

## 건축구조물의 비선형 지진응답 산정을 위한 내진성능평가 방법의 비교

### Comparison of Performance Evaluation Methods Based on the Estimation of Nonlinear Seismic Responses for Multistory Building

최 원 호\*  
Choi, Won-Ho

이 동 근\*\*  
Lee, Dong-Guen

#### ABSTRACT

There has been an increasing trend toward the use of pushover analysis as a tool for evaluating the seismic resistant and safety of a building structure in the performance based earthquake engineering field. The ATC-40 document proposed a nonlinear static procedure based on the Capacity Spectrum Method to determine earthquake-induced demand given the structure pushover curve, which a curve representing base shear versus roof displacement. However, the procedure is conceptually simple, iterative and time consuming method and may sometimes lead to no solution or multiple solutions.

A new improved method of seismic performance evaluation for moment frame building, which take into account the previously mentioned deficiencies of currently used elastic design procedures, is presented in this paper. The results of nonlinear static and nonlinear time history analysis of an example high-rise steel moment frame designed by the proposed method are presented and discussed.

#### 1. 서 론

성능에 기초한 내진설계 분야에서 건축구조물의 내진성능을 평가하는 해석적인 연구 방법은 많은 연구자들에 의해서 진행되어 왔다. 이러한 해석 방법론 중에서 대표적인 것이 ATC-40(1996)에서 제시하고 있는 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, 이하 CSM)과 FEMA-273(1997)과 FEMA-356(2000)에서의 변위계수법(Displacement Coefficient Method, 이하 DCM)이다. 두가지 방법 모두 구조물이 항복 이후에 발생할 수 있는 변형 능력에 대하여 예측하고, 고려된 지진하중에 대한 요구수준과 비교함으로써 대상 구조물의 비선형 지진응답을 평가하는 방법이다. 능력스펙트럼법(CSM)의 경우에는 비선형 정적해석(pushover analysis)을 이용하여 구조물의 횡하중에 대한 저항능력(capacity)을 파악한 후에 지반운동에 대한 요구수준(demand)과 비교함으로써 내진성능을 평가하는 방법이다. 두 곡선이 만나는 점은 구조물에서 동적평형(dynamic equilibrium)이 이루어지는 상태를 의미하며, 비선형 최대 변위응답에 대한 강성(stiffness)과 강도(strength)의 영향을 매우 효과적으로 표현할 수 있다는 장점이 있다. 그리고 변위계수법(DCM)은 비선형 최대 변위응답 산정에 있어서 탄성시스템에서의 최대변위에 대하여 비선형 시스템의 효과를 고려한 다양한 동적계수들을 고려한다. 직접적이고 간단하게 적용할 수 있는 방법이기 때문에 성능에 기초한 내진설계기준에서 많이 채택하고 있는 해석 방법론이다. 현재 선진국의 내진설계기준에서는 이러한 해석적 방법론에 대한 결과들을 이용하여 종래의 하중에 근거한 설계방법론(force-based design)이 아닌 변위에 근거한 설계방법론(displacement-based design)을 제시하고 있으며, 대표적인 방법론이

\* 학생회원 성균관대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 정 회원 성균관대학교 건축공학과 교수

바로 SEAOC 「Blue Book (1999)」에서 제시하고 있는 직접변위설계법(Direct Displacement Based Design)과 등가변위설계법(Equivalent Displacement Based Design)이다.

최근에 연구들은 이러한 비선형 해석에 의한 내진성능평가와 설계방법론에 대한 많은 문제점들을 제시하였고, 다양한 연구결과들에서 보다 향상되고 개선되는 방향으로 진행되고 있는 실정이다. 이에 대한 대표적인 연구가 ATC의 Working Group에 의하여 진행되었으며, ATC-55(2002) 「Evaluation and Improvement of Inelastic Seismic Analysis Procedures」에서 능력스펙트럼법(CSM)과 변위계수법(DCM)을 비롯한 여러 가지 해석방법론과 설계방법론에 대한 문제점을 지적하고, 비선형 지진응답 평가에 대한 지난 5년 동안의 연구결과들을 비교·검토함으로써 건축구조물의 비선형 지진해석에 대한 평가와 개선방안에 대하여 2002년에 발표할 계획이다. 본 연구에서는 능력스펙트럼법(CSM)과 변위계수법(DCM)의 문제점을 분석하여 보고, 이러한 문제점을 개선할 수 있는 새로운 방법론을 제시하였다. 고층 철골 모멘트 골조구조물에 대하여 비선형 정적해석을 수행함으로써 지진응답을 분석하고 내진성능을 평가하였으며, 제안된 방법과 기존의 방법을 비선형 시간이력해석의 결과와 비교함으로써 제안된 방법에 대한 정확성과 타당성을 검증하였다.

