

철골구조물의 변형능력평가를 위한 MPA 방법의 적용성 검토

Application of Modal Pushover Analysis for Deformation Capacity Evaluation of Steel Moment Frames

최 원 호*
Choi, Won-Ho

김 기 주**
Kim, Ki-Joo

이 동 근***
Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Pushover analysis is frequently used for evaluation of seismic performance and determination of seismic demand of a building structure in the current structural engineering practice field. However, pushover analysis has a advantage for estimation of seismic demands, which cannot account for the contributions of higher modes to response or for a redistribution of inertia forces because of structural yielding and the associated changes in the vibration properties of the structures. Recently, Chopra and Goel(2001) derived uncoupled inelastic dynamic equation of motion with several assumptions in the pushover analysis. By using this approach, pushover analysis for each mode is carried out and modal pushover analysis method, which can consider higher mode effects of the building, was suggested. The principle objective of this study is to introduced the modal pushover analysis by Chopra et al.(2001) and investigated the applicability and validity of this method for the steel moment frames subjected to various earthquake ground motions.

1. 서론

비선형 정적해석은 성능에 기초한 내진설계 분야에서 건축구조물의 비선형 변형능력을 예측하고 내진성능을 평가하는데 가장 많이 적용되고 있는 해석법이다. 최근에 연구되고 있는 ATC-55 『Evaluation and Improvement of Inelastic Seismic Analysis Procedures』 프로젝트는 건축물의 비선형 해석분야에 대한 기존 연구방법의 이론적 근거와 근본적 가정에 대한 문제점을 제시하고 적용성(applicability), 한계성(limitation) 그리고 신뢰성(reliability)을 검토함으로써 새로운 건물에 대한 설계와 기존건물의 성능평가 및 향상에 적용될 수 있는 비선형 정적해석 방법을 개발하는 것이 그 목적이라고 할 수 있다. 일반적으로 비선형 정적해석은 단조증가 하중상태에서 구조물 높이에 따른 횡하중을 분포시킴으로써 항복 이후의 동적 안정상태를 파악하는 실용적인 해석방법이다. 그러나 강성과 강도의 불규칙성을 가지고 있는 시스템, 하나의 지배적인 모드가 나타나지 않는 고층 또는 비정형 건축물이나 가진된 지진의 특성에 따라 많은 오류가 발생하는 문제점을 내포하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 많은 연구들이 수행되었으며, 최근에는 비선형 정적해석 수행시 여러 개의 모드 영향을 고려하는 해석 방법이 Chopra와 Goel(2001) 등에 의하여 개발되었다. 본 연구에서는 Chopra 등에 의하여 제시된 모드별 비선형정적해석(modal pushover analysis, 이하 MPA)에 대하여 소개하고 다양한 지진하중을 받는 철골구조물에서의 적용성을 검토하고자 한다. Chopra 등의 연구에서는 특정지진하중과 9층 철골모멘트 골조에 의하여 수행되어 MPA 방법의 정확성을 주장하였다. 본 연구에서는 지반특성과 주파수 특성이 다른 4개의 지진에 대하여 강기동-약보 개념으로 설계된 8층과 20층 철골모멘트 골조에 MPA 방법을 적용하고 비선형 정적응답을 비선형 시간이력해석 결과와 비교함으로써 이 방법의 타당성을 검토하고자 한다.

* 학생회원 성균관대학교 건축공학과 박사수료

** 학생회원 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정 회 원 성균관대학교 건축공학과 교수

2. 모드별 비선형 정적해석 (Modal Pushover Analysis)

최근에 Chopra 등은 연구 보고서 (Report No. PEER-2001/03) 『A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings』에서 비선형 정적해석을 수행할 때에 각 모드별 특성을 반영할 수 있는 새로운 해석방법을 제안하였고, 이 방법을 적용하여 건축구조물에 서 고차모드가 반영된 비선형 지진응답을 평가하였다.

