

## 건물의 질량중심과 면진층의 강성중심 차이에 따른 면진효과

### Seismic Isolation Effects Due to the Difference Between the Center of Mass of the Building and the Center of Stiffness of Isolation Layer

허 무 원<sup>1)</sup>      천 영 수<sup>2)\*</sup>  
Moo-Won Hur      Young-Soo Chun

#### Abstract

In this study, we examined the seismic isolation effects due to the difference between the center of mass of the building and the center of stiffness of isolation layer. Because the base isolation technique is a technique that is highly dependent on the performance of seismic isolation devices installed on the seismic isolation layer, we have to examine the horizontal stiffness of seismic isolation devices after making them. If difference between the design stiffness and the actual stiffness of the seismic isolation device occurred, a big problem may be generated in the upper members on the seismic isolation layer. The analytical results show that the more eccentricity increases, the more maximum response acceleration, story shear and the member forces of the upper part of the structure increases, and the damage is expected to be in excess. Therefore, it is recommended that if possible, isolation devices have to be designed to coincide the center of mass of the building with the center of stiffness of isolation layer. If not after making isolation devices, they need to be relocated to prevent the eccentricity.

Keywords : Seismic isolation, Stiffness of isolation layer, Isolation effect

#### 1. 서론

면진은 건물과 기초 또는 중간층 사이에 특별한 장치를 삽입하여 건물의 진동주기를 장주기화 함으로서 건물의 지진 저항 능력을 크게 개선할 수 있는 효과적인 기술이다. 이러한 면진기술은 현재 세계 여러 나라에서 강진으로부터 중요한 건물들을 보호하고, 구조물의 내진성능 향상을 도모하기 위한 실무적인 해결책으로서 받아들여지고 있으며, 일본을 비롯한 미국, 뉴질랜드, 중국 등과 같이 지진에 대한 경험이 많은 나라들을 중심으로 실증되고 상용화된 기술로서 그 우수성을 인정받고 있다. 최근 들어 국내에서도 건물의 중요도 및 클라이언트의 요청에 따라 면진기술 적용 사례가 증가하고 있으나, 국내의 경우에는 해외와 달리 면진설계에 대한 구체적인 설계기술이 정립되지 못하고 있는 실정이다. 면진기술은 면진층에 설치되는 면진장치의 성능에 크게 의존하

는 기술이므로 면진장치 제작 후 전수검사를 통하여 면진장치의 수평강성을 검토하는 것이 바람직하다. 하지만 면진장치 성능실험 시 각각의 면진장치의 품질기준이 정해져 있지 않아, 설계 시 적용된 강성과 실제 강성의 차이가 발생할 수 있으며, 이 차이가 크게 될 경우 건물의 질량중심과 면진층의 강성중심의 차로 인해 면진층 상부 부재에 과도한 응력을 부담시킬 수 있다.

기존연구에서는 건물의 질량중심을 변경하여 이와 유사한 문제를 검토한 것이 있으나 실제 실무에서는 건물의 질량중심을 변경하는 것이 쉽지 않으며, 면진장치 제작상의 오차에 따른 편심율의 범위를 반영하여 연구가 수행되지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 면진설계 시 면진층에 설치되는 면진장치의 제작오차로 인한 강성변화에 근거하여 건물의 질량중심과 면진장치의 강성중심 차이에 따른 면진효과를 검토하고자 하며, 이로 인해 면진효과가 어떻게 변화하는지에

1) 정회원, 단국대학교 건축공학과 박사과정  
2) 정회원, LH 토지구획연구원 수석연구원, 교신저자

\* Corresponding author : cysoo@lh.or.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

대한 정보를 제공하고자 한다.

## 2. 연구대상 건물

### 2.1 해석모델

연구대상 모델로 선정된 건물은 중·저층 건물로서 5층의 경우를 대표모델로 하여 비교·분석하였다. 또한, 보-기둥 강성비는 기존연구에서 강성비의 차에 따른 면진효과는 크지 않았으나, 그 중 가장 효과적인 면진효과를 나타낸  $\rho = 0.3$  ( $\rho = \sum \frac{EI_b}{L_b} / \sum \frac{EI_c}{L_c}$ )의 경우를 기준으로 하여 해석을 실시하였다. 건물의 모든 부재들은 일정한 단면을 갖고 있으며 각 층의 질량과 강성의 분포는 일정한 것으로 가정한다. 구조부재의 사이즈는 기둥은 700×700mm, 보는 400×700mm로 모델링하였다. 본 해석에 적용된 구조재료의 강도는 콘크리트 압축강도 27MPa, 철근의 항복강도는 400MPa이다. Fig. 1은 연구대상 건물의 평면도 및 입면도를 나타낸 것이다.

### 2.2 골조의 기본 진동주기 ( $T_1$ )

면진설계 전 건물의 기본 진동주기는 일반적으로 채용되는 건물 층수에 대한 약산 식을 기준으로 식 (1)과 같은 범위를 연구대상으로 하였다. 면진장치를 적용한 건물의 진동주기는 기존연구에서 제시된 바에 따르면 중·저층 구조물의 경우 면진 전 건물의 주기와 면진 후 건물의 주기비가 2.5배 이상, 그리고 면진주기 2.0초 이상으로 적용하여야만 충분한 면진효과를 발휘할 수 있다. 면진장치를 적용한 건물의 기본 진동주기는 충분한 면진효과를 발휘하기 위하여 기

