

# 비선형 약산법들에 의한 전단형 건물의 지진응답평가

## The Seismic Response Evaluation of Shear Buildings by Various Approximate Nonlinear Methods

김재웅\*      강병두\*\*      전대한\*\*\*  
Kim, Jae-Ung      Kang, Pyeong-Doo      Jun, Dae-Han

### 국문요약

성능에 기초한 설계법에서는 비선형 응답산정이 필수적이다. 이를 위한 해석법으로는 비선형 시간이력해석, 비선형 정적해석 혹은 비선형의 영향을 고려한 등가정적해석 등이 있다. 비선형 응답을 산정하기 위한 가장 정확한 해석방법은 비선형 시간이력해석법이지만, 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 비선형 직접스펙트럼법은 pushover곡선으로부터 구조물의 선형 진동주기와 항복강도를 구한 다음, 반복계산 없이 비선형 응답을 직접 산정하는 약산법이다. 본 연구에서는 비선형 약산법들의 정확성과 신뢰성을 다양한 지진과 전단형 건물의 여러 가지 조건에 대해 검토하고자 한다. 본 연구의 결론은 다음과 같다. 1) 선형 능력스펙트럼법에 의한 약산응답들은 수렴하는 해를 구하지 못하거나 발산하는 경우가 발생하며 수렴하더라도 큰 오차가 발생하는 경우가 있으며, 지진별로 오차의 편차가 크다. 2) 비선형 능력스펙트럼법은 능력스펙트럼법보다 계산량이 크게 줄어들고, 해는 구해지나 요구곡선의 특성으로 정확한 해를 구하기 어려울 수 있으며, 전반적으로 큰 오차가 발생한다. 3) 비선형 직접스펙트럼법은 다른 약산법들에 비해 추가적이고 반복적인 계산과정 없이 pushover곡선과 비선형 응답스펙트럼으로부터 비교적 정확한 값을 직접 구할 수 있으므로 실용적인 방법으로 사료된다.

**주요어** : 비선형 응답, 비선형 직접스펙트럼법, 능력스펙트럼법, 비선형 능력스펙트럼법

### ABSTRACT

In performance-based design methods, it is clear that the evaluation of the nonlinear response is required. Analysis methods available to the design engineer today are nonlinear time history analyses, or monotonic static nonlinear analyses, or equivalent static analyses with simulated inelastic influences. The nonlinear time analysis is the most accurate method in computing the nonlinear response of structures, but it is time-consuming and necessitate more efforts. Some codes proposed the capacity spectrum method based on the nonlinear static analysis to determine earthquake-induced demand. The nonlinear direct spectrum method is proposed and studied to evaluate nonlinear response of structures, without iterative computations, given by the structural linear vibration period and yield strength from pushover analysis. The purpose of this paper is to compare the accuracy and the reliability of approximate nonlinear methods with respect to shear buildings and various earthquakes. The conclusions of this study are summarized as follows: 1) Linear capacity spectrum method may fail to find a convergent answer or make a divergence. Even if a convergent answer is found, it has a large error in some cases and the error varies greatly depending on earthquakes. 2) Although nonlinear capacity spectrum method need much less calculation than capacity spectrum method and find an answer in any case, it may be difficult to obtain an accurate answer and generally large error occurs. 3) The nonlinear direct spectrum method is thought to have good applicability because it produce relatively correct answer than other methods directly from pushover curves and nonlinear response spectrums without additional and iterative calculations.

**Key words** : nonlinear response, nonlinear direct spectrum method, capacity spectrum method, nonlinear capacity spectrum method

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

근래 들어 일련의 지진경험을 통하여, 구조물의 거동을 실제에 가깝게 추정할 수 있고, 성능을 예측할 수 있는 성능설계와 같은 개선된 기준이 필요하다는 공감대가 형성되었다. 이와 같은 구조물의 성능에 기초한 설계법에서는 비선형 응답 산정이 필수적이 된다. 이를 위한 방법으로는 정산적 방법들이 있으나 정확성과 실용성의 측면에서 보다 약산적 방법들이 요구되고 있다.<sup>(1)-(4)</sup> 이에 따라 복잡하고 시간이 많이 소요되는 고유치해석이나 비선형 동적해석을 하지 않고 비선형 정적해석만으로 구조물의 비선형 최대응답을 간단히 평가하고자 하는 여러 가지 약산법들<sup>(5)-(8)</sup>이 제시되고 있다.

구조물의 비선형 최대응답을 평가하기 위한 기존의 약산법으로 ATC-40<sup>(5)</sup>에서는 선형 요구 스펙트럼을 사용한 선형 능력스펙트럼법(capacity spectrum method; 이후로는 CSM), FEMA-273<sup>(6)</sup>에서는 변위계수법(displacement coefficient method), 그리고 Chopra 등<sup>(4)</sup>은 능력스펙트럼법을 개선하여 비선형 요구 스펙트럼을 사용하는 비선형 능력스펙트럼법(nonlinear capacity spectrum method; 이후로는 NCSM) 등에 대해 연구하였다. 이러한 약산법들은 개념적으로는 간단하나 반복계산과정이 요구되고, 부정확한 결과가 산출되는 경우도 있으며, 비선형 요구 스펙트럼을 사용한 개선된 방법에서도 다소의 연산과정이 요구된다.

이에 따라 개념적으로 간단하고 기존 약산법들의 단점인 반복계산과정과 부정확한 결과를 줄이기 위해 비선형 직접스펙트럼법(nonlinear direct spectrum method; 이후로는 NDSM)<sup>(9)-(11)</sup>이 연구, 제시된 바 있다. NDSM은 pushover 곡선으로부터 구조물의 항복강도와 진동주기를 구한 다음, 일련의 계산과정을 거치지 않고 직접적으로 구조물의 비선형

\* 정회원·동아대학교 건축학부 교수, 공학박사(대표저자 : jukim@dau.ac.kr)

\*\* 정회원·거창전문대학교 건축과 부교수, 공학박사

\*\*\* 정회원·동서대학교 건설공학부 부교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시기 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2005. 7. 25 / 심사종료일 : 2005. 9. 20)

최대 응답을 구할 수 있는 약산적인 방법이다.

구조물의 약산적인 비선형 응답산정을 위해 개발된 NDSM의 신뢰성 검토를 위한 선행 연구로서 비선형 시각이력해석(nonlinear response history analysis; NRHA)에 의한 응답을 정산해로 하여 전단형 건물과 복합구조물에 대해 연구<sup>(10),(11)</sup>된 바 있다. NDSM의 사용성과 신뢰성을 확인하기 위해 CSM과 NCSM 등과 같이 개념적으로 비슷한 기존의 비선형 약산법들과의 비교검토가 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 다양한 구조적 특성과 여러 가지 지진에 대하여 본 연구에서 제시하는 비선형 약산법인 NDSM과 기존에 제시된 CSM 및 NCSM의 결과를 정산해인 NRHA와 비교하여 사용성과 신뢰성을 검토하고자 한다.

## 1.2 연구방법 및 내용

NDSM을 적용하기 위해 기본모드를 바탕으로 여러 가지 변수들을 결정하고, 또한 구조물에 대한 비선형 정적해석(pushover)시 기본모드의 공간분포벡터를 작용수평하중의 분포로 사용한다. NDSM은 pushover해석으로 얻어진 밀면 전단력과 최상층변위의 관계를 이용하여 유사항복가속도  $A_y/g$ 와 진동주기  $T$ 를 산정한 후 등가단자유도계 모델에 대한  $A_y/g-T$ 의 비선형 가속도응답스펙트럼으로부터 연성비  $\mu$ 를 산정하여, 다자유도계의 비선형 최대응답을 반복과정 없이 직접 산정하고자 하는 방법이다.

NDSM의 사용성과 신뢰성을 검토하기 위한 해석모델로는 다양한 구조적 특성( $T_1=0.3, 0.8, 2.0\text{sec}$ ,  $\mu=2, 4, 8$ )을 갖는 9가지의 집중질량계 2차원 전단형 건물이다. 각 해석모델의 동적해석을 위한 입력지진동으로는 18가지의 지진기록<sup>(12)</sup>을 선정하며 감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용한다. 또한 적분시간 간격은 0.005sec 이하가 되도록 한다.

비선형 정적해석 및 비선형 시각이력해석(NRHA)은 비선형 해석프로그램인 CANNY<sup>(13)</sup>를 사용하고 비선형 가속도응답스펙트럼 작성은 USEE<sup>(14)</sup>를 사용하여 수행하기로 한다.

## 2. 비선형 해석

### 2.1 개요

구조물의 비선형 해석방법들은 동적하중에 대한 시각이력해석의 동적해석법, 정적수평하중에 대하여 해석하는 비선형 정적해석법(pushover해석법) 그리고 비선형 응답을 간편하게 추정할 수 있는 비선형 약산법으로 대별할 수 있다. 본 연구에서 사용되는 해석법들은 다음과 같다.

