

Base Isolation System이 있는 건물의 지진하중에 대한 동적해석

Seismic Analysis of Building Structures with Base Isolation System

이 동 근*
Lee, Dong Guen
이 정 석**
Lee, Jeong Suk

요 약

Base isolation system은 구조물의 기초하부에 설치되며 지진에 의한 구조물의 피해를 감소시켜 준다. 지금까지 많은 공학들에 의해 여러가지 base isolation system이 개발되었으나 실용화된 것은 1970년대에 laminated rubber bearing(LR type)이 개발되고서부터 였다. 최근에는 laminated rubber bearing 밑에 미끄럼판을 둔 새로운 base isolation system(SR type)이 개발되었다.

본 연구에서는 isolation system과 구조물의 여러가지 성질에 따른 isolation 효과에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구의 결과, isolation system은 지진하중이 작용할 때 건물에 발생하는 피해를 상당히 감소시킬 수 있으며, isolation system의 주가가 길어짐에 따라 isolation 효과는 증가함을 알 수 있다. 그리고 건물의 높이가 증가함에 따라 isolation 효과는 줄어든다는 것을 알 수 있다. SR type isolation system이 있는 건물에 지진하중이 작용할 때, 건물내부에서 발생하는 가속도와 총간변위, 그리고 전체변위는 LR type의 경우보다 작으므로 보다 효율적이라는 것을 알 수 있다.

ABSTRACT

The isolation system is installed at the base of a structure for reduction of the earthquake damage to the structure. In the 1970's, when the laminated rubber bearing(LR type) is developed, the isolation system is put in practice. And recently a new isolation system(SR type), including the laminated rubber bearing with the friction plate beneath, is developed.

In this thesis, a study on the base isolation effect, for various of the isolation system and structure properties, is performed. The results of this parameter study show that the isolation system can reduce the earthquake damage of the building structures significantly. As the period of isolation system increases, the isolation effect increases and converges to zero damage. As the number of story increases, the isolation effect reduces. It is found that SR type isolation system is more effective than LR type because SR type base isolation system reduces acceleration, drift and total displacement.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 조교수

** 학생회원, 한국과학기술원 석사과정

이 논문에 대한 토론을 1990년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1991년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

지진이 발생하여 건물에 지진하중이 가해지면 지반의 급격한 반복운동에 의해 건물은 피해를 입게 된다. 멕시코 지진과 같이 지반이 매우 연약한 경우를 제외한 일반적인 지진의 경우, 지진 에너지는 진동주기가 짧은 영역에 집중되어 있으므로 중-저층건물의 피해는 고층건물의 피해보다 더 크게 발생할 위험이 있다. 이러한 중-저층건물은 지진에 의한 지반운동을 증폭하게 되어 각 층에서의 가속도는 위로 갈수록 커지게 되는데, 이렇게 증폭된 가속도는 건물골조(frame)의 응력을 증가시키고 과다한 충간변위(drift)를 유발시켜 건물이 구조적인 파괴에 이르지 않더라도 건물내의 사람이나 시설물에 심각한 피해를 입히게 된다.

중-저층건물의 피해를 줄이기 위해서는 건물내의 가속도를 감소시켜야 하는데, 이렇게 하기 위해서는 건물을 유연(flexible)하게 하여 건물의 기본 진동주기를 길게 해야 한다. 그러나 건물이 유연해 지면 충간변위가 커지므로 창문이 깨어지거나 내벽에 균열이 발생하는 등, 비구조재의 피해가 커진다. 그러므로 건물의 충간변위를 작게 하면서 건물내의 가속도를 줄일 수 있는 방법이 필요하게 되었는데, 이러한 목적에서 개발된 것이 base isolation이다. Base isolation의 기본개념은 건물의 연직방향 하중은 지지하면서 지반의 운동을 건물의 기초밑에서 허용한다는 것이다.

1921년 동경의 Imperial hotel을 설계할 때, 양질의 토층밑에 상당한 깊이의 연약 점토층을 두어 지진발생시 완충장치의 역할을 하도록 한 것으로부터 시작된 base isolation 기법은 soft first story[Fintel and Kahn (1969)], roller bearing system [Ryuiti(1941, 1956)] 등 많은 공학자들에 의해 연구가 계속되어 왔다[4]. 그러나 base isolation 이 실용화된 것은 1970년대에 laminated rubber bearing(이하 LR type)이 개발되고서 부터였다. 얇은 고무판과 강판을 여러겹으로 접착시켜 만든 laminated rubber bearing은 등방성 재료인 고무의 연직방향의 강성을 증가시 키므로써 건물의 연직하중을 지지하고 지진이 발

생하였을 때 완충작용을 하도록 한 것이다. 최근에는 laminated rubber bearing 하부에 마찰면을 두어 에너지가 작은 지진이 발생하였을 경우에는 LR type base isolation system과 같은 거동을 하나, 에너지가 큰 지진이 발생하여 건물에 과도한 응력이 발생할 때에는 미끄러짐이 발생하므로써 지진에너지흡수시키도록 한 새로운 base isolation system (sliding and rubber base isolation system, 이하 SR type)이 개발되었다[8].

