

다양한 지진에 따른 비선형 직접스펙트럼법의 오차해석 Error Analysis of Nonlinear Direct Spectrum Method to Various Earthquakes

강 병 두* 박 진 화** 전 대 한*** 김 재 응****
Kang, Pyeong-Doo Park, Jin-Hwa Jun, Dae-Han Kim, Jae-Ung

ABSTRACT

It has been recognized that damage control must become a more explicit design consideration. In an effort to develop design methods based on performance it is clear that the evaluation of the inelastic response is required. The methods available to the design engineer today are nonlinear time history analyses, or monotonic static nonlinear analyses, or equivalent static analyses with simulated inelastic influences. Some codes proposed the capacity spectrum method based on the nonlinear static(pushover) analysis to determine earthquake-induced demand given the structure pushover curve. This procedure is conceptually simple but iterative and time consuming with some errors. This paper presents a nonlinear direct spectrum method to evaluate seismic performance of structure, without iterative computations, given the structural initial elastic period and yield strength from the pushover analysis, especially for multi degree of freedom structures. The purpose of this paper is to investigate accuracy and confidence of this method from a point of view of various earthquakes and unloading stiffness degradation parameters.

1. 서 론

기존의 내진설계규준들에 의해 설계된 구조물들은 Loma Prieta(1989)지진, Northridge(1994)지진, Kobe(1995)지진 등의 발생 이후 인명 피해방지라는 측면에서는 매우 적합하였으나 경제적인 측면에서는 구조요소와 비구조요소의 손상으로 막대한 손실을 입었다. 따라서 구조물의 거동을 실제에 가깝게 추정할 수 있고, 성능을 예측할 수 있는 성능설계와 같은 개선된 규준이 필요하다는 공감대가 형성되었다. 이와 같은 구조물의 성능에 기초한 설계에서는 비선형응답 산정이 필수적이 된다. 이를 위한 방법으로는 비선형 시각이력해석, 비선형 정적(pushover)해석, 등가 선형해석 등이 있는데, 정확성과 실용성의 측면에서 보다 약산적 방법이 요구되고 있다.^{1~4)} 이에 따라 Vision2000(SEAOC), ATC-40(ATC), FEMA-273(NEHRP) 등에서는 복잡한 고유치해석이나 비선형 동적해석(비선형 시각이력해석)을 하지 않고 간단히 비선형 정적해석(pushover analysis)만으로 지진에 의한 구조물의 비선형 최대응답을 평가하고자 하는 방법, 즉 등가 SDOF 모델에 대하여, pushover(MDOF)로 구한 비선형 정적응답과 능력스펙트럼(SDOF)의 동적특성을 고려하여 비선형 응답을 추정하는 능력스펙트럼법(capacity spectrum method)이나 변위계수법(displacement coefficient

* 정회원 · 거창전문대학 건축과 조교수, 박사수료
** 정회원 · 동아대학교 건축학부 석사과정
*** 정회원 · 동서대학교 건설공학부 조교수, 공학박사
**** 정회원 · 동아대학교 건축학부 교수, 공학박사

method) 등을 제시하고 있다. ATC-40⁵⁾에서는, 비선형 정적(pushover)해석의 밀면전단력과 최상층변위관계를 이용한 능력스펙트럼(capacity spectrum)과 등가 감쇠를 이용한 요구스펙트럼(demand spectrum)으로 이루어진 선형 능력스펙트럼법을 제안하고 있는데, 개념적으로는 간단하나 반복계산과정이 요구되며, 부정확한 결과가 산출되는 경우가 많다. 따라서 시행착오적인 등가 선형 요구스펙트럼대신 비선형 요구스펙트럼을 사용하는 방법들에 대한 연구들이 진행되고 있다.^{6)~8)} 비선형 요구스펙트럼은 표준적 선형 설계스펙트럼으로부터 결정될 수 있으며, 이 방법은 등가 선형의 경우보다는 계산과정이 대폭 줄어들기는 하나 아직도 다소의 연산과정이 요구된다. 이에 따라, pushover 곡선으로부터 구조물의 항복강도와 진동주기를 구한 다음, 일련의 계산과정을 거치지 않고 직접적으로 다자유도계의 비선형 최대응답을 구할 수 있는 비선형 직접스펙트럼법이 연구된바 있다.⁹⁾

본 연구에서는 이러한 비선형 직접스펙트럼법의 정확성 및 신뢰성을 다양한 지진과 제하강성저하지수의 관점에서 검토하기로 한다.

