

면진된 실대형 일경간-이층 철팔조 자유진동 실험

Free Vibration Test for Base Isolated Real Size One Bay-Two Story Steel Frame

김대곤*

Kim, Dae-Kon

이상훈**

Lee, sang-hoon

.....
ABSTRACT

To evaluate the seismic performance of a base isolated building, accurate analytical model should be selected. The analytical results, such as reduced accelerations, member forces and relative displacements of the superstructure of the base isolated building, are only meaningful when the analytical model is close enough to the real structure. Real size one bay-two story steel frame and two kinds of seismic isolators(laminated elastomeric bearing and lead-rubber bearing) are designed, manufactured and constructed in the laboratory. Free vibration tests using fuse bars were conducted to evaluate the change of dynamic characteristics(period and damping) before and after base isolation of the steel frame. The experimental results of free vibration tests were also used as a bench mark for adjusting the selected analytical modeling to real base isolated steel frame.

.....

1. 서론

지진 진동이 기초로부터 건물로 전달되는 것을 최소화하기 위해 여러 가지 면진구조 방식이 연구되어오고 있다.¹⁾ 지진력이 건물에 미치는 충격을 효과적으로 완화시키는 면진방법에는 흔히 적층고무베어링이나 납-고무베어링등을 이용하여 건물의 주기를 대부분의 지진파 가속도의 지배적인 주기 밖으로 충분히 길게 만들어 공진 현상을 피하고 상부구조에 발생하는 가속도도 현저히 경감시켜, 상부구조에 발생하는 부재력과 층간변위등을 작게 하여 건물의 피해를 최소화한다.

본 논문에서는 수직 하중만을 고려하여 일경간-이층 철팔조를 설계하고 이 철팔조의 내진 성능 향상을 위해 사용될 적층고무베어링과 납-고무베어링을 설계, 제작하였다.²⁾ 또한 제작된 면진장치를 대상으로 일정 수직하중 하에서 수평방향 정현파와 반복하중(cyclic sine wave)에 대한 실험을 수행하여 면진장치의 내진 성능(이력특성)을 실험적으로 구하였다. 면진장치의 각 수평방향 실험에서 고려된 변수는 전단변형률 크기효과, 가력속도효과, 수직하중효과, 변위경로효과, 그리고 정현파하중 반복횟수효과 및 시간경로효과 등이며, 수평방향 실험뿐만 아니라 순수 압축, 인장실험을 통해서 면진장치들의 중력방향의 강도, 강성들도 구하였다.³⁾

* 정희원, 서울산업대학교 구조공학과 전임강사

** (주)대우건설기술연구소 주임연구원

이러한 면진장치로 기초분리(base isolation)된 건물의 내진 성능을 해석적으로 구하기 위해서는, 상부구조물의 적절한 점탄성 감쇠계수를 가정하여 면진장치의 이력특성과 상부 철골조가 정확히 표현된 해석모델이 선정되어야한다. 이 해석모델을 이용하여 수치적으로 얻은 기초분리된 건물의 동특성 변화, 즉 상부구조에 발생하는 가속도, 부재력, 상대변위량등의 저감효과가 신빙성을 가지려면, 면진장치를 포함한 상부구조의 해석모델이 최대한 현실 구조물에 가까워야한다.

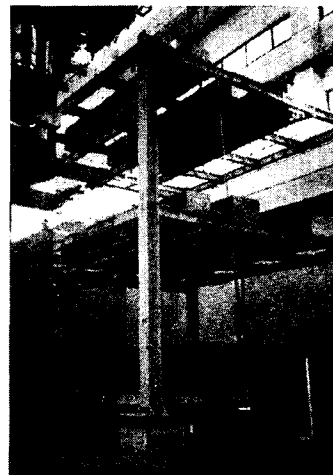
본 논문에서는 해석모델과 똑같은 크기의 실험용 철골조를 대형구조실험실에서 건립하여, 2가지 면진장치(적층고무베어링과 납-고무베어링)로 기초분리 시켰으며, 구조물이 기초분리 되었을 때 주기나 감쇠계수 등 진동특성이 어떻게 변하는지 퓨즈강봉 (fuse bar)을 이용한 자유진동실험 (free vibration test)을 실시하였다. 마지막으로 해석적으로 구한 건물의 3차원 동특성을 자유진동실험 결과와 비교하여 그 차이점을 조정하여 선정된 해석모델이 실제 상황과 가깝게 하였다.

