

2.2.3 능력스펙트럼 법(Capacity spectrum method, CSM)

능력스펙트럼법은 1975년 Freeman에 의하여 처음 소개된 이후 ATC-40과 FEMA-273 등에 도입되어 건축물에 대한 내진성능 평가와 보강을 위한 방법으로 사용되고 있다. 건물의 내진성능을 비교적 쉽고 빠르게 평가하기 위하여 개발된 능력스펙트럼법은 지진하중에 대한 건물의 저항능력을 나타내는 능력스펙트럼과 가속도-변위 응답 스펙트럼 형식의 지진의 요구를 나타내는 요구스펙트럼을 하나의 그래프에서 표현함으로써 건물의 성능점을 시각적으로 쉽게 평가하는 방법이다. 건물의 선형탄성응답은 5% 감쇠비의 요구스펙트럼을 이용하여 나타내고 건물의 비탄성 응답은 높은 감쇠 스펙트럼으로 나타낸다.

가) 능력스펙트럼(Capacity spectrum)

능력곡선은 요구하는 능력(최대층간변위 등)에 도달할 때까지 횡하중을 증가시킴으로써 구할 수 있으며 지붕의 횡변위와 건물의 밀면전단력으로 표현된다. 일반적으로 이러한 해석방법에 의하여 얻어진 곡선을 Pushover curve라고 한다. 능력곡선을 얻기 위하여 구조물에 작용하는 횡하중의 분배 방법 중 1차모드가 지배적인 구조물에 대하여 식(2-12)과 같이 밀면전단력을 건물의 높이에 따라 1차모드 형상에 따라 분배한다.

$$F_i = \frac{m_i \phi_{i1}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{i1}} V \quad (2-12)$$

여기서 , F_i : i 층의 층지진하중

m_i : i 층의 층질량

ϕ_i : 1차모드에서 i 층의 모드 형상계수

V : 밀면전단력

N : 건물의 층수

그러나 1차모드 형상에 따른 분배 방법은 고차모드의 영향을 고려하지 못한다는 단점이 있다. 몇몇 연구자들에 의하여 건물의 모드해석을 수행한 후 고차모드의 영향을 고려한 횡하중 분배 방법들이 제안되었다. 그 중에서 식 (2-13)는 Freeman 등이 제안한 방법으로 각 모드에 대한 하중을 SRSS조합 방법을 이용하여 분배하는 방법이다.

$$F_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2} \right) \phi_{ij} S_{a_j} m_i \right]^2} \quad (2-13)$$

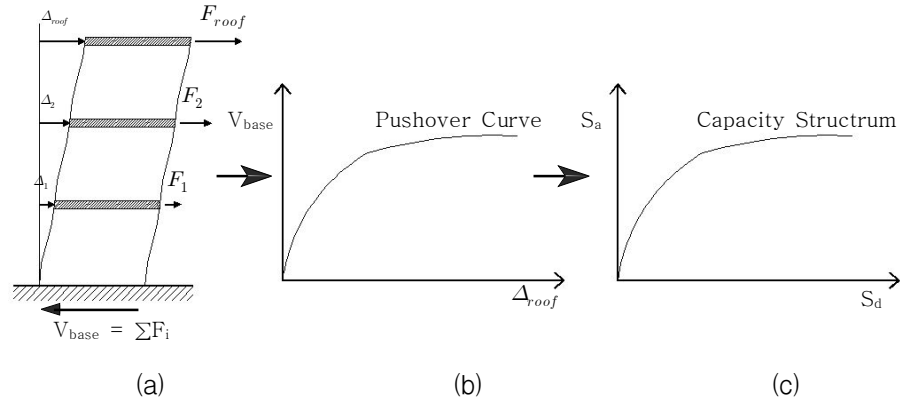
여기서, ϕ_{ij} : j 번째 모드에서 i 층의 모드 형상 계수

S_{a_j} : j 번째 모드에 대한 탄성스펙트럼에서의 가속도

또한, Valles 등은 등가고유모드 형상계수($\bar{\phi}_i$)와 등가모드 참여계수($\bar{\Gamma}$)를 이용하여 식(2-15)과 같이 제안하였다. 등가고유모드 형상계수는 먼저 각 모드별 참여계수(Γ_j)를 구한 후 식(2-14)에 대입하여 구할 수 있다.

