

## 건축구조물의 시스템 연성요구도 평가를 위한 대표응답의 활용

### Responses of Equivalent SDOF System for System Ductility Demands Evaluation of Multistory Building Structures

최 원 호\*  
Choi, Won-Ho

이 동 근\*\*  
Lee, Dong-Guen

---

#### ABSTRACT

System-level ductility is an essential parameter for seismic performance evaluation of multistory building structures. The ductility demands for single degree of freedom structures or individual structural members can be determined easily. However, there is no clearly established method to determine the ductility demands for structural systems. The system ductility demands are estimated in this study by the equivalent SDOF system methods and proposed method which used the representative responses obtained from the MDOF systems directly. And seismic performance of building structures is evaluated by the modified Capacity Spectrum Method using the representative responses, and the result was compared with those of the inelastic time history analysis.

---

#### 1. 서 론

일반적으로 내진설계에서는 구조물이 보유하고 있는 연성도 능력은 지진하중에 의하여 부과되는 연성요구도보다는 크도록 유도하고 있다. 구조물은 지진하중에 의하여 비탄성 거동을 하게되므로 인명안전이나 붕괴 방지를 위해서는 이러한 비탄성거동에 의한 변형을 허용범위내로 제한하여야 한다. 그러므로 지진하중을 받는 구조물의 내진성능을 평가하고 지진거동을 명확하게 파악하기 위해서는 연성요구도의 산정과 구조물의 연성도 능력에 대한 예측이 매우 중요하다고 할 수 있다. 연성도 능력은 구조부재에 대하여 실험적으로만 평가되지만 연성요구도는 구조물의 비탄성해석에 의하여 산정된다. 비탄성 지진해석에 의한 연성요구도를 평가하는 방법으로는 비탄성 시간이력해석에 의한 응답을 이용하는 방법과 비탄성 정적해석을 이용하여 구조물의 항복 이후의 거동을 파악하고 지진하중에 대한 비탄성 응답스펙트럼을 이용하여 구조물이 성능점을 파악함으로써 연성 요구도를 산정할 수 있는 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method, 이하 CSM)이 있다. 특히 능력스펙트럼법(CSM)은 구조물의 보유능력(capacity)과 지진요구(demand)를 매우 효과적으로 분석함으로써 성능에 기초한 내진설계에서 구조물의 내진성능을 평가하는 가장 대표적인 방법으로 적용되고 있다.

---

\* 성균관대학교 건축공학과 박사과정

\*\* 성균관대학교 건축공학과 교수

본 연구에서는 모멘트골조에 대하여 비탄성 시간이력해석에 의한 다자유도계에서의 대표응답을 이용하여 시스템 연성요구도를 산정하고, 능력스펙트럼법에 의하여 평가된 구조물의 연성요구도와 비교하였다. 그리고 능력스펙트럼법(CSM)에 의한 내진성능평가에 있어서 본 연구에서 제안한 대표응답을 이용하여 기존의 ATC-40과 FEMA-273,274 등의 내진설계기준에서 제시된 방법과 다른 수정된 능력스펙트럼을 제안하였다.

## 2. 비탄성 시간이력해석에 의한 시스템 연성요구도 평가 방법

구조시스템을 대표할 수 있는 응답이 다자유도계에서 유도된다면 이를 이용하여 구조물의 내진설계를 위한 연성요구도를 효과적으로 평가할 수 있다. 이 과정에서 다자유도계의 비선형 거동이 구조시스템의 대표적 응답에 적절하게 반영되어야 한다. 비탄성 시간이력해석의 응답을 이용한 연성요구도의 평가방법에는 두가지가 있다. 첫 번째는 다자유도계의 동적특성이 반영된 등가단자유도계(ESDOF)를 유도하는 방법이며, 두 번째는 다자유도계 동적응답으로부터 구조시스템의 대표응답을 직접 유도하는 방법이다.