### 2.2 비선형 시각이력해석법(NRHA)

여러 가지 비선형 동적해석방법 중, 본 연구에서는 비선형 시각이력해석법(NRHA)을 사용한다. NRHA에서의 응답은 대표적 수치적분법인 Newmark  $\beta$ 법을 이용하여 비선형 직접적분법으로 산정한다. NRHA에서 외력을 받는 비선형

감쇠 및 강성구조물에 대한 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + f_s(u, \text{sign}\dot{u}) = sp(t) \quad (1)$$

위에서, 공간벡터  $s$ 는  $m\iota$ , 외력  $p(t)$ 는  $-\ddot{u}_g(t)$ 이다. 비선형에서의 감쇠 메카니즘은 명확하게 정량적으로 구명되어 있지 않으나 구조동역학에서 일반적으로 사용되는 단순 점성 감쇠(viscous damping)로 가정한다. 그리고 여러 유형의 감쇠를 조합하면 질량행렬, 구조물의 초기강성행렬, 구조물 및 부재 요소의 강성이 시간에 따라 변화하는 강성행렬 등으로 구성되나, 본 연구에서는 시간에 따라 강성이 변화하지 않는 것으로 가정하여 아래와 같이 Rayleigh 감쇠를 사용한다.

$$c = a_m m + a_0 k_0 \quad (2)$$

$$a_m = \zeta \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (3)$$

$$a_0 = \zeta \frac{2}{\omega_1 + \omega_2} \quad (4)$$

식 (2)에서와 같이 Rayleigh 감쇠는 해석모델에 대해 고유치해석을 수행하여 얻어진 1차 모드와 2차 모드의 진동수 ( $\omega_1, \omega_2$ )와 가정된 감쇠비( $\zeta$ )를 식 (3)과 식 (4)에 대입하면 감쇠계수  $a_m, a_0$ 가 구해진다.

수치적분법으로는 일반적으로 건물의 지진응답을 계산하는데 있어서 널리 사용되는 Newmark  $\beta$ 법( $\beta=1/4, \gamma=1/2$ )을 이용한다. 비선형 동적해석의 수치해석에서는 불평형력으로 인해 오차의 누적이 발생할 수 있으며, 이것은 수렴하지 않고 발산을 야기할 수 있다. 따라서 불평형력이 오차범위 안에서 수렴할 수 있도록 반복해석을 하여야 한다. 불평형력이 수렴하기 위한 반복해석은 뉴턴-랩슨 방법(Newton-Raphson method)를 사용한다.

비선형 해석은 힘과 변위 사이의 불연속적(piece-wise) 선형 관계에 대한 가정을 바탕으로 증분해석법(step by step analysis method)을 사용하며, 내부적으로 적당한 시간간격의 증분으로 재계산한다. 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법은 선형의 입력운동을 가정하고 힘과 전체 변위 사이의 비선형적 관계, 구조물 절점에서의 변위의 적합조건, 구조물 절점에서의 힘(관성, 감쇠, 저항, 외력)의 평형조건 및 시간 응답 함수 사이의 미분관계(변위, 속도, 가속도)를 바탕으로 수행한다.

### 2.3 비선형 정적해석법(Pushover해석법)

비선형 정적해석법은 pushover해석법이라고도 알려져 있으며, NRHA의 변수 중 일부를 단순화시켜 응답결과와 양과 연산시간을 줄이면서 비교적 정확하게 다양한 비선형 응답들을 산정할 수 있는 방법이다.

이 방법은 정적수평하중 분포는 고정된 상태에서, 최상층의 변위가 목표변위가 될 때까지 횡력의 크기만 계속 증가

시켜 구조물을 비선형 해석하여 전체응답을 산정하는 방법으로서, 부재의 항복한지 발생과정과 전체 구조물의 총항복상태를 정밀히 추적할 수 있다. 정적수평하중의 일반적인 분포방법은 Valles et al<sup>(15)</sup>과 같이 일정 분포(uniform distribution), 역삼각형 분포(inverted triangular distribution), 일반 지수 분포(generalized power distribution), 고차모드를 고려한 분포(modal adaptive distribution) 등이 있고, 해석목적에 따라 다양하게 적용된다. 본 연구에서는 해석대상 건물이 저층인 관계로 고차모드의 영향이 작으므로, Chopra<sup>(17)</sup> 등이 제시한 기본모드의 공간분포벡터를 정적하중의 작용수평하중 분포(profile)로 사용하기로 한다. 비선형 정적해석은 하중조절 혹은 변위조절에 의해 수행하거나, 또는 처음에는 하중조절(탄성 범위까지)로 수행한 다음 변위조절로 수행한다.

## 2.4 비선형 직접스펙트럼법(NDSM)

본 연구에서 제시한 비선형 직접스펙트럼법(NDSM)은 Chopra 등<sup>(4)</sup>이 제안한 비연립 모드해석법(uncoupled modal response history analysis; 이후로는 UMRHA)의 특성과 장단점을 토대로 구조물의 기본모드( $n=1$ )만을 고려하여 구조물의 비선형 최대응답을 보다 간편하게 구하는 약산적인 방법이다. UMRHA는 비선형 시스템의  $n$ 차모드방정식에서  $n$ 차모드가 지배적이고, 나머지 모드들의 기여정도가 현저히 낮을 경우 선형시스템에서와 같이 다른 모드와 분리될 수 있다는 가정에 따라 비선형 응답을 산정하는 방법이다. 이와 같이 비선형 시스템의 방정식이 각 모드별로 분리될 수 있다는 가정을 따른다면,  $N$ 차의 연립2계 미분방정식(coupled, MDF) 대신에  $N$ 개의 독립된 2계 미분방정식(uncoupled, SDF)의 해를 중첩하여 구할 수 있다.<sup>(4),(11)</sup> 일반적으로 능력스펙트럼법 등에서 에너지 소산능력의 저하는 성능점의 이동에 따른 등가선형 반응스펙트럼의 변화로써 나타난다고 알려져 있다. 그러나 등가선형 스펙트럼에서의 에너지 소산능력의 저하현상은 결과적으로 비선형 스펙트럼의 성능점으로 수렴하므로, 본 연구에서는 비선형 스펙트럼의 사용으로 에너지 소산능력의 저하가 반영될 수 있다고 가정한다.

NDSM은 UMRHA의 특성과 장단점을 토대로 구조물의 기본모드만을 고려하여 구조물의 비선형 최대응답을 보다 간편하게 구하는 약산적인 방법으로 전개과정은 아래와 같다.

### 2.4.1 비선형 정적해석

그림 1(a)와 같은 실제구조물에 대하여, 수평 층진력의 분포를 식 (5)와 같은 기본모드의 공간분포벡터  $s_1^*$ 으로 가정하고 그 크기를 점진적으로 증가시키면서 비선형 정적해석(pushover)을 수행하여 최상층변위  $U_N$ 과 밀면전단력  $V_b$ 의 관계인 pushover곡선(그림 1(b))을 구한다. 그림 1(b)에서  $V_{by}$ 는 밀면 항복전단력이고  $U_{Ny}$ 는 최상층 항복변위이다.

$$s_1^* = \mathbf{m} \phi_1 \quad (5)$$

### 2.4.2 등가단자유도계 응답

#### 1) 강성이력곡선

앞에서 구한 pushover곡선을 아래의 변수변환을 통해 등가단자유도계(equivalent single degree of freedom; ESDF)에 대한 그림 1(c)와 같은 강성이력곡선( $F_{s1}/L_1 - D$ )을 구할 수 있다.

$$A = \frac{F_{s1}}{L_1} = \frac{V_b}{M_1^*} \quad (6)$$

$$D = \frac{U_N}{\Gamma_1 \phi_M} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에서 기본모드의 유효질량  $M_1^*$ 과 기본모드의 참여계수  $\Gamma_1$ 은 각각 다음 식으로 산정할 수 있다.

$$M_1^* = \frac{L_1^2}{M_1} \quad (8)$$

$$\Gamma_1 = \frac{L_1}{M_1} \quad (9)$$

$$L_1 = \phi_1^T \mathbf{m} \mathbf{e} \quad (10)$$

$$M_1 = \phi_1^T \mathbf{m} \phi_1 \quad (11)$$

그림 1(c)에서  $\beta$ 는 항복후강성계수,  $\omega_1^2$ 은 곡선의 초기 기울기이며,  $n$ 차 모드에 대한 ESDF 시스템의 기본진동주기  $T_1$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_1^2 = \frac{A_y}{D_y} \quad (12)$$

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = 2\pi \left( \frac{D_y}{A_y} \right)^{1/2} \quad (13)$$

#### 2) ESDF 최대응답

입력지진동에 대한 비선형 가속도응답스펙트럼을  $A_y/g-T_1$  함수로 나타내면 그림 1(d)와 같은 비선형 가속도응답스펙트럼이 된다. 그림 2는 대표적으로 Imperial Valley 1940 지진( $\zeta=5\%$ ,  $\ddot{u}_{y, \max}=0.319g$ )에 대해 작성된 비선형 응답스펙트럼의 예로써, 항복후강성비  $\beta=10\%$ 인 경우이다.