$$F_i = \frac{m_i \bar{\phi}_i}{\sum_{i=1}^N m_i \bar{\phi}_i} V \quad (2-14)$$

$$\Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}}{\sum_{i=1}^N m_i \phi_{ij}^2}, \quad \bar{\phi}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^N (\phi_{ij} \Gamma_j)^2} \quad (2-15)$$



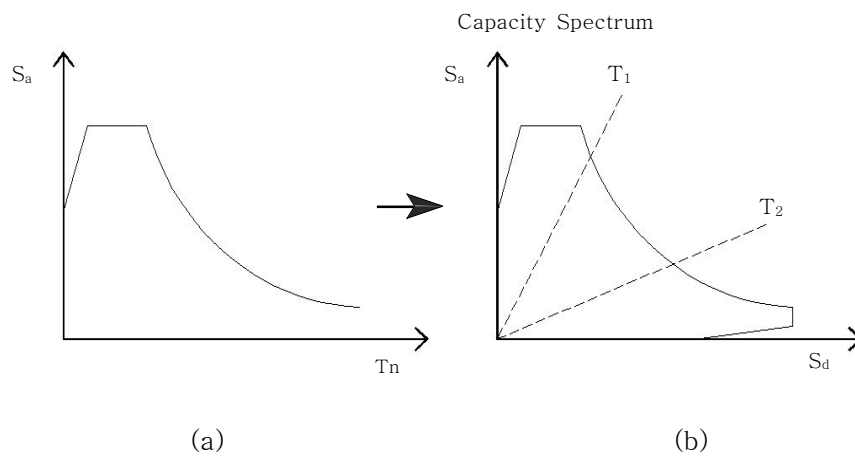
<그림 2-4> 능력스펙트럼

<그림 2-4(b)>와 같이 비선형 정적해석에 의하여 산정된 능력곡선을 요구스펙트럼과 직접 비교하기 위하여 구조물의 동적특성을 이용하여 Δ_R 과 V 의 능력곡선을 <그림 2-4(c)>에 나타낸 것과 같이 응답 가속도(S_a)와 응답 변위(S_d)의 능력스펙트럼으로 변환하게 된다. 1차 모드 형상을 이용한 능력스펙트럼으로의 변환은 식(2-16)과 같다. 여기서 Γ_1 은 1차 모드에 대한 참여계수이고 M_1^* 은 1차모드에 대한 유효모드질량으로 식(2-16)과 같다.

$$S_a = \frac{V}{M_1^*}, \quad S_d = \frac{\Delta_R}{\Gamma_1 \phi_{R1}}, \quad M_1^* = \frac{\left(\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1} \right)^2}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j1}^2} \quad (2-16)$$

나) 요구스펙트럼(Demand spectrum)

요구스펙트럼은 일반적으로 그림 2-5(a)와 같이 주기에 대한 응답변위, 응답속도, 응답가속도의 관계로서 표현되지만 능력스펙트럼과 하나의 그래프에 나타내기 위하여 S_d 와 S_a 좌표계의 ADRS형식으로 표현된다. 이 변환에는 식(2-17)의 관계를 이용한다.



<그림 2-5> 요구스펙트럼

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (2-17)$$

ADRS형식에서 구조물의 유효주기(T_{eff})는 식(2-18)와 같은 S_a 와 S_d 의 관계에서 구해지며 스펙트럼 상에서는 그림 2-7(b)와 같이 방사의 형태로 나타난다.

$$T_{eff} = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a \cdot g}} \quad (2-18)$$

다) 구조물의 성능점 산정(Performance evaluation)

능력스펙트럼과 요구스펙트럼으로 구성된 능력스펙트럼법을 이용하여 구조물의 성능점을 산정하는 절차는 다음과 같다.

1. 비선형 정적해석을 이용하여 능력곡선과 5% 감쇠비를 가진 탄성설계응답스펙트럼을 작성한다.

2. 능력곡선과 설계응답스펙트럼을 변환식을 이용하여 ADRS형식으로 변환한다.

3. 변환된 능력스펙트럼과 요구스펙트럼을 하나의 그래프에 그린다.

