

면진장치 들림 효과를 고려한 면진된 골조의 구조 거동 평가

Evaluation of Structural Response of Base Isolated Frame Considering Uplift Effect of Isolators

김 대 곤
Kim, Dae-Kon

요 약

적층고무 면진장치의 전단강성 뿐만 아니라 인장강성 및 압축강성을 실험적으로 구한 후 비선형 해석 프로그램을 이용하여 면진장치를 모델링 하였다. 수평력을 받는 면진된 골조의 면진장치에 전도에 의한 인장응력이 발생되게 하기 위하여 큰 초기변위를 부여한 자유진동 실험을 해석적으로 수행하였다. 적층고무 면진장치는 인장에 약하기 때문에 면진장치에서의 들림 현상을 해석적으로 구하기 위하여 면진장치의 수직방향 강성들이 해석 모델에 적절히 반영되어야 한다.

Abstract

After obtaining tensile and compressive stiffness as well as shear stiffness of elastomeric seismic isolator experimentally, those stiffness were modeled analytically using nonlinear computer program. To induce tensile stress due to overturning in the seismic isolators of an isolated frame for horizontal force, free vibration simulations generated by large initial displacement were conducted. Since elastomeric seismic isolator is weak for tensile stress, the axial stiffness of isolators shall be included properly in the analytical model to evaluate the uplift phenomenon of elastomeric seismic isolator.

키워드 : 적층고무 면진장치, 들림 효과, 자유진동, 비선형 해석

Keywords: Elastomeric seismic isolator, Uplift effect, Free vibration, Nonlinear analysis

1. 서론

외국의 지진피해사례들을 접한 후 건물에 대한 지진의 피해를 경감하기 위해서 우리나라에서도 내진설계법이 마련되어 1988년부터 적용되어 오고 있다. 특히 1995년 일본의 고베지진의 엄청난 피해를 접한 이후로 내진설계에 대한 관심이 고조되기 시작하였다.¹⁾ 한편 지진하중으로부터 건물을 보호하기 위한 또 다른 접근 방법으로서 면진설계가 있으며 건물이 면진되면 내진설계된 경우보

다 면진설계된 상부구조물의 수평력 요구(demand)가 작아지고 건물 층가속도와 건물 층간 상대변위 등을 동시에 줄일 수 있기 때문에 상부구조물 횡력 저항 시스템의 선택범위가 넓어진다.²⁾

세계적으로 일본, 미국, 중국, 대만, 뉴질랜드, 그리고 이탈리아는 면진설계 기준을 가지고 있으며 20세기말부터 현재까지 활발하게 건물에 적용해 오고 있다. 특히 1994년 미국 노스리지, 1995년 일본 고베, 1999년 대만 치치 지진 등에서 면진된 건물이 전혀 피해를 입지 않고 즉각적으로 건물고유의 기능을 수행하는 우수성이 입증되기도 하였다. 일본에서는 2005년 현재 약 3,000개의 건물이 면진되었으며 면진 아파트와 면진 사무소가 인기

정희원 · 서울산업대학교 건설공학부 부교수, 공학박사
Tel: 02-970-6572 Fax: 02-948-0043
E-mail : dkkim@snut.ac.kr

를 끌고 있다.³⁾ 국내에서도 최근 들어 거주 안전성을 높이기 위하여 면진해석에 대한 연구가 일부 이루어지고 있고 고층아파트, 주상복합건물, 사무소건물, 주민 복지센터 등 몇몇 건물에 시공되어지고 있다.⁴⁾ 그러나 국내에는 면진설계기준이 없어서 외국설계기준을 적용하여 외국엔지니어링 회사에서 설계되어 국내에서 시공하기 전에 국내전문가에 의해 설계가 검토되어진 후 허가 관청의 허가를 취득한 후 시공되어지고 있는 실정이다.