### 2.1 등가단자유도계(ESDOF) 응답에 의한 방법

등가단자유도계의 선형 및 비선형 성질은 다자유도계의 비탄성 정적거동에 의하여 결정한다. 그리고 지진 하중을 받는 다자유도계 구조물의 비탄성 응답은 등가단자유도계를 이용하여 근사적으로 평가할 수 있다. 등가단자유도계를 유도하는 방법은  $Q$  모델,  $Q_i$  모델,  $N2$  방법,  $Lee$  모델 등이 있다. 본 연구에서는  $Lee$ 에 의하여 제안된 방법을 사용하였다. 등가단자유도계의 성질은 점진적으로 단조증가하는 하중에 의한 비선형 정적 해석으로부터 구해진 변형형상을 이용하여 산정한다. 힘과 변위의 비탄성관계는 근사화된 이선형(bilinear)관계로부터 결정된다. 등가단자유도계의 비탄성 동적응답은 지진하중에 의한 동적해석으로부터 구해지며, 시간 이력에 의한 힘과 변위에 대한 동적응답을 이용하여 구조물의 시스템 연성요구도가 평가된다.

### 2.2 다자유도계(MDOF) 응답에 의한 방법

이 방법에서는 구조물의 시스템 연성요구도를 다자유도계의 동적응답에 의한 하중과 변위관계를 기반으로 하여 산정한다. 구조물의 대부분의 동적응답은 첫 번째 진동모드에 의하여 지배된다고 가정을 한다면 구조시스템을 대표할 수 있는 대표변위(Equivalent Displacement,  $ED$ )는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ED = \frac{\phi_1^T M X(t)}{\phi_1^T M 1} \quad (1)$$

여기서,  $X(t)$ 는 비탄성 시간이력해석에 의한 각 층의 변위를 나타내며 대표변위( $ED$ )는 구조물의 1차모드 형상에 의하여 결정이 될 수 있다. 그리고 구조물의 동적응답이 첫 번째 진동모드에 지배되고 탄성 범위내에서 거동을 한다고 가정하면, 다자유도계에 대한 구조시스템의 대표저항력(Equivalent Force,  $EF$ )은 다음과 같은 식에 의하여 정의될 수 있다.

$$EF = \phi_1^T R(X) = \phi_1^T K X = \phi_1^T K \phi_1 x = \omega^2 \phi_1^T M \phi_1 x \quad (2)$$

여기서,  $R(X)$ 는 비선형 시간이력해석에 의한 각 층의 전단력을 나타낸다.

### 3. 능력스펙트럼법(CSM)에 의한 시스템 연성요구도 평가 방법

능력스펙트럼법(CSM)에서는 건축구조물의 횡하중에 대한 저항능력(capacity)을 비탄성 정적해석을 수행한 후에 하중과 변위 곡선으로 표현하고, 고려되는 지진요구(demand)를 응답스펙트럼 형식으로 나타낸다. 이 두 곡선을 하나의 좌표계로 표현함으로써 수요와 능력(공급)의 상호관계를 효과적으로 나타낼 수 있으며, 두 곡선의 교차점은 고려한 지진에 대한 구조물의 비탄성 응답과 성능수준을 의미한다.

#### 3.1 능력스펙트럼(capacity spectrum)의 평가

구조물의 횡방향 저항능력을 나타내는 하중과 변위관계에 의한 능력곡선은 1차모드의 영향을 고려하여 ATC-40 과 FEMA-273,274 에서는 다음과 같은 과정을 이용하여 능력스펙트럼의 형식인 응답가속도( $S_a$ )와 응답변위( $S_d$ )의 관계로 전환된다.