## 2. 능력스펙트럼법(CSM)과 변위계수법(DCM)

능력스펙트럼법(CSM)과 변위계수법(DCM)은 개념적으로 모두 등가단자유도(ESDOF) 시스템을 이용하여 다자유도(MDOF) 구조물의 비선형 지진응답을 산정하는 해석적 방법들이다. 두 방법 모두 복잡한 비선형 거동을 나타내는 다자유도 구조물을 단순화된 단자유도 시스템으로 변환함으로써 보다 효율적으로 비선형 지진응답을 평가하는 해석적 방법들이다.

등가단자유도(ESDOF) 시스템에 대한 적용은 다자유도(MDOF) 구조물의 응답이 하나의 지배적인(predominant) 모드에 의하여 나타나는 경우에 변형과 저항능력을 표현하는데 유용하다. 대표적인 방법으로는 Rothe and Sozen (1983), Qi and Moehle (1991), Miranda (1991), Fajfar and Gaspersin (1996), Villaverde (1996), Han and Wen (1997), Chopra and Goel (2001) 등이 있다.

본 절에서는 두 가지 비선형 해석 방법론에 대하여 지금까지 여러 연구자들에 의하여 연구되어 왔던 연구결과들을 제시하고 이 두 방법에 대한 문제점들을 지적하고자 한다.

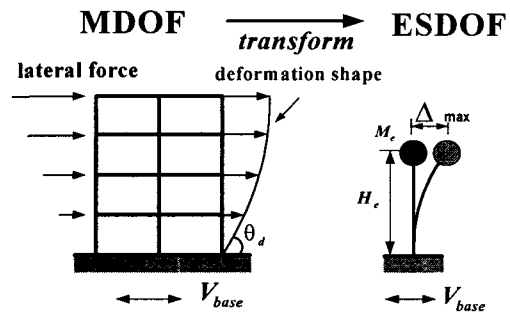


그림 1 등가단자유도(ESDOF) 시스템의 개념

### 2.1 능력스펙트럼법 (Capacity Spectrum Method)

이 방법의 핵심적인 사항은 비선형 시스템의 최대변위를 산정하기 위하여 비선형 정적해석에 의한 능력곡선과 항복구조물에서 에너지 소산으로 설명되는 감쇠는 탄성응답스펙트럼과의 교점을 이용한 것이다. 그러므로 능력스펙트럼법(CSM)의 기본 개념은 비선형 지진응답을 산정하기 위하여 감소된 강성(stiffness)과 증가된 감쇠(damping)를 사용하는 등가 선형시스템(equivalent linear system)을 이용한다. 비선형 시스템에서 감소된 강성은 할선강성(secant stiffness)으로 표현된다. 그리고 지진

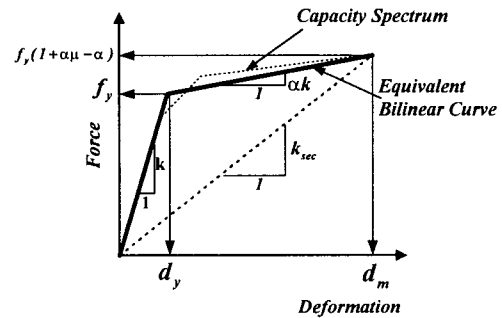


그림 2 등가 선형 시스템의 개념

하중에 의한 요구수준(demand)은 점성감쇠에너지에 의한 이력에너지 소산의 기본적 관계에 의하여 산정되는 탄성설계응답스펙트럼(smoothed elastic design response spectrum)을 사용한다.

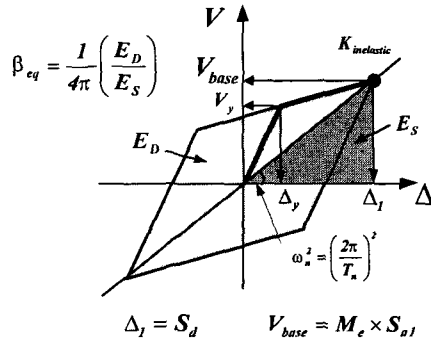


그림 3 유효감쇠(effective damping)의 개념

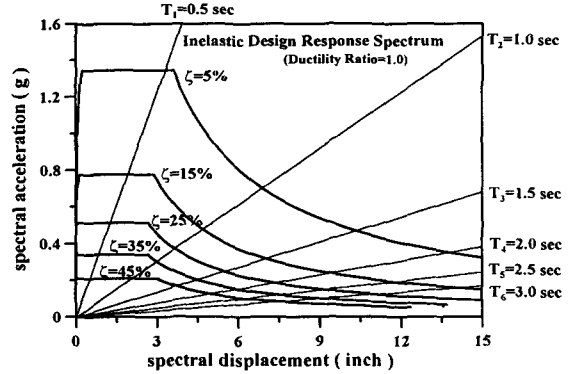


그림 4 유효감쇠에 의한 설계응답스펙트럼

능력스펙트럼법(CSM)의 문제점에 대한 파악은 여러 가지 관점에서 접근할 수 있으며 많은 연구 결과들에 의해서 대표적인 문제점은 다음과 같이 지적되고 있다.