4. 5% 감쇠비의 탄성 요구스펙트럼과 능력스펙트럼의 교차점으로부터 S_{di} 와 S_{ai} 를 구하여 유효감쇠비를 계산한다.

5. 산정된 유효감쇠비를 가진 요구스펙트럼을 작성한 다음 능력스펙트럼과의 교차점으로부터 다시 S_{dj} 와 S_{aj} 를 구한다. 이때 구한 변위응답 S_{dj} 와 이전단계에서 구한 S_{di} 의 차이가 허용오차범위에 들면 S_{dj} 가 구하고자 하는 비탄성 응답이 된다. 오차범위를 만족하지 못하면 (5)의 과정을 반복한다.

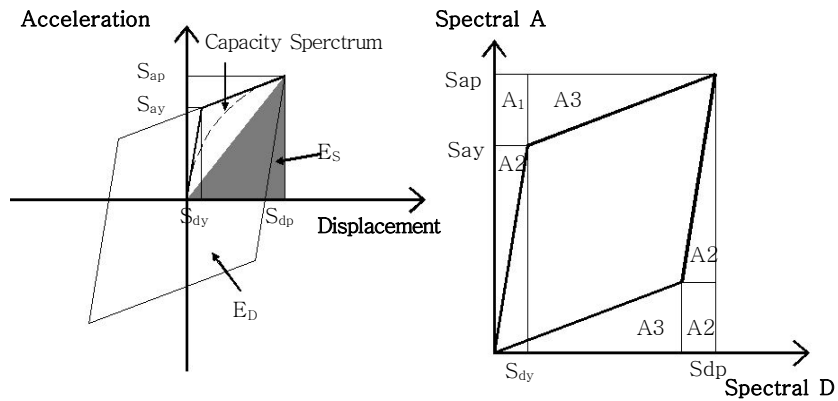
6. 그림 8에 나타난 것과 같이 성능점에서는 S_{dp} 와 S_{ap} 를 변환식을 이용하여 다자유도계에서 최상층의 변위와 밑면전단력을 산정한다.

라) 유효감쇠비(Effective damping) 산정

5% 감쇠비의 탄성 요구스펙트럼을 높은 감쇠비의 비탄성 요구스펙트럼으로 표현하기 위하여 구조물의 이력거동에 의한 등가점성 감쇠비

$$\beta_{eq} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_S} = \frac{2(S_{ay} \cdot S_{dp} - S_{dy} \cdot S_{ap})}{\pi S_{ap} \cdot S_{dp}} \quad (2-19)$$

$$\beta_{eff} = \beta + \kappa \beta_{eq} \quad (2-20)$$



<그림 2-6> 이력거동에 의한 등가감쇠

<그림2-7> 소산되는 에너지량의 산정

여기서 E_D 는 이력거동에서 점성 감시에 의하여 소산되는 에너지를 나타내며 <그림 2-6>의 빗금친 삼각형 면적으로 식(2-20)와 같다. β 는 구조물의 고유감쇠비를 나타낸다.

$$\begin{aligned} E_D &= 4(\text{그림 2-7의 마름모 면적}) \\ &= 4(S_{ap} \cdot S_{dp} - 2A_1 - 2A_2 - 2A_3) \end{aligned}$$

$$= 4(S_{ap} \cdot S_{dp} - S_{dp} \cdot S_{ap})$$

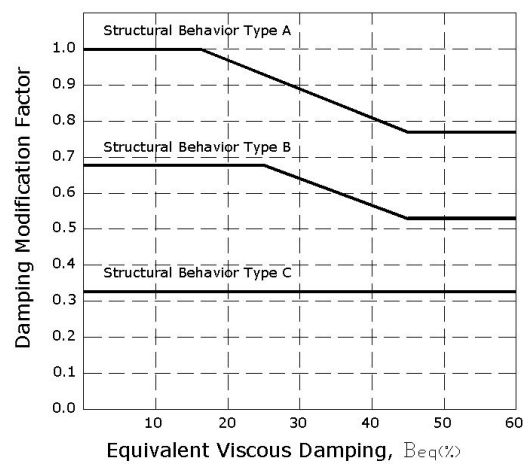
$$E_s = \frac{S_{ap} \cdot S_{ap}}{2} \quad (2-21)$$

