# 비선형 정적 해석을 통한 벽식구조물의 내진성능 평가

# Seismic Evaluation of Shear Wall System by Nonlinear Static Analysis Procedures

안 성 기* 송 정 원* 송 진 규** 이 수 곤***
Ahn, Seong Ki Song, Jeong Won Song, Jin Gyu Lee, Soo Gon

ABSTRACT

Concrete is popular as a building material, however it is inherently brittle and performs poorly during earthquakes if not reinforced properly. Traditional retrofit design techniques assume that buildings respond elastically to earthquakes. This assumption simplifies the analysis procedure but can lead to an erroneous conclusion. The complete nonlinear time history analysis is considered overly complex and impractical for general use. Simplified nonlinear analysis methods, referred to as nonlinear static analysis procedures, include the capacity spectrum method(CSM) developed in detail at ATC-40 and the displacement coefficient method(DCM) utilized at FEMA-273. In this study, the above mentioned nonlinear static analysis methodologies were applied to a residential shear wall APT system. The results were compared and analyzed. The program used was neoMAX-3D to express nonlinear material.

## 1. 서 론

콘크리트 재료는 가장 널리 사용되는 건설재료이나, 재료 자체가 취성이므로 적절한 보강이 이루어지지 않으면 지진에 대해 취약할 수 있다. 전통적인 콘크리트 건물의 내진 성능 평가는 건물이 지진에 대하여 탄성적인 거동을 보인다는 가정하에 이루어졌다. 이것은 해석 작업은 간단하게 할 수 있으나, 파괴 기구나 힘의 재분배를 고려할 수 없으므로 실제 구조물의 거동을 표현하는데는 적절하지 못하다. 이에 비해 완전한 시간-이력 해석을 하는 경우는 매우 복잡하고, 실제 사용하기에는 비실용적이다. FEMA-273의 변위 계수법(Displacement Coefficient Method)과 ATC-40에서 자세히 소개된 Capacity Spectrum Method는 단순화된 비선형 해석 방법이다. 이러한 방법들은 pushover 해석을 통해 구조물의 전체적인 하중-변위관계를 한눈에 보여주며, 지진의 반응 spectrum과 비교하여 예상 지진에 대한 최대 변위 예측을 가능하게 해준다. 따라서, 이러한 비선형 정적 해석 기법은 기존의 콘크리트 건물의 내진 성능 평가나 보강시에 아주 유용한 방법이라 할 수 있다. 본 연구에서는 위에서 제시된 비선형 정적 해석 방법들을 3차원의 전단벽 판상형 APT시스템에 적용하기 위한 절차를 제시하고, 그 결과를

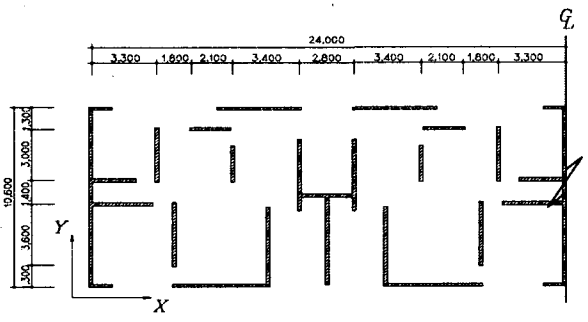
* 정회원, 전남대 건축공학과, 석사과정
** 정회원, 전남대 건축학과, 조교수
*** 정회원, 전남대 건축학과, 교수

비교 분석해 보았다.

