

# Pushover 해석의 전반적인 개념에 대한 이해

## Introduction to the overall Concept of the Pushover Analysis



김영민\*



문정호\*\*

\* 정회원, (주)마이다스아이티 기술연구소 책임연구원 공학박사  
 \*\* 한남대학교 건축학부 교수 공학박사

### 1. 서론

Pushover 해석의 주요 용도는 비선형 해석을 통하여 지진하중에 대한 구조물의 보유성능을 평가하는 것이다. 신축 구조물의 경우에는 목표성능을 달성하도록 설계하고자 할 때, 그리고 기존 구조물의 경우에는 내진보강 설계를 수행하고자 할 때 사용할 수 있다.

통상적인 구조설계에서는 그림 1(a)와 같은 지진하중에 대하여 구조물이 선형적으로 거동하는 것으로 가정한다. 이 때 지진하중의 크기는 탄성 응답스펙트럼에 의한 하중을 반응수정계수 R로 나누어 산정한  $V_s$ 가 되며, 지진하중에 의해서 발생 가능한 구조물의 최대변위는 선형해석에서 산정된 변위  $\Delta_s$ 에 변위증폭계수  $C_d$ 를 곱하여 산정한

다(그림 1(b)). 그러나 이들 계수는 설계기준에서 제시하고 있는 경험적인 수치이며, 선형해석에서는  $V_s$ 이후의 점선으로 표현된 부분은 예측할 수 없다. 따라서 선형해석을 통해서는 비선형 거동까지 포함하는 구조물 보유성능을 예측할 수 없다.

비선형 해석에서는 구조물의 최대 보유내력 및 그 이후까지의 거동을 예측하는 해석을 수행하며, 그 결과를 비선형 응답스펙트럼과 비교한다. 비선형 응답스펙트럼은 구조물의 비선형 이력거동에 따른 에너지 소산량에 의해서 결정된다(그림 1(c)). 그리고 비선형 해석에 따른 하중-변위 관계도와 비선형 응답스펙트럼이 만나는 교차점을 산정하며, 이 교차점이 실제 지진하중에 대하여 구조물이 가질 수 있는 성능점(performance point)이 된다(그림 1(d))

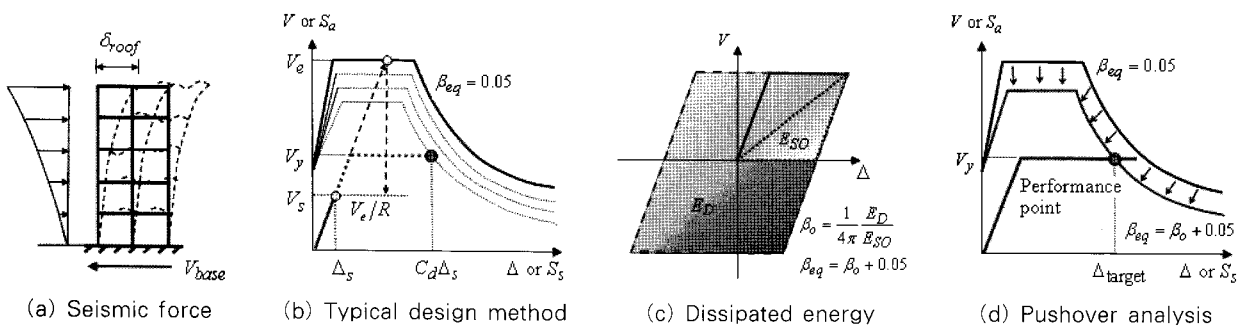


그림 1 Comparison of analysis methods

(FEMA 2000, ATC 1996). 따라서 비선형 해석을 수행하면 반응수정계수와 변위중폭계수를 별도로 산정하지 않고 자동으로 반영할 수 있으며, 구조물의 보유성능 및 안전율을 예측할 수 있다는 장점이 있다.

이상은 비선형 해석의 개요에 대한 설명이며, 보다 구체적인 내용 및 방법의 이해를 위해서는 다음과 같은 사항에 대한 이해가 필요하다.

- 비선형 해석법의 종류
- Pushover 해석의 순서
- 부재의 모멘트-곡률-회전각의 관계
- 소성힌지의 특성
- Pushover 해석 결과-응답스펙트럼의 관계
- P- $\Delta$  효과 및 반복계산 방법

본 고에서는 이상과 같은 사항들을 2장부터 7장에서 살펴보고, 8장에서는 Pushover 해석의 활용과 관련한 주의사항을 기술하면서 글을 맺었다.

## 2. 비선형 해석법의 종류

구조물의 내진성능 평가를 위한 비선형 해석법은 그림 2와 같이 크게 비선형 동적해석법과 비선형 정적해석법으로 분류되며, 일반적으로 비선형 정적해석법을 pushover 해석법이라 부른다. 비선형 동적해석법은 가장 정확한 해석법이라 할 수 있지만, 일반 엔지니어가 사용하기에는 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 반면에 정적해석법은 지진하중에 대한 구조물의 고유한 동적 특성을 반영하기 어렵다는 단점이 있으나, 해석절차가 간단하여 사용하기 쉽다. 또한 해석결과를 개념적으로 쉽게 표현하고 이해할 수 있어서 가장 많이 사용되고 있다.

