

중·저층골조에서 면진주기 설정에 따른 면진효과

Seismic Isolation Effects According to Set up the Isolation Period in the Medium and Low-rise Framed Building

천 영 수¹⁾*

Chun, Young Soo

허 무 원²⁾

Hur, Moo Won

Abstract

Seismic isolation offers an attractive approach for reducing seismic loads in the building and its components. This paper deals with the seismic isolation effects due to variation in period ratio between superstructure and isolation layer of the building. Seismic isolation effects of the moment-resisting frames with the various period ratio were studied by nonlinear time history analysis, and the guidelines on the stiffness ratio of the superstructure and isolation layer of the building for the effective seismic isolation follow from the results of this study. It is recommended that the isolation period should be greater than 2.5 times of that of the superstructure for the effective seismic isolation.

Keywords : Seismic isolation, Period ratio, Isolation effect, Guidelines

1. 서론

면진기술은 현재 세계 여러 나라에서 강진으로부터 중요한 건물들을 보호하고, 구조물의 내진성능 향상을 도모하기 위한 실무적인 해결책으로서 받아들여지고 있다. 하지만 국내의 경우에는 특수한 목적에 의한 몇몇 설계시공사례가 보고 되고 있을 뿐 아직까지 구체적인 설계기술은 정착되지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 효과적인 면진구조를 구현하기 위한 설계기술 개발의 일환으로 건물골조와 면진층 간의 진동주기비에 따른 면진주기의 설정방법에 대하여 분석해 보고자 한다.

면진구조는 수평방향으로 작은 강성을 가지는 면진장치를 건물의 밑면에 설치하여 상부 구조를 장주기화 함으로써 건물로 유입되는 지진에너지를 감소시켜 건물을 안전하게 보호하는 기술로서, 일반적으로 상부 구조는 평행 이동 하듯 천천히 흔들리는 움직임을 갖게 되고 이에 따라 건물 각 층의 가속도 분포가 일정하게 유지되며 층간 변위가 현저하게 감소하는 효과를 얻게 된다. 하지만 면진기준을 포함하고 있는 여러 나라의 기준들에서는 상부

구조와 면진층 간의 진동주기비에 따라 이러한 효과가 다르게 나타날 수 있다고 지적하고 있으며, 그에 따른 제한 규정들을 포함하고 있다(Demin Feng, 2007). 이 경우 주목되는 점은 이러한 제한규정들이 기준마다 서로 다르다는 것으로, 건물의 특성에 따라 목표 면진주기를 어떻게 설정하느냐에 따라 면진효과는 다르게 나타나게 될 것으로 예상된다.

따라서 본 논문에서는 상부구조에 있어서 보-기둥 강성비 변화에 따른 골조의 특성과 상부구조와 면진층 간의 진동주기비에 따른 면진효과를 분석해 보고, 상부 골조의 특성과 상부골조의 주기와 목표 면진주기의 설정에 따라 면진효과가 어떻게 달라지는가에 대한 정보를 제공하여 향후 면진건물을 설계하기 위한 기본계획을 세우는데 있어서 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구대상 건물 모델링

본 연구에서는 골조의 동적특성을 Roehl(1972)에 의해 제안된 바에 따라 건물의 기본진동주기(T)와 보-기

1) 정회원, 한국토지주택공사 수석연구원, 공학박사
2) 정회원, DBR동일 면진제진기술연구소 선임연구원

* Corresponding author : cysoo@lh.or.kr 042-866-8416

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

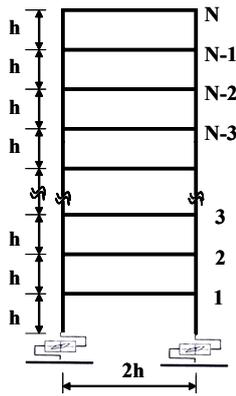


Fig. 1 Modeling for the object of study

동 강성비(ρ)에 의하여 아래와 같이 정의하고, 건물의 층 높이를 h 로 하고 스패를 $2h$ 로 하는 1경간 골조로 모델링하여 골조의 특성에 따른 면진효과를 검토해 보고자 한다. 건물의 모든 부재들은 일정한 단면을 갖고 있으며 각 층의 질량과 강성의 분포는 일정한 것으로 가정한다. Fig. 1은 연구대상 모델을 도식화하여 나타낸 것이며, 본 연구에서 고려하는 주요 변수와 연구범위는 다음과 같다.