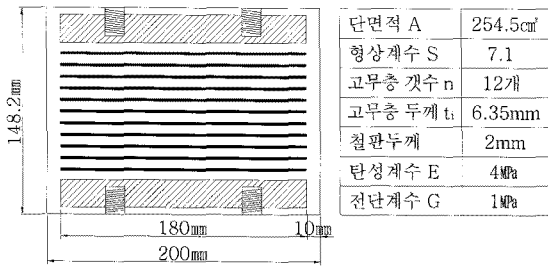
면진시스템이 효과적이기 위해서 면진설계는 중·저층 건물에 주로 적용된다. 그러나 일본에서는 최고 49층의 고층건물 면진까지 하고 있으며 우리나라에서도 15층 아파트에 면진설계를 도입·시공한 사례가 있으며 현재 36층 주상복합건물에 면진설계가 도입 중이다.⁵⁾ 고층건물에 면진설계를 도입하는 경우 중·저층에 적용된 경우보다 효과가 크지는 않지만 최상층 응답변위 감소, 층간 변형률 감소, 면진층 상부 구조물의 응답가속도, 층전단력, 그리고 전도모멘트의 감소 효과가 있는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 그러나 고층건물 면진설계의 경우 건물의 기초가 고정된 건물들에서 고유주기는 이미 상대적으로 길기 때문에 면진장치를 이용하여 주기를 더욱 길게 만들면 면진장치에서의 수평변위는 매우 크게 발생하며 동시에 큰 연직하중과 횡하중에 의한 전도모멘트가 커져 면진장치에 인장력 또는 압축력의 부가축력이 발생할 가능성이 증가하는데 이는 중요한 기술적 문제로 거론된다. 따라서 평면의 구석에 위치한 면진장치에 들림 (uplift)이 생기는 것은 바람직하지 못하므로 상부구조의 구조적 변경 즉, 전단벽이나 가새를 적절히 배치하여 건물 평면의 구석에 위치한 면진장치에 압축력이 집중되도록 한다. 면진계면에서의 전체 구조물의 전도(overturning)에 의한 국부적인 들림 때문에 발생하는 기울어짐이 면진장치 또는 다른 구조요소에 과도한 응력 또는 안정성 결여의 원인이 되지 않는 경우 이외에는 구조물의 개별 구성요소들의 국부적인 들림 현상이 허용되어서는 안 된다. 면진장치에 인장력이 유발되는 경우 실험에 의해 검증된 변형 특성을 반영하여 면진시스템의 수학적 모델이 만들어져야 한다. 즉, 각 면진장치에 발생하는 전도에 의한 들어 올려짐이 상세하게 반영될 수 있도록 면진 장치의

모델이 만들어져야 한다.⁶⁾

과거로부터 건물이나 교량의 면진설계에 많이 사용되어져온 적층고무 면진장치 (Laminated Elastomeric Seismic Isolator)로 면진된 구조물의 해석시 면진장치의 수평 전단 강성은 비교적 자세히 모델링 하였으나 수직 방향강성은 수평방향 강성에 비하여 무한히 크다고 가정하였다.⁴⁾⁵⁾⁷⁾⁸⁾ 본 논문에서는 적층고무 면진장치의 수평 전단거동 뿐만 아니라 수직 인장·압축거동을 실험적으로 알아보고 지진과 같은 큰 수평하중동안 면진장치에 인장응력이 발생하는 경우 즉, 면진장치의 들림, 뽐힘, 양압력, 또는 부반력 발생 등으로 다양하게 표현되는 현상이 발생하는 경우, 면진된 건물의 해석적 연구를 위하여 면진장치의 전단거동뿐만 아니라 인장거동과 압축거동도 상세히 모델링하였다. 큰 수평하중을 받는 면진된 골조의 면진장치에 전도에 의한 인장응력이 발생되게 하기 위하여 초기변위를 의도적으로 크게 부여한 자유진동 실험을 해석적으로 수행하였으며, 면진장치에서의 들림 현상을 해석적으로 구하기 위하여 면진장치의 수직방향 강성들의 해석 모델을 몇 가지로 달리하는 경계해석 (boundary analysis)을 수행하였다.

2. 적층 고무 면진장치의 압축·인장 특성

적절한 면진장치의 선택은 면진설계 기준에서 고려되어야만 하는 중요사항이며, FEMA-274에서 건물의 면진에 사용할 수 있는 몇 가지 유형의 면진장치를 제시하고 있다. 그 중에서 가장 많이 쓰이는 것 중의 하나가 적층고무 면진 장치이다.⁹⁾ 그림 1은 내진 설계되지 않은 1경간 2층 철골조의 면진을 위하여 설계되고 제조된 적층고무 면진장치를 보여준다.¹⁰⁾ 이 면진장치는 철판 들이 고무에 접착되어 있어서 무거운 압축하중에서 면진장치 측면이 옆으로 볼거져 나오는 것을 최소화 해준다. 그러므로 면진장치의 압축강성은 크다. 반면에 면진장치의 인장강성은 압축강성보다 현저히 작은 것으로 알려져 있으며 면진장치의 압축강성 k_c 는 식 (1)로부터 구할 수 있다.⁹⁾



〈그림 1〉 적층고무 면진장치

$$k_c = \sum_{i=1}^n \frac{E_c A}{t_i} = \frac{E_c A}{T} \quad (1)$$

여기서, t_i 는 고무 1층의 두께, n 은 총 고무층의 갯수, A 는 수직하중이 가해진 단면적, T 는 총 고무층의 두께, 그리고 E_c 는 압축상태의 겉보기 탄성률 (apparent Young's Modulus) 인데 면진장치의 형상 및 고무의 경도 등과 관계가 있으며 체적 탄성계수를 고려한 BE 1/76 식, 체적 탄성계수를 고려치 않은 BE 1/76 식, 그리고 Gent와 Lindley의 식은 각각 식 (2) 식 (3), 그리고 식 (4) 과 같다.¹¹⁾¹²⁾