일반적으로 isolation system을 가진 건물은 일반적인 건물에 비하여 비경제적이나, 병원, 우체국, 은행 등 중요한 건물에 있어서 지진이 발생하였을 경우에는 그 피해가 매우 크므로 base isolation system을 설치하는 것이 오히려 경제적이라고 할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 LR type과 SR type isolation system을 가진 건물을 해석하는 전산 프로그램을 개발하여, 지진하중이 작용하였을 경우 이러한 isolation system이 있는 건물의 거동을 예측하고, isolator의 강성과 건물의 높이의 변화에 따른 isolation의 효과에 대하여 연구하고자 한다. 그리고 LR type SR type isolation system이 설치된 건물의 거동을 비교하고자 한다.

2. 해석모델

2.1 기본 가정

Base isolated building은 그림1 (a)에서 보는 바와 같이 상부구조물, 상부기초, isolator, 그리고 하부기초로 이루어져 있다. 상부구조물은 일반적인 건축구조물이며, 상부기초와 하부기초는 다른 구조요소보다 상당히 큰 강성을 갖고 있으므로 본 연구에서는 강체로 가정한다. 그리고 지반도 강체로 가정한다.

일반적으로 base isolated building의 기초부분은 지표면 밑에 위치하며, 건물과 지표면 사이에 간격(clearance)을 두어 지진이 발생하였을 때 충돌을 방지하게 되어있으나, 연구의 편의상 여기서는 상부기초와 isolator가 지표면 위에 위치하는 것으로

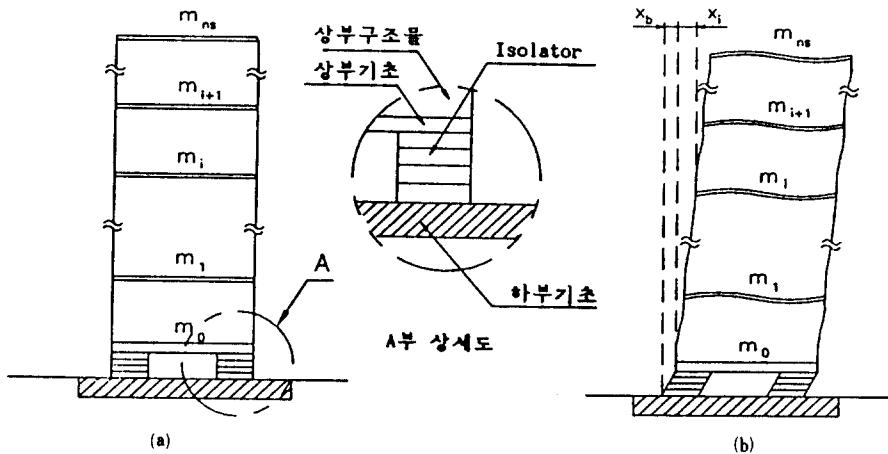


그림 1. LR Type base Isolation System이 설치된 건물

가정한다. 그리고 지진이 발생할 때 연직방향의 지진가속도는 구조물에 미치는 영향이 수평방향의 성분에 비해 매우 작으므로 수평방향의 지진가속도 성분만 고려한다.

지진하중이 작용할 때 LR type의 경우에는 isolator가 선형거동을 하며, SR type의 경우에는 isolator의 거동을 bilinear로 가정한다.

2.2 상부구조물

지진에 의해 건축구조물에 가해지는 하중은 지진가속도의 수평성분만 고려할 때, 수평방향의 지진가속도에 건축구조물의 질량을 곱한 형태가 된다. 그러므로 전체구조물의 자유도 (degree of freedom)를 모두 고려하지 않고 총당 하나의 자유도만 고려하여 구조물을 해석하면 훨씬 효율적인 계산을 할 수 있다. 이렇게 총당 하나씩의 자유도만을 고려하여 강성행렬을 구성하는 방법에는 shear building 모델과 matrix condensation 기법에 의한 방법이 있다.

Shear building 모델에 의한 방법은 보의 강성이 무한히 커서 각층의 수평방향의 변위는 기둥의 횡방향변형에 의해 지배된다는 가정하에 행해지며 이 때의 강성행렬은 tri-diagonal matrix 형태가 된다.

Matrix condensation 기법에 의한 방법은 보의 회전 및 수직방향의 자유도와 기둥의 축, 회전 및 수

평방향의 자유도를 모두 고려한 후 원하는 성분 (여기서는 각층의 수평방향의 자유도)을 제외한 나머지 자유도를 제거하여 강성행렬을 구성하게 되는데 이 때의 강성행렬은 full matrix 형태가 된다. 본 연구에서는 matrix condensation 기법에 의해 강성행렬을 구성하였다.

구조물의 감쇠행렬을 구하는 방법으로는 모드 형상벡터에 모드 감쇠비를 곱하여 구하는 모드감쇠법(modal damping method)과 감쇠행렬이 강성행렬과 질량행렬에 비례한다고 가정하여 구하는 Rayleigh 감쇠법이 있다. 여기서는 Rayleigh 감쇠법을 이용하여 감쇠행렬을 구하였다.

일반적인 구조해석에 쓰이는 질량행렬에는 모든 요소의 질량이 절점에 집중되어 있다고 가정하는 집중질량행렬(lumped mass matrix)과 질량이 전 요소에 분포되어 있다고 보는 분포질량행렬(consistent mass matrix)이 있다. 본 연구에서는 집중질량행렬을 사용하였다.