2.1. 보-기둥 강성비(ρ)

보-기둥 강성비는 식 (1)과 같이 정의될 수 있으며, 0에서 ∞ 로 그 값이 변함에 따라 골조의 다른 특성을 나타내게 된다.

$$\rho = \frac{\sum_{beam} \frac{EI_b}{L_b}}{\sum_{column} \frac{EI_c}{L_c}} \quad (1)$$

여기서, E =탄성계수(elastic modulus)

I_b =보의 단면2차모멘트

I_c =기둥의 단면2차모멘트

L_b =보의 길이

L_c =기둥의 길이

ρ 값은 건물 중간층에서의 값을 취하는 것으로 한다. 극한값 $\rho=0$ 는 절점의 회전에 어떠한 구속도 갖지 않는 보로 이루어진 캔틸레버이고 극한값 $\rho=\infty$ 는 절점 회전이 완전하게 구속되어 있는 전단건물(shear building)을 나타낸다. 두 극한값 사이의 값은 보와 기둥이 절점회전 정도에 따라 휨 변형을 일으키는 골조를 나타내게 된다. 본

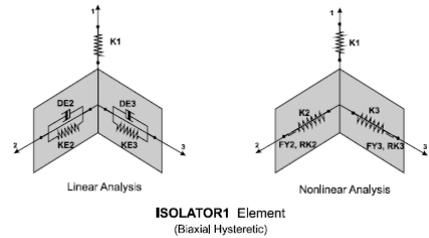


Fig. 2 Base isolated 3-dimensional frame in ETABS

논문에서는 ρ 값을 기존 연구를 바탕으로 국내 건물골조의 특성을 나타내기 위해 충분한 0.05와 2.0 사이로 범위를 정하고, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0의 7가지 경우에 대하여 해석을 실시하였다.

2.2. 골조의 기본 진동주기(T_1)

건물의 기본 진동주기는 일반적으로 채용되는 건물 층수에 대한 약산 식을 기준으로 다음과 같은 범위를 연구 대상으로 한다.

$$0.6 T \leq T_1 \leq 1.4 T \quad (2)$$

여기서, $T = 0.1N$

N = 건물의 층수

2.3. 건물의 층수(N)

건물의 층수는 15층을 중심으로 분석하였으며, 중저층에서 높이에 따른 영향을 고려하기 위하여 저층 건물로서 5층의 경우를 비교·분석하였다.

본 연구에서는 상기와 같은 변수들과 연구범위를 고려하여 7개의 강성비 모델과 6개의 주기 및 2개의 층수 모델을 구성하여 총 84개의 모델을 해석하고 분석하였다. 해석에 사용된 면진장치의 이력특성은 실제 면진설계에서 적용된 복합면진시스템의 특성(이선형 모델)을 사용하였으며(주택도시연구원 2005), 지진동은 일반적으로 많이 사용되고 있는 El Centro EQ를 사용하여 시간이력 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 ETABS v8.48로 상부구조는 프레임 요소로서 모델링하고, 면진장치는 2축방향으로 면진장치의 이선형적인 특성을 모델링할 수 있는 Isolator1 요소를 사용하여 전체 모델의 국부적인 비선형성을 모델링 하였다(Fig. 2 참조).