그림 1(c)와 식 (13)으로부터 산정된 기본모드의 비선형 유사가속도  $A_y/g$ 와 기본진동주기  $T_1$ 에 대한 비선형 스펙트럼으로부터  $\mu$ 를 구할 수 있다. 연성계수  $\mu$ 가 구해지면 기본모드에 대한 ESDF의 비선형 최대변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$D = \mu \left( \frac{A_y}{g} \right) \left( \frac{T_1}{2\pi} \right)^2 g \quad (14)$$

### 2.4.3 비선형 최대응답

위에서 구한  $D$ 로부터 구조물의 최상층에 대한 전체최대

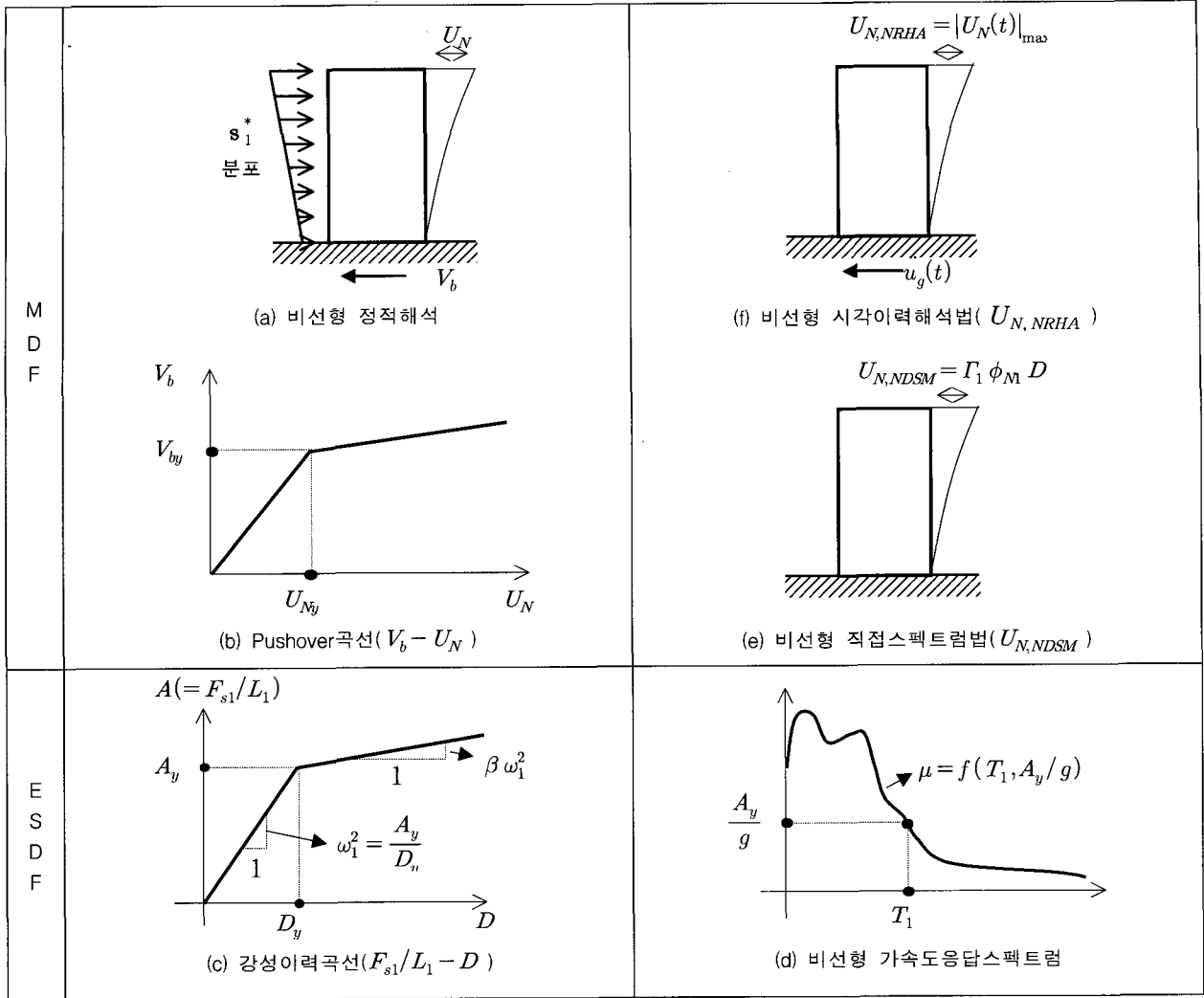


그림 1 NDSM의 해석과정

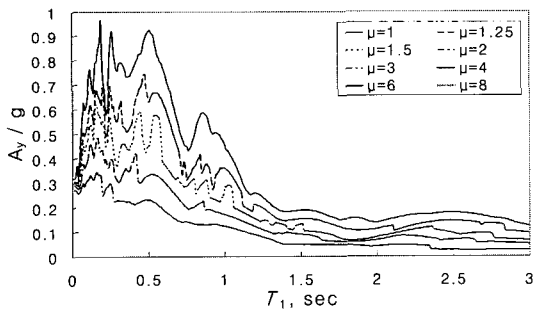


그림 2 비선형 가속도응답스펙트럼  
(Imperial Valley 1940,  $\ddot{u}_{g, \max} = 0.319g$ ,  $\zeta = 5\%$ ,  $\beta = 10\%$ )

변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U_{N,NDSM} = \Gamma_1 \phi_M D \quad (15)$$

### 2.5 선형 능력스펙트럼법(CSM)

선형 능력스펙트럼법(CSM)은 ATC-40에서 제안한 비선형 구조물의 최대지진요구(maximum seismic demand)를 산정하는 약산법이다. 이 방법은 고차모드의 영향을 무시하고 기본모드만을 고려하여 비선형 정적해석의 결과인 밀면전단력

과 최상층변위의 관계를 이용하여 능력스펙트럼으로 변환한다. 그리고 등가단자유도계 모델에 대한 선형 요구스펙트럼과의 시행착오적인 성능점을 통하여 구조물의 비선형 응답을 추정하는 방법으로 다음과 같이 구해질 수 있다.

#### 2.5.1 비선형 정적해석

NDSM과 동일하게 구한다.

#### 2.5.2 등가단자유도계 응답

##### 1) 능력곡선

NDSM의 강성이력곡선과 동일하게 구한다.

##### 2) 요구스펙트럼

입력지진동에 대하여 진동주기  $T$ 와 유사가속도  $A$ 의 선형 응답스펙트럼( $A-T$ )을  $A-D$ 양식으로 변환( $D=A/\omega^2$ )하면, 그림 3과 같은 선형 요구스펙트럼(demand spectrum)이 구해진다.

##### 3) 성능점

앞서 구한 능력곡선과 요구스펙트럼을 그림 4와 같이 동일한  $A-D$ 양식 내에 중첩하면, 두 곡선의 교차점으로부터 성

능점(performance point)  $D$ 를 구할 수 있다. 이 때 아래와 같은 비선형계에 대한 등가진동주기  $T_{eq}$ 와 등가감쇠  $\zeta_{eq}$ 를 산정하여, 이 ESDF에 대한 요구스펙트럼을 연속적으로 사용하여 수렴하는 성능점으로부터 비선형 최대응답을 추정하게 되며,  $T_{eq}$ 와  $\zeta_{eq}$ 는 다음과 같다.

$$T_{eq} = T_1 \sqrt{\frac{\mu}{1 + \beta\mu - \beta}} \quad (16)$$

$$\zeta_{eq} = \zeta + \frac{2(\mu - 1)(1 - \beta)}{\pi\mu(1 + \beta\mu - \beta)} \quad (17)$$

### 2.5.3 비선형 최대응답

위의 ESDF에서 구한 성능점  $D$ 에 따라 구조물의 최상층에 대한 전체최대변위는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$U_{N,CSM} = \Gamma_1 \phi_M D \quad (18)$$

## 2.6 비선형 능력스펙트럼법

CSM의 한계와 정확성을 개선하기 위하여 등가선형의 요구스펙트럼 대신 비선형 요구스펙트럼을 고려하는 비선형 능력스펙트럼법(NCSM)은 다음과 같다.

### 2.6.1 비선형 정적해석

CSM과 동일하게 구한다.

