수정된 능력스펙트럼을 이용한 건축구조물의 내진성능평가
Seismic Performance Evaluation of Building Structures Using Modified Capacity Spectrum

최 원 호* 이 동 근**
Choi, Won-Ho Lee, Dong-Guen

ABSTRACT

Current seismic design codes for building structures are based on the methods which can provide enough capacity to satisfy objected performance level and exactly evaluate the seismic performance of buildings. The capacity spectrum method using the nonlinear static (pushover) analysis is becoming a popular tool for evaluating the seismic performance of existing and new building structures.

By means of a graphical procedure, capacity spectrum method esimates the performance level of structure by comparing the capacity of structure with the demand of earthquake ground motion on the structure. In the method, the relation between base shear estimated by a nonlinear static analysis and horizontal displacement is used. Capacity spectrum is usually expressed as what represents the responses of the equivalent single degree of freedom (ESDOF) system for the building structures. However, there are some problems in converting procedures into ESDOF system which include not considering the effect of higher modes of structures. The objective of this paper is to compare and verify existing methods and suggest the modified capacity spectrum for seismic performance evaluation of building structures.

1. 서 론

최근 건축구조물에 대한 내진설계기준은 구조물의 사용년한 동안에 예상할 수 있는 지진하중에 대하여 목표로 하는 성능수준을 만족하도록 설계하는 성능에 기초한 내진설계(Performance Based Seismic Design)의 원리에 기반을 두고 있다. 지진하중에 대한 구조물의 거동을 보다 명확하게 규명함으로써 내진성능을 평가하는 기법들이 적용되고 있으며 가장 대표적인 방법이 바로 능력스펙트럼법(Capacity Spectrum Method 이하 CSM)이다. CSM은 설계지진하중에 대한 지진요구(seismic demand)와 구조물의 보유능력(capacity)을 각각 응답가속도와 응답변위의 형태로 표현하고 하나의 그래프에 나타냄으로써 구조물의 성능점(performance point)을 산정하는 방법이다. 이 방법은 현재 ATC-40[1]과 FEMA-273[2] 등의 내진설계기준에서 기존 건축구조물에 대한 내진성능평가와 보강을 위한 기법으로 광범위하게 적용되고 있다.

일반적으로 CSM에서 지진요구는 비탄성변형을 고려한 스펙트럼 형식으로 나타내고 구조물의 보유 능력은 비선형 정적해석(pushover analysis)을 수행하여 밑면전단력과 구조물의 횡변위와의

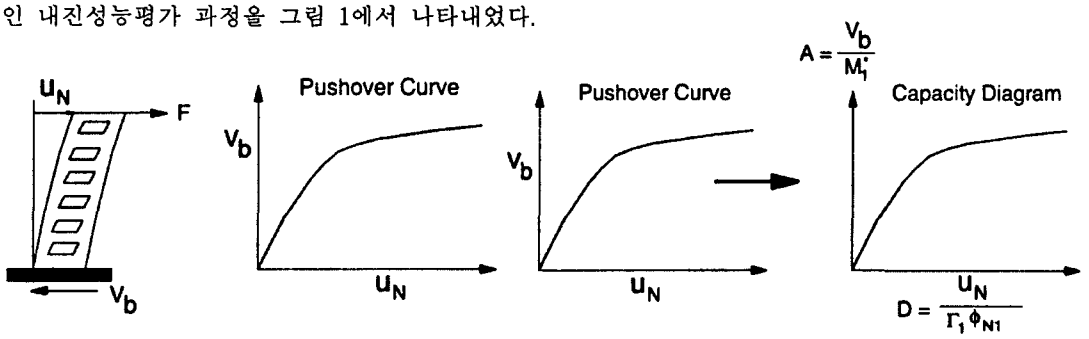
* 학생회원 성균관대학교 건축공학과 박사과정
** 정 회 원 성균관대학교 건축공학과 교 수

관계로 표현된다. 특히 비선형 정적해석에서 산정된 하중-변위 관계를 능력스펙트럼으로 표현하기 위해서는 반드시 등가의 단자유도계(Equivalent Single Degree of Freedom system)로 치환을 하여야 한다. 몇몇 연구자들에 의하여 다자유도 구조물을 등가의 단자유도계로 전환하는 연구가 수행된바 있으나 이러한 등가의 단자유도 시스템은 고차모드에 대한 효과를 제대로 고려하지 못함으로 인하여 원래의 다자유도 구조물의 특성을 제대로 표현하지 못하는 문제점이 있다.