2.1 모드별 비선형 정적해석 (MPA)에 대한 개요

모드별 비선형 정적해석(MPA)은 동역학적 이론에 기초하여 기존의 비선형 정적해석의 개념적 간단함과 계산상의 편리함을 유지하면서 지진응답 산정에서는 보다 높은 정확성을 확보할 수 있다는 것이 가장 큰 특징이다. MPA 방법에서는 비선형 해석시 강성과 질량의 변화가 없다는 가정 하에 탄성 모드형상을 사용하여 응답스펙트럼해석의 원리를 이용한다. 비선형 해석은 일반적으로 강성저하에 따른 시스템 주기특성의 변화와 각 모드간의 상호작용으로 인한 간섭으로 인하여 모드별 분리가 불가능하다. 그러나 각 모드간의 상호작용의 영향은 1차모드가 지배적인 건물의 경우에 실제 예상되는 지진하중의 범위내에서는 내진설계 적용시 무시할 수 있는 공학적인 오차를 가진다는 것이 MPA 방법의 근본 원리이다. 일반적으로 비선형 정적해석을 수행하는 경우에 가장 정확한 지진응답을 산정하는 것으로 평가받고 있는 적응적 비선형 정적해석(adaptive pushover analysis)은 시간변동(time-variant)에 따른 강성의 변화를 고려함으로써 구조물의 요구수준을 명확하게 평가할 수 있다. 그러나 이 방법은 개념적으로 매우 복잡하며 응답 평가시 많은 소요시간이 요구되므로 실제 건물에 적용시 어려움이 있다. MPA 방법은 지배모드를 이용한 모드해석의 개념적 간단함과 고차모드의 영향을 효과적으로 반영할 수 있고, 이 방법은 소성힌지분포와 층간 변위와 같은 비선형 지진응답의 평가에서 잘 반영되는 것으로 연구되었다.

2.2 모드별 비선형 정적해석 (MPA)의 이론 및 과정

탄성모드형상을 이용하는 MPA 방법은 비선형 시스템의 강성과 질량 그리고 감쇠 특성은 선형시스템과 동일하다는 가정을 이용하여 모드별로 분리된 비연계 운동방정식(uncoupled equation of motion)을 유도한다. 각 모드별 운동방정식은 단자유도 시스템으로 전환이 되며 등가단자유도 시스템에서의 비선형 시간이력해석과 모드별 비선형 정적해석을 통하여 모드별 지진응답을 산정할 수 있다. 그리고 적절한 조합방법을 사용하여 다자유도 시스템의 지진응답을 평가한다.

(1) 모드별 비선형 운동방정식의 유도

비선형 다자유도 구조물의 일반적인 운동방정식은 식(1)과 같이 표현된다. 일반적으로 각 요소들은 초기 하중 재하 곡선을 이선형으로 이상화할 수 있으며, 하중을 제거하거나 다시 가할때 초기 하중 곡선과는 다른 경로를 갖는다. 그러므로, N 층에서 횡력(f_s)과 횡변위(u)관계값은 하나의 해가 아니지만 시간에 대한 변위이력은 독립적이다. 그러므로 이선형 특성을 가지는 비선형 시스템의 일반식은 다음과 같이 표현된다.

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

$$\text{여기서, } u(t) = \sum_{n=1}^N \phi_n q_n(t) \quad m\ddot{u} = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N \Gamma_n m \phi_n$$

비선형 시스템의 강성은 선형시스템과 동일하다고 가정한다면 질량과 감쇠 역시 두 시스템이 같으며, 선형시스템에서의 고유진동모드는 비선형 시스템에서도 동일하게 적용될 수 있다. 모드 응

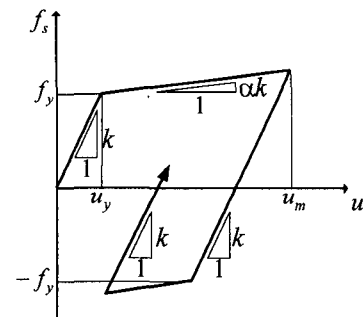


그림 1 힘과 변위의 비선형 관계

답 해석에서와 같이 식(1)의 각 항에 탄성 모드형상벡터 ϕ_n 를 전승한 후에 직교조건(orthogonality relationship)을 적용하면 식(2)을 얻을 수 있다.

$$\ddot{q}_n + 2\zeta_n\omega_n\dot{q}_n + F_{sn}/M_n = -\Gamma_n\ddot{u}_g(t) \quad (2)$$

여기서, $F_{sn} = F_{sn}(q_n, \text{sign } q_n) = \phi_n^T f_s(u_n, \text{sign } q_n)$ 이다.

