

# 적응적 횡하중 분배방법을 이용한 건축구조물의 내진성능평가

## Seismic Performance Evaluation of Building Structures Based on the Adaptive Lateral Load Distribution

이 동 근\*                      최 원 호\*\*                      정 명 채\*\*\*  
Lee, Dong-Guen              Choi, Won-Ho                      Cheong, Myung-Chae

### 국문요약

성능에 기초한 내진설계 분야에서 구조물의 내진성능평가를 위해서는 비탄성 지진거동을 보다 정확하게 예측할 필요가 있다. 성능기초 설계기준에 반영되어 있는 내진성능 평가 방법 가운데 하나인 pushover 해석을 이용한 방법은 몇몇 연구자들에 의하여 다양한 해석 방법론이 개발되었다. 이 방법을 사용하여 비탄성 전체 또는 국부적 지진응답을 보다 정확하게 평가하기 위해서는 사용되는 횡하중 분배가 구조시스템과 지반운동의 동적특성에 부합되도록 반영되어야 한다. 그리고 구조물의 변형능력을 합리적으로 평가하여 성능점을 보다 정확하게 산정해야 한다. 본 연구에서는 개선된 적응적 횡하중 분배방법과 건물의 등가응답을 이용하여 비탄성 지진응답을 정확하고 효율적으로 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 건물의 전체 비탄성 거동에 대한 내진성능을 평가하고 국부적인 비탄성 지진응답을 정확하게 산정하는데 사용될 수 있다. 또한 제안된 방법의 정확성과 타당성을 검증하기 위해서 비탄성 시간이력해석과 기존의 다른 해석방법들에 의한 비탄성 지진응답과 비교하였다.

**주요어** : 적응적 횡하중 분배방법, 등가응답, 비탄성 정적해석, 비탄성 시간이력해석

### ABSTRACT

It is very important that predict the inelastic seismic behavior exactly for seismic performance evaluation of a building in the performance based seismic design. Evaluation method of seismic performance based on the pushover analysis reflected in PBSE was developed by some researchers. For the evaluation of inelastic global and local seismic responses by pushover analysis exactly, lateral load distribution should be adjusted and reflected the dynamic characteristics of structural system and various seismic ground motions. And performance point should be determined based on the evaluation of reasonable deformation capacity of a building more exactly. An effective method based on the improved the adaptive lateral load distribution and the equivalent responses of a multistory building is proposed in this study to efficiently estimate the accurate inelastic seismic responses. The proposed method can be used to evaluate the seismic performance for the global inelastic behavior of a building and to accurately estimate its local inelastic seismic responses. In order to demonstrate the accuracy and validity of this method, inelastic seismic responses estimated by the proposed method are compared with those obtained from other analytical methods.

**Key words** : adaptive lateral load distribution, equivalent responses, pushover analysis, inelastic time history analysis

## 1. 서 론

### 1.1 성능에 기초한 내진설계

성능에 기초한 내진설계 분야에서 건축구조물의 내진성능은 비탄성 지진거동 및 응답의 정확한 예측에 의하여 평가할 수 있다. 비탄성 지진해석을 이용하여 구조물의 거동을 평가하는 방법은 많은 연구자들에 의하여 관련 연구가 이루어졌다. 특히, pushover 해석을 이용한 방법들은 ATC(1996)<sup>(1)</sup>, FEMA(1997)<sup>(2)</sup>, NEHRP(2000)<sup>(3)</sup> 등과 같은 설계기준에 반영되었고 다양한 해석적 방법들이 개발되고 있다.

비탄성 지진해석을 통한 응답 산정의 핵심적인 내용은 구조물의 비탄성 저항능력을 평가한 후에 구조물에서 예상되는 지진하중과 비교하여 성능의 수준을 결정하는 것이다. 이때 사용되는 지진해석 모델은 다자유도(MDOF)시스템 또는

등가단자유도(ESDOF)시스템이 있으며, 해석방법은 비탄성 시간이력해석과 pushover 해석이 있다. 다자유도 시스템을 이용하는 경우에는 해석시간이 과다하게 소요되고 여러 개의 응답이 산정되므로 그 가운데 어느 것을 기준으로 구조물의 능력을 평가해야 하는지에 대한 불확실성이 내포되어 있다. 이러한 경우에 일반적으로 구조물의 최상층의 변위응답을 이용하거나, 다자유도 시스템을 대표할 수 있는 하나의 응답을 산정하여 구조물의 능력을 평가하였다. 단자유도 시스템을 이용하는 경우에는 다자유도 시스템의 특성을 반영할 수 있는 등가의 응답을 사용함으로써 비탄성 응답을 산정하고 있다.

성능에 기초한 내진설계 분야에서는 pushover 해석으로 평가되는 구조물의 비탄성 저항능력과 예상되는 지반운동에 대한 요구수준을 서로 비교하여 대상구조물의 내진성능을 평가하는 방법이 연구와 실무분야에 적용되고 있다. Pushover 해석은 구조물이 항복한 이후의 동적거동과 하중의 재분배를 고려하여 시스템의 안정한계 상태를 파악할 수 있는 가장 간단하면서도 실용적인 해석 방법이라 할 수 있다. Pushover 해석을 보다 정확하게 수행하기 위해서는 여러 가지 고려해

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 교수(대표저자) : dglee@skku.ac.kr

\*\* 학생회원 · (주)마이다스아이티(MIDASIT), 공학박사

\*\*\* 정회원 · 전주대학교 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 10. 20 / 심사종료일 : 2003. 12. 9)

야 할 사항들이 있으며, 그 중에서도 가장 중요한 변수 중에 하나가 횡하중의 분배방법이다. 일반적으로 pushover 해석은 한 방향으로 단조증가하는 하중을 이용하는 정적해석의 개념에 기초하여 구조물의 비탄성 거동을 관찰하기 때문에 1차 진동모드가 지배하는 정형적인 구조물에 적용할 수 있다. 그러므로 고차모드의 영향을 받는 비정형 구조물이나 고층구조물에 대한 pushover 해석은 부정확한 응답을 초래할 수 있으며, 구조물의 소성힌지분포, 층간변위와 같은 국부적인 지진응답의 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다(Iwan 2000).<sup>(4)</sup> 특히 고층구조물의 경우에는 하중-변형응답의 저감에 영향을 미칠 수 있는 충분한 크기를 가지는 반복하중에 의하여 층간변위와 잔류층간변위가 증가되고 상부층에 층간변위가 집중되며, 상부층으로 소성화가 진행되는 것이 고차모드의 영향 때문이라는 연구결과가 있다(Naeim 2000).<sup>(5)</sup> 그리고 pushover 해석은 각 층에서 층간변위의 최대값이 동시에 발생할 수 없기 때문에 지진하중과 같은 반복하중에 의한 최대 층간변위를 정확하게 표현할 수 없으며 붕괴메카니즘에 따라서 양상이 매우 달라질 수 있다(Krawinkler 1998).<sup>(6)</sup> 또한 pushover 해석을 통하여 결정되는 구조물의 비탄성 최대변형 능력에 대한 정확성은 어떠한 지반운동을 사용하느냐에 따라서 매우 다양할 수 있다(Fajfar 1999, Miranda 2001).<sup>(7),(8)</sup> 그러므로 pushover 해석을 이용하여 비탄성 거동을 평가하기 위해서는 실제 구조물에 작용하는 지진하중의 분포를 정확하게 반영하고 고차모드의 영향을 평가할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 pushover 해석을 이용하여 구조물의 비탄성 지진응답을 산정할 경우에 전체 및 국부적 비탄성 응답을 보다 정확하게 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.

## 1.2 비탄성 지진해석을 이용한 구조물의 변형능력 평가

비탄성 지진해석에 의하여 구조물의 변형능력을 평가하는 방법으로는 비탄성 시간이력해석으로 구한 지진응답을 이용하는 방법과 pushover 해석으로 구한 지진응답을 이용하는 방법이 있다. 후자의 방법 중에서 가장 대표적인 것이 ATC-40(1996)<sup>(1)</sup>의 능력스펙트럼법(capacity spectrum method, 이하 CSM)과 FEMA-273(1997)<sup>(2)</sup>의 변위계수법(Displacement Coefficient Method, 이하 DCM)이다.

앞 절에서 언급한 것처럼 구조물의 변형능력을 평가하기 위해서는 시스템의 응답을 대표할 수 있는 하나의 응답이 필요하다. 이러한 이유로 지금까지 비탄성 시간이력해석에서 사용되는 많은 이론들이 비교적 간단하게 구조물의 전체 거동을 근사적으로 평가할 수 있는 등가단자유도(ESDOF) 시스템에 의한 평가방법을 채택하여 왔다. 그러나 이 방법은 고차모드의 영향을 고려할 수 없으며, 소성힌지분포와 층간변위와 같은 국부적인 지진거동을 제대로 반영할 수 없다는 단점이 있다. 그리고 pushover 해석에서도 하나의 응답을 이용하여 구조물의 변형능력을 평가하고 있으며, 가장 일반적인 것이 구조물의 최상층 변위응답을 이용하는 방법이다.

또한 pushover 해석에서 등가단자유도 시스템의 원리에 의하여 구조물의 유효높이에서의 응답을 이용하는 방법과 구조물의 등가응답을 이용하는 방법들이 연구되었다(Lee 1997, 2002).<sup>(9),(10)</sup> Pushover 해석에 의하여 구조물의 고차모드 응답을 평가하기 위해서 가장 중요한 것이 횡하중 분배형태를 어떻게 결정하느냐와 고려되는 지진에 의한 성능점을 어떤 방법으로 산정하는가를 결정하는 일이다.

## 1.3 Pushover 해석을 위한 횡하중 분배 방법

Pushover 해석시 사용될 수 있는 정적 횡하중의 분배 방법으로는 UBC(1997), ATC 3-06(1984)<sup>(11)</sup>, FEMA-273(1997)<sup>(2)</sup> 등 설계기준에서 제시된 방법들과 1차 모드특성을 고려한 ATC-40(1996)<sup>(1)</sup>의 방법이 있다. 그러나 이 방법들은 고차모드의 영향을 정확하게 고려한다고는 할 수 없으며, 특히 Pushover 해석에 적용될 경우에는 구조물의 비탄성 지진응답의 거동 특성을 제대로 반영하지 못하는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 여러 가지 횡하중분배에 대한 연구결과들이 제안되었다.

Freeman(1998)<sup>(12)</sup>과 Requena(2000)<sup>(13)</sup>은 응답스펙트럼 해석에서 고려된 모든 모드에 대한 하중을 SRSS 형태로 조합하여 분배하는 방법을 제안하였다. 그리고 Lee(1996)<sup>(14)</sup>은 구조물에서 발생하는 층전단력을 이용하여 층하중을 산정함으로써 선형탄성 범위에서 응답스펙트럼해석 결과를 정확하게 반영할 수 있는 유사동적해석법을 제안하였다. 특히, 이 방법에 의한 하중분배는 여러 가지 모드의 특성과 지진하중의 영향도 하중분포 형상에 고려할 수 있는 특징이 있다. Reinhorn(1997)<sup>(15)</sup> 및 Gupta와 Kunnath(2000)<sup>(16)</sup>은 강성저하에 따라 변화되는 특정 순간의 구조물 동적모드 특성을 단계마다 적용할 수 있는 하중분포형상을 제안하였다. Bracci(1997)<sup>(17)</sup>은 철근콘크리트 구조물이 비탄성 거동을 할 때 발생하는 균열, 항복현상, 소성힌지발생에 따른 강성의 변화를 고려할 수 있는 적응적(adaptive)인 층하중을 산정하였다. 그러나 pushover 해석에서 사용되는 이러한 적응적 분배방법은 강성변화에 따른 구조물의 요구수준을 명확하게 평가할 수 있지만, 개념적으로 매우 복잡하고 응답평가가 많은 소요시간이 요구되며 재료와 비탄성적인 동적 특성에 매우 민감하기 때문에 아직까지 그 적용성과 정의가 명확하게 확정되지 않았다. 최근에는 pushover 해석에서 고차모드의 영향을 고려하기 위하여 Chopra(2001)<sup>(18)</sup>은 각 모드별로 pushover 해석을 수행하고 모드별 응답을 조합함으로써 전체 응답을 평가하는 Modal Pushover Analysis(MPA) 방법을 제안하였다.

## 2. PUSHOVER 해석을 이용한 내진성능평가

### 2.1 Pushover 해석을 이용한 내진성능평가 방법 소개

Pushover 해석을 이용하여 구조물의 지진응답과 저항능력을 평가하고 내진성능을 평가하는 방법들은 많은 연구자들에 의하여 개발되었다.

가장 대표적인 방법이 FEMA-273의 변위계수법(DCM)이다. 이 방법은 비탄성 특성을 반영한 동적계수를 이용하여 매우 간단하고 직접적으로 변형능력을 평가할 수 있기 때문에 예비설계 단계에서 주로 적용된다. 변위계수법(DCM)은 단자유도 시스템의 응답에 대한 통계적 방법에 근거하며, 시스템과 지반의 진동주기에 매우 민감하고 이력특성과 P-Delta에 대한 동적계수는 경험적으로 평가되어 신뢰성이 떨어진다는 문제점이 있다. 특히 탄성과 비탄성의 변위비에 대한 동적계수는 단주기 영역에서는 시스템의 강성저하 및 강도저감과 같은 이력특성에 매우 민감하여, 장주기에서는 변위응답을 과대평가하는 경향을 나타낸다(Gupta와 Kunnath 1998, Song과 Pincheria 2000).<sup>(19),(20)</sup>

능력스펙트럼법(CSM)은 ATC-40(1996)<sup>(1)</sup>에서 제시하고 있는 건축물의 비탄성 변형능력과 내진성능을 평가할 수 있는 방법으로 성능에 기초한 내진설계 분야에서는 가장 널리 사용되고 있는 방법이다. 구조물이 보유하고 있는 저항능력과 지진하중에 의한 요구수준을 스펙트럼 형식으로 서로 비교함으로써 비탄성 최대응답을 매우 효과적으로 평가하는 해석방법이다. 그러나 이 방법은 이력면적에 따른 유효감쇠의 과대평가로 인하여 응답감소계수와 변위응답을 과소평가할 수 있다. 또한 성능점 산정에 있어서 반복과정에 의한 시간적인 소요와 수렴과정에서 발생하는 문제점이 있다(Iwan 2000, Tagawa와 MacRae 2001).<sup>(4),(21)</sup>

유효감쇠원리에 의하여 정의되는 비탄성 응답스펙트럼은 넓은 진동주기와 연성비 범위에서 변위응답을 정확하게 평가할 수 없다. 그리고 높은 감쇠에서의 변위응답과 실제 시스템에서의 비탄성 응답은 그 연관성이 부족하다는 연구결과가 제시되었다. 비탄성 영역에서 발생하는 변위응답과 직접적인 연관성이 있는 것은 변위연성비(displacement ductility)이며, 연성계수에 따른 비탄성 응답스펙트럼이 비교적 시간 이력해석의 결과를 잘 반영할 수 있다는 연구가 Tagawa와 MacRae(2001)<sup>(21)</sup>, Chopra와 Goel(1999)<sup>(22)</sup>에 의하여 제시되었다.

Chopra(2001)<sup>(18)</sup>에 의하여 제시된 Modal Pushover Analysis (MPA) 방법은 동역학적 이론에 기초하여 pushover 해석의 개념적인 간단함과 계산상의 편리함을 유지하면서 지진응답의 산정에서는 보다 높은 정확성을 확보하고자 하는 의도에서 제안된 방법이다. 비탄성 시스템의 동적특성은 탄성시스템과 동일하다는 가정하에 탄성모드형상을 이용하여 각 모드별 특성과 응답을 조합하여 평가함으로써 고차모드의 영향을 고려할 수 있다는 것이 이 방법의 특징이다. 그러나 비탄성 영역에서의 주기특성의 변화와 각 모드간의 상호작용으로 인한 간섭의 영향을 무시함으로써 각 모드별로 분리된 비연계된 운동방정식을 유도한다는 이론적인 모호성이 존재한다. 그리고 다양한 특성을 포함하는 지진하중과 구조물 시스템 특성에 대한 이 방법의 적용성이 아직까지 명확하게 검증되지 않은 상태이다.

이러한 방법들 이외에도 시스템의 유효감쇠와 변위연성비의 관계를 보다 정확하게 규정하여 요구스펙트럼을 평가

함으로써 내진성능을 평가하는 방법도 있다. 그리고 시스템의 항복변위와의 상관관계를 이용하여 비탄성 응답을 효과적으로 평가하는 Yield Point Spectra(Aschheim, 2000)<sup>(23)</sup> 방법 등이 연구되었다.