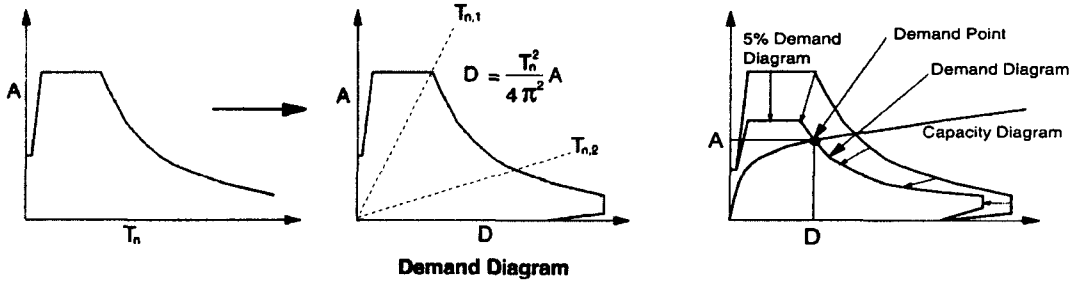
본 연구에서는 기존에 연구된 능력스펙트럼에 대한 방법들을 비교분석하고 이와 다른 수정된 능력스펙트럼을 제안하고자 한다. 그리고 수정된 능력스펙트럼을 이용하여 예제구조물의 내진성능을 ATC-40에서 제시된 방법과 변위연성비를 이용한[3] 방법으로 평가하고 비교하여 보았다.

2. CSM에 의한 내진성능평가

CSM에서는 건축구조물의 횡하중에 대한 저항능력을 비선형 정적해석을 수행한 후 하중-변위 곡선으로 표현하고 고려되는 지진 수요를 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. CSM에 의한 일반적인 내진성능평가 과정을 그림 1에서 나타내었다.



(a) 비선형 정적해석에서의 하중-변위 관계 (b) 능력스펙트럼으로의 변환



(c) 요구 응답스펙트럼의 ADRS 변환 (d) 비선형응답 산정과 성능수준

그림 1. CSM을 이용한 내진성능평가 과정

3. 비선형 정적해석에 의한 하중-변위 관계의 산정

비선형 정적해석에서 산정된 하중-변위에 대한 관계를 능력스펙트럼으로 변환하기 위해서는 다자유도계 시스템의 비선형 특성을 적절하게 반영할 수 있는 등가 단자유도계로 전환하는 과정이 필요하다. 등가의 단자유도 시스템에 대한 모델은 여러 가지 다른 목적으로 개발된 방법으로써 Q

모델, N2 방법[4], Lee 모델[5] 등이 있다. 이 방법들은 구조물의 층변위, 밑면전단력, 전도모멘트를 예측하기 위하여 다자유도계의 비선형 정적해석 및 등가 단자유도계의 비선형 동적해석의 과정에 의해서 구성된다. 위에서 언급한 세가지 등가 단자유도 모델은 구조물의 동적거동이 대부분 1차모드에 의해서 결정이 된다는 가정하에서만 성립될 수 있다. 그리고 비선형 정적해석 역시 구조물의 1차모드만을 반영하여 다자유도 구조물의 비선형 거동을 결정하는 문제점이 있다.

본 연구에서는 기존의 등가 단자유도계에서의 하중-변위 관계를 산정하는 방법을 검증하고, 이와 다른 다자유도계에서 직접 하중-변위 관계를 산정할 수 있는 방법을 제안하였다.

3.1 등가단자유도계를 이용한 방법 (N2 방법과 Lee 모델)

일반적으로 등가의 단자유도계 모델은 다자유도계의 동적 운동방정식으로부터 유도된다. 본 논문에서 적용하는 N2 방법(Fajfar *et al*, 1996)과 Lee 모델(Lee, 1984)에 의한 등가단자유도계 모델은 구조물의 1차모드만을 고려하여 평가하는 것이다. N2 방법의 경우는 구조물의 최상층변위와 하중과의 관계에 의하여 등가의 강성이 산정되며, Lee 모델의 경우는 구조물 전체의 강성을 대표하는 단일 등가강성을 찾기 위하여 정적 변형형상으로부터 대표변위를 산정한다. 두 방법 모두 하중-변위에 대한 비탄성 관계는 이선형(bilinear) 이력거동으로 근사화된다. 각각의 방법에서 제안하는 등가의 질량, 강성 및 등가주기는 다음식에서 구할 수 있다.