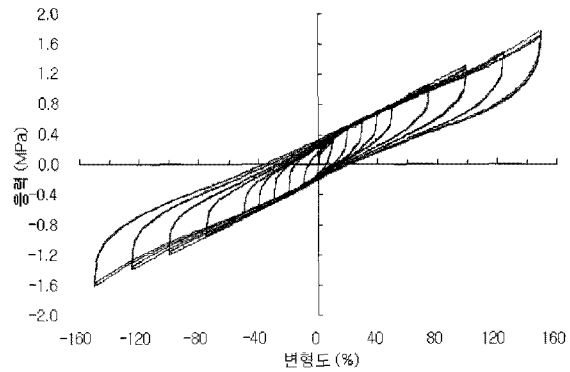
$$E_c = \left[\frac{1}{E(1+2\kappa S^2)} + \frac{1}{K} \right]^{-1} \quad (2)$$

$$E_c = E(1+2\kappa S^2) \quad (3)$$

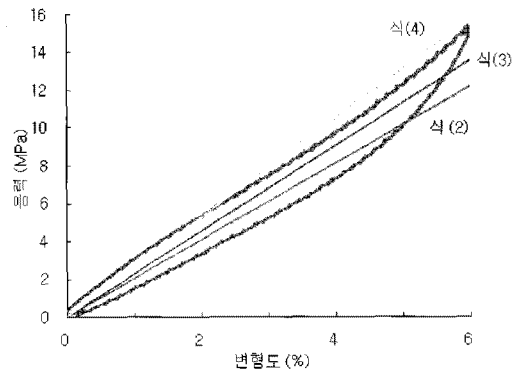
$$E_c = \frac{6GS^2K}{6GS^2+K} \quad (4)$$

여기서, S 는 형상계수, E 는 탄성계수, G 는 전단계수, K 는 체적탄성계수 (약 2000 MPa), 그리고 κ 는 고무의 경도에 따른 보정계수이며 0.55 (경도가 약 60인 경우) 를 사용하였다. 고무가 등방성 재료일 때 프와송 비 $\nu=0.5$ 이며 $E=3G$ 이지만 실험결과 본 실험에 사용된 고무가 감쇠능력이 높은 고감쇠 고무의 경향을 보이므로 $E=4G$ 을 채택하였다.¹³⁾ 전단계수 G 는 그림 2에서 보여주는 적층고무 면진장치의 전단 거동 실험결과로부터 전단변형도 $r=27\%$ 와 $r=58\%$ 사이를 연결한 값으로 구하여¹³⁾ $G=1.0$ MPa를 얻었다.

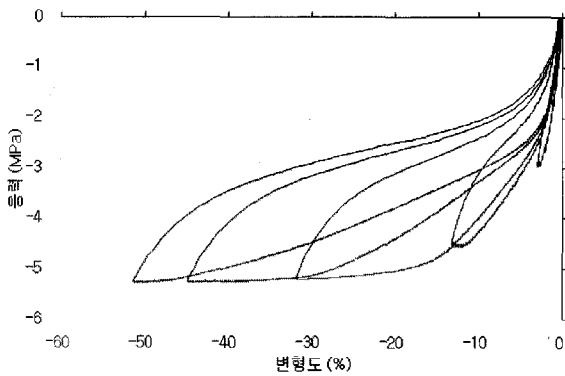
그림 3은 면진장치에 압축력을 가했다가 제거하는 실험으로부터 구한 면진장치의 압축거동을 보여주며 식 (1) 부터 식 (4)을 적용하여 얻은 압축응력-변형도 관계도 함께 보여준다. 본 논문에서는 이론식들 중 식 (3)에 의하여 구한 압축강성을 해석적 연구를 위하여 사용하였다. 그림 4는 면진장치에 인장력을 가했다가 제거하는 사이클릭 가력실험으로부터 구한 면진장치의 인장 거동을 보여주며 그림 5는 그림 3과 그림 4로부터 얻은 압축과 인장거동의 가력방향 포락선을 보여준다. 인장강성은 첫 번째 사이클 인장응력 1.0 MPa (인장변형률 0.5% 일 때) 정도에서는 거의 탄성적인 거동을 나타내지만 이후부터는 강성이 감소함을 보여주며 2번째 사이클부터는 압축 축의 거동과는 대조적으로 3선형 (Tri-linear) 의 경향을 보여준다.