동적하중에 대한 구조물의 거동은 개별 고유모드들의 중첩으로 나타나지만, 비선형 정적해석법에서는 거동을 특징짓는 주요 모드인 1차모드(primary mode) 만을 대상으로 해석을 수행한다. 그러나 비선형 해석의 결과는 산술적으로 중첩할 수 없기 때문에 비선형 정적해석법에서는 고차모드의 영향을 반영하기 어렵다. 따라서 이 분야에서는 정적비선형 해석법의 장점을 유지하면서 고차모드의 효과를 효율적으로 반영하는 것을 주된 목적으로 많은 연구가 이루어지고 있다(Villaverde 2007).

단일모드법에서는 선형거동의 가정에 따른 고유모드로부터 횡하중 분포를 산정하고, 해석이 종료될 때까지 이 하중 분포를 고정된 형상(invariant force pattern)으로 유지한다. 즉 1차 모드가 차지하는 비중이 큰 것으로 가정하여 해석을 수행하는 방법이다. 따라서 고차모드의 영향이 큰 구조물에 단일모드법을 적용하기는 어렵다(Kalkan and Kunnath 2006, Chopra and Goel 2002, Vamvatsikos and Cornell 2002).

단일모드법에는 능력스펙트럼법(CSM; capacity spectrum method)(ATC 1996), 변위계수법(DCM; displacement coefficient method) (FEMA 2000), N2(Fajar 2000) 등의 방법이 있다. 능력스펙트럼법은 ATC-40에서 제시하고 있는 방법으로 가장 일반적으로 사용되고 있다. 특히 일본에서는 2000년에 능력스펙트럼법을 새로운 내진설계 기준으로 채택하였다. 변위계수법은 FEMA-356에서 제시한 방법으로 능력스펙트럼법 보다는 단순한 방법이다. 그리고 N2는 능력스펙트럼법과 유사한 방법으로 2001년에 유로코드(Eurocode-8)에 반영되었다. 본 고에서는 가장 일반적으로 사용되고 있는 방법인 능력스펙트럼법을 위주로 설명하였다.

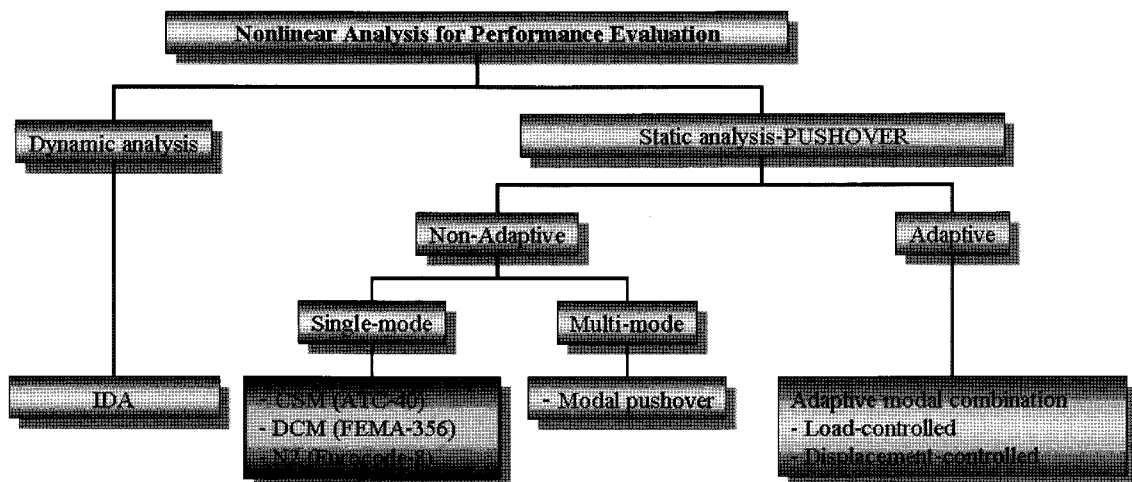


그림 2 Analytical methods used in structural nonlinear analysis

### 3. Pushover 해석의 순서

Pushover 해석은 그림 3과 같은 순서로 진행된다. 그림에서 처음의 두 단계는 통상적인 구조 설계의 단계와 동일하다. 즉 구조해석을 수행하고, 부재를 설계하는 단계를 의미한다. 그 이후부터는 하중 혹은 변위를 작은 단계로 나누고, 순차적으로 증분 해석을 수행하게 된다.

이를 위하여 먼저 소성힌지의 특성을 정의하고, 비선형 거동이 예상되는 위치에 소성힌지를 할당한다(4, 5장 참조). 횡하중의 분포를 결정하기 위하여 고유치 해석을 수행하고, 1차모드의 형상으로 구조물이 변형하도록 횡하중 분포를 결정한다. 이 때 하중 분포의 형상이 변하지 않는다는 가정을 사용하기 때문에, 구조물은 단자유도계로 거동함을 의미한다.

