

# 비선형 해석을 위한 에너지 소산 산정법의 활용

## Application of Energy Dissipation Capacity for Nonlinear Analysis

임혜정\*  
Lim, Hye Jeong

박홍근\*\*  
Park, Hong Gun

엄태성\*\*\*  
Eom, Tae Sung

### ABSTRACT

In the performance based seismic design method such as the capacity spectrum method, it is required to estimate precisely strength, deformability and energy dissipation of the member. However it merely depends on empirical equations which are not exact in the estimation of energy dissipation capacity. It is same to the generously used computer programs for nonlinear analysis such as DRAIN-2DX. On the other hand, simple equations for evaluating energy dissipation were developed in a recent study. In this paper, based on the evaluation method, a new cyclic behavior model for a flexure-dominated RC member is proposed. Although this model is simplified, it can accurately reflect the variation of energy dissipation capacity with design parameters. Using this model, a program for the nonlinear static/dynamic analysis of RC moment frame structures is also developed.

### 1. 서 론

최근 건축물의 내진성능을 평가하고 설계함에 있어 능력스펙트럼방법과 직접변위기초설계법 등과 같이 성능에 기초한 비선형 정적 방법이 개발되어 사용되고 있다. 이들 방법은 구조물을 등가의 단자유도계로 치환하여 구조물의 내진 성능을 평가·설계하는 방법인데, 여기서 등가의 단자유도계란 최대변형에 의한 활선 강성( $K_{se}$ ) 및 비탄성거동에 의한 에너지 소산과 같은 효율을 갖는 등가감쇠비( $\beta_{eq}$ )를 갖는 탄성시스템을 말한다. 따라서 이들 방법에서는 강도와 변형 능력 뿐만 아니라 에너지 소산 능력이 중요한 변수가 되므로, 구조물의 각 부재에 대한 에너지 소산 능력을 정확히 평가하여 반영시키는 것이 무엇보다도 중요하다.

그러나, 현재 사용되고 있는 비선형 정적 방법이나 철근 콘크리트 부재의 비선형 주기 거동 모델은 에너지 소산 능력을 정확히 평가·반영하지 못하고 있는 실정이다. 일례로, ATC-40과 FEMA-273 등에서 제시된 비선형 정적 해석법

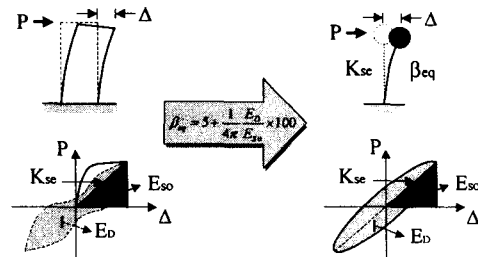


그림 1. Conversion to equivalent SDOF system

\* 서울대학교 건축학과 석사과정  
\*\* 서울대학교 건축학과 조교수, 정회원  
\*\*\* 서울대학교 건축학과 박사과정

인 능력스펙트럼방법은 구조물의 비선형 거동에 의한 에너지 소산 능력을 평가함에 있어 논리적 근거가 부족한 경험식이나 실험에 의존하고 있다. 즉, 철근콘크리트 구조물의 예상되는 주기 거동 특성에 따라 3가지로 분류하고, 운동강화(kinematic hardening)거동에 의한 에너지 소산량( $E_{sh}$ )에 각각 1.0, 0.67, 0.33의 감쇠보정계수를 곱하여 에너지 소산 능력을 평가한다.(그림 2) 또한, 주기 하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 비탄성 해석시 부재의 주기 거동 모델로 확장다케다모델(Extended Dakeda Model)이 흔히 이용되고 있다. (그림 3) 다케다모델의 경우 논리적인 근거에 기초하지 않고 실험 결과로부터 경험적으로 제시된 모델이므로, 주기 거동시 휨편칭을 보이는 실제 부재의 비선형 주기 거동과 다를 수 있고 구조물의 내진 성능을 나타내는 중요한 지표인 에너지 소산 능력을 정확히 고려할 수 없다.