2. 비선형 직접스펙트럼법

선형 능력스펙트럼법에 비하여 보다 간단하게 비선형 구조물의 최대지진요구(maximum seismic demand)를 산정하는 비선형 직접스펙트럼법은, 고차모드의 영향을 무시하고 기본모드만을 고려하며 비선형 정적(pushover)해석에서 횡력분포 자체는 변화하지 않는다는 가정을 따르며 다음과 같이 수행된다.

(1) 실제공간(MDOF)

그림 1(a)와 같은 실제 구조물(MDOF)에 대하여, 수평 층지진력 F (합계는 V_b)의 분포를 가정(예를 들면, 질량행렬 $\times 1$ 차모드벡터)하고, F 의 크기를 증가시키면서 pushover(비선형 정적) 해석을 수행한다. 밀면전단력 V_b (y 축)과 최상층변위 U_N (x 축)의 관계를 도출하면 pushover 곡선(그림 1(b))가 구해지는데, 어떤 범위를 넘어서면, 항복현상이 나타나면서 U_N 이 크게 증가한다.

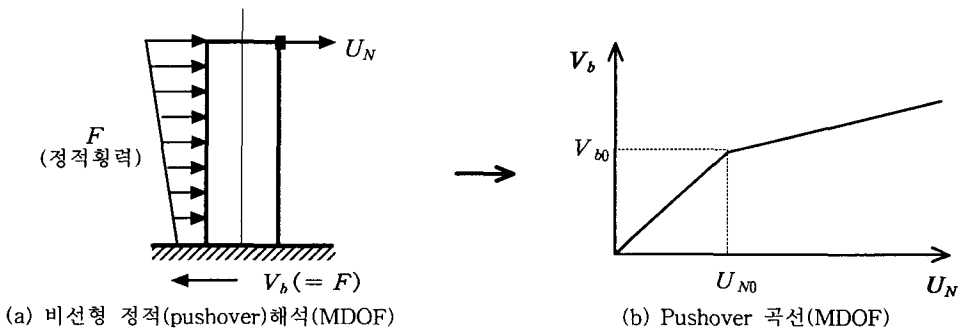


그림 1. 하중-변위관계

(2) 약식공간(SDOF)

1) 능력스펙트럼(capacity spectrum; A-D format)

식 (1)~(4)와 같은 변수변환을 통하여 MDOF 모델의 pushover 곡선 (V_b-U_N)의 관계(그림 2(a))를, 등가 SDOF 모델에 대한 능력스펙트럼(A-D; 유사가속도-최대변위, 그림 2(b))으로 변환한다.

$$A = \frac{V_b}{M_1^*} \quad (1)$$

$$D = \frac{U_N}{\Gamma_1 \phi_M} \quad (2)$$

$$M_1^* = \frac{(\phi_1^T \mathbf{m} \mathbf{1})^2}{\phi_1^T \mathbf{m} \phi_1} = \frac{(\sum m_j \phi_{j1})^2}{\sum m_j \phi_{j1}^2} \quad (3)$$

$$\Gamma_1 = \frac{\phi_1^T \mathbf{m} \mathbf{1}}{\phi_1^T \mathbf{m} \phi_1} = \frac{\sum m_j \phi_{j1}}{\sum m_j \phi_{j1}^2} \quad (4)$$

위에서,

- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| A ; 유사가속도(pseudo acceleration) | m_j ; j 층 바닥의 질량 |
| D ; 최대변위(peak deformation) | $\mathbf{1}$; 단위벡터 |
| V_b ; 밑면전단력 | ϕ_1 ; 기본모드벡터 |
| U_N ; 최상층변위 | ϕ_{j1} ; 기본모드의 j 층 요소 |
| Γ_1 ; 기본모드의 모드참여계수 | ϕ_M ; 기본모드의 최상층 요소 |
| M_1^* ; 기본모드의 유효질량 | N ; 전체 층수 |
| \mathbf{m} ; 질량행렬 | |

이 때 기본모드벡터 ϕ_1 은 고유치해석(또는 합리적)으로 산정(또는 추정)한다. 능력스펙트럼($A-D$)을 이 선형(bi-linear)로 약식화하여 항복강도 및 선형구간을 확인하고, 초기 선형구간내의 기울기 $\omega_n^2 (= A_0/D_0)$ 으로 기본진동수 ω_n 또는 기본진동주기 $T_n (= 2\pi/\omega_n)$ 을 추정할 수 있고, 항복강도 $A_0 (= V_{b0}/M_1^*)$ 를 구할 수 있다. 결국 능력스펙트럼으로부터 등가 SDOF의 동적특성 T_n (또는 ω_n)과 비선형 유사가속도 A_y/g ($= A_0/g$)를 구할 수 있다(그림 2(b)).