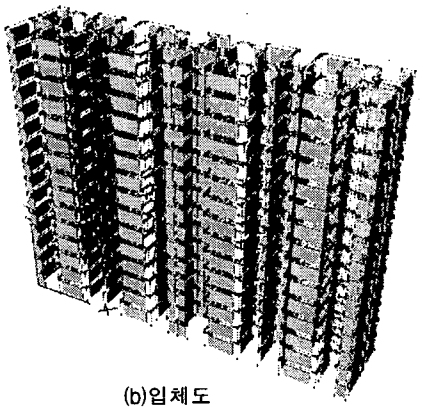
## 2. 비선형 정적 해석

### 2.1 해석 모델

해석 모델은 기존의 15층 아파트를 참고로, 해석에 적합하도록 단순화하였다. 이 건물의 평면 및 입체도는 그림 1에 나타나 있다. pushover 해석을 위해 사용된 프로그램은 neoMAX-3D 범용해석 프로그램을 이용하였다. 이 프로그램의 특징은 재료의 비선형 곡선을 bilinear 또는 multilinear로 표현, 3차원 해석이 가능하다는 점이다. 또한, 고유치해석이 가능하므로, 모드 기여 계수(modal participation factor)와 모드 질량 계수(modal mass coefficient)를 산정할 수 있다. 재료는 콘크리트 $f_{ck}=210$ kg/cm$^2$, wall 두께는 20cm로 하였다.




(a) 평면도(전체의 1/2)



(b)입체도

그림 1. 해석 모델의 평면도 및 입체도

### 2.2 능력(capacity) 스펙트럼

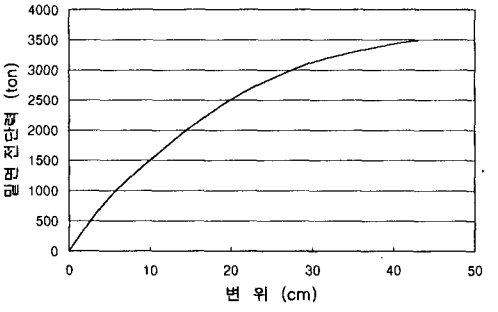
지진하중에 저항하는 구조물의 저항능력을 구하기 위해서는 pushover 해석이 필요하다. 이러한 능력은 각 구조부재의 강도나 변형능력에 좌우되므로, 해석 모델에서는 콘크리트의 강도-변형률 관계를 bilinear화하여 항복 강도 이후에는 힘의 재분배가 이루어지도록 하였다. 지진하중의 분배는 "건축물 하중기준"에 따라 식 (1)과 같이 하였다.

$$F_x=\left(\frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^{n} w_i h_i^k}\right)V \qquad \begin{cases} F_x : x\text{층의 층지진하중} \ , \ w_x , w_i : i, x\text{층의 건축물 중량} \\ T\le 1.0 \text{ 초} : k=1.0 \ , \ 1.0 < T \le 2.0 \text{ 초} : k=1.5 \\ T > 2.0 \text{ 초} : k=2.0 \ , \ h_x , h_i : \text{밑면에서의 높이} \end{cases} \quad (1)$$

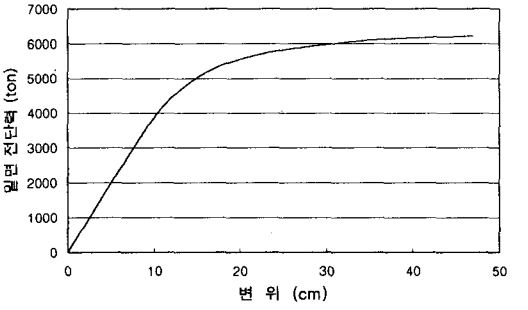
예제 구조물의 해석 결과는 다음 그림 2.와 같다. Y방향으로 배치된 wall이 X방향보다 많아 상대적으로 강성이 더 큰 것을 알 수 있다. 전체적으로 횡하중에 대하여 상당히 강성이 큰 것으로 나타났다.

### 2.3 요구(demand) 응답 스펙트럼

pushover 해석 결과, 벽체의 횡방향 강성이 상당히 크므로, 요구 응답 스펙트럼으로 지진계수(seismic coefficient)가 큰 스펙트럼을 사용하였다. 응답 스펙트럼으로 가속도가 낮은 지진을 이용하면




(a) X방향




(b) Y방향

그림 2. pushover 해석 결과

구조물의 거동이 탄성영역에서 일어나게 되고, CSM에 의한 비선형 곡선의 bilinear 표현이 어려워 질 수 있다. UBC97에 따라 지반 종류는 $S_B$ 암반지역, 지진계수 $C_a$,$C_v$를 0.4로하면 그림 3.과 같은 요구 응답 스펙트럼을 얻을 수 있다.

