

# 철골 모멘트 골조의 지진해석을 위한 등가 단자유도시스템

## Equivalent SDF Systems Representing Steel Moment Resisting Frames

한상환<sup>1)</sup> · 문기훈<sup>2)</sup> · 김진선<sup>3)</sup>

Han, Sang-Whan · Moon, Ki-Hoon · Kim, Jin-Seon

**국문 요약** >> 다자유도 시스템의 내진 성능을 평가하기 위해서는 반복적인 비선형 시간 이력 해석이 필요하며 이를 위해 많은 계산과정과 노력이 필요하다. 이와 같이 해석에 따르는 어려움을 보완하기 위해 복잡한 다자유도 시스템을 반영할 수 있는 등가 단자유도 시스템을 개발하였다. 등가 단자유도의 이력 모델로는 일반적으로 이선형 모델과 삼선형 모델이 사용된다. 이러한 모델은 탄성 거동 이후 음강성을 가질 수 있도록 하여 지진 발생 시 중력하중에 의한 발생되는 효과를 반영하기 위해서이다. 본 연구에서는 철골모멘트 골조의 실제 응답을 예측하기 위하여 이러한 이력 모델들로 거동하는 등가단자유도 시스템의 필요조건에 대하여 평가하였다. 이를 위해 본 연구에서는 로스엔젤레스 지역의 SAC 9층 모멘트 저항 골조를 비선형 다자유도 시스템과 등가단자유도 시스템으로 모델링하여 반복하중 푸쉬오버 해석, 비선형 시간 이력해석 및 IDA(Incremental Dynamic Analysis)를 수행하여 비교 검토하였다. 또한 본 연구에서는 강도저감 모델에 대해서도 평가를 수행하였다.

**주요어** 등가단자유도 시스템, 이력모델, 이선형, 삼선형, 강도한계, 철골모멘트저항골조

**ABSTRACT** >> To evaluate the seismic performance of multi-degree of freedom(MDF) systems, repeated nonlinear response history analyses are often conducted, which require extensive computational efforts. To reduce the amount of computation required, equivalent single degree of freedom(SDF) systems representing complex multi-degree of freedom(MDF) systems have been developed. For the equivalent SDF systems, bilinear models and trilinear models have been most commonly used. In these models, the  $P-\Delta$  effect due to gravity loads during earthquakes can be accounted for by assigning negative stiffness after elastic range. This study evaluates the adequacy of equivalent SDF systems having these hysteretic models to predict the actual response of steel moment resisting frames(SMRF). For this purpose, this study conducts cyclic pushover analysis, nonlinear time history analysis and incremental dynamic analysis(IDA) for SAC-Los Angeles 9-story buildings using nonlinear MDF models(exact) and equivalent SDF models(approximate). In addition, this study considers the strength limited model.

**Key words** equivalent single degree of freedom, hysteretic model, bilinear model, trilinear model, strength limit, steel moment resisting frames

### 1. 서론

구조물의 정확한 내진성능평가를 수행하기 위해서는 지진으로 인한 구조물에 발생하는 요구하중과 구조물의 보유능력을 정확히 결정되어야 한다. 최근, 보다 정확한 구조물의 보유능력을 측정하기 위하여 IDA(Incremental Dynamic Analysis)<sup>1)</sup>와 같은 방법이 개발된 바 있다. 특히 IDA에서는 복잡한 다

자유도 구조물의 반복적인 비선형 시간이력해석(Nonlinear Response History Analysis; Nonlinear RHA)을 요구되는데 이는 지진가속도를 구조물의 탄성범위부터 붕괴에 이를 때까지 지진가속도를 다양한 크기로 조정하여 여러 개의 지진가속도에 대해 이와 같은 시간이력해석을 반복 수행하여야 한다.

이에 따라 다자유도 구조물의 비탄성 시간이력해석(Nonlinear RHA)을 통하여 IDA를 수행할 경우 매우 많은 계산이 요구되기 때문에 다자유도 구조물의 비탄성 시간이력해석을 피하고 내진성능평가를 하기 위하여 등가단자유도 시스템을 이용하는 방법이 개발되고 있다.<sup>2-4)</sup> 대부분의 등가단자유도 시스템의 경우 탄소성모델이나 삼선형 모델을 주로 사용한다.<sup>2-4)</sup> 이 모델들은 중력에 의한  $P-\Delta$ 의 영향이 큰 경우 음강성을 적용할 수 있다.

<sup>1)</sup> 정희원·한양대학교 건축공학부 정교수

(대표저자: swhan@hanyang.ac.kr)

<sup>2)</sup> 한양대학교 건축공학부 석박사과정

<sup>3)</sup> 한양대학교 건축공학부 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 10. 31 / 수정일 1차 : 2008. 6. 5, 2차 : 2008. 6. 10 / 게재확정일 : 2008. 6. 10)

본 연구에서는 철골모멘트골조의 내진성능평가를 위하여 등가단자유도 구조물에서 사용하는 이선형 모델이나 삼선형 모델의 정확도를 평가하기 위하여 SAC-LA 9층 건물을 대상으로 비교 검토하였다. 각 모델의 검증을 위하여 반복 하중 푸쉬오버 곡선(Pushover Curve), 변위시간이력, 그리고 IDA곡선을 다자유도 구조물의 비탄성 정적해석 및 시간이력해석을 이용하여 구하고, 이선형과 삼선형을 갖는 등가단자유도 구조물의 비탄성 정적해석 및 시간이력해석 이용하여 구한 후 서로 비교 검토하였다. 또한, 본 연구에서는 강도 제한 이력모델(Strength Limited Model)<sup>(6)</sup>도 철골 모멘트저항골조 해석을 위한 등가단자유도 시스템의 이력모델로 고려하였다.

## 2. 등가 단자유도시스템

등가단자유도 시스템은 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method: CSM)<sup>(2)</sup>이나 변위계수법<sup>(3)</sup>에서 사용되고 있다. 또한 모드푸쉬오버해석(Modal Pushover Analysis: MPA)<sup>(5)</sup>에서도 소개되고 있고, CSM을 변형한 N2법<sup>(4)</sup>에도 사용된 바 있다. 구조물의 1차모드를 이용하여 다자유도 시스템을 단자유도로 치환하는 방법은 모두 유사하다. 본 연구에서 사용한 등가단자유도 시스템은 다음과 같은 절차를 통하여 구축된다.