비선형 시스템에서 저항력 F_{sn} 은 모드좌표계 $q_n(t)$ 에 종속이며 구조물의 항복으로 인하여 연계된(coupled) 방정식이 된다. Chopra 등(2001)의 연구에 의하면 실용적인 지진하중의 범위내에서는 (El Centro 지진에 대하여 $0.25 \times \text{PGA} \sim 3.0 \times \text{PGA}$) 각 모드별 상호작용에 의한 간섭이 무시할 정도의 오차를 가진다. 그러므로 모드별 좌표계에서 n 개 방정식의 연계를 무시하면 유효 지진하중에서 구조물의 근사적인 응답 $u(t)$ 은 저항력 F_{sn} 에 대하여 하나의 모드 좌표계(q_n)에만 의존하게 되어 비선형 다자유도 시스템에서 모드별로 분리된 단자유도계 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\ddot{D}_n + 2\zeta_n\omega_n\dot{D}_n + F_{sn}/L_n = -\ddot{u}_g(t) \quad (3)$$

여기서, $F_{sn} = F_{sn}(D_n, \text{sign } \dot{D}_n) = \phi_n^T f_s(D_n, \text{sign } \dot{D}_n)$ 이며 비연계된(uncoupled) 관계가 성립한다. 이러한 가정에 의하여 발생하는 오차의 원인은 비선형 시스템에서의 항복으로 인하여 증가하는 모드별 좌표계의 연계를 무시하였기 때문이며, 모드별 지진응답에 대하여 접침의 원리를 적용하는 과정에서 발생한다. MPA 방법에서는 이러한 모드별로 분리된 단자유도 시스템의 동적특성과 응답을 비선형 정적해석에 적용함으로써 다자유도 시스템의 응답을 평가한다.

(2) 모드별 비선형 정적해석 (MPA)의 과정

- ① 구조물의 탄성 진동에 의한 고유치해석을 통하여 고유진동수와 모드형상을 계산한다.
- ② 각 모드별 하중분포 형상 $s^*_n = m\phi_n$ 을 결정한다.
- ③ 구조물은 각 모드에서 FEMA-273의 변위계수법(DCM)을 이용하여 초기 목표변위(target roof displacement)를 산정한 후에 다자유도 시스템의 밀면전단력과 최상층 변위 관계를 산정한다.

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left(\frac{T_g^2}{4\pi^2} \right) g \quad (4)$$

- ④ 각 모드별 힘과 변위 관계를 이선형 곡선으로 이상화하고 항복변위와 변형경화비를 구한다.
- ⑤ $F_{sn}/L_n - D_{ny}$ 이용하여 모드별 비선형 단자유도 시스템으로 전환한다.

모드참여계수 Γ_n 과 모드별 유효질량 M^*_n 을 이용하여 응답변위와 응답가속도를 계산한다.

$$\text{- 응답변위(spectral displacement) : } D_{no} = u_{mo}/\Gamma_n\phi_m \quad D_{ny} = u_{my}/\Gamma_n\phi_m \quad (5)$$

$$\text{- 응답가속도(spectral acceleration) : } F_{sno}/L_n = V_{bno}/M^*_n \quad F_{sny}/L_n = V_{bny}/M^*_n \quad (6)$$

- ⑥ 각 모드별 단자유도 시스템에서 비선형 동적해석을 수행하고 모드별 최대변위 D_n 를 산정한다.
- ⑦ $u_{mo} = \Gamma_n\phi_m D_n$ 을 이용하여 다자유도 시스템에서의 모드별 성능점을 구한다.
- ⑧ 모드별 성능점을 이용하여 모드별 비선형 정적해석을 다시 수행한다.
- ⑨ 비선형 정적해석에 의한 각 모드별 응답을 SRSS로 조합하여 전체 응답을 계산한다.