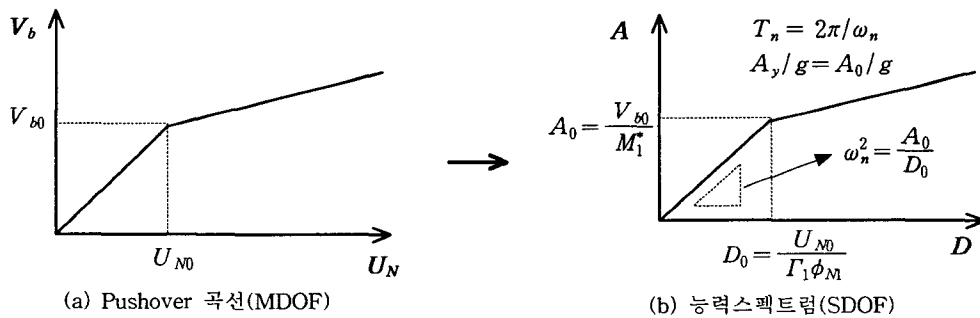


그림 2. 능력스펙트럼 작성

2) 요구스펙트럼(demand spectrum; $A_y/g - T_n$ format)

등가 SDOF모델에 대한 $A_y/g - T_n$ (비선형 유사가속도-진동주기)의 비선형 가속도응답스펙트럼이 곧 요

구스펙트럼이 되며, 그림 3은 El-Centro NS 지진기록($\zeta=5\%$, $\ddot{u}_{g\max}=0.319g$)에 대해 작성된 요구스펙트럼의 예이다.

3) 성능점(performance point)

T_n 과 A_y/g 에 대한 비선형 가속도응답스펙트럼($T_n-A_y/g-\mu$), 즉 요구스펙트럼(그림 3)으로부터 μ 를 직접 구하면, 식 (5)와 같이 비선형 변위 D 를 구할 수 있다.

$$D = \mu \frac{A_y}{g} \left(\frac{T_n}{2\pi} \right)^2 g \quad (5)$$

(3) 실제공간(MDOF, 비선형 최대응답)

위의 등가 SDOF모델에서 구한 성능점 D 에 따라 MDOF의 N 층의 응답은 최종적으로 식 (6)과 같이 추정할 수 있다.

$$U_N = D \Gamma_1 \phi_M \quad (6)$$

3. 비선형해석

3.1. 기본가정

비선형 정적(pushover)해석 및 비선형 동적해석은 CANNY¹⁰⁾를 통하여 수행하기로 한다. 비선형 직접스펙트럼법의 적용성과 신뢰성을 평가하기 위한 모델은 집중질량계(lumped mass system)의 2차원 해석모델로써 스프링 요소를 사용하였다. 해석모델은 기초 위에 고정되어 있고 P- Δ 효과는 고려하지 않았다.

3.2. 골격곡선 및 이력곡선

본 연구에서 사용한 골격곡선(skeleton curve)은 이선형(bi-linear)을 사용하였으며, 항복후 강성은 초기강성에 항복후 강성계수(0.001)를 곱한 값으로 하였다. 이력곡선(hysteresis rule)은 그림 4와 같은 강성저하형 이선형(degrading bilinear) 이력곡선으로써 제하(除荷, unloading)와 재하(再荷, reloading)강성(K_u)은 식 (7)을 따르도록 하였다.¹⁰⁾

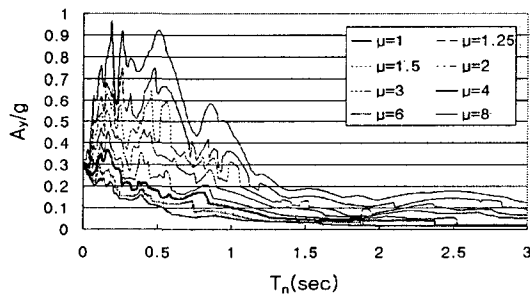


그림 3. 요구스펙트럼

($\zeta=5\%$, $\ddot{u}_{g\max}=0.319g$, El-Centro 1940 NS)