(1) 고차모드 효과에 대한 고려 - Pushover 해석은 횡변형에 대한 구조물의 저항능력을 효과적으로 정량화할 수 있으며 전체적인(global) 파괴 메카니즘을 표현할 수 있는 방법이다. 이 해석법은 비선형 최대변위응답을 근사적으로 산정할 수 있으나, 고차모드 효과에 의하여 직접적으로 영향을 받을 수 있는 층간변위, 층전단력, 전도모멘트, 소성힌지분포 등은 평가하기 어렵다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 multimodal force distribution (Reinhorn 1997), adaptive pushover (Kunnath 2000), incremental dynamic analysis (Elnashai 2000), modal pushover analysis (Chopra and Goel 2001) 등과 같은 연구가 있었다. 그러나 각 방법마다 특별하게 적용되는 가정이 있으며, 복잡한 대수적 관계에 의하여 그 적용성에 대해서는 아직까지 확실하게 검증이 되지 않은 상태이다.

(2) MDOF 효과에 대한 고려 - 능력스펙트럼법(CSM)에서 구조물의 저항능력을 산정하기 위하여 능력스펙트럼(capacity spectrum) 평가식에서 사용하는 모드참여계수(PF<sub>1</sub>)와 유효질량계수(α<sub>1</sub>)는 단자유도와 다자유도 시스템의 관계를 명확하게 규명할 수 있는 변수가 아니다. 정량화된 변수들을 이용한 강제적인 지배(predominant) 모드의 평가는 다자유도 시스템의 복잡한 시간변동에 대한 응답을 표현할 수 없다. 특히, 고층구조물의 경우에는 지진하중에 따라서 층간변위, 소성힌지분포가 국부적으로 집중될 수 있으며, 강성 및 강도저하 이력특성을 가지는 부재를 고려하면 다자유도 시스템 거동의 복잡성과 불확실성에 의하여 모든 비선형 지진응답들이 다르게 평가될 수 있다.

(3) 유효 감쇠에 의한 응답스펙트럼 평가 - 능력스펙트럼법(CSM)에서 사용하는 점성감쇠에너지에 의한 이력에너지 소산 평가는 단순한 조화하중(harmonic excitation)을 받는 단자유도 시스템의 공진 상태에서의 최대변위응답에 근거한다. 여기서는 연성(ductility)-유효감쇠(effective damping)-응답감소계수(spectral reduction factor)의 관계를 산정하고 탄성 설계응답스펙트럼에서 감쇠의 증가를 고려함으로써 스펙트럼의 비선형성을 고려한다. MacRae and Tagawa (2001)은 연성과 응답감소계수의 관계를 직접 이용한 Direct Capacity Spectrum Method를 제안하였으며, Chopra와 Fajfar는 R-μ-T 관계에 근거한 비탄성 스펙트럼을 능력스펙트럼(CSM) 과정에 적용하였다.

(4) 지반운동의 특성에 대한 고려 - Near Field와 Far Field에서의 지반운동과 연약지반(soft soil)에 대한 고려는 기존의 평가방법에 의한 비선형 지진응답과 매우 다른 결과들을 줄 수 있다.

## 2.2 변위계수법 (Displacement Coefficient Method)

변위계수법(DCM)에 대한 연구는 능력스펙트럼법(CSM)에 비하여 상대적으로 연구결과들이 많지 않다. 그러므로 이 방법에 대한 문제점에 대해서는 아직까지 명확하게 밝혀지지 않았다. 그러나 관련된 연구결과에 의하면 이 방법에서는 초기강성과 유효강성에 대한 평가가 매우 중요시 되며 항복 후에 발생하는 강도의 변화에 대한 고려는 최대 변위응답의 산정에서 무시된다. 몇몇 연구에 의하면 변위계수법(DCM)은 다른 방법들과 비교하였을 경우에 대부분 장주기 시스템(0.3초-0.5초 이상)에 대해서는 보수적인 결과를 보여주며 그리고 단주기 시스템(0.3초 미만)에 대해서는 변위가 증폭될 수 있는 가능성이 제시되었다. 이러한 문제점을 고려하기 위하여 Miranda와 Iwan 등에 의하여 R- $\mu$ -T 관계 및 강도저감계수(R)가 재평가 되었다. 또한 Cuesta와 Vidic 등은 지반운동에 대한 특성주기(characteristic period)를 고려한 R- $\mu$ -T/ $T_g$  관계를 제시하였다.