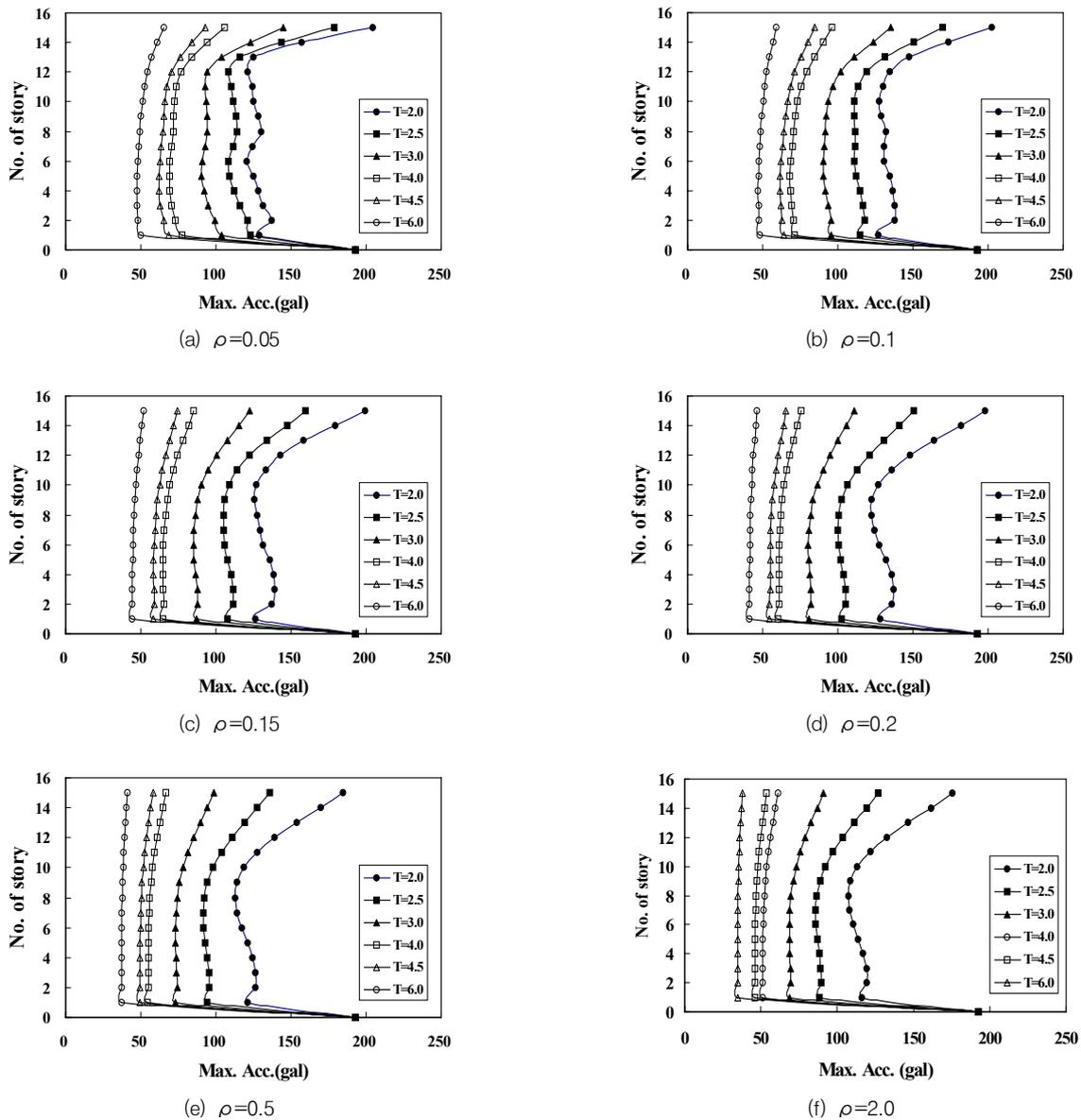


Fig. 3 Distribution of the acceleration of superstructure due to variation in period ratio(15F)

또한 상부구조의 감쇠는 5%의 점성감쇠를 가정하였으며, 면진층 부분은 면진장치의 이력감쇠이외에 점성감쇠는 고려하지 않았다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 상부구조와 면진층 간의 주기비에 따른 면진효과

Fig. 3은 면진건물의 상부구조와 면진층 간의 주기비에 따른 면진효과를 알아보기 위하여 각각 $\rho=0.05 \sim \rho=2.0$ 일 때 면진건물의 주기변화에 따른 각 층별 최대 응답가속도 분포를 나타낸 것이다.

면진건물의 경우 건물의 진동주기를 결정하는 강성은 면진층의 강성에 의하여 대표되기 때문에 상부구조와 면진건물의 주기 비율은 결국 상부구조와 면진층의 강성비율을 나타낸다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상부구조의 진동주기를 고정한 조건 하에서 면진건물의 진동주기를 변화시킴으로서 상부구조와 면진층의 강성비 변화에 따른 면진효과를 검토하였다. 이 경우 면진건물의 상부구조(비 면진건물)는 상기 식 (2)의 조건을 고려하여 15층 건물의 경우 1.5초의 주기를 갖도록 설정하였다.