우선, 대칭평면을 갖는 다자유도 시스템에 지진가속도  $\ddot{u}_g(t)$ 가 한 방향으로 작용할 때 운동방정식은 다음과 같다.

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

여기서  $\mathbf{u}$ 는 지반 가속도에 의한 각 층에서의 상대 횡 변위를 나타내는 벡터이고,  $\mathbf{m}$ 과  $\mathbf{c}$ 는 질량과 감쇠계수 매트릭스이고,  $\mathbf{f}_s(\mathbf{u}, \text{sign } \dot{u})$ 는 횡력과 횡변위의 관계를 나타내는 비선형복원력이다. 영향벡터(Influence Vector)  $\mathbf{I}$ 의 모든 요소는 1이다.

이러한 다자유도 시스템을 등가단자유도로 치환하기 위하여 먼저 다자유도 시스템의 초기강성만 고려한 탄성시스템에 대하여 고유치 해석을 수행하여 기본주기( $T_1$ )와 상응하는 모드형상( $\phi_1$ )을 결정한다.

등가단자유도시스템의 이력곡선을 결정하기 위하여 다음과 같은 횡력 분포( $s_1$ )로 다자유도 시스템을 푸쉬오버 해석한다.<sup>(5)</sup>

$$s_1 = \mathbf{m}\phi_1 \quad (2)$$

푸쉬오버 해석을 통하여 밀면 전단력과 지붕층 변위의 관

계를 나타내는 곡선을 작성한다. 이 곡선을 등가단자유도 시스템의 밀면전단력( $F_{s1}/L_1$ )과 변위( $D_1$ )에 대한 곡선으로 만들기 위하여, 식 (3)과 식 (4)를 사용한다.

$$\frac{F_{s1}}{L_1} = \frac{V_{b1}}{M_1^*} \quad (3)$$

$$D_1 = \frac{u_{r1}}{\Gamma_1\phi_{r1}} \quad (4)$$

여기서,  $M_1^* = L_1\Gamma_1$ ,  $L_1 = M_1\Gamma_1$ ,  $\Gamma_1 = \frac{\phi_1^T \mathbf{m} \mathbf{I}}{\phi_1^T \mathbf{m} \phi_1}$

위의 변환을 통하여 식 (5)와 같은 등가단자유도 시스템의 운동방정식을 만들 수 있다.

$$\ddot{D}_1 + 2\zeta_1\omega_1\dot{D}_1 + \frac{V_1}{\Gamma_1L_1} = -\ddot{u}_g(t) \quad (5)$$

이 운동방정식을 주어진 지진에 대하여 해석을 수행하면 변위  $D_1(t)$ 를 얻을 수 있고 이는 식 (6)을 통하여 다시 다자유도 시스템의 지붕층 변위로 변환할 수 있다.

$$u_{r1} = \Gamma_1\phi_{r1}D_1(t) \quad (6)$$

이러한 방법은 비탄성 다자유도 시스템의 시간이력해석을 피하고 단순히 비탄성 등가단자유도 시스템의 시간이력 해석을 이용하므로 매우 효율적이라 할 수 있다.

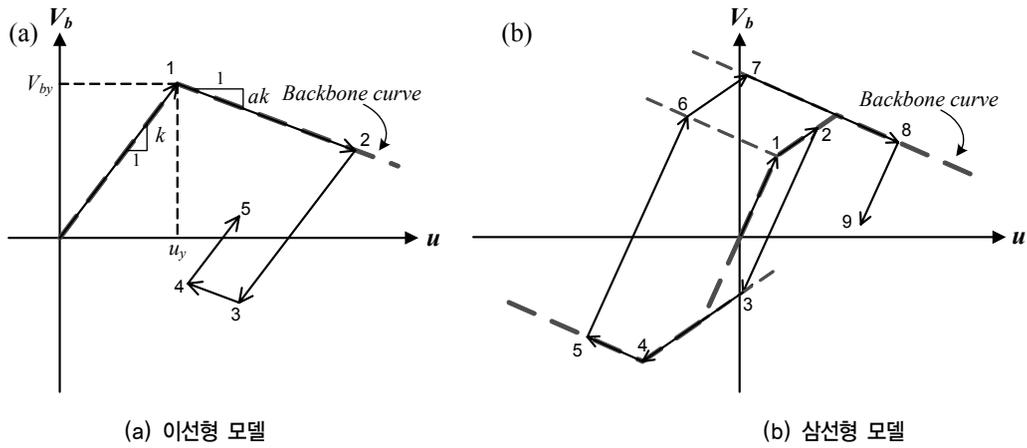
## 3. 등가 단자유도시스템의 이력모델

일반적으로 철골모멘트골조를 등가단자유도를 이용하여 해석할 경우 이선형모델이나 삼선형 모델을 사용하였다.<sup>(1-6)</sup> 이 모델들은 중력하중의 영향이 큰 경우  $P-\Delta$  효과를 음강성으로 표현할 수 있다. 또한 이 모델들은 많은 기존 소프트웨어에 탑재되어 있어 철골모멘트 골조가 아닌 경우에도 많이 사용되어 왔다.