## 2.2. Pushover 해석을 위한 횡하중 분배

내진설계기준에서 구조물의 고차모드에 대한 효과를 고려하기 위한 방법은 여러 가지가 있으며, 각각의 지진하중 분배방법을 pushover 해석시 횡하중 분배방법으로 적용할 수 있다. 횡하중 분배방법의 특성은 크게 고정적(constant) 분배방법과 적응적(adaptive) 분배방법으로 구분할 수 있다. 고정적 분배방법에는 내진설계기준 등에서 제시하는 구조물의 동적특성과 지진하중의 특성과는 무관하게 구조물의 높이와 질량분포만을 고려하는 방법과 구조물의 동적특성을 반영할 수 있는 모드형상을 이용하는 방법이 있다. 그리고 적응적 분배방법은 구조물의 동적특성 뿐만 아니라 지진하중의 특성도 하중분포 형상에 반영할 수 있는 방법으로 탄성 및 비탄성 영역에서 동일하게 적용하는 정적인 방법과 비탄성 영역에서도 하중분포 형상이 변화되는 동적인 방법이 있다. 그러나 적응적 분배방법 중 동적인 방법은 구조물의 동적특성변화에 따른 요구수준을 명확하게 평가할 수 있지만 개념적으로 매우 복잡하고 응답평가가 매우 많은 소요시간이 요구된다. 특히 재료의 비탄성적 특성과 비탄성 요소의 소성거동 특성에 매우 민감하기 때문에 하중 제하 단계에서 부재 및 구조물의 변형상태를 정확하게 반영하기가 매우 힘들다. 그러므로 아직까지 이 방법의 적용성과 정의가 명확하게 확정되지 않았다. 본 연구에서는 현재 pushover 해석에서 가장 많이 사용하고 있는 고정적 분배방법과 적응적 분배방법 중 정적인 방법을 이용하여 응답을 평가하였다.

### 2.2.1 CASE-1: UBC-97에 의한 횡하중 분배방법

지진하중을 각 층에 따라서 분배하고 최상층에 하중을 추가함으로써 고차모드 효과를 반영한다. 각 층에서 산정되는 전단력은 모든 층에서 안전한 결과를 유도한다. 그러나 이 방법은 설계를 목적으로 적용할 수 있지만, pushover 해석에 의한 비탄성 거동은 정확하게 평가하기 어렵다.

$$F_x = \frac{(V - F_t)w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (1)$$

$$F_t = 0.07TV \quad (\text{단, } T \leq 0.7 \text{ 초인 경우 } F_t = 0) \quad (2)$$

여기서,

$V$ : 지진하중에 의한 밑면전단력

$F_t$ : 추가하중

$w_i$ : 각 층의 무게

$h_i$ : 각 층의 높이를 나타낸다.

### 2.2.2 CASE-2: FEMA-273에 의한 횡하중 분배방법

구조물의 질량과 높이에 따라서 층하중을 분배한다. 변수  $k$ 에 따라서 하중분배의 형상곡선이 변하며 장주기 구조물의 경우에는 포물선 곡선을 나타냄으로써 근사적으로 고차모드 영향을 반영할 수 있다. 하중분배식은 식 (3)과 같으며  $w$ 는 각 층의 무게,  $h$ 는 각 층의 높이를 나타낸다.

$$C_{ux} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k} \quad (3)$$

$$F_x = C_{ux} V \quad (\text{단, } T \leq 0.5 \text{ 초인 경우는 } k=1.0, \\ T \geq 2.5 \text{ 초인 경우는 } k=2.0) \quad (4)$$

### 2.2.3 CASE-3: ATC-40에 의한 횡하중 분배방법

응답스펙트럼해석에 의하여 산정된 구조물의 1차 모드에 대한 밀면전단력을 고려하여 지진하중을 분배하는 방법이다. 일반적으로 정형인 건물이나 층수가 낮은 구조물에 적용할 수 있지만, 고차모드의 영향을 고려할 수 없으며 지진하중의 특성을 정확하게 반영할 수 없는 문제점이 있다. 1차 모드에 대한 밀면전단력( $V_1$ )의 산정과 하중의 분배는 식 (5) 및 식 (7)과 같이 표현된다.

$$V_1 = \alpha_1 S_{a1} W \quad (5)$$

여기서,

- $S_{a1}$  : 1차 모드 고유진동주기에 대한 응답가속도
- $W$  : 건물의 총중량
- $\alpha_1$  : 유효질량계수

그리고  $\alpha_1$ 은 식 (6)과 같이 산정된다.

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1} \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N m_i \right] \sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}^2} \quad (6)$$

여기서,

- $m_i$  : 각 층의 질량
- $\phi_{i1}$  : 1차 모드에 대한 모드형상계수
- $N$  : 건물의 층수

$V_1$ 을 이용하여 각 층별 횡하중은 다음 식으로 계산한다.

$$F_i = \frac{m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}} V_1 \quad (7)$$

### 2.2.4 CASE-4: 전단력 분포를 반영한 횡하중 분배방법

본 연구에서는 시스템의 층전단력을 정확하게 반영할 수

있는 효과적인 하중분배방법을 비탄성 정적해석에 적용하여 지진응답을 평가하였다. 개념적으로 단순하고 계산상의 이점을 유지하는 이 방법은 Lee(1996)<sup>(14)</sup>에 의하여 제안되었으며, 선형 탄성 범위에서는 응답스펙트럼 해석에 의한 층전단력을 정확하게 반영할 수 있다. 지진해석 시 구조물의 지진응답 특히, 부재력을 산정하는데 있어서는 전단력이 절대적인 영향을 미친다. 이 방법은 고차진동 모드의 영향을 반영할 수 있으며 지진하중의 특성에 부합되도록 횡하중 분포가 생성된다는 장점이 있다. 또한 지진하중의 특성에 따라 적응적으로 변화하는 방법이다. 시스템 전단력을 반영하는 지진하중 분배식은 다음과 같다.

$$F_i = V_i - V_{i+1} \quad (8)$$

여기서,

$$V_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij})^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \left[ \sum_{i=1}^N (m_i \Gamma_j \phi_{ij} S_a(T_j)) \right]^2}$$

여기서,

- $V_i$  : 층전단력
- $n$  : 모드수
- $N$  : 층수
- $m_i$  : 층질량
- $\Gamma_j$  : 모드참여계수
- $\phi_{ij}$  :  $j$  번째 모드의 형상벡터
- $S_a(T_j)$  :  $j$  번째 모드의 가속도 응답

본 연구에서는 지반운동의 특성이 다른 3개의 지진하중에 대하여 저차모드가 지배하는 중층구조물(8층)과 고차모드 영향이 있는 고층구조물(20층)의 거동을 위에서 언급한 4가지 횡하중 분배방법을 이용하여 평가하였다. 3가지 지진에 대하여 8층과 20층 건물의 층전단력을 선형탄성 영역에서 응답스펙트럼해석(CASE-5)과 시간이력해석(CASE-6)에 의한 결과와 서로 비교하였다. 그림 1과 그림 2에서 알 수 있듯이 지진하중의 특성에 따라서 오직 CASE-4만이 층전단력의 분포형상이 변화된다는 것을 확인할 수 있다. 그러나 CASE-4를 제외한 나머지 3가지 방법은 지진하중에 상관없이 구조물이 동일하면 항상 일정한 분포형상을 나타내고 있다. 또한 CASE-4는 응답스펙트럼해석에 의한 CASE-5의 층전단력 분포 결과와 정확하게 일치한다는 것을 알 수 있다.

## 2.3 제안된 내진성능평가 방법

본 연구에서는 pushover 해석을 이용하여 구조물의 변형 능력과 내진성능을 보다 정확하게 평가하기 위하여 다음과 같은 세가지 특징이 반영된 새로운 해석 방법을 제안하였다.

### 2.3.1 고차모드 영향을 고려한 횡하중 분배

다양한 지반운동의 특성에 적응적으로 변화하며 구조물의 고차모드 영향을 반영할 수 있는 횡하중 분배방법을 이용하

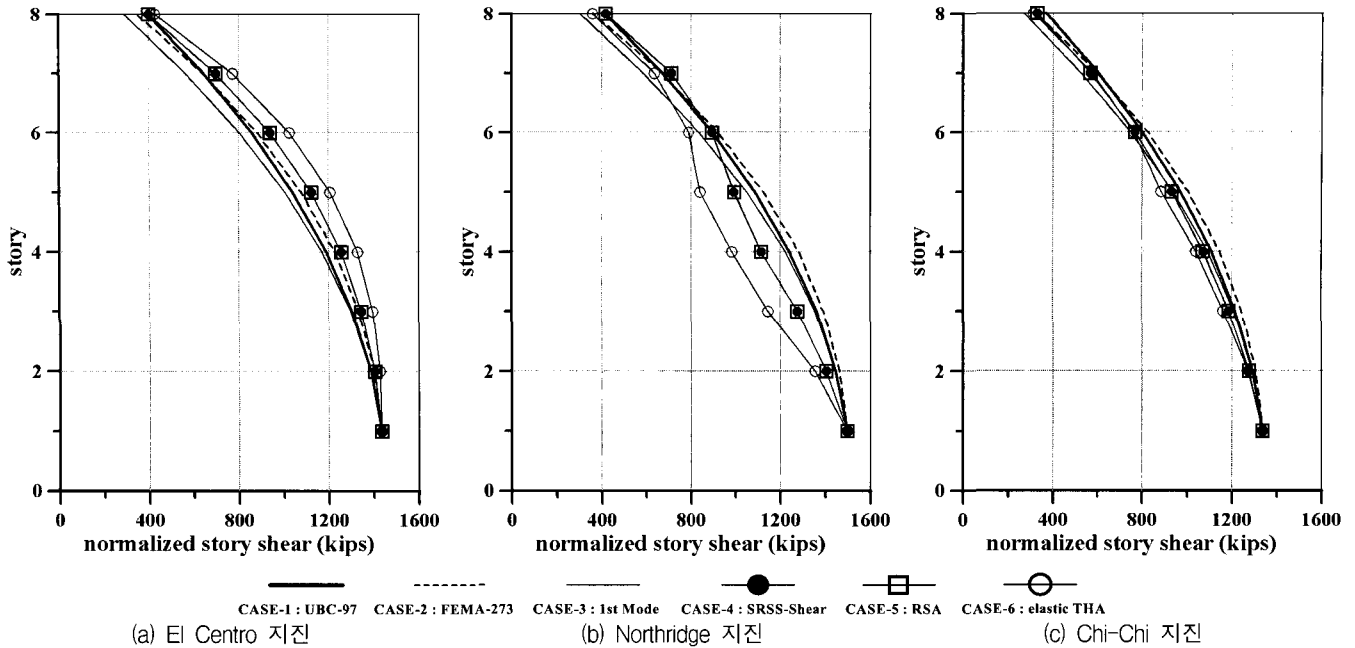


그림 1 8층 구조물의 횡하중 분배방법에 따른 탄성 층전단력 분포 비교

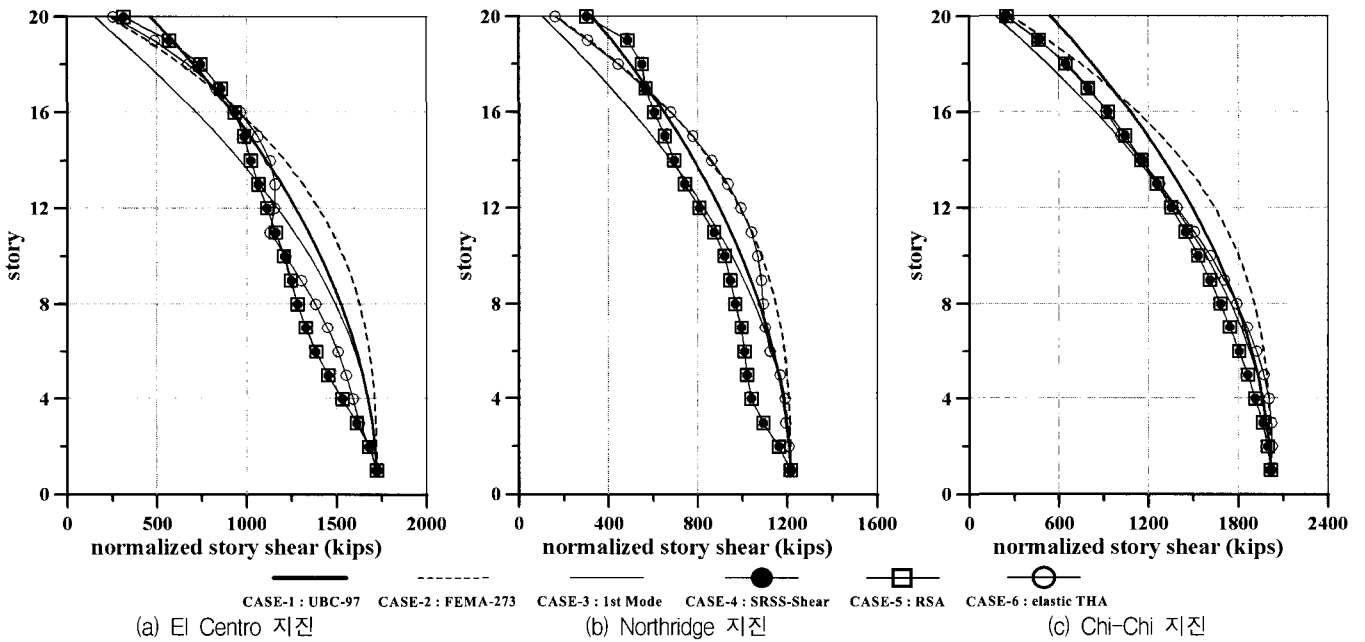


그림 2 20층 구조물의 횡하중 분배방법에 따른 탄성 층전단력 분포 비교

였다. 선형탄성범위에서 정확성이 검증되었던 Lee(1996)<sup>(14)</sup>에 의해 제안된 전단력 분포를 반영할 수 있는 횡하중 분배 방법을 비탄성 범위로 확장하여 적용하였다.

### 2.3.2 등가응답을 이용한 구조물의 능력곡선 평가

일반적으로 기존의 능력스펙트럼법(CSM)에서는 최상층 변위와 밀면전단력의 관계로부터 구조물의 능력곡선을 산정하고 단자유도계 형식인 능력스펙트럼을 평가하기 위해서는 구조물의 1차 탄성모드에 대한 동적 매개변수(모드참여계수, 유효질량계수)를 적용하는 근사적이고 불명확한 방법을 채택하고 있다. 본 연구에서는 다자유도 시스템에서 단자유도 시스템으로의 전환 과정이 필요 없이 구조물의 다자유도 시

스템에서 직접 정적 등가변위와 등가저항력을 산정하고 이 두 응답의 관계로부터 구조물의 능력스펙트럼에 대한 평가가 이루어지는 등가응답의 원리를 이용하였다. 그러므로 이 방법은 기존의 방법보다는 명확하고 직접적으로 구조물의 저항능력을 평가할 수 있다. Pushover에 의하여 산정되는 구조물을 대표할 수 있는 정적 등가변위( $D_e$ )와 등가저항력( $V_e$ )을 이용하여 응답변위 및 응답가속도를 각각 다음 식으로 구한다.

$$S_d = D_e \approx \frac{\bar{\Phi}_1^T M X_{static}}{\Phi_1^T M 1}$$

$$S_a = V_e / M_{eff} \approx \bar{\Phi}_1^T R_{static} / M_{eff}$$

여기서  $X_{static}$ ,  $R_{static}$ 은 pushover 해석으로부터 구해지는 각 층 변위 및 저항력 응답을 나타낸다.  $M_{eff}$ 은 구조물의 1차 모드에 대한 유효질량을 나타내며, 응답변위와 응답가속도로 표현되는  $S_d$ 와  $S_a$ 는 각각 다자유도계에서 구조물의 비탄성 정적응답을 이용하여 평가된 스펙트럼 상에서의 정적 등가변위와 등가가속도 응답을 의미한다. 이 방법은 탄성모드 형상을 이용하는 실용적인 방법이며, 탄성 및 비탄성 영역에서 에너지 등의 응답을 비교적 정확하게 반영하는 것으로 연구되었다.