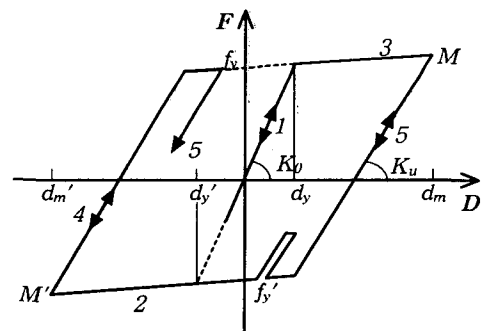


그림 4. 강성저하형 이선형 이력곡선

$$K_u = K_0 \left(\frac{d_y - d_y'}{d_m - d_m'} \right)^\gamma \quad (7)$$

여기서, $d_m \geq d_y$, $d_m' \geq d_y'$ 이고, γ 는 제하강성저하시수로써 0~0.5의 값을 사용하였다.

3.3. 비선형 정적해석

비선형 정적해석은 수평층지진력 F 의 고정된 분포를 가정하고 F 의 크기를 증가시키면서 해석하는 방법이다. 이 해석법으로부터 구조물과 부재의 항복상태를 확인할 수 있으며, 밀면전단력 V_b 와 최상층변위 U_N 의 관계를 나타낼 수 있다.

3.4. 비선형 시각이력해석

비선형 시각이력해석에서 운동방정식을 풀기 위한 수치적분법으로는 Newmark β 법($\beta=0.25$, $\gamma=0.5$)을 사용하였다. 감쇠로는 Rayleigh 감쇠를 사용하여 해석을 수행하였으며, 감쇠계수를 구하기 위한 감쇠비(ζ)는 5%로 가정하였다.

4. 해석모델 및 분석

4.1. 입력지진동

비선형 시각이력해석에 사용된 입력지진동은 표 1과 같은 5가지를 사용하였다. 입력된 지진이력 데이터에 대한 적분시간 간격은 0.005sec가 되도록 하였다.

표 1. 입력지진동

No.	Earthquake (Year)	M	Comp.	PGA (cm/sec ²)	Duration (sec)
1	El-Centro (1940)	6.3	NS	312.7	31.18
2	Taft (1952)	7.7	EW	175.9	54.46
3	Hachinohe (1968)	7.9	NS	225.0	36.00
4	Kobe (1995)	7.2	NS	817.8	30.00
5	Northridge (1994)	6.6	N360	217.3	60.00

표 2. 구조물의 제반구조특성 ($T_n=0.8\text{sec}$, $\mu=4$)

j (층수)	① w_j (kips)	② F_j (V_b)	③ V_j (V_b)	④ k_j/k_1	⑤ k_j (kips/in)	⑥ F_{jv} (kips)	⑦ V_{jv} (kips)	⑧ V_{jv}/W
1	100	0.063	1.000	1.000	234.90	5.59	72.14	0.1443
2	100	0.126	0.937	0.937	220.12	9.61	66.55	0.1331
3	100	0.189	0.811	0.811	190.55	13.60	56.94	0.1139
4	100	0.252	0.622	0.622	146.20	17.68	43.33	0.0867
5	100	0.371	0.371	0.371	87.08	25.65	25.65	0.0513

4.2. 해석모델의 제반구조특성

비선형 직접스펙트럼법의 적용성과 신뢰성을 검토하기 위한 모델로써 다자유도계의 2차원 모델을 사용하였으며, 해석모델 중 대표적인 구조물($T_n=0.8\text{sec}$, $\mu=4$)의 제반구조 특성¹¹⁾을 표 2에 나타내었다. 표 2에서 층중량 w_j 는 모든 층이 균일한 것으로 가정하였으며, 층횡력 F_j 산정시 UBC 횡력분포를 따르기로 하였다. V_j 는 층전단력을 나타내며, 층강성 k_j 산정시 모든 층의 층간변위는 등분포로 가정(즉, 전체변위는 선형 분포)하여 구조해석(고유치해석)을 통해 산정하였다. 층항복력 F_{jv} 는 소성율 μ 와 진동주기 T_i ($i=1\sim 5$)에 대한 El-Centro 지진의 비선형 가속도응답스펙트럼(예; 그림 3)으로부터 A_y ($=S_a^i$)를 산정한 다음 응답