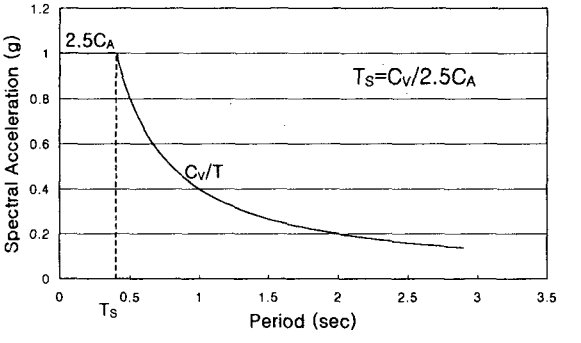



그림 3. 감쇠율 5%의 탄성 응답 스펙트럼

2.4 CSM(Capacity Spectrum Method)

2.4.1 ADRS(Acceleration-Displacement Response Spectra)로의 변환

능력 곡선과 요구 곡선을 그림 4.와 같이 하나의 그래프로 나타내기 위해서는 하중-변위 관계의 능력 곡선 그래프를 응답가속도( $S_a$)와 응답변위( $S_d$)의 그래프로 바꾸어야 한다. 식 (2)의 1차 모드 기여 계수 $PF_1$과 1차 모드 질량 계수 $\alpha_1$을 통해 식 (3)을 이용하면 ADRS로의 변환이 가능하다. 표 1.은 예제 구조물의 고유치 해석 결과를 보여주며 이로부터 예제의 $PF_1$, $\alpha_1$을 구하는 것이 가능하다. 요구 곡선은 응답 스펙트럼에서 변위와 가속도의 관계가 $S_a = 4\pi^2/T^2 \cdot S_d$ 이므로, 그림 3.을 그림 4.와 같이 변환 시킬 수 있다.

$$PF_1 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{N}(w_i\phi_{i1})/g}{\sum_{i=1}^{N}(w_i\phi_{i1}^2)/g} \right] \qquad \alpha_1 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}(w_i\phi_{i1})/g\right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{N}w_i/g\right]\left[\sum_{i=1}^{N}(w_i\phi_{i1}^2)/g\right]} \tag{2}$$

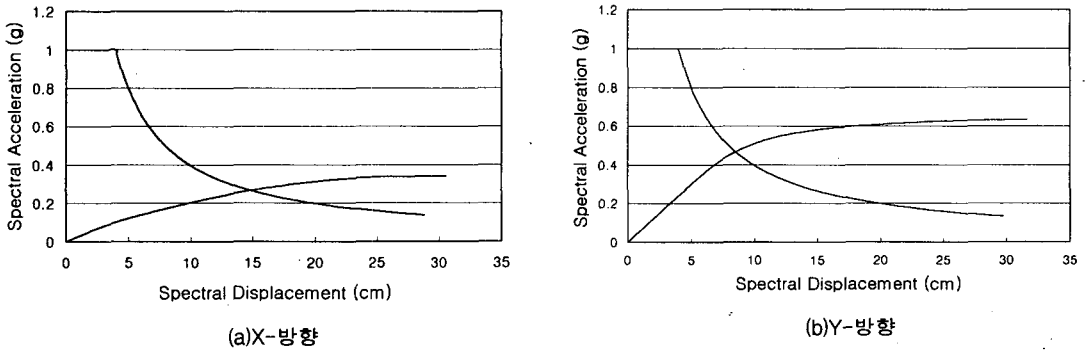
$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \qquad S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_1\phi_{roof,1}} \tag{3}$$