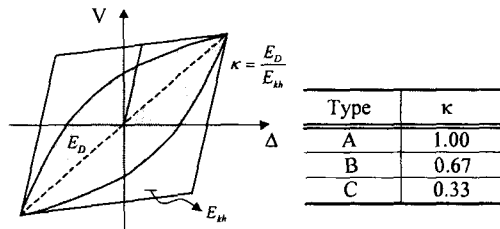


그림 2. Evaluation of energy dissipation capacity (ATC-40)

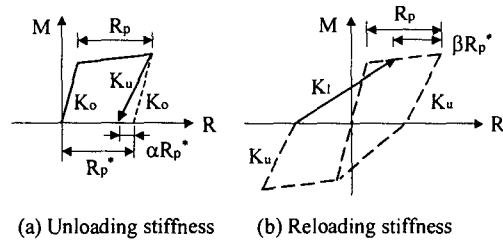


그림 3. Extended Dakeda model (DRAIN-2DX)

한편 엄태성, 박홍근<sup>1)</sup>의 최근 연구를 통하여 주기 하중을 받는 휨지배 철근콘크리트 부재의 에너지 소산 능력을 정확히 평가할 수 있는 방법을 개발되었다. 연구에 따르면 철근콘크리트 부재의 주기 거동에 의한 에너지 소산은 축력, 철근비, 배근형태, 변형능력 등의 다양한 변수의 영향을 받으며, 또한 편칭을 수반하는 복잡한 주기 곡선의 형태가 에너지 소산량과 밀접한 관련이 있다는 사실이 밝혀졌다.

본 연구에서는 이미 개발된 철근콘크리트 부재의 에너지 소산량 평가식을 이용하여 새로운 철근콘크리트 부재의 주기 거동 모델을 제안하고, 이를 적용하여 철근콘크리트 모멘트 골조 시스템에 대한 비선형 정적 및 동적 해석 프로그램을 개발하고자 한다. 또한, 기존의 에너지 소산량 산정식을 능력스펙트럼법에 적용하고, 그 실효성을 비선형 시간이력해석과의 비교를 통하여 검증하고자 한다.

## 2. 철근콘크리트 부재의 비선형 모델 및 해석 프로그램

### 2.1 철근콘크리트 부재의 비선형 모델 개발

철근콘크리트 부재는 주기 거동시 편칭으로 인하여 그림 4 (a)와 같이 복잡한 비탄성 거동을 보인다. 이러한 복잡한 경로를 정확하게 나타내는 것은 매우 어려우므로, 본 연구에서는 기존의 에너지 소산량 산정법을 이용하여 이를 단순화하고자 한다.

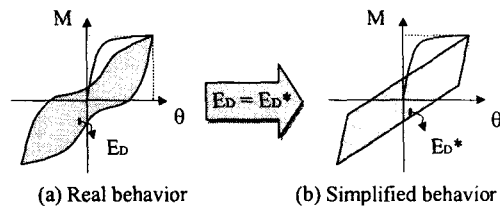


그림 4. Simplification of cyclic behavior

일반적으로 휨지배 철근콘크리트 부재는 비탄성 휨 변형이 양단에 집중된다고 가정할 수 있다. 따라서 각 부재는 탄성 변형만 발생하는 '탄성보(elastic beam)'와 양단의 비탄성 변형이 발생하는 '소성 힌지(plastic hinge)'로 모델링할 수 있다. 이 때 각 노드의 회전각은 탄성보의 회전각과 소성 힌지의 회전각의 합과 같으며 탄성보 및

소성 힌지의 휨모멘트는 노드에 걸리는 휨모멘트와 동일하다. 이와 같은 사실에서 식을 유도하면 부재의 연성 행렬은 탄성보의 연성 행렬과 소성 힌지의 연성 행렬의 합으로 구할 수 있으며 여기서 역행렬을 구하면 부재의 강성 행렬을 획득할 수 있다. 항복 이후 양단의 소성 힌지의 강성 계수는 상호 독립적으로 결정된다.