2.3 ISOLATOR

2.3.1 LR Type Base Isolation System

Rubber isolation system에서 isolator의 수평방향의 강성은 rubber의 전단변형에 대한 강성이라고 할 수 있는데, 이 수평방향의 강성은 연직방향의 강성에 비해 매우 작다. 실제로 isolator의 연직방향

성은 수평방향의 강성보다 400~600배 정도가 된다[6]. 그러므로 isolator의 연직방향 강성을 무한대로 가정하면 isolation system은 흥방향의 스프링 요소로 바꿀 수 있다. LR type isolation system의 수치적 모형화와 힘-변위 관계를 그림2에 나타내었다.

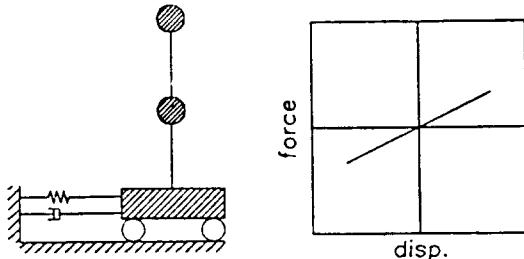


그림 2. LR Type base Isolation System의 모형화와 힘-변위 관계도

2.3.2 SR Type Base Isolation System

SR type isolation system은 그림3과 같이 laminated rubber isolator의 하부에 미끄럼판을 둔 부분(I)과 rubber만으로 이루어진 부분(II)으로 구성되어 있

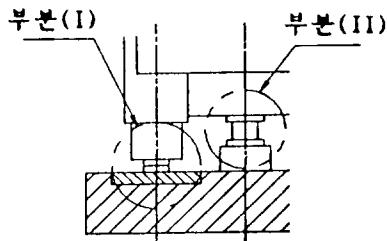


그림 3. SR Type base Isolation System

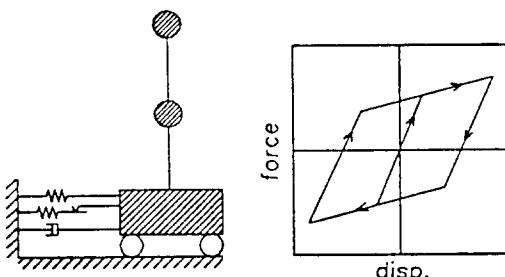


그림4. SR Type base Isolation System의 모형화와 힘-변위 관계도

다. 그러므로 미끄러짐이 발생하기 전의 isolator의 강성은 (I), (II) 부분의 강성이 합쳐진 값이 되고, 미끄러짐이 발생하면 (II) 부분의 강성값만이 전체 isolator의 강성이 된다. SR type isolation system의 수치적 모형화와 힘-변위 관계를 그림4에 나타내었다.

3. 해석방법

일반적인 건축구조물의 동적평형방정식을 미소시간 증가량 Δt 에 따른 미소변위 벡터 증분 $\{\Delta x\}$ 의 항으로 표시하면 다음과 같다.

$$[\mathbf{M}]\{\Delta \ddot{x}\} + [\mathbf{C}]\{\Delta \dot{x}\} + [\mathbf{K}]\{\Delta x\} = -[\mathbf{M}]\{1\}\Delta \ddot{x}_k(t) \quad (1)$$

여기서 $[\mathbf{M}]$, $[\mathbf{C}]$, $[\mathbf{K}]$ 는 각각 구조물의 질량 행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고, $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ 는 각각 건물의 각 층에서의 가속도, 속도, 변위 벡터이며, $\ddot{x}_k(t)$ 는 시간 t 에서의 지반가속도이다. 위의 동적평형방정식을 풀면 변위 벡터 증분 $\{\Delta x\}$ 가 구해지며, 각 시간간격에서 구한 증분들의 누적된 값이 그 시간간격이 끝난 후의 총 벡터가 된다.

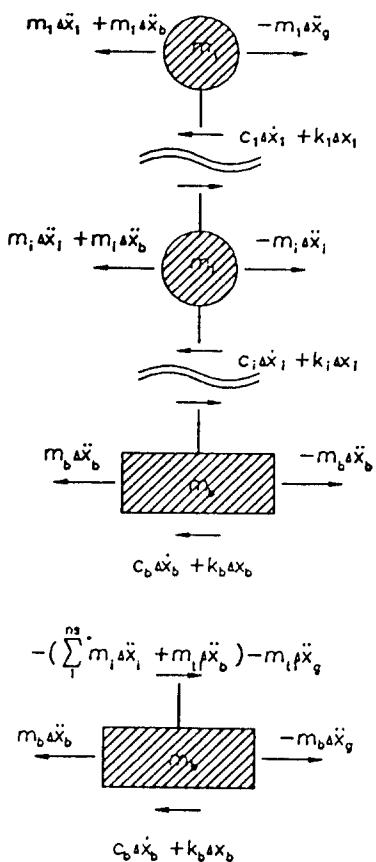
3.1 LR Type Isolation

Base isolated building에서 상부기초의 변위 형상은 강체운동 (rigid body motion)이다. 이것은 상부기초와 isolator의 연직방향의 강성을 무한대로 가정하였기 때문이다. 이렇게 하면 상부구조물과 isolator의 변위는 서로 couple되지 않는다. 전체 구조물의 변위형상을 그림1(b)에 나타내었다. 여기서 x_h 는 isolator의 수평방향 변위이며, x_i 는 상부기초에 대한 i층의 수평방향 상대변위이다.