전술된 바와 같이 면진구조는 상부 구조가 평행이동 하듯 천천히 흔들리는 움직임을 갖게 되고 이에 따라 건물

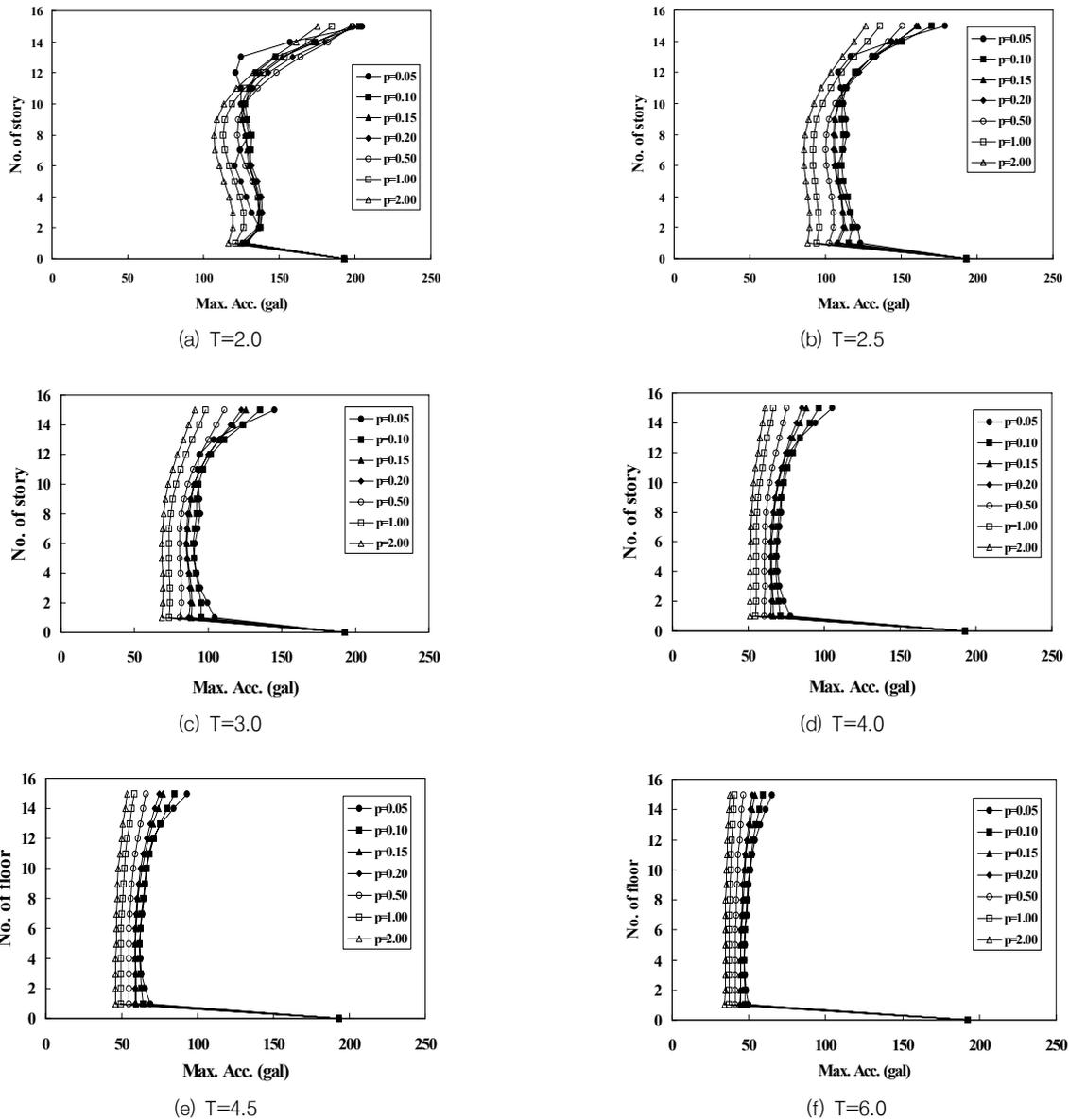


Fig. 4 Distribution of the acceleration of superstructure due to variation in the stiffness ratio of superstructure(15F)