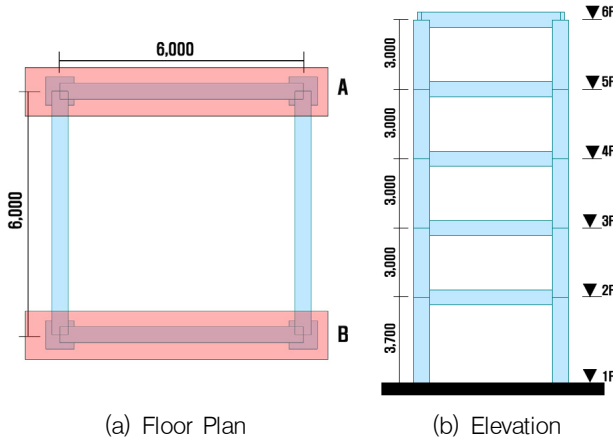


Fig. 1 The shape of the Building

준에 제시된 주기비보다 더 큰 값인 3.0초로 하였다.

$$0.6 T \leq T_1 \leq 1.4 T \quad (1)$$

여기서,  $T = 0.1N$        $N =$  건물의 층수

### 2.3 면진장치의 품질 기준

면진장치는 화학적, 물리적 및 역학적 성질이 충분히 안정적이어야 하며 장치 제작 후 장치 전체의 품질시험 실시를 원칙으로 한다. 하지만 국내 건축기준에는 면진장치에 대한 품질기준이 지정되어 있지 않으며, 교량의 경우에는 Standard Specification for Highway Bridge (2013)에서 “각각의 유효강성은 설계값의  $\pm 20\%$  이내, 에너지면적은  $-25\%$  이상으로 지정하고 있고, 장치 전체의 유효강성 평균값은  $\pm 10\%$  이내, 에너지면적은  $-15\%$  이상”으로 지정하고 있다. 또한, ASCE 7-10 제17장의 경우에도 “각 실험체에 대하여 유효강성과 유효강성의 평균값의 차이는 15%보다 크지 않아야 한다”라고 정하고 있다. 일본의 경우에도 품질기준은 지정되어 있지 않으며, 각 제조회사별로 차이는 있으나 대체적으로 유효강성의  $\pm 15\%$  이내로 지정하고 있다. 이에 본 연구에서는 각 장치별로  $\pm 15\%$ 의 편차를 만족하는 7가지 ( $-15\%$ ,  $-10\%$ ,  $-5\%$ ,  $0\%$ ,  $5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$ )의 면진장치 강성을 이용하여 총 16가지 해석변수를 비교·분석하였다. Table 1은 해석 시 사용된

Table 1 Analysis Case

No	Type	Isolation Stiffness error (%)		Eccentricity (%)	Total stiffness
		A Line Col.	B Line Col.		
Case-1	1-1	0	0	0%	1764
	1-2	5	-5	5%	
	1-3	10	-10	10%	
	1-4	15	-15	15%	
Case-2	2-1	0	5	2%	1808
	2-2	0	10	5%	1852
	2-3	0	15	7%	1896
Case-3	3-1	0	-5	3%	1720
	3-2	0	-10	5%	1676
	3-3	0	-15	8%	1632
Case-4	4-1	5	5	0%	1852
	4-2	10	10	0%	1940
	4-3	15	15	0%	2029
	4-4	-5	-5	0%	1676
	4-5	-10	-10	0%	1588
	4-6	-15	-15	0%	1499

각각의 변수값을 정리하여 나타낸 것이다. Table 1에서 Case-1은 면진층 강성의 합은 동일하고, 건물의 질량중심과 면진층의 강성중심 차이에 따른 영향을 검토한 것이며, 이를 통하여 포괄적인 편심율을 알아볼 수 있다.

Case-2와 Case-3은 면진층에 설치되는 장치의 강성 증가와 감소에 따른 허용 편심율을 도출하기 위한 변수이며, 마지막으로 Case-4는 각 장치별 강성특성을 파악해 보기 위한 변수로써 건물의 질량중심과 면진층의 강성중심의 차이는 0%로 고정하였으며, 면진장치의 강성변화를 변수로 채택하였다.

해석에 사용된 면진장치의 이력특성은 실제 면진설계에서 적용된 면진시스템의 특성 (이선형 모델)을 사용하였으며 (Housing & Urban Research Institute, 2005), 프로그램은 MIDAS GEN Ver. 820로 상부구조는 프레임 요소로서 모델링하고, 면진장치는 Isolator1 요소를 사용하여 전체 모델의 국부적인 비선형성을 모델링 하였다. 또한 상부구조의 감쇠는 5%의 점성감쇠를 가정하였으며, 면진층 부분은 면진장치의 이력감쇠 외에 점성감쇠는 고려하지 않았다.

### 3. 면진장치 설계 및 비선형 동적 해석

#### 3.1 면진장치 설계

##### 3.1.1 목표면진주기 및 면진시스템 유효 강성

면진장치가 적용된 면진건물의 유효주기는 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정된다. 면진주기의 설정은 설계하고자 하는 구조물의 성능을 결정하는 것이므로 설계절차에서 가장 선행되어야 하는 단계이다. 또한, 설계변위 ( $D_D$ )에서 면진 구조물의 유효 주기는 다음 식 (2)에 따라 면진시스템의 변형특성을 이용하여 결정한다. 그러므로 2.2절에서 설정된 목표 면진주기를 이용하여 역으로 목표 면진주기를 만족시키기 위한 면진시스템의 변형특성을 결정 할 수 있다.

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K_D \times g}} \quad (2)$$

여기서,  $W$  : 상부 건물의 유효 중량 (=2,550 kN)

$K_D$ : 설계변위에서 면진시스템의 유효강성

$$K_D = \frac{4\pi^2 \times 2,550,000}{9 \times 9,806} = 1.14 \text{ kN/mm} \quad (3)$$

#### 3.1.2 면진장치 설계 및 면진시스템 구성

상기 조건에 따라 본 연구에서는 면진시스템의 구성요소로 납붕삽입적층고무 (Lead Rubber Bearing, LRB) 장치를 사용하여 해석을 실시하였다. 면진장치는 각 기둥에 하나씩 적용하여 총 4개의 장치를 사용하였다. 다음 Fig. 2는 각각의 면진장치 이력루프를 나타낸 것으로 기본 값을 0%로  $\pm 15\%$ 에 대한 이력루프를 나타내었다.