변위계수법(DCM)에서 사용되는 동적계수들에 대한 불확실성과 신뢰성에 대한 연구는 아직도 많이 진행되고 있다. 특히 단성과 비탄성 변위응답의 비에 대한 조정계수, 강도저감계수에 의한 조정계수, 펀칭효과와 P-Delta 효과를 고려한 동적계수들에 대한 평가가 정확하게 이루어져야 한다. 그리고 Near Field 지반운동과 연약지반의 특성을 고려한 방법이 반영이 되어야 할 것이다.

## 3. 대표응답을 이용한 비선형 지진응답 평가

본 연구에서는 앞서 설명한 능력스펙트럼법(CSM)에서 나타난 문제점들을 개선하기 위하여 새로운 방법론을 제시한다. 건축구조물의 대표응답(representative responses)을 이용한 비선형 지진응답분석과 내진성능평가 방법은 이전의 연구결과에 의하여 검증이 되었다(참고문헌 3). 제안된 방법의 가장 큰 특징은 비선형 시간이력해석과 비선형 정적해석에 의한 지진응답을 함께 고려함으로써 내진성능을 보다 효과적으로 평가할 수 있다는 점이며, 능력스펙트럼과 요구스펙트럼의 산정에 있어 기존의 능력스펙트럼법(CSM)보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 방법을 사용하였다.

### 3.1 능력스펙트럼 (capacity spectrum) 의 평가

제안된 방법에서 능력스펙트럼을 평가하는 방법은 비선형 정적해석을 수행하는 경우에 고차모드 효과를 고려할 수 있는 하중분포형상을 이용하였다는 것과 구조물의 능력스펙트럼을 평가할 때 동적 변환계수들을 사용하지 않고 다자유도 구조물의 대표응답을 직접 이용하였다는 점이 기존의 능력스펙트럼법(CSM)과 다르다. 능력스펙트럼을 평가하는 식은 다음과 같다.

$$S_d = D_r \approx \frac{\Phi_1^T M X_{static}}{\Phi_1^T M 1} \quad S_a = V_r / M_{eff} \approx \frac{\Phi_1^T R_{static}}{M_{eff}} \quad (1)$$

여기서  $X_{static}$ ,  $R_{static}$  는 비선형 정적해석으로부터 구해지는 각 층 변위 및 저항력 응답이며,  $M_{eff}$  은 구조물의 1차 모드에 대한 유효질량을 나타낸다.  $D_r$  와  $V_r / M_{eff}$  는 각각 다자유도 시스템에서 비선형 정적응답을 이용하여 평가된 구조물의 대표변위와 대표저항력을 의미한다.

### 3.2 요구스펙트럼 (demand spectrum) 의 평가

제안된 방법에서는 Newmark and Hall (1982)에 의하여 제안된 R- $\mu$ -T 관계를 이용하고 변위연성비를 적용한 비탄성 설계응답스펙트럼을 고려함으로써 요구스펙트럼을 평가하였다.

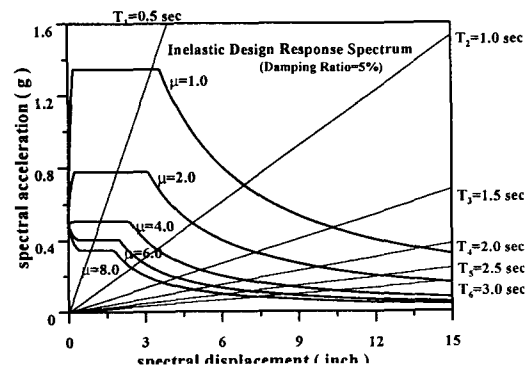


그림 5 변위연성비에 의한 설계응답스펙트럼

#### 4. 20층 철골 모멘트골조 구조물의 내진성능평가

본 연구에서는 ATC-40에서 제시된 능력스펙트럼법(CSM)과 제안된 방법에 의한 비선형 해석 결과를 분석하고 각 방법에 따른 내진성능을 비교·검토하고자 한다. 3경간 20층 철골 보통 모멘트골조 구조물로서 강기둥-약보 개념에 의하여 설계되었고, 중심선 모델을 사용하였다. 접합부 패널 존에서 발생하는 효과는 무시하였으며, 보와 기둥에서 비선형 거동이 집중된다고 가정하였다.