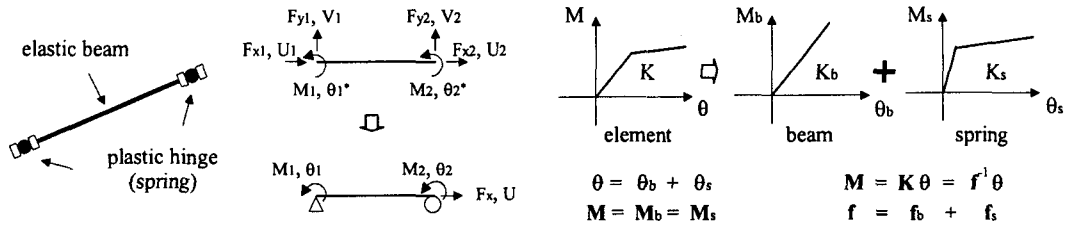


그림 5 Element model

탄성 변형에서는 에너지 소산이 발생하지 않으므로 소성 힌지의 주기 거동 모델을 다음과 같이 제안하여 에너지 소산량을 반영하였다. 단, 초기  $M-\theta$ 의 관계가 이선형(bilinear)인 경우에 한하며 감쇠보정계수( $\kappa$ )는 참고 논문<sup>1)</sup>의 식을 일반화하여 적용한다.

- 1) 단조 하중(monotonic loading)일 때는 초기 경로를 따른다.
- 2) 주기 거동 경로는 소성 힌지가 겪은 최대 회전각, 최대 휨모멘트에 의존하여 결정되며 항복 미도달시에는 항복점을 기준으로 한다.
- 3) 최대 회전각에 도달한 후 하중의 방향이 바뀌면 양(+), 부(-) 방향의 최대 회전각 및 최대 휨모멘트를 꼭지점으로 하는 평행사변형을 구성한다. 이 때 운동강화 주기 거동에 의한 에너지 소산량의  $\kappa$ 배가 되도록 한다.
- 4) 소성 힌지의 회전각이 새로운 최대값에 도달하기 이전까지는 이 영역 내에서 주기 거동한다.
- 5) 최대 회전각에 도달한 후 하중의 방향이 변하지 않으면 초기 경로를 따른다.
- 6)  $\kappa$ 값은 최대 회전각을 새로이 겪을 때마다 산출하여 하중 방향이 바뀌면 새로운 평행사변형을 구성하고 이 경로를 따른다.

위에서 제시한 주기 거동 모델을 이용하여 철근콘크리트 모멘트 골조 시스템의 비선형 정적 및 동적 해석을

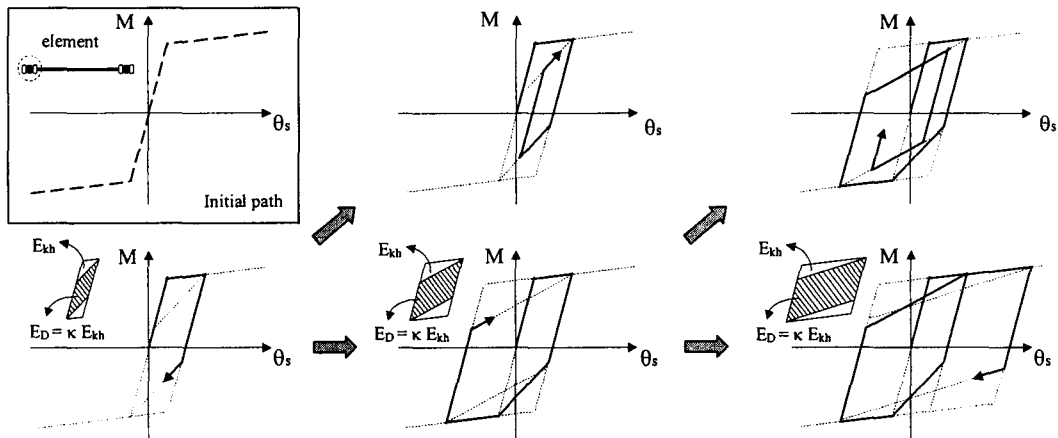


그림 6. Proposed moment-rotation relationship

수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 해석 방법은 변위 제어법을 이용하였으며 비선형 동적 해석시 시간이력해석의 방법으로는 참고 자료<sup>3)</sup>의 알고리즘을 프레임 해석에 적용되도록 변환하여 이용하였다.