### 2.6.2 등가단자유도계 응답

#### 1) 능력곡선

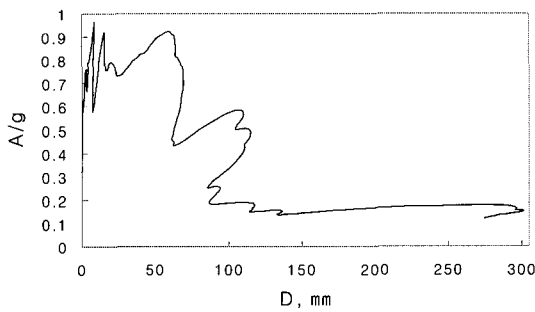


그림 3 등가선형 요구스펙트럼  
(Imperial Valley 1940,  $\ddot{u}_{g, max} = 0.319g$ ,  $\zeta = 5\%$ )

CSM과 동일하게 구한다.

#### 2) 요구스펙트럼

입력지진동에 대하여 진동주기  $T$ 와 연성계수  $\mu$ , 유사가속도  $A_y$ 의 비선형 응답스펙트럼( $A_y-T$ )을  $A_y-D$ 양식으로 변환하면( $D = \mu D_y = \mu A_y / \omega^2$ ) 그림 5와 같은 비선형 요구스펙트럼이 구해진다.

#### 3) 성능점

능력곡선과 요구스펙트럼을 같은  $A_y-D$ 양식에 중첩하면 그림 6과 같다. 능력곡선이 여러 개의  $\mu$ 에 대한 비선형 요구스펙트럼과 만나게 되는데, 그 중에서 항복변위에 대한 비선형 변위의 비율과 일치하는  $\mu$ 곡선과의 교차점으로부터 성능점  $D$ 가 구해진다.

### 2.6.3 비선형 최대응답

위의 ESDF에서 구한 성능점  $D$ 에 따라 구조물의 최상층에 대한 전체최대변위는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$U_{N,NCSM} = \Gamma_1 \phi_M D \quad (19)$$

## 3. 적용예제 및 분석

비선형 약산법들의 정확한 평가를 위해 비선형 정적해석의 목표변위는 비선형 시각이력해석(NRHA) 결과 발생된 최대변위로 가정한다. 이러한 목표변위를 다양한 비선형 약산법들로부터 산정된 최상층 응답결과와 비교·검토하기로 한다.

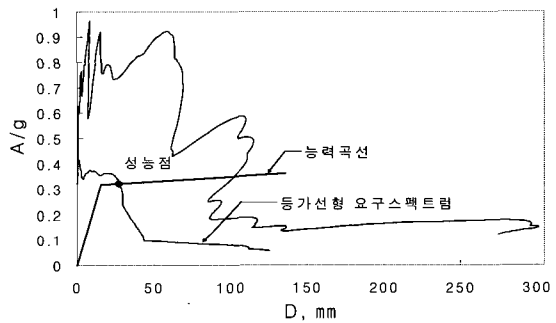


그림 4 등가선형 성능점 결정

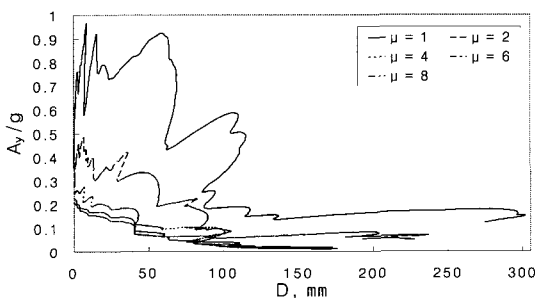


그림 5 비선형 요구스펙트럼  
(Imperial Valley 1940,  $\ddot{u}_{g, max} = 0.319g$ ,  $\zeta = 5\%$ ,  $\beta = 10\%$ )

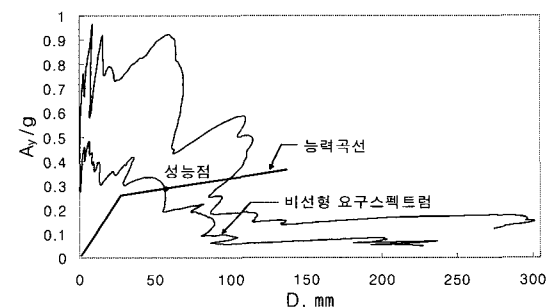


그림 6 비선형 성능점 결정

### 3.1 해석모델

해석모델로는 그림 7과 같은 집중질량계의 2차원 전단건물(MDF)모델로써 세 가지의 기본진동주기( $T_1=0.3, 0.8, 2.0\text{sec}$ )와 각각의 기본진동주기에 세 가지의 연성비( $\mu=2, 4, 8$ )를 갖는 9가지 모델을 고려하기로 한다. 해석모델은 기초 위에 고정되어 있는 것으로 가정한다. 골격곡선은 이선형(bilinear)을 사용하였으며, MDF모델의 제반 응답특성을 살펴보기 위해 항복후강성계수(post-yielding stiffness factor)인  $\beta$ 는 초기강성의 10%(0.10)로 가정<sup>(16)</sup>하였다.

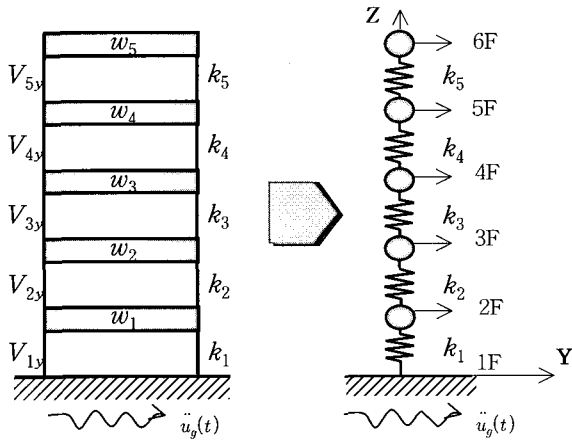


그림 7 2차원 전단건물

### 3.2 구조물의 주요조건

예제구조물 중 대표적인 구조물의 제반구조특성<sup>(11),(17)</sup>은 표 1과 같고, 표에서  $w_j$ 는 층중량,  $F_j$ 는 층횡력,  $V_j$ 는 층전단력,  $k_j$ 는 층강성,  $F_{jy}$ 는 층항복횡력,  $V_{jy}$ 는 층항복전단력을 나타낸다.

표 1 구조물의 제반구조특성 ( $T_1=0.8\text{sec}$ ,  $\mu=4$ , EQ15'인 경우)

$j$ (층)	$w_j$ (kN)	$F_j$ ( $V_b$ )	$V_j$ ( $V_b$ )	$k_j/k_1$	$k_j$ (kN/mm)	$F_{jy}$ (kN)	$V_{jy}$ (kN)
1	444.8	0.063	1.000	1.000	41.137	47.68	293.84
2	444.8	0.126	0.937	0.937	38.549	60.79	270.63
3	444.8	0.189	0.811	0.811	33.370	73.72	231.06
4	444.8	0.252	0.622	0.622	25.604	86.47	176.79
5	444.8	0.371	0.371	0.371	15.250	106.09	106.07

\* EQ15는 표 3 참조

### 3.3 감쇠

구조물의 감쇠는 Rayleigh 감쇠로 가정하였으며, 감쇠계수를 구하기 위한 감쇠비는 1, 2차 모드에서  $\zeta=5\%$ 를 사용하여 해석을 수행하였다. 예제 구조물 중에서 기본진동주기  $T_1=0.8\text{sec}$ 와 연성비  $\mu=4$ 에 대한 탄성해석을 통하여 진동수를 구하면,  $\omega_1=7.85\text{rad/sec}$ ,  $\omega_2=19.63\text{rad/sec}$ 가 되고, 식 (2)~(4)에 따른 감쇠계수는  $a_m=0.5609$ ,  $a_0=0.0036$ 이 된다. 다른

조건들에 대해서도 위와 동일한 방법으로 구조물의 감쇠계수를 구하면 표 2와 같다.