(1) N2 방법에 의한 등가단자유도 시스템

$$m = \phi_1^T M 1 \qquad k = \frac{F}{D} = \frac{c \sum P_i}{c D_t} \qquad T_{eq} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{1}$$

여기서, $c = (\phi_1^T M \phi_1)/(\phi_1^T M 1)$, D_t =구조물의 최상층변위, $\sum P_i$ =각 층하중의 합을 나타낸다.

(2) Lee 모델에 의한 등가단자유도 시스템

$$m = \sum_{i=1}^{n} M_i D_i^2 \qquad k = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} K_{ij} D_i D_j \qquad T_{eq} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{2}$$

여기서, 형상벡터 $D_i = e\overline{D_i}$, $e = (\sum M_i \overline{D}_i)/(\sum M_i \overline{D}_i^2)$, $\overline{D_i}$ = 변위형상벡터, M_i는 구조물 각층의 질량을 나타낸다. Lee 모델에서 1차모드가 구조물의 거동에 지배적인 영향을 미치는 경우에는 비선형 정적해석에서 수행된 각 층의 변위로부터 대표변위를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$x = \frac{\sum M_i X_i^2}{\sum M_i X_i} \tag{3}$$

여기서, X_i는 각 층의 변위를 나타내며, 구조물의 변형된 모양을 그대로 고려하여 산정된 대표변위 x와 밑면전단력을 이용하여 하중-변위 관계가 표현된다.

3.2 다자유도계 응답을 이용하는 방법 : 제안된 방법

이 방법은 구조물의 하중-변위 관계를 다자유도계의 동적 응답을 기반으로 하여 구해진다. 구조물의 i번째 모드형상 ϕ_i에 대한 모드별 변위 $x_i(t)$는 식(4)와 같이 평가될 수 있다.

$$x_i(t) = \frac{\phi_i^T M X(t)}{\phi_i^T M 1} \tag{4}$$

일반적으로 정형구조물의 대부분의 동적응답은 구조물의 첫 번째 진동모드형상에 의하여 지배된다. 동적응답의 결과로부터 첫 번째 모드성분이 지배적일 경우 모드형상벡터를 정규화된 다자유도계의 첫 번째 모드형상 ϕ_1로 취할 수 있다. 본 연구에서는 구조시스템의 대표적인 변위 $x(t)$를 첫 번째 모드변위로 평가할 수 있다는 가정하에 다음식과 같이 다자유도계 대표변위를 구하였다.

$$x(t) = \frac{\phi_1^T M X(t)}{\phi_1^T M 1} \tag{5}$$

구조물의 응답이 정확하게 첫 번째 진동모드와 탄성범위내에서 거동을 한다고 가정하면, 다자유도계에 대한 구조시스템의 대표적 저항력 $r(x)$는 다자유도 구조물의 밑면전단력과 같아진다.

$$\begin{aligned} r(x) &= \phi_1^T R(X) = \phi_1^T KX = \phi_1^T K\phi_1 x = \omega^2 \phi_1^T M\phi_1 x \\ &= \omega^2 \phi_1^T M1x = \phi_1^T K1x = 1^T R(X) = V_0 \end{aligned} \tag{6}$$

4. 각 방법에 따른 능력스펙트럼의 변환

비선형 정적해석에서 산정된 하중-변위 관계를 각각 응답가속도와 응답변위로 변환하여 표현한 것이 능력스펙트럼이다. 본 연구에서는 이러한 능력스펙트럼의 형식으로 변환하는 기존의 연구방법에 앞서 제시되었던 각 방법에 의한 하중-변위 관계를 적용하여 보았다.

4.1 N2 방법에서의 능력스펙트럼 변환

식(1)로부터 제시된 등가의 질량과 구조물의 최상층 변위는 다음 식을 이용하여 능력 스펙트럼 형식으로 변환이 된다. N2 방법에서는 구조물의 1차모드만을 고려하여 평가한다.

$$S_a = \frac{F}{m} \qquad S_d = D_t \times c \tag{7}$$

식(7)에 의하면 N2 방법에서의 하중-변위 관계는 등가질량 m에 의하여 응답가속도로 변환이 되고, 모드참여계수의 역수로 표현되는 c계수를 구조물의 최상층 변위에 곱함으로써 응답변위의 형태로 표현이 된다.