각 층의 응답가속도 감소는 물론 그 분포 또한 일정하게 유지되는 특성을 갖게 되며, 이러한 응답효과 크기를 비교함으로써 면진건물로서의 기능이 충분히 발휘되고 있는지의 여부를 판단할 수 있다. Fig. 3을 보면 $\rho=0.05 \sim \rho=2.0$ 인 경우 모두 면진건물의 주기가 증가함에 따라 건물 각 층의 응답가속도 분포가 고차모드의 영향을 포함하는 형태로부터 강체거동에 가깝게 일정한 분포를 갖는 형태로 변화하고 있다는 것을 알 수 있다. 가속도의 감소라는 관점에서 보면 상기 건물들은 모두 가속도의 감소효과를 얻고 있으나 상부구조와 면진층 간의 진동주기 비가 낮은 경우에는 면진층에서 감소된 가속도가 일정

하게 유지되지 못하고 건물 최상층에서 다시 증가되는 양상을 나타내고 있어 효과적인 면진을 기대하기 어렵다. 상부구조에서 가속도의 감소는 곧 부재설계에 있어서 하층의 감소를 의미한다는 점을 감안한다면 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 상부구조와 면진층 간의 진동주기 비를 일정 수준 이상으로 유지하여 설계할 필요가 있다.

또한 상부구조와 면진층 간의 진동주기 비가 낮은 경우에는 고차모드의 영향으로 응답가속도 분포가 일정하지 않아 건물의 사용성이라는 측면에서 크게 향상된 효과를 기대하기 어렵고, 예상치 못한 특정 층에 하중이 크게 작용하여 연약 층을 형성함으로써 건물의 전체적인 거동