#### 3.2 입력지진동

비선형시간이력해석에 사용된 지진파는 비교적 안정된 지반에서 관측된 기록파 (El-Centro 1940, Taft 1952) 2개와 인공지진파 1개를 선정하여 총 3개의 지진파를 사용하여 해석을 수행하였다. KBC 2009 0306.7.4.1 (설계지진파의 선정)에 따라 지반조건  $S_D$  지반의 설계스펙트럼에 적합하게 크기를 조정 (scaling)하여 해석에 반영하였다. Fig. 3은 KBC2009의 스케일링 방법에 따라 크기가 조정된 지진파의 응답스펙트럼과 설계스펙트럼과의 관계를 나타낸 것이다.

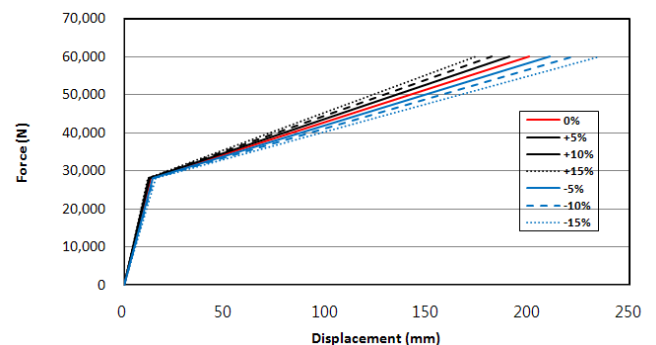


Fig. 2 Hysteretic characteristics of the isolation bearing ( $K_1+K_2$ )

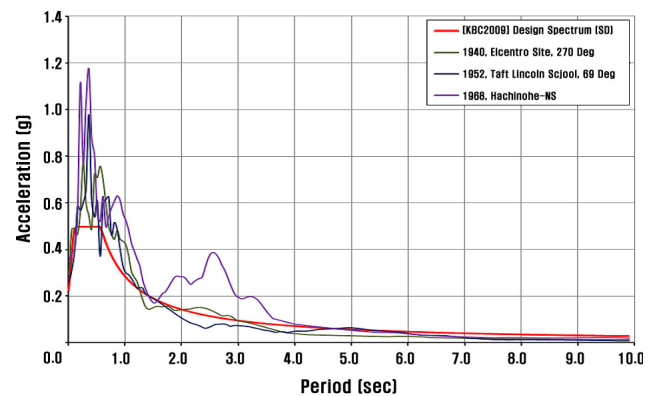


Fig. 3 Frequency contents of used earthquakes

## 4. 해석결과 및 분석

### 4.1 Case-1의 결과

Table 2는 각 지진파에 따른 Case-1의 해석결과를 편심율 0%를 기준으로 상대비로 비교하여 각 지진파 별로 정리한 것이며, Fig. 4는 이를 도식화하여 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 최대응답변위의 경우, 각 지진파별로 다소 차이는 있으나 면진층에서 만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 상부 구조물은 강제거동과 유사하게 층 변위에 차이가 거의 발생하고 있지 않는 것으로 나타났다. Fig. 4(b)의 최대응답가속도의 경우, 건물의 질량중심과 면진층의 강성중심의 편심율이 0%일 때는 각 층의 응답가속도가 거의 일정한 분포를 나타내고 있지만, 각 지진파 별로 다소 차이는 있으나, 편심율이 증가할수록 상부층의 최대응답가속도는 약 15~25% 증가하는 양상을 나타내었다. 또한, 하부 면진층에서도 편심율이 증가할수록 상부층과 유사한 경향을 나타내었다. 이는 편심에 의한 구조물의 비틀림에 의해 나타난 결과라 판단된다. 최대응답가속도의 증가율은 지진파별로 다소간 차이는 있으나 편심으로 인한 층 가속도의 증가는 결국 상부 구조의 부재설계에 있어서 작용하중의 증가를 의미하므로 면진장치는 장치제작 후 전수검사를 실시하여 반드시 설계된 의도대로 편심이 발생하지 않도록 장치를 재배치할 필요가 있다. Fig. 4(c)는 층 전단력 해석결과로서, 각 지진파별로 편심율의 증가에 따라 약 5% 내외에서 증감하는 경향을 나타내었다. Fig. 4(d), (e), (f)는 면진층 상부 기둥 (B열의 좌측기둥)의 부재력을 상대비로 나타낸 것으로 축력의 경우에는 편심율의 차에 따라 큰 영향이 나타나지 않았으나, 전단력과 모멘트의 경우에는 각 지진파별로 편심이 증가할수록 부재력이 6~7% 증가하는 양상을 나타내었다.

이러한 효과로 Case-1의 조건이 최대지진레벨 (Maximum Credible Earthquake, MCE)에서 그 차이가 다르게 예상된다. MCE에 대한 최대응답가속도의 경우 각 지진파별로 편심율이 증가할수록 약 4~7% 까지 증가하는 양상을 나타내었다. 또한, 최대응답가속도를 검토한 결과, 설계지진레벨 (Design Based Earthquake, DBE)의 해석결과와 같이 편심율이 증가할수록 면진층 및 상부층의 최대응답가속도는 약 10~15% 증가하는 양상을 나타내었다. 층전단력의 경우에도 편심율이 증가할수록 면진층 상부의 층전단력도 약 15%전후로 증가하는 양상을 나타내었다. MCE에 대한 부재력 해석결과, 축력의 경우는 큰 차이를 나타내지 않았으며, 전단력 및 모멘

트의 경우는 면진층 상부로 올라갈수록 약 5% 전후로 증가하는 양상을 나타내었다. 이처럼 면진장치로 인한 강성차가 발생한다면 DBE 및 MCE 모두를 검토가 필요할 것으로 판단된다.