예제구조물의 평면 및 단면 형상은 그림 6과 7에서 나타내었다. 부재의 이력거동은 항복 후에 2%의 변형경화 효과를 가지는 이선형곡선으로 가정하였다. 중력하중에 의한 P- $\Delta$  효과는 고려하지 않았다. 비선형 시간이력해석에 적용된 하중은 El Centro (NS, 1940) 지진이며 유효최대가속도(EPA)를 0.4g로 조정하여 비선형 해석에 사용하였다.

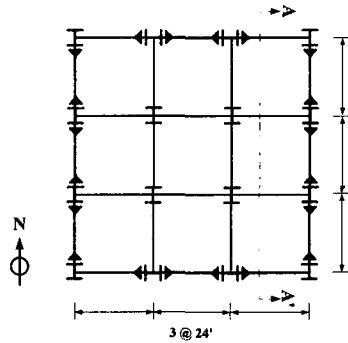


그림 6 예제구조물의 평면

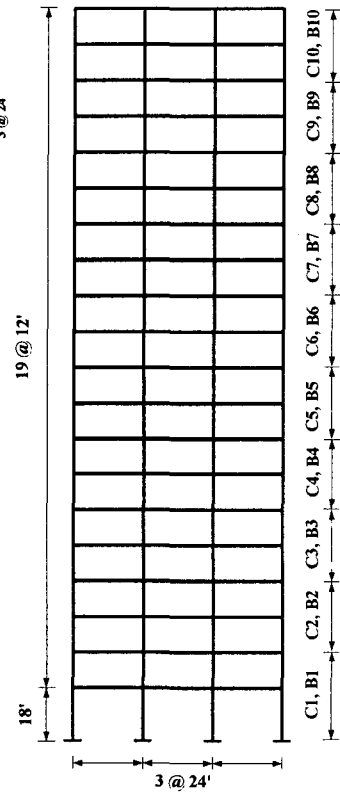


그림 7 예제구조물의 단면 (A-A)

표 1 사용된 부재 및 단면크기

Column ID.	Interior	Exterior	Girder ID.	Interior & Exterior
C10	W27X84	W18X86	B10	W24X62
C9	W27X102	W18X97	B9	W24X68
C8	W30X116	W18X106	B8	W24X76
C7	W30X132	W18X119	B7	W24X76
C6	W36X135	W18X130	B6	W27X84
C5	W36X150	W18X143	B5	W27X84
C4	W36X160	W18X158	B4	W27X94
C3	W36X170	W18X175	B3	W27X94
C2	W36X182	W18X192	B2	W27X102
C1	W36X232	W18X211	B1	W27X102

#### 4.1 구조물의 대표응답에 의한 비선형 지진응답 평가

예제구조물에 대한 고유치해석을 수행한 결과는 1차 모드의 진동주기가 2.786초로 나타났으며, 모드참여계수  $PF_1=1.379$  와 유효질량계수  $\alpha_1=0.778$  로 산정되었다. 이러한 결과는 대부분의 동적응답이 첫번째 진동모드의 형상에 의하여 지배된다는 것을 보여준다. 그림 8과 9에서는 예제구조물의 대표변위와 대표저항력을 산정하고 각각 구조물의 최상층 변위와 밀면전단력과 비교하였다.

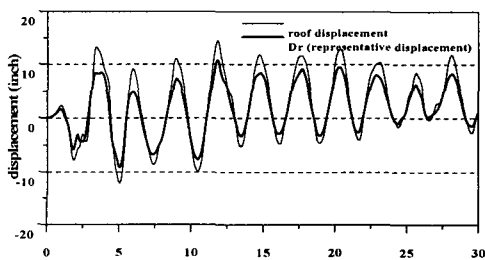


그림 8 최상층 변위와 대표변위 ( $D_r$ )의 비교

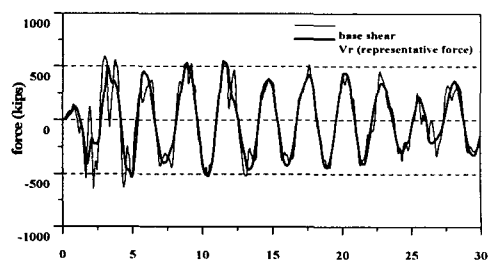


그림 9 밀면전단력과 대표저항력 ( $V_r$ )의 비교

### 4.2 비선형 시간이력해석에 의한 시스템 연성요구도 평가

등가단자유도 시스템의 응답과 다자유도 시스템의 대표응답에 의하여 힘과 변위관계를 산정하고 이를 이용하여 시스템 연성요구도를 그림 10과 11에서 비교하였다. 대표응답에 의한 방법이 다자유도 시스템의 시간변동 특성을 잘 고려하고 있다.