앞의 동적평형방정식 (1)에 isolation system에 의해 추가되는 동적평형방정식은 그림5의 자유물체도 (free body diagram)로 부터 구할 수 있으며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{ns} m_i \Delta \ddot{x}_i + m_i \Delta \ddot{x}_h + c_h \Delta \dot{x}_h + k_h \Delta x_h = -m_i \Delta \ddot{x}_k(t) \quad (2)$$

- $i = 1, 2, 3, \dots, ns$
 $ns =$ 건물의 전체 총수
 $m_i = i$ 층의 질량
 $\Delta \ddot{x}_i = i$ 층에서의 가속도 증분
 $\Delta \dot{x}_g =$ 지반의 가속도 증분



상부기초에서의 동적평형

그림 5. Base Isolated Building의 자유물체도

여기서 m_s 는 상부기초의 질량을 포함한 건물의 전체 질량이고, c_b, k_b 는 각각 isolator의 감쇠계수와 강성계수이며, $\Delta x_b, \Delta \dot{x}_b, \Delta \ddot{x}_b$ 는 각각 isolator의 변위, 속도, 가속도증분이다.

이렇게 하여 전체 동적평형방정식을 행렬 형식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [M_s] & m_1 & \Delta \ddot{x}_1 \\ & m_2 & \Delta \ddot{x}_2 \\ & m_3 & \Delta \ddot{x}_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & m_i & \Delta \ddot{x}_i \\ & \vdots & \vdots \\ & m_s & \Delta \ddot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & 0 & \Delta \dot{x}_2 \\ & 0 & \Delta \dot{x}_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & 0 & \Delta \dot{x}_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & \Delta x_1 & \Delta x_2 \\ & 0 & \Delta x_3 \\ & \vdots & \vdots \\ & 0 & \Delta x_b \\ & \vdots & \vdots \\ & 0 & \Delta x_s \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} [M_s] & 0 & 1 & \Delta \ddot{x}_g(t) \\ & \vdots & \vdots & \\ & 0 & m_i & \end{bmatrix}$$

여기서 $[M_s], [C_s], [K_s]$ 는 각각 상부구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이다.

3.2 SR Type Isolator

3.2.1 미끄러짐이 발생하지 않는 경우

미끄러짐이 발생하지 않을 경우에 isolator에 가해지는 하중은 isolator의 (I) 부분과 (II) 부분(그림 3)이 함께 저항하게 된다. Isolation에 가해지는 전체 하중에서 (II) 부분이 받는 하중을 뺀 나머지가 마찰력(friction force, $\mu g m_i$)을 초과할 때 (I) 부분의 isolator와 하부기초와의 접촉면에서 미끄러짐이 발생한다. 여기서 μ 는 마찰면의 동적마찰계수이고, g 는 중력가속도이며, m_i 는 상부기초를 포함하는 전체구조물의 질량이다.

미끄러짐이 발생하기 전의 전체 건물의 거동은 LR type과 같으며 이 때의 동적평형 방정식도 역시

행렬식 (3)과 비슷한 형태가 되나, isolator의 강성계수는 k_b 대신에 (I), (II) 부분의 강성계수를 합한 값이 된다. 즉 행렬식 (3)에서 isolator의 강성계수는 $k_{bl} + k_{bh}$ 가 된다. 여기서 k_{bl} 는 (I) 부분의 isolator의 강성값이고, k_{bh} 는 (II) 부분의 강성값이다.

3.2.2 미끄러짐이 발생하는 경우

(I) 부분의 isolator에 가해지는 하중이 마찰력을 초과하여 미끄러짐이 발생하게 되면, 하중이 증가하여도 (I) 부분의 isolator가 하중에 대하여 저항하는 힘은 일정하게 마찰력을 유지하므로, 전체 isolator의 강성값은 (II) 부분의 강성계수만의 값이 된다. 즉, 행렬식 (3)에서 isolator의 강성계수는 k_b 대신에 k_{bh} 가 된다.

적분을 수행하다가 (I) 부분의 isolator에 걸리는 하중이 마찰력을 초과하면 미끄러짐이 발생하게 되는데, 이 때는 바로 전의 단계로 되돌아 가서 미끄러짐이 발생하는 시간 단계를 작게 나누어 적분을 수행하여 미끄러짐이 발생하는 정확한 시간을 구하여 적분과정에서 발생하는 오차를 줄인다. 미끄러짐이 발생하면 (I) 부분의 isolator는 더 이상 저항을 하지 못하므로 전체 isolation system의 강성을 (II) 부분의 강성값으로 바꾸어 적분을 수행해 나간다.

직접 적분법에 의해 변위와 속도를 구한 다음 가속도를 구하기 위하여 건물의 동적평형을 고려할 때, 건물은 미끄러짐 상태에 있으므로 (I) 부분 isolator의 마찰력을 고려하여야 한다. 그러므로 동적평형방정식에서 하중 벡터는 다음의 식(4)와 같이 미끄러짐이 발생하지 않은 상태의 하중 벡터에 마찰력항이 추가된 형태가 된다.

$$-\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ \cdots & \cdots \\ 0 & m_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \Delta \ddot{x}_g(t) \\ \cdots \\ \lambda \mu g m_I \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

여기서 λ 는 isolator가 미끄러지는 방향에 관계된 계수인데 변위가 +방향이면 λ 는 -1이 되고, 변위가 -방향이면 λ 는 +1이 된다.