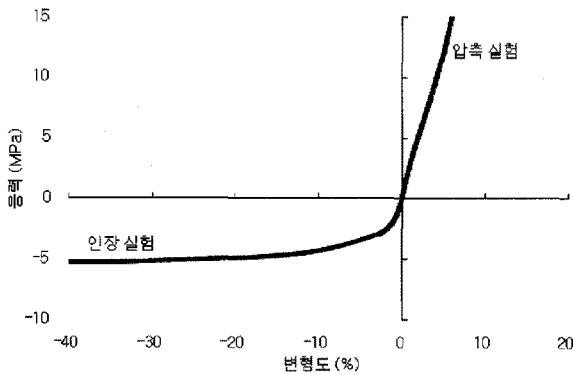
〈그림 2〉 면진장치 전단 거동



〈그림 3〉 면진장치 압축 거동



〈그림 4〉 면진장치 인장 거동

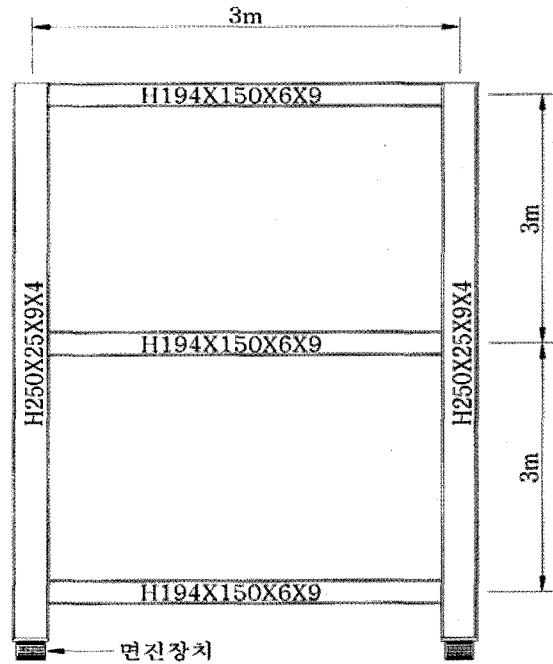


〈그림 5〉 면진장치 인장-압축 거동

3. 면진 해석 및 분석

면진된 골조의 면진장치 들림 효과를 고려한 해석적 연구를 위하여 그림 6과 같은 1경간 2층 철골조를 채택하였으며 면진을 위하여 그림 1의 적층고무 면진장치가 사용되었다. 채택된 골조는 실험에 사용된 적층고무 면진장치로 면진되기에 적당한 규모이다.

모드 해석을 통하여 면진 전 골조의 주기는 0.63초 이었으며 면진 후 주기는 1.61초로 길어졌다. 본 논문의 목적은 면진장치의 들림 효과를 모델링하는 방법을 찾는 것이기 때문에 수평하중을 받는 면진된 골조의 면진장치에 전도에 의한 인장응력이 발생되게 하기 위하여 초기 변위를 의도적으로 크게 부여한 자유진동 실험을 비탄성 컴퓨터 프로그램인 DRAIN-2DX을 사용하여 해석적으로 수행하였으며, 해석시 모든 비선형 거동은 면진장치에서만 생기는 것으로 가정하였다.

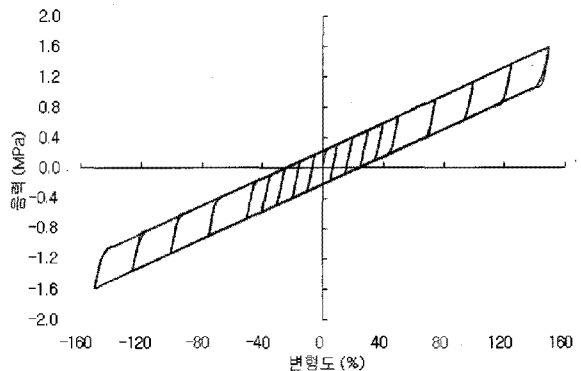


〈그림 6〉 해석에 사용된 면진된 골조

3.1 면진장치 모델링

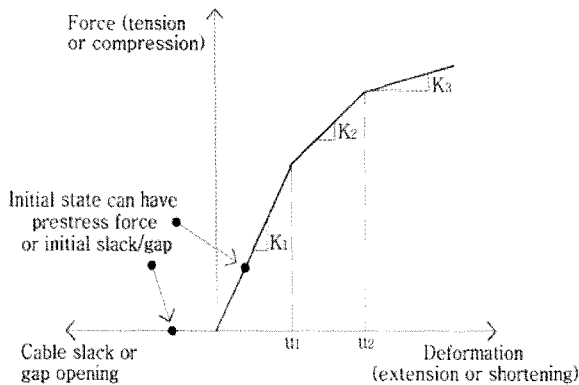
면진된 건물의 내진성능은 면진장치의 특성치 변화에 민감하므로 반드시 성능실험을 통하여 면진장치의 특성치를 구하여 해석에 반영해야 한다. 면진장치의 전단 거동을 위하여 Truss 요소를 사용하여 2선형으로 모델링하였다. 그림 7은 해석적 모델로부터 얻은 면진장치의 전단거동을 보여준다. 이때 사용한 변위제어는 그림 2에서 보여주는 것처럼 면진장치의 전단거동을 실험적으로 구할 때 사용한 변위제어와 동일한 것을 사용하였다.