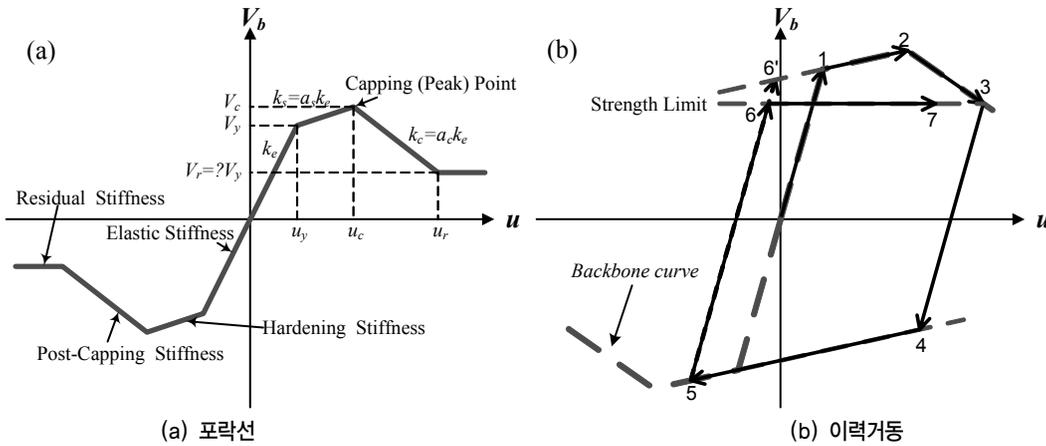
본 연구에서는 이선형모델과 삼선형 모델을 이용한 등가단자유도 시스템의 타당성을 평가하고자 한다. 또한 본 연구에서는 강도한계 모델의 적용성도 검토한다.

이선형 모델은 그림 1(a)와 같이 탄성강성( $k$ )과 후탄성 강성( $\alpha k$ )로 결정된다. 후탄성 강성은 0이나 음수가 될 수도 있다. 삼선형 모델은 세 개의 직선으로 세 개의 다른 강성을 표현할 수 있다. 그림 1(b)에는 삼선형 모델의 백본 곡선 및 이력 거동을 나타낸다.

강도한계모델<sup>(6)</sup>은 그림 2에 나타나 있다. 그림 2(a)에 나타난 초기 하중에 대한 처음 두 개의 직선은 탄성강성  $k_e$ , 항복



〈그림 1〉 이선형 모델과 삼선형 모델의 이력 거동



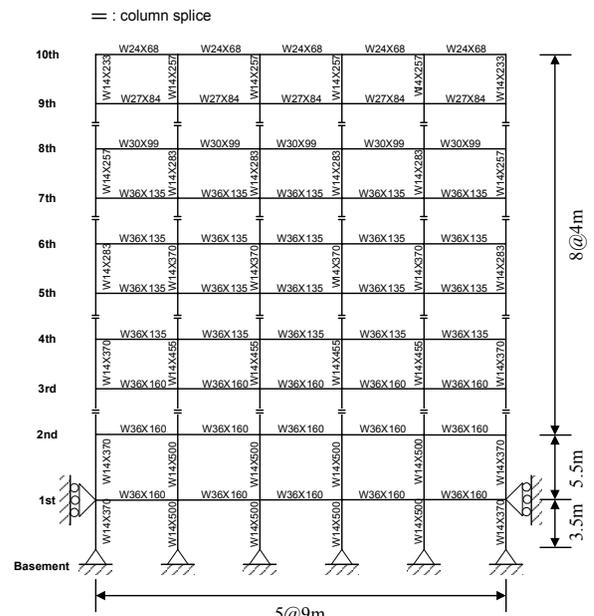
〈그림 2〉 강도한계 모델

강도  $V_y$ , 변형경화강성  $\alpha_s k_e$  로 표현된다. 감소구간(Softening Range)의 직선에 대하여는 강성  $\alpha_s k_e$ , 최대강도  $V_c$ 와  $V_c$ 에 상응하는 변위  $u_c$ 로 표현된다. 그림 2(b)에 보이는 것처럼 강도한계모델은 그림 2(a)에 보이는 포락선을 따라 이력곡선이 생성된다. 하지만 이 모델 (그림 2(b))에서는 그림 2(a)에서 보이는 포락선 이외에도 강도 한계 값(Strength Limit)이 적용된다. 예를 들면, 그림 2(b)에서 점 5에서 점 6'으로 가는 것이 아니라 강도한계로 인하여 점 6으로 간 후에 점 3을 향하여 가게 된다. 만약 강도한계를 정하지 않는다면 사이클이 경과하면 강도가 이선형이나 삼선형과 같이 계속 증가하게 된다.

모든 모델의 포락선 및 각 모델을 결정하는 변수는  $s_1$ 으로 MDF시스템을 푸쉬오버해석 하여 얻은 밀면전단력과 지붕층변위를 등가단자유도 시스템의 밀면전단력과 횡변위로 치환하여 얻은 곡선에 가까워지도록 결정한다.

#### 4. 대상골조의 선정 및 다자유도 시스템 해석모델

철골모멘트골조의 등가단자유도 시스템과 이력모델을 결



〈그림 3〉 대상 9층 건물 입면 및 사용한 부재 크기

정하기 위하여 대상 구조물을 SAC LA 9층 건물을 선정하였다. 이 건물은 평면대칭구조물이며 구조시스템은 특별모멘트저항 골조(Special Moment Resistance Steel Frame:

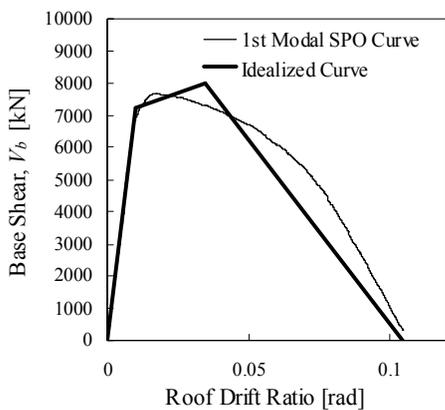
SMRSF)이다. 그림 3에는 대상골조와 선택한 부재가 나타나 있다. 층고는 1층이 5.5m이고 나머지 층들의 층고는 4m이다. 경간은 9.2m이다.

이 구조물의 지진에 대한 해석을 위하여 접합부는 M1 모델을 사용한다.<sup>(11)</sup> 각 부재는 기본적인 중심선 모델을 사용하였으며, 이 모델에서는 패널 존과 보의 기둥접합부의 소성 힌지를 후탄성강성이 탄성강성의 3%인 스프링을 이용한다. 중력하중 영향으로 인한  $P-\Delta$  효과는 강성이 매우 큰 가상의 더미칼럼을 본 구조물에 핀으로 연결하여 중력하중을 작용시켜 고려한다. M1 모델을 이용하여 MDF 시스템을 모델링하여 해석한 결과를 정해(Exact Solution)라고 가정하고 등가단자유도 시스템을 이용하여 얻은 결과(Approximate Solution)와 비교한다. SAC LA 9층 건물의 기본 진동 주기는 2.34초이다. 식 (1)에 있는 감쇠계수 매트릭스  $c$ 는  $a_0m + a_1k$ 가 되도록 결정하였다. 여기서  $k$ 는 구조물의 탄성강성 매트릭스이고  $a_0$ 와  $a_1$ 은 두 개의 주기에 대하여 정한 감쇠비를 가지고 결정한다.  $a_0$ 와  $a_1$ 을 결정하기 위하여 1차와 5차 모드의 감쇠비를 2%로 가정한다.