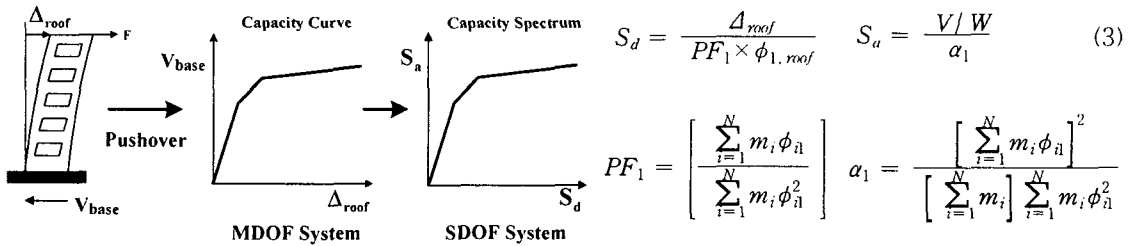


그림 1. 비탄성 정적해석에 의한 하중과 변위곡선과 능력스펙트럼으로의 변환

일반적으로 비탄성 정적해석(pushover analysis)에서는 하중의 분포형상(lateral load pattern)의 중요한 변수가 된다. 본 연구에서는 응답스펙트럼해석에 의한 모드별 총전단력을 조합한 후에 조합된 총전단력에서 층분포하중을 산정하는 방법을 사용하였다. 이러한 하중분배 방법은 일반적으로 적용되고 있는 1차모드에 의한 하중분배 방법과 모드조합(SRSS)에 의한 하중분배 방법보다 탄성 및 비탄성 지진응답을 보다 정확하게 표현하고 있는 것으로 연구되어졌다. 본 연구에서는 총전단력을 이용한 하중분배 방법을 이용하여 비탄성 정적해석을 수행하고 다음과 같은 방법으로 하중과 변위관계를 평가하는 수정된 능력스펙트럼법을 제안하였다.

$$S_d = ED = \frac{\phi_1^T M X(t)}{\phi_1^T M 1} \quad , \quad S_a = EF = \phi_1^T R(X) \quad (4)$$

여기서, 응답변위와 응답가속도로 표현되는  $ED$  와  $EF$  는 다자유도계에서 구조물의 비탄성 응답을 이용하여 평가한 대표응답을 나타내며, 기존의 전환식을 이용하지 않고 직접적으로 능력스펙트럼을 평가할 수 있다.

#### 3.2 요구스펙트럼(demand spectrum)의 평가

지진하중에 의하여 구조물에 부가되는 지진요구의 산정은 응답가속도( $S_a$ )와 응답변위( $S_d$ )의 형태로 표현되는 비탄성 응답스펙트럼으로 나타낼 수 있다. ATC-40 에서는 유효감쇠계수(effective damping coefficient)를 이용하여 비탄성 응답스펙트럼을 산정한다. 그러나 이러한 유효감쇠를 이용한 요구스펙트럼은 성능점을 산정하기 위하여 반복수행과정이 필요하며 수렴하지 않는 경우도 발생하는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에

서는 Newmark and Hall(1982)에 의하여 제안된 비탄성 응답스펙트럼의 원리를 이용하여 특정 지진하중에 대한 비탄성 응답스펙트럼과 비탄성 설계응답스펙트럼을 요구수평강도의 저감에 따른 변위연성비에 의하여 평가하였다. 목표변위연성비에 대하여 각 주기마다 탄성 거동에서의 수평강도( $f_0$ )와 항복강도( $f_y$ )에 대한 비( $\bar{f}_y$ )를 변화시켜가면서 목표연성비를 만족하는 값을 찾았다. 비탄성 응답변위 및 응답가속도와, 변위연성비와의 관계는 식(5)와 같이 표현된다. 능력스펙트럼을 고려하여 계산된 연성비( $\mu_r$ )가 목표연성비와 일치할때 까지 반복수행하며 최종적으로 산정된 연성비와 그때의 응답변위 및 응답가속도가 비탄성 거동을 고려하였을 경우의 최대변위 및 최대가속도라고 할 수 있다.

$$D_y = \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 A_y, D = \mu \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 A_y, R_y = \frac{f_0}{f_y} = \frac{A}{A_y} = \frac{1}{f_y}, D = \mu \frac{1}{R_y} \left(\frac{T_n}{2\pi}\right)^2 A \quad (5)$$

그리고 비탄성 설계응답스펙트럼은 탄소성시스템에 대하여  $R_y - \mu - T_n$  관계로부터 산정할 수 있다. 이 방법에서는 가속도, 속도 및 변위의 민감구간에 대하여 변위연성비( $\mu$ )와 관련된 계수를 적용함으로써 변위연성비에 따른 설계응답스펙트럼을 구한다. 각각의 응답스펙트럼은 그림 2, 3과 같다.