### 4.2 Case-2 및 Case-3의 결과

Table 3과 Table 4는 각 지진파에 따른 Case-2와 Case-3의 해석결과를 편심율 0%를 기준으로 상대비로 비교하여 정리한 것이며, Fig. 5와 Fig. 6은 이를 도식화하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)와 Fig. 6(a)는 최대응답변위의 상대비를 나타낸 것으로서, 면진장치의 강성증감에 따른 효과는 각 지진파 별로 차이는 있으나, 면진층에서 만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 Case-1과 거의 유사한 결과를 나타내었다. 단, 강성변화에 증감에 차이로 5~10% 증감하는 것으로 나타났다. Fig. 5(b)와 Fig. 6(b)는 최대응답가속도의 비교 결과로서 면진장치 강성의 증감으로 인한 편심율이 증가할수록 최대응답가속도 또한 증가하는 결과를 나타내었다. 최상층 가속도의 경우에는 지진파에 따라 다소 차이는 있으나 약 4배까지 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 면진층의 강성차에 따른 증감도 가속도 증가에 영향을 미치지만, 면진층의 총 강성합 또한 가속도 증가에 영향을 주었기 때문이다. 그러므로 면진장치는 장치제작 후 전수검사를 실시하여 면진층 강성의 총 합도 반드시 설계된 의도대로 실험결과가 도출되었는지 확인할 필요가 있다. Fig. 5(c)와 Fig. 6(c)는 층전단력의 해석결과로서 Case-1의 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

Fig. 5(d), (e), (f)와 Fig. 6(d), (e), (f)는 면진층 상부의 부재력 (B열 왼쪽기둥)을 편심율 0%를 대상으로 상대비로 비교하여 나타낸 결과로서 Case-1의 결과와 유사하게 축력 상대비의 경우에는 큰 차이를 나타내지 않았고, 전단력과 모멘트 상대비의 경우에는 면진층 총 합에 따라 면진층 상부로 올라갈수록 증가하는 양상을 나타내었으나, 그 비율도 약 18%까지 더 크게 나타났다.

### 4.3 Case-4의 결과

Table 5는 각 지진파에 따른 Case-4의 해석결과를 편심율 0%를 기준으로 상대비로 비교하여 각 지진파 별로 정리한 것이며, Fig. 7은 이를 도식화 하여 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 최대응답변위의 경우, 면진층의 강성 증가 시에는 면진층에서만 큰 변위가 발생하고 있을 뿐 Case-1, Case-2 및 Case-3의

Table 2 Analysis Results (Case-1)

Type	Story	EL 1-1	EL 1-2	EL 1-3	EL 1-4	TA 1-1	TA 1-2	TA 1-3	TA 1-4	Art 1-1	Art 1-2	Art 1-3	Art 1-4
Relative Displacement Ratio	6	1.00	0.99	1.02	1.03	1.00	1.02	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	0.99
	5	1.00	0.99	1.02	1.03	1.00	1.02	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	0.99
	4	1.00	0.99	1.02	1.03	1.00	1.02	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	0.99
	3	1.00	0.99	1.02	1.03	1.00	1.02	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	0.99
	2	1.00	0.99	1.02	1.03	1.00	1.02	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	0.99
	1.5	1.00	0.99	1.02	1.03	1.00	1.02	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	0.99
Relative Acceleration Ratio	6	1.00	1.11	1.16	1.22	1.00	1.07	0.97	1.21	1.00	1.04	1.05	1.04
	5	1.00	1.05	1.10	1.12	1.00	0.98	0.96	1.10	1.00	1.02	1.03	1.02
	4	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00	1.00
	3	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	0.99
	2	1.00	1.01	1.09	1.15	1.00	0.99	1.00	1.08	1.00	1.01	1.02	1.02
	1.5	1.00	1.09	1.20	1.28	1.00	1.11	1.04	1.22	1.00	1.02	1.03	1.03
Relative Shear Force Ratio	6	1.00	1.01	1.02	1.04	1.00	1.00	0.99	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	1.00	1.03	1.06	1.07	1.00	0.99	0.98	1.04	1.00	1.00	1.01	1.01
	4	1.00	1.01	1.03	1.04	1.00	1.00	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00
	3	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	2	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00
	1.5	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00
Relative Moment Ratio	6	1.00	1.02	1.03	1.04	1.00	0.99	0.99	1.02	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	1.00	1.02	1.05	1.06	1.00	1.00	1.00	1.04	1.00	1.00	1.00	1.01
	4	1.00	0.99	1.01	1.02	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	3	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00
	2	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	0.99	0.99	1.00
	1.5	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00	0.99	0.99	1.00