### 5. 등가단자유도 시스템의 이력모델 평가

#### (1) 반복하중 푸쉬오버(Cyclic Pushover)

본 연구에서는 철골 모멘트 골조해석을 위한 등가단자유도 시스템의 이력모델의 정확성을 평가하기 위하여, 반복하중 푸쉬오버(Cyclic Pushover)해석을 수행하였다. 우선  $s_1$ 으로 다자유도 시스템을 푸쉬오버 해석한 곡선을 가지고 삼선형 이상화 모델의 각 부분별 강성을 결정하였다(그림 4). 또한 강도한계모델에서도 삼선형 백본을 사용하므로 동일한 강성을 사용하였다. 이선형은 삼선형보다 응답 결과의 정확도가 떨어지는 것으로 나타나 본 연구에서는 비교에



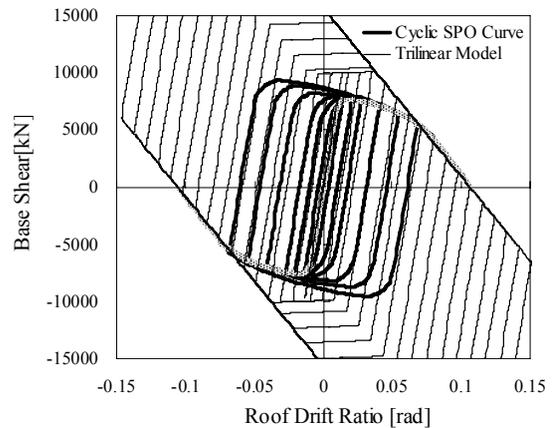
〈그림 4〉 대상 9층 건물 푸쉬오버 곡선(Pushover Curve) 및 이상화 곡선(Idealized Curve)

포함하지 않는다. 기존의 푸쉬오버는 그림 4에 있는 것과 같이 한방향으로만 수행하여 곡선을 만드는데 반하여 본 연구에서는 하중이 반복적으로 가해지면서 강도나 강성감소를 평가하기 위하여 반복하중 푸쉬오버 해석을 수행하였다.

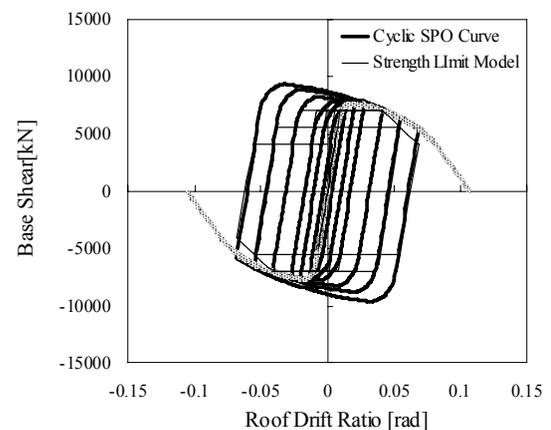
그림 5(a)에는 삼선형과 강도감소모델을 이용한 등가 단자유도 시스템을 이용한 반복하중 푸쉬오버 곡선이 다자유도 시스템의 반복하중 푸쉬오버 해석을 통하여 얻은 이력곡선과 같이 나타나 있다. 이 그림에서 나타난 것처럼 삼선형 모델을 이용한 결과는  $P-\Delta$ 의 영향으로 다자유도 시스템의 반복하중 푸쉬오버곡선에 대하여 크게 왜곡된 것으로 나타났다. 다자유도 반복하중 푸쉬오버(Cyclic SPO)는 강도가 일정 값 이상을 양이든 음이든 넘지 않는 것으로 나타났다. 강도한계모델은 이러한 현상을 잘 반영하는 것으로 나타났다(그림 5(b)).

#### (2) 비선형 시간이력해석(Nonlinear RHA)

그림 6은 Northridge, 1994-LA, Hollywood Storage FF (N94-HSFF) 지진기록<sup>(7)</sup>에 대한 다자유도 시스템과 등가