소성힌지의 할당과 함께 하중 분포가 결정되면, 하중 혹은 변위의 증분에 따른 순차적 증분 해석을 수행하게 된다. 해석의 결과는 주로 하중-변위의 관계로 표현되며, 각 증분 단계에서의 부재력 및 부재 변형 등을 산출할 수 있다.

해석 결과를 능력스펙트럼법으로 분석하기 위해서는 요구스펙트럼(demand spectrum)과 성능스펙트럼(capacity spectrum)이 만나는 점을 찾아야 한다. 여기에서 요구스펙트럼과 성능스펙트럼은 각각 대상지역의 응답스펙트럼과 해석 결과인 하중-변위의 관계(capacity curve)를 의미한다. 이 때 다자유도 시스템을 단자유도 시스템으로 변환하는 과정이 필요하다. 그리고 요구스펙트럼과 성능스펙트럼을 가속도변위응답스펙트럼(ADRS; Acceleration-Displacement Response Spectra)형식의 그래프에 함께

표현하며, 요구스펙트럼과 성능스펙트럼이 만나는 점을 성능점(performance point)라 칭한다(6장 참조). 성능점은 실제 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물이 보일 수 있는 거동의 상태를 의미한다.

### 4. 부재의 모멘트-곡률-회전각의 관계

구조부재에 휨 모멘트가 작용하면 곡률이 발생하며, 선형(탄성)구간에서 곡률 값은 모멘트의 크기에 비례한다. 그리고 회전각은 변형전의 부재축에 대하여 부재가 회전한 각을 의미한다. 따라서 일정구간에 분포된 곡률 값을 그 구간에 대하여 적분하면 회전각이 된다(Gere 2003).

부재에 작용하는 모멘트가 항복모멘트를 초과하는 경우에는 그림 4(a)와 같이 비선형 구간에서 곡률이 크게 증가하며, 이로 인한 회전각 역시 크게 증가한다. 따라서 비선형 특성을 해석에 반영하기 위하여 모멘트-곡률 관계 또는 모멘트-회전각 관계를 미리 정의하고, 이를 소성 힌지의 특성으로 사용한다.

모멘트-회전각 관계는 개념적으로 그림 4(b)와 같이 이상화시킨 곡률분포를 이론적 근거로 한다(FEMA 2000, Giberson 1974). 즉 모멘트의 크기에 비례하는 탄성곡률이 부재 전 구간에 발생하며, 부재의 단부( $L_p$ )에는 집중된 비선형 곡률이 추가적으로 발생하는 것으로 가정한다. 따라서 탄성곡률의 분포로 인한 회전각은 탄성 회전각, 집중된 비선형 곡률로 인한 회전각은 비탄성 회전각을 각각 의미한다. 이는 그림 4(b)와 같이 탄성부재의 끝 단에 비선형 스프링이 부착된 구조 부재와 동일한 역학적 특성을 가