2.4.2. 성능점(performance point)의 산정

그림 4.(b)는 요구 스펙트럼이 능력 스펙트럼의 항복 이전 부분을 지나고 있다. 여기서는 바로 교차점이 구조물의 성능점이라 할 수 있다. 그림 4.(a)에서는 능력 스펙트럼이 항복 이후의 비탄성으로 거동하는 부분을 지나므로 CPM을 이용하여 성능점을 산정해야 한다. 먼저, 구조물이 계속 탄성 거동을

표 1. 고유치 해석 결과

| | | X방향 1차 mode | | | Y방향 1차 mode | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | T=1.414sec | | | T=0.969sec | | |
| | $m=w_x/g$ (ton) | $\phi$ | $m\phi$ | $m\phi^2$ | $\phi$ | $m\phi$ | $m\phi^2$ |
| roof | 101.06 | 0.0464 | 4.688 | 0.217 | 0.0470 | 4.745 | 0.223 |
| 14 | 101.06 | 0.0427 | 4.311 | 0.184 | 0.0430 | 4.344 | 0.187 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 2 | 101.06 | 0.00185 | 0.187 | 0.0003 | 0.00188 | 0.190 | 0.00036 |
| 1 | 101.06 | 0.000536 | 0.054 | 0 | 0.000583 | 0.0589 | 0 |
| 합계 | 1515.9 | | 31.739 | 1 | | 31.562 | 1 |
| $PF_1$ | 식 (2) | 31.739/1=31.739 | | | 31.562/1=31.562 | | |
| $\alpha_1$ | 식 (2) | $31.739^2$/1515.9/1=0.665 | | | 31.5622/1515.9/1=0.657 | | |




(a)X-방향 (b)Y-방향

그림 4. $S_d$, $S_a$ 관계의 능력 스펙트럼 및 요구 스펙트럼

하더라도 변위는 근사적으로 변하지 않는다는 사실을 이용하여 성능점을 가정한다. 성능점으로부터 초기 접선($K_i$)에 그림 5.(a)와 같이 선을 그으면 능력 곡선의 bilinear 표현이 가능하게 된다. 그림 5.(b)는 이와 같은 과정을 X-방향에 적용한 결과이다.

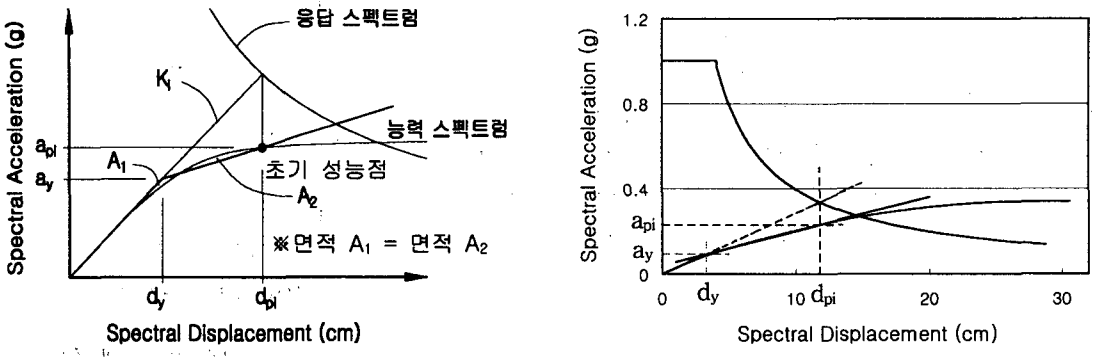
성능점의 위치에 의해 구조물이 탄성 또는 비탄성 범위에 있는지가 결정되므로, 이로부터 이력 거동에 의한 에너지 흡수 능력이 반영 되어야 한다. 이것은 감쇠율(damping)의 수정으로 이루어지며, ATC-40 보고서에서는 식 (4)와 같은 방법으로 유효 감쇠율(effective viscous damping)을 정하고 있다. 유효 감쇠율에 따른 저감 계수(reduction factor)는 식 (5)로부터 구할 수 있다. 이와 같은 저감 계수는 그림 6.에서와 같이 요구 스펙트럼의 크기를 줄이는데 이용된다.