2. 실험체

일경간-이층 철골조를 AISC 허용응력도 설계법에 의하여 중력방향 하중만을 고려하여 설계하였다.²⁾ 이 2층철골조를 실제 제작하였으며, 그림 1은 실험동에 설치된 면진된 철골조의 정면과 측면에서 본 모습을 보여준다. 제작된 실험용 철골조는 3가지 각각 다른 실험을 위하여 사용되었다. 첫 번째와 두 번째 실험은 기초와 건물이 적층고무베어링과 납-고무베어링으로 각각 기초분리 되었을 때의 동특성(주기, 감쇠계수)을 알아보는 실험이고, 세 번째 실험은 기초와 건물이 고정되었을 때의 동특성을 알아보는 실험이다. 도표 1은 이들 세 가지 실험체명을 나타낸다.



(a) 정면에서 본 실험체



(b) 측면에서 본 실험체

그림 1. 기초 분리된 실험체

도표 1. 실험체명

실험체명	특징
건물-기초분리 I	건물이 적층고무베어링에 의해 기초와 분리
건물-기초분리 II	건물이 납-고무베어링에 의해 기초와 분리
건물-기초 고정	건물이 기초에 일체로 연결

3. 자유진동 실험

다자유도계의 자유진동 운동방정식은 변위 벡터 $\{u(t)\}$ 를 식(1)과 같이 모드 형태 벡터(mode shape vector) $\{\phi_n\}$ 과 시간에 대한 함수 $q_n(t)$ 를 이용하여 각 모드별로 확장시키고, 각 모드의 직교성(orthogonality)을 이용하여 식 (2)와 같이 N 개의 단자유도 운동방정식으로 표현할 수 있다.⁴⁾

$$\{u(t)\} = q_n(t)\{\phi_n\} \quad (1)$$

$$\ddot{q}_n(t) + 2\xi_n\omega_n\dot{q}_n(t) + \omega_n^2q_n(t) = 0 \quad (2)$$

식(2)는 단자유도계의 자유진동 운동방정식과 동일하며 아래첨자 n 은 각 모드를 나타낸다. 그러므로, 이 식의 해는 식 (3)과 같다.

$$q_n(t) = e^{-\xi_n\omega_n t} \left[q_n(0) \cos \omega_{nD}t + \frac{\dot{q}_n(0) + \xi_n\omega_n q_n(0)}{\omega_{nD}} \sin \omega_{nD}t \right] \quad (3)$$

$$\omega_{nD} = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2}$$

최종적으로 다자유도계의 자유진동에 의한 변위는 식(3)의 각 모드 변위를 합하면 되므로 식(1)에 의하여 식(4)와 같이 표현된다.

$$\{u(t)\} = \sum_{n=1}^N \{\phi_n\} e^{-\xi_n\omega_n t} \left[\dot{q}_n(0) \cos \omega_{nD}t + \frac{\dot{q}_n(0) + \xi_n\omega_n q_n(0)}{\omega_{nD}} \sin \omega_{nD}t \right] \quad (4)$$

다자유도계의 각 모드의 감쇠율 ξ_n 은 이론적으로 각 모드의 형태 벡터 $\{\phi_n\}$ 이 발생되게끔 식(4)의 초기변위 $q_n(0)$ 나, 초기속도 $\dot{q}_n(0)$ 을 부여하여 계를 자유진동 시켜 구할 수 있다.

각 2층 철골조 실험체들의 주기와 점탄성 계수를 실험적으로 구하기 위해서, 구조물을 잡아당겼다가(초기변위 부여) 순간적으로 힘을 제거(초기속도 = 0)하여 구조물이 평형상태로부터 자유진동을 일으키는 quick release test (일명 snap back test) 기법을 사용하여 자유진동실험을 실시하였다. 실험체를 자유진동 시키기 위한 set-up은 그림 2와 같다.