4.2 ATC-40 에서의 능력스펙트럼 변환

본 연구에서 제안되었던 Lee 모델에 의한 방법과 다자유도계 응답을 이용한 하중-변위 관계는 ATC-40에서 제시하는 능력스펙트럼의 변환식을 이용하였다. ATC-40에서 제시하는 능력스펙트럼으로의 변환식은 다음과 같다.

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \qquad S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1 \times \phi_{1,roof}} \tag{8}$$

여기서, $PF_1 = \left[\dfrac{\sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{i1}^2} \right]$, $\alpha_1 = \dfrac{\left[\sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{i1} \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{N} m_i \right] \sum_{i=1}^{N} m_i \phi_{i1}^2}$ Δ는 구조물의 최상층 변위이다.

본 연구에서는 Lee 모델에서 산정된 대표변위와 다자유도계 응답에서 직접 구한 대표변위를 식(8)에 적용하였으며 모드참여계수와 구조물의 질량참여계수는 1차모드를 고려하였고, 모드형상계수 역시 각 방법에 의해서 산정된 조정된 값을 사용하였다.

5. 예제구조물의 해석

본 연구에서 제안한 능력스펙트럼을 적용하여 예제구조물에 대한 건축물의 내진성능을 평가하여 보았다. 비선형 정적해석을 통한 능력스펙트럼 산정은 등가단자유도계에 의한 방법 (N2 방법, Lee 모델)과 다자유도계에서 직접적으로 대표변위를 산정함으로써 하중-변위관계를 표현하는 방법을 비교분석하였다. 예제구조물의 내진성능평가 방법은 ATC-40에서 제시된 성능평가방법과 변위연성비를 이용한 성능평가방법을 비교하여 보았으며, 지진하중에 대한 요구스펙트럼에서 고려된 하중은 1940년 El Centro 지진 남북방향 성분을 선택하였다.

5.1 예제구조물의 선택

예제구조물은 2경간 4층 구조물로서 건축물의 설계기준에 의하여 설계되었으며 층고는 3.5m로 설정하였다. UBC-97 기준에 근거하여 중약진 지역에 적절한 지진계수가 적용된 밑면전단력을 산정하였다. 산정된 밑면전단력은 UBC-97 기준에서 제시한 층하중분배식에 의하여 구조물에 횡하중을 분포시켰으며, 비선형 정적해석 프로그램은 DRAIN-2D+[6]을 사용하였다. 보와 기둥 부재의 비탄성 변형은 부재의 단부에 집중된다고 가정하였으며 그림 3과 같이 강기둥 약보의 설계개념이 적용되었다. 예제구조물의 형상은 그림 2와 같으며 단면에 대한 크기 및 배근은 표 1과 같다.

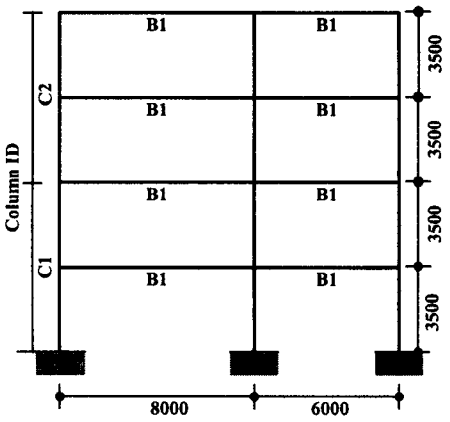


그림 2. 예제구조물의 형상

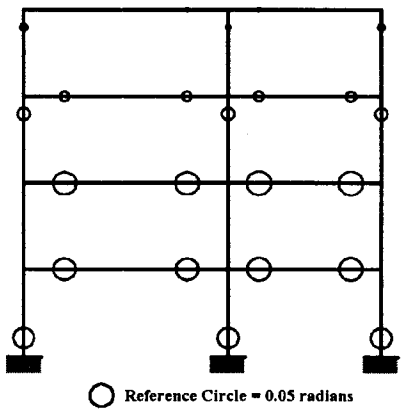


그림 3. 소성힌지의 발생 분포

표 1. 예제구조물의 부재 단면 (단위 : mm)