2.3.3 변위연성비를 이용한 요구스펙트럼 평가

제안된 방법에서 지진하중에 대한 요구스펙트럼은 이선형 특성을 가지는 R- $\mu$ -T 관계를 직접 이용한 비탄성 응답스펙트럼에 의하여 평가하였다. 변위연성비를 이용한 비탄성 응답스펙트럼의 평가는 설정된 목표 변위연성비에 대하여 각 주기마다 탄성 거동에서의 수평강도와 항복강도에 대한 비를 변화시켜 가면서 비탄성 시간이력해석을 수행하여 목표연성비를 만족하는 값을 찾는 것이다. 그림 3과 그림 4는 EPA를 0.4g로 조정한 El Centro 지진(NS, 1940)에 대하여 유효감쇠비에 의하여 평가된 비탄성 응답스펙트럼과 변위연성비에 의하여 평가된 응답스펙트럼을 각각 응답가속도와 응답변위의 관계를 이용하여 나타내고 서로 비교한 것이다. 본 연구에서는 위에서 언급한 세가지 특징을 반영하여 구

조물의 시스템 연성요구도와 같은 전체적인 변형능력과 소성힌지분포 및 비탄성 중간변위와 같은 국부적인 변형능력을 평가하였다. 일반적으로 적용되고 있는 FEMA-273의 변위계수법(DCM)과 ATC-40의 능력스펙트럼법(CSM) 그리고 Chopra(2001)<sup>(18)</sup>에 의하여 제안된 Modal Pushover Analysis (MPA) 방법과 평가 결과를 서로 비교하였다.

3. 지진의 특성에 따른 구조물의 비탄성 변형능력 평가

3.1 예제구조물

본 연구에서 제안된 방법의 타당성은 UBC-97(1997) 설계기준 ( $C_a=0.4$ ,  $C_r=0.4$ )에 의한 강기둥-약보(SCWB)의 개념으로 설계된 8층과 20층 철골모멘트 골조를 대상으로 검증하였다. 중층구조물(8층)과 고층구조물(20층)을 선택한 이유는 각각의 구조물에서 1차 모드의 기여 정도가 달라질 수 있으며, 비탄성 시간이력해석과 pushover 해석에 의한 고차모드의 반영 여부를 명확하게 평가할 수 있기 때문이다. 표 1에는 예제 건물의 부재 제원을 표시하였다. 모드해석에서는 각 구조물에서 발생하는 전체모드를 모두 고려하였으며, 이중 5차 모드까지에 대한 진동주기와 유효질량계수를 표 2에서 나타내었다. 그림 5에서 보는 것처럼 각 구조물은 3경간을 가지며, 1층 층고는 18ft이고 나머지 층고는 12ft이다. 각 층

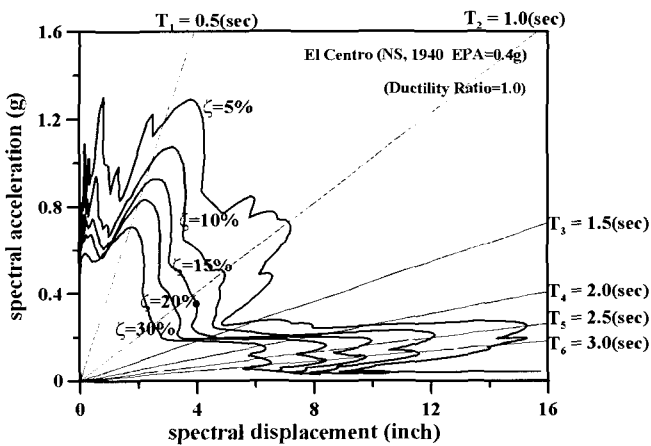


그림 3 유효감쇠비에 의한 비탄성 응답스펙트럼

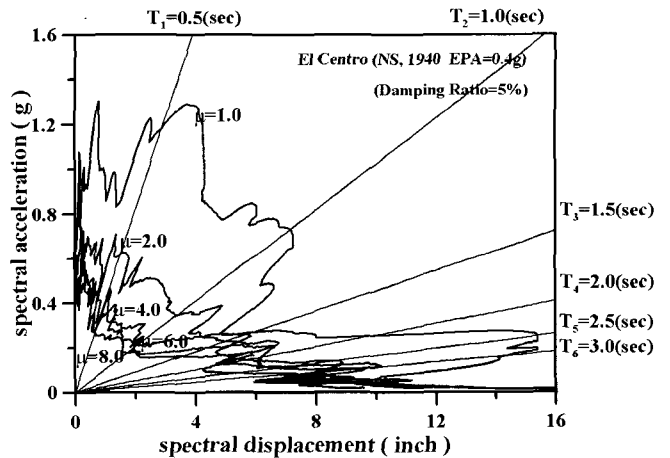


그림 4 변위연성비에 의한 비탄성 응답스펙트럼

표 1 예제구조물에 사용된 부재단면

기둥 ID.	내부기둥		외부 기둥		보 ID.	8 층	20 층
	8 층	20 층	8 층	20 층			
C10	-	W27×84	-	W18×86	B10	-	W24×62
C9	-	W27×102	-	W18×97	B9	-	W24×68
C8	-	W30×116	-	W18×106	B8	-	W24×76
C7	-	W30×132	-	W18×119	B7	-	W24×76
C6	-	W36×135	-	W18×130	B6	-	W27×84
C5	-	W36×150	-	W18×143	B5	-	W27×84
C4	W24×55	W36×160	W14×48	W18×158	B4	W18×40	W27×94
C3	W24×84	W36×170	W14×74	W18×175	B3	W21×50	W27×94
C2	W24×94	W36×182	W14×90	W18×192	B2	W24×55	W27×102
C1	W24×131	W36×232	W14×99	W18×211	B1	W24×68	W27×102

표 2 고유치해석에 의한 예제구조물의 동적특성

구분	진동모드	진동주기 (초)	모드참여계수	유효질량계수
8 층	1 차	1.168	1.348	0.829
	2 차	0.420	0.508	0.115
	3 차	0.238	0.240	0.033
	4 차	0.158	0.149	0.012
	5 차	0.114	0.109	0.005
20 층	1 차	2.786	1.379	0.778
	2 차	0.961	0.566	0.126
	3 차	0.549	0.312	0.042
	4 차	0.383	0.214	0.019
	5 차	0.290	0.154	0.012

의 질량은 0.8953 kips-sec<sup>2</sup>/in이며 rayleigh 감쇠로 가정하여 1차 및 2차 모드에 대한 감쇠계수를 각각 0.02와 0.05로 선택하였다. 보와 기둥에서 발생하는 소성힌지는 부재의 단부에 집중된다고 가정하였으며, 부재의 이력거동은 항복 후에 2%의 변형경화 효과를 가지는 이선형 곡선으로 가정하였다. 보와 기둥 접합부에 대한 패널존 효과와 중력하중에 의한 P-Delta 효과는 고려하지 않았다.

본 연구의 목적이 제안된 방법의 타당성과 다양한 지진하중에 대한 적용성을 검증하는 것이기 때문에 이러한 단순한 모델을 사용하는 것이 적절하다고 판단된다. 본 연구에서 제

시하는 방법과 비교되는 기존의 방법 또한 이러한 효과를 이용하여 내진성능을 평가하는 방법과 절차에 대하여 정확하게 규명되지 않은 상태이다. FEMA-273의 변위계수법의 경우에는 P-Delta효과를 반영하는 C<sub>3</sub> 계수의 신뢰성이 부족한 상태이고, ATC-40의 능력스펙트럼법은 P-Delta효과를 고려하는 경우에 기존의 단순한 동적계수를 이용한 시스템 전환 방식과 성능점 평가에 대한 방법들의 신뢰성 및 적용성 여부가 검증되지 않았다. 그리고 Chopra에 의한 모드별 비탄성 정적해석법(MPA)도 아직까지 P-Delta 효과와 접합부 특성을 고려한 적용성의 연구는 진행되지 않았다. P-Delta 효과로 발생하는 항복이후 음(negative)강성을 가지는 구조물의 급격한 강성 및 강도저하의 상태는 비탄성 최대내력 상태를 산정하는 성능점 평가에 대한 문제보다는 구조물의 불안정상태를 다루는 동적이차효과에 대한 문제로 접근하여야 한다. 예제구조물에 대한 pushover 및 비탄성 시간이력 해석은 일반적인 2차원 비탄성 해석프로그램인 DRAIN-2D+(1997)<sup>(24)</sup>를 사용하였다.

### 3.2 지진하중

예제구조물의 지진해석에서 적용된 지진하중은 다양한 지반운동 중에서 진동수 성분, 지속시간이 서로 다른 지진하중 5개를 사용하였다. 이들 지진하중의 특성을 표 3에 정리

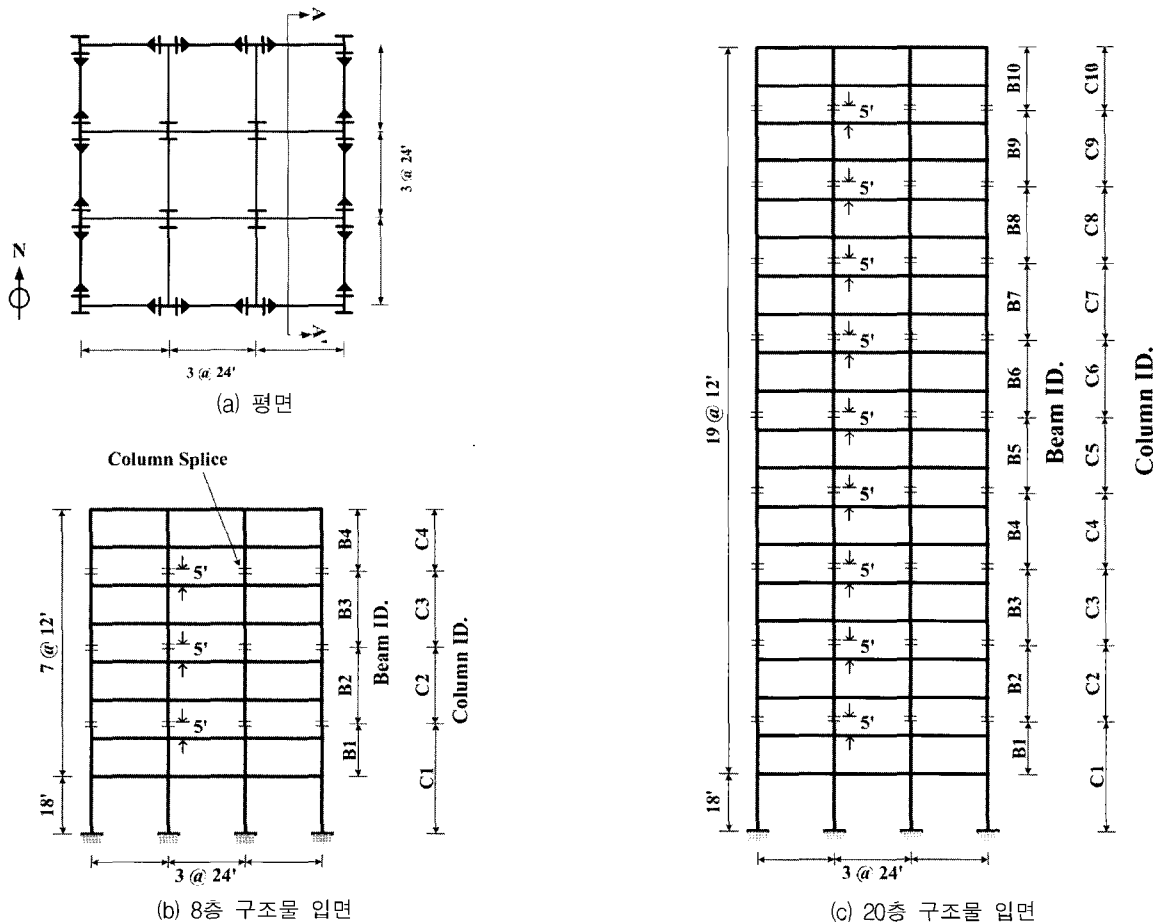


그림 5 8층 및 20층 예제구조물의 평면과 입면

표 3 지진하중의 특성

구분	지진하중	발생일	위치	방향	규모	지반	PGA(g)	EPA(g)	조정EPA(g)
1	El Centro	1940.5.18	Imperial Valley	N00E	M=6.9	Stiff Soil	0.348	0.283	0.400
2	Taft	1952.7.21	Kern County	N90E	M=7.7	Rock	0.179	0.158	0.400
3	Northridge	1994.1.17	Sylmar County	N00E	M=6.7	Alluvium	0.848	0.813	0.400
4	Izmit	1999.8.17	Turkey Kocaeli	IZT090	M=7.8	Stiff Soil	0.220	0.221	0.400
5	Chi-Chi	1999.9.21	Taiwan	CHY006	M=7.6	Soft Soil	0.202	0.145	0.400

하였다. 각 지진하중은 하중의 입력에너지를 동일하게 평가하기 위하여 유효최대가속도(EPA)를 0.4g로 조정하였다. 유효최대가속도(EPA)의 조정은 각각의 지진하중에 대하여 가

속도 응답스펙트럼이 지배적인 진동주기 범위를 설정하여 평가하였다. 선택한 5개의 지진하중은 8층과 20층 구조물에 각각 서로 다른 비탄성 지진거동을 유발하였으며, 특히 20층 구조물의 경우에는 소성힌지분포가 매우 상이하게 나타남으로써 고차모드의 영향을 효과적으로 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 지진하중 각각에 대한 가속도 시간이력과 응답스펙트럼은 그림 6 및 그림 7과 같다. 그림 8과 그림 9는 8층과 20층 구조물의 5개 지진하중에 대한 비탄성 소성힌지분포를 나타낸 것이다. 기준소성힌지의 회전각은 0.02(radian)으로써 그림에서 나타나는 가장 큰 회전각의 크기를 나타내며 소성힌지분포는 이에 대한 상대적인 크기으로써 표현한 것이다. 지반운동의 특성에 따라서 동일한 구조물이라고 할지라도 비탄성 거동이 매우 다르게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 특히 20층 구조물의 경우에는 하부층, 중간층 그리고 상부층에서 국부적으로 소성화 현상이 집중되어 나타나는 것을 명확하게 구분할 수 있다. 본 연구에서는 5개의 지진하중 중에서 비탄성 지진거동의 양상이 매우 다른 3개의

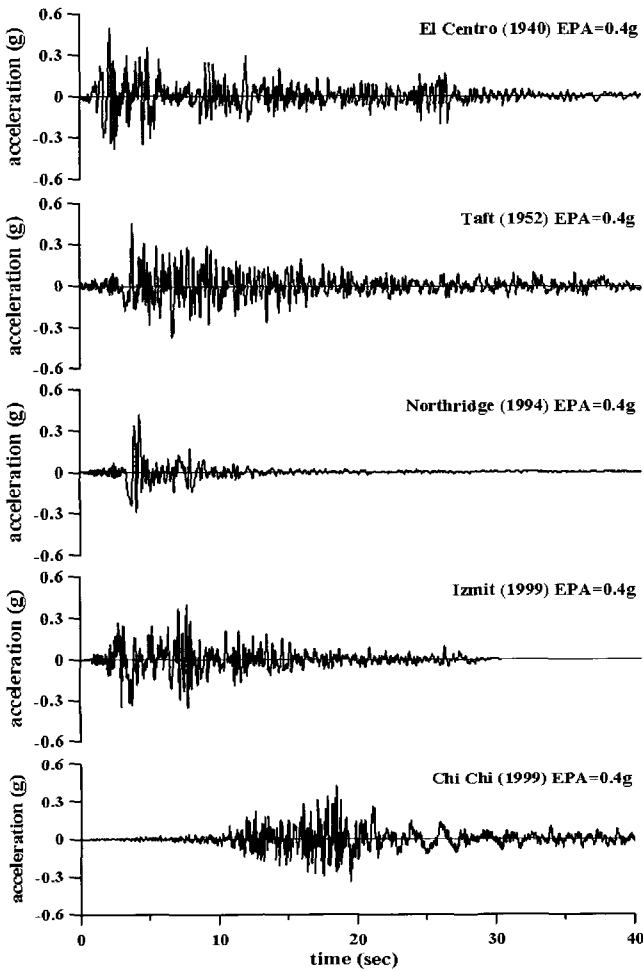


그림 6 5개 지진하중에 대한 가속도 시간이력

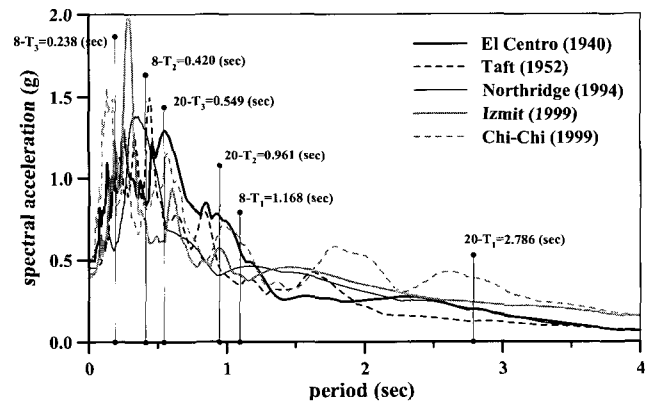


그림 7 5개 지진하중에 대한 가속도 응답스펙트럼(EPA=0.4g)