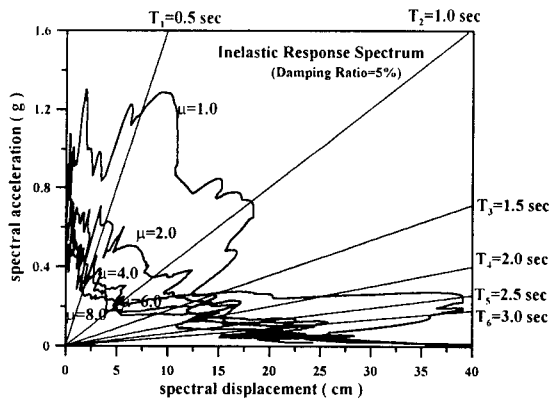


그림 2 비탄성 응답스펙트럼 (IRS)

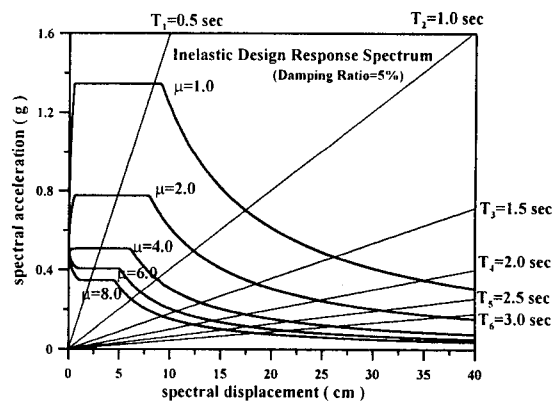


그림 3 비탄성 설계응답스펙트럼 (IDRS)

#### 4. 모멘트골조 구조물의 시스템 연성도 및 내진성능평가

본 연구에서는 모멘트골조 구조물에 대하여 비탄성 시간이력해석을 수행하고, 등가단자유도계와 다자유도계의 대표응답을 이용하여 각각 시스템 연성요구도를 산정하였다. 그리고 수정된 능력스펙트럼을 이용하여 시스템 연성요구도를 평가하고 각 방법에 따른 내진성능을 비교·분석하였다.

##### 4.1 예제구조물과 입력지진하중

예제구조물은 15층의 철근콘크리트 구조물로서 콘크리트 압축강도는  $210 \text{ kg/cm}^2$  이며, 철근의 인장강도는  $4000 \text{ kg/cm}^2$  로 고려하였다. 비탄성 해석을 수행할 경우에는 구조물의 중력하중에 대한 영향을 고려하여야 하므로 모든 층에 대하여 고정하중 (D.L)  $600 \text{ kg/m}^2$  과 적재하중 (L.L)  $250 \text{ kg/m}^2$  을 적용하였다. 예제구조물의 형상과 사용 부재에 대한 단면크기는 그림 4와 표 1에서 나타내었다.

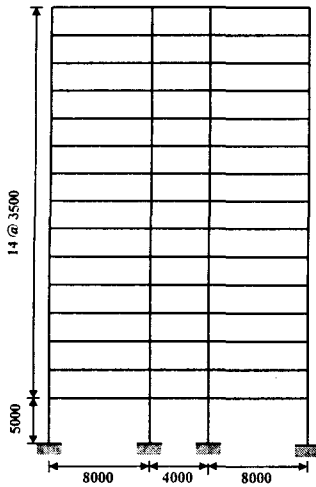


그림 4 15층 모멘트 골조 (단위: cm)

모멘트골조 구조물의 비탄성 시간이력해석에 적용될 하중은 El Centro 지진 (NS, 1940)이며, 유효최대가속도 (Effective Peak Acceleration, 이하 EPA)를 0.40 g로 조정하였다. 그리고 비탄성 정적해석에서 적용될 지진 하중 분포형상은 5% 감쇠비를 가지는 탄성설계응답스펙트럼을 이용하여 평가하였다. EPA가 조정된 지진하중은 그림 5와 같다.