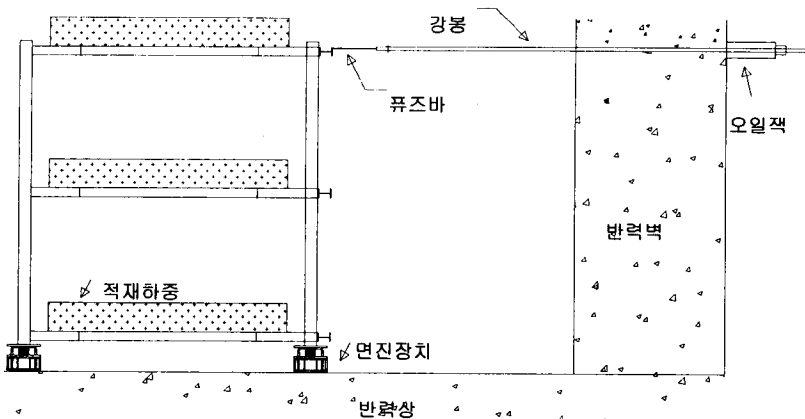


그림 2. 자유진동실험 set-up

도표 2. 자유진동 실험

실험명	실험내용
FEB2C	건물-기초분리 I 실험체의 최상층 중앙부를 당겨서 초기변위 유발
FEB2E	건물-기초분리 I 실험체의 최상층 단부를 당겨서 초기변위 유발
FEB1C	건물-기초분리 I 실험체의 중간층 중앙부를 당겨서 초기변위 유발
FLR2C	건물-기초분리 II 실험체의 최상층 중앙부를 당겨서 초기변위 유발
FLR2E	건물-기초분리 II 실험체의 최상층 단부를 당겨서 초기변위 유발
FLR1C	건물-기초분리 II 실험체의 중간층 중앙부를 당겨서 초기변위 유발
FFX2C	건물-기초고정 실험체의 최상층 중앙부를 당겨서 초기변위 유발
FFX2E	건물-기초고정 실험체의 최상층 단부를 당겨서 초기변위 유발
FFX1C	건물-기초고정 실험체의 중간층 중앙부를 당겨서 초기변위 유발

실험체를 D22 이형철근(fuse bar)과 Dywidag™ 강봉으로 반력벽에 연결하였다. 퓨즈바를 오일 잭으로 잡아당겨졌을 때(본 논문의 모든 실험에서 잡아당기는 방향은, 4개의 기둥 H250×250×9×14의 약축 방향), 각 실험체에 약 5~20 mm의 탄성 변위가 발생되며 이 퓨즈바가 끊어지게끔 퓨즈바의 두께를 4~7 mm로 밀링 하였다. 면진장치를 설계할 때 고려되었던 seismic weight는 고정하중 전체와 적재하중의 반으로부터 약 69 ton 이었지만, 실험실 여건상 그림 2에서 보여주는 적재하중용 무게는 각 층에 각각 약 11.8 ton씩만 적재하였고, 실험체의 자중은 약 12 ton이기 때문에, 본 실험을 위한 총 seismic weight는 약 44.4 ton이며 고정하중의 약 80%이다. 자유진동 실험은 도표 2와 같이 총 9번 시행하였다. 실험동안 각 층에서의 변위, 그리고 1층 강축과 약축 방향의 가속도를 각각 레이저 변위계와 가속도계로 측정하여 응답주파수가 2.5 kHz인 동적 data logger로 받아 들였다.

그림 3은 실험체의 최상층 중앙부를 당겨서 초기 변위를 발생시킨 경우의 건물-기초분리I, 건물-기초분리II, 그리고 건물-기초고정 실험체의 자유진동 실험결과를 각각 보여준다. 다자유도계의 각 모드의 감쇠율 ξ_n 은 식 (4)와 같이 quick release 자유진동 실험으로 구할 수 있지만 이 실험법의 어려운 점은 실험체의 한 부분만을 잡아 당겼다가 놓기 때문에 고차 모드의 영향이 소멸된 후 오직 한 모드로 실험체가 자유진동을 한다는 것이다. 즉, 기본 모드(1차 모드)에 대한 감쇠율 ξ_1 만을 얻을 수 있다는 것이다. 자유 진동 실험의 변위 응답 시간 이력 data를 통하여 실험체의 기본 모드에 대한 감쇠비 ξ_1 이 건물-기초분리I, 건물-기초분리II 그리고 건물-기초고정의 경우에 대해 각각 2.374%, 1.422%, 0.155%임을 알았다. 감쇠비는 식 (5)의 대수감소법(logarithmic decrement method)으로 구하였다.⁴⁾

$$\xi_1 = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}} \quad (5)$$

여기서, i, j 는 각 cycle을 나타낸다. 식 (4)의 자유진동 진폭 envelop은 식 (6)으로 구할 수 있으며, 3가지 실험체에 대하여 실험적으로 구한 ξ_1 값들을 사용한 2층에서의 자유진동 진폭 envelop를 그림 3(a), 3(c), 3(e)에 각각 나타내었다.