표 2 구조물의 감쇠계수 ( $\zeta=5\%$ )

$T_1$	$T_2$	$\omega_1$	$\omega_2$	$a_m$	$a_0$
0.3	0.12	20.94	52.35	1.4959	0.0014
0.8	0.32	7.85	19.63	0.5609	0.0036
2.0	0.80	3.14	7.85	0.2243	0.0091

### 3.4 입력지진동

입력지진동은 표 3과 같이 FEMA-307<sup>(12)</sup>에서 사용되었던 것을 선택하였으며, 표의 지진기록은 SD(short duration), LD(long duration) 및 FD(forward directive) 3가지 분류에 각 6가지이다. 여기서, SD는 약 7이하 지진규모의 지진기록이고, 반면 LD는 일반적으로 더욱 강한 지진기록으로 지진이 장시간 지속된 것이다. 그리고 FD는 S파에서 매우 일찍 관찰되어지는 강한 속도파로써 단층파괴면 근처에서 기록된 것이다. 표의 identifier에서 첫 2글자는 지진기록, 다음 숫자 2자리는 지진의 발생년도, 다음의 4글자는 지진기록을 수집한 장소, 마지막 3~4글자는 지진의 성분을 나타낸다. 따라서 EQ9의 IV40ELCN180은 1940년 Imperial Valley 지진으로 El Centro에서 수집된 남북 요소를 의미한다. 표의 지진규모는  $M_L$ 은 리히트 규모로써 국지적 규모 진도,  $M_W$ 는 모멘트 규모,  $M_S$ 는 표면파 규모를 나타낸다. 각 지진기록에 관련된 특성진동주기(characteristic period)는 0.2sec에서 2.0sec까지이다. 지진력 데이터에 대한 적분시간 간격은 모두 0.005sec 이하가 되도록 하였다. 표 3의 지진기록 중 대표적인 지진의 특성은 그림 8과 같다.

### 3.5 해석결과 및 분석

다양한 진동주기와 연성을 갖는 구조물에 대하여, 이상과 같은 여러 약산법들의 해석결과 및 응답오차는 표 4~10과 같다. 응답오차는 식 (20)으로 산정하였고, 평균절대오차는 식 (21)로 산정된 것이다. 또한 표 8~10의 결과를 지진의 관점에서 그림으로 나타내면 그림 9~11과 같고, 그림 12~14는 구조물의 조건에 따른 평균절대오차를 나타낸다. 그림 9~11에서 굵은 실선은 평균절대오차를 의미한다.

$$e_n = \frac{(U_{N,NRHA} - U_{N,약산법})}{U_{N,NRHA}} \times 100 (\%) \quad (20)$$

$$\text{평균절대오차} = \frac{1}{N_e} \sum_{n=1}^{N_e} |e_n|$$

1) CSM(표 8, 그림 9, 그림 12)의 비선형 응답특성을 분석하면 다음과 같다.

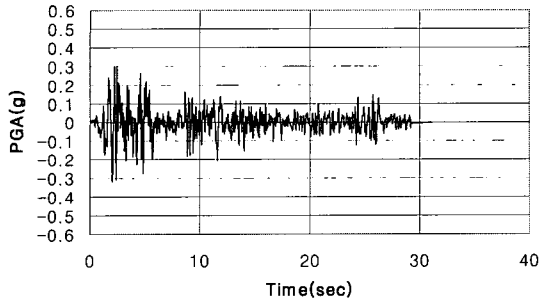
- ① CSM의 평균절대오차는 27.4%이며, 지진별로 오차의 편차가 크다. 특히 EQ4(40.1%), EQ6(42.8%),

표 3 지진기록

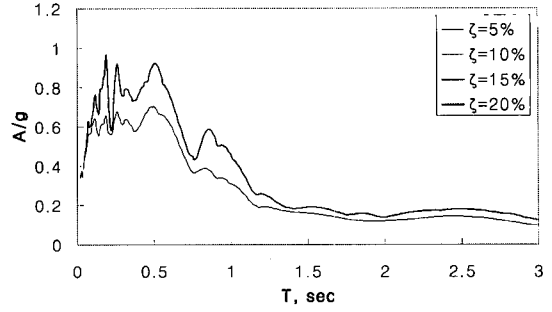
EQ No.	Identifier	Earthquake Date	Mag.	Station	Component	PGA (g)	Epic. Dist. (km)	Char. Period (sec)	Dur. Time (sec)
Short Duration(SD)									
EQ1	WN87MWLN090	Whittier Narrows 1 Oct 87	$M_L=6.1$	Mount Wilson Caltech Seismic Station	90	0.175	18	0.20	39.98
EQ2	BB92CIVC360	Big Bear 28 Jun 92	$M_S=6.6$	Civic Center Grounds	360	0.544	12	0.40	60.00
EQ3	SP88GUKA360	Spitak 7 Dec 88	$M_S=6.9$	Gukasyan, America	360	0.207	57	0.55	19.99
EQ4	LP89CORR090	Loma Prieta 17 Oct 89	$M_S=7.1$	Corralitos Eureka Canyon Rd.	90	0.478	8	0.85	39.98
EQ5	NR94CENT360	Northridge 17 Jan 94	$M_w=6.7$	Century City	360	0.221	19	1.00	59.98
EQ6	IV79ARY7140	Imperial Valley 15 Oct 79	$M_L=6.6$	Array #7-14	140	0.333	27	1.20	36.87
Long Duration(LD)									
EQ7	CH85LLEO010	Central Chile 3 Mar 85	$M_S=7.8$	Llolleo-Basement of 1-Story Building	10	0.711	60	0.30	116.38
EQ8	CH85VALP070	Central Chile 3 Mar 85	$M_S=7.8$	Valparaiso University of Santa Maria	70	0.176	26	0.55	79.37
EQ9	IV40ELCN180	Imperial Valley 18 May 40	$M_L=6.3$	El Centro Irrigation District	180	0.348	12	0.65	31.18
EQ10	TB78TABS344	Tabas 16 Sep 78	$M_L=7.1$	Tabas	344	0.937	<3	0.80	49.98
EQ11	LN92JOSH360	Landers 28 Jun 92	$M_L=7.5$	Joshua Tree	360	0.274	15	1.30	79.98
EQ12	MX85SCT1270	Michoacan 19 Sep 85	$M_S=8.1$	SCT1-Secretary of Communication and Transportation	270	0.171	376	2.00	180.06
Forward Directivity(FD)									
EQ13	LN92LUCN250	Landers 28 Jun 92	$M_L=7.5$	Lucerne	250	0.733	42	0.20	49.28
EQ14	IV79BRWY315	Imperial Valley 15 Oct 79	$M_L=6.6$	Brawley Municipal Airport	315	0.221	43	0.35	97.88
EQ15	LP89SARA360	Loma Prieta 17 Oct 89	$M_S=7.1$	Saratoga Aloha Avenue	360	0.504	28	0.40	40.00
EQ16	NR94NWHL360	Northridge 17 Jan 94	$M_w=6.7$	Newhall LA County Fire Station	360	0.589	19	0.80	59.98
EQ17	NR94SYLH090	Northridge 17 Jan 94	$M_w=6.7$	Sylmar County Hospital Parking Lot	90	0.604	15	0.90	59.98
EQ18	KO95KOMSNS	Hyogo-Ken Nambu 17 Jan 95	$M_L=7.2$	Takatori-kisu	360	0.617	11	1.40	40.00

표 4 NRHA에 의한 예제 구조물의 최상층 변위응답 (unit: mm)

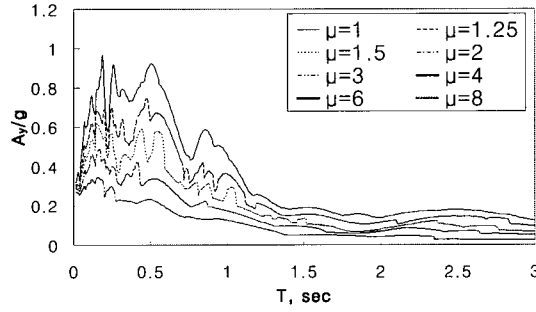
$T_1$	$\mu$	SD						LD						FD					
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18
0.3	2	6.4	46.0	17.0	34.8	14.0	19.3	56.9	12.4	17.3	45.5	20.1	10.2	30.7	20.1	24.1	62.0	32.0	66.5
	4	4.8	32.8	14.5	49.3	19.3	30.5	53.1	16.5	26.2	55.6	30.5	16.0	33.3	18.3	24.4	83.8	44.7	90.7
	8	3.8	35.8	20.8	69.9	23.6	42.4	58.9	19.8	35.6	77.7	37.6	24.6	44.5	29.5	32.0	114.8	70.6	121.9
0.8	2	6.1	62.5	33.5	143.8	91.2	149.6	127.5	47.8	74.9	216.4	91.2	101.9	133.1	59.4	103.9	304.8	264.7	415.0
	4	6.4	50.8	35.8	125.7	65.0	165.1	99.6	41.9	80.3	234.4	94.2	160.8	145.0	77.2	128.8	252.0	216.2	230.4
	8	5.6	42.4	38.6	161.8	57.2	152.7	127.5	46.7	93.2	267.0	89.7	257.3	215.9	96.3	151.1	209.6	256.3	255.0
2.0	2	6.1	56.6	45.0	201.7	122.7	319.0	243.8	80.8	206.0	452.6	130.8	777.7	469.9	156.2	309.1	471.2	626.1	476.3
	4	4.8	63.0	47.8	181.6	90.4	236.0	184.4	62.7	161.5	541.8	148.8	629.7	614.2	167.1	310.4	503.7	367.3	349.5
	8	4.1	71.9	57.7	214.4	71.4	259.8	156.2	58.2	208.0	897.9	122.9	438.2	954.3	164.8	278.6	566.2	287.0	340.9