## 2.2 프로그램 검증

본 프로그램의 해석 방법에 대한 검증으로써 동일 구조물에 대해 DRAIN-2DX의 해석 결과와 비교해 보고자 한다. DRAIN-2DX는 부재의 주기 거동시 에너지 소산 능력이 반영되지 않았으므로 비교 대상은 운동강화 주기 거동을 보이는 구조물, 즉 에너지 소산이 완전하게 일어나는 구조물(k=1)로 제한한다. 해석 모델의 세부 사항은 그림 7 및 표 1에 나타낸 바와 같다. 횡하중은 삼각형분포로 가정하였으며 각 층의 고정하중과 적재하중은 각각 690 kN, 360 kN 이다.

본 프로그램과 DRAIN-2DX로 각각 해석해본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 최상층 변위( $\Delta$ )와 밀면전단력( $V$ ) 사이의 주기 곡선이 서로 일치한다. (그림 8)
- 2)  $\Delta=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  (m) 일 경우 각각 구조물의 층별 변위가 일치한다.
- 3)  $\Delta=2.0$  (m) 즉, 최상층 변위가 건물 높이의 5%에 도달했을 때 소성 힌지의 발생 위치를 비교해 보면 거의 일치함을 알 수 있고, 각 위치에서 회전각의 크기 역시 같다. (그림 9)
- 4) 각 부재마다 소성 힌지에서의  $M-\theta$  관계 주기 곡선도 두 가지경우가 매우 잘 맞는다.

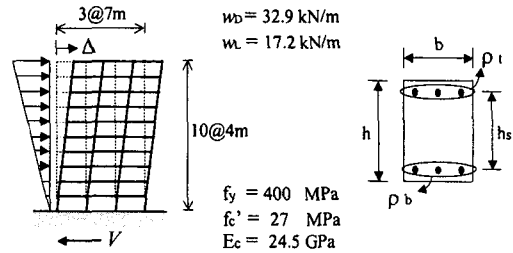


그림 7. Model for numerical analysis

표 1. Properties of beam and columns

type	location	b(mm)	h(mm)	h <sub>s</sub> (mm)	$\rho_t$ (%)	$\rho_b$ (%)
col (A)	1~3 F	700	700	610	1	1
col (B)	4~6 F	600	600	510	1	1
col (C)	7~10 F	500	500	410	1	1
Beam	all	400	600	520	1	0.75

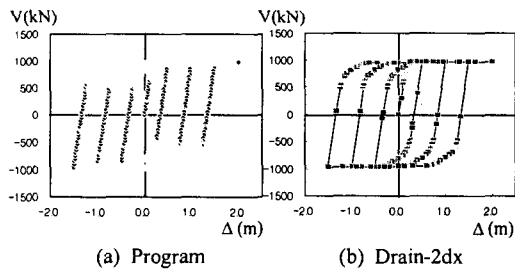


그림 8. Roof displacement and base shear relationship

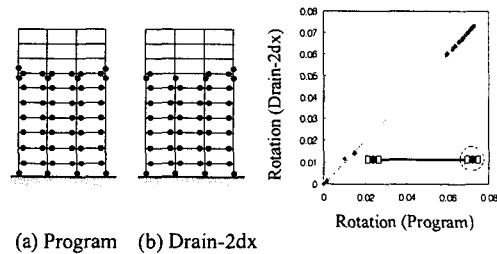


그림 9. Location of plastic hinges and the deformations

## 3. 비선형 정적 해석

### 3.1 CSM에 적용하여 성능점 산출

본 프로그램은 구조물의 에너지 소산능력을 정확하게 반영하는 데 중점을 둔 것으로서 이를 CSM에 적용하여 성능점을 구해보고자 한다. 해석 모델은 앞서 이용한 구조물과 동일한 것으로 하되 운동강화 주기 거동이 아니라 에너지 소산량을 반영한 주기 거동 모델을 사용한다. 횡하중은 각각 삼각형분포(load case 1), 등분포(load case 2)인 경우로 가정하여 해석하였다. 요구스펙트럼을 위한 지진 데이터로는 El Centro 1940 (NS component,

PGA=0.319g), Northridge CA 1994(Component: 196°, PGA=0.412g)를 적용한다.