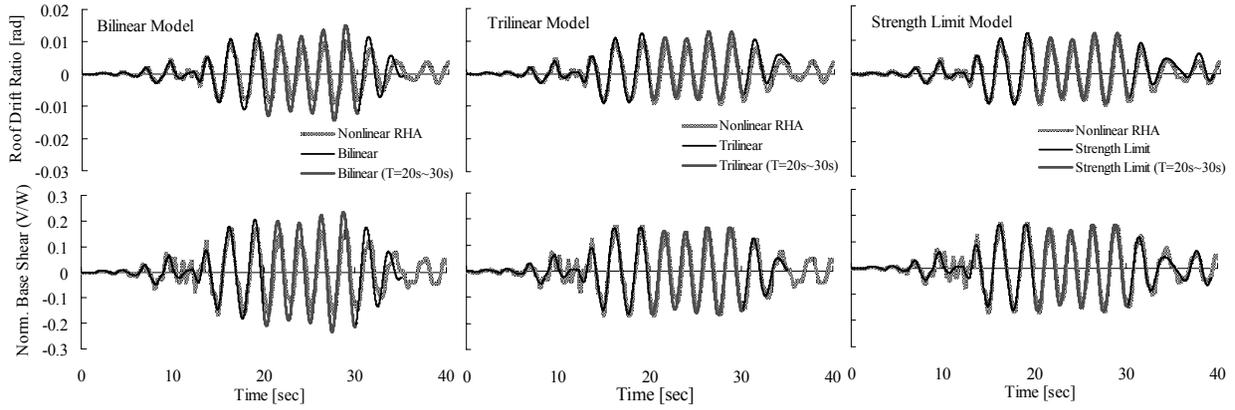


(a) 삼선형 모델

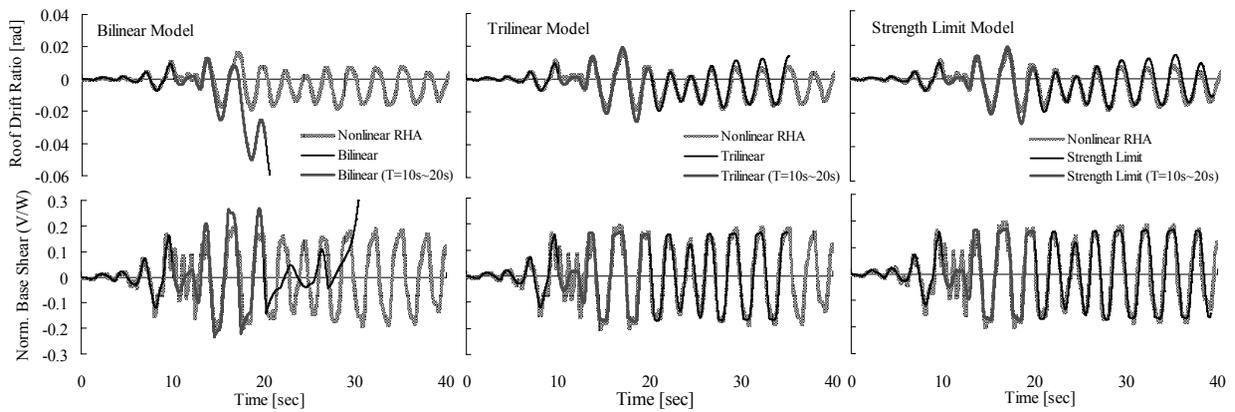


(b) 강도한계감소 모델

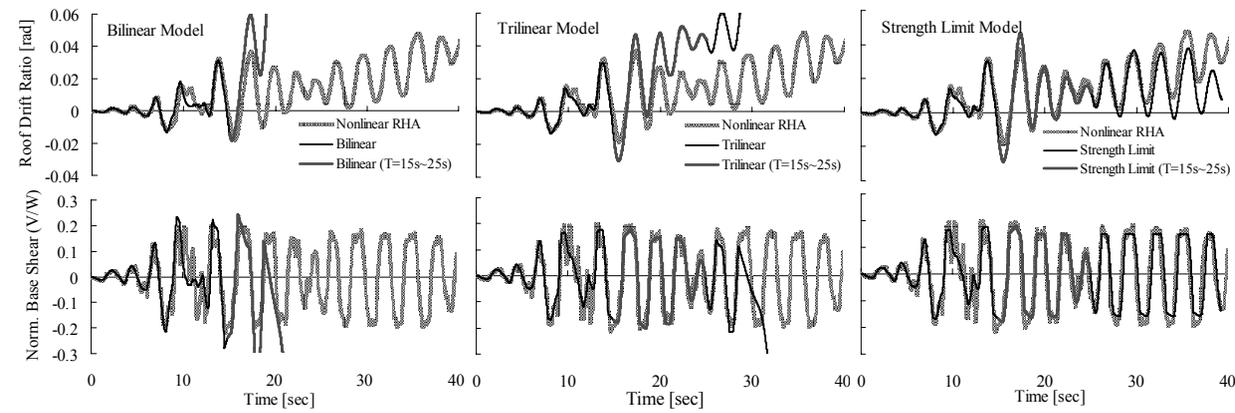
〈그림 5〉 반복하중 푸쉬오버 곡선



(a) Excitation: N94-HSFF  $A(T_1, 5\%) = 0.20g$



(b) Excitation: N94-HSFF  $A(T_1, 5\%) = 0.50g$



(c) Excitation: N94-HSFF  $A(T_1, 5\%) = 0.90g$

〈그림 6〉 N94-HSFF 지반 가속도[(a)  $A(T_1, 5\%)=0.2g$ , (b)  $A(T_1, 5\%)=0.5g$ , (c)  $A(T_1, 5\%)=0.9g$ ]에 따른 9층 골조의 다자유도 시스템과 등가 단자유도 시스템의 지붕층 변위비 및 밀면 전단력 시간이력곡선

단자유도 시스템의 비탄성 시간이력 해석을 수행하여 얻은 지붕층 변위비이력곡선( $\theta_{roof}$ ) 및 정규화된 밀면 전단력( $V/W$ ) 이력곡선을 비교한 것이다. 등가 단자유도 시스템은 이선형, 삼선형, 강도한계 이력모델을 갖는 것으로 각각에 대하여 해석을 수행하였다. 지진의 크기는 9층 골조 1차모드 주기와 5% 감쇠비를 갖는 단자유도 응답 가속도값 [ $A(T_1, 5\%)$ ] 이 0.2g, 0.5g 그리고 0.9g로 조정하여 동일한 비선형 동적