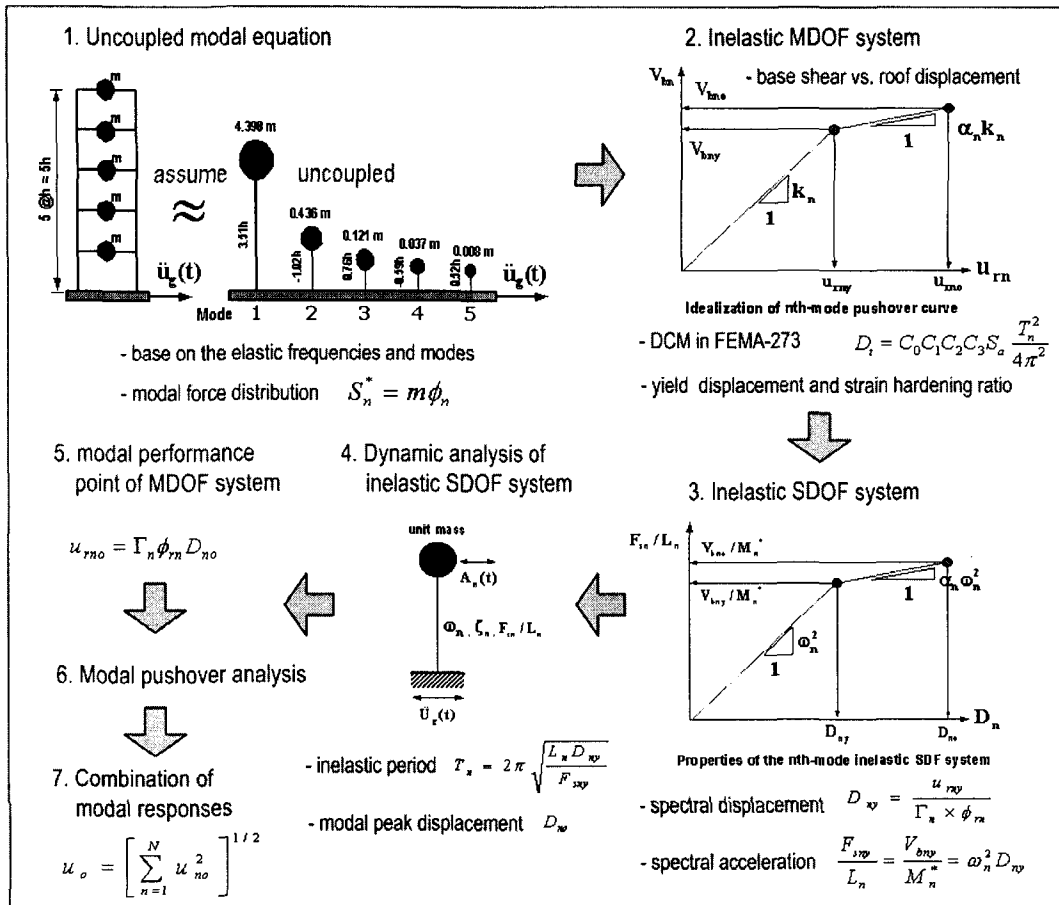


그림 2 모드별 비선형 정적해석 (Modal Pushover Analysis) 의 진행 과정

3. 철골 모멘트골조의 변형능력평가

본 연구에서는 철골 모멘트골조 8층과 20층 예제구조물에 대하여 모드별 비선형 정적해석(MPA)방법을 적용하여 지진응답을 평가하였다. 저층 및 고층 철골골조에 대하여 고차모드효과에 의한 지진응답을 분석하고 지반특성과 주파수 성분이 각각 다른 다양한 지진하중을 선택하여 소성힌지분포와 층간변위에 대한 모드별 비선형 지진응답을 평가한 후에 비선형 시간이력해석의 결과와 비교함으로써 MPA 방법의 적용성과 타당성을 검토하였다.

3.1 예제구조물과 지진하중

예제구조물의 비선형 거동은 부재의 단부에서만 발생하고 강기동-약보 개념에 의하여 설계되었다. 골조는 3경간이며, 1층 높이는 18(feet)이고 나머지 층의 높이는 12(feet) 그리고 집합부 패널존에서의 변형은 고려하지 않았다. 비선형 해석프로그램은 DRAIN-2D+를 이용하여 정적 및 비선형 시간이력해석에 사용하였다. 부재의 이력거동은 항복 후에 2% 변형경화 효과를 가지는 이선형 곡선으로 가정하였다. 본 연구에서는 표2에서와 같이 여러 가지 지반특성과 각각 주파수 성분이 서로 다른 4가지 지진하중을 선택하였다. 유효지반가속도(EPA)를 0.4g로 조정하였으며, 각 지진하중에 대한 5% 감쇠를 가지는 가속도 및 변위 응답스펙트럼을 그림4와 그림5에서 나타내었다.