표 2 시스템 연성요구도 비교

Model	$D_y$ (inch)	$D_{max}$ (inch)	$\mu_{sys}$
ESDOF	7.345	13.598	1.851
MDOF	6.476	10.736	1.658

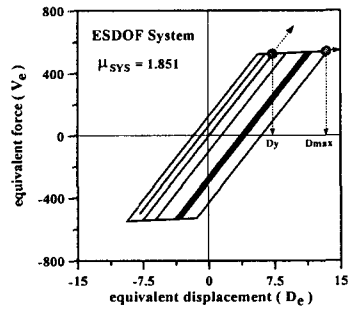


그림 10 등가응답 (ESDOF)

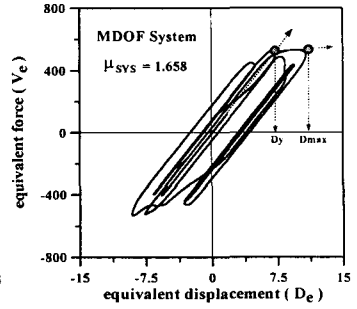


그림 11 대표응답 (MDOF)

### 4.3 비선형 정적해석에 의한 시스템 연성요구도 평가

비선형 정적해석을 수행한 후에 ATC-40의 능력스펙트럼법(CSM)과 본 연구에서 제안된 방법에 의하여 능력곡선을 산정하였다. 두 방법의 차이점은 하중분포형상과 힘과 하중관계에서 고려한 응답이 다르다는 것이다. 각 방법에 의한 능력곡선은 이선형 형태로 이상화시키고, 이것을 능력스펙트럼으로 전환한다. ATC-40의 방법은 동적 모드계수를 이용하지만, 제안된 방법에서는 시스템의 전환 없이 직접 능력스펙트럼이 평가된다. 그림 13과 14는 각각 유효감쇠원리를 이용한 ATC-40의 방법과 변위연성비를 이용한 제안된 방법에서 성능점을 산정하는 과정을 나타낸 것이다. 그림 14와 표 3에서 알 수 있듯이 반복작업을 수행하면서 유효감쇠 원리를 이용한 ATC-40에서는 성능점을 평가하는 과정에서 오차가 발생하였으며 특정한 수렴값을 얻을 수가 없었다. 20층 철골구조물의 경우에는 층수가 낮은 구조물보다 초기강성과 항복 후 강도가 낮게 평가되는 유연성을 보유하고 있다. Chopra 와 Goel (1999) 의 단자유도 시스템에서의 연구결과에 의하면 유연성을 가지는 장주기 시스템에서는 고려되는 지진하중에 따라서 해를 구할 수 없다고 하였으며, 본 연구에서는 다자유도 시스템에서도 동일한 연구 결과를 확인할 수 있었다.