(a) 시각이력



(b) 선형 스펙트럼



(c) 비선형 스펙트럼 ( $\zeta=5\%$ ,  $\beta=10\%$ )

그림 8 EQ9의 지진특성

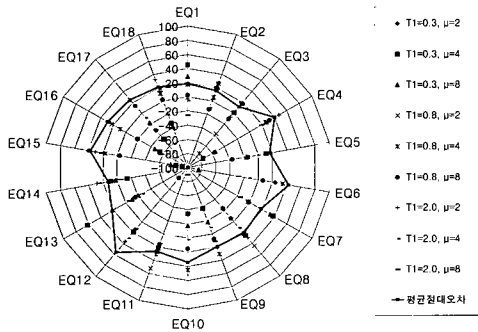


그림 9 지진종류에 따른 CSM의 응답오차

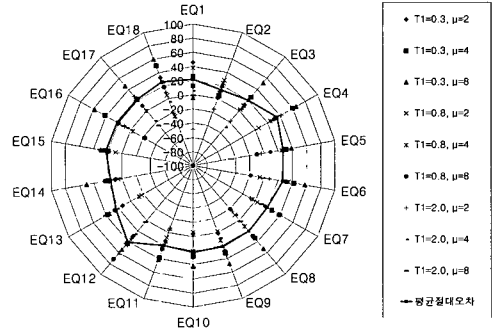


그림 10 지진종류에 따른 NCSM의 응답오차

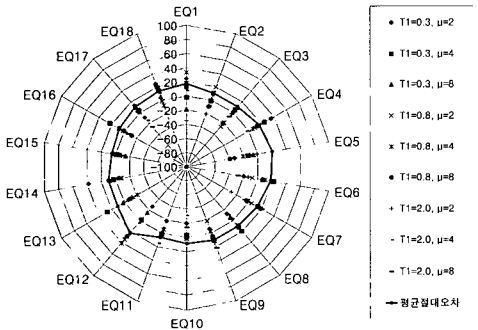


그림 11 지진종류에 따른 NDSM의 응답오차

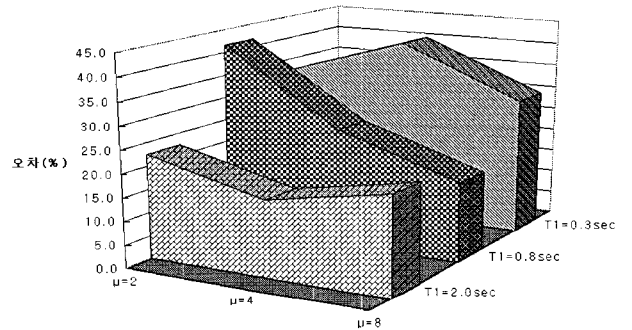


그림 12 구조물 조건에 따른 CSM의 평균절대오차

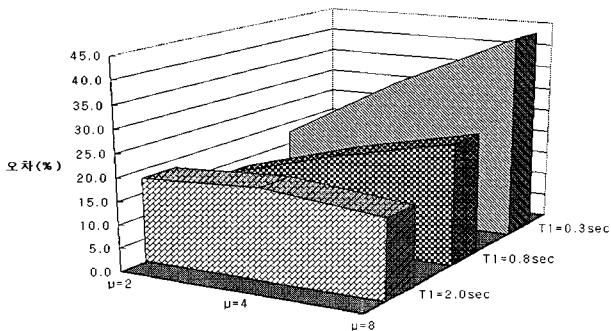


그림 13 구조물 조건에 따른 NCSM의 평균절대오차

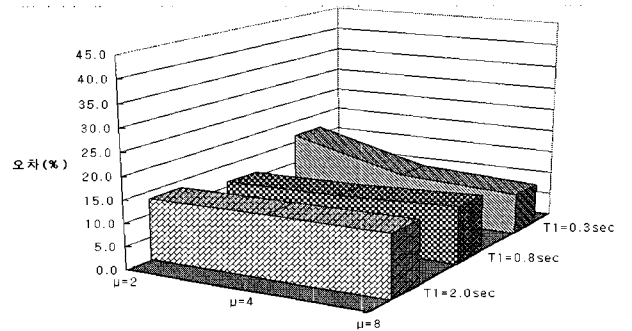


그림 14 구조물 조건에 따른 NDSM의 평균절대오차



EQ12(55.4%), EQ16(38.1%)에서 약 40% 이상의 오차가 나타난다.

②  $T_1=0.3$ 일 때 전반적으로 오차가 크게 나타나며, 특히 EQ12에 대한  $T_1=0.8$ 인 경우의  $\mu=2$ 와  $\mu=4$ 인 모델에서 100%가 넘는 오차가 발생한다.

2) NCSM(표 9, 그림 10, 그림 13)의 비선형 응답특성을 분석하면 다음과 같다.

① 지진종류에 따른 오차를 분석한 결과, 지진별 오차의 편차가 크지 않으며, 평균절대오차는 23.1%이다. 그러나 전반적으로 큰 오차가 나타나며, 특히 EQ5 (35.0%), EQ12 (40.8%)에서 큰 오차가 나타난다.

② 구조특성에 따른 오차를 분석한 결과,  $T_1=0.3$ ,  $\mu=8$ 인 경우 큰 오차가 나타났다.

3) NDSM(표 10, 그림 11, 그림 14)의 비선형 응답특성을 분석하면 다음과 같다.

① 지진종류에 따른 오차를 분석한 결과, 평균절대오차는 12.4%로써 CSM, NCSM에 비해 작게 나타났다.

② 오차의 대부분이 음(-)의 값으로 나타났으며, 이것은 NDSM의 응답이 NRHA의 응답보다 크게 산정되는 것을 의미한다.

③ 지진 분류형태에 따른 오차의 특성은 FD분류의 지진동인 경우 작은 오차를 나타내었다.

표 5 CSM에 의한 예제 구조물의 최상층 변위응답 (unit: mm)

$T_1$	$\mu$	SD						LD						FD					
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18
0.3	2	*	33.8	*	54.4	**	14.7	*	*	**	*	*	8.9	*	*	14.5	*	41.9	**
	4	2.5	26.7	14.2	86.1	17.3	63.5	33.3	12.2	36.1	74.9	24.1	13.2	13.0	21.1	44.7	130.0	65.8	120.9
	8	2.8	28.2	17.0	108.5	27.4	78.5	39.6	21.1	41.9	91.2	27.9	20.1	49.0	28.7	56.4	168.7	83.1	169.2
0.8	2	**	46.5	27.9	104.9	*	*	*	26.7	*	*	43.9	267.0	107.2	55.9	**	236.2	*	*
	4	5.1	48.0	29.5	93.7	74.7	108.5	102.9	32.5	56.4	130.0	68.8	363.0	175.8	70.4	107.7	230.4	163.8	204.5
	8	5.6	47.8	42.7	111.3	78.2	142.5	129.3	57.7	86.4	226.6	76.2	466.9	250.7	86.6	156.7	251.0	221.2	250.2
2.0	2	6.4	55.4	48.5	106.4	102.4	*	*	56.9	166.4	**	102.1	493.8	542.0	111.5	214.4	358.6	*	322.3
	4	5.3	69.9	48.5	138.2	91.2	268.2	158.5	55.9	177.8	531.6	100.3	438.9	776.7	124.7	211.3	381.0	398.3	287.5
	8	5.3	81.0	47.2	174.2	82.8	333.5	181.1	62.2	185.4	1708.2	105.4	383.5	1005.8	173.0	217.4	404.6	372.9	292.9

\* : 수렴하는 해를 구할 수 없는 경우

\*\* : 발산하는 경우

표 6 NCSM에 의한 예제 구조물의 최상층 변위응답 (unit: mm)

$T_1$	$\mu$	SD						LD						FD					
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18
0.3	2	3.6	41.1	15.2	23.9	12.7	22.9	47.5	14.7	17.0	47.2	17.5	7.4	26.7	18.0	17.8	49.8	28.7	45.2
	4	3.6	31.2	10.7	19.8	13.5	17.5	39.1	10.9	17.8	40.1	19.1	9.1	21.1	14.7	19.3	49.3	35.1	46.0
	8	3.8	28.7	9.9	24.4	14.5	18.0	37.3	9.4	18.8	45.0	22.1	11.4	29.2	14.7	22.4	48.8	37.6	49.0
0.8	2	5.3	45.5	32.8	136.4	64.3	159.3	123.4	52.3	76.2	230.4	84.6	55.1	156.5	56.1	94.2	244.9	203.5	393.2
	4	3.8	38.9	32.3	95.3	48.5	109.0	104.4	37.1	70.4	186.7	72.4	64.0	164.3	62.5	104.1	260.4	215.9	291.3
	8	5.1	41.9	29.0	109.7	62.7	105.7	77.5	32.8	66.8	189.5	67.3	73.4	161.5	73.2	115.6	256.5	200.9	210.6
2.0	2	9.1	65.3	53.3	119.1	127.0	295.1	263.7	93.7	135.1	455.7	138.7	511.0	406.9	140.7	240.0	423.9	458.5	431.5
	4	4.6	59.9	62.2	125.7	131.8	330.2	141.7	68.1	148.1	419.4	125.5	465.3	478.8	159.8	206.0	475.0	434.3	366.3
	8	4.3	64.3	55.6	159.3	105.2	261.6	142.0	56.6	149.6	507.7	127.3	421.6	571.0	159.0	223.0	500.4	362.0	259.6