구 분	단 면	단면 크기		주 근	보조근 또는 늑근
기 둥	C1	내 부	500×500	16 - HD25	D10 @ 300
		외 부	400×400	12 - HD25	D10 @ 300
	C2	내 부	400×400	12 - HD25	D10 @ 300
		외 부	300×300	8 - HD25	D10 @ 300
보	B1	300×400		TOP 3-HD25, BOTT. 3-HD25	D10 @ 300

5.2 하중-변위 관계 및 능력스펙트럼의 비교

선택된 예제구조물에 대하여 등가단자유도계를 이용한 방법과 다자유도계에서 대표변위를 고려한 방법을 적용하여 능력스펙트럼을 비교하였다. 본 논문에서 적용된 능력스펙트럼을 산정하는 방법은 표 2와 같으며 각 방법에서 산정된 하중-변위 관계는 그림 4와 같다.

표 2. 각 방법에 의한 하중-변위 관계 및 능력스펙트럼 변환

방 법	하중-변위 관계	능력스펙트럼 변환
Method-1	N2 방법	N2 방법
Method-2	Lee 모델	ATC-40 (1차모드)
Method-3	MDOF-1차 모드	ATC-40 (1차모드)

각 방법에 따른 하중-변위 관계를 그림 4에서 살펴보면 N2 방법에 의한 Method-1과 대표변위로 평가되는 Method-2는 정확하게 비교할 수는 없다. 변환된 능력스펙트럼은 본 예제구조물의 경우 Method-2와 Method-3가 거의 일치하였으며, 그림 5에서 알 수 있듯이 N2 방법에 의한 능력스펙트럼이 다른 두 방법에 비하여 응답변위가 작게 평가되고 있다.

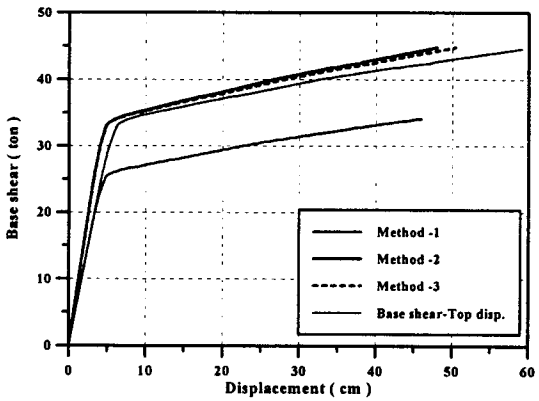


그림 4. 각 방법에 따른 하중-변위 관계

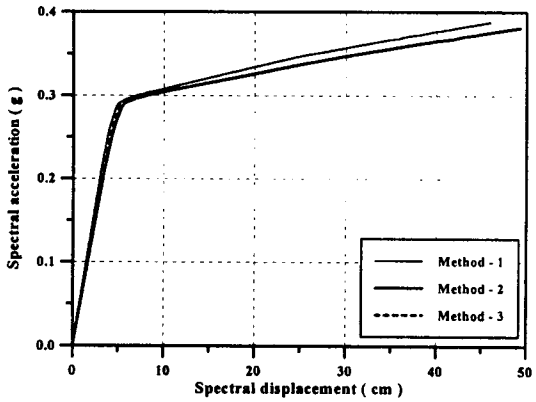


그림 5. 각 방법에 따른 능력스펙트럼 비교

6. 예제구조물의 내진성능평가

각 방법에 의해서 변환된 능력스펙트럼과 El Centro (1940, NS) 지진에 의한 요구스펙트럼을 이용하여 ATC-40에서 제시된 내진성능평가 방법과 변위연성비를 이용한 방법으로 예제구조물의 내진성능을 비교하여 보았다.

6.1 ATC-40 에 의한 내진성능평가

ATC-40 에서는 비탄성 요구스펙트럼은 5% 감쇠를 가진 선형 탄성응답스펙트럼을 기준으로 등가의 면적을 가지는 이선형곡선을 이용하여 등가감쇠를 산정한 후 이력특성이 고려된 유효감쇠계수에 의하여 평가된다. 표 3과 그림 7은 Method-3 에 대하여 이러한 평가과정을 나타내고 있으며 적절한 오차범위내에 수렴할때까지 반복수행하여 구조물의 비탄성 응답을 산정한다.