CSM에 의하여 성능점을 산출하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 비선형 정적 해석을 수행하여 최상층 변위와 밀면전단력 관계인 성능 곡선을 그린다.
- 2) 성능 곡선을 응답가속도( $S_a$ ) 및 응답변위( $S_d$ )와의 관계인 성능 스펙트럼으로 변환시킨다. (변환식은 ATC-40 에 제시된 기준을 따름)
- 3) 실제 지진과의  $S_a$ -T 관계 그래프를 그린다. ( $\beta=5\%$ )
- 4)  $S_a$ -T를 다음 식을 이용하여  $S_a$ - $S_d$  로 변환하여 탄성요구스펙트럼(elastic demand spectrum)을 작성한

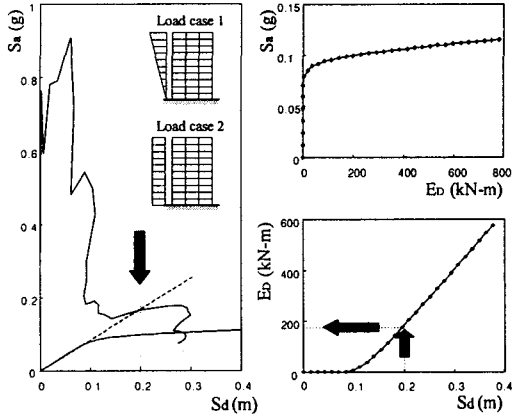


그림 10. Evaluation of energy dissipation capacity

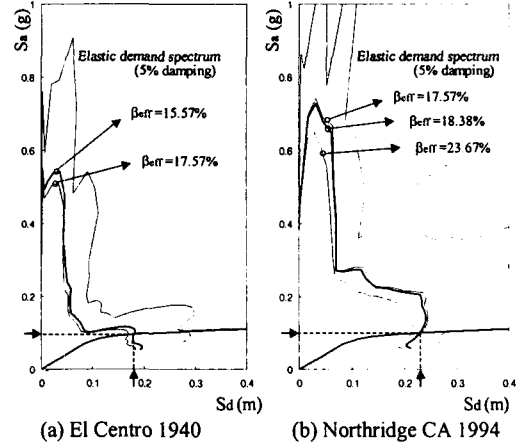


그림 11. Determination of performance point

표 2. Performance point ( load case 1 )

(a) El Centro 1940								
Iter.	$d_{pi}$ (m)	$a_{pi}$ (g)	$\Delta_p$ (m)	$V_p$ (kN)	$E_{so}$ (kN-m)	$E_d$ (kN-m)	$\beta_{eff}$ (%)	$d_p$ (m)
1	0.2097	0.0996	0.2790	909.1	126.8	200.4	17.57	0.170
2	0.1818	0.0971	0.2418	886.1	107.1	142.3	15.57	0.180
(b) Northridge CA 1994								
Iter.	$d_{pi}$ (m)	$a_{pi}$ (g)	$\Delta_p$ (m)	$V_p$ (kN)	$E_{so}$ (kN-m)	$E_d$ (kN-m)	$\beta_{eff}$ (%)	$d_p$ (m)
1	0.4613	0.1143	0.6136	1043.7	320.2	751.3	23.67	0.210
2	0.2097	0.0996	0.2790	909.1	126.8	200.4	17.57	0.235
3	0.2237	0.1007	0.2976	919.2	136.8	230.0	18.38	0.230

표 3. Performance point ( load case 2 )

(a) El Centro 1940								
Iter.	$d_{pi}$ (m)	$a_{pi}$ (g)	$\Delta_p$ (m)	$V_p$ (kN)	$E_{so}$ (kN-m)	$E_d$ (kN-m)	$\beta_{eff}$ (%)	$d_p$ (m)
1	0.1360	0.1075	0.1767	1021.6	90.3	69.7	11.15	0.220
2	0.2137	0.1205	0.2776	1145.0	158.9	220.9	16.06	0.170
3	0.1845	0.1164	0.2397	1105.7	132.5	163.6	14.82	0.184
(b) Northridge CA 1994								
Iter.	$d_{pi}$ (m)	$a_{pi}$ (g)	$\Delta_p$ (m)	$V_p$ (kN)	$E_{so}$ (kN-m)	$E_d$ (kN-m)	$\beta_{eff}$ (%)	$d_p$ (m)
1	0.3302	0.1322	0.4289	1256.2	269.4	465.0	18.74	0.237
2	0.2525	0.1252	0.3280	1189.4	195.0	301.5	17.30	0.243

다.