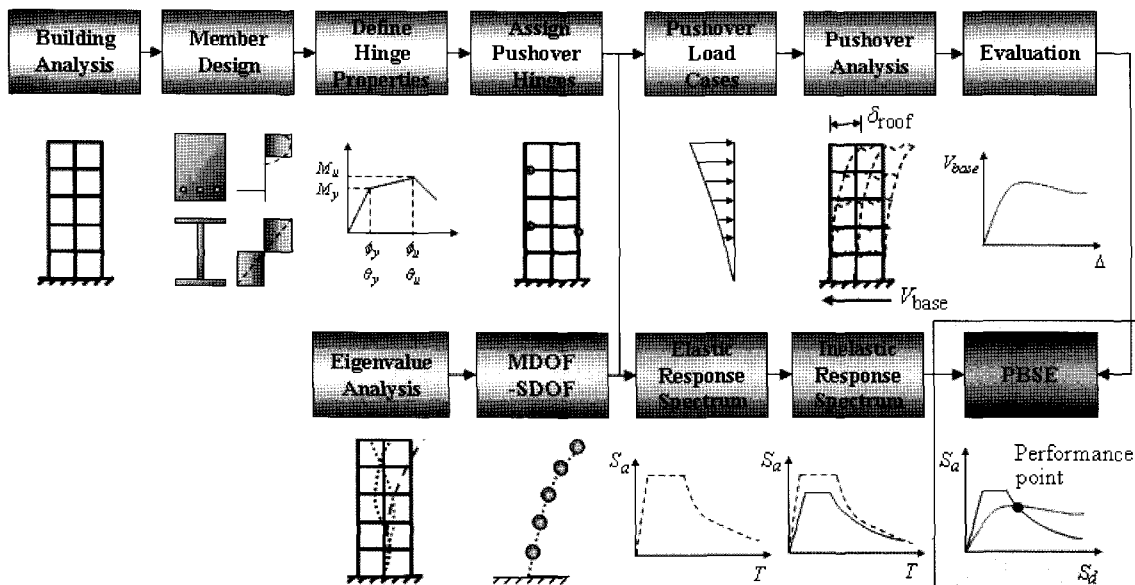


그림 3 Pushover analysis procedure

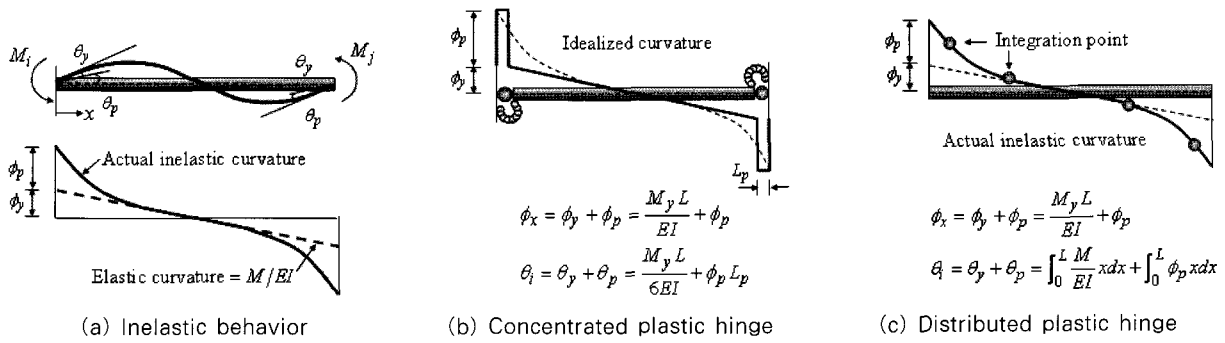


그림 4 Relations of moment-curvature-rotation

진다고 할 수 있다.

부재의 항복 모멘트와 항복 곡률은 단면의 특성에 해당하는 값이므로 부재 설계과정에서 산정한 값을 사용할 수 있으나, 항복 회전각의 경우에는 이를 정의하는 방법이 필요하다. 항복 회전각은 곡률분포에 따라 달라지므로, 해석 전에 입력할 수 있는 값이 아니다. 특히 변곡점의 위치가 변하게 되면 항복 회전각도 변하게 된다. 따라서 해석의 효율을 고려하여 쉐넬레버는  $3EI/L$ , 단곡률 변형의 경우에는  $2EI/L$ , 복곡률 변형의 경우에는  $6EI/L$  등과 같은 값을 초기강성으로 사용하여 항복회전각을 계산하기도 한다.

모멘트-곡률 관계는 이상화의 가정을 사용하지 않은 곡률분포를 대상으로 그림 4(c)와 같이 수치적분법에 따라 회전각을 산정한다(Scott and Fenves 2006). 따라서 항복회전각에 대한 별도의 정의는 필요하지 않다. 곡률분포에 따른 회전각의 산정을 위하여 적절한 갯수의 적분점에 대해 수치적분을 수행한다. 이 때 적분점의 수가 증가할수록 정확도는 높아지지만 5개 이상을 사용할 필요는 없다. 그러나 집중하중 등의 작용으로 인하여 모멘트도가 불연속이 될 경우에는 적분점의 수를 증대시키는 것 보다는 해당 위치를 중심으로 요소를 분할하는 것이 더 바람직하다.

### 5. 소성힌지의 특성

비선형 해석을 위해서는 해석 전에 개별 부재에 대한 모멘트-곡률 또는 모멘트-회전각의 관계를 정의하여야 한다. 그리고 해석과정에서 부재는 이들 관계로 정의된 경로를 따라 거동하게 되며, 이를 소성힌지(plastic hinge)의 특성이라 한다.

소성힌지의 특성으로는 수치 계산법 또는 실험 등에 의한 결과를 이용할 수 있다. 수치 계산법을 사용하는 경우에는 부재설계 과정에서 산정한 항복모멘트와 이 때의 항복 곡률 또는 항복 회전각을 사용하고, 항복점 이후의 거

동은 엔지니어의 판단에 따라 적절히 정의한다. 즉, 큰 연성거동(ductile behavior)이 예상되는 부재는 항복점 이후에도 내력의 저하없이 큰 변형이 발생하도록 하며, 취성거동(brittle behavior)이 예상되는 경우에는 항복점 이후에 내력이 저하되도록 한다(그림 5(a)). 실험결과를 사용하고자 하는 경우에는 그림 5(b)와 같이 실험에서 얻어진 모멘트-곡률 또는 모멘트-회전각의 관계를 대상으로 이상화한 결과(backbone curve)를 사용한다. 그리고 소성힌지의 특성곡선이 최대하중에 도달할 때까지 꺾이는 횟수에 따라, 1회 꺾이는 경우는 2-선형(bi-linear), 2회 꺾이는 경우는 3-선형(tri-linear) 관계 등으로 명명하기도 한다.

부재에 축력과 모멘트가 동시에 작용하면 축력의 영향으로 항복 모멘트의 크기가 달라진다. 철근콘크리트 부재의 경우에는 균형점(balanced point) 보다 큰 축력이 작용할 때, 그리고 철골부재는 모든 경우에 대하여 축력의 크기가 커질수록 항복모멘트의 크기는 작아진다. 따라서 축력과 항복모멘트 사이의 상관관계는 그림 5(c)와 같은 PMM(축력-모멘트-모멘트) 상관관계로 표현된다. PMM 상관관계는  $P-M_y-M_z$  축으로 표현되는 3차원 공간에서 폐곡면의 형태로 표현된다(EI-Tawil and Deierlein 2001).