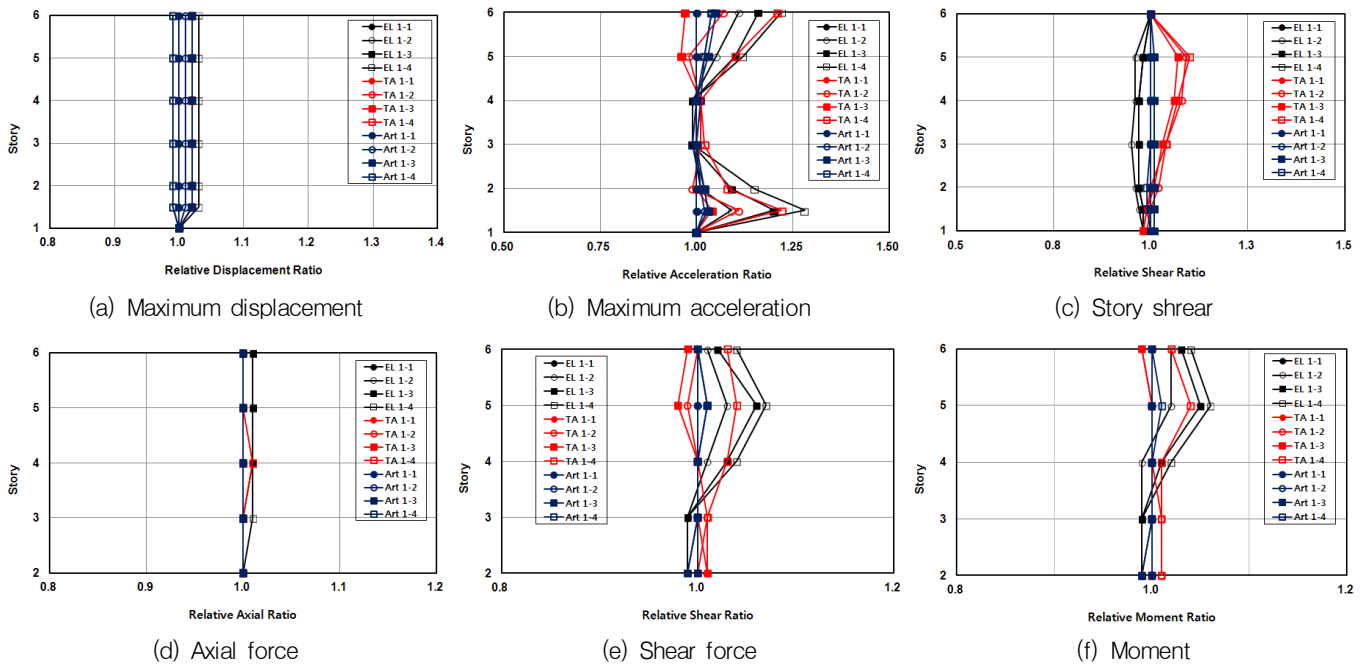


Fig. 4 Comparison of Analysis Results (Case-1)

Table 3 Analysis Results (Case-2)

Type	Story	EL 1-1	EL 2-1	EL 2-2	EL 2-3	TA 1-1	TA 2-1	TA 2-2	TA 2-3	Art 1-1	Art 2-1	Art 2-2	Art 2-3
Relative Displacement Ratio	6	1.00	0.96	0.94	0.91	1.00	0.99	1.01	0.98	1.00	1.02	1.04	1.01
	5	1.00	0.96	0.94	0.91	1.00	0.99	1.01	0.98	1.00	1.02	1.04	1.01
	4	1.00	0.96	0.94	0.91	1.00	0.99	1.01	0.98	1.00	1.02	1.04	1.01
	3	1.00	0.95	0.94	0.91	1.00	0.99	1.01	0.98	1.00	1.02	1.04	1.01
	2	1.00	0.95	0.94	0.90	1.00	0.99	1.01	0.98	1.00	1.02	1.04	1.01
	1.5	1.00	0.95	0.94	0.90	1.00	0.99	1.01	0.98	1.00	1.02	1.04	1.01
Relative Acceleration Ratio	6	1.00	1.17	1.30	1.46	1.00	1.03	1.01	1.11	1.00	1.03	1.09	1.10
	5	1.00	1.06	1.09	1.32	1.00	1.00	1.02	1.03	1.00	1.03	1.07	1.07
	4	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.02	1.00	1.02	1.03	1.03
	3	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.02	1.03	1.00	1.02	1.03	1.03
	2	1.00	1.03	1.11	1.30	1.00	1.02	1.01	1.03	1.00	1.02	1.05	1.06
	1.5	1.00	1.13	1.25	1.47	1.00	1.10	1.06	1.11	1.00	1.03	1.07	1.07
Relative Shear Force Ratio	6	1.00	1.02	1.04	1.08	1.00	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01
	5	1.00	1.03	1.07	1.18	1.00	1.01	1.02	1.01	1.00	1.01	1.02	1.02
	4	1.00	1.01	1.03	1.12	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.02	1.02
	3	1.00	1.00	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00
	1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00
Relative Moment Ratio	6	1.00	1.02	1.04	1.10	1.00	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
	5	1.00	1.02	1.04	1.16	1.00	1.01	1.02	1.02	1.00	1.01	1.02	1.02
	4	1.00	1.00	1.01	1.06	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.01	1.01	1.01
	3	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00
	2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	1.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