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a g$$

- 5) 등가변위법(equal displacement method)을 이용하여 임의의 성능점  $a_{p,1}$ ,  $d_{p,1}$ 을 정한다.
- 6) 응답 변위가  $d_{p,1}$ 일 때 구조물의 에너지 소산량을 그래프에서 구한다. 이 때 그래프는 프로그램 내에 에너지 소산식을 적용하여 얻어진 것이다. 즉, 비선형 정적 해석 과정에서 최상층 변위값에 따라 각 부재마다 비탄성 변형량을 구한 후 참고식을 이용하여 에너지 소산량을 산정한다. 소성 힌지가 발생한 지점들에서 얻어진 에너지 소산량을 모두 더하면 구조물 전체의 에너지 소산량이 되며, 이를 그래프로 나타내면 된다. (그림 10)
- 7) 이를 다음 식에 대입하여 유효감쇠계수( $\beta_{eff}$ )를 구한다.

$$\beta_{eff} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{so}} \times 100 + 5$$

- 8) 탄성요구스펙트럼에 응답감소계수( $SR_A, SR_V$ )를 적용하여 비탄성요구스펙트럼을 구성한다. (응답감소계수는 ATC-40에 제시된 식을 따름)
- 9) 능력스펙트럼과 비탄성요구스펙트럼이 교차하는 지점이 처음에 가정한 성능점  $a_{p,1}, d_{p,1}$ 와 일치하는지를 확인하고 오차가 많이 나면 성능점을 다시 가정하여 4)~6)을 반복한다.

횡하중을 삼각형 분포(load case 1) 및 등분포(load case 2)로 가정하였을 때 각 지진에 대해서 성능점을 산출한 결과는 각각 표 2, 3에 나타낸 바와 같다.

ATC-40에 따르면 에너지 소산량은 이력 곡선으로 둘러싸인 부분의 면적에 감쇠보정계수 0.33, 0.67, 1.0을 선택하여 곱해서 구하도록 되어있다. 이 때 사용되는 값이 본 해석 구조물의 실제 감쇠보정계수와 얼마나 차이가 나는지 알아보기 위해  $\kappa$ 를 직접 계산해보도록 한다. Load case 1 중 El Centro 1940에 대해 산출한 성능점 기준으로 계산하면 이력 곡선으로 둘러싸인 부분의 면적이 275.1 kN-m, 실제 소산된 에너지는 142.3 kN-m (표 3 (a))이므로 감쇠보정계수  $\kappa$ 는  $142.3/275.1 = 0.52$ 이다. 이 수치는 ATC-40에서 사용하는 0.67과 큰 차이를 보이고 있으며, 만약 감쇠보정계수로서 0.67을 사용할 경우 구조물의 에너지 소산능력이 실제보다 과대 평가되어 성능점을 제대로 산출할 수 없다.

#### 4. 비선형 동적 해석

본 논문에서 제시한 부재의 주기 거동 모델을 사용하여 El Centro 1940과 Northridge CA 1994 두 지진 가속도 이력에 대하여 비선형 시간 이력 해석을 수행하였다. 그림 13은 지진 데이터, 밀면 전단력 이력, 최상층 변위 이력을 보여준다. 또한 그림 12는 비선형 거동을 보이는 중간층 보 부재의 소성 힌지에서의 휨모멘트-회전각 이력을 보여준다. 그래프에 의하면 초반에 최대 변위에 도달한 후 좁은 범위 내에서 이력 거동하는 형상이기 때문에 에너지 소산이 별로 일어나지 않음을 알 수 있다. 해석을 통하여 구한 최대 최상층 변위 및 밀면 전단력은 표 4에 나타내었다. El Centro 1940의 경우 구조물의 최대 최상층 변위는 247.7 mm, 최대 밀면 전단력은 1190.6 kN이며, Northridge CA 1994의 경우 각각 356.5 mm, 1393.6 kN으로 해석되었다.