소성힌지에 작용하는 축력과 모멘트 등을 나타내는 좌표값이 상관관계의 영역 내부에 위치하는 경우에 소성힌지는 탄성거동을 하며, 이 좌표값이 상관관계의 경계와 만나면 비선형 거동을 시작한다. 따라서 해석 전에 항복점을 미리 정의할 수는 없으며, 해석의 과정에서 부재의 항복여부가 결정된다. 또한 3-선형관계의 경우에는 2개의 PMM 상관관계를 필요로 하며, 작은 곡면은 큰 곡면의 안쪽에 위치하게 된다. 이상과 같은 상관관계는 상용프로그램에서는 프로그램 내부에서 자동으로 산정되며, 사용자의 선택에 따라 자동으로 고려되도록 하는 것이 일반적이다.

해석의 간편함을 위하여 상관관계를 사용하지 않는 경

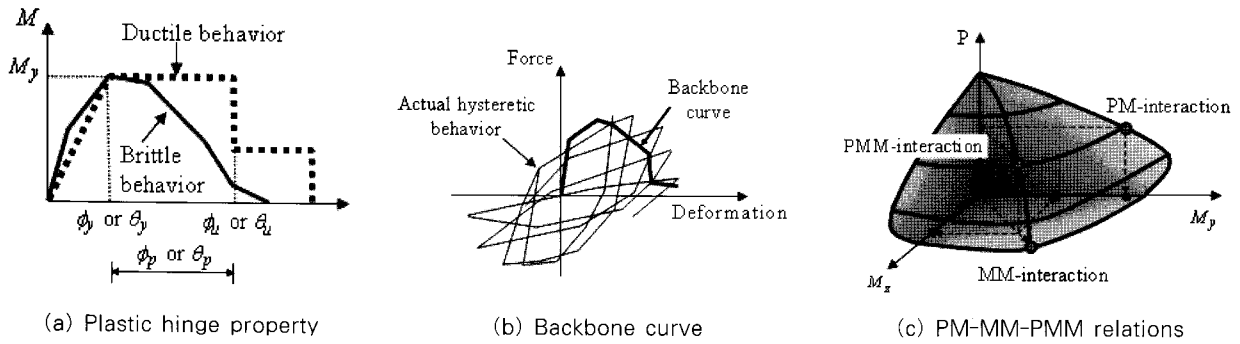


그림 5 Computation of yield moments

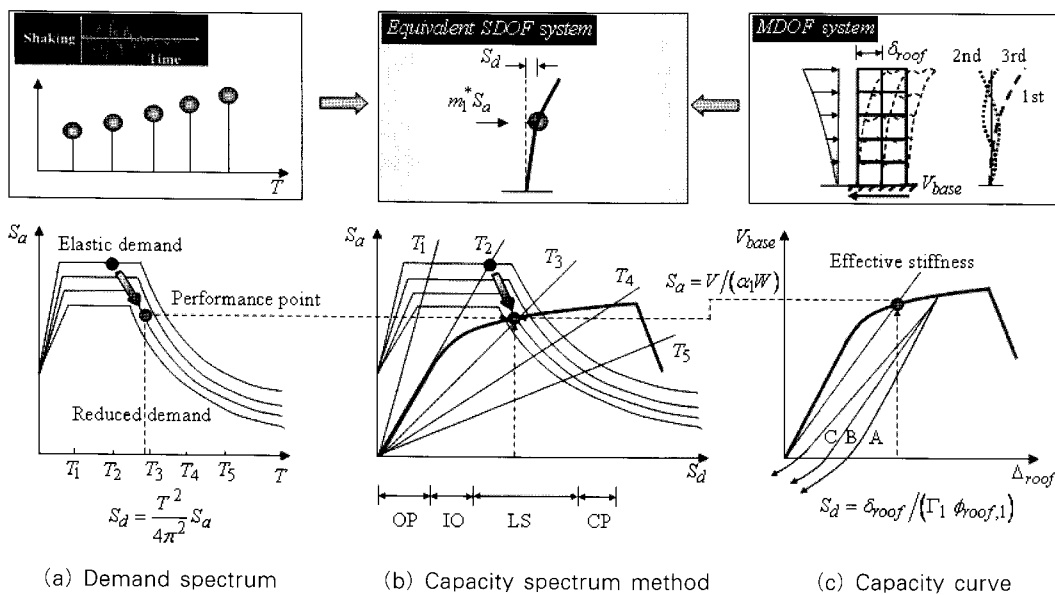
우에는 축력이 없는 상태에서 산정된 항복모멘트를 부재의 항복모멘트로 사용한다. 따라서 해석 전에 항복모멘트를 미리 정의할 수 있으며, 이 경우 부재설계 과정에서 얻어진 항복모멘트를 사용한다.