$$\{u(t)\}_{envelop} = \{\phi_1\} \rho e^{-\xi_1 \omega_1 t} \quad (6)$$

$$\rho = \sqrt{[q_1(0)]^2 + \left[\frac{\dot{q}_1(0) + \xi_1 \omega_1 q_1(0)}{\omega_{1D}} \right]^2}$$

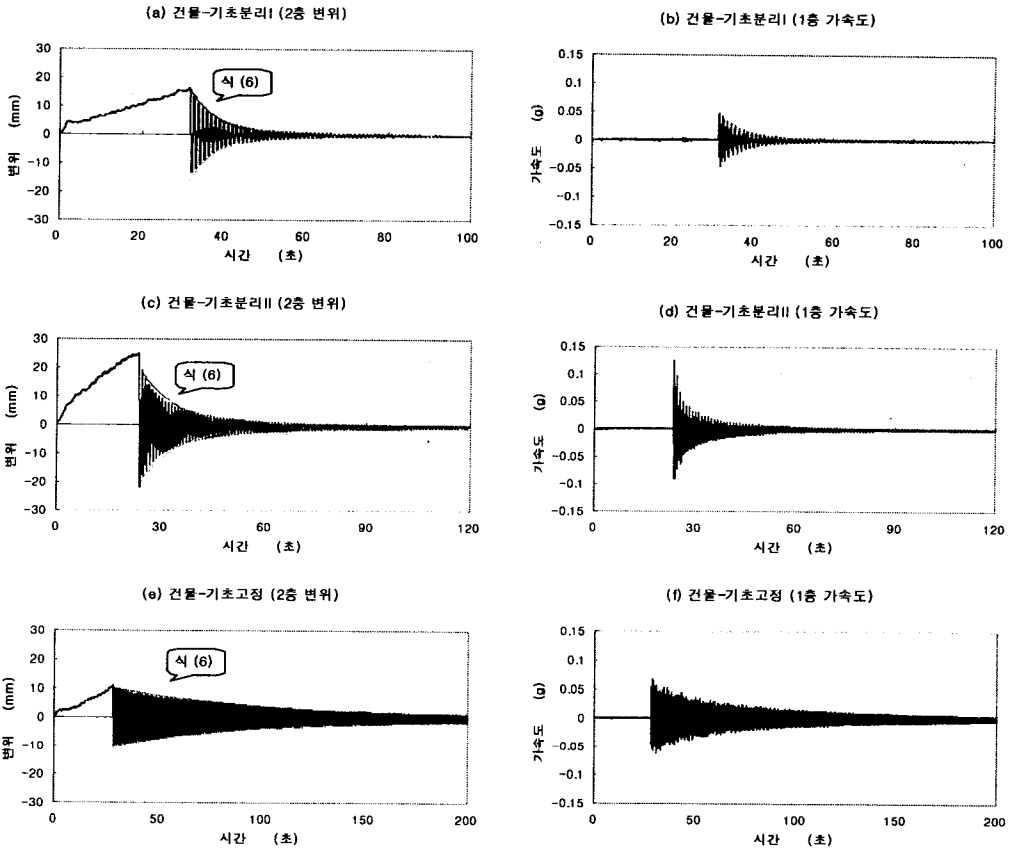


그림 3. 자유진동 실험결과

이와 같은 9번의 자유진동 실험을 실시한 후, 각 실험체들의 주기를 구하기 위하여 변위와 가속도 시간이력들의 spectral 해석을 실시하였으며, 그 해석 결과를 도표 3에 정리하였다. 또한, 각 실험체의 최상층 단부를 당겨서 초기변위를 유발시킨 자유진동 실험의 약축 방향 가속도계로부터 기록된 가속도 시간이력 데이터의 spectral 해석 결과를 그림 4에서 보여준다.

4. 자유진동 해석

지금까지 자유진동 실험법을 이용하여 구한 주파수들을 해석적으로 재현하고, 각 주파수들의 특성을 파악하기 위해서 상용 3차원-탄성 해석 프로그램인 SAP90을 채택하여 도표 1의 3가지 실험체에 대한 주파수 해석(modal analysis)을 실시하였다.