$$\beta_{eff} = \kappa\beta_0 + 5 = \frac{63.7\kappa(a_y d_{pi} - d_y a_{pi})}{a_{pi} d_{pi}} + 5 \qquad (4)$$

$\kappa$ : 취성적인 거동을 보이는 콘크리트에 대한 보정값으로 취성적인 재료일수록 낮은 값을 갖는다. $(0.33 < \kappa < 1.0)$

$\beta_0$ : 이력 거동에 의한 감쇠율 , $a_y$, $d_y$ : 항복점 , $a_{pi}$, $d_{pi}$ : 초기 성능점

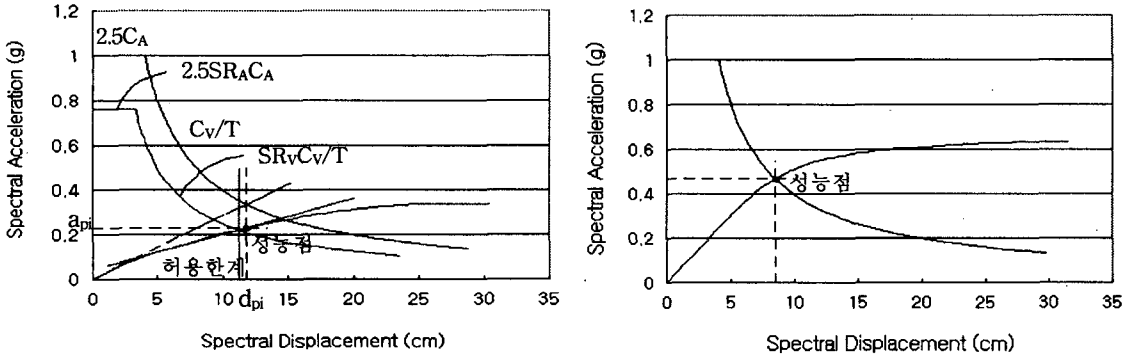
$$SR_A = \frac{3.21 - 0.68\ln(\beta_{eff})}{2.12} \qquad SR_V = \frac{2.31 - 0.41\ln(\beta_{eff})}{1.65} \qquad (5)$$




(a) 능력 스펙트럼의 bilinear화 과정 (b) 예제 구조물의 bilinear 화

그림 5. 성능점 산정을 위한 능력 스펙트럼의 bilinear 화

그림 5.(b)로부터 예제 구조물의 초기 성능점은 0.23g($a_{pi}$), 11.8cm($d_{pi}$)이고 항복점은 0.09g($a_y$), 3.28cm($d_y$) 이다. 구조물의 연성 능력이 보통($x=0.67$)이라면 식 (4)로부터 유효 감쇠율은 10.5가 된다. 스펙트럼 저감계수는 식 (5)에 의해 $SR_A$가 0.76, $SR_V$가 0.82가 된다. 감소된 응답 스펙트럼과 능력 스펙트럼이 만나는 점의 응답 변위가 초기 성능점으로부터 5%이내(그림 6.의 수직 실선) 에 있으면, 초기 성능점이 주어진 응답 스펙트럼에 대한 최종 성능점이라 할 수 있다. 만일 교점이 한계를 벗어나 존재하게 되면 다시 이점을 성능점으로 가정하여, 위와 같은 과정을 반복해야 한다. 예제로 택한 벽식 구조물에서 X-방향의 경우는 그림 6.(a)에서와 같이 감소된 응답 스펙트럼과 능력 스펙트럼의 교점이 허용 한계 이내에 있으므로 최초에 가정한 $a_{pi}$, $d_{pi}$가 구조물의 성능점이 된다. Y-방향의 성능점은 이미 설명한 것처럼, 탄성 영역에서 두 곡선이 교차하므로 그림 6.(b)와 같이 산정할 수 있다.