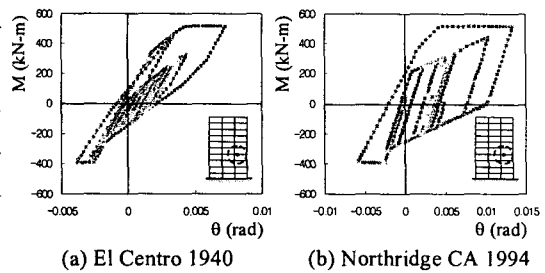


그림 12. Cyclic behavior

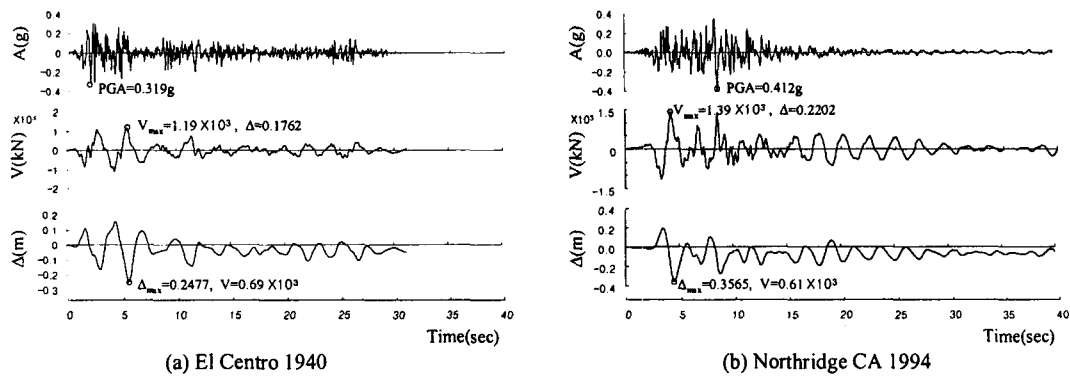


그림 13. Nonlinear dynamic analysis

### 5. 해석 결과 비교 및 분석

참고문헌 1의 에너지소산능력 평가 방법, ATC-40의 에너지소산능력 평가식( $\kappa=0.67$ ), 그리고 비선형 시간이력해석 세 방법에 의한 구조물의 최대 최상층 변위  $\Delta_{max}$ 와 밀면 전단력  $V_{max}$ 를 표 7에 비교하여 나타내었다. 각 경우 성능곡선 산정을 위한 푸시오버해석시 두 가지 층지진하중의 분포 load case 1, 2를 사용하였다.

층지진하중분포와 지진파의 종류에 관계없이 참고문헌 1의 에너지소산능력 산정식을 적용할 경우 ATC-40에서 제안한 방법보다 실제 비선형 시간이력해석 결과에 더 근사한 비탄성 변위와 밀면 전단력을 얻었다. 그러나, 층지진 하중의 분포에 따른 CSM에 의한 최상층 변위는 지진파에 따라 다른 양상을 나타내는데, El Centro 1940 지진은 삼각형 층하중분포(load case 1)인 경우에 비선형시간이력해석결과에 더 근접한 결과를 보인 반면 Northridge CA 1994 지진은 등분포 층지진하중(load case 2)인 경우에 더 정확한 결과를 보였다.