표 3. ATC-40 의 성능평가방법에 의한 성능점의 산정 (Method-3)

Iteration No.	D_i (cm)	A_i (g)	ζ_{eq}	D_j (cm)	A_j (g)	Error(%)
1	11.496	0.3074	0.1616	6.248	0.2942	-83.99
2	6.248	0.2942	0.0797	9.384	0.3032	33.42
3	9.384	0.3032	0.1397	6.952	0.2972	-34.98
:	:	:	:	:	:	:
16	**7.964**	**0.2984**	**0.1184**	**7.968**	**0.2986**	**0.05**

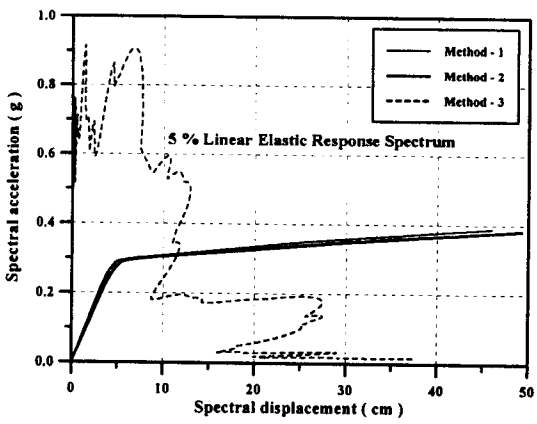


그림 6. 능력스펙트럼과 5% 탄성 응답스펙트럼

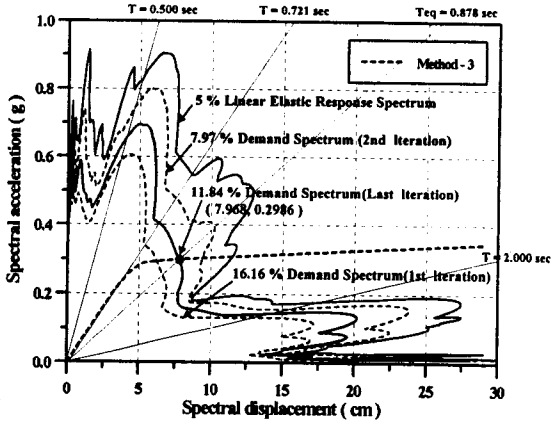


그림 7. 유효감쇠계수에 의한 성능점 산정

6.2 변위연성비를 이용한 내진성능평가

유효감쇠계수를 이용하는 ATC-40에서의 요구스펙트럼은 정확한 의미에서 비탄성 스펙트럼이라고 할 수 없다. 비탄성 스펙트럼은 구조물의 비탄성 이력거동이 고려된 요구수평강도의 저감에 따른 변위연성비를 이용하여 평가되어야 한다. 본 연구에서는 Method-3의 능력스펙트럼에 대하여 목표연성비를 설정한 후에 각 주기마다 탄성 거동에서의 수평강도(f_0)와 항복강도(f_y)에 대한 비($\overline{f_y}$)를 변화시켜가면서 목표연성비를 만족하는 값을 찾았다.

그림 8에서는 목표연성비에 의한 변위연성비 2, 4, 6, 8에 대하여 비탄성스펙트럼을 표현하고 성능점을 산정하였다.

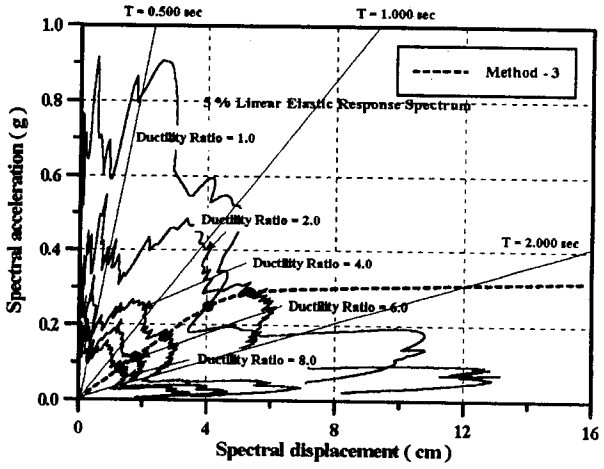


그림 8. 변위연성비에 의한 성능점 산정

비탄성 응답변위 및 응답가속도와, 변위연성비와의 관계는 식(9)와 같이 표현된다. 계산된 연성비(μ_r)가 목표연성비와 일치할때까지 반복수행하며 최종적으로 산정된 연성비와 그때의 응답변위 및 응답가속도가 비탄성 거동을 고려하였을 경우의 최대변위 및 최대가속도라고 할 수 있다.