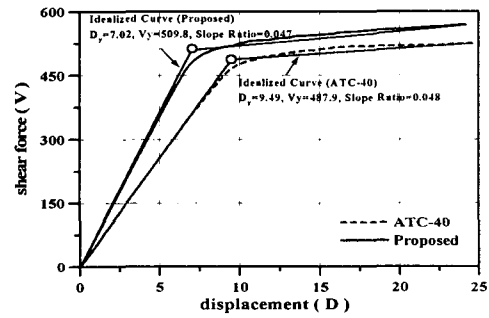


그림 12 능력곡선(capacity curve)의 비교

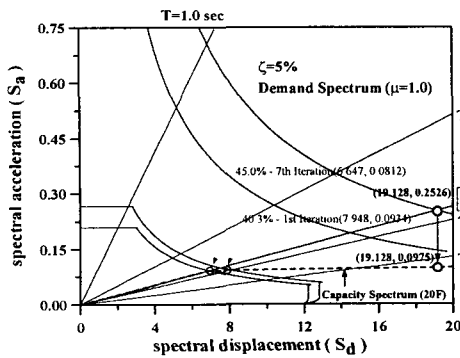


그림 13 유효감쇠비에 의한 성능점 산정

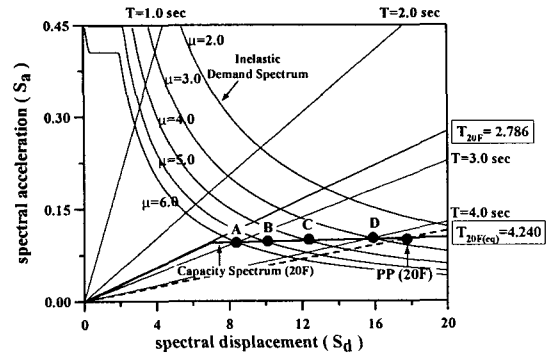


그림 14 변위연성비에 의한 성능점 산정

표 3 능력스펙트럼법(CSM, ATC-40)에 의한 구조물의 성능점 및 시스템 연성요구도 산정

Iteration NO.	$S_{di}$ (in)	$S_{ai}$ (g)	$\mu_{sys}$	$\zeta_{eq}$ (%)	$S_{dj}$ (in)	$S_{aj}$ (g)	difference (%)
1	19.128	0.0975	2.698	40.3	7.948	0.0934	-140.66
2	7.948	0.0934	1.121	11.5	27.987	0.1029	71.60
3	21.987	0.1029	3.974	44.6	6.931	0.0878	-303.795
4	6.931	0.0878	1.000	5.0	41.981	0.1125	83.49
5	41.981	0.1125	5.921	45.0	6.647	0.0812	-531.58
6	6.647	0.0812	1.000	5.0	41.981	0.1125	84.17
7	<b>41.981</b>	<b>0.1125</b>	<b>5.921</b>	<b>45.0</b>	<b>6.647</b>	<b>0.0812</b>	<b>-531.578</b>

표 4 제안된 방법에 의한 구조물의 성능점 및 시스템 연성요구도 산정

ductility	SDOF System		MDOF System		$\mu_{sys}$	$T_{eff}$
	$S_d$ (in)	$S_a$ (g)	D (in)	V (kips)		
A ( $\mu=6.0$ )	8.504	0.093	8.504	500.242	1.211	3.058
B ( $\mu=5.0$ )	10.128	0.094	10.128	505.621	1.443	3.319
C ( $\mu=4.0$ )	12.437	0.096	12.437	516.379	1.772	3.640
D ( $\mu=3.0$ )	15.985	0.098	15.985	527.137	2.277	4.084
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b><math>\mu=2.48</math></b>	<b>17.408</b>	<b>0.099</b>	<b>17.408</b>	<b>532.516</b>	<b>2.479</b>	<b>4.240</b>
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
E ( $\mu=2.0$ )	24.139	0.102	24.139	548.653	3.439	4.919

본 연구에서는 해를 구할 수 없는 ATC-40에 의한 방법에서 요구스펙트럼을 평가할 때에 유효 감쇠 원리 대신에 변위연성비를 이용하고 능력스펙트럼을 동일하게 평가함으로써 성능점을 다시 산정하였다. 그림 15와 표 5는 비선형 시간이력해석과 비선형 정적해석에 의한 응답을 이용하여 각 방법에 따른 성능점과 시스템 연성요구도를 비교한 것이다. 비선형 정적해석의 경우에는 설계 응답스펙트럼을 사용하였기 때문에 비선형 시간이력해석 결과보다 어느 정도 과대평가 된다는 것을 알 수 있다. 제안된 방법에서는 비선형 시간이력해석에서 사용된 대표응답의 원리가 동일하게 비선형 정적해석에서도 적용 되었으므로 정적 및 동적 관계의 상호작용을 효과적으로 파악할 수 있으며, 정적해석 결과에 대한 신뢰성 있는 평가기준을 확보하고 있다고 판단된다.

표 5 각 방법에 따른 시스템 연성요구도 비교

구 분	비선형 시간이력해석		비선형 정적해석	
	ESDOF	MDOF	ATC-40	Proposed
시스템 연성요구도	1.851	1.658	2.629	2.479

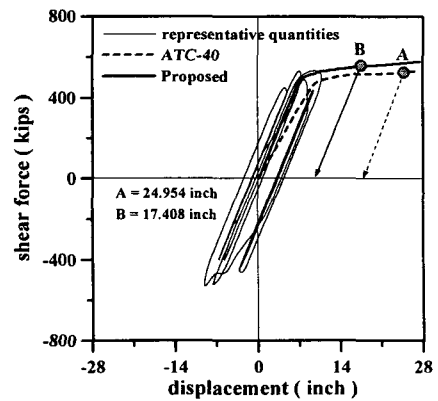
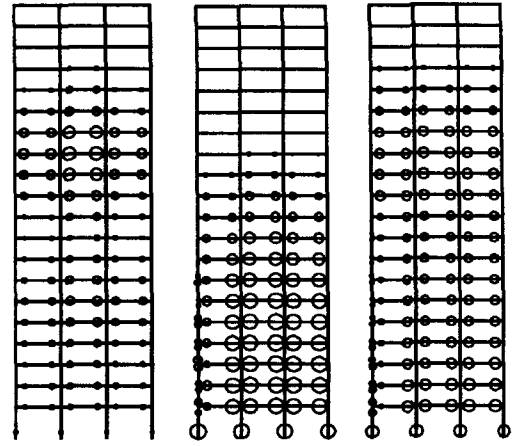