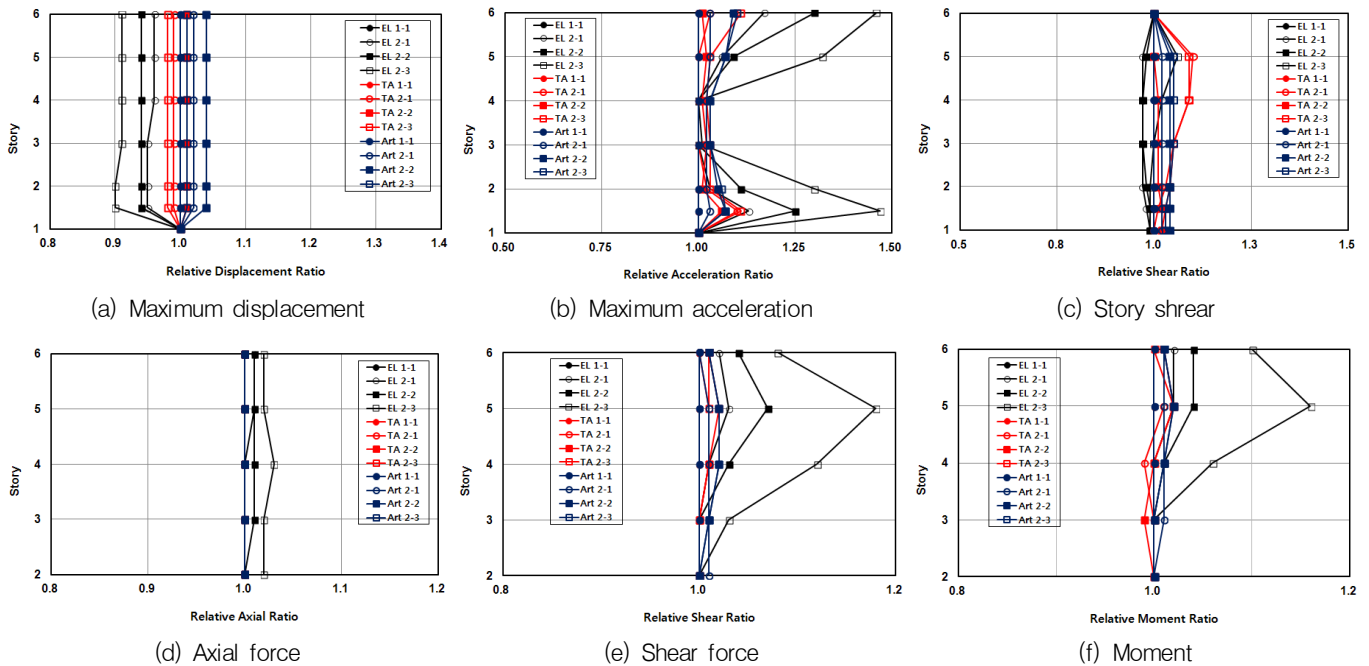


Fig. 5 Comparison of Analysis Results (Case-2)

Table 4 Analysis Results (Case-3)

Type	Story	EL 1-1	EL 1-2	EL 1-3	EL 1-4	TA 1-1	TA 1-2	TA 1-3	TA 1-4	Art 1-1	Art 1-2	Art 1-3	Art 1-4
Relative Displacement Ratio	6	1.00	1.01	1.02	1.05	1.00	1.01	1.04	1.05	1.00	1.00	1.00	0.97
	5	1.00	1.01	1.02	1.05	1.00	1.01	1.04	1.05	1.00	1.00	1.00	0.97
	4	1.00	1.01	1.02	1.05	1.00	1.01	1.04	1.05	1.00	1.00	1.00	0.97
	3	1.00	1.01	1.02	1.05	1.00	1.01	1.04	1.05	1.00	1.00	1.00	0.97
	2	1.00	1.01	1.02	1.05	1.00	1.01	1.04	1.05	1.00	1.00	1.00	0.97
	1.5	1.00	1.01	1.02	1.05	1.00	1.02	1.04	1.05	1.00	1.00	1.00	0.97
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Relative Acceleration Ratio	6	1.00	1.21	1.04	1.22	1.00	1.05	1.08	0.97	1.00	1.04	1.03	1.00
	5	1.00	1.08	1.02	1.09	1.00	1.00	0.97	0.96	1.00	1.03	1.02	0.99
	4	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	0.99	0.98	1.00	1.00	1.00	0.99
	3	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.98
	2	1.00	1.09	0.99	1.12	1.00	0.99	1.00	0.99	1.00	1.01	1.00	0.99
	1.5	1.00	1.18	1.00	1.23	1.00	1.09	1.10	1.01	1.00	1.02	1.01	0.99
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Relative Shear Force Ratio	6	1.00	1.03	1.00	1.03	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	1.00	1.05	1.01	1.06	1.00	0.99	0.98	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
	4	1.00	1.03	0.99	1.03	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
	3	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
	2	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99
	1	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99
Relative Moment Ratio	6	1.00	1.03	1.01	1.03	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00
	5	1.00	1.04	1.00	1.05	1.00	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99
	4	1.00	1.01	0.99	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
	3	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99
	2	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99
	1	1.00	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99	0.99	0.99