이러한 층지진하중 분포와 지진파의 종류 등에 따른 비선형 정적 및 동적 해석 결과의 차이는 다음과 같은 복합적인 이유로 나타난다. 첫째, 지진파의 형태에 따라 층지진하중의 분포가 달라진다. 둘째, 실제 지진에 의하여 건물이 비선형 거동을 겪는 경우 기본진동형상이 달라지고 또한 고차모드의 효과가 커지면서 층하중의 분포가 달라진다. 셋째, CSM에서는 지진파의 형태에 관계없이 구조물이 정(+), 부(-) 방향의 최대, 최소 변형에서 지속적으로 주기거동을 하며 에너지를 소산한다고 가정하고 있지만, 그림 13에서 보는 바와 같이 실제 지진의 경우 지진파가 불규칙하기 때문에 지진거동 내내 CSM에서 가정하는 것과 같은 양호한 형태의 에너지 소산하

표 4. Comparison of results

(a) El Centro 1940					
	CSM (load case 1)		CSM (load case 2)		Nonlinear dynamic analysis
	Proposed method	ATC-40 ( $\kappa=0.67$ )	Proposed method	ATC-40 ( $\kappa=0.67$ )	
$\Delta$ (mm)	241.8	223.2	239.7	201.9	247.7
V (kN)	886.1	872.8	1105.7	1057.0	1190.6

(b) Northridge CA 1994					
	CSM (load case 1)		CSM (load case 2)		Nonlinear dynamic analysis
	Proposed method	ATC-40 ( $\kappa=0.67$ )	Proposed method	ATC-40 ( $\kappa=0.67$ )	
$\Delta$ (mm)	297.6	279.0	328.0	290.2	356.5
V (kN)	919.2	909.1	1189.4	1156.2	1393.6

는 경우는 드물고, 오히려 그림 12 에 나타난 바와 같이 한번의 큰 지진가속도에 의하여 손상을 입은 후 탄성상태에서 주기거동을 일으키는 것이 대부분이다.

## 6. 결 론

본 연구는 구조물의 에너지소산능력이 정확하게 평가·반영된 내진 설계 및 해석 방법을 개발하기 위한 기초적인 연구로서, 최근 연구<sup>1)</sup>에서 개발된 에너지소산능력평가 방법을 이용하여 휨지배 철근콘크리트 부재의 에너지소산능력을 정확히 고려할 수 있는 주기 거동 모델을 제안하고 철근콘크리트 모멘트 골조 시스템에 대해 비선형 정적 및 동적 해석을 수행할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 기존의 비선형 주기 거동 모델이 경험식에 의존한 반면, 본 연구에서 제안된 주기 거동 모델은 주기거동 동안 소산하는 에너지량을 정확히 일치시킨 모델로서 단면형태, 철근비, 배근형태, 변형능력 등에 따른 에너지소산능력을 정확히 고려하고 이를 비선형 주기 거동 모델에 반영시킬 수 있다. 또한, 에너지소산능력평가 방법을 능력스펙트럼방법에 적용하여 내진 해석을 수행할 수 있는 방법을 개발하고, 기존 에너지소산능력 산정법에 의한 내진 해석, 비선형 시간이력해석 등과 비교·검토를 통하여 제안된 방법의 우수성을 입증하였다.

향후 다음과 같은 방향의 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

- 1) 압축력을 받는 휨지배 철근콘크리트 부재에서 나타나는 휨핀칭 거동을 고려할 수 있도록 주기거동모델을 개선한다.
- 2) 최대, 최소 변위에서의 지속적인 주기거동을 가정하는 현 능력스펙트럼방법을 개선하여, 매우 불규칙한 지진과의 특성을 고려할 수 있는 비선형정적해석법을 연구한다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지진공학연구센터(KEERC)의 재정적 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 엄태성, 박홍근, "휨핀칭과 에너지 소산능력", 한국콘크리트학회 논문집 8월 게재 예정
2. 엄태성, 박홍근, "휨지배 철근콘크리트 부재의 에너지 소산량 평가 방법", 한국콘크리트학회 논문집, Vol.14, No.4, 2002, pp.566-577.
3. 엄태성, 박홍근, "비선형 시간이력해석에 의한 벽식 아파트의 내진 안전성 검토", 한국지진공학회 학술발표논문집, Vol.5, No.1, pp.248-255
4. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40 Report, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
5. Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielson, N. N., "Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes", Journal of Structural Engineering Division, ASCE, Vol.96, No.ST12, Dec. 1970, pp.2557-2573.
6. Allahabadi, R. and Powell, G. H., "DRAIN-2DX User Guide", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-88/06, Mar., 1988.
7. 건축물 하중기준, 건설교통부, 2000