면진장치의 인장거동은 그림 4처럼 매우 비선형적이기 때문에 모델링하기 어렵고 면진장치 성능의 변화를



〈그림 7〉 면진장치 전단거동 해석 모델

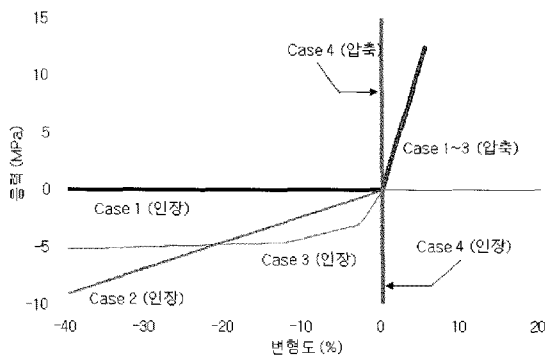
고려하여 최대성능과 최소성능에 대한 해석인 경계해석이 필요하다. 본 연구에서 면진장치의 수직방향 거동을 그림 8에서 보여주는 것처럼 Link 요소를 사용하였다. 압축 거동은 건물의 중력에 의한 압축응력 (initial compression)을 포함한 압축에만 작용하는 Link 요소를 사용하였고 인장거동은 건물의 중력에 의한 압축변형도 (cable slack)가 고려된 인장에만 작용하는 Link 요소를 사용하였으며 이들 압축과 인장 Link 요소들을 병렬로 연결하여 면진장치의 수직방향 거동을 모델링 하였다. 본 논문에서 채택한 해석 모델은 표 1과 같으며, 그림 9는 전산해석을 위한 각 해석모델의 모델링 결과를



〈그림 8〉 LINK 요소

〈표 1〉 면진장치 인장 및 압축방향 해석 모델

모델명	특징	
	압축강성	인장강성
CASE 1	식(3)에 근거	0
CASE 2	식(3)에 근거	압축강성의 10%
CASE 3	식(3)에 근거	실험에 근거
CASE 4	∞	∞



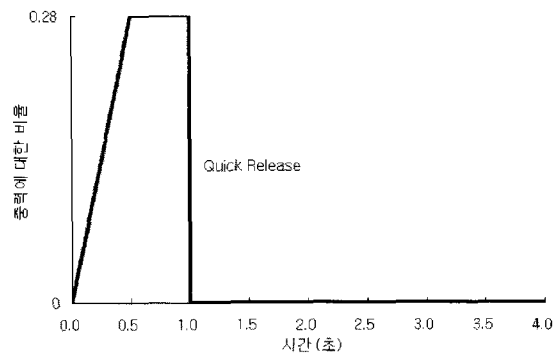
〈그림 9〉 면진장치 인장 및 압축 거동 해석모델

보여준다.

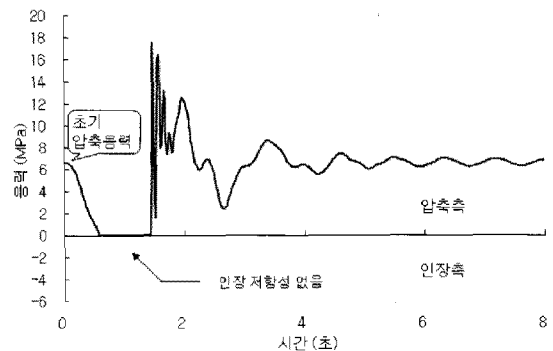
CASE 1은 면진장치의 인장 강성을 완전히 무시한 (들림에 대한 저항성 없음) 모델로서 최소성능을 나타낸다. CASE 2는 면진장치의 인장강성을 압축강성 (식 (3)에 근거)의 10%로 채택한 선형모델이다. CASE 3은 면진장치의 인장강성을 그림 5로부터 구한 3선형 (Tri-linear) 모델이다. 끝으로 CASE 4는 면진장치의 들림 현상을 무시하고 면진장치의 압축강성 뿐만 아니라 인장강성도 전단강성에 비하여 무한히 크다고 가정한 모델로서 최대성능을 나타낸다.