### 6. Pushover 해석결과-비선형 응답스펙트럼의 관계

구조물의 내진성능 평가를 위한 방법 중에서 능력스펙트럼법이 가장 일반적으로 사용된다(ATC 1996). 능력스펙트럼법에서는 지진하중에 대한 요구스펙트럼(demand spectrum, 그림 6(a))와 pushover 해석에 의한 능력곡선

(capacity curve, 그림 6(c))을 하나의 그래프(그림 6(b))에 표현하는 방법을 사용하며, 이러한 형식의 그래프를 가속도변위응답스펙트럼(ADRS)이라 부른다.

요구스펙트럼은 단자유도 구조물을 대상으로 고유주기에 대한 응답가속도의 관계를 나타내는 응답스펙트럼을 의미하며, 구조물의 에너지 소산 능력에 따라 결정되는 선들로 이루어져 있다. 즉 에너지 소산 능력이 클수록 응답가속도의 크기는 작아진다. 능력곡선은 pushover 해석을 통하여 얻어지는 하중-변위의 관계이다. 이들 두 가지의 관계는 서로 다른 좌표축을 가진 그래프에 표현되므로, 이들을 비교하기 위해서 ADRS 형식의 그래프에 함께 표현할 필요가 있다.



$$V_{base} = (\alpha_1 W) S_{d1}; \quad \delta_{roof} = (\Gamma_1 \phi_{roof,1}) S_{d1}; \quad S_{d1} = \frac{T_1^2}{4\pi^2} S_{a1}; \quad \alpha_1 = \frac{\left( \sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1} \right)^2}{\sum_{j=1}^n m_j \sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1}^2}; \quad \Gamma_1 = \frac{\sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1}}{\sum_{j=1}^n m_j \phi_{j1}^2}$$

그림 6 Performance evaluation by CSM

ADRS 형식의 그래프에서 가로축은 스펙트럼 변위 (Spectrum displacement,  $S_d$ )를 나타내며, 세로축은 스펙트럼 가속도(spectrum acceleration,  $S_a$ )를 나타낸다. 따라서 요구스펙트럼과 능력곡선을 그림 6과 같은 방법으로 변환하여야 한다. 요구스펙트럼은 주기-스펙트럼 변위의 관계를 이용하여 변환한다. 그리고 능력곡선을 ADRS 형식의 그래프에 나타내기 위해서는 먼저 다자유도 시스템 거동을 단자유도 시스템의 거동으로 변환하여야 한다. 단일모드의 고정된 하중 분포를 사용하였기 때문에 그림 6의 식과 같이 다자유도 시스템의 밑면 전단력을 단자유도 시스템의 스펙트럼 가속도로 변환할 수 있다. 또한 최상층 변위는 최상층 변위-스펙트럼 변위의 관계를 이용하여 스펙트럼 변위로 변환한다. 이와 같이 변환된 관계를 능력스펙트럼(capacity spectrum)이라 한다. 그리고 ADRS 형식의 그래프에서 구조물의 진동 주기는 대각선 좌표로 표현된다.

요구스펙트럼과 능력스펙트럼이 ADRS 형식의 그래프에 함께 표현되었지만, 이들이 교차하는 점에서 상호관계가 의미를 가진다. 요구스펙트럼은 구조물의 이력거동에 따라 소산되는 에너지의 양(그림 1(c))에 따라 그림 6(b)와 같이 감소되어야 하며, 소산되는 에너지의 양은 능력스펙트럼 상의 위치에 따라 달라진다. 따라서 이력거동에 의한 에너지 소산량과 이를 반영하여 감소된 요구스펙트럼 선이 만나는 점을 찾기 위해서는 반복계산이 필요하다. 그리고 에너지 소산의 정도는 그림 6(c)의 A, B, 그리고 C와 같이 분류할 수 있다. 즉 에너지 소산량이 큰 경우는 A-type, 중간 정도인 경우는 B-type, 작은 경우는 C-type 등으로 구분하기도 한다(ATC 1996).

이상과 같은 과정을 통하여 산정된 교차점을 성능점(performance point)라 하며, 이를 그림 6에 표시하였다. 결과적으로 성능점은 구조물의 이력거동에 따라 소산되는 에너지를 고려하여 축소된 비선형 응답스펙트럼 하중에

대한 구조물의 보유 성능을 의미한다고 할 수 있다. 따라서 성능점은 설계자 또는 발주자가 미리 목표 성능(target performance)을 설정하고, 목표성능이 발휘되도록 구조설계를 수행하거나, 내진 보강을 하는데 활용할 수 있다.

해석의 결과는 항복점의 위치와 종국강도의 위치 등을 고려하여 OP(operational), IO(Immediate Occupancy), LS(Life Safety), CP(Collapse Prevention) 등으로 구분하고, 발생 가능한 지진하중에 대하여 구조물이 가질 수 있는 내진 성능을 평가하기도 한다(그림 6(b)). 여기에서 OP는 지진의 피해가 경미한 경우이며, IO는 즉시 사용이 가능한 정도의 피해를 의미한다. LS는 상당한 피해가 예상되지만 인명의 피해는 없는 경우이며, CP는 붕괴가 발생하기 직전 정도의 피해를 의미한다.