표 7 NDSM에 의한 예제 구조물의 최상층 변위응답 (unit: mm)

$T_1$	$\mu$	SD						LD						FD					
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18
0.3	2	4.8	42.2	17.0	22.9	18.5	23.1	45.7	14.0	18.3	54.4	23.6	13.0	33.0	12.4	23.6	61.7	35.1	54.4
	4	4.8	33.0	13.7	37.1	22.1	23.9	45.7	13.2	24.6	57.4	30.2	16.5	24.4	17.8	24.4	65.0	42.9	77.7
	8	4.3	35.6	19.1	59.7	25.1	39.4	48.5	21.1	32.0	80.3	36.3	28.7	43.4	26.7	36.6	104.9	64.0	115.3
0.8	2	5.1	50.3	42.4	130.6	99.3	161.0	122.9	41.4	88.1	212.3	90.7	67.1	153.2	64.8	106.4	282.2	250.2	420.6
	4	4.3	45.0	42.4	118.9	78.2	147.6	101.3	38.4	82.3	241.8	99.8	95.0	176.3	82.0	135.1	248.9	213.1	248.4
	8	5.1	46.7	46.7	140.7	79.2	141.5	133.1	40.9	85.9	265.2	84.8	184.7	237.5	100.8	157.2	235.2	227.8	195.1
2.0	2	8.4	68.6	46.0	128.8	124.0	362.5	314.5	82.6	176.8	449.6	139.2	576.3	470.2	138.9	336.6	483.6	541.3	394.0
	4	4.6	69.9	49.3	163.1	119.9	356.4	146.3	64.8	145.0	709.4	127.3	606.8	640.3	160.5	327.4	541.5	421.4	310.9
	8	4.3	78.2	62.2	216.7	95.5	331.5	166.6	64.5	161.8	1023.9	123.2	303.3	1060.2	173.5	302.8	607.1	362.2	267.7

표 8 CSM과 NRHA의 오차비교 (%)

T <sub>1</sub>	μ	SD						LD						FD						평균절대 오차	
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18		
0.3	2	*	26.7	*	-56.8	**	23.7	*	*	**	*	*	14.2	*	*	40.5	*	-31.4	**	32.2	34.1
	4	45.3	18.4	0.5	-74.7	10.7	-107.7	37.6	25.5	-38.4	-34.5	21.3	17.8	61.3	-14.2	-83.9	-55.3	-47.3	-33.3	40.4	
	8	28.1	21.8	17.9	-55.4	-16.4	-85.1	33.1	-6.2	-17.9	-17.6	25.6	18.7	-10.4	1.8	-75.7	-46.9	-17.8	-38.9	29.7	
0.8	2	**	25.5	16.6	27.0	*	*	*	44.5	*	*	51.7	-162.0	19.6	6.0	**	22.5	*	*	41.7	28.1
	4	17.5	5.5	17.3	25.5	-14.9	34.3	-3.3	22.3	29.8	44.5	26.8	-125.7	-21.2	8.8	16.4	8.6	24.3	11.3	25.4	
	8	1.9	-12.9	-10.7	31.3	-36.6	6.7	-1.4	-23.7	7.2	15.1	15.2	-81.4	-16.1	9.9	-3.6	-19.8	13.7	1.9	17.2	
2.0	2	-3.0	2.3	-7.7	47.2	16.7	*	*	29.4	19.3	**	21.8	36.5	-15.4	28.5	30.6	23.9	*	32.3	22.5	19.8
	4	-6.2	-10.9	-1.1	24.0	-0.9	-13.6	14.1	10.7	-10.1	1.9	32.6	30.3	-26.5	25.4	31.9	24.4	-8.4	17.7	16.1	
	8	-26.8	-12.8	17.9	18.7	-15.9	-28.3	-15.9	-7.2	10.8	-90.2	14.4	12.5	-5.4	-4.9	22.0	28.5	-29.9	14.1	20.9	
평균절대 오차	18.4	15.2	11.2	40.1	16.0	42.8	17.6	21.2	19.1	34.0	26.2	55.4	22.0	12.4	38.1	28.7	24.7	21.4	27.4		
		23.9						28.9						24.5							

\* : 수렴하는 해를 구할 수 없는 경우

\*\* : 발산하는 경우

표 9 NCSM과 NRHA의 오차비교 (%)

T <sub>1</sub>	μ	SD						LD						FD						평균절대 오차	
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18		
0.3	2	45.5	10.8	11.0	31.1	9.1	-18.5	16.4	-19.5	1.9	-4.1	12.8	29.0	13.0	9.6	26.6	19.9	9.9	32.0	17.8	31.2
	4	25.3	4.7	25.4	60.0	30.8	42.4	26.3	34.0	31.7	27.8	37.6	42.7	36.5	19.5	20.5	41.1	21.3	49.3	32.0	
	8	-4.4	20.0	52.0	64.9	38.9	57.6	36.6	52.1	47.3	42.1	41.4	54.3	34.1	49.8	29.9	57.4	46.6	59.7	43.8	
0.8	2	12.0	27.2	2.1	5.1	29.5	-6.4	3.1	-9.6	-1.6	-6.5	7.3	45.8	-17.5	5.8	9.4	19.7	23.2	5.3	13.2	19.9
	4	37.6	23.3	9.6	24.3	25.2	34.0	-4.9	11.4	12.3	20.3	23.1	60.2	-13.3	18.9	19.2	-3.3	0.1	-26.4	20.4	
	8	11.5	1.1	25.2	32.3	-9.7	30.8	39.3	29.9	28.2	29.0	25.1	71.4	25.2	24.0	23.5	-22.5	21.6	17.4	26.0	
2.0	2	-48.7	-15.4	-18.7	40.9	-3.5	7.5	-8.1	-16.2	34.4	-0.7	-6.1	34.3	13.4	9.8	22.3	10.0	26.8	9.4	18.1	18.2
	4	5.1	5.0	-30.1	30.8	-45.9	-39.9	23.2	-8.9	8.3	22.6	15.7	26.1	22.0	4.4	33.6	5.7	-18.3	-4.8	19.5	
	8	-1.4	10.6	3.6	25.6	-47.2	-0.7	9.2	2.2	28.1	43.5	-3.5	3.8	40.2	3.5	20.0	11.6	-26.1	23.9	16.9	
평균절대 오차	21.3	13.1	19.7	35.0	26.6	26.4	18.6	20.4	21.5	21.8	19.2	40.8	23.9	16.2	22.8	21.3	21.5	25.3	23.1		
		23.7						23.7						21.8							

표 10 NDSM과 NRHA의 오차비교 (%)

T <sub>1</sub>	μ	SD						LD						FD						평균절대 오차	
		EQ1	EQ2	EQ3	EQ4	EQ5	EQ6	EQ7	EQ8	EQ9	EQ10	EQ11	EQ12	EQ13	EQ14	EQ15	EQ16	EQ17	EQ18		
0.3	2	24.3	8.6	0.6	34.2	-32.2	-19.2	19.5	-12.9	-6.0	-19.8	-18.4	-26.5	-7.8	38.2	2.6	0.5	-9.6	18.6	16.6	12.0
	4	-2.1	-1.2	4.6	24.7	-13.4	22.1	13.8	19.4	5.7	-3.2	1.2	-2.5	26.8	3.1	-0.6	22.2	3.9	14.3	10.3	
	8	-19.1	1.0	8.9	14.3	-6.2	7.0	18.0	-6.3	9.9	-3.3	3.6	-15.5	2.3	8.9	-14.0	8.4	9.3	5.3	9.0	
0.8	2	17.5	19.6	-26.3	9.2	-8.8	-7.7	3.5	13.3	-17.5	1.9	0.5	34.1	-15.0	-8.7	-2.3	7.4	5.5	-1.3	11.1	11.7
	4	33.1	11.6	-18.9	5.5	-20.5	10.6	-1.8	8.4	-2.5	-3.2	-5.9	40.9	-21.6	-6.5	-4.9	1.2	1.4	-7.8	11.5	
	8	11.6	-10.3	-21.3	13.1	-38.5	7.4	-4.5	12.2	7.7	0.7	5.4	28.3	-10.0	-4.9	-4.1	-12.3	11.1	23.5	12.6	
2.0	2	-34.9	-21.3	-2.4	36.2	-1.0	-13.6	-28.9	-2.3	14.2	0.7	-6.6	25.9	0.0	10.9	-8.9	-2.6	13.5	17.3	13.4	13.6
	4	7.9	-10.7	-2.9	10.3	-32.9	-51.0	20.7	-3.5	10.2	-30.9	14.6	3.6	-4.2	4.0	-5.5	-7.5	-14.7	11.1	13.7	
	8	-2.0	-8.9	-7.8	-1.1	-33.9	-27.6	-6.6	-11.1	22.3	-14.0	-0.1	30.8	-11.1	-5.2	-8.6	-7.2	-26.2	21.4	13.7	
평균절대 오차	16.9	10.4	10.4	16.5	20.8	18.5	13.0	9.9	10.7	8.6	6.3	23.1	11.0	10.1	5.7	7.7	10.6	13.4	12.4		
		15.6						11.9						9.7							