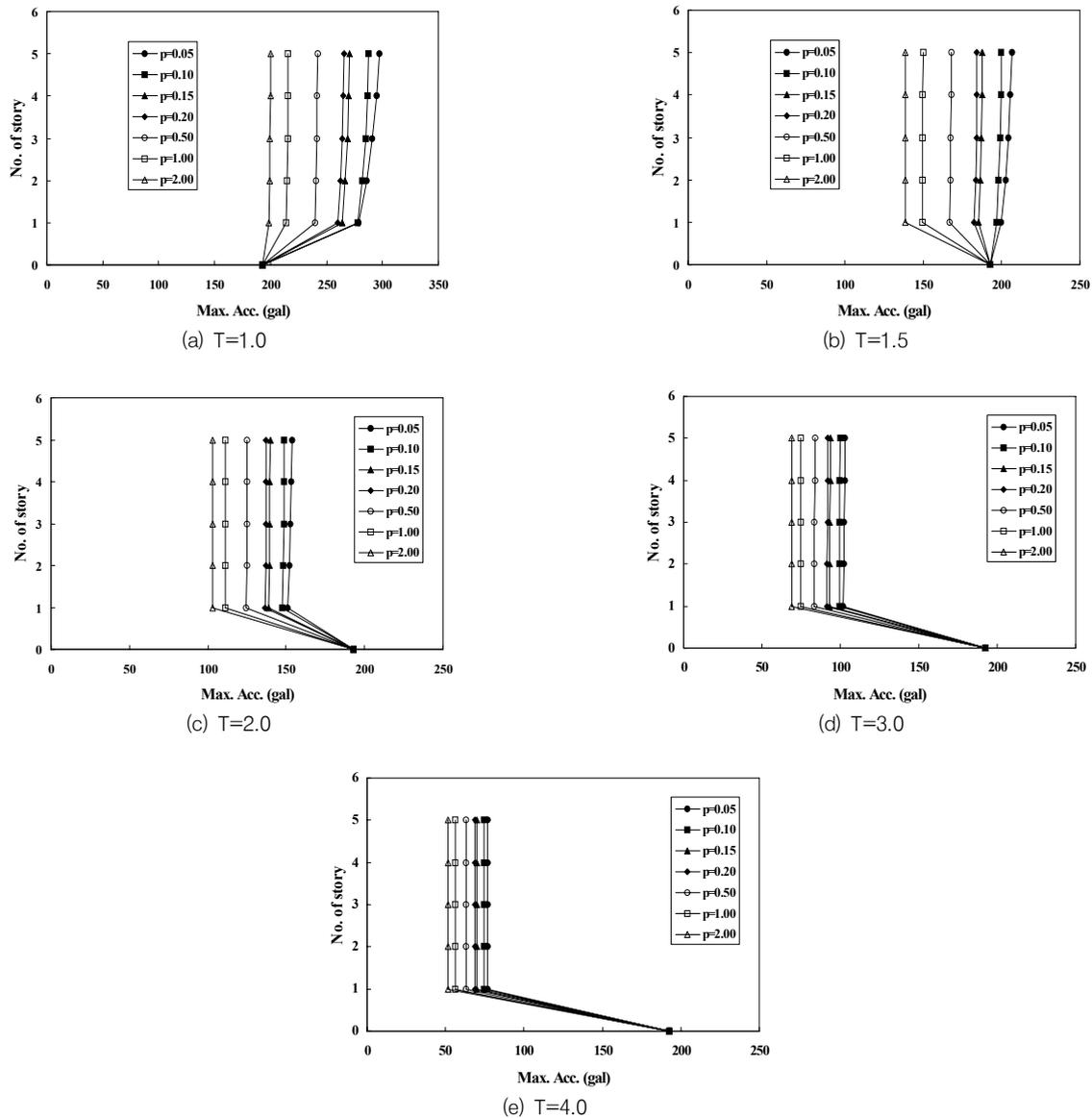


Fig. 5 Distribution of the acceleration of superstructure due to variation in period ratio(5F)

과 위험예측을 어렵게 할 가능성이 높아 설계 시 주의할 필요가 있다는 점에서 역시 상부구조와 면진층 간의 진동 주기 비를 일정 수준 이상으로 유지하여 설계하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.

상부구조와 면진층 간의 진동주기에 따른 면진효과라는 관점에서 볼 때 실무적인 입장에서는 유효한 면진효과를 얻기 위하여 어느 정도의 주기비가 반드시 확보될 필요가 있는지에 대하여 정량적인 기준을 설정할 필요가 있다. 하지만 아직까지 특정 응답의 형태로부터 면진효과가 있는지 없는지에 대한 정량적인 기준은 정확히 정립되어 있지 않은 상태이며 실제적으로 그러한 기준은 설계자에 의하여 판단되어야 할 문제이다.

다만, Fig. 3의 비교결과를 토대로 볼 때 면진설계로부터 얻고자 하는 바가 응답가속도의 감소와 사용성 증가를 목적으로 한 일정한 응답가속도 분포라는 점을 고려한다면 중·저층 건물에 있어서 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 상부구조와 면진층 간의 진동주기비는 최소한 2.5배 이상을 채택하여 설계할 것을 추천한다. 참고적으로 면진에 대한 적용사례가 많은 일본의 경우 경험적으로 4.0초대의 면진을 적극 추천하고 있다는 점에서 본 연구에서의 추천내용은 좀 더 설득력을 가질 수 있을 것으로 사료된다.