4.1 건물-기초고정

우선 철골조 자체의 해석적 모델링을 최대한 정확히 하기 위하여, 건물-기초 고정 실험체의 SAP90 해석으로부터 $f_1=1.65 \text{ Hz}$ 를 얻었다. 이 값은 도표 3에서 보여주는 자유진동 실험결과를 주파수 해석하여 구한 값 $f_1=1.4 \text{ Hz}$ 보다 0.15 Hz 높다. 즉, SAP90 해석모델이 실제 상황보다 약간 뻣뻣하게(stiff) 모델링 되었다. SAP90의 모델링은 보와 기둥의 공장 용접 접합 상황, 보와 보의 현장 볼트 접합, 그리고 기둥과 기초의 현장 볼트 접합들이 완전 강접이라고 가정했지만, 실험을

도표 3. spectral 해석결과

실험체명 ¹	실험명 ²	측정치 ³	위치 ⁴	f ₁ ⁵	f ₂	f ₃	실험체명	실험명	측정치	위치	f ₁	f ₂	f ₃		
건물-기초분리 I	FEB2C	변위	B	0.99			건물-기초고경	FFX2C	변위	B	1.4				
			1	0.99						1	1.4				
			2	0.99						2	1.4				
		가속도	X	0.99	2.06					가속도	X	1.4		4.75	
			Y		2.12						Y				
	FEB2E	변위	B	1.0	2.11				FFX2E	변위	B	1.4	3.22		
			1	1.0	2.12						1	1.4	3.22	4.75	
			2	1.0	2.13						2	1.4	3.22		
		가속도	X	1.0	2.12	4.92				가속도	X	1.4	3.22	4.75	
			Y		2.13						Y		3.22		
	FEB1C	변위	B	1.0					FFX1C	변위	B	1.4			
			1	1.0							1	1.4		4.75	
			2	1.0							2	1.4			
가속도		X	1.0		4.96		가속도	X		1.4	3.22	4.75			
		Y						Y		1.4	3.22				
건물-기초분리 II	FLR2C	변위	B	1.07			1. 실험체명 설명은 도표1 참조 2. 실험명 설명은 도표2 참조 3. 변위: 변위-시간 data로부터 spectral 해석, 가속도: 가속도-시간 data로부터 spectral 해석 4. B: 바닥층 변위계, 1: 1층 변위계, 2: 2층 변위계, X: 기둥약축(fuse bar 설치방향)가속도계 Y: 기둥강축(fuse bar 설치방향과 직교방향)가속도계 5. f _i : i th frequency (Hz)	FLR2E	변위	B	1.08	2.46			
			1	1.08	2.46						가속도	X	1.08	2.46	3.83
			2	1.08	2.46							Y		2.46	
		가속도	X	1.08	2.46	3.83									
			Y		2.46										
	FLR1C	변위	B	1.07					FLR1E	변위	B	1.07			
			1	1.07							1	1.07			
			2	1.07							2	1.07			
		가속도	X	1.07	2.47	3.83				가속도	X	1.07	2.47	3.83	
			Y	1.07							Y	1.07			