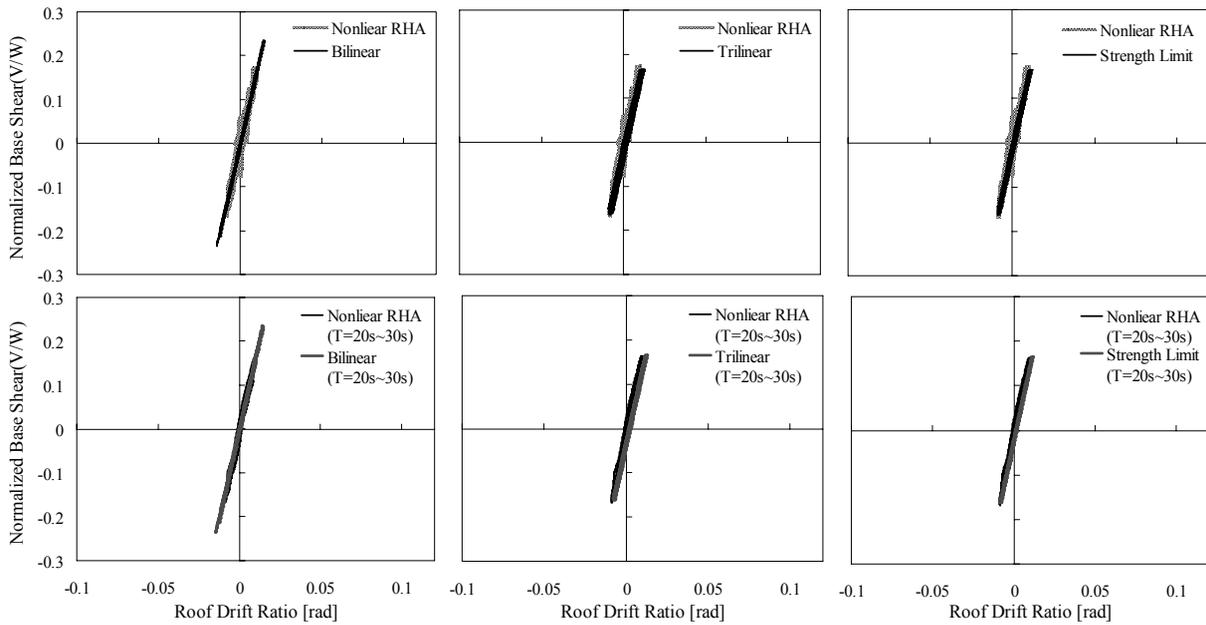
해석을 수행하였다.

그림 6(a)에서 보는 것처럼 세 모델 모두 N94-HSFF 지진기록에 대하여는 다자유도 시스템을 이용하여 비선형 시간이력해석을 한 결과와 유사한 것으로 나타났다. 이는 작은 크기를 갖는 지진기록에 대하여 구조물이 탄성거동을 한 결과이다. 하지만 N94-HSFF 지진기록을  $A(T_1, 5\%)=0.5g$ 로 증가하여 해석을 수행한 결과, 이선형 모델은 한쪽으로

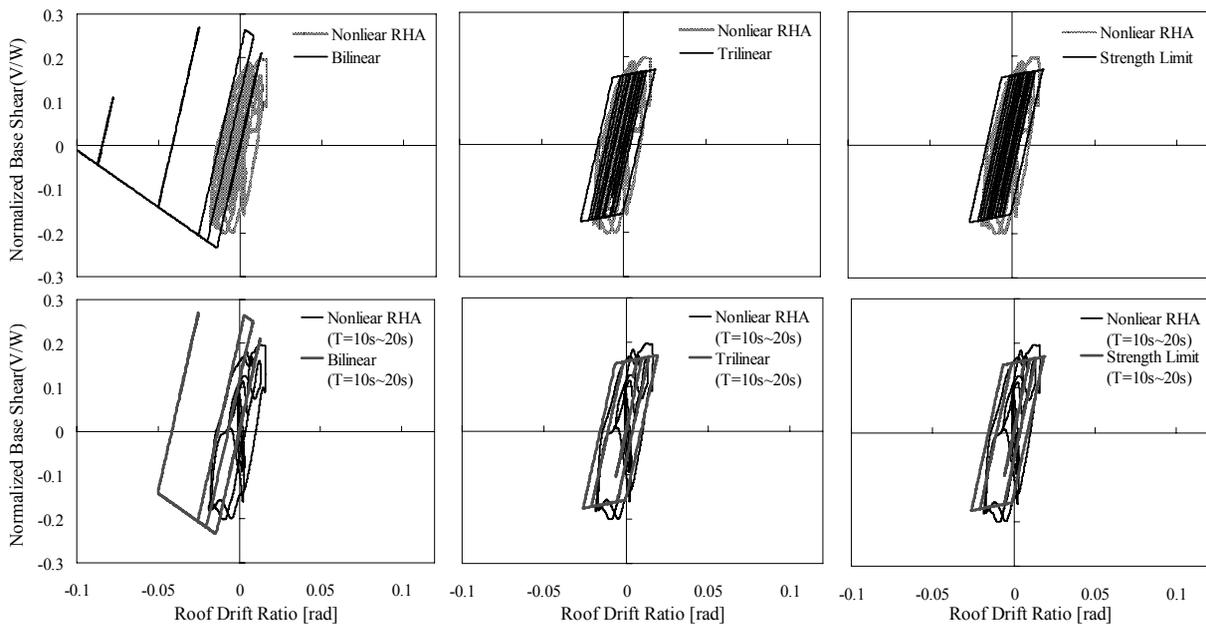
치우치는 현상이 크게 발생하였다. 하지만 삼선형 모델과 강도한계 모델은 다자유도 시스템을 이용하여 비선형 시간이력해석 결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다. 마지막으로 N94-HSFF 지진기록을  $A(T_1, 5\%) = 0.5g$ 로 하여 수행한 결과 강도한계 모델을 제외하고는 다자유도 시스템을 이용하여 비선형 시간이력해석 결과를 잘 예측하지 못하는 것으로 나타났다. 삼선형 모델은 한쪽으로 크게 치우치는 것으로 예측하였다. 이에 반하여 실제 다자유도 시스템의 시간이력 해석 결과와 강도한계모델을 이용한 등가 단자유도 시스템

의 해석결과는 유사한 것으로 나타났으며 이 두 결과 모두 이선형이나 삼선형 모델을 사용한 결과와는 다르게 한쪽으로 구조물이 치우침은 크지 않은 것으로 나타났다.