표 1. 고유치해석에 의한 예제구조물의 동적특성

모형	모드	진동주기	모드 참여 계수	감쇠비
8층	1차	1.168	1.348	0.829
	2차	0.420	0.508	0.115
	3차	0.238	0.239	0.033
20층	1차	2.786	1.378	0.777
	2차	0.960	0.567	0.126
	3차	0.548	0.307	0.041

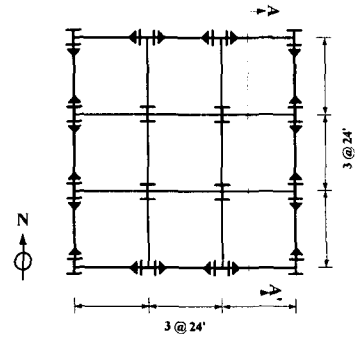


표 2. 지반특성과 주파수 성분이 서로 다른 4가지 지진하중

	Earthquake	Station	Magnitude	Direction	Epicentral Distance (km)	Site Geology	PGA (g)
CASE-1	El Centro 1940.5.18	Imperial Valley	M=6.9	N00E	10	Stiff Soil	0.348
CASE-2	Taft 1952.7.21	Kern County	M=7.7	N90E	107	Rock	0.179
CASE-3	Loma Prieta 1989.10.17	Apeel No.2 Redwood City	M=7.0	S47E	63	Bay Mud	0.220
CASE-4	Northridge 1994.1.17	Symar-County Hospital Parking	M=6.7	N00E	16	Alluvium	0.843

그림 3 예제구조물의 평면

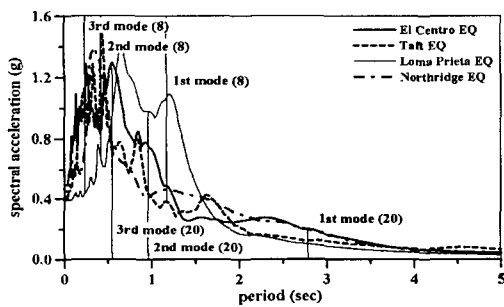


그림 4 각 지진하중에 대한 가속도 응답스펙트럼

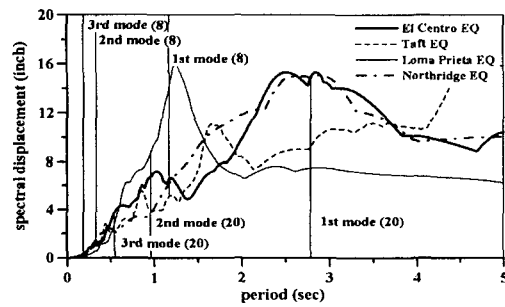


그림 5 각 지진하중에 대한 변위 응답스펙트럼

3.2 MPA 방법에 의한 변형능력의 평가

예제구조물의 비선형 지진응답을 평가하기 위하여 4가지 지진하중 중에서 CASE-1인 El Centro (NS, 1940 EPA=0.4g) 지진에 대하여 MPA 방법을 단계별로 적용하면 다음과 같다.

(1) 초기 목표변위에 의한 모드별 하중-변위 관계

각 모드별 횡하중에 대한 하중분포형상($S_i = m\phi_i$)을 이용하여 비선형 정적해석을 수행한 후에 그림 6,7과 같은 최상층변위와 밀면전단력의 관계를 구한다. 이때 최초의 목표변위는 FEMA-273에서의 변위계수법에 의하여 근사적으로 산정된다. 다자유도 시스템에서의 힘과 변위관계를 이선형 곡선으로 이상화한 후에 각 모드별 항복변위와 항복후 변형경화비를 구한다.

(2) 등가단자유도 시스템에서의 최대변위와 각 모드별 응답의 조합

앞서 언급한 MPA 방법에서의 가정과 관계식을 이용하여 다자유도 시스템을 각 모드별로 분리된 등가단자유도 시스템으로 전환한다. 그리고 모드별 비선형 시간이력해석을 수행하여 각 모드

별 최대변위를 구한다. 단자유도 시스템에서의 모드별 최대변위는 $u_{mo} = I_n \phi_m D$ 의 관계식을 이용하여 다자유도 시스템의 모드별 목표변위 즉 성능점으로 전환된다. 그리고 모드별 비선형 정적해석을 다시 한번 수행한 후에 각 모드별 응답을 조합(SRSS)한다.