### 7. P-Δ 효과 및 반복계산

Pushover 해석에서 P-Δ 효과를 고려하는 것은 매우 중요하다. 횡하중에 의해서 발생한 횡변위는 중력하중의 영향으로 더욱 증가할 수 있으며, 이러한 현상을 P-Δ 효과라고 한다. P-Δ 효과는 구조물의 횡강성을 감소하게 하며, 축력이 크게 작용하는 저층부 혹은 소성힌지의 발생으로 강성이 크게 줄어든 연약층(soft story)에서 붕괴를 야기할 수도 있다.

P-Δ 효과를 고려하지 않는 경우에 대한 평형방정식은 그림 7(a)와 같이  $V=K\Delta_o$ 로 나타낼 수 있다. 그러나 P-Δ 효과를 고려하는 경우에는 축력에 횡변위를 곱한 모멘트가 추가로 발생하며, 이는 그림 7(b)와 같이 추가적인 횡력이 작용하는 것과 같은 효과가 있다. 따라서 평형 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Gupta and Krawinkler 2000).

$$V = K(1-Q)\Delta_f$$

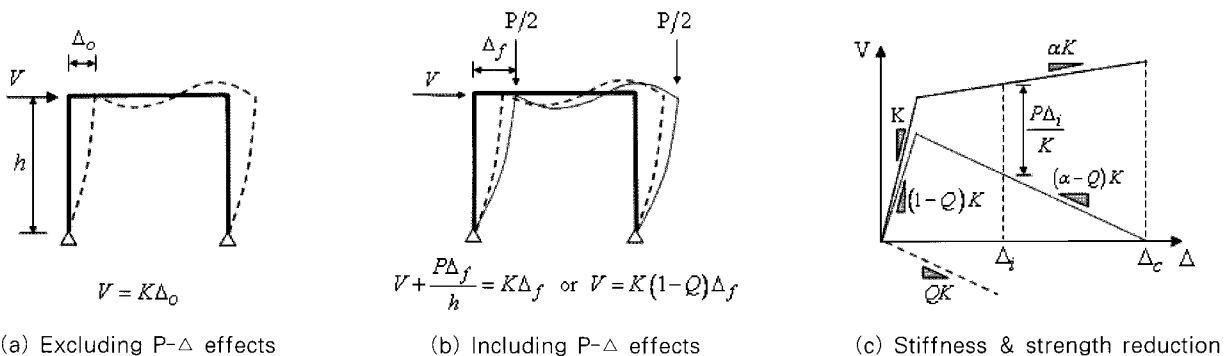
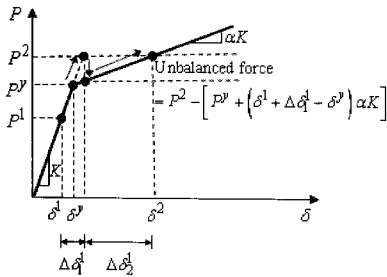


그림 7 Performance evaluation by CSM



(a) Force increment

$$\Delta \delta_1^1 = (P^2 - P^1) / K$$

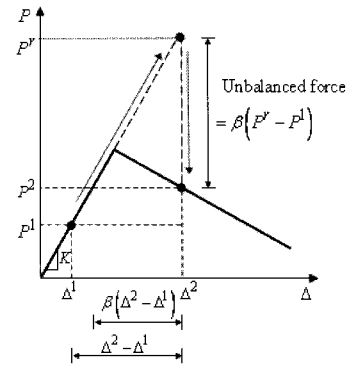
$$\Delta \delta_2^1 = \text{Unbalanced force} / \alpha K$$

$$= \delta^2 - \delta^1 - \Delta \delta_1^1$$

$$\delta^2 = \delta^1 + \Delta \delta_1^1 + \Delta \delta_2^1$$

$$\beta = \frac{\text{Unbalanced force} / K}{(P^2 - P^1) / K}$$

$$P^2 = P^1 - \beta(P^2 - P^1) = (1 - \beta)P^2 + P^1$$



(b) Displacement increment

그림 8 Iterative procedure

여기서  $Q = P / Kh$ : 안정성계수(stability coefficient)

그림 7(c)에 나타낸 바와 같이 P-Δ 효과로 인하여 선형 강성은  $(1-Q)K$ , 항복점 이후의 강성은  $(\alpha-Q)K$ 로 감소한다. 그리고  $Q > \alpha$ 인 경우에는 구조물이 횡력저항 능력을 상실하고, 횡변위  $\Delta_c$ 에서 붕괴에 도달한다.

부재가 비선형 거동을 보이는 경우에는 그림 8(a)와 같은 반복계산을 수행하여야 한다. 그러나 재료의 특성 또는 P-Δ 효과 등으로 인하여 최대강도 부근 혹은 이후에 내력이 저하되는 경우에 대해서는 하중 증분에 의한 해석을 수행할 수 없다. 이 경우에는 그림 8(b)와 같이 변위 증분에 의한 해석을 수행하여야 한다.