미끄러짐 상태에서 적분을 계속 수행하다가 isolator의 변위증가방향이 바뀌면 (I) 부분의 isolator가 다시 고정상태로 바뀌므로 이 때에는 바로 전의 단계로 되돌아 가서 상태가 바뀌는 정확한 시간을 구한 후 전체 isolation system의 강성을 (I), (II) 부분의 강성을 합한 값으로 바꾸어 준 후 적분을 수행한다.

4. 예제 해석

4.1 예제 해석용 건물과 Isolator

본 연구에서는 사용한 해석용 기본건물은 1경간 2층 평면 철근콘크리트 건물이며, 층의 변화에 따른 isolation system의 효과를 비교하기 위한 건물로는 1경간 5층과 1경간 10층의 평면 철근콘크리트 건물을 사용하였다. 건물들의 경간 길이는 모두 7m이며 층고는 1층이 4.5m, 2층 이상이 3.5m이다. 건물의 모드감쇠비는 5%로 가정하였으며, 탄성계수는 E는 모든 부재에 대하여 $220t/cm^2$ 이다. 기타 건물들의 제원은 그림 6에 나타나 있다. 또한 El Centro(1940) 지진의 남북방향 성분을 입력하중으로 사용하였다.

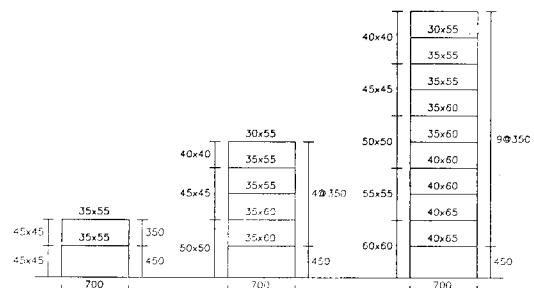


그림 6. 예제 해석용 2층, 5층, 10층 건물의 제원

중-저층 건물에 isolation system을 설치하는 목적은 진동주기가 짧은 중-저층 건물에 진동주기가 긴 isolation system을 설치하여 전체 건물의 진동주기를 길게 하는 것이다. 여기서 isolation sys-

tem의 주기라 함은 식(5)에서 보는 바와 같이 isolation system이 설치된 건물의 전체 질량과 isolator의 강성을 갖는 단자유도 시스템의 진동주기를 말한다.

$$T_b = \frac{2\pi}{\omega_b}, \quad \omega_b = \sqrt{k_b/m_t} \quad (5)$$

여기에서 T_b 는 isolation system의 진동주기이고, ω_b 는 진동수(angular frequency)이며, k_b 는 isolator의 강성계수, m_t 는 상부기초를 포함한 상부구조물의 전체 질량이다.

본 예제는 먼저 서로 다른 주기를 가진 LR type isolation system을 위의 건물에 설치하므로써 지진이 발생하였을 때 isolation system의 주기의 변화에 따른 건물의 응답을 비교하고, 미끄러짐이 발생하기 전의 진동주기가 LR type과 같은 SR type isolation system을 건물에 설치하였을 경우에 지진하중에 대한 LR type과 SR type isolation system의 응답을 비교하는 방법으로 전개해 나가도록 한다. 본 예제에서는 isolator의 진동주기가 1, 2, 3, 4초인 경우에 대하여 해석을 수행하였으며, isolator의 감쇠계수는 8%로 가정하였다.[6]

4.2 진동 모드와 진동 주기

Base isolation system이 설치되어 있는 건물의 첫 번째 진동 모드는 isolator에 의한 상부구조물의 강체운동과 거의 비슷한 형태의 모드가 된다. 그리고 두번째와 세번째 모드는 건물의 상부기초를 기준으로 할 때 각각 isolation system이 없는 일반적인 건물의 첫번째와 두번째 모드와 유사한 형

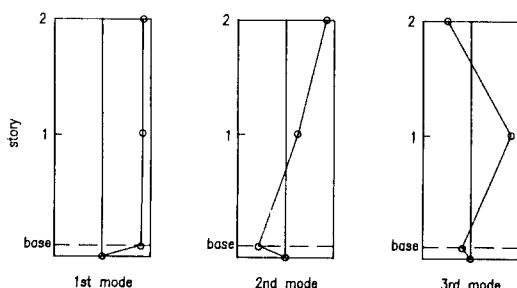


그림 7. LR Type Base Isolated Building의 진동모드 형상

태가 된다. LR type isolation system이 설치된 2층 건물의 각 진동 모드의 형태를 그림 7에 나타내었다.

LR type isolation system이 설치된 2층, 5층, 10층 건물의 경우 isolation system의 진동주기의 변화에 따른 각 건물들의 진동주기의 변화를 표1에 나타내었다. 이 표에서는 전체 건물의 진동주기는 isolation system의 진동주기에 큰 영향을 받게 됨을 알 수 있다.