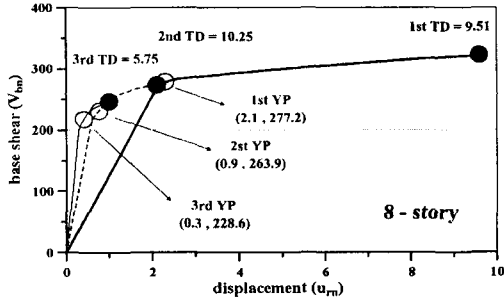


그림 6 각 모드별 능력곡선 (8층)

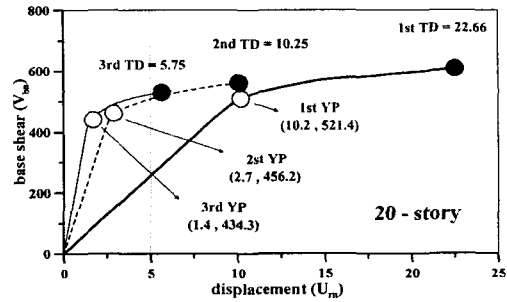


그림 7 각 모드별 능력곡선 (20층)

표 3. 단자유도 시스템과 다자유도 시스템에서의 각 모드별 최대변위(CASE-1)

모드	단자유도(SDOF) 시스템		다자유도(MDOF) 시스템		비선형 시간이력해석	
	8층	20층	8층	20층	8층	20층
1차	6.510	12.380	8.775	17.040	8.071	14.532
2차	2.170	4.977	1.102	2.811		
3차	0.627	3.910	0.149	1.200		

4. 지진하중 특성에 따른 변형능력 평가

본 연구에서는 앞서 언급한 4가지 지진하중에 대하여 각각 8층과 20층 철골골조에 MPA 방법을 적용하였다. 소성힌지분포와 층간변위와 같은 비선형 지진응답을 비선형 시간이력해석에 의한 결과와 비교함으로써 MPA 방법의 정확성과 적용성을 검토하였다.

4.1 CASE-1 : El Centro (1940) 지진하중

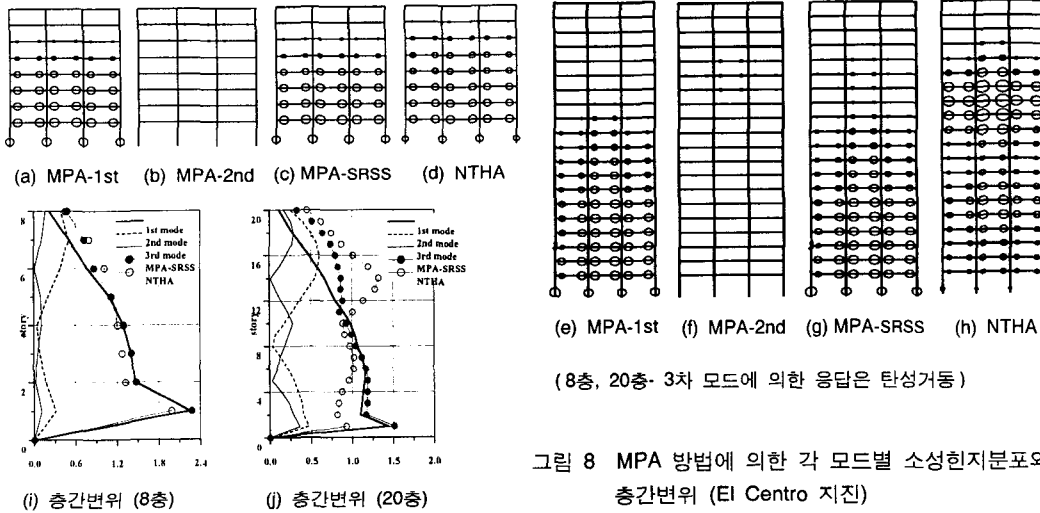


그림 8 MPA 방법에 의한 각 모드별 소성힌지분포와 층간변위 (El Centro 지진)

8층의 경우에 1차모드에 의하여 하부층이 지배된다는 것을 볼 수 있으며, 20층은 상부층에서 발생하는 2차모드의 영향을 MPA 방법이 다소 반영하고 있다는 것을 확인할 수 있다.