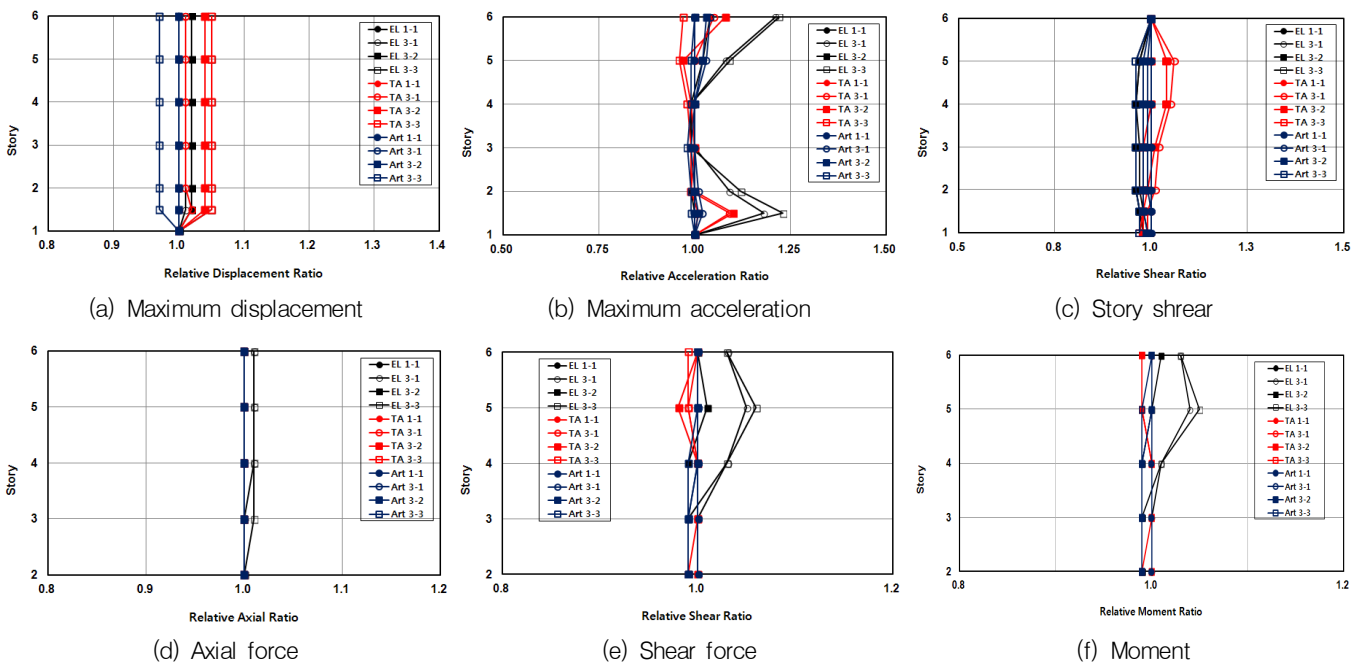


Fig. 6 Comparison of Analysis Results (Case-3)

Table 5 Analysis Results (Case-4)

Type	Story	EL 1-1	EL 4-1	EL 4-2	EL 4-3	EL 4-4	EL 4-5	EL 4-6	TA 1-1	TA 4-1	TA 4-2	TA 4-3	TA 4-4
Relative Displacement Ratio	6	1.00	0.95	0.93	0.91	1.03	1.07	1.08	1.00	1.00	1.00	0.99	1.04
	5	1.00	0.95	0.93	0.91	1.03	1.07	1.08	1.00	1.00	1.00	0.99	1.04
	4	1.00	0.95	0.93	0.91	1.03	1.07	1.08	1.00	1.00	1.00	0.99	1.04
	3	1.00	0.95	0.93	0.91	1.03	1.08	1.08	1.00	1.00	1.00	0.99	1.04
	2	1.00	0.95	0.92	0.91	1.03	1.08	1.08	1.00	1.00	1.00	0.99	1.04
	1.5	1.00	0.95	0.92	0.91	1.03	1.08	1.09	1.00	1.00	1.00	0.99	1.04
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Relative Acceleration Ratio	6	1.00	1.16	1.05	1.07	0.99	1.01	1.07	1.00	1.03	1.02	1.05	1.00
	5	1.00	1.03	1.01	1.04	0.99	0.99	1.04	1.00	1.03	1.03	1.05	1.00
	4	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.98	0.98	1.00	1.00	1.02	1.03	0.98
	3	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.98	1.00	1.02	1.05	1.06	0.99
	2	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99	0.99	1.02	1.00	1.04	1.06	1.06	1.01
	1.5	1.00	1.09	1.03	1.06	1.00	1.01	1.10	1.00	1.02	1.04	1.03	1.02
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Relative Shear Force Ratio	6	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
	5	1.00	1.01	1.01	1.02	1.00	1.01	1.03	1.00	1.01	1.01	1.02	1.00
	4	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.99	1.01	1.00	1.01	1.02	1.03	1.00
	3	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.99	0.98	1.00	1.01	1.02	1.02	1.00
	2	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.98	0.98	1.00	1.01	1.01	1.02	0.99
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Relative Moment Ratio	6	1.00	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.02	1.00	1.00	1.00	1.01	1.00
	5	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	1.00	1.02	1.00	1.01	1.02	1.03	1.00
	4	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.99	0.99	1.00	1.01	1.02	1.02	1.00
	3	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.99	0.98	1.00	1.01	1.02	1.02	0.99
	2	1.00	1.00	1.00	1.01	0.99	0.99	0.98	1.00	1.01	1.01	1.02	0.99
	1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