지진하중을 받는 구조물의 이력특성은 강도저하, 강성저하, 펀치 등 여러 가지 효과들에 의하여 <그림2-6>과 이상화된 이력특성을 나타내지 못한다. ATC-40에서는 이러한 구조물의 이력특성을 반영하기 위해 표 5와 같은 감쇠조정계수(damping modification factor, k)를 사용하여 유효감쇠비를 조정하도록 하고 있다. 건물의 이력특성에 따라 세가지 유형으로 나뉘는데, Type A는 횡하중에 대한 저항시스템이 설치된 건물로 <그림2-6>과 가장 유사한 이력특성을 나타낸다. Type C에 해당하는 건물은 수평하중에 저항하는 시스템이 없거나 이력거동을 신뢰할 수 없는 경우이다. Type B는 Type A와 Type C의 중간의 경우로 기존 부재와 새로운 부재가 혼합되어 있는 경우이다. 각 유형에 따른 감쇠조정계수의 변화를 그래프로 나타내면 <그림 2-8>과 같다. 유효감쇠비에 대한 한계는 50%이다. 따라서 구조물의 고유감쇠비 5%를 제외하면 증가점성 감쇠비에 대한 제한값은 45%이다.

특정한 지진에 대한 응답스펙트럼이 아니라 설계스펙트럼을 이용하는 경우 유효감쇠비에 따라 스펙트럼을 조정할 수 있는 방법이 필요하다. ATC-40에서는 산정한 유효감쇠비를 이용하여 응답 감소계수(spectrum reduction factor) SR_A , SR_V 를 구한 후 <그림 2-9>와 같은 방법으로 비탄성 응답스펙트럼을 작성한다. 감소계수는 식(2-21), 식(2-22)과 같다. 이 값들은 표 6의 이력거동유형별 최소값보다 커야한다.

<표 2-7> 감쇠조정계수, k

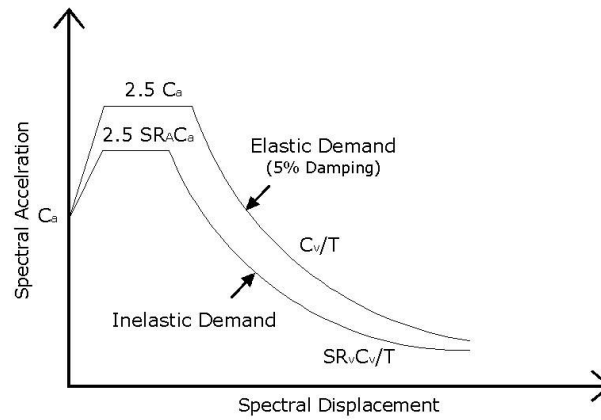
건물의 거동유형	$\beta_{eq}(\%)$	k
Type A	≤ 16.25	1.0
	> 16.25	$1.13 - \frac{0.51(S_{ay} \cdot S_{dp} - S_{dy} \cdot S_{ap})}{S_{ap} \cdot S_{dp}}$
Type B	≤ 25	0.67
	> 25	$0.845 - \frac{0.446(S_{ay} \cdot S_{dp} - S_{dy} \cdot S_{ap})}{S_{ap} \cdot S_{dp}}$
Type C	모든 감쇠비	0.33



<그림 2-8> 이력거동유형 A, B, C에 대한 감쇠조정계수

$$SR_A = \frac{1}{B_s} \doteq \frac{3.21 - 0.68 \ln(\beta_{eff})}{2.12} \quad (2-22)$$

$$SR_V = \frac{1}{B_1} \doteq \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}{1.65} \quad (2-23)$$



<그림 2-9> 비탄성 요구스펙트럼의 작성

<표 2-8> SR_A 와 SR_V 의 최소값

건물의 거동유형	SR_A	SR_V
Type A	0.33	0.50
Type B	0.44	0.56
Type C	0.56	0.67

<표 2-9> 유효감쇠비에 따른 감쇠계수 B_s 와 B_1

$\beta_{eff}(\%)$	B_s	B_1
<2	0.8	0.8
5	1.0	1.0
10	1.3	1.2
20	1.8	1.5
30	2.3	1.7
40	2.7	1.9
> 50	3.0	2.0