4.2 CASE-2 : Taft (1952) 지진하중

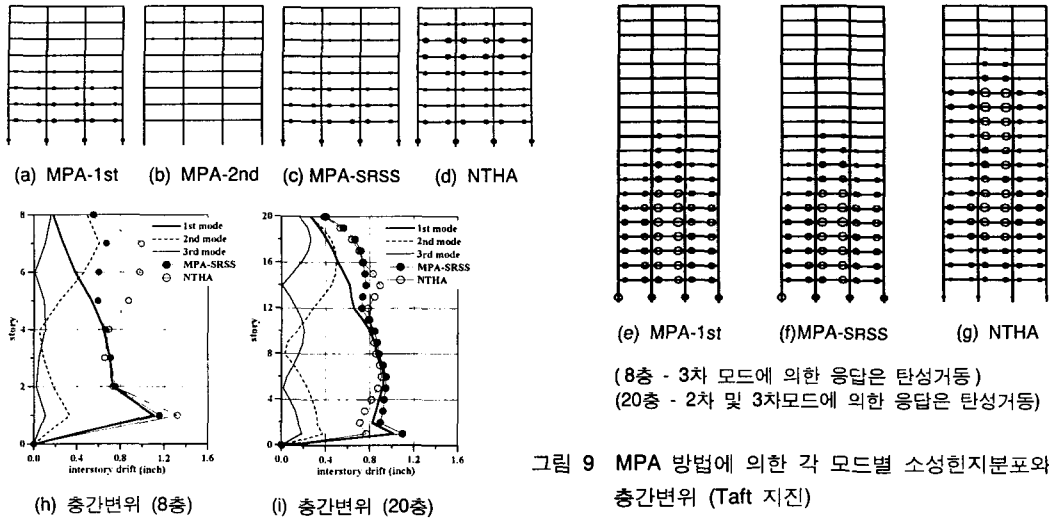


그림 9 MPA 방법에 의한 각 모드별 소성힌지분포와 층간변위 (Taft 지진)

8층의 경우에도 지진특성에 따라서는 2차모드 이상의 고차모드가 비선형 거동을 고려할 때 충분히 커질 수 있다는 것을 보여준다. 이러한 양상은 강성저하에 따른 비선형 영역에서는 모드별 진동주기가 길어지고 이에 따라 응답스펙트럼 상에서 응답의 값들이 크게 또는 작게 변할 수 있다는 것은 의미한다. 이러한 진동주기 변화에 따른 응답의 변화가 비선형 응답에 영향을 미칠 수 있지만 주기의 정확한 변화를 평가에 대해서는 추후연구 되어야 할 부분이다.

4.3 CASE-3 : Loma Prieta Apeel No.2 (1989) 지진하중

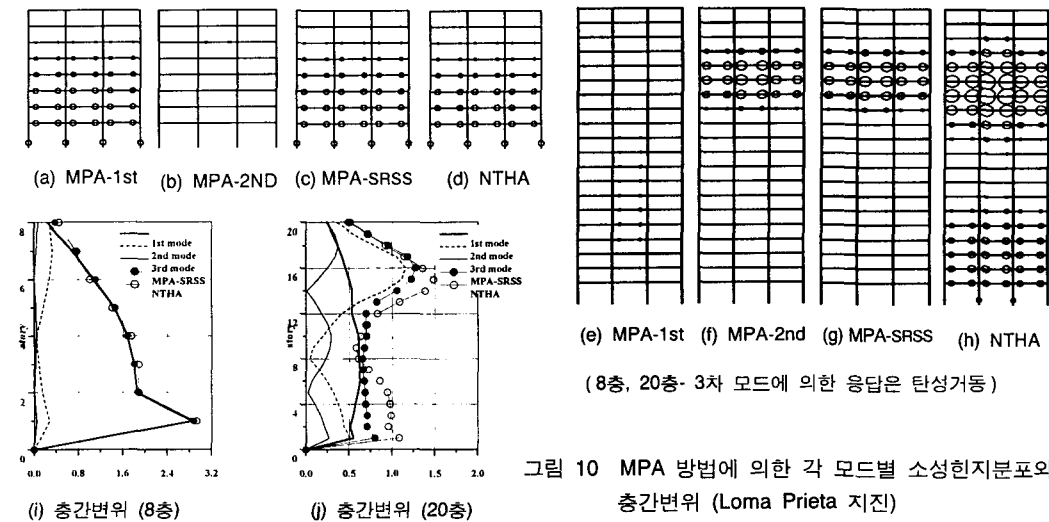


그림 10 MPA 방법에 의한 각 모드별 소성힌지분포와 층간변위 (Loma Prieta 지진)

8층의 경우에는 1차모드가 지배하고 20층의 경우에는 고차모드가 지진응답에 많은 영향을 주는 대표적인 경우이다. 실제 2차모드 응답은 탄성과 소성영역에서 1차모드에 비하여 상당히 크게

반영된다. 소성힌지 회전각의 부재가 탄성거동을 하는 경우에는 응답의 조합과정에서 반영이 되지 않는다. 이에 반하여 층간변위는 각 모드별 양이 조합하는 과정에서 탄성거동을 할지라고 반영이 되므로 비선형 지진거동의 평가에 대한 보다 정확한 근거가 될 수 있다.