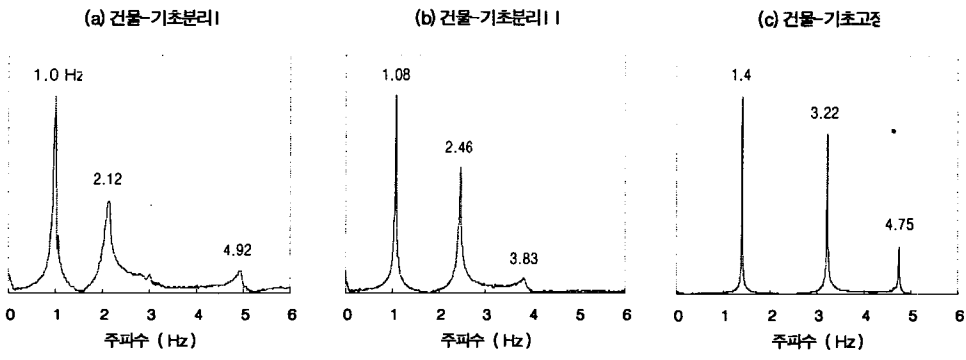


그림 4. spectral 해석결과

통하여 알 수 있듯이 볼트 접합된 부분이 완전 강접이 아닐 가능성이 있다. 이 효과를 고려하기 위하여 SAP90 input data의 모든 보의 휨강성을 약 40% 감하여 $f_1=1.4$ Hz의 실험값과 일치시켰다. 수정된 해석 모델로부터의 SAP90 주파수 해석 결과, 1, 2차 모드는 각각 기둥 약축과 강축 방향의 sidesway 모드이고, 3차는 비틀림 모드, 4차에서 6차는 중력 방향 모드들이며, 그리고 7차는 1층과 2층의 변위 방향이 각각 반대인 sidesway 모드이다. 도표 3의 자유진동 실험결과(또는 그림 4(c))와 비교해 보면 실험에서 얻은 f_1 , f_2 그리고 f_3 는 각각 기둥 약축 방향 sidesway 모드, 중력 방향 모드 그리고 1층과 2층의 변위 방향이 각각 반대인 sidesway 모드임을 알았다.

4.2 건물-기초분리 I

상부구조 자체의 해석모델은 4.1 절에서 채택되었다. 이제는 이 해석모델에 면진장치의 해석모델을 포함시켜야 한다. 면진에 사용된 적층고무베어링의 수직강성은 실험을 통하여 75838 kg/cm를 얻었고³⁾ 적층고무베어링이 횡방향 하중에 대하여 순수 전단변형만 발생하는 경우, 즉 회전강성이 무한히 강한 경우, 도표 3의 자유진동 실험결과의 $f_1=1.0$ Hz가 되기 위해서는 SAP90 해석모델에서 면진장치의 전단강성은 약 695 kg/cm 이어야 한다. 이 값은 적층고무베어링의 전단변형률 γ 가 약 25% 일 때의 값이다.³⁾ SAP90 주파수 해석결과 건물-기초고정의 경우와 마찬가지로 1, 2차 모드는 각각 기둥 약축과 강축 방향의 sidesway 모드이고, 3차는 비틀림 모드, 4차는 면진장치와 1층의 약축 횡변위 방향이 같고 2층의 약축 횡변위 방향이 그 반대인 sidesway 모드이고, 그리고 10차는 면진장치와 2층의 횡변위 방향이 같고 1층의 횡변위 방향이 그 반대인 sidesway 모드이다. 도표 3의 자유진동 실험결과(또는 그림4(a))와 비교해 보면, 실험에서 얻은 f_1 은 기둥 약축 방향 sidesway 모드, f_2 는 비틀림 모드와 면진장치와 1층의 약축 횡변위 방향이 같고 2층의 약축 횡변위 방향이 그 반대인 sidesway 모드가 섞인 모드, 그리고 f_3 는 면진장치와 2층의 횡변위 방향이 같고 1층의 횡변위 방향이 반대인 sidesway 모드이다.

4.3 건물-기초분리 II

건물-기초분리 II 실험의 면진에 사용된 납-고무베어링의 수직, 회전강성은 건물-기초분리 I 실험체의 경우와 동일한 값을 사용하였고, 도표 3의 자유진동 실험결과의 $f_1=1.08$ Hz가 되기 위해서는 전단강성은 약 960 kg/cm 이어야 한다. (납-고무베어링의 이력특성은 bilinear의 형상인데 SAP90 input data에서 사용한 전단강성은 유효 전단강성 값이다.³⁾) 도표 3의 자유진동실험 결과(또는 그림4(b))와 비교해 보면, 실험에서 얻은 f_1 , f_2 는 건물-기초분리II 실험체의 경우와 동일한 경우이고, f_3 는 면진장치와 1층의 강축 횡변위 방향이 같고 2층의 강축 횡변위 방향이 그 반대인 sidesway 모드이다.