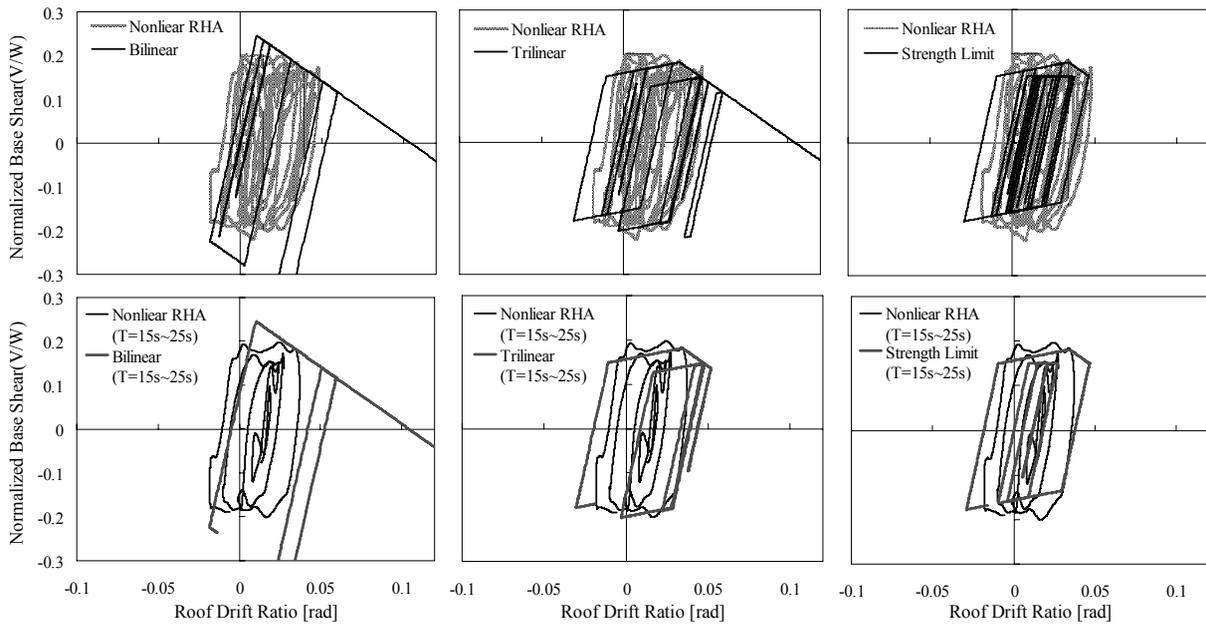
그림 7~9에는 각각의 조정된 지진에 대한 밀면전단력과 지붕층의 이력곡선을 나타낸 것이다. 또한 그림 7~9에는 그림 6에서 다자유도 시스템 해석 결과와 각 등가 단자유도 시스템의 시간이력 해석 결과가 달라지는 시점에서의 각 등가 단자유도 시스템과 다자유도 시스템의 밀면전단력 대 지붕층 변위 비 이력곡선을 비교하였다. 그림 7에서 작은 크기( $A(T_1, 5\%)$ )



<그림 7> 이선형 모델, 삼선형 모델, 강도한계 모델 및 다자유도 시스템의 밀면 전단력 대 지붕층 변위비 곡선.  $A(T_1, 5\%) = 0.2g$  N94-HSFF 지반 가속도



<그림 8> 이선형 모델, 삼선형 모델, 강도한계 모델 및 다자유도 시스템의 밀면 전단력 대 지붕층 변위비 곡선.  $A(T_1, 5\%) = 0.5g$  N94-HSFF 지반 가속도



〈그림 9〉 이선형 모델, 삼선형 모델, 강도한계 모델 및 다자유도 시스템의 밀면 전단력 대 지붕층 변위비 곡선.  $A(T_1, 5\%) = 0.9g$  N94-HSFF 지반 가속도

=0.2g)의 지진에 대하여는 세 모델을 이용한 등가단자유도 시스템이 실제 다자유도 시스템의 해석결과와 유사한 것으로 나타났다. 하지만 그림 8에서는 이선형 모델을 이용한 등가단자유도 시스템은 다른 시스템들과 큰 차이를 나타내고 있다. 구조물이 큰 변위 발생과 음강성으로 인하여 붕괴직전에 도달한 것으로 해석되었다.  $A(T_1, 5\%) = 0.9g$ 로 지진크기를 크게하여 해석하여 얻은 결과는 그림 9에 나타나 있다. 이 그림에 나타난 바와 같이 다자유도 시스템인 경우 15~25초에서의 이력곡선이 어느 한방향으로 치우치지 않고 안정적으로 이력거동하는데 비해 이선형이나 삼선형 이력곡선을 갖는 등가 단자유도 시스템을 이용한 해석결과는 지붕층 변위가 한쪽 방향으로 치우쳐 구조물이 붕괴된 것으로 나타난다. 하지만 강도한계모델을 이용한 결과는 MDF 시스템 해석을 통하여 얻은 결과와 유사하게 나타났으며, 붕괴까지는 여유가 있는 것으로 나타났다.

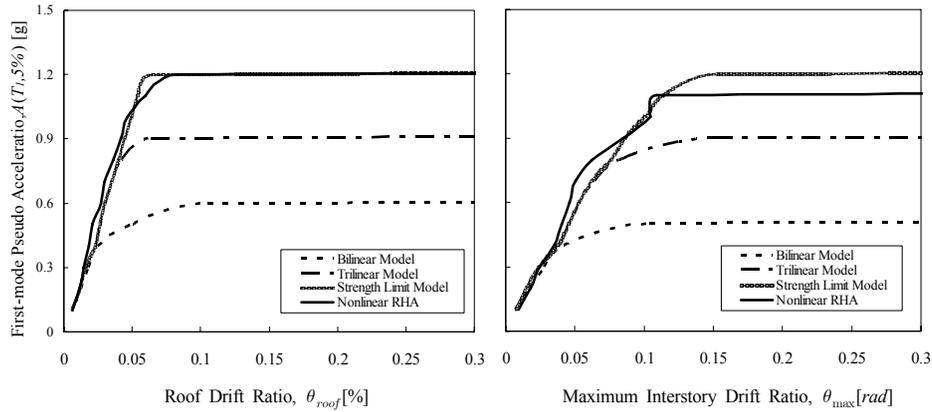
### 6. IDA 해석

철골모멘트골조 MDF 시스템의 내진성능평가를 세 개의 이력 모델을 위한 IDA 해석에서 이용한 등가 단자유도 시스템으로 수행가능한지를 평가하였다. 최근에 내진성능평가를 위하여 IDA(Incremental Dynamic Analysis)가 개발되어<sup>(1)</sup> 사용되고 있다.<sup>(8)</sup> IDA 해석은 구조물의 탄성부터 붕괴까지를 다 포함할 수 있도록 선택된 지진들의 크기를 증가시키며 해석을 수행하는 것이다. 이를 통하여 지진요구강도(IM)와

손상정도(DM)의 관계를 나타내는 IDA곡선을 작성한다. IM으로는 PSA(Pseudo Spectral Acceleration)가 주로 사용되며 DM으로는 최대 지붕층 변위비( $\theta_{roof}$ )나 최대 층간변위비( $\theta_{max}$ )가 사용된다. 본 연구에서는 IDA 곡선을 작성하기 위하여 단단한 지반에서 지진규모가 6.5-6.9사이의 세 개(Loma Prieta, 1989; Superstition Hills, 1987; and Imperial Valley, 1979)의 지진발생시 15~32km 떨어진 곳에서 기록된 20개의 지진을<sup>(7)</sup> 사용하였다.