표 3. 층항복전단력(V_{μ} ; kips)

T_n (sec)	기본 모드 벡터	El-Centro			Taft			Hachinohe			Kobe			Northridge		
		μ			μ			μ			μ			μ		
		2	4	8	2	4	8	2	4	8	2	4	8	2	4	8
0.3	1.00	125.46	91.34	58.54	106.68	69.35	36.96	160.17	77.62	50.22	347.37	283.49	246.17	94.72	73.76	58.39
	2.00	115.19	83.82	53.63	99.13	64.34	34.08	148.96	71.82	46.14	322.02	262.46	227.79	87.40	68.30	54.04
	2.98	97.94	71.23	45.60	84.64	54.93	29.07	127.23	61.28	39.33	274.88	224.00	194.42	74.45	58.33	46.17
	3.93	75.52	55.01	35.34	63.57	41.39	22.19	95.37	46.43	30.23	207.45	169.52	147.27	56.79	44.09	34.92
0.8	4.82	46.33	33.86	21.97	35.87	23.65	13.23	53.43	27.03	18.41	119.10	98.24	85.64	33.73	25.50	20.26
	1.00	98.65	72.14	25.58	48.93	31.87	13.81	99.25	35.00	28.29	428.17	158.47	66.65	81.79	64.91	18.91
	1.99	90.94	66.55	23.02	43.95	29.11	12.23	90.62	31.44	25.79	397.11	144.09	55.98	75.43	59.91	16.55
	2.97	77.92	56.94	19.74	37.18	24.84	10.46	77.03	26.91	22.12	338.84	122.16	46.32	64.37	51.16	14.22
2.0	3.93	59.31	43.33	15.72	29.98	19.30	8.59	59.97	21.45	17.18	255.59	96.26	42.92	49.06	38.90	11.81
	4.81	35.17	25.65	10.61	20.56	12.13	6.17	37.95	14.58	10.87	146.29	62.41	36.11	29.19	23.00	8.80
	1.00	32.95	20.20	8.37	16.51	9.49	5.26	34.50	16.47	10.97	95.31	32.84	16.99	19.37	14.62	4.66
	2.00	28.60	17.29	7.24	14.31	8.22	4.63	30.69	14.86	9.74	75.95	23.34	11.72	15.88	11.88	3.77
	2.98	24.66	14.46	6.38	12.61	6.98	4.09	25.72	12.83	8.38	63.17	23.43	14.73	13.20	9.71	3.55
	3.93	20.89	12.92	5.41	10.46	6.07	3.31	21.47	10.20	6.85	63.16	23.40	12.77	12.70	9.62	3.19
	4.82	15.81	10.38	4.09	7.96	4.73	2.40	15.48	6.74	4.85	57.60	22.55	11.56	11.12	8.60	2.74

스펙트럼법(선형; MIDAS등)에 따라 각 모드에 대한 층항복력을 구할 수 있다. 이 항력을 전체모드($i=1\sim 5$)에 대하여 합성(SSRS)하면 μ 에 대한 층항복력 F_{μ} 가 구해질 수 있으며, 이와 같이 구해진 F_{μ} 로부터 층항복전단력 $V_{\mu}(=\Sigma F_{\mu})$ 를 산정할 수 있다. 이와 같은 방법에 따라, 5가지 지진기록에 대하여 다양한 소성율 μ 와 기본진동주기 T_n 에 따라 비선형 가속도응답스펙트럼으로부터 산정한 층항복전단력 V_{μ} 의 결과는 표 3과 같다. 전체 해석모델은 세 가지의 기본진동주기($T_n=0.3, 0.8, 2.0\text{sec}$)와 각각의 기본진동주기에 대해 세 가지의 소성율($\mu=2, 4, 8$)을 갖는 모델들이다.