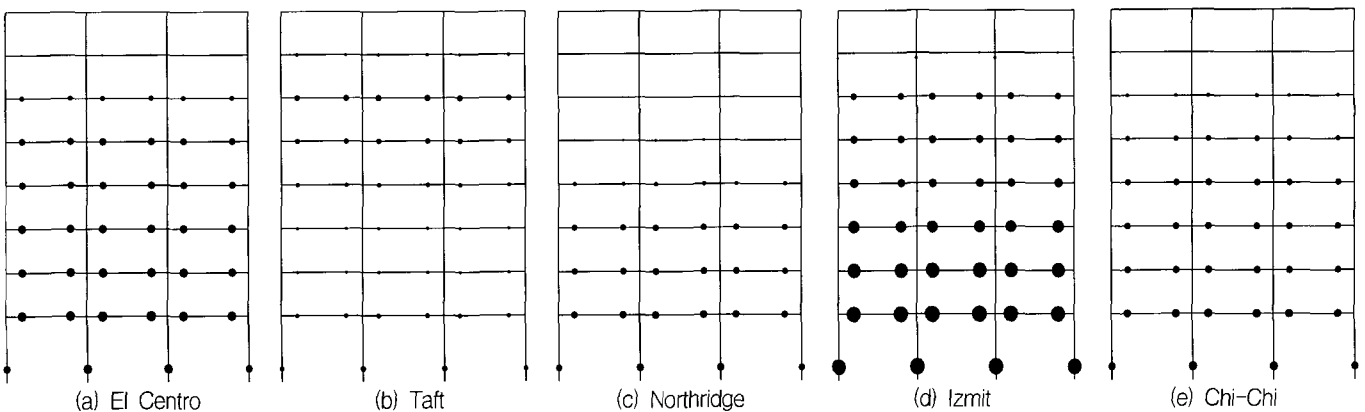


그림 8 비탄성 시간이력해석에 의한 5개 지진하중의 소성힌지분포(8층)



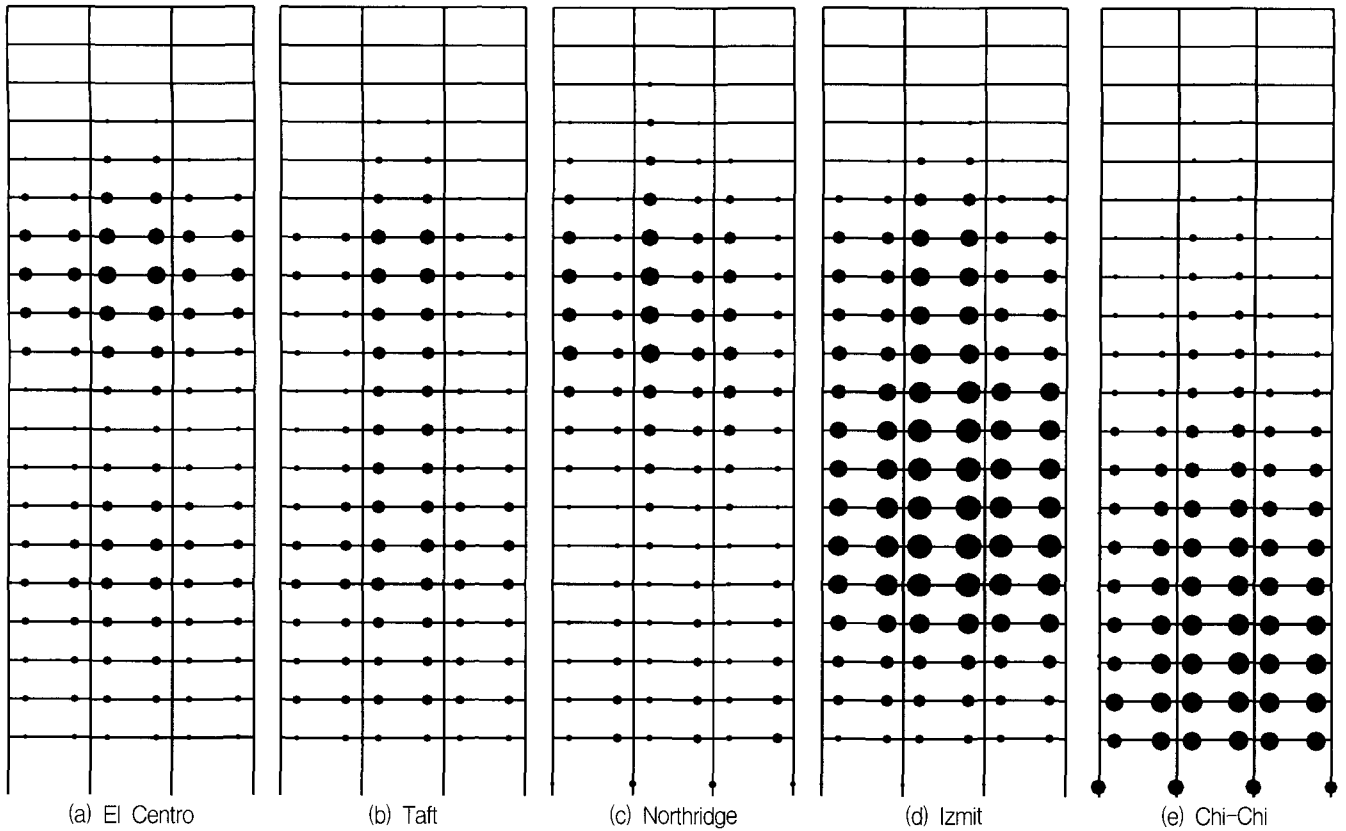


그림 9 비탄성 시간이력해석에 의한 5개 지진하중의 소성힌지분포(20층)

지진하중(El Centro, Northridge, Chi-Chi)을 선택하여 pushover 해석에 의한 변형능력과 내진성능을 평가하였다. 선택한 지진하중 중에서 El Centro 지진의 경우에는 하부층과 상부층에 소성거동이 집중되고 있으며, Northridge 지진의 경우에는 중간층 및 상부층, 그리고 Chi-Chi 지진의 경우에는 하부층에 소성거동이 집중되는 경우이다.

### 3.3 비탄성 전체응답 분석

본 연구에서는 8층과 20층 구조물에 서로 다른 비탄성 거동을 일으키는 3개의 지진하중에 대하여 pushover 해석을 이용하여 변형능력을 파악하였다. 그리고 본 연구에서 제안하는 내진성능평가 방법과 기존의 여러 가지 방법을 이용하여 성능점을 산정한 후에 비탄성 유효주기와 시스템 연성요구도와 같은 비탄성 지진응답을 비교하였다. 각각의 내진성능평가 방법들은 횡하중분배, 구조물의 변형능력 평가, 요구스펙트럼 산정, 성능점 산정 등에 대한 평가 방법이 서로 상이하기 때문에 비탄성 지진응답 역시 모두 다르다고 할 수 있다. 본 연구에서 적용된 내진성능평가 방법들에 대한 특징

은 표 4와 같다.

각각의 내진성능평가 방법을 이용하여 8층과 20층 예제구조물에 대한 비탄성 지진응답을 산정하였다. 표 5와 6에서는 3가지 지진하중에 대한 비탄성 유효주기, 최대변위, 시스템 연성요구도를 산정하고 비탄성 시간이력해석에 의한 최대변위와 비교하였다. 구조물의 전체응답으로 비교하면 대체적으로 FEMA-273에 의한 방법이 비탄성 지진응답을 과대평가하고 ATC-40에 의한 방법은 과소평가하는 것으로 파악되었다. FEMA-273에서 사용되는 변위계수법(DCM)은 5% 감쇠를 가지는 탄성스펙트럼에 의한 지진가속도와 비탄성 거동의 효과를 고려한 동적계수의 곱에 의하여 성능점 변위를 평가한다. 일반적으로 탄성스펙트럼에서의 응답가속도는 비탄성 스펙트럼에서의 가속도 값보다 크며, 장주기 영역에서 탄성과 비탄성에 대한 변위비( $C_1$ ) 또한 과대평가되기 때문에 이로 인하여 변위응답이 증폭되었다.

ATC-40의 능력스펙트럼법(CSM)에서는 비탄성 최대변형에서의 활선강성과 같은 강성을 가지는 등가선형시스템의 원리를 이용하고 비탄성 시스템에서와 동일한 최대변위 응답을 유발하는 충분한 감쇠를 등가감쇠로 평가한다. 등가감

표 4 내진성능평가 방법들의 특징

구분	횡하중 분배	변형능력 평가	요구스펙트럼 평가	성능점 산정
FEMA-273	고정적 하중분배 CASE-2	최상층변위 vs. 밀면전단력	탄성스펙트럼	변위계수법(DCM)
ATC-40	고정적 하중분배 CASE-3	최상층변위 vs. 밀면전단력	유효감쇠에 의한 비탄성 스펙트럼	능력스펙트럼법(CSM)
MPA	모드별 하중 분배	각 모드별 변위 vs. 밀면전단력	각 모드별 시간이력해석	모드별 pushover(MPA)
Proposed	CASE-4	등가변위 vs. 등가저항력	변위연성비에 의한 비탄성 스펙트럼	제안된 방법

표 5 8층 구조물에 대한 비탄성 유효주기, 최대변위, 시스템 연성요구도 비교

8층		FEMA-273	ATC-40	MPA			Proposed	Inelastic THA
				1차모드	2차모드	3차모드		
El Cento (1940)	$T_{eq}$ (초)	2.46	2.02	2.22	0.62	0.33	2.31	$\delta_{max}=8.07(\text{inch})$
	$\delta_{max}$ (inch)	9.51	6.77	8.78	1.10	0.15	7.29	
	$\mu_{sys}$	4.53	2.99	4.15	1.29	1.04	4.70	
Northridge (1994)	$T_{eq}$ (초)	2.36	2.35	1.90	0.56	0.24	1.99	$\delta_{max}=5.79(\text{inch})$
	$\delta_{max}$ (inch)	9.99	6.64	6.36	1.26	0.09	7.01	
	$\mu_{sys}$	4.29	2.93	2.83	1.66	1.00	3.01	
Chi-Chi (1999)	$T_{eq}$ (초)	2.24	1.70	2.12	0.42	0.24	1.98	$\delta_{max}=7.32(\text{inch})$
	$\delta_{max}$ (inch)	8.80	5.59	8.92	0.42	0.09	6.99	
	$\mu_{sys}$	3.78	2.47	4.06	1.00	1.00	3.01	

표 6 20층 구조물에 대한 비탄성 유효주기, 최대변위, 시스템 연성요구도 비교

20층		FEMA-273	ATC-40	MPA			Proposed	Inelastic THA
				1차모드	2차모드	3차모드		
El Cento (1940)	$T_{eq}$ (초)	4.06	3.08	3.49	1.06	0.55	3.58	$\delta_{max}=14.62(\text{inch})$
	$\delta_{max}$ (inch)	24.86	12.98	17.38	3.43	1.18	19.14	
	$\mu_{sys}$	2.36	1.29	1.66	1.29	1.00	1.68	
Northridge (1994)	$T_{eq}$ (초)	4.20	3.11	3.54	0.96	0.55	3.69	$\delta_{max}=17.25(\text{inch})$
	$\delta_{max}$ (inch)	24.60	12.76	18.40	2.16	0.67	20.75	
	$\mu_{sys}$	2.16	1.19	1.78	1.00	1.00	1.81	
Chi-Chi (1999)	$T_{eq}$ (초)	5.06	3.25	3.62	0.98	0.55	3.65	$\delta_{max}=20.99(\text{inch})$
	$\delta_{max}$ (inch)	37.06	14.58	19.85	2.84	0.69	19.91	
	$\mu_{sys}$	3.25	1.36	1.91	1.01	1.00	1.79	

쇠의 원리는 조화하중을 받는 단자유도 시스템의 공명상태 응답의 원리에 기초하여 계산되기 때문에 이력면적에 따른 유효감쇠를 과대평가할 수 있다. 즉, 능력스펙트럼법(CSM)에 의한 비탄성 변위응답은 시스템에 따라서는 크게 과소평가될 수 있다는 연구결과(Iwan 2000, Tagawa 2001, Chopra 1999)<sup>(4),(21),(22)</sup>를 본 연구에서도 확인할 수 있었다.

MPA 방법에서 각 모드별 성능점은 비연계된 단자유도 시스템의 비탄성 시간이력해석에 의하여 산정한다. 이 방법 역시 기본적인 개념은 등가의 단자유도 시스템에 대한 원리를 모드별로 분리하여 적용하고 전체응답은 모드별 응답을 조합함으로써 평가한다는 것이다. 예제구조물과 지진하중의 특성에 따라서 1차 및 2, 3차 모드에 대한 기여정도가 다르게 나타났다. 상부층 및 중간층에 소성거동이 발생하는 El Centro 지진과 Northridge 지진의 경우에는 2차 모드에 대한 기여정도가 크게 나타났으며, 하부층에 소성거동이 집중적으로 발생하는 Chi-Chi 지진은 거의 1차모드가 비탄성 지진 응답을 지배하였다.

본 연구에서 제안된 방법은 MPA 방법의 1차모드에 의한 비탄성 응답보다는 약간 크게 평가되어 고차모드의 영향을 직접적으로 고려할 수 있다는 것을 파악할 수 있다. 제안된 방법은 구조물의 충전단력을 반영할 수 있는 횡하중 분배방법을 적용하여 pushover 해석을 적용하였으며, 등가응답의 원리에 의하여 구조물의 변형능력을 평가한 것이 특징이다. 또한 구조물의 비탄성 거동 및 지진응답과 직접적인 연관성

이 있는 변위연성비를 이용하여 요구스펙트럼을 평가하였기 때문에 전체응답 뿐만 아니라 국부응답에서도 비탄성 시간 이력해석의 결과를 보다 정확하게 반영할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

각 방법에 의하여 산정된 성능점을 비교하여 보면 FEMA-273의 경우는 변형능력의 과대평가로 인하여 성능점 및 시스템 연성요구도가 가장 크게 평가되었고, ATC-40의 경우는 1차모드만의 영향을 반영하고 또한 유효감쇠의 과대평가로 인하여 전체적인 지진응답이 과소평가되었다. 대체적으로 MPA방법과 제안된 방법이 유사한 경향을 보이고 있으며 비탄성 시간이력해석의 결과와 비교하여 볼때 앞서 언급한 기존의 두가지 방법보다는 근사적으로 평가되는 것을 확인할 수 있다. MPA방법의 경우에는 각 모드별 응답을 조합한 결과가 반영되므로 고차모드의 영향이 반영되었다고 할 수 있으며, 성능점과 시스템 연성요구도에 대한 조합방법의 연구는 제시되고 있지 않는 상태이다. MPA방법과 제안된 방법 모두 탄성모드형상을 사용한다는 점이 공통적이라고 할 수 있지만 MPA의 경우에는 하중형상이 모드별로 고정적인 하중을 적용하는 반면에 제안된 방법의 경우에는 각 모드별 영향과 지진하중 및 구조물의 동적특성의 상호작용의 효과가 반영된 적응적 하중분배가 적용되었다는 것이 차이점이다. 이는 두 방법에 대한 전체응답의 비교보다는 다양한 지진하중에 의한 국부적 지진응답을 비교함으로써 확인할 수 있다.

### 3.4 비탄성 국부응답 분석

성능에 기초한 내진설계에서 구조물의 내진성능의 수준을 결정하는 가장 중요한 변수 중에 하나가 구조물에서 발생하는 소성힌지분포이다. 구조물의 비탄성 거동 특성은 항복이후에 각 부재에서 발생하는 소성모멘트에 의한 회전각으로 국부적인 지진응답을 예측할 수 있다. 그리고 각 층에서 발생하는 비탄성 층간변위와 층별 회전연성도와 같은 응답은 시스템의 붕괴메카니즘을 평가하는데 매우 중요한 수단이 된다. 일반적으로 불규칙적인 반복하중을 받는 비탄성 시간이력해석에 의한 비탄성 거동을 단조증가하는 하중을 이용하는 pushover 해석을 이용하여 반영한다는 것은 매우 어려운 일이다. Pushover 해석에 의한 구조물의 비탄성 거동은 시간이력해석과는 달리 구조물의 관성력과 감쇠력을 반영할 수 없다는 점과 무엇보다도 소성힌지의 발생순서가 다르다는 것이 가장 큰 차이점이다. 즉, 비탄성 정적해석은 어떤 특정한 부재가 소성거동이 발생한 이후에 모멘트 재분배와 부재력의 이동으로 인하여 다른 부재로 소성힌지 발생이 진행되지만 비탄성 시간이력해석의 경우에는 동시에 각 부재에서 소성힌지가 발생할 수 있다는 것이 두가지 해석에서의 가장 큰 차이점이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 소성힌지분포에 의하여 힌지 발생위치를 상대적으로 비교하였고 최대 소성힌지 회전각의 절대적 크기를 각 내진성능평가 방법별로 분석하였다. 그리고 비탄성 층간변위에 대한 평가를

이용하여 구조물의 국부적인 비탄성 변위연성도에 대한 거동 양상을 파악하였다. 또한 구조물의 국부적인 연성요구도를 파악하기 위하여 각 층에서 발생하는 소성힌지 항복 회전각과 최대 소성힌지 회전각의 비를 이용하여 층별 회전연성 요구도를 평가하였다.