각각의  $PSA[A(T_1, 5\%)]$ 에 대하여 20개 지진으로 인한 20개의 최대 지붕 층 변위와 최대 층간 변위를 가지고 16.50 그리고 84%의 초과확률을 갖는  $\theta_{roof}$ 와  $\theta_{max}$ 를 산정하였다. 이 통계 값들은 정렬법(Counting Method)으로 결정되었다. 정렬법에서는 20개의 데이터를 증가하는 순서로 나열하고, 이중 10번째와 11번째의 평균을 50% 초과하지 않을 확률을 가진 값으로 정하고, 5번째가 16%, 17번째가 84%의 초과하지 않을 확률을 갖는 값으로 정한다.

그림 10에는 50% IDA 곡선이 나타나 있다. 이선형과 삼선형을 이용한 등가단자유도 시스템은 철골모멘트 골조 MDF 시스템의 비선형해석을 통하여 얻은 50% IDA 곡선(Exact)을 매우 과소 평가하는 것으로 나타났다. 이에 반하여 강도한계모델을 이용한 IDA곡선은 실제 곡선(Exact)과 매우 유사한 것으로 나타났다. 따라서 철골모멘트 저항골조의 IDA 해석을 위한 등가단자유도 시스템 선정시 이력모델의 선정은 매우 중요한 것으로 나타났다.



〈그림 10〉 등가 단자유도 시스템-이선형 모델, 삼선형 모델 그리고 강도한계 모델- 및 비선형 시간이력해석을 수행한 정해의 50% IDA 곡선

## 7. 결론

본 연구에서는 철골모멘트 골조 MDF 시스템의 내진성능평가를 위한 비선형 시간이력해석을 효율적으로 정확하게 수행하기 위하여 등가단자유도 시스템을 사용하였다. 본 연구에서는 등가 시스템의 이력모델이 해석결과에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위하여 MDF 시스템의 비선형 정적 동적 해석 결과와 등가단자유도 시스템의 비선형 정적 및 동적 해석 결과와 비교하였다. 이를 통한 결론은 다음과 같다.

1. 기존에 철골 모멘트골조의 효율적인 해석을 위한 등가 단자유도 시스템에서 사용하는 이선형 모델과 삼선형 모델은 다자유도 시스템의 정적해석 결과 뿐만 아니라 동적 해석 결과도 정확하게 예측 못하는 것으로 나타났다. 구조물이 탄성범위 내에서 가동하는 작은 지진에서는 다자유도 시스템의 해석결과와 유사한 반면 지진의 크기가 커져 비탄성정도가 심해질수록 차이가 심해졌다. 특히 이선형과 삼선형 모델을 이용하여 해석한 결과, 지진 크기가 클수록 구조물이 한쪽으로 치우치는 현상이 매우 과대하게 평가 되었다.
2. 강도한계 모델은 MDF 시스템의 비선형 정적 및 동적 해석 결과를 모두 잘 예측하는 것으로 나타났다. 특히 지진의 크기가 큰 경우에도 강도한계 모델은 철골 모멘트저항 골조 (MDF 시스템)의 시간이력해석 결과를 잘 예측하였다.
3. 내진성능평가에서 사용하는 IDA 곡선을 가지고 각 모델의 정확성을 비교한 결과 이선형과 삼선형 모델 모두 실제 시스템의 IDA 곡선을 크게 과소평가하는 것으로 나타났다. 반면 강도한계모델은 PSA 전구간에 걸쳐 정확한 IDA 곡선을 예측하는 것으로 나타났다.
4. 본 연구결과를 토대로 철골모멘트 골조의 내진성능평가를 등가단자유도 시스템을 이용하여 수행할 경우 강도한계 모델을 사용하는 것이 타당하다고 판단한다. MDF 시

스템의 비선형 정적, 동적, IDA 해석을 위한 등가단자유도 시스템을 선정할 경우, 등가시스템의 이력 모델은 MDF 시스템의 일방향 푸쉬오버 곡선 뿐만 아니라 사이클릭 푸쉬오버 곡선과도 유사하도록 결정하여야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 교육과학기술부(MEST) 우수연구센터 육성사업인 한양대 친환경건축연구센터(R11-2005-056-040020-0)와 국토해양부 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호: 07도시재생B04) 지원사업에 의하여 수행된 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. Vamvatisikos, D. and Cornell, C. A., "Incremental dynamic analysis," *Earthq. Engrg. Struct. Dyn.*, 2002, 31:491-514.
2. Applied Technology Council, ATC 40: *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Vol.1 & Vol.2, California Seismic Safety Commission No. SSC 96-01, 1996.
3. Building Seismic Safety Council, *NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA 273, Washington, DC, 1997.
4. Fajfar, P., "Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol.28, No.9, 1999, pp. 979-993.
5. Chopra, A. K. and Goel, R. K., "A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings," *Earthq. Engrg. Struct. Dyn.*, Vol.31, 2002, pp. 561-582.
6. Ibarra L. F., "Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations," Ph.D Thesis, Dept. of Civil Engineering, Stanford University, Stanford, CA, 2003.
7. Vamvatisikos, D. and Cornell C. A., "Direct Estimation of Seismic Demand and Capacity of Multi-degree of Freedom Systems Through Incremental Dynamic Analysis of Single Degree of Freedom Approximation," *J. Struct. Engrg.* (ASCE), Vol.131, No.4, 2005, pp. 589-599.
8. SAC Joint Venture, *Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings*, FEMA 350, Washington, DC, 2000.