표1. LR type isolation system의 주기에 대한

2층, 5층, 10층 건물의 진동주기

(단위 : sec)

ISOLATION SYSTEM의 주기	2 층	5 층	10 층
FIXED	0.360	0.732	1.263
ISOLATED	1 초	1.032	1.176
	2 초	2.016	2.084
	3 초	3.011	3.054
	4 초	4.008	4.042

4.3 LR type isolation system의 진동 주기의 변화에 따른 건물의 응답 비교

4.3.1 최대 변위와 최대 가속도

Isolation system의 진동주기의 변화에 따른 2층 건물의 각 층에서의 수평 방향의 총 변위를 그림 8(a)에 나타내었다. 이 그림에서 isolation system이 설치된 경우의 수평방향의 최대 총 변위는 isolation system이 없는 일반적인 경우에 비해 상당히 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 isolator가 건물의 다른 구조 요소보다 상당히 유연하기 때문이다. 그러나 isolator는 상대적으로 큰 변형을 허용하고 있으므로 건물전체의 안정은 유지된다. 실제로 isolator는 상대적으로 큰 변형을 허용하도록 설계되어 있으므로 건물전체의 안정은 유지된다. 실제로 isolator의 전단 변형은 최대 100%까지 허용된다[4]. 여기서 isolator의 전단변형을 100% 허용한다는 것은 isolator의 높이 만큼 수평방향의 변형을 허용한다는 뜻이다. 그림8(c)는 상부기초에 대한 각 층의 최대 충간변위를 나타내고 있다. 이 그림에서 isolation system이 설치되지 않은 일반적인 2층 건물에 비해

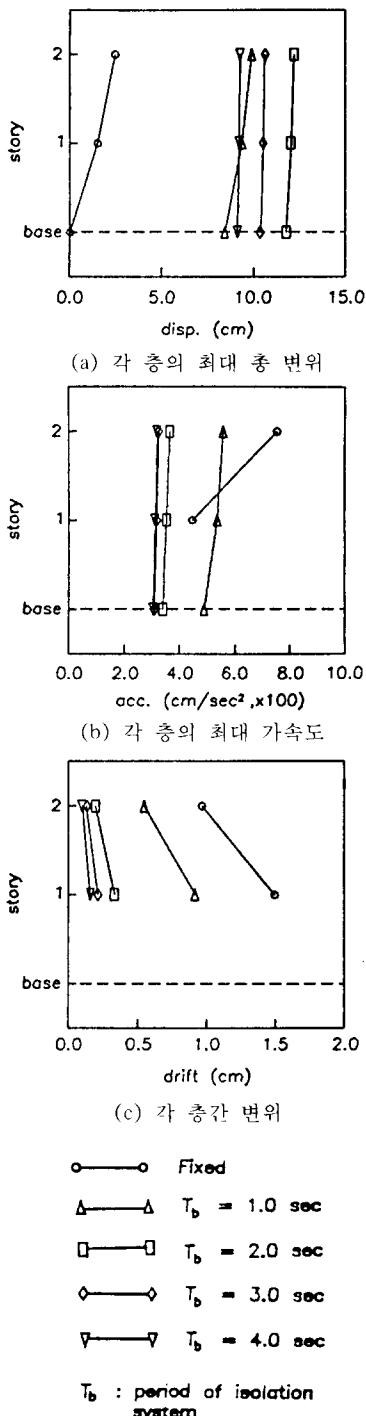


그림 8. El Centro 지진이 작용할 LR Type Isolation System의 진동주기의 변화에 따른 2층 건물의 최대 응답 비교

tem이 설치되지 않은 일반적인 2층 건물에 비해 isolation system이 설치된 2층 건물의 최대 층간변위가 크게 감소되었음을 알 수 있다. 이것은 지진하중이 작용할 때 건물내에 발생하는 응력이 감소된다는 것을 뜻한다. Isolation system의 진동주기의 변화에 따른 2층 건물의 각 층에서의 수평방향의 최대 가속도의 변화를 그림 8 (b)에 나타내었다. 이 그림에서 isolation system이 설치된 2층 건물의 경우 isolation system이 설치되지 않은 일반적인 건물에 비해 상당히 감소함을 알 수 있으며, 층간변위의 경우와 마찬가지로 isolation system의 진동주기가 길어짐에 따라 감소하는 정도는 줄어들어 영에 수렴함을 알 수 있다.

4.3.2 최대 밀면 전단력

Isolation system의 진동주기의 변화에 따른 2층 건물의 최대 밀면 전단력을 표 2에 나타내었다. 이 표에서 isolation system의 진동주기가 1초일 경우의 밀면전단력은 isolation system이 없는 경우 거의 같으나 2초 이상일 경우에는 상당히 크게 감소함을 알 수 있다.

Isolation system의 진동주기가 1초일 때 밀면전단력이 isolation system이 없는 경우와 거의 차이가 없는 최대 가속도의 그림 8(b)에서 보는 것과 같이 isolation system이 있는 건물의 경우 아랫층으로 감에 따라 가속도가 isolation system이 없는 건물보다 증가하기 때문이라고 생각한다.

표 2. LR type isolation system의 진동주기의 변화에 따른 2층, 5층, 10층 건물의 밀면전단력
(단위 : ton)

ISOLATION SYSTEM의 주기		2 층	5 층	10 층
FIXED		18.125	36.215	32.279
ISOLATED	1 초	20.020	34.241	32.900
	2 초	6.963	15.381	31.404
	3 초	2.732	7.048	15.228
	4 초	1.351	2.927	5.963

4.3.3 5층과 10층 건물의 경우

Base isolation system이 설치되어 있는 5층과 10

총의 철근 콘크리트 건물하부에 EI Centro 지진의 남북방향성분이 작용하였을 때, 각 건물들의 최대 총간 변위의 변화를 그림 9에 나타내었다. 여기서도 isolation system이 있는 경우에는, 없는 경우에 비하여 최대 총간 변위가 줄어들어 구조물에 미치는 피해가 감소되었음을 알 수 있으나, 건물의 전체 층수가 많아짐에 따라 isolation system의 주기가 그만큼 더 길어져야 건물의 피해가 감소한다는 것을 알 수 있다.