그림 15 성능점과 시스템 연성요구도

#### 4.4 각 방법에 따른 비선형 지진응답 비교 및 내진성능평가

고층구조물에서 발생하는 고차모드에 대한 영향을 가장 효과적으로 파악할 수 있는 것이 층전 단력, 비선형 층간변위, 소성힌지분포(plastic hinge formation) 등을 평가하는 것이다. 본 연구에서는 비선형 정적해석을 이용한 두가지 방법과 비선형 시간이력해석에 의한 방법에 의하여 소성힌

지분포와 층간변위, 그리고 층 연성도를 산정하고 비교하였다. 비선형 정적해석은 단조증가 하중에 의한 단순한 해석 방법이므로 다양한 진동수 성분을 포함하고 랜덤한 지진하중의 특성을 가지는 시간이력해석의 응답을 정확하게 반영하기 어렵다. 특히 예제구조물의 경우에 상부층에서 비선형 지진응답이 집중되는 것을 알 수 있다. ATC-40 방법에서는 하부층에서만 과대평가하고 상부층 응답은 제대로 표현하지 못하고 있지만, 제안된 방법은 상부층의 비선형 응답을 포함하여 전체적으로 어느 정도 반영하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 각 방법에 따른 층간변위와 층연성도의 비교에서도 잘 확인할 수 있었다. 그림 19는 제안된 방법에 의하여 각 층에서의 성능점을 산정하고 구조물의 전체에 대한 성능한계를 표현한 것이다.



(a) Time History (b) ATC-40 (c) Proposed

그림 16 각 방법에 따른 소성힌지분포의 비교

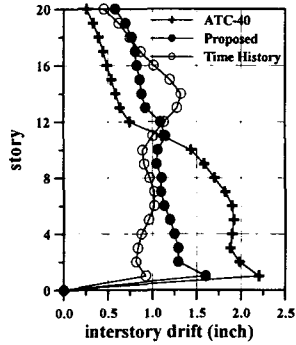


그림 17 층간변위

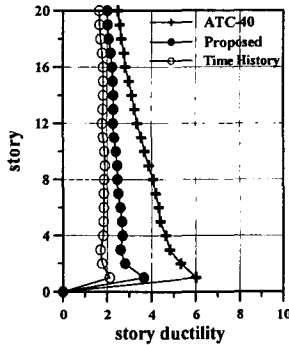


그림 18 층 연성도

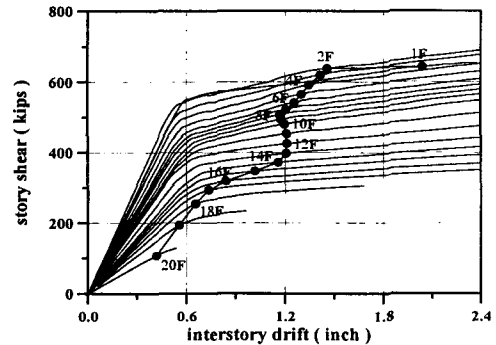


그림 19 제안된 방법에 의한 성능한계

## 5. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 제시된 비선형 지진응답을 산정하고 내진성능을 평가하는 기존의 해석 방법에 대한 문제점을 지적하고 그 대안적인 방법으로 구조물의 대표응답을 이용한 비선형 해석방법을 제안하였다. 고층 철골 모멘트골조 구조물에 적용한 결과 ATC-40에 의한 방법은 성능점 산정에 있어서 많은 오차를 발생하였으며, 비선형 지진응답에 대한 평가 또한 정확하지 못하였다. 본 연구에서는 고층구조물에서도 대표응답의 원리가 적용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 앞으로 강성 및 강도저하 시스템을 가지는 구조물, P-Delta 효과의 영향, 연약지반의 효과, 지반운동의 특성을 고려하였을 경우에 제안된 방법의 타당성과 정확성에 대한 검증이 필요하다고 판단된다.

## 참고 문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
2. ATC, "Evaluation and Improvement of Inelastic Seismic Analysis Procedures," ATC-55 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 2002 예정. <http://www.atcouncil.org>
3. 이동근, 최원호, "대표응답을 이용한 건축구조물의 비선형 지진응답 분석 및 내진성능평가," 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제6호, 2001. 12, pp. 65-76.