3.2 자유진동 해석 및 분석

그림 10은 면진된 골조의 면진장치에 전도에 의한 인장응력이 발생되게 하기 위하여 그림 6에서 보여주는 골조의 지붕 층에 오른쪽으로 가한 수평하중의 시간이력을 보여준다. 최대 수평하중의 크기는 건물의 총 무게 334.52 kN의 28%인 93.7 kN 이며 시간이 1초에 도달했을 때 갑자기 수평하중을 제거 (Quick Release) 하여



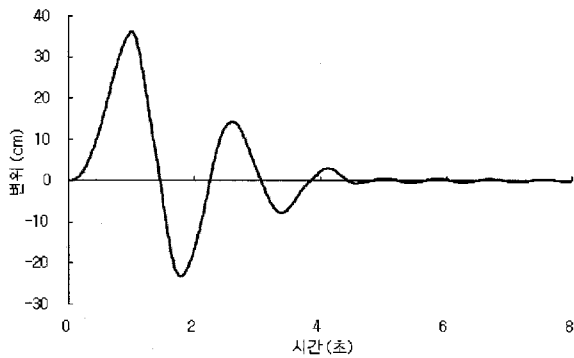
〈그림 10〉 수평하중 시간 이력



〈그림 11〉 면진장치 수직응력 시간 이력 (CASE 1)

구조물에 자유진동을 유발 시켰다.

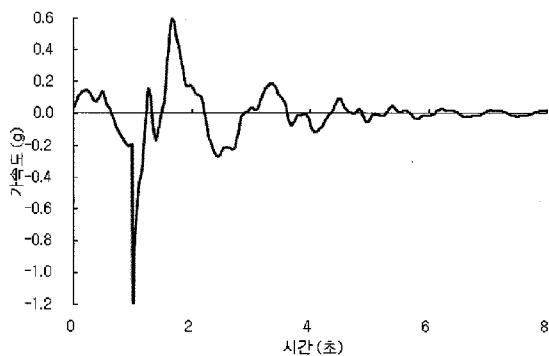
그림 11은 면진장치를 CASE 1로 모델링 한 경우, 즉 면진장치의 인장 강성을 완전히 무시한 경우의 그림 6의 왼쪽 면진장치에 발생된 수직방향 응력 시간 이력을 보여준다. 시간이 0일 때 면진장치 한 개에 가해지는 건물로 부터의 자중 (압축력)은 167.26 kN 으로서 면진장치의 단면적이 254.5 cm² 이기 때문에 초기 압축응력이 6.57 MPa 임을 보여주며 자유진동이 유발되는 시점을



〈그림 12〉 지붕층 수평변위 (CASE 3)

전후한 시간이 0.61초에서 1.43초 사이에 면진장치는 순수한 인장 상태에 있음을 알 수 있지만 면진장치가 들림에 대하여 저항성이 없게 모델링되었기 때문에 응력이 0 임을 보여준다.

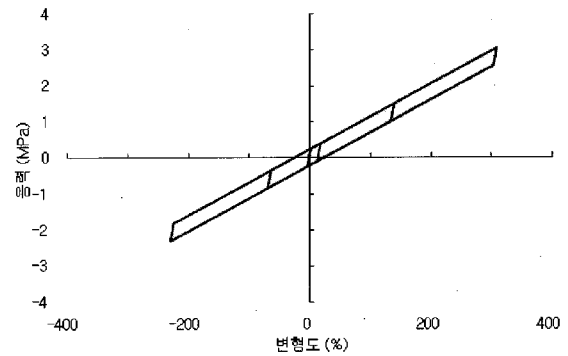
표 1의 각 해석 모델에 대한 해석 결과는 표 2에서 정리 하였으며 해석결과에 대한 그림은 면진장치의 인장강성을 가장 현실에 가깝게 모델링한 것으로 간주할 수 있는 실험에 근거한 3선형 CASE 3 해석모델에 국한 하였다. 그림 12와 그림 13은 면진된 골조 지붕 층의 수평 변



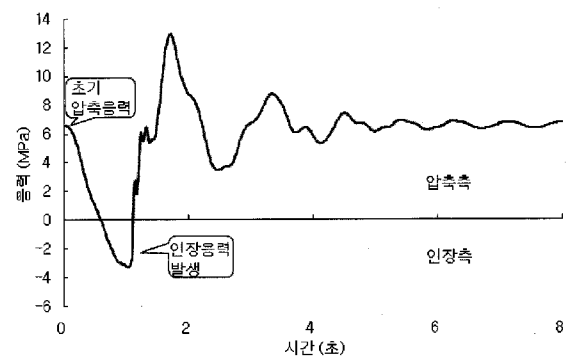
〈그림 13〉 지붕층 수평 증가속도 (CASE 3)

위와 수평 증가속도 시간 이력을 각각 보여주며 그림 14는 면진장치의 전단 거동을 보여준다.