4.3. 해석결과 및 분석

다양한 진동주기(T_n)와 소성율(μ)을 갖는 다자유도계 구조물에 대하여 비선형 직접스펙트럼법을 적용하여 산정한 최상층 최대변위와, 제하강성저하지수를 변화시키면서 비선형 시각이력해석을 수행한 결과인 최상층 최대변위를 비교하면 그림 5와 같다. 그림 5의 오차는 식 (8)에 의해 산정된 결과이다.

$$\text{오차(\%)} = \left| \frac{(U_{N,dyn} - U_{N,sta})}{U_{N,dyn}} \right| \times 100, \quad U_{N,dyn} = |U_N(t)|_{\max} \quad (8)$$

여기서, $U_N(t)$ 과 $U_{N,sta}$ 은 각각 비선형 시각이력해석 및 비선형 직접스펙트럼법에 의한 최상층의 변위를 나타낸다. 그림 5의 (a)~(e)는 5가지 지진기록에 대해 비선형 직접스펙트럼법으로 산정한 최상층 최대변위 결과와 제하강성저하지수(식 (7))의 변화에 따라 비선형 시각이력해석법으로 산정된 결과를 나타낸 것이다. 다양한 기본진동주기(T_n)와 소성율(μ)을 갖는 다자유도계 구조물의 비선형 직접스펙트럼 해석결과는 Taft, Hanchinohe, Kobe 지진의 경우 대부분의 해석모델에 대해 40% 이하의 오차를 나타내었으며, El-Centro와 Northridge 지진의 경우 일부 해석모델에 있어 상당한 오차를 나타내었다. 그림 5(f)는 5가지 지진기록에 대한 오차결과를 평균한 것으로서 모든 제하강성저하지수에 대하여 40%이하의 평균오차를 나타낸다. 전반적으로 해석오차는 제하강성저하지수보다는 각 지진특성에 영향이 더 크게 나타나며, 특히 μ 가 4일 때 오차가 더욱 큰 것으로 보여진다.