5. 면진효과

실험적으로 구하고 해석적으로 분석한 각 실험체의 기본고유주기 T_1 (건물-기초고정= 0.71초, 건물-기초분리I= 1.0초, 건물-기초분리 II= 0.93초)을 그림 5에서 보는바와 같이, El Centro 지진파 지반가속도의 50%의 지진파(PGA=0.175g)에 대한 가속도 반응 스펙트럼에 표시하였다. 이 지진파는 본 논문의 면진장치를 설계할 때 고려했던 지진파이다.²⁾ 또한 면진장치를 설계할 때 고려되었던 seismic weight는 고정하중 전체와 적재하중의 반으로부터 약 69 ton 이었다. 실험실 여건상 seismic weight는 약 44.4ton만 사용하여서 건물-기초분리I인 경우 $T_1 = 1.0$ 초, 건물-기초분리 II인 경우 $T_1 = 0.93$ 초이었지만, 실험실의 여건이 허락하여 69 ton의 seismic weight를 사용할 수 있었다면, 건물-기초분리I인 경우 $T_1 = 1.3$ 초, 건물-기초분리 II인 경우 $T_1 = 1.2$ 초이며 이들의 경우도 그림 5에 표시하였다. 그림 5(a)에서 관찰할 수 있듯이 면진장치를 사용한 후 건물의 주

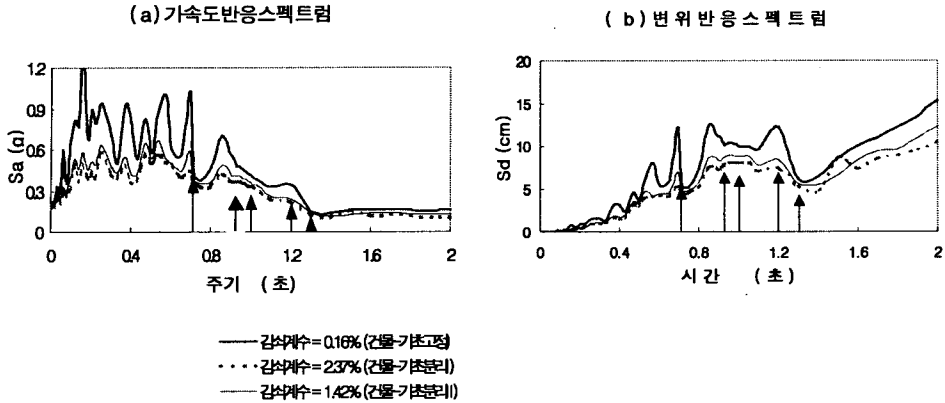


그림 5. 반응 스펙트럼

기가 길어져서, 건물의 가속도가, 즉 지반으로부터 건물로 전달되는 전단력이 감소함을 알 수 있다. 기본적으로 건물이 면진장치에 의해 지반과 분리되어 있으면, 건물 가속도와 건물 층간변위를 동시에 줄일 수 있다. 그러나 면진장치에서의 수평변위는 비교적 크다. 그림 5(b)는 건물의 주기가 증가할수록 건물의 변위가 (주로 면진층에서) 증가함을 관찰할 수 있다.

6. 결론

면진장치로 기초 분리되기 전과 후의 동특성 변화를 구하기 위해서 퓨즈바를 이용한 자유진동 실험을 이용할 수 있다. 실험으로부터 얻은 변위와 가속도 signal을 spectral 분석을 통해서 각 주파수들을 구할 수 있으며, 감쇠비는 대수감소법으로 구할 수 있다. 또한 실험결과를 바탕으로 비교적 현실적인 해석모델을 선택할 수 있다.

면진장치로 건물이 기초 분리되면 건물의 주기를 대부분의 지진파 가속도의 지배적인 주기범위 밖으로 길게 만들 수 있어, 공진 현상도 피할 수 있고 건물에 전달되는 지진가속도도 경감시켜 상부구조물의 부재력들이 작아지므로 지진피해를 줄일 수 있다. 면진층에서의 과도한 횡변위는 이 변위를 수용할 충분한 공간만 면진층 주변에 시공되면 문제가 되지 않는다.

감사의 글

본 연구는 (주)대우건설기술연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 실험 전과정동안 많은 도움을 준 연구소의 김대영 선임연구원, 김지영 주임연구원, 그리고 오태수 연구원께 감사드립니다.

참고문헌

1. I. G. Buckle, "Development and Application of Base Isolation and Passive Energy Dissipation: a World Overview," ATC-17, California, 1986.
2. 김대근, 이상훈, 안재현, 박철림, "내진 설계되지 않은 철골조에 사용될 면진 장치," 한국강구조학회지, 제10권 2호, 1998년 6월, pp 83-94.
3. 김대근, 이상훈, 김대영, 박철림, "적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진 성능에 관한 실험적 평가," 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호 (통권 제8호), 1998년 12월, pp 53-62.
4. Chopra, A.K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995, 729pp.