표 1 부재에 대한 단면크기와 철근배근 (단위: mm)

층	기둥(너비×높이)		보 (폭×춤)
	내부	외부	
14층-15층	500×500 8-HD25	450×450 8-HD25	400×500 3-HD25
11층-13층	550×550 12-HD25	500×500 8-HD25	400×550 3-HD25
8층-10층	600×600 16-HD25	550×550 12-HD25	400×600 4-HD25
5층-7층	650×650 20-HD25	600×600 16-HD25	500×600 4-HD25
2층-4층	700×700 20-HD25	650×650 20-HD25	500×650 5-HD25
1층	750×750 24-HD25	700×700 20-HD25	500×700 5-HD25

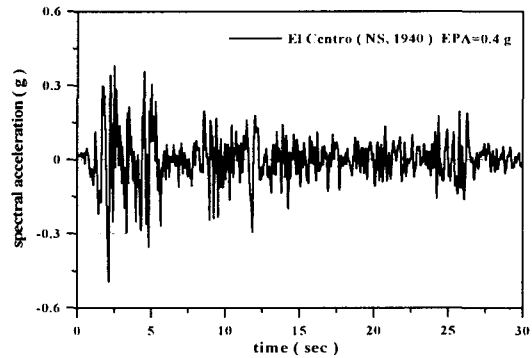


그림 5 지진하중 (El Centro, NS 1940) EPA=0.4 g

#### 4.2 응답스펙트럼 해석결과

모멘트골조 구조물에 대하여 응답스펙트럼 해석을 수행하고 동적특성인 모드형상, 고유진동주기, 모드참여 계수, 유효모드질량을 산정하였다. 응답스펙트럼 해석에서는 모든 모드를 사용하였으며, 전체모드 중에서 주요 3차모드에 대한 응답스펙트럼 해석 결과를 표 2에서 제시하였다.

표 2 예제구조물에 대한 응답스펙트럼 해석결과

예제구조물	모드	고유진동수(sec)	모드참여계수	유효질량계수	질량참여율(%)
15층 모멘트골조	1 차	2.535	1.4024	1.3369	75.529
	2 차	0.906	0.6100	0.2538	14.337
	3 차	0.526	0.3387	0.0820	4.632

비탄성 정적해석을 수행할 경우에 적용되는 하중분포형상을 선택하기 위하여 1차모드에 의한 하중분배 방법(TYPE-S)과 모드조합(SRSS)에 의한 하중분배 방법(TYPE-F), 그리고 층전단력을 이용한 하중분배 방법(TYPE-V)을 적용하여 지진응답(층간변위, 층하중, 층전단력, 정규화된 층전단력)을 비교하였다. 본 연구에서는 그림 6에서 보는 바와같이 가장 정확하게 시간이력해석에 의한 지진응답을 반영하는 TYPE-V를 비탄성 정적해석에서의 하중분포형상(loading shape function)으로 사용하였다.