본 연구에서는 이와 같은 다양한 국부적 비탄성 평가지수들을 이용하여 앞절에서 제시한 4가지 방법을 이용하여 3가지 지진하중에 대한 8층과 20층의 비탄성 지진응답을 비교·분석하였다. 그리고 각 방법에 대한 평가결과를 비탄성 시간이력해석에 의한 방법과 비교함으로써 본 연구에서 제시하는 제안된 방법의 정확성과 신뢰성을 검증하였다.

#### 3.4.1 8층 구조물에 대한 비탄성 국부응답 평가

중층이라고 할 수 있는 8층 구조물에서는 비탄성 영역에서도 1차 진동모드가 지진응답을 지배하기 때문에 소성힌지 분포는 대체적으로 중간층과 하부층에 집중되었으며, 그림 10, 11, 12에서 볼 수 있듯이 4가지 방법 모두가 비슷한 양상을 보였다. 그러나 FEMA-273과 ATC-40 방법은 3.3절의 성능점 산정 결과에서도 알 수 있듯이 그림 13, 14, 15에서 나타나는 최대 소성힌지 회전각, 비탄성 층간변위, 층별 회전연성 요구도와 같은 국부적 응답에서도 비탄성 시간이력해석에 비하여 각각 과대평가 및 과소평가된다는 것을 볼 수 있다. 8층 구조물의 경우에는 MPA 방법과 본 연구에서 제안된 방

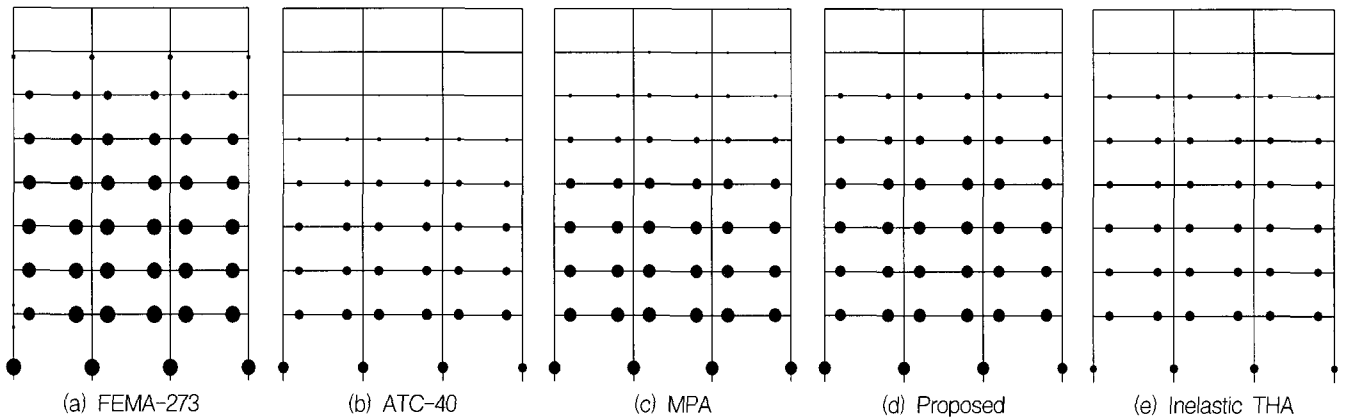


그림 10 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(8층) : El Centro(EPA=0.4g), Reference angle=0.02(radian)

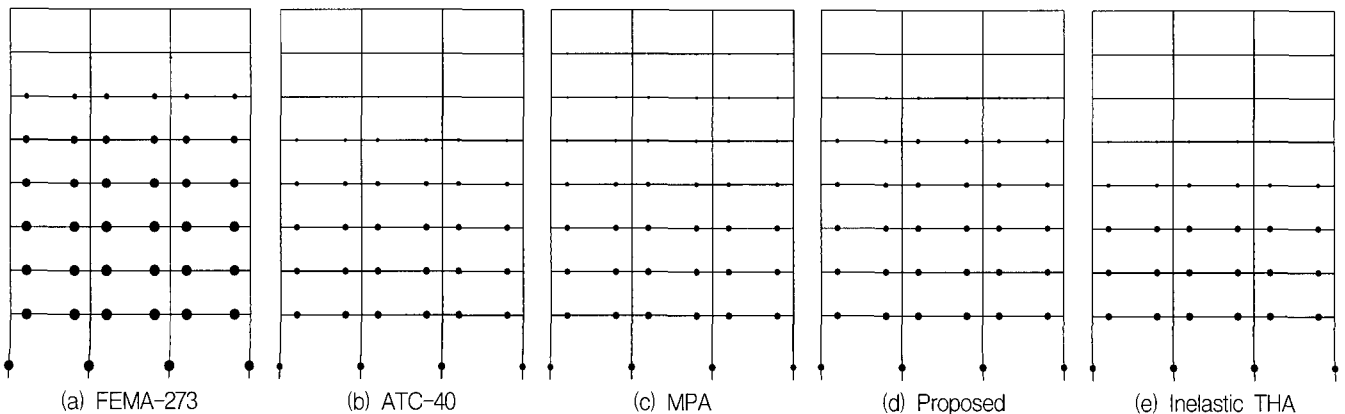


그림 11 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(8층) : Northridge(EPA=0.4g), Reference angle=0.02(radian)

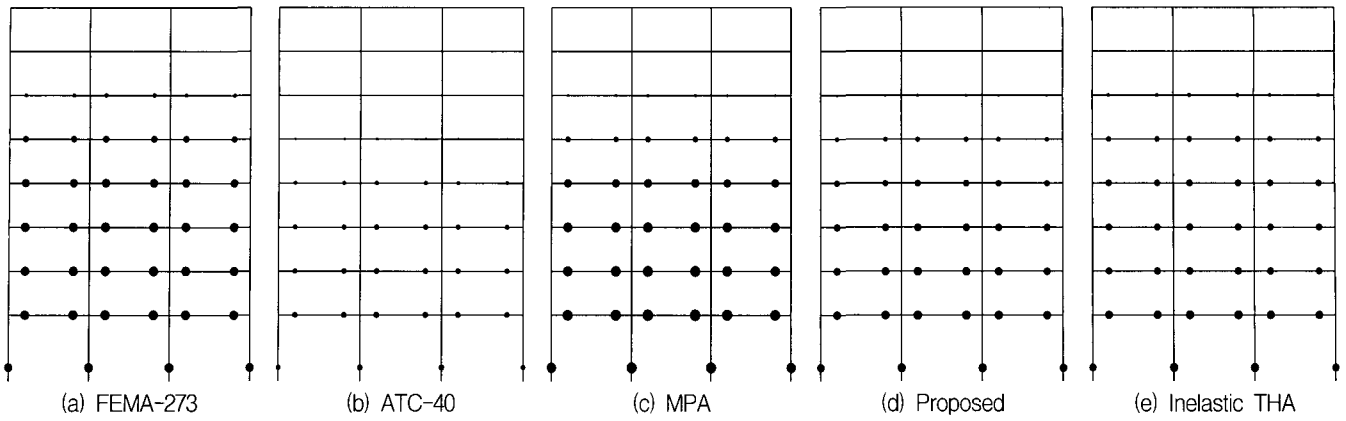


그림 12 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(8층) : Chi-Chi(EPA=0.4g), Reference angle=0.02(radian)

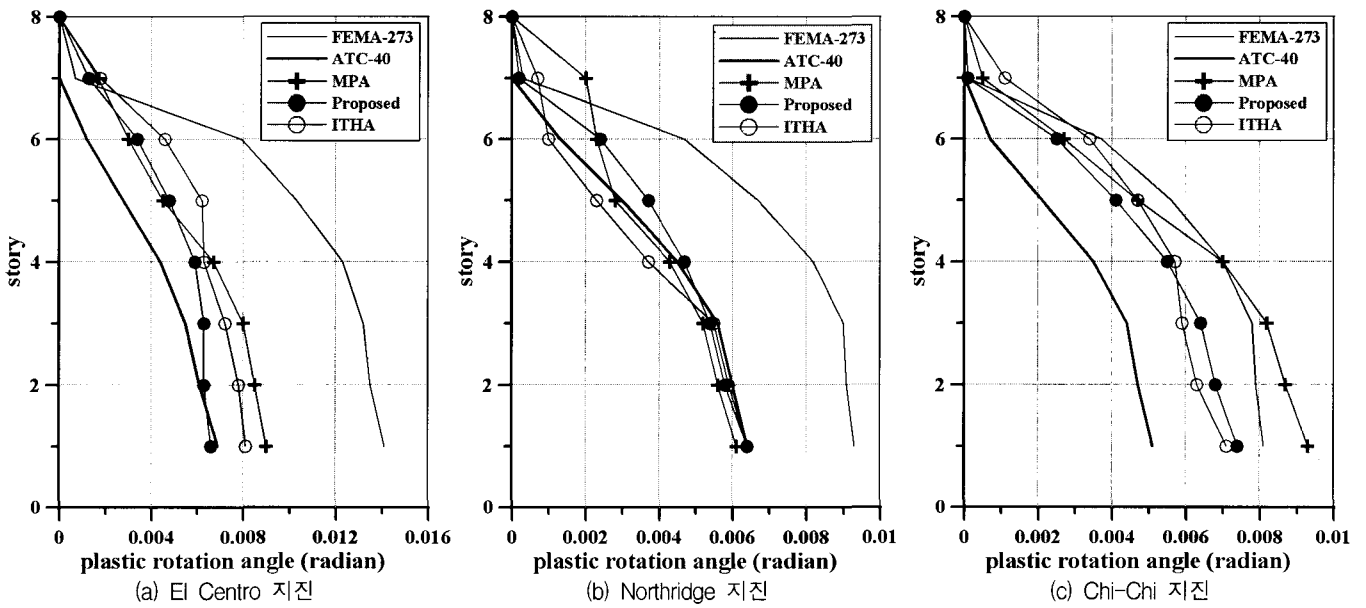


그림 13 각 방법에 의한 층별 최대 소성힌지 회전각 비교(8층)

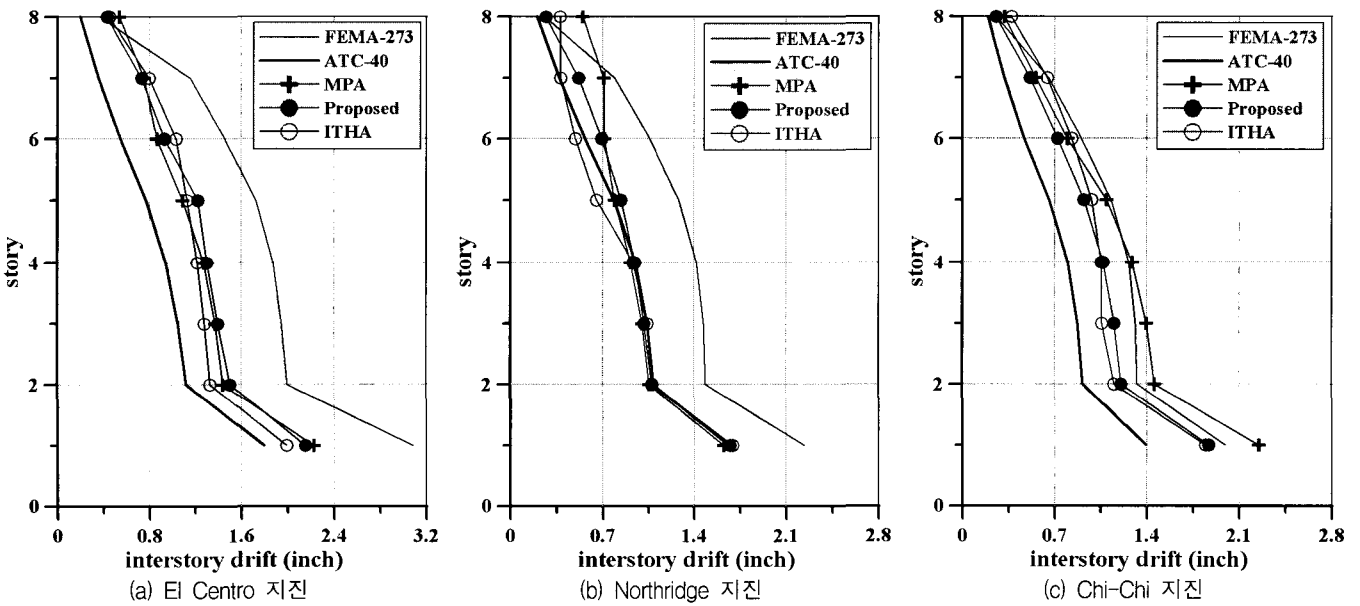


그림 14 각 방법에 의한 비탄성 층간변위 비교(8층)

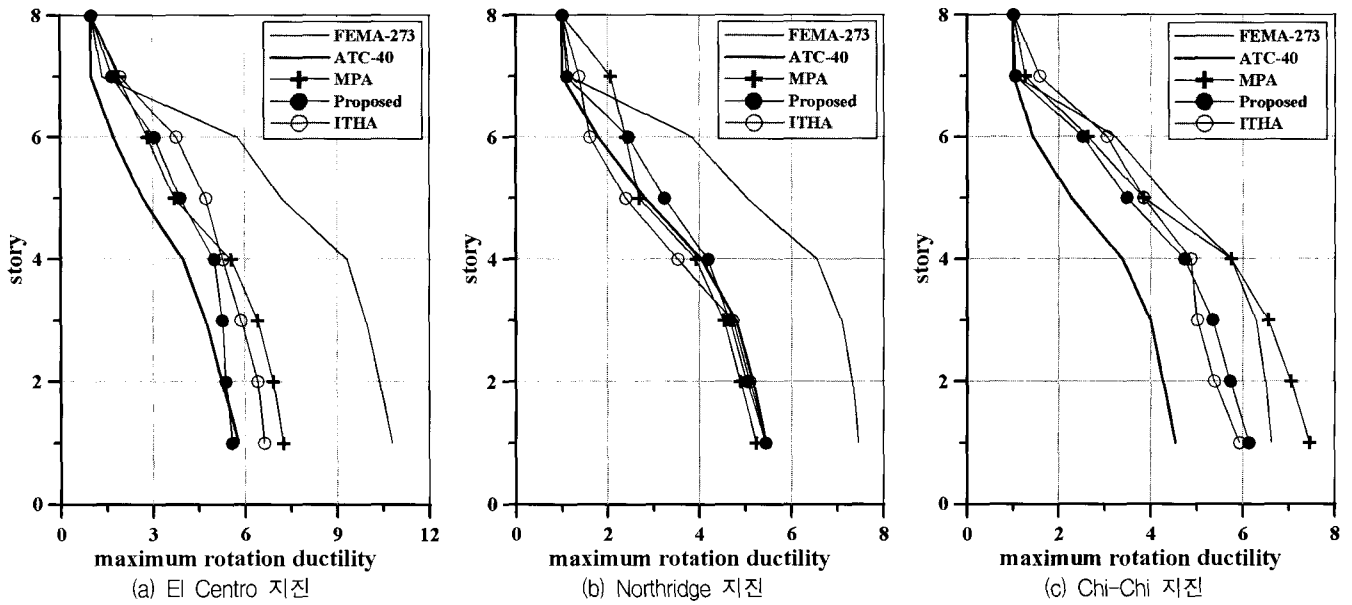


그림 15 각 방법에 의한 층별 회전연성 요구도 비교(8층)