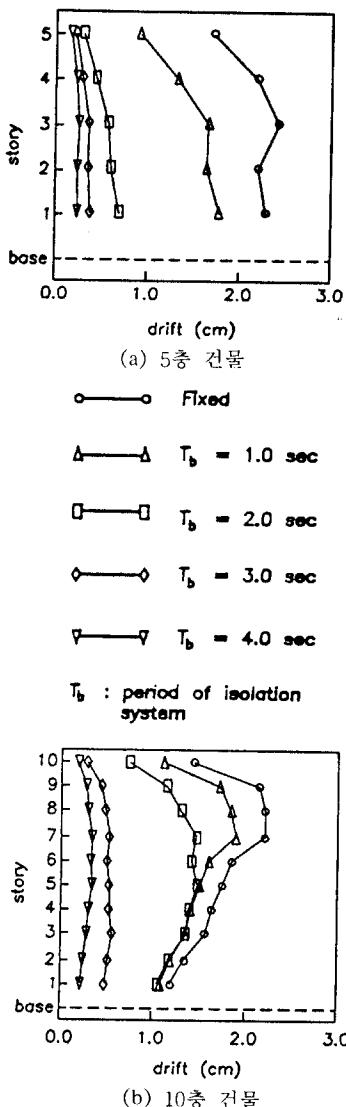


그림 9. EI Centro 지진이 작용할 때 LR Type Isolation System의 진동주기의 변화에 따른 최대 응답 비교

4.4 LR type과 SR type Isolation system의 비교

SR type base isolation system은 isolator 하부에 마찰면이 있는 laminated rubber bearing으로 된 부분(I)과 rubber만으로 된 부분(II)로 이루어져 있다. 그러므로 건물의 중량은 (I)부분의 isolator가 지지하며 (II) 부분의 isolator는 미끄러짐이 발생할 때, 건물의 수평변위의 증가에 대하여 저항하는 역할을 한다. 그리고 마찰면의 재료로서 SUS(stainless-steel)를 주로 사용하는데, 이 경우의 동적마찰계수는 접촉력에 따라 0.05~0.10, 미끄러짐이 발생할 때의 미끄러지는 속도에 따라 0.10~0.15의 변화를 보인다[3].

SR type base isolation system이 설치된 건물의 응답은 (I), (II) 부분의 강성과 동적마찰계수 μ 에 따라 달라지나, 여기서는 LR type과 비교하기 위하여 미끄러짐이 발생하기 전의 전체 isolation system의 진동주기를 LR type과 같게 하고, 미끄러짐이 발생한 후의 isolation system의 강성을 미끄러짐이 발생하기 전의 전체 강성의 1/5로 하였다. 그리고 $\mu=0.1$ 로 하였다.

4.4.1 2층 건물의 경우

SR type isolation system이 설치된 2층 철근 콘크리트 구조물의 2층에서의 수평방향의 최대 총변위, 최대 총간 변위, 그리고 최대 가속도를, 일반적인 2층 건물의 경우와 LR type isolation system이 설치된 2층 건물의 경우와 비교하여 그림 10 (a), (b), (c)에 나타내었다. 여기서 isolation system이 설치된 건물의 경우 최대 총간 변위와 최대 가속도가 줄어듦으로 해서 지진 발생시 두 isolation system이 건물의 피해를 줄이는 데 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, SR type isolation system이 LR type isolation system에 비해 최대 총간 변위와 최대 가속도가 감소되는 것은 물론 각 층에서의 총 변위도 LR type에 비해 감소되므로 지진발생시 LR type에 비해 더욱 유리한 거동을 한다는 것을 알 수 있다.

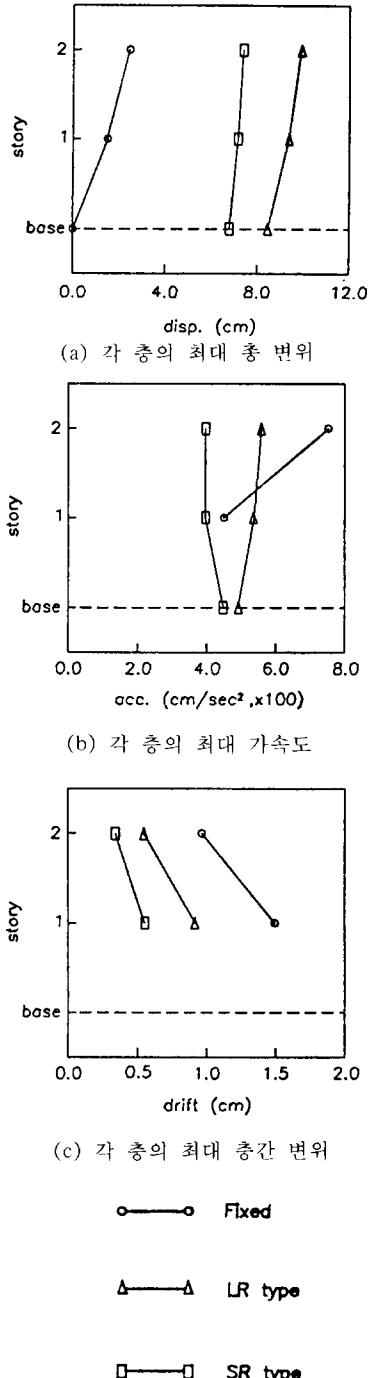


그림 10. EI Centro 지진이 작용할 때 LR Type과 SR Type Base Isolation System을 가진 2층 건물의 최대 응답 비교