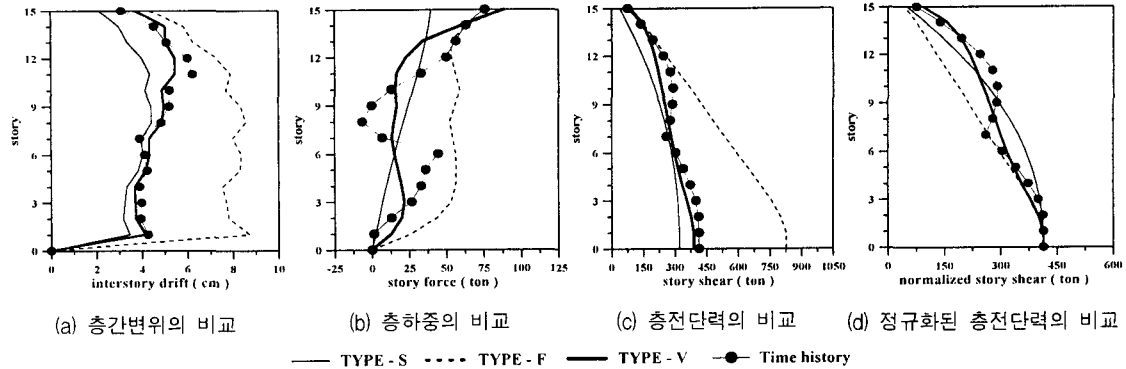


그림 6 지진하중 분배방법에 따른 층전단력과 층하중의 비교

### 4.3 비탄성 시간이력해석을 이용한 시스템 연성요구도

구조물의 시스템 연성요구도는 항복변위( $D_y$ )에 대한 최대변위( $D_{max}$ )의 비로서 정의된다. 본 연구에서는 시스템 연성요구도를 등가단자유도계에 의한 방법과 다자유도계에서의 대표응답을 이용한 방법에 따라서 각각 산정하고 그 결과를 비교하였다. 그리고 대표응답이 반영된 수정된 능력스펙트럼법을 이용하여 성능점을 평가함으로써 시스템 연성요구도를 평가하였다. 그림 7은 다자유도계에서의 대표변위와 대표저항력을 15층 모멘트골조 구조물에 대하여 산정하고 최상층 변위 및 밑면전단력과 비교하여 나타낸 것이다.

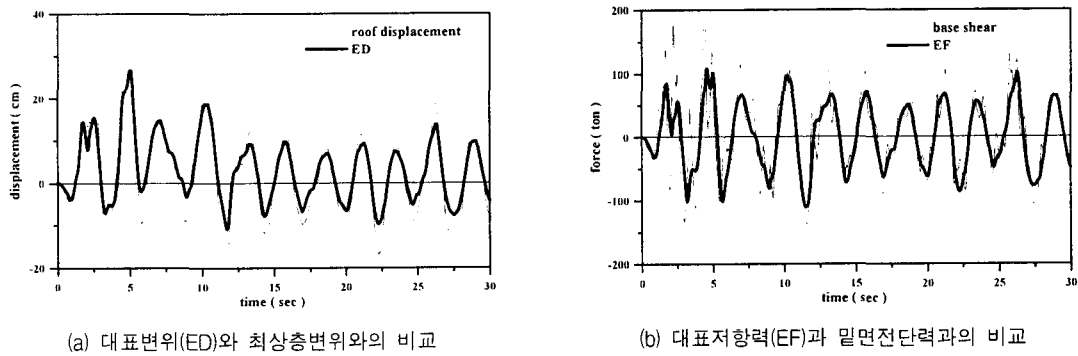


그림 7 모멘트골조 구조물에 대한 대표변위(ED)와 대표저항력(EF)의 산정

그림 8은 밑면전단력과 구조물의 최상층 변위로서 표현되는 능력곡선과 이를 ATC-40에서 적용되고 있는 능력스펙트럼법에 의하여 전환된 능력스펙트럼을 본 연구에서 제안한 대표응답을 이용한 방법과 각각 비교하였다. 두가지의 방법에 의한 구조물의 능력스펙트럼은 비교적 차이가 발생하였으며 이는 성능점 및 구조물의 연성요구도가 달라질 수 있다는 것을 의미한다.

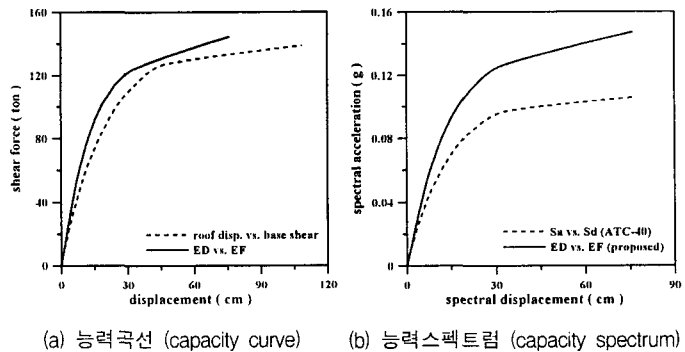


그림 8 능력곡선과 능력스펙트럼의 비교

본 연구에서 제시한 하중분포형상을 이용하여 비탄성 정적해석을 수행한 후에 그림 9와 같이 산정한 변형형상을 기반으로 하여 예제구조물의 등가단자유도계의 특성을 구하였다. 그림 10(b)는 등가단자유도계 방법을 사용하여 구한 힘과 변위 관계를 나타낸 것이다. 비선형 성질을 이선형(bilinear)으로 모형화하였기 때문에 힘과 변위 관계는 완전한 이선형 형태로 나타난다. 그림 10(c)에서 보여지는 다자유도계의 대표응답을 이용한 방법은 약간의 불규칙한 거동을 보이고 있으며 이는 실제적인 비탄성 거동의 시간에 따른 변동을 반영하고 있기 때문이다. 그러나 시스템 연성요구도를 평가하기 위한 항복력 및 최대변위의 평가는 두 방법이 큰 차이가 없이 비슷함을 알 수 있다.