법은 El Centro 지진에서는 다양한 국부적 비탄성 지진응답을 FEMA-273과 ATC-40 방법보다 정확하게 반영하고 있다. 그러나 MPA 방법의 경우에 소성힌지의 발생위치는 비탄성 시간이력해석 결과를 비교적 정확하게 반영하고 있지만 최대 소성힌지 회전각, 비탄성 층간변위, 층별 회전연성 요구도의 경우는 각 모드별로 탄성과 비탄성 지진응답을 누적하여 조합하기 때문에 다소 과대평가 될 수 있는 가능성이 있다. MPA 방법의 경우에 각 지진하중의 특성에 따라서 조금

씩 다르게 평가되며, 특히 Northridge 지진을 받는 경우의 상부층과 Chi-Chi 지진을 받는 경우의 하부층에서 지진응답을 다소 과대평가하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4.2 20층 구조물에 대한 비탄성 국부응답 평가

고차모드의 영향을 받을 수 있는 20층 예제구조물의 경우에는 그림 16, 17, 18에서 볼 수 있듯이 지진하중의 특성에 따라서 비탄성 거동의 형태가 분명하게 구분되었다. 그리고

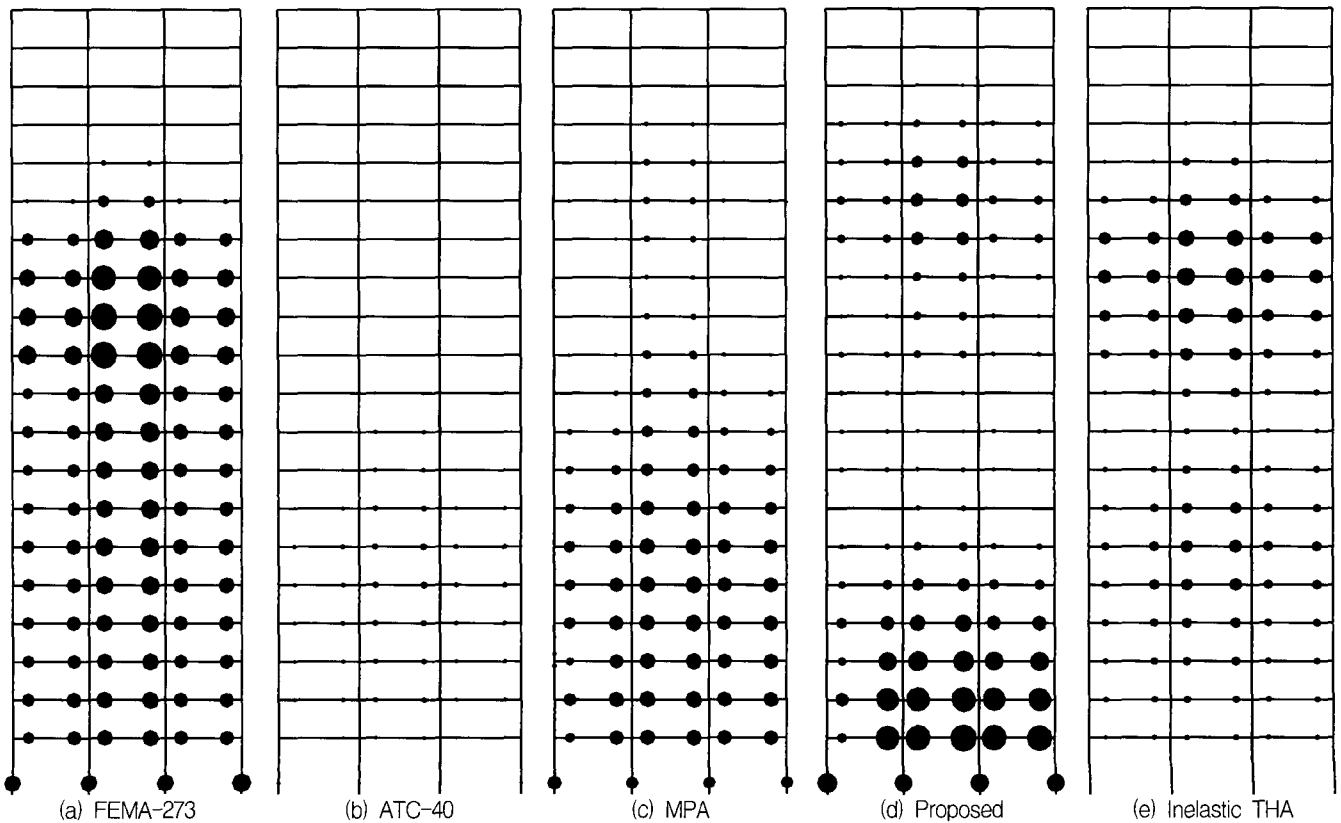


그림 16 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(20층) : El Centro(EPA=0.4g), Reference angle=0.02(radian)

각 방법에서 다르게 적용되는 횡하중 분배방법이 소성힌지의 위치를 결정하는 가장 중요한 변수가 된다는 것을 확인할 수 있다.

FEMA-273과 ATC-40의 경우에는 횡하중 분배방법이 항상 일정하기 때문에 지진하중에 따른 성능점이 달라져 소성힌지의 크기는 변하지만 소성힌지의 위치는 지진하중의 영

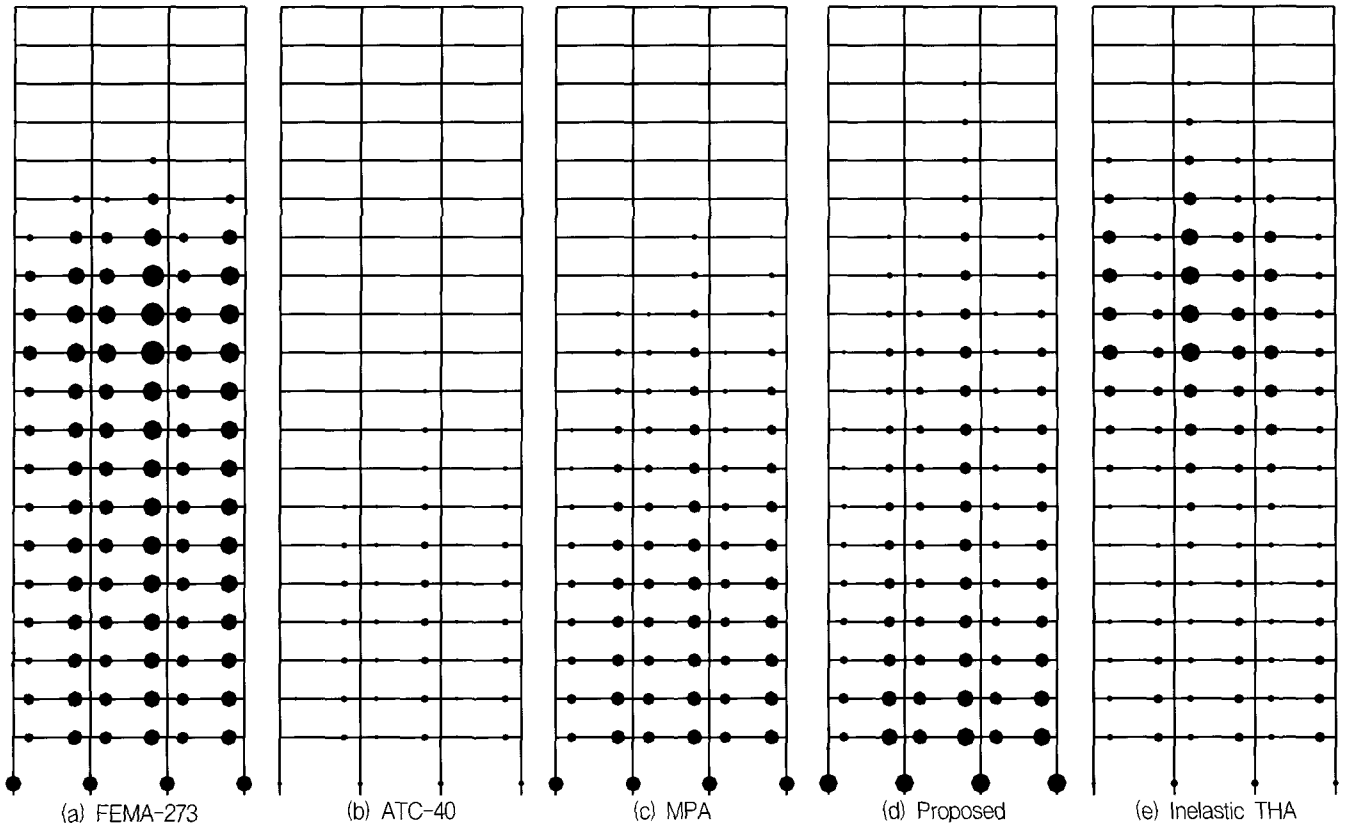


그림 17 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(20층) : Northridge(EPA=0.4g), Reference angle=0.02(radian)

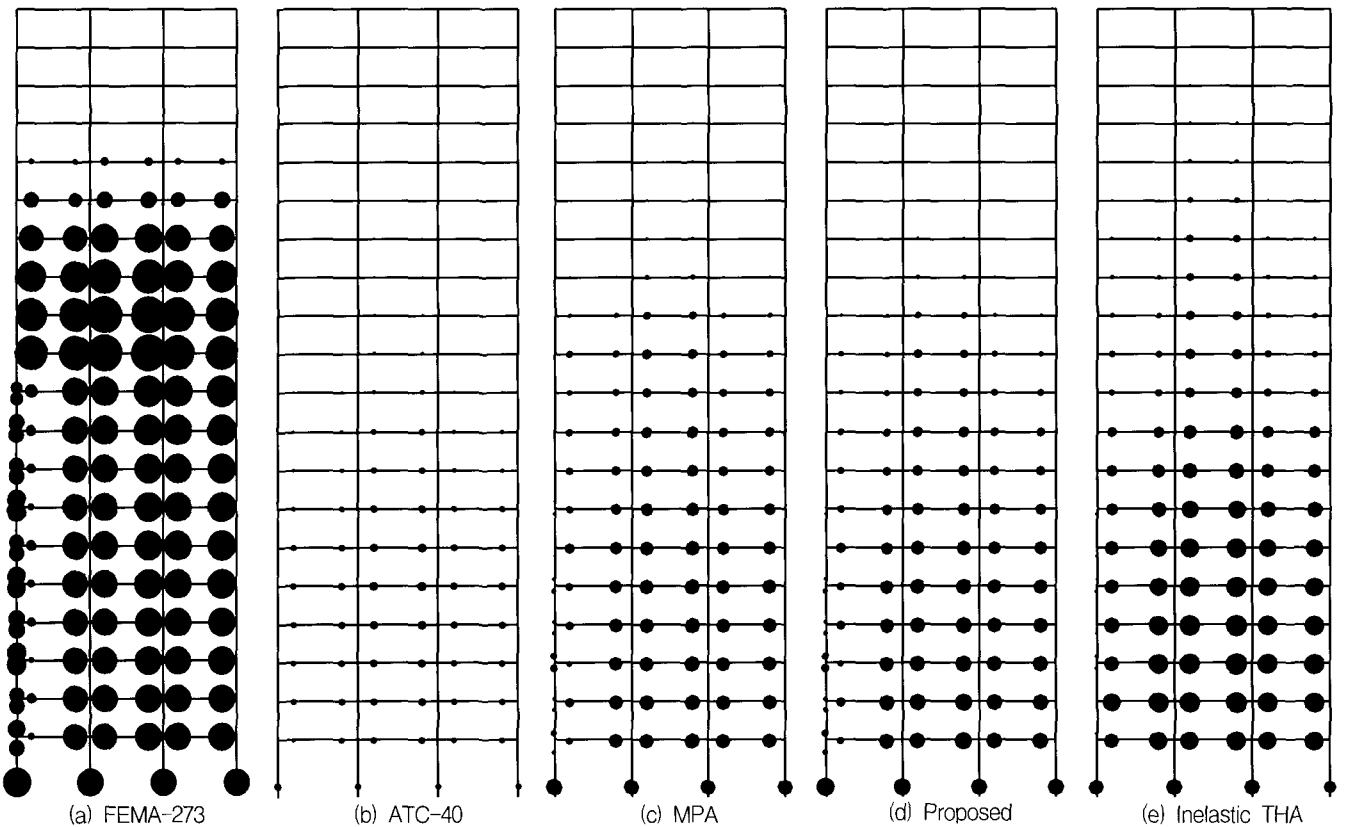


그림 18 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(20층) : Chi-Chi(EPA=0.4g), Reference angle=0.02(radian)

항에 관계없이 일정한 분포를 나타내었다. MPA 방법 또한 구조물의 모드형상에 따라 조합하는 방법이므로 결국 이 방법 또한 각 모드별 하중분포형상은 지진하중의 특성과는 상관없이 항상 일정하다고 할 수 있다. 본 연구에서 적용하는 적응적 하중분포 형상만이 지진하중 및 구조물의 특성에 따라서 변하면서 적용한다는 것을 알 수 있다. 특히, 제안된 방법의 경우에는 고차모드의 영향을 반영할 수 있는 횡하중 분배방법의 영향으로 다른 3가지 방법에 비하여 비탄성 시간이력해석의 결과를 비교적 정확하게 반영하고 있다는 것을 알 수 있다. MPA 방법의 경우에는 소성힌지의 발생위치는 고차모드의 효과를 반영하고 있지만 El Centro 지진과 Northridge 지진의 경우에 그림 19에서 나타난 최대 소성힌지 회전각의 크기는 상부층을 다소 과소평가하는 것으로 나타났다. 이것은 MPA 방법에서 무시하였던 각 모드간의 상

호작용에 의한 응답 기여의 정도가 지진하중과 구조물의 특성에 따라서는 커질 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 소성힌지 회전각의 경우에는 부재가 탄성거동을 하면 발생하기 않기 때문에 응답의 조합과정에서 그 효과가 누락될 수 있으므로 비탄성 거동을 다소 과소평가 할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

그림 20과 21에서 나타난 비탄성 층간변위와 층별 회전연성요구도 평가에서는 El Centro 지진의 경우에는 제안된 방법이 하부층에 다소 과대평가되고 있지만 전체적인 거동형상은 다른 방법보다 비탄성 시간이력해석 결과를 잘 반영하고 있다. 그리고 Chi-Chi 지진의 경우 역시 제안된 방법이 가장 정확하게 층간변위를 평가하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 Northridge 지진의 경우에는 중간층 및 상부층에서 발생하는 소성거동을 어떤 방법도 정확하게 반영할 수 없었다. 이것은 비탄성 시간이력해석에서는 최대 층간변위가 각

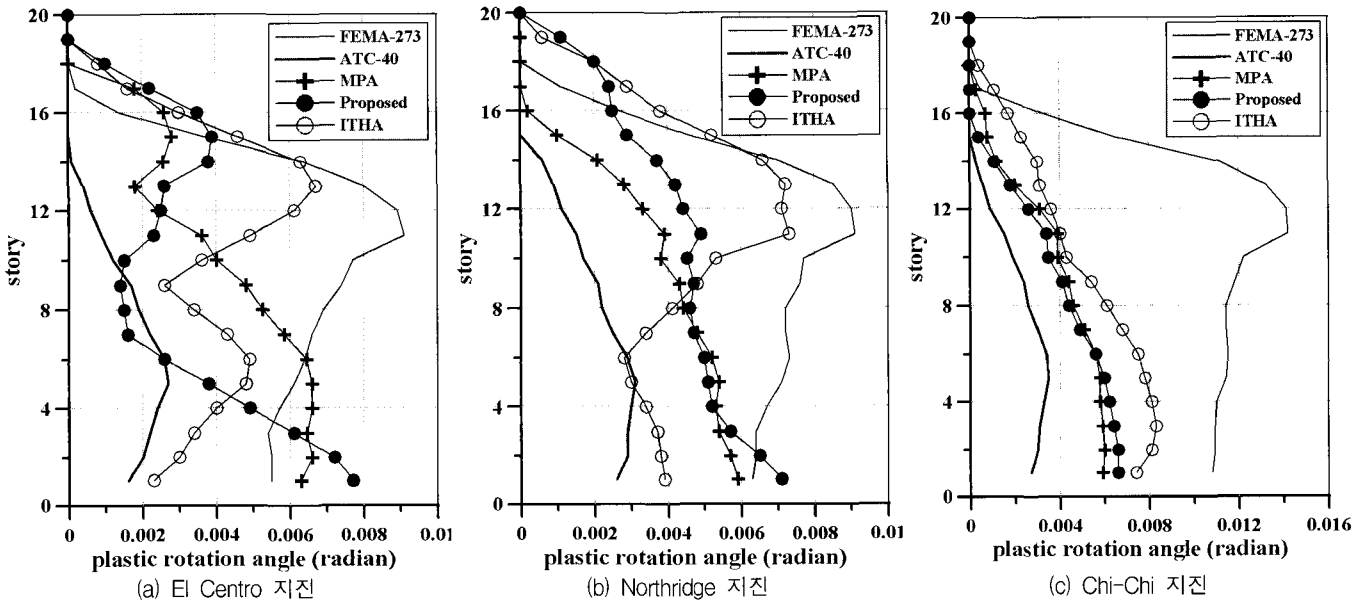


그림 19 각 방법에 의한 층별 최대 소성힌지 회전각 비교(20층)