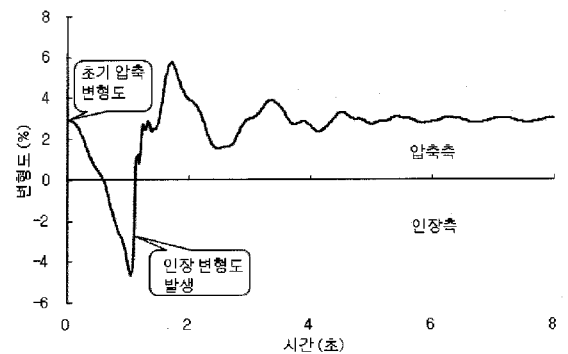
면진장치에 인장응력이 발생되게 하기 위하여 매우 큰 수평이동을 가했기 때문에 자유진동이 유발되는 순간의 지붕층 수평변위는 그림 12에서 36.2 cm 이다. 이 변위는 그림 14에서 보여주는 면진장치의 수평변위 23.6cm (즉, 전단 변형도 $\gamma \approx 300\%$)를 포함하는 변위이다. 흔히 알려져 있는 적층고무면진장치의 최대 전단변형도



〈그림 14〉 면진장치 전단 거동 (CASE 3)



〈그림 15〉 면진장치 수직응력 시간 이력 (CASE 3)



〈그림 16〉 면진장치 수직변형도 시간 이력 (CASE 3)

〈표 2〉 면진된 골조 자유진동 해석 결과

모델명	지붕층 최대 변위 (cm)		지붕층 최대 증가속도 (g)		면진장치 최대 전단 변형도 (%)		면진장치 최대 수직응력 (MPa)		면진장치 최대 수직변형도 (%)	
	+	-	+	-	+	-	압축	인장	압축	인장
CASE 1	41.3	22.2	0.57	1.17	267	216	17.48	0	7.74	86.64
CASE 2	37.5	24.1	0.61	1.27	305	231	13.25	3.63	5.87	16.07
CASE 3	36.2	23.3	0.59	1.24	309	229	12.93	3.30	5.73	4.68
CASE 4	34.4	21.6	0.58	1.24	307	226	12.48	3.33	0	0

(Elongation at Break)는 약 400%이다.¹⁰⁾ 그림 13에서 자유진동이 유발되는 순간 큰 지붕층 증가속도가 발생됨을 알 수 있다.

그림 15와 그림 16은 그림 6의 왼쪽 면진장치에 발생된 수직방향 응력, 그리고 변형도 시간이력을 각각 보여준다. 그림 15에서 CASE 3 해석모델로 구한 면진장치의 수직 응력 시간 이력은 그림 11에서 보여주는 CASE 1 해석모델로 구한 것과는 달리 자유진동이 유발되는 시점을 전후한 시간이 0.61초에서 1.11초 사이에 면진장치에는 순수한 인장응력이 발생됨을 보여준다. 즉, CASE 1과 CASE 3에서 순수 인장응력이 발생하는 시점은 0.61초로서 동일하지만 이 순간 이후 순수 인장 변위량이 CASE 1의 경우가 더 크기 때문에 다시 면진장치에 압축 응력이 생기기 시작하는 시간이 서로 다를 수 있다. 또한 CASE 1과 CASE 3이 같은 압축 강성 식을 사용하였지만 인장강성이 서로 다르기 때문에 최대 압축응력이 서로 차이를 보임도 알 수 있다. 그림 16도 그림 15와 마찬가지로 면진장치에 발생하는 초기 압축변형도의 크기와 면진장치에 발생하는 순수한 인장변형도의 분포를 보여준다.

표 2는 표 1의 각 해석 모델에 대한 지붕층의 최대 변위 및 최대 증가속도와 면진장치에 발생하는 최대 전단 변형도, 최대 압축-인장 응력 및 변형도를 보여준다. 해석결과들의 비교는 가장 현실에 가까운 모델로 간주할 수 있는 실험에 근거한 3선형 CASE 3 모델의 해석결과와 나머지 모델들의 해석결과 간에 행하였다.

먼저 면진계면 상부구조물의 거동을 살펴보면 지붕층 최대변위의 경우, CASE 3 모델의 해석결과는 면진장치의 인장강성을 무시한 CASE 1 모델의 해석결과와는

14.1%의 비교적 큰 차이를 보이지만 면진장치의 인장강성을 압축강성의 10%로 채택한 CASE 2 모델의 해석결과와는 3.6%로 그 차이가 비교적 작으며, 면진장치의 압축뿐만 아니라 인장강성을 무한히 크다고 가정한 CASE 4 모델의 해석결과와는 7.3% 차이를 보였다. 지붕층 최대 증가속도의 경우, CASE 3 모델의 해석결과는 CASE 1, CASE 2, 그리고 CASE 4 모델의 해석결과와 각각 5.6%, 3.4%, 그리고 1.7%의 차이를 보였다.