4.4 CASE-4 : Northridge Symar-County (1989) 지진하중

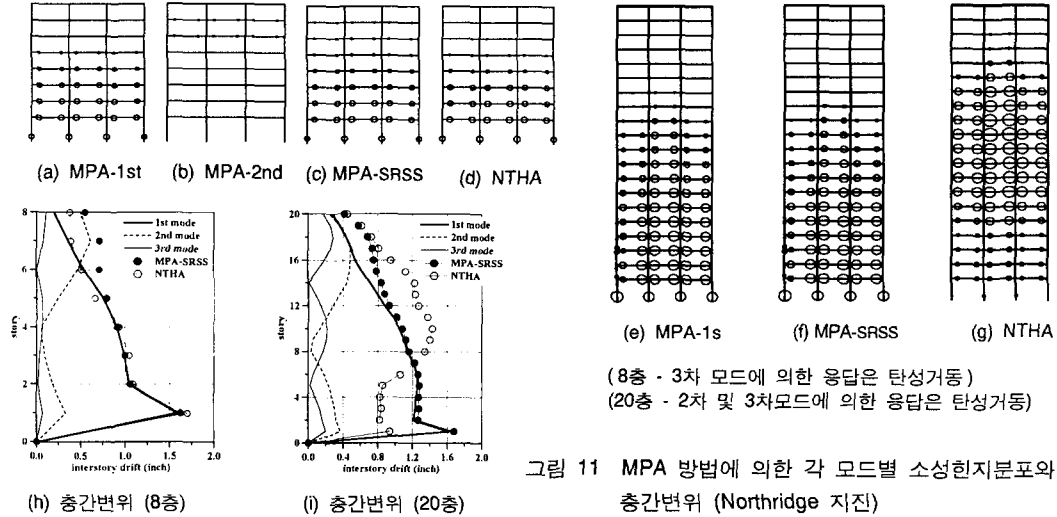


그림 11 MPA 방법에 의한 각 모드별 소성힌지분포와 층간변위 (Northridge 지진)

MPA방법에서는 2차와 3차모드가 탄성임에도 불구하고 비선형 시간이력해석의 결과에서는 특히 3차모드 영향이 크게 작용하였다. 그러므로 중간층에서의 비선형 응답이 많은 오차를 보였다.

5. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 다양한 지진하중과 시스템 특성에 따라서 MPA 방법의 적용성과 타당성을 검토하였다. MPA 방법에서는 각 모드별로 분리된 하중분포형상과 단자유도 시스템에서의 비선형 시간이력해석에서 구한 목표변위를 이용하여 독립적으로 비선형 정적해석을 수행한다. Chopra에 의하면 비선형 시간이력해석에서 발생하는 모드상호작용에 의한 각 모드간 응답기여의 정도가 무시될 수 있다고 하였다. 그러나 본 연구에서 살펴보았듯이 지반특성이 다른 다양한 지진하중에 따라서 응답의 변화양상도 매우 다르며 8층과 20층 골조구조물에 대해서 응답의 오차정도가 경우에 따라서는 많은 차이를 보였다. 이것은 비선형 영역에서 발생하는 각 모드간 증폭변화를 MPA 방법에서는 고려하지 못하기 때문이다. 그러므로 MPA 방법을 이용하여 건물의 변형능력을 평가하는 경우에는 지진하중의 특성과 시스템 특성을 모두 고려하여 그 영향을 분석하여야 하며, 비선형 거동상태에서 각 모드의 응답증폭의 변화를 파악할 수 있는 연구가 추후에 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

1. ATC, "Evaluation and Improvement of Inelastic Seismic Analysis Procedures," ATC-55 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 2002 예정. <http://www.atcouncil.org>.
2. 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.