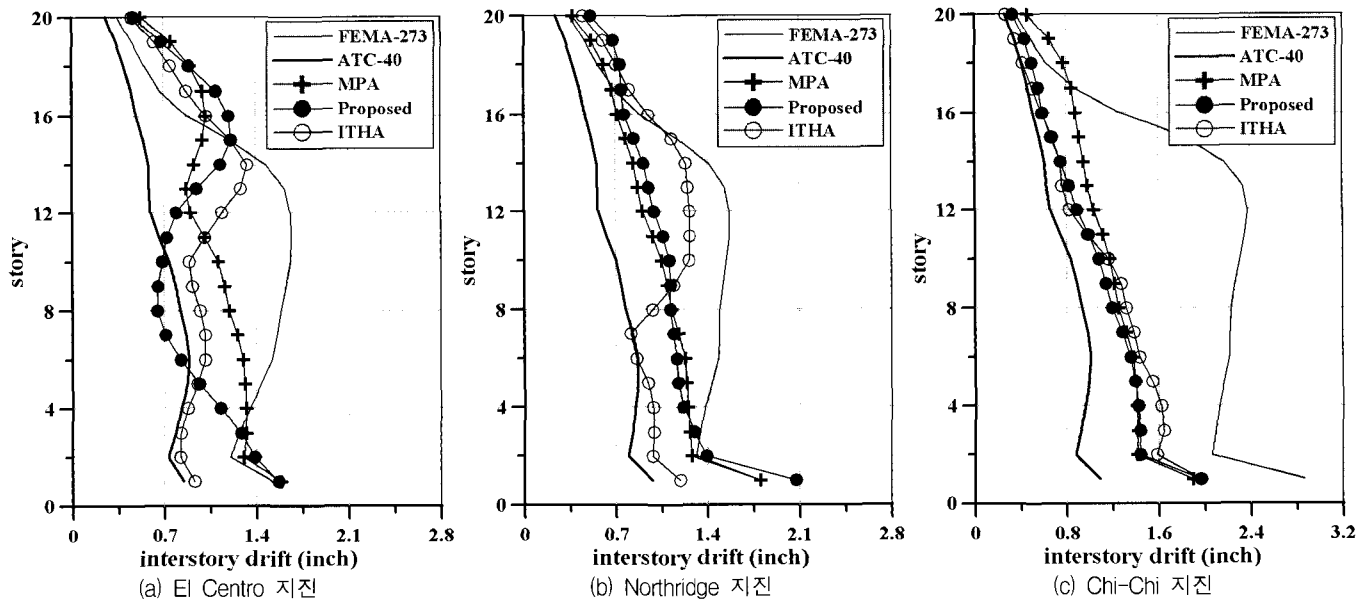


그림 20 각 방법에 의한 비탄성 층간변위 비교(20층)

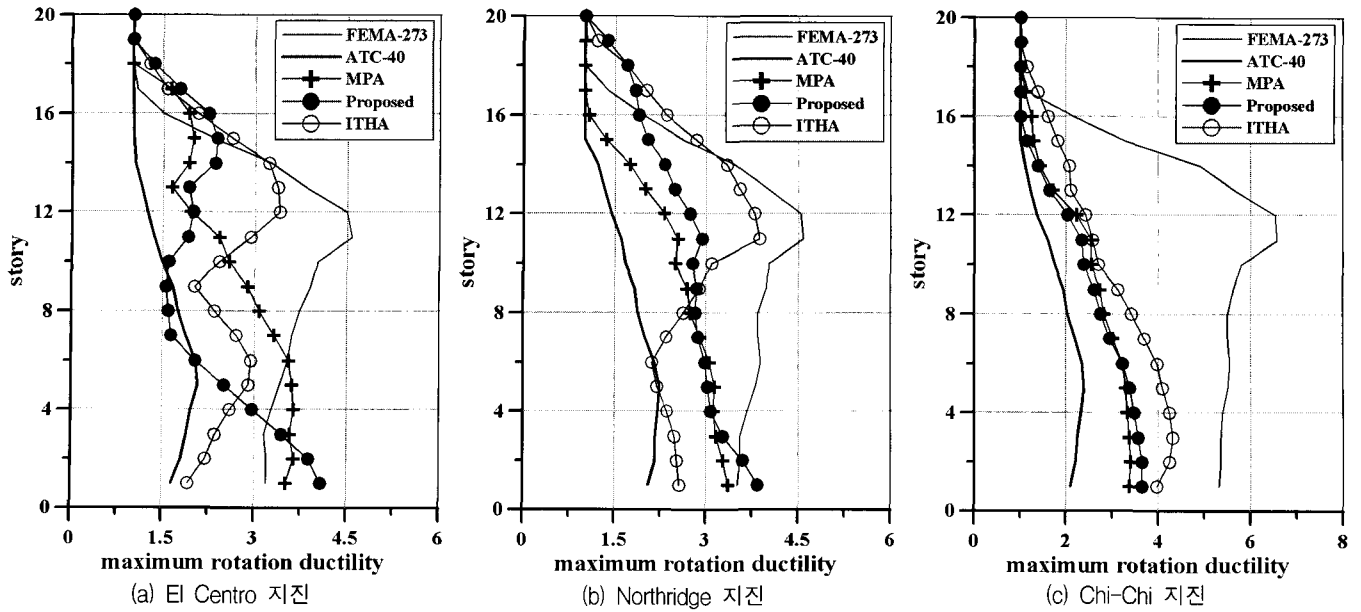


그림 21 각 방법에 의한 층별 회전연성 요구도 비교(20층)

층에서 동시에 발생할 수 있지만, 단조증가 하중의 특성을 가지는 pushover 해석에서는 강기동 약보 개념으로 설계된 구조물 파괴메카니즘의 특성 상 구조물 1층 기동의 아래 부분부터 파괴가 진행되며 최대 층간변위가 각 층에서 동시에 발생할 수 없기 때문인 것으로 파악된다.

### 3.4.3 EPA=0.6g 에 대한 20층 구조물의 비탄성 국부응답 평가

본 연구에서는 20층 구조물에 대하여 지진하중의 크기를

증가시켰을 경우에 비탄성 시간이력해석과 pushover 해석에 의한 비탄성 지진거동을 비교·분석하기 위하여 EPA를 0.6g로 조정하여 해석을 수행하였다. 특히, EPA가 0.4g인 경우에 3가지 지진하중에 의한 비탄성 소성거동 양상이 어떻게 변화되는지를 관찰하고 지진하중의 크기 변화에 대해서 각 방법에 의한 응답 평가 결과를 확인하였다. 그림 22, 23, 24는 3개 지진하중의 EPA를 0.6g로 조정하고 20층 구조물에 대하여 각 방법에 따른 소성흔지분포를 나타낸 것이며,

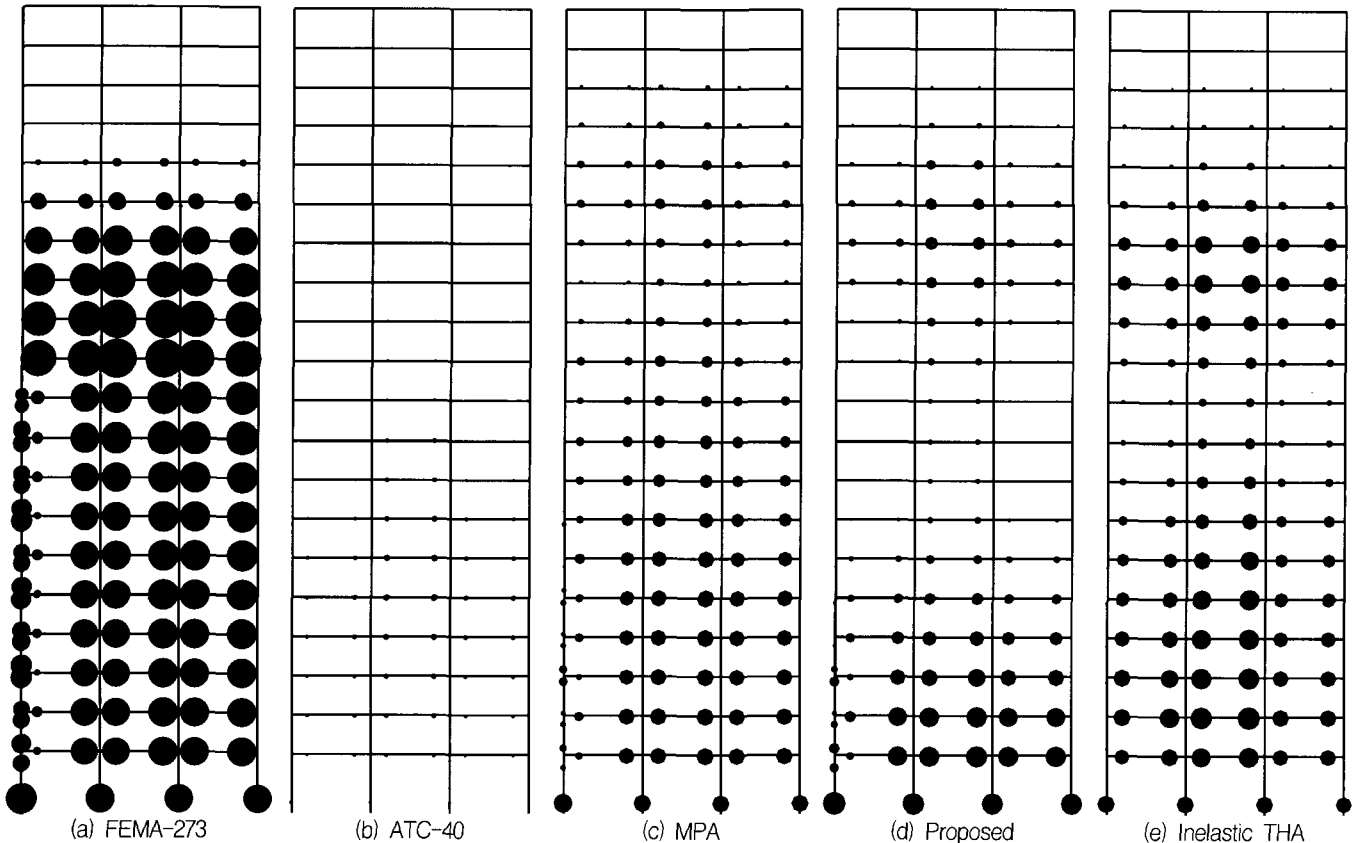


그림 22 각 방법에 의한 소성흔지분포 비교(20층) : El Centro(EPA=0.6g), Reference angle=0.02(radian)



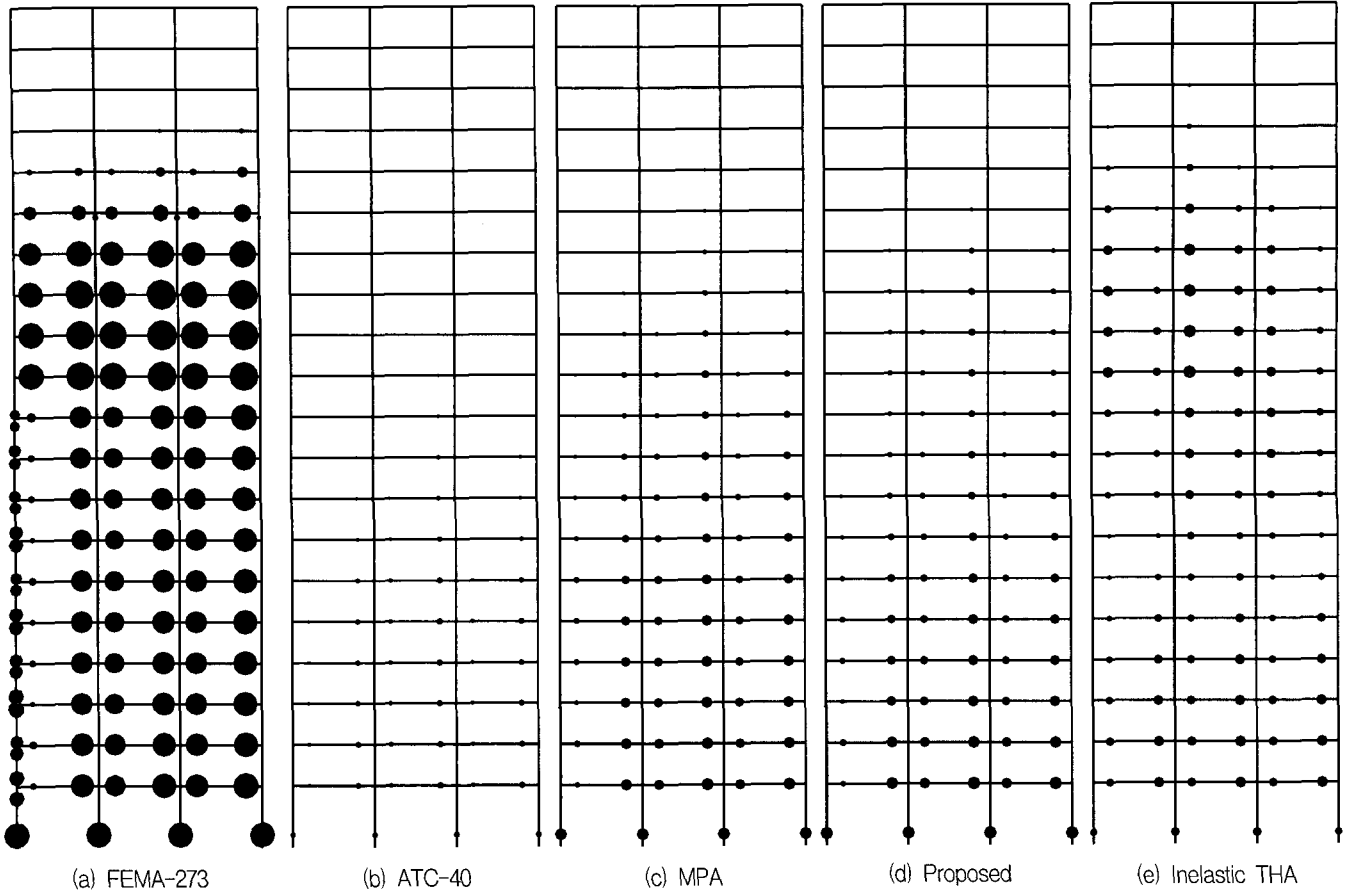


그림 23 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(20층) : Northridge(EPA=0.6g), Reference angle=0.03(radian)