#### 4. 결 론

구조물의 비선형 내진성능평가를 위한 해석법 가운데 가장 정확한 방법은 비선형 시각이력해석법(NRHA)이지만 실용적으로 사용하기에는 복잡하기 때문에, 정확성과 실용성의 측면에서 약산적인 방법들이 요구된다. 다양한 약산적 해석법들 중에서도 대표적 방법으로 능력스펙트럼법(CSM)은 개념적으로 간단하나 반복과정이 요구되며, 응답이 부정확한 경우가 많다. 이를 보완하기 위한 비선형 능력스펙트럼법

(NCSM)은 선형의 경우보다 계산과정이 간단하나 아직도 다소의 연산과정이 뒤따른다. 따라서 본 연구에서는 정확성과 실용성을 개선하기 위해 제시된 비선형 직접스펙트럼법(NDSM)을 중심으로, 다양한 구조물과 여러 가지 지진을 통하여, 여타 약산법들과의 사용성과 신뢰성을 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비선형 직접스펙트럼법은 pushover곡선과 비선형 응답스펙트럼으로부터 별도의 계산과정 없이 비선형 응답을 직

- 접 구할 수 있으므로 실용적인 방법으로 사료된다.
- 2) 선형 능력스펙트럼법에 의한 약산응답들은 수렴하는 해를 구하지 못하거나 발산하는 경우가 발생하며 수렴하더라도 큰 오차가 발생하는 경우가 있으며, 지진별로 오차의 편차가 크다.
  - 3) 비선형 능력스펙트럼법은 능력스펙트럼법보다 계산량이 크게 줄어들고, 어떤 경우에서도 해는 구해지나 요구곡선의 특성으로 정확한 해를 구하기 어려울 수도 있다. 그리고 전반적으로 큰 오차가 발생한다.
  - 4) 비선형 직접스펙트럼법의 응답은 대체적으로 비선형 시각이력해석의 응답보다 크게 산정되는 것으로 나타났다.
  - 5) 응답오차에 대한 분석결과, 능력스펙트럼법과 비선형 능력스펙트럼법은 약 18~34% 정도의 평균절대오차가 발생하나, 비선형 직접스펙트럼법은 평균절대오차가 약 12% 정도로서 상대적으로 신뢰성이 높은 것으로 나타난다. 이것은 반복적 수렴작업 없이 pushover곡선과 스펙트럼으로부터 직접적으로 해를 구하는 비선형 직접스펙트럼법 자체의 알고리즘에 의한 것으로 판단된다.

본 연구 결과는 전단형 건물에 제한된 경우로서 좀 더 일반화된 결과를 위해서는, 차후의 연구에서 실제구조물의 다양한 층수(고층, 저층), 구조형식(라멘조, 전단벽조, 이중골조, 복합구조 등), 진동주기(단주기, 장주기), 연성도(고연성, 저연성)등에 대한 구체적 검토가 필요할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

“이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.” (KRF-2004-002-D00427)

### 사용 기호

- 본 논문에서 사용된 기호는 다음과 같다.
- $A$  ; 기본모드의 유사가속도(pseudo acceleration)
  - $A_y$  ; 항복변위  $D_y$  에 대응하는 유사가속도
  - $D$  ; 기본모드의 최대변위(peak deformation)
  - $D_y$  ; 기본모드의 항복변위(yield deformation)
  - $M_1^*$  ; 기본모드의 유효질량
  - $N$  ; 구조물의 전체 자유도수
  - $N_e$  ; 지진기록수
  - $T_1$  ; 기본진동주기
  - $U_N$  ; 최상층변위
  - $U_{N,NRHA}$  ; NRHA에 의한 최상층 최대변위 ( $=|U_N(t)|_{\max}$ )
  - $U_{N,약산법}$  ; 각 약산법에 의한 최상층 최대변위
  - $V_b$  ; 밀면전단력
  - $a_m$  ; 질량행렬  $m$ 에 비례하는 감쇠계수
  - $a_0$  ; 초기강성  $k_0$ 에 비례하는 감쇠계수
  - $c$  ; 구조물의 감쇠행렬( $N \times N$ )
  - $e_n$  ;  $n$ 번째 지진해석결과의 오차

- $f_s$  ; 저항력 벡터( $N \times 1$ )
- $k_0$  ; 구조물의 초기강성( $N \times N$ )
- $m$  ; 구조물의 질량행렬( $N \times N$ )
- $p(t)$  ; 외력( $= -\ddot{u}_g(t)$ )
- $s$  ; 공간분포벡터( $= m t$ )
- $s_1^*$  ; 기본모드의 공간분포벡터( $= m \phi_1$ )
- $\ddot{u}_g(t)$  ; 지반가속도
- $u$  ; 변위벡터
- $\dot{u}$  ; 속도벡터
- $\ddot{u}$  ; 가속도벡터
- $\Gamma_1$  ; 기본모드의 참여계수
- $\beta$  ; 항복후강성계수(post-yielding stiffness ratio)
- $\zeta$  ; 선형계의 감쇠비
- $v$  ; 영향벡터
- $\mu$  ; 연성계수(ductility)
- $\phi_M$  ; 기본모드의 최상층요소
- $\phi_1$  ; 기본모드에 대한 모드벡터
- $\omega_1$  ; 1차모드의 진동수
- $\omega_2$  ; 2차모드의 진동수

### 참고 문헌

1. Fajfar, P., "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra," *Earthquake engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 979-993.
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. 박진화, 강병두, 노필성, 김제웅, "지진응답평가를 위한 비선형 약산법의 오차해석", 대한건축학회 부산경남지회 학술발표대회논문집, 제9권, 제1호(통권 제9집), 2002. 11, pp. 241-246.
4. Chopra, A. K. and Goel, R. 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, 67pp.
5. Applied Technology Council, "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings," *Report ATC-40*. November, 1996, 319pp.
6. FEMA, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," *Report No. FEMA-273*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., May 1997, 439pp.
7. SEAOC, "Performance Based Seismic Engineering of Buildings," *SEAOC Vision 2000 Committee*, Volume 1, Sacramento, California, 1995, 298pp.

8. Bommer, J. J. and Elnashai, A. S., "Displacement spectra for seismic design," *J. Earthquake Engng.*, 3, 1999, pp. 1-32.
9. 강병두, 김재웅, "내진성능평가를 위한 비선형 직접스펙트럼법의 특성", 한국지진공학회 논문집, 제6권, 제4호, 2002. 8, pp. 65-73.
10. 강병두, 김재웅, "복합구조물에 대한 비선형 직접스펙트럼법의 신뢰성", 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제2호, 2003. 4, pp. 75-84.
11. 김재웅, 강병두, "진단형건물의 비선형 지진응답산정을 위한 직접스펙트럼법 평가", 대한건축학회 논문집, 제19권, 제9호, 2003. 9, pp. 51-58.
12. FEMA, "Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings-Technical resources," *Report No. FEMA-307*, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1998, 254pp.
13. Mehmet Inel, Erich M. Bretz, Edgar F. Black, Mark A. Aschheim and Daniel P. Abrams, *USEE 2001 : Utility Software for earthquake engineering report and user's manual*, Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Campaign, Urbana, Illinois, October, 2001, 88pp.
14. Li, Kang-Ning, *CANNY 99, 3-dimensional nonlinear static/dynamic structural analysis computer program-users manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, 215pp.
15. 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, 237pp.
16. 강병두, 박진화, 노필성, 김재웅, "항복후강성계수 변화에 따른 비선형 직접스펙트럼법의 응용", 대한건축학회 부산경남지회 학술발표대회논문집, 제9권, 제1호(통권 제9집), 2002. 11, pp. 229-234.
17. Chopra, A. K., *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall: New Jersey, 2001, 844pp.