다음으로 면진장치 자체의 거동을 살펴보면 면진장치의 최대 전단 변형도의 경우, CASE 3 모델의 해석결과는 CASE 1 모델의 해석결과와 13.6%의 비교적 큰 차이를 보이지만 CASE 2와 CASE 4 모델의 해석결과와는 각각 1.3%로 그 차이가 작다. 면진장치의 최대 압축 응력 및 압축 변형도의 경우, CASE 3 모델의 해석결과는 CASE 1 모델의 해석결과와는 35%의 비교적 큰 차이를 보이지만 CASE 2와는 2.5%로 그 차이가 작다. 그러나 CASE 4 모델의 경우 압축 응력은 CASE 3 모델과 3.5%의 비교적 작은 차이를 보이지만 이 해석 모델은 면진장치의 압축 강성이 무한히 크다고 가정하였으므로 압축 변형도는 0을 얻었다. 면진장치의 최대 인장 응력 및 인장 변형도의 경우, CASE 1 모델은 면진장치의 인장강성을 무시하였기 때문에 인장 응력은 0을 얻었으며 또한 큰 값의 인장변형도를 얻었다. CASE 2 모델의 해석결과는 CASE 3 모델의 해석결과와 최대 10%의 인장응력 차이를 보이며 인장변형도는 243%의 큰 차이를 보인다. CASE 4 해석모델의 해석결과는 CASE 3 모델의 해석결과와 최대 0.9% 인장응력 차이를 보여 그 차이가 작지만 면진장치의 인장 강성이 무한히 크다고 가정하였으므로 인장 변형도는 0을 얻었다.

4. 결 론

적층고무 면진장치로 면진된 골조에 대한 면진장치 인장거동 (들림 현상)의 구조적 영향을 해석적으로 구하기 위하여 면진장치의 수직방향 강성들의 해석모델을 4가지로 달리하는 경계해석 (boundary analysis)을 수행하였으며 해석 결과로부터 다음 사실을 알았다.

(1) 적층고무 면진장치의 인장 강성은 압축 강성에 비하여 현저히 작지만 이를 완전히 무시하고 해석을 수행하면 면진계면 상부구조의 거동이나 면진장치 자체의 거동에 비교적 큰 오차가 발생한다.

(2) 면진된 건물의 정확한 구조거동을 얻기 위하여 적층고무 면진장치의 수직강성은 실험에 근거한 면진장치의 변형특성을 반영하여야 하며 면진장치의 인장강성은 3선형 (Tri-linear)으로 모델링할 수 있다.

(3) 면진장치의 실험결과가 없는 경우 면진된 건물의 예비설계 단계에서 면진된 건물의 구조적 거동을 알아보기 위한 목적으로 면진장치의 인장강성을 압축강성의 10%로 채택한 선형모델을 사용할 수 있다.

(4) 예비설계 단계에서 면진장치의 들림 현상을 무시하고 면진장치의 압축강성 뿐만 아니라 인장강성도 전단강성에 비하여 무한히 크다고 가정한 모델을 사용할 수 있을 것으로 사료되지만 이 경우 면진장치의 수직 방향 인장 및 압축 변형도는 구할 수 없다.

-참 고 문 헌-

1. 이동근, 김태호, 우리나라의 면진 및 진동제어, 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제6호, 2006, 67-77.
2. Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H., An Introduction to Seismic Isolation, John Wiley & Sons, 1993.

3. Masahiko, H. and Shin, O., Response Control and Seismic Isolation of Buildings, Taylor & Francis, 2006.
4. 주영규외 2인, 동일하이빌 하월곡 주상복합 건물에 대한 면진장치 적용기술 개발, 고려대학교, 2008.
5. 이주연외 3인, 고층 건물 중간층의 면진장치 적용 효과 분석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제 28권 제 1호, 2008, 9-12.
6. ASCE-SEI 7-05, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE, 2005.
7. 김태호외 3인, 구조형식에 따른 면진건축물의 경제성 평가, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제 24권 제 2호, 2004, 305-308.
8. 조해진외 3인, 공동주택 건축물에 대한 면진시스템의 적용성 평가, 대한건축학회 학술발표대회 논문집 제 25권 제 1호, 2005, 55-58.
9. FEMA 274 C9, Seismic Isolation and Energy Dissipation, The Building Seismic Safety Council for the Federal Emergency Management Agency, 1998.
10. 김대곤외 3인, 적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진 성능에 관한 실험적 평가, 한국지진공학회 논문집, 제 2권, 제4호, 1998, 53-62.
11. Stanton, J.F., and Roeder C.W., Elastomeric Bearings Design, Construction, and Materials, NCHRPR 248, 1982.
12. Naeim, F. and Kelly, J.M., Design of Seismic Isolated Structures, John Wiley & Sons, INC, 1999.
13. AASHTO, Revision to the Guide Specifications for Seismic Isolation Design, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1998.

▶접수일자 : 2009년 12월 15일

▶심사 완료일자 : 2010년 4월 20일

▶게재 확정일자 : 2010년 6월 10일