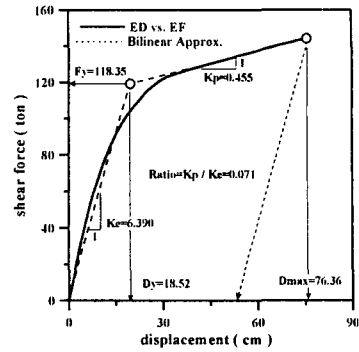


그림 9 등가단자유도계의 특성

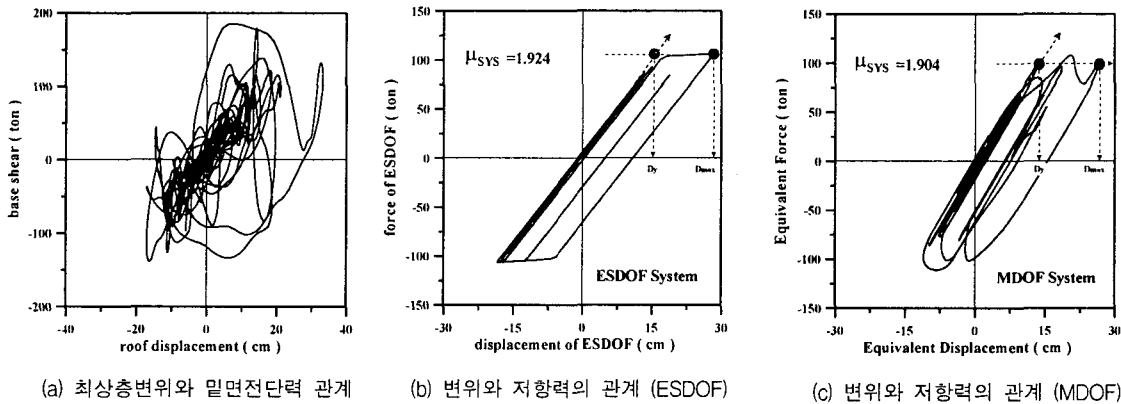


그림 10 구조물의 변위와 저항력을 이용한 각 방법의 시스템 연성요구도 평가 비교

능력스펙트럼법(CSM)에 의한 시스템 연성요구도의 평가는 그림 11 과 표 3 에서 나타내었다.

표 3 CSM에 의한 시스템 연성요구도의 산정 과정

시스템	$\mu$ (SDOF)	D (cm)	A (g)	$\mu_{sys}$ (MDOF)
Modified CSM (proposed)	A ( $\mu = 8$ )	16.05	0.094	0.866
	B ( $\mu = 6$ )	19.44	0.116	1.049
	C ( $\mu = 4$ )	25.88	0.124	1.396
	$\mu = 2.1$	38.58	0.129	2.082
CSM (ATC-40)	D ( $\mu = 2$ )	45.96	0.132	2.480
	E ( $\mu = 8$ )	19.27	0.081	1.126
	F ( $\mu = 6$ )	23.44	0.097	1.369
	G ( $\mu = 4$ )	32.05	0.104	1.873
	$\mu = 2.4$	48.34	0.107	2.825
	H ( $\mu = 2$ )	59.53	0.109	3.478

