reinhorn, A. M., "Inelastic analysis techniques in seismic evaluations," *Seismic design methodologies for the next generation of codes*, Eds; P. Fajfar and H. Krawinkler, Rotterdam, Balkema, 1997, pp. 277-287.
 10. Vidic, T., Fajfar, P., and Fischinger, M., "Consistent inelastic design spectra : strength and displacement," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp. 502-521, 1994.
 11. Mehmet Inel, Bretz, E. M., Black, E. F., Aschheim, M. A., and Abrams, D. P., "USEE 2001 : Utility Software for earthquake engineering report and user's manual," Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Campaign, Urbana, Illinois, 2001. 10, p. 88.
 12. Li, K. N., "CANNY 99, 3-dimensional nonlinear static/dynamic structural analysis computer program- users manual," CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, p. 215.
 13. Valles, R., Reinhorn, A., Kunnath, S., La C., and Madan, A., "IDARC 2D Version 4.0 : A program for the inelastic damage analysis of buildings," NCEER-96-0010, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 1996, p. 237.
 14. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 2001, p. 844.
 15. 김용주, 강병두, 전대환, 김재웅, "비선형구조물의 지진 응답평가를 위한 직접스펙트럼법", 2001년도 추계학술 발표논문집, 대한건축학회, 제21권, 제2호, 2001. 10, pp. 119-122.