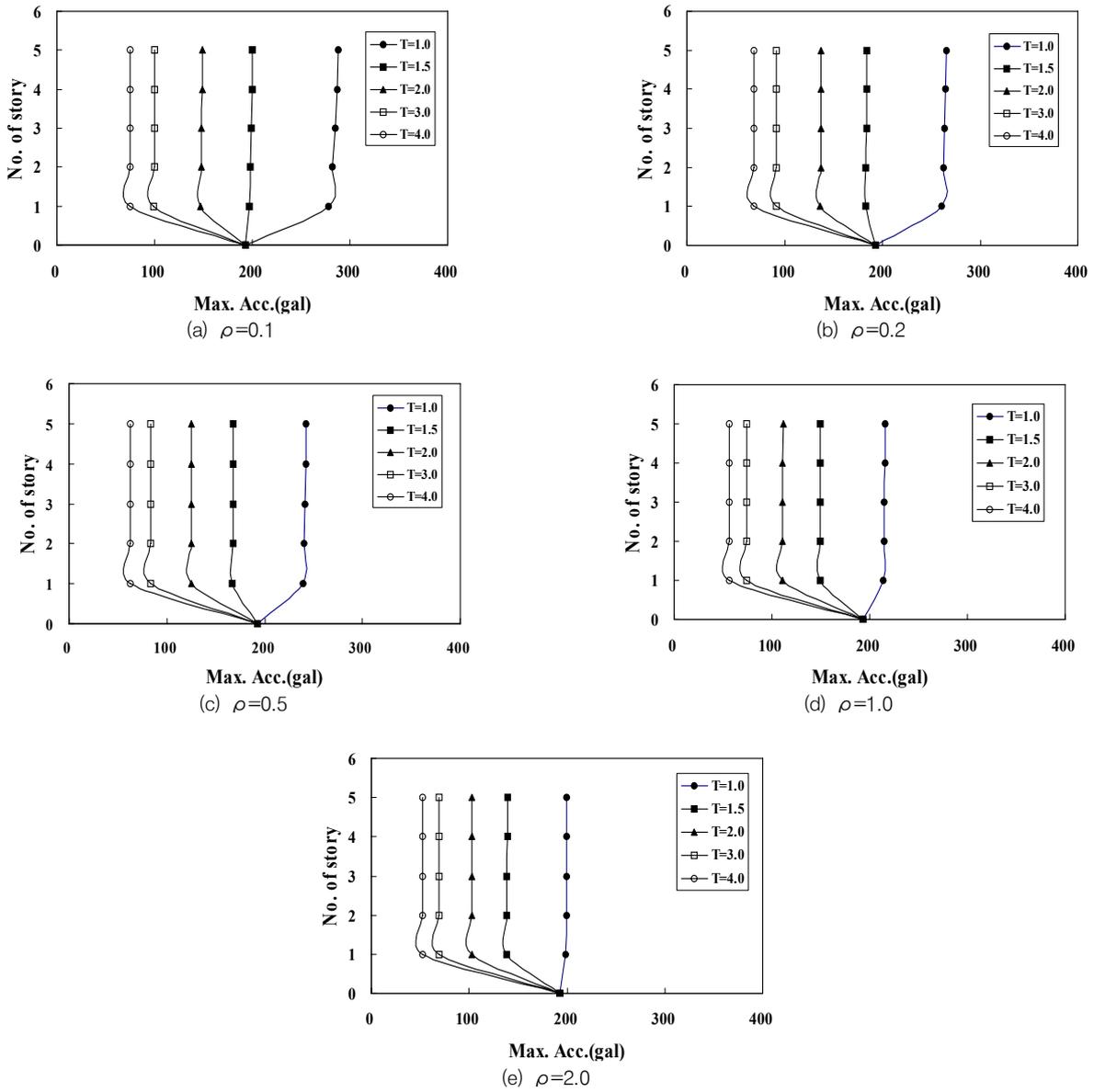


Fig. 6 Distribution of the acceleration of superstructure due to variation in the stiffness ratio of superstructure(5F)

3.2 보-기둥 강성비에 따른 효과

Fig. 3으로부터 또 한 가지 주목되는 점은 상부구조와 면진층 간의 주기비 조건이 같다면 상부구조의 보-기둥 강성비(ρ)에 따른 응답은 크게 다르지 않다는 것이다. 이러한 사실은 결국 면진설계 시 상부구조의 강성(또는 골조특성)에 따라 목표 면진주기를 다르게 고려할 필요가 없다는 사실을 말해주는 것으로 면진효과는 오직 상부구조와 면진층 간의 진동주기비에 따라서 만이 달라질 수 있음을 시사하고 있다.

Fig. 4은 각각 상부구조와 면진층과의 주기비 차이가

1.33배(2.0초)부터 4배(6.0초)인 경우까지 보-기둥 강성비(ρ) 변화에 따른 응답가속도 분포를 나타낸 것으로, 앞서 지적되었듯이 보-기둥 강성비(ρ) 변화에 따른 차이는 그리 크지 않다는 것을 확인할 수 있다. 다만, 이 경우 미소한 차이이기는 하나 $\rho=0$ 에 가까운 건물이 이러한 강성비 변화에 더 민감하다는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서 대상으로 한 15층규모 건물의 경우 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 목표 면진주기를 2.5배 이상으로 설정하는 것이 가속도 감소효과와 함께 일정한 응답가속도 분포를 얻는데 보다 효과적이다 라는 것을 다시 한 번 확인 가능하다.

3.3 저층건물에서의 주기비와 강성비에 따른 면진효과

Fig. 5와 Fig. 6은 상기에서 설정된 기준이 건물의 층수에 상관없이 저층건물에 까지 일반적으로 적용될 수 있는지의 여부를 알아보기 위하여 저층건물(5층)을 대상으로 다양한 상부구조와 면진층 간의 주기비와 다양한 보-기둥 강성비(ρ)를 갖는 조건에서 면진주기 1.0초, 1.5초, 2.0초, 3.0초, 4.0초에서의 해석결과를 나타낸 것이다.