### 8. 맺음말

Pushover 해석법의 중요한 특징은 1) 비선형 정적해석 방법을 사용하며, 2) 하중 또는 변위의 증분에 따라 단계적인 반복 계산을 수행하고, 3) 1차 모드의 형상에 따라 결정되는 고정된 하중 분포를 사용하므로 고차모드의 효과를 반영하지 못한다는 점 등이다. 이 중에서 가장 중요한 사항은 1차 모드의 형상에 따라 결정되는 고정된 하중 분포를 사용한다는 점이다. 따라서 고차모드의 영향이 큰 구조물의 경우에는 고차모드의 효과를 반영할 수 있는 정적 해석법을 사용하거나, 동적 비선형 해석법을 사용하여야 한다. 고차모드의 영향이 큰 구조물로는 고층건물, 횡방향 및 수직방향으로 강성 또는 질량 등의 분포가 불규칙한 경우 등을 들 수 있다. 따라서 고유치 해석을 통하여 구조물의 동적 특성을 먼저 파악한 후 Pushover 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

Pushover 해석을 포함한 비선형 해석은 선형해석과는

달리 여러 가지의 이론적 가정을 포함하고 있으며, 상용 프로그램을 이용하여 이를 해석할 때에는 입력하여야 할 값이 많고 복잡하다. 그리고 해석된 결과를 간단하게 검증하기 어렵기 때문에 Pushover 해석을 수행할 때에는 다음과 같은 사항에 주의하여야 한다.

- 비선형해석 수행 전에 반드시 선형해석을 먼저 수행하여 구조물의 거동 경향을 미리 예측한다. 선형해석의 결과는 비선형해석의 결과를 평가하는 하나의 기준이 될 수 있다.
- 비선형해석에 사용되는 구조요소는 간략화 및 이상화를 위한 여러 가정을 사용하기 때문에 요소의 특성에 대한 사전 지식을 가져야 한다.
- 비선형해석의 결과는 입력 값에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 반드시 수계산 등을 통하여 검증하여야 한다.
- 대상 구조물에 대한 비선형해석은 단계별로 수행한다. 즉 대상 구조를 간략화 하여 결과물의 경향을 단계적으로 파악하면서 실제 모델에 근접시킨다.
- 한번의 비선형해석을 통하여 적절한 답을 얻는 것은 어렵다. 따라서 해석의 결과물은 다양한 그래픽 기능을 이용하여 분석할 필요가 있다.
- 비선형해석은 단계별 증분 해석을 수행하기 때문에 해석의 후반부에서는 수렴한 답을 얻기 어려울 수 있다. 해석의 중간 단계에서 수렴한 답을 얻지 못한 경우에는, 하중이나 변위의 단계를 좀 더 세분하거나, 목표 하중이나 목표 변위 값을 하향 조정하여야 한다.
- 중요 부재에 대해서는 항복점과 그 이후 소성현지의 변천과정, 그리고 이 때의 부재력 등에 대한 검증이 필수적이다. 즉 가정된 소성현지의 특성 등이 결과물에 정확하게 반영되었는지를 검토하여야 한다.
- 비선형해석은 구조요소의 제약 조건이나 모델링에서

의 가정 등으로 인하여 추정치(경향)를 제공할 뿐이다. 따라서 엔지니어의 최종 판단은 필수적이다.

### 참 고 문 헌

1. Federal Emergency Management Agency (FEMA), "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", FEMA-356, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C., 2000.
2. Applied Technology Council (ATC), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings." Rep. No. ATC-40, Volumes 1 and 2, Redwood City, Calif., 1996.
3. Villaverde R., "Methods to Assess the Seismic Collapse Capacity of Building Structures: State of the Art", Journal of Structural Engineering, Vol. 133, No. 1, January, 2007.
4. Kalkan, E., and Kunnath, S. K., "Adaptive Modal Combination Procedure for Nonlinear Static Analysis of Building Structures", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 11, November, 2006.
5. Chopra, A. K., and Goel, R. K., "A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, 2002.
6. Vamvatsikos, D., and Cornell, C. A., "Incremental dynamic analysis." Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, No. 3, 2002.
7. Fajar, P., "A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design", Earthquake Spectra, Vol. 16, No. 3, 2000.
8. Gere, J. M., "Mechanics of materials", 6<sup>th</sup> edition, Thomson, 2003.
9. Giberson, M. F., "Two Nonlinear Beams with Definition of Ductility", Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 95, No. ST7., 1974.
10. Scott, M. and Fenves, G. L., "Plastic Hinge Integration for Force-Based Beam-Column Elements", Journal of Structural Engineering, Vol. 132, No. 2, February, 2006.
11. El-Tawil, S., and Deierlein, G. G., "Nonlinear analyses of mixed steel-concrete moment frames. Part I: Beam-column element formulation." Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No. 6, 2001.
12. Gupta, A., and Krawinkler, H., "Dynamic P-delta Effects for Flexible Inelastic Steel Structures", Journal of Structural Engineering, Vol. 126, No. 1, January, 2000. 