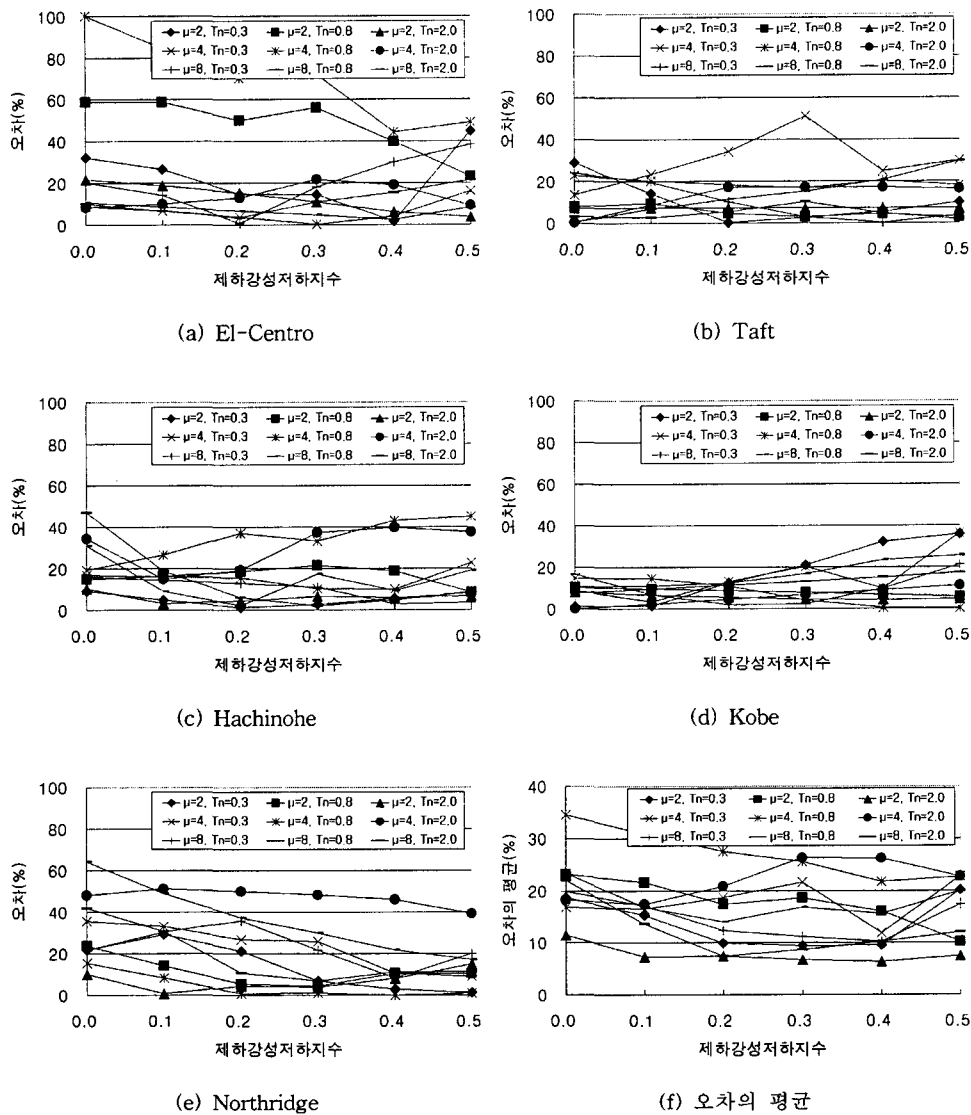


그림 5. 비선형 직접스펙트럼법과 비선형 시각이력해석법 결과

5. 결론 및 추후연구과제

구조물의 능력스펙트럼과 선형 요구스펙트럼에 바탕을 둔 선형 능력스펙트럼법은, 개념적으로는 간단하나 이론적 근거가 충분치 못하고 반복 계산과정이 요구되며, 부정확한 결과가 산출되는 경우가 많다. 이에 따라 해석법의 정확성을 개선하기 위한 방법의 하나로써, 선형 스펙트럼대신 비선형 스펙트럼을 이용하는 방식이 제시되고 있다. 본 연구에서는 다자유도계를 대상으로 하여 비선형 직접스펙트럼법의 적용성과 신뢰성을 다양한 지진과 제하강성저하시수의 관점에서 검토·연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비선형 직접스펙트럼법에서는 능력스펙트럼으로부터 T_n (또는 ω_n)과 $A_y/g (= f_y/w)$ 을 간단히 구하여,

별도의 연산과정 없이 비선형 가속도응답스펙트럼으로부터 비선형 최대응답을 직접 구할 수 있다.

2) 비선형 직접스펙트럼법과 비선형 시각이력해석에 의해 산정된 최상층 변위결과를 비교하면, 제하강성저하지수보다 지진특성에 따라 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

3) Pushover 해석(진동주기와 항복강도 산정)과 선형모드가정만으로 복잡한 비선형 시각이력해석을 대신할 수 있다는 것은 매우 바람직하나, 일부 응답에서는 비선형 시각이력해석의 해석결과와 비교할 때 작지 않은 오차가 발생한다. 따라서, 비선형 직접스펙트럼법이 좀 더 실용적이고 신뢰성 있는 방법으로 정착되기 위해서는 아직 많은 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 한국과학재단 연구비 지원(과제번호:2000-1-31000-007-3)에 의한 결과의 일부이며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Chopra, A. K. (1999). *Capacity-demand-diagram methods for estimating seismic deformation of inelastic structures: sdf systems*. Report No. PEER-1999/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center: Univ. of Berkeley, Calif.
2. Freeman, S. A. (1998). Development and use of capacity spectrum method. *Proceedings of 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle. CD-ROM. Oakland, Calif.: EERI.
3. Paret, T. F., Sasaki, K. K., Eilbeck, D. H., and Freeman, S. A. (1996). Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects. Paper No. 966, *11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco, Mexico.
4. J. J. Bommer and A. S. Elnashai, 'Displacement spectra for seismic design', *J. Earthquake Engng.* 3, 1-32(1999).
5. Applied Technology Council (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Report ATC-40. November.
6. Fajfar, P. (1998). *Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra*. IKIPR Report EE 3/98. September. Ljubljana, Slovenia: Univ. of Ljubljana.
7. Reinhorn, A. M. (1997). *Inelastic analysis techniques in seismic evaluations*. Seismic design methodologies for the next generation of codes, eds. P. Fajfar and H. Krawinkler, 277-87. Rotterdam: Balkema.
8. Vidic, T., Fajfar, P., and Fischinger, M. (1994). Consistent inelastic design spectra: strength and displacement. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 23(5) 507-521.
9. 김용주, 강병두, 전대한, 김재웅, "비선형구조물의 지진응답평가를 위한 직접스펙트럼법", 대한건축학회 추계학술발표논문집, 제21권 제2호(통권 제42집), 2001,10. pp 119-122.
10. Kang-Ning Li, *CANNY 99, 3-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural Analysis Computer Program-Users Manual*, CANNY Structural Analysis, CANADA, 2000, p.215
11. Chopra, A. K. (2001). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall: New Jersey