$$D_y = (\frac{T_n}{2\pi})^2 A_y \ , \ D = \mu (\frac{T_n}{2\pi})^2 A_y \ , \ R_y = \frac{f_0}{f_y} = \frac{A}{A_y} = \frac{1}{f_y} \ , \ D = \mu \frac{1}{R_y} (\frac{T_n}{2\pi})^2 A \qquad (9)$$

표 4. 변위연성비를 이용한 성능점의 산정 (Method-3)

변위연성비	D_y (cm)	A_y (g)	D (cm)	μ_r	A (g)
μ = 1.50	5.3620	0.2890	8.1273	1.5157	0.2874
μ = 1.51			**8.0864**	**1.5080**	**0.2896**
μ = 1.55			7.7564	1.4465	0.2899
μ = 1.58			7.6873	1.4336	0.2959
μ = 1.60			7.6250	1.4220	0.2996

6.3 해석결과의 분석 및 평가

본 연구에서 제시된 예제구조물에 대하여 각 방법에 따른 하중-변위 관계와 능력스펙트럼을 비교하여 본 결과 Method-2와 Method-3의 경우가 거의 일치함을 알 수 있었다. 그리고 ATC-40 과 변위연성비를 이용한 내진성능평가 결과에서도 Method-2 와 Method-3 가 비슷한 응답가속도와 응답변위를 나타내었다. 선택된 지진하중에 대한 요구스펙트럼에서 구조물의 능력스펙트럼이 같을 경우는 성능평가 역시 같아진다는 것을 알 수 있으며, 만약 고차모드의 영향을 받는 구조물의 경우에는 본 논문에서 적용된 능력스펙트럼의 각 방법들이 상당히 차이가 날 것으로 판단된다.

7. 결론 및 추후연구과제

본 연구에서는 구조물의 내진성능평가를 위하여 기존에 연구된 능력스펙트럼과 수정된 능력스펙트럼을 제안하여 이를 비교분석하여 보았다. 그리고 제안된 능력스펙트럼을 적용하여 ATC-40 에서 제시한 내진성능평가 방법과 변위연성비를 이용한 내진성능평가 방법을 적용하여 보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 등가의 단자유도계를 이용하여 능력스펙트럼을 변환하는 경우에는 비선형 정적해석에서 산정되는 하중-변위 관계를 정확하게 표현할 수는 없다. 특히 N2 방법에 의한 경우 능력스펙트럼에서 변위가 다소 과소평가 되었으며 등가 단자유도계 모델을 사용할 경우에는 대표변위를 이용하여 하중-변위 관계를 평가하는 Lee 모델이 더 적절한 것으로 판단된다.
2. 구조물의 거동에서 1차모드가 지배적인 경우에는 본 연구에서 제안한 다자유도계에서 직접 구한 대표변위를 이용하여 하중-변위 관계를 평가하고 이를 적용하여 능력스펙트럼으로 변환하는 것이 비교적 정해에 근접하는 것으로 판단된다.
3. 본 연구에서의 예제구조물은 정형이고 비교적 층수가 낮은 구조물이기 때문에 고차모드에 대한 기여를 정확하게 평가할 수 없었다. 그러므로 추후 연구과제로는 고차모드의 영향을 고려할 수 있는 고층구조물 및 비정형 구조물에 대한 내진성능평가 방법이 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 1999년도 두뇌한국 21사업 핵심분야 사업비에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. ATC(1996), "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California.
2. FEMA (1997), "NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings," FEMA 273, October, Washington, D.C. : Federal Emergency Management Agency.
3. A. K. Chopra, R. K. Goel(1999), "Capacity-Demand-Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures : SDF Systems," Report No.PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engneering Research Center, University of Califonia, Berkeley.
4. P. Fajfar, M. Fischinger (1988), "N2 - A Method for Non-linear Seismic Analysis of Regular Buildings," Proc. 9th World Conf. Earthquake Engng. Tokyo, Kyoto, Vol.5, pp.111-116.
5. D. G. Lee(1984), "Accurate and Simplified Models for Seismic Response Prediction of Steel Frame Structure," Phd thesis, Stanford Univ.
6. K. C. Tsai, J. W. Li(1994), " DRAIN 2D+ - A General Purpose Computer Program for Static and Dynamic Analyses of Inelastic 2D Structures Supplemented with a graphic processor," Report No. CEER/R83-03, National Taiwan Univ.