Fig. 5와 Fig. 6의 결과는 저층 건물의 경우 예측된 바와 같이 응답가속도 분포에 있어서 고차모드의 영향은 문제되지 않으나 목표 면진주기의 설정에 따라 면진효과는 분명히 다르게 나타날 수 있음을 보여주고 있다. 특히 상부구조에서 보-기둥 강성비가 낮은 건물의 경우 상부구조와 면진층 간의 주기비를 3배(1.5초)로 설정한 경우에 있어서도 면진으로 인한 가속도의 감소효과는 기대수준 이하의 값밖에 얻을 수 없음을 보여주고 있다.

이러한 결과는 입력지진동으로 사용한 El Centro지진파의 탁월지진수 영역을 고려한다면 충분히 설명 가능한 결과로서 공진으로 인한 효과가 영향을 미친 결과라 사료된다. 따라서 이 경우에는 상부구조와 면진층 간의 강성비를 일정수준 이상으로 유지하는 조건과 함께 면진주기를 역시 일정 수준 이상으로 확보할 필요가 있는 것으로 판단되며, 상기 결과를 기준으로 볼 때 최소한 목표 면진주기를 2.0초 이상 설정하여 설계할 것을 추천한다. 이러한 제한 조건은 기존 기준들에 의해서도 이미 언급되고 있는 내용으로 유효한 면진효과를 얻기 위하여 반드시 고려되어야 할 인자인 것으로 판단된다. 또한 대부분의 면진기준이 그러하듯이 건설에 제한을 두고 있지는 않으나 연약지반의 경우 장주기 지진파에 의한 영향에 유의할 것을 강조하고 있으며, 지반과의 공진효과를 피하기 위한 조치의 의미도 내포하고 있다는 사실을 유념해 둘 필요가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 상부구조와 면진층 간의 진동주기비(강성비) 및 다양한 골조특성에 따른 면진효과에 대하여 살펴보고자 하였으며, 이로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 골조형식 건물의 경우 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 최소한 상부구조의 고유진동주기 대비 2.5배 이상의 면진주기를 확보하고, 목표 면진주기를 2.0초 이상으로 설정하여 설계할 것을 추천한다.
- (2) 상부구조와 면진층 간의 주기비 조건을 만족한다면 상부구조의 보-기둥 강성비로 정의되는 골조의 특성은 면진효과에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 이현호, 천영수, "면진건물의 포락해석을 위한 설계용 도표 산정", 구조물진단학회지, 10권2호, 2006.3, pp.56-66
2. 일본도로협회, "도로교시방서 및 동 해설", 일본도로협회 편, 2002
3. 천영수 등, "면진기법 시험적용 및 성과분석", 주택도시연구원 연구보고서, 2005, pp.20-24
4. 천영수 등, "면진무량판 구조시스템 개발 및 경제성분석", 주택도시연구원 연구보고서, 2007, pp.30-36
5. AASHTO, "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", AASHTO, 2nd Ed., 1999
6. ASCE/SEI, "Minimum design loads for buildings and other structures", ASCE 7-05, 2005
7. Demin Feng, "A comparative study of seismic isolation codes worldwide", Proceedings of SIViC International Seminar, 2007, pp.1-28
8. Roehl, J. L., "Dynamic response of ground-excited building frames", Ph.D thesis, Rice University, Houston, Texas, 1972. Oct.

(접수일자 : 2010년 5월 17일)
(심사완료일자 : 2010년 7월 18일)

요 지

본 논문에서는 상부구조에 있어서 보-기둥 강성비 변화에 따른 골조의 특성과 상부구조와 면진층 간의 진동주기비에 따른 면진효과를 분석해 보고, 상부골조의 주기와 목표 면진주기의 설정에 따라 면진효과가 어떻게 달라지는가에 대한 정보를 제공하여 향후 면진건물을 설계하기 위한 기본계획을 세우는데 있어서 필요한 기초 자료를 제공하고자 한다. 그 결과 건물골조의 경우 유효한 면진효과를 얻기 위해서는 최소한 상부구조의 고유진동주기 대비 2.5배 이상의 면진주기를 확보하고, 목표 면진주기를 2.0초 이상으로 설정하여 설계할 것을 추천한다.

핵심 용어 : 면진, 진동주기비, 면진효과, 설계지침