4.4.2 5층과 10층 건물의 경우

미끄러짐이 발생하기 전의 전체 isolation system의 진동주기가 1초인 SR type isolation system이 설치된 5층과 10층 건물에 EI Centro 지진이 작용하였을 때, 각 층에서의 최대 층간 변위를, 일반적인 5층, 10층 건물의 경우와 LR type isolation system이 설치된 경우와 비교하여 그림 11에 나타내었다. 여기서도 2층의 경우와 마찬가지로 지진하중이 작용할 경우 SR type의 경우가 LR type의 경우보다 더욱 유리한 거동을 하나, 건물의 전체 층 수가 많아질수록 그 차이는 줄어든다는 것을 알 수 있다.

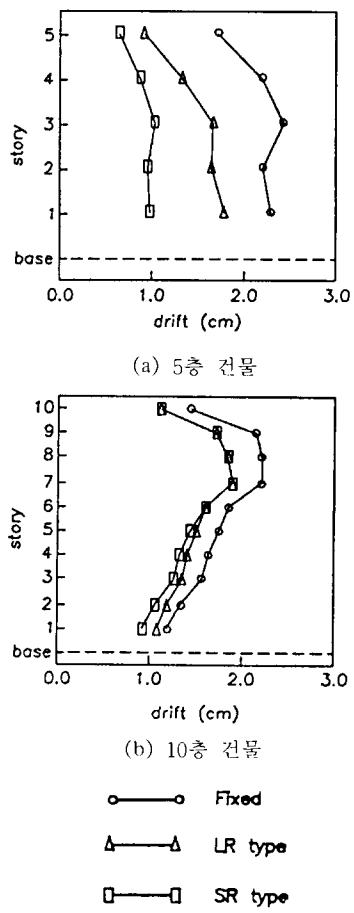


그림 11. EI Centro 지진이 작용할 때 LR Type과 SR Type Base Isolation System을 가진 건물의 최대 응답 비교

5. 결 론

본 연구에서는 지진하중이 작용할 때, LR type isolation system이 설치된 건물의 경우에 있어서 iso-isolation system의 진동주기와 건물 전체 충수의 변화에 따른 응답을 isolation system이 없는 일반적인 건물의 응답과 비교하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

1. 지진하중이 작용할 때 isolation system이 설치된 건물의 전체 변위는 증가하지만 실제로 구조물에 피해를 주는 요인인 가속도와 충간 변위는 감소하므로 isolation system은 지진에 의한 피해를 크게 감소시킨다.
2. Isolation system의 진동주기가 길어짐에 따라 가속도와 충간 변위는 계속 감소하나, 어느 정도를 넘어서서는 거의 일정하게 된다. 그리고 밀면 전단력의 경우 진동주기가 대체로 2초 이상이 되어야 감소효과를 발휘할 수 있다.
3. Isolation system이 설치된 건물의 전체 충수가 많아짐에 따라 건물의 피해는 isolation system의 주기가 훨씬 더 길 때까만 상당히 감소한다. 이것은 고층건물의 경우 건물자체의 첫번째 모드의 진동주기가 저층건물에 비해 길기 때문이다.
4. 지진하중이 작용할 때 SR type isolation system이 설치된 건물은 LR type isolation system이 설치된 건물보다 가속도와 충간 변위가 감소될뿐 아니라. 충변위도 감소하므로 더욱 효과적이라 할 수 있다. 그러나 isolation system의 진동주기가 길어질수록 (II) 부분의 isolator에 가해지는 하중이 감소하여 결국에는 미끄러짐이 발생하지 않게 되는데, 이 때는 LR type isolation system이 설치된 건물과 같은 저동을 하게 된다.

참 고 문 헌

1. Chopra, A. K., "Dynamics of Structures a Primer", Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, California, 1981.
2. Housner, G. W. and P. C. Jennings, "Earthquake Design Criteria", Earthquake Engineering Research Institute, Division of Engineering and Applied Science, California Institute of Technology, 1982.
3. Kawamura, S., K. Kitazawa, M. Hisano and I. Nagashima, "Study on a Sliding Type Base Isolation System", Proceedings of 9-th World Conference on Earthquake Engineering, Taisei Corp., Totsuka-ku, Yokohama, Japan, 1988.
4. Kelly, J. M., "Progress and Prospects in Seismic Isolation", Proceeding of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, Berkeley, California, 1986.
5. Mostaghel, N. and M. Khodaverdian, "Dynamics of Resilient - Friction Base Isolator (R-FBI)", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 15, 379 - 390, 1987.
6. Way, D. and M. Lew, "Design and Analysis of a High - Damping - Rubber Isolation", Proceeding of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation, 1986.
7. Weaver, W. Jr. and P. R. Johnston, "Structural Dynamics by Finite Elements", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1987.
8. Yasaka, A., H. Koshida and M. Iizuka, "Base Isolation System for Earthquake Protection and Vibration Isolation of Structures", Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Kajima Corp., Tokyo, Japan, 1988.

(접수일자 : 1990. 2. 10)