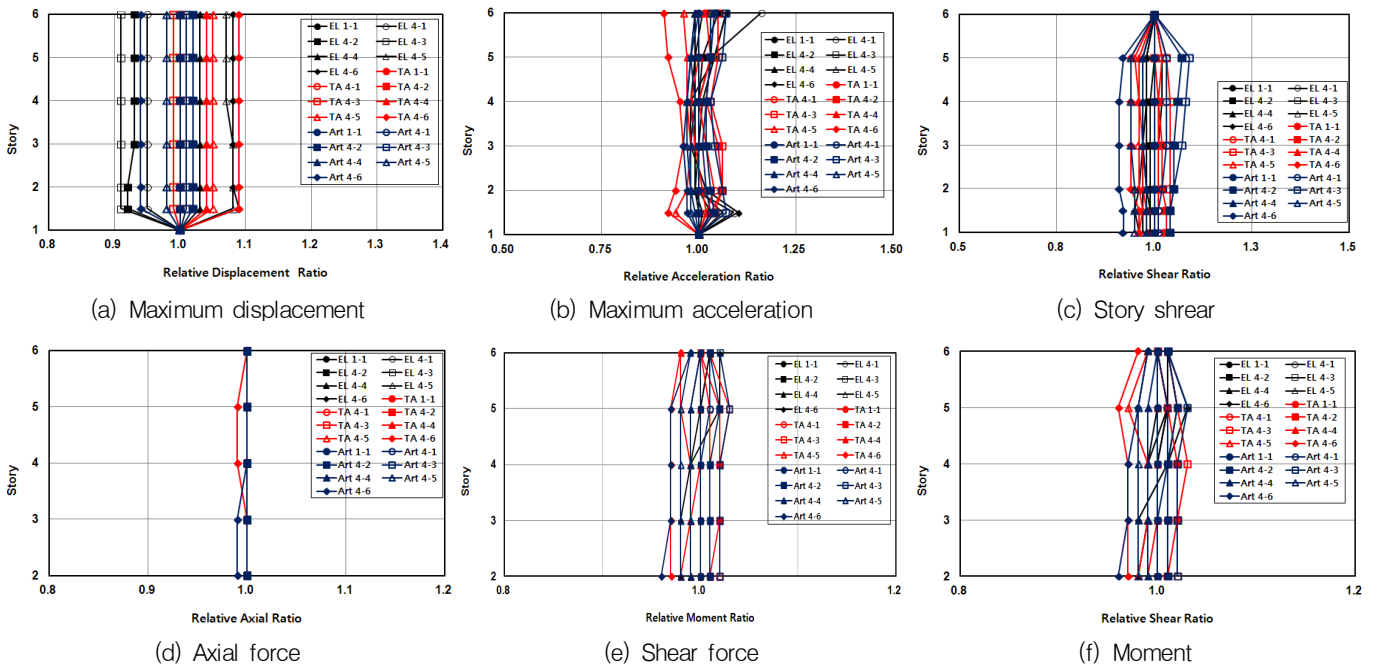


Fig. 7 Comparison of Analysis Results (Case-4)



해석결과와 유사한 결과를 나타내었다. 하지만 면진층의 강성의 합이 감소할수록 기본모델의 설계 변위 보다 약 10% 정도 면진층 변위가 증가하는 것으로 나타났다.

이는 면진층 강성의 총합이 줄어 설계변위가 증가한 것으로 판단된다. Fig. 7(b)의 최대응답가속도의 경우, 지진과 별로 다소 차이는 있으나 편심의 발생이 없어 층의 응답가속도 분포는 크게 변화되지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 7(c)의 층전단력의 경우에도 면진층 강성의 증감의 영향으로 상부층 층전단력 또한 동일하게 약 10% 전후로 증감하는 양상을 나타내었다. Fig. 7(d), (e), (f)는 면진층 상부 기둥 (B열 왼쪽 기둥)의 부재력을 상대비로 나타낸 것으로 축력의 경우에는 Case-1, Case-2 및 Case-3과 유사한 결과를 나타내었다. 하지만, 전단력과 모멘트 상대비의 경우에는 면진층 강성의 증감에 따라 약 2~3%의 차이로 나타내었으나 건물의 수직방향으로 그러한 차이의 분포로 일정하게 나타났다.

## 5. 결론

본 논문에서는 면진설계 시 면진층에 설치되는 면진장치의 강성차에 따른 건물의 질량중심과 면진장치의 강성중심 사이의 차이 따른 면진효과를 검토하였으며, 검토결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 면진설계 시 발생할 수 있는 건물의 질량중심과 면진층 강성중심의 차이에 따른 면진효과를 다양한 케이스를 통하여 분석한 결과, 각 지진과 별로 차이는 있으나 편심율이  $\pm 10\%$ 를 초과할 경우 최대응답가속도 및 면진층 상부기둥의 부재력이 약 5~10% 증가하는 결과를 나타내었다. 또한, 면진층 강성의 총합도  $\pm 10\%$ 를

- 초과할 경우 최대응답가속도, 층전단력 및 면진층 상부기둥의 부재력이 6~7% 증가하는 결과를 나타내었다.
- (2) Case-4의 해석결과, 면진층의 강성의 총합의 증감에 따라 설계변위 및 부재력이 증가하는 것으로 나타났다. 면진층 강성의 총합이 15% 감소할 경우 변위가 10% 증가하는 것으로 나타나, 설계 허용변위에 대한 재검토가 필요한 것으로 사료된다.
- (3) 제작오차가 15%까지 허용되는 면진장치를 그대로 사용할 경우 상부구조의 부재력이  $\pm 10\%$ 정도 변화가 예상됨으로 전수검사를 통하여 얻은 강성값을 기준으로 설계된 의도대로 편심이 발생하지 않도록 장치를 재배치하여 설계할 것을 추천한다.

## References

1. ASCE/SEI (2010), Minimum design loads for buildings and other structures, ASCE7-10, 165-178.
2. Chum, Y. S. etc (2005), Field Application and Outcome Analysis of Base Isolation System, Housing and Urban Research Institute.
3. Chun, Y. S., Hur, M. W. (2010), Seismic isolation effects according to set up the isolation period in the medium and low-rise framed building, *Journal of KSMI*, 14(6), 1-7 (in Korean).
4. Korea Road & Transportation Association (2013), Standard Specification for Highway Bridges (in Korean).
5. Moon, D. S. (2004), Application of Seismic Isolators for Irregular Structures, Master of engineering, Seoul National University of Technology.

Received : 01/20/2014

Revised : 04/07/2014

Accepted : 06/03/2014

## 요 지

본 연구에서는 건물의 질량중심과 면진층의 강성중심 사이의 차이에 따른 면진효과에 대하여 살펴보았다. 면진기술은 면진층에 설치되는 면진장치의 성능에 크게 의존하는 기술이므로 면진장치 제작 후 전수검사를 통하여 면진장치의 수평강성을 검토하게 되어 있다. 하지만 면진장치 성능실험 시 각각의 면진장치의 품질기준은 건축기준에는 정해져 있지 않으며, 이로 인해 설계 시 적용된 강성과 실제 강성의 차이가 발생하여 면진층 상부 부재에 큰 문제를 야기할 수 있다. 연구결과, 최대응답변위의 차이는 크게 나타나지 않았으나 편심이 증가할수록 최대응답가속도, 층전단력 및 상부구조의 부재력은 크게 증가하여 일부 부재에서는 과도한 손상이 예상된다. 따라서 면진층은 실제 장치 제작 후 전수검사를 실시하여 반드시 설계된 의도대로 편심이 발생하지 않도록 장치를 재배치할 필요가 있으며, 가능하다면 건물의 질량중심과 강성중심의 차이는 동일하게 설계할 것을 추천한다.

**핵심 용어** : 면진장치, 면진층 강성, 면진효과