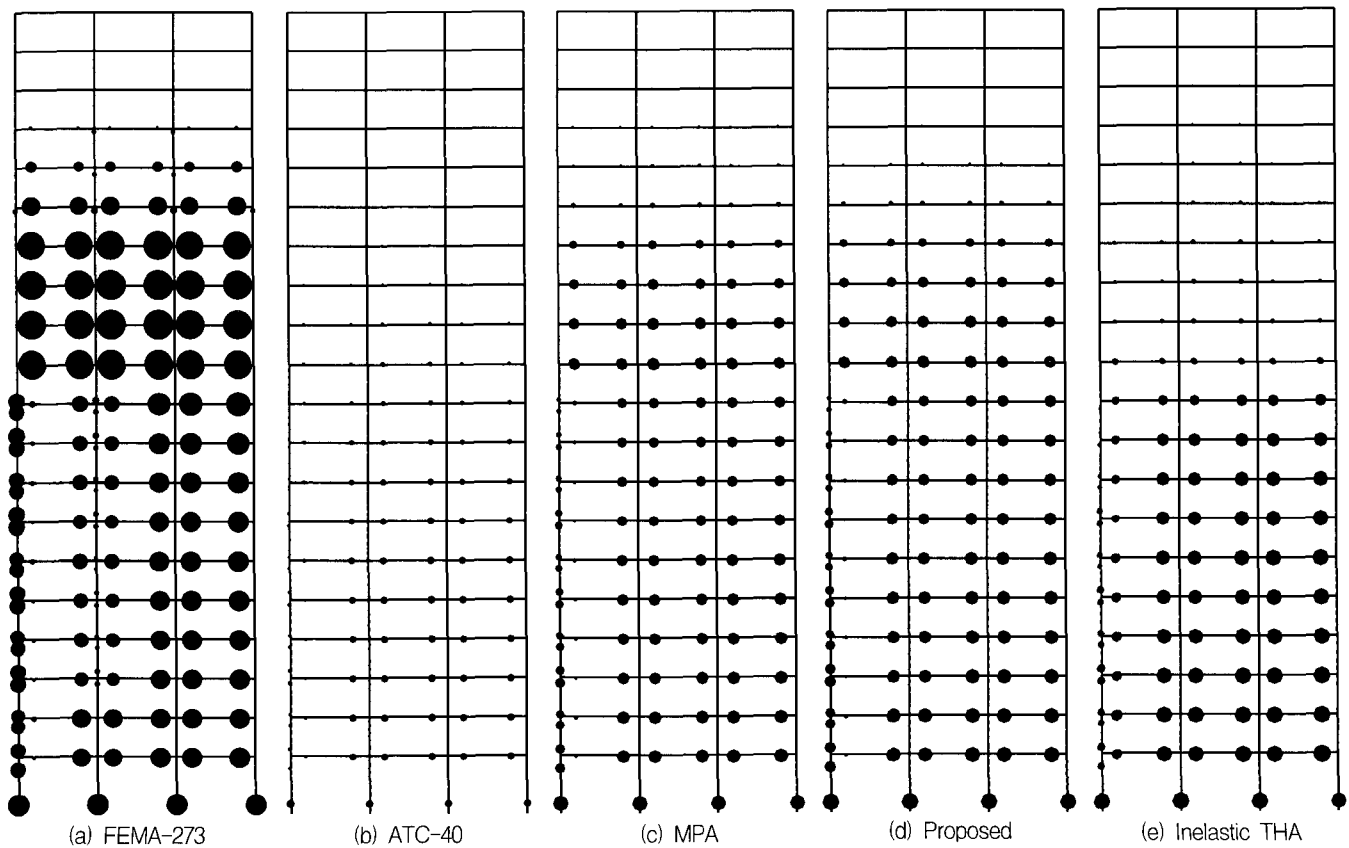


그림 24 각 방법에 의한 소성힌지분포 비교(20층) : Chi-Chi(EPA=0.6g), Reference angle=0.04(radian)

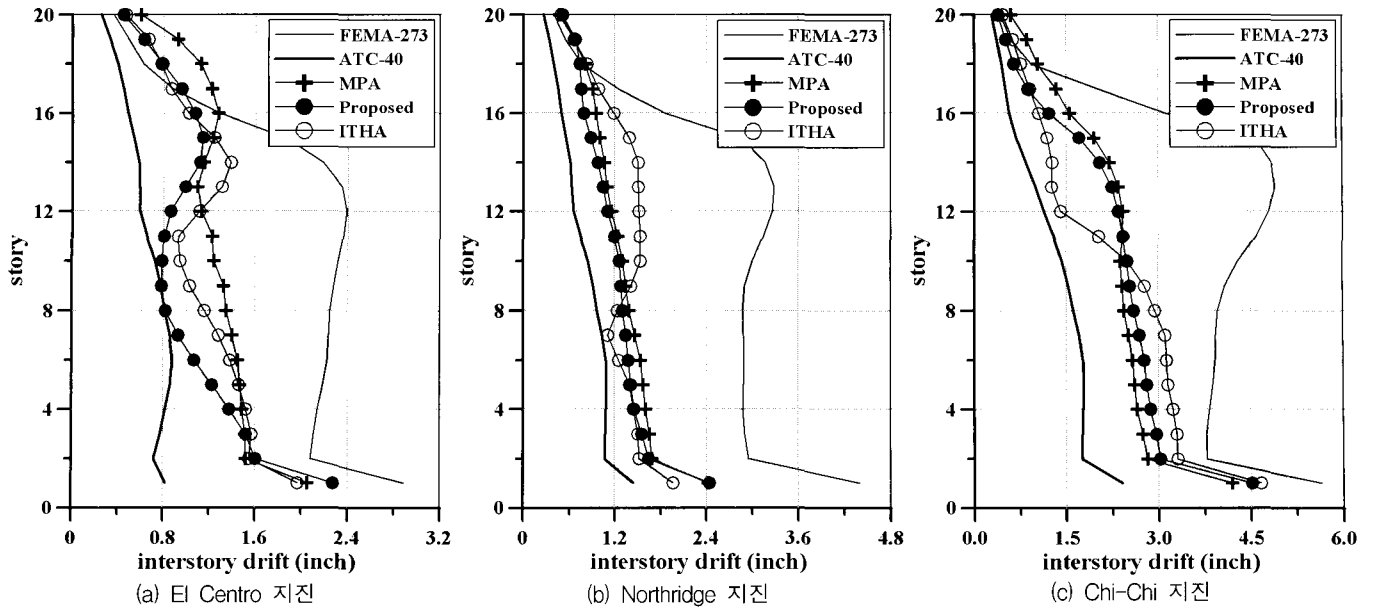


그림 25 각 방법에 의한 비탄성 층간변위 비교(20층) : EPA=0.6g

그림 25는 비탄성 층간변위를 비교한 것이다. EPA가 0.6g인 경우에 pushover 해석에 의한 소성힌지는 EPA 0.4g와 비교하여 비례적으로 증가하지만 비탄성 시간이력해석에 의한 소성힌지는 하부층에 집중되어 증가하였다. pushover 해석에 의한 소성거동이 하부층부터 진행된다는 것을 고려할 때 지진하중이 커지면 하부층에서의 소성거동 양상이 비탄성 시간이력해석에 의한 결과와 유사해지며 전체적인 소성거동의 양상 또한 제안된 방법에 의한 소성힌지분포 및 층간변위가 다른 방법과 비교하여 보다 정확하게 평가하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 pushover 해석에 의한 중층 및 고층 구조물의 비탄성 지진요구도와 내진성능을 다양한 해석방법을 이용하여 평가하였다. 그리고 본 연구에서는 고차모드를 반영할 수 있는 횡하중 분배방법과 등가응답의 원리를 이용한 구조물의 변형능력 평가, 변위연성비에 의한 요구스펙트럼 원리를 적용한 성능점 산정 등의 방법이 적용된 새로운 해석방법을 제안하였다. 다양한 지진하중 중에서 8층과 20층 구조물에 서로 다른 비탄성 거동양상을 보이는 3개의 지진하중을 선택하고 pushover 해석과 비탄성 시간이력해석에 의한 비탄성 전체 및 국부응답을 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Pushover 해석에서 구조물의 탄성 및 비탄성 거동은 횡하중 분배방법에 따라서 달라진다. 본 연구에서 제안하는 구조물의 층전단력을 반영할 수 있는 적응적 횡하중 분배방법을 이용하면 선형탄성 범위에서는 응답스펙트럼해석에 의한 결과와 동일한 부재력을 산출하기 때문에 구조물의 지진응답 및 거동을 보다 정확하게 고려할 수

있다. 또한 제안된 횡하중분배 방법은 해석에서 고려되는 지진하중의 진동수 특성에 부합하도록 적응적으로 변하기 때문에 고차모드에 의한 탄성 및 비탄성 거동 양상을 비교적 정확하게 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

(2) 횡하중의 분배는 구조물의 동적특성과 지진하중의 특성을 모두 고려할 수 있는 방법을 사용해야 비탄성 거동을 정확하게 분석할 수 있다. 기존의 UBC-97, FEMA-273 등의 내진설계기준에서 사용하는 하중분배 방법은 지진하중의 영향을 반영할 수 없는 단순한 설계목적으로 사용될 수 있으며, ATC-40에서 제시하는 1차 모드에 의한 하중분배 방법은 고차모드의 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다. 그리고 이러한 방법들에 의한 구조물의 비탄성 거동은 구조물이 동일할 경우에는 작용하는 지진하중과는 상관없이 항상 일정한 변형 형상과 소성힌지 분포를 나타내기 때문에 지진하중과 대상구조물에 따라서 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

(3) FEMA-273에서 제안된 변위계수법은 대체적으로 구조물의 비탄성 변위응답을 과대평가함으로써 시스템 연성도와 국부적 지진응답 역시 크게 평가된다. 그리고 ATC-40에서 사용되는 능력스펙트럼법은 유효감쇠의 과대평가로 인하여 비탄성 변위응답을 과소평가하였다. 이 문제는 유효감쇠 평가식을 다르게 적용할 수 있는 연구결과를 이용하면 어느 정도 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 pushover 해석 시 적용하는 1차 모드 특성을 이용한 횡하중 분배방법으로 인하여 발생하는 비탄성 거동 평가의 오차는 개선되어야 할 것이다. MPA 방법은 아직까지 이론적인 정당성이 확립되지는 않았지만 구조물의 소성힌지분포와 층간변위의 평가에서 고차모드의 영향을 어느 정도 반영할 수 있고 특히 각 모드별 진동주기에 대한 변화를 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 다양한 진동수 성분과 크기를 가지는 지진하중과

구조시스템의 특성에 따라서 모드간 상호작용으로 인한 응답의 기여정도가 커질 수 있고 소성한지 회전각은 다소 과소평가되고 층간변위와 층별 회전연성요구도는 과대평가 될 수 있는 가능성이 있다고 판단된다. 그러므로 이 방법에 의하여 구조물의 변형능력과 내진성능을 평가할 때에는 지진하중의 특성과 구조시스템에 따라서 응답의 오차가 커질 수 있으므로 신중한 고려가 요구된다.

- (4) 제안된 방법은 pushover 해석시 탄성범위내에서의 시스템 층전단력을 반영할 수 있는 횡하중분배를 사용하였기 때문에 비탄성 범위에서도 어느 정도 고차모드의 효과를 반영할 수 있다. 또한 등가응답의 원리와 변위연성도를 이용한 요구스펙트럼에 의하여 성능점을 정확하게 평가할 수 있으므로 구조물의 시스템 연성요구도와 최대변위와 같은 비탄성 전체응답은 비교적 정확하게 산정할 수 있다. 제안된 방법은 지진하중 및 구조물의 동적특성에 적응적으로 변화되어 비탄성 거동을 평가함으로써 소성한지분포, 층간변위와 같은 비탄성 국부응답을 기존의 다른 방법에 비하여 비탄성 시간이력해석 결과를 정확하게 반영할 수 있다. 그러므로 제안된 방법은 구조물의 비탄성 변형능력과 내진성능을 평가하는 효율적인 해석방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 추후연구과제

본 연구는 다양한 지진하중을 받는 구조물에 대하여 pushover 해석을 이용한 구조물의 변형능력과 내진성능평가에 대한 제안된 방법의 신뢰성과 적용성을 검증하는 것이 목적이기 때문에 철골 모멘트골조의 해석모델을 단순화 하였다. 그리고 제안된 방법과 비교된 다른 연구결과들도 본 연구에서와 동일한 해석모델을 사용하였다. 그러나 부재의 강성과 강도 변화를 포함하는 이력특성, 접합부 패널존의 효과 그리고 P-Delta효과 등을 고려한다면 본 예제에서 나타나는 비탄성 거동과는 상당히 다른 양상을 보일 수 있다. 특히 고층 철골 모멘트 골조에서의 P-Delta효과는 항복 이후에 시스템의 음(negative)강성에 의한 내진성능 저하와 같은 파괴메카니즘을 보이는 것으로 최근 연구들에 의하여 밝혀졌다. 이러한 철골 모멘트골조에서의 부재 이력특성, 접합부 특성 및 P-Delta효과를 고려하였을 경우에 본 연구에서 제안한 해석방법에 대한 타당성과 정확성을 검증하는 연구가 필요할 것이다. 이 밖에도 비탄성 영역에서 구조물 진동주기가 장주기화 됨에 따라서 응답스펙트럼 상에서의 동적응답 변화를 정확하게 예측할 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 2003년도 두뇌한국 21 사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학기술단 우수연구센터 지원금에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," *ATC-40 Report*, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. FEMA, "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," *FEMA 273*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 1997. 10.
3. NEHRP, *Recommended Provisions for Seismic Regulation for Buildings and Other Structures*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
4. Iwan, W. D., Huang, C. T., and Guyader, A. C., "Important features of the response of inelastic structures to near-field ground motion," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, 2000. 2.
5. Naeim, F., Skliros, K. and Reinhorn, A. M., "Influence of hysteretic deteriorations in seismic response of multi-story steel frame buildings," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, 2000. 2.
6. Krawinkler, H. and Seneviranta, G. D. P. K., "Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation," *Engineering Structures*, Vol. 20, Nos. 4-6, 1998, pp. 452-464.
7. Fajfar, P., "Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 970-993.
8. Miranda, E., "Estimation of Inelastic Deformation Demands of SDOF Systems," *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 127, No. 9, 2001, pp. 1005-1012.
9. Lee, D. G., Choi, W. H., and Lee, J. W., "Evaluation of Seismic Performance Using Representative Responses of Multistory Buildings," *7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Boston, Massachusetts, 21-25 2002. 7.
10. Lee, K. and Foutch, D. A., "Performance prediction and evaluation of steel moment frames for seismic loads," *SAC Background Document SAC/BD-00/25*, SAC Joint Venture, Richmond, California, 2000.
11. ATC, "Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings," *ATC 3-06 Applied Technology Council Report*, 2nd Printing, Palo Alto, California, 1984.
12. Freeman, S., Sasaki, K., and Paret, T., "Multi-Mode Push-over Procedure (MMP) - A Method to Identify the

- Effects of Higher Modes in a Pushover Analysis," *Proceedings of the 6th National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, Seattle, Washington, 1998.
13. Requena, M. and Ayala, A. G., "Evaluation of a Simplified Method for the Determination of the Nonlinear Seismic Response of RC Frames," *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, 2000. 2.
  14. Lee, D. G. and Kim, H. C., "Efficient seismic analysis of multi-story buildings," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 4, No. 5, 1996, pp. 497-511.
  15. Reinhorn, A. M., *Inelastic techniques in seismic evaluations, Seismic Design Methodologies for the Next Generation of Codes*, Fajfar P and Krawinkler H. eds., Bled, Slovenia, 1997. 6.
  16. Gupta, B. and Kunnath, S.K., "Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 2, 2000, pp. 367-391.
  17. Bracci, J. M., Kunnath, S. K., and Reinhorn, A. M., "Seismic Performance and Retrofit Evaluation of Reinforced Concrete Structures," *Journal of the Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 123, No. 1, 1997. 1, pp. 3-10.
  18. Chopra, A. K. and Goel, R. K., "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for buildings: theory and preliminary evaluation," *Report No. PEER 2001/03*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2001. 1.
  19. Gupta, B. and Kunnath, S. K., "Effect of hysteretic model parameters on inelastic seismic demands," *6th US National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, 1998. 6.
  20. Song, J. K. and Pincheira, J. A., "Spectral displacement demands of stiffness and strength degrading systems," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 4, 2000, pp. 817-851.
  21. Tagawa, H. and MacRae, G., "Capacity spectra method for estimating SDOF oscillator demands," *Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*, American Society of Civil Engineers, Washington, D. C., 2001. 5.
  22. 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 California, Berkeley, 1999.
  23. Aschheim, M. and Black, E. F., "Yield Point Spectra for seismic design and rehabilitation," *Earthquake Spectra*, Vol. 16, No. 2, 2000, pp. 317-335.
  24. Tsai, K. C. and Li, J. W., "DRAIN 2D+ - A General Purpose Computer Program for Static and Dynamic Analyses of Inelastic 2D Structures Supplemented with a Graphic Processor," *Report, No. CEER/R86-07*, National Taiwan Univ, 1997. 7.
  25. Choi, W. H and Lee, D. G., "Evaluation of Seismic Performance Multistory Building Using Improved Capacity Spectrum Method," *8th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction*, Singapore, 5-7, 2001. 12.
  26. Chopra, A., K. and Goel, R. K., "Modal Pushover Analysis of SAC Buildings," *Third US-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, August 16-18, Seattle, Washington, 2001.
  27. Gupta, A. and Krawinkler, H., "Dynamic P-Delta Effects for Flexible Inelastic Steel Structures," *Journal of the Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol. 126, No. 1, 2000, pp. 145-154.
  28. ICBO, *Uniform Building Code*, International Conference on Building Officials, Whittier, California, 1997.
  29. Krawinkler, H. and Gupta, B., "Story drift demands for steel moment frame structures in different seismic regions," *6th US National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington, Earthquake Engineering Research Institute, 1998. 6.
  30. Lee, D. G., Song, J. K. and Yun, C. B., "Estimation of system-level ductility demands for multi-story structures," *Engineering Structures*, Vol. 19, No. 12, 1997, pp. 1025-1035.
  31. Otani, S., "New seismic design provisions in Japan," *Proceedings of the U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering for Reinforced Concrete Building Structures*, Sapporo, Japan, 2000. 9.