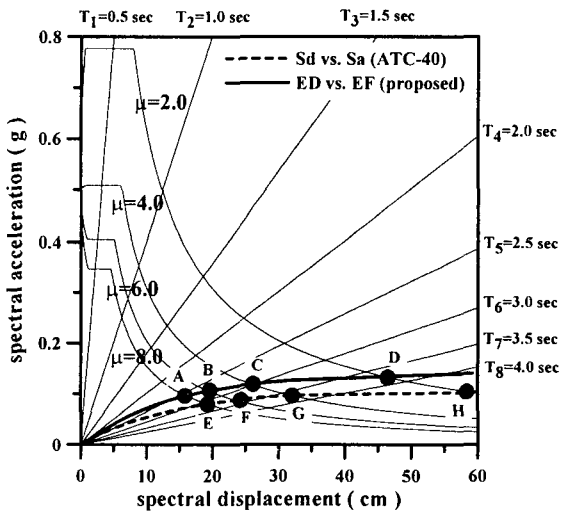


그림 11 비탄성 설계응답스펙트럼을 이용한 성능점의 산정

#### 4.4 각 방법에 따른 시스템 연성요구도의 비교 및 분석

앞서 제시되었던 네가지 방법에 의하여 모멘트골조 구조물의 시스템 연성요구도를 산정하여 보았다. CSM에 의하여 결정된 성능점과 시스템 연성요구도의 관계는 그림 12와 같으며, 각 방법에서 산정된 시스템 연성요구도의 비교는 표 4 와 같다.

표 4 각 방법에 따라 산정된 시스템 연성요구도 비교

구분	시스템 연성요구도 (system ductility demand)	
비선형 시간이력해석	ESDOF	$\mu_{sys} = 1.924$
	MDOF(대표응답)	$\mu_{sys} = 1.904$
능력스펙트럼법	Modified CSM	$\mu_{sys} = 2.082$
	CSM(ATC-40)	$\mu_{sys} = 2.825$

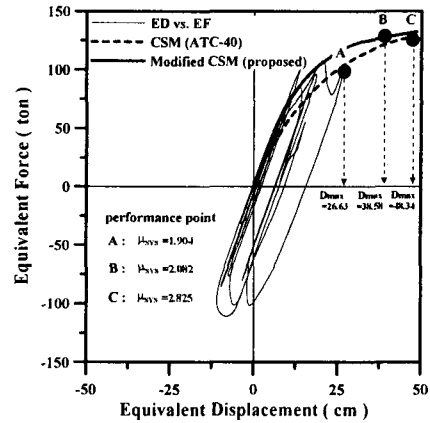


그림 12 성능점과 시스템 연성요구도

### 5. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 모멘트골조 구조물에 대하여 비선형 시간이력해석과 능력스펙트럼법을 이용하여 시스템 연성요구도를 산정하는 방법을 살펴보았다. 그리고 다자유도계에서의 대표응답을 이용하는 방법과 대표응답을 이용한 능력스펙트럼법에서 성능점을 결정하는 방법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 구조물의 대표응답을 이용하면 등가단자유도계에 의한 방법보다 시스템 연성요구도를 보다 명확하게 평가할 수 있다. 그리고 산정된 시스템 연성요구도는 능력스펙트럼법에 의하여 결정되는 성능점에서의 연성요구도와 비교될 수 있으며, 구조물의 내진성능을 평가하는 기준이 될 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 대표응답을 이용한 능력스펙트럼은 응답변위와 응답가속도에 대한 능력스펙트럼 형식으로서의 전환이 필요 없이 직접적으로 구조물의 저항능력을 평가할 수 있으며, 성능점에서의 시스템 연성요구도를 기존의 능력스펙트럼법에 의한 방법보다 비교적 정확하게 평가할 수 있었다.
- (3) 다양한 지진하중에 대한 평가와 구조물의 층연성요구도를 평가할 수 있는 방법이 추후 연구로 요구된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2001년도 두뇌한국21 사업 핵심분야 사업비와 서울대학교 지진공학연구센터(KEERC)를 통한 한국과학재단 우수연구센터에 의하여 지원되었음을 밝히며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," *ATC-40 Report, Applied Technology Council*, Redwood City, California, 1996.
2. Dong-Guen Lee, Jong-Keol Song and Chung-Bang Yun, "Estimation of system-level ductility demands for multi-story structures," *Engineering Structures*, Vol.19, No.12, pp.1025-1035, 1997.
3. A. K. Chopra and R. K. Goel, "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.