(a) X-방향 (b) Y-방향

그림 6. 예제 구조물의 CPM에 의한 성능점

2.5 DCM(Displacement Coefficient Method)

기존의 연구에서 구조물의 비선형 곡선을 bilinear화 하는데 주로 사용되어온 방법중 하나가 DCM이라 할 수 있다. DCM방법은 앞에서 설명한 CSM과는 달리 하중-변위 관계를 스펙트럼으로 전환할 필요가 없다. 그러나, 그림 7.의 $K_S$를 산정하는 것처럼 기술자의 판단이 요구되는 부분이 있다. $K_S$는

건물이 항복하는 동안의 평균 기울기를 나타낸다. 항복점은 $K_S$로부터 원점에 직선을 연결하여 이때의 능력 곡선과 만나는 교점이 0.6Vy가 되면 $K_e$(유효 횡방향 강성)가 결정된다. 예제의 전단벽 시스템에서는 이와 같은 교점을 찾기가 어려우므로 $K_i$(초기의 횡방향 강성)와 $K_e$가 같게 된다. DCM에서의 목표 변위(target displacement, CPM의 성능점과 같은 의미)는 FEMA 273에서 식 (6)의 $\delta_t$로 정의하고 있다.(식 (6)의 계수들은 참고문헌 2.를 참조하기 바란다.) 표 2.에서는 예제 벽식 구조물의 CPM의 성능점과 DCM의 목표 변위에 대한 결과를 보여준다.

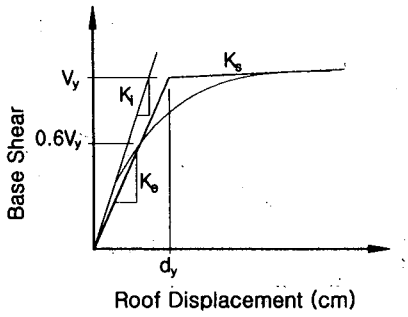



그림 7. Displacement Coefficient Method

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{Te^2}{4\pi^2} \tag{6}$$

표 2. 성능점에 의한 CPM과 DCM 결과의 비교

| | 변위 형태 | CPM | DCM |
|---|---|---|---|
| X-방향 | 실제 변위 | 17.38cm | 20.68cm |
| | 스펙트럼 변위 | 11.8cm | - |
| Y-방향 | 실제 변위 | 12.6cm | 14.3cm |
| | 스펙트럼 변위 | 8.5cm | - |

## 3. 결 론

벽식 구조물을 비선형 정적 해석한 결과는 다음과 같다.

(1) 주로 단변 방향으로 배치되는 벽체의 영향으로 단변 방향의 횡방향 강성이 장변방향보다 크게 나타났다. 또한, 장변 방향의 거동은 모멘트 골조와 비슷한 양상을 보여주었다.

(2) CSM을 이용한 비선형 정적 해석 방법은 능력 곡선을 bilinear화 하는데, DCM보다 합리적이다.

(3) DCM의 예상 변위나 CSM의 성능점은 거의 차이가 없다.

(4) 지진계수 0.4g에 대한 이와 같은 결과는 벽식 구조물의 지진에 대한 저항 능력이 상당히 크다고 할 수 있다. 따라서, 반응수정계수 R값에 이와 같은 결과의 반영에 대한 연구가 계속 필요하다고 볼 수 있다.


## 감사의 글

neoMAX-3D 프로그램을 이용한 벽식 구조물의 비선형 해석에 도움을 주신 (주)한과박소프트 관계자 여러분께 감사드립니다.


## 참 고 문 헌


1. ATC (1996), "Seicmic 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. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설", 대한건축학회, 2000.
4. Williams, "Seismic Design of Buildings and Bridges", Engineering Press, 1998.
5. 안지회, 최원호, 이동근, " 고차모드효과를 고려한 비정형 구조물의 능력스펙트럼 평가", 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제 20권 제1호, 2000. 4.