

# 필로티형 건물의 비선형 시간이력해석 Non-linear Time History Analyses of a Piloti-type Building Structure

이한선\*                      고동우\*\*  
Lee, Han Seon              Ko, Dong Woo

---

## ABSTRACT

Many RC building structures of multiple uses constructed in Korea have the irregularities of torsion and soft story at bottom stories. A typical irregular building was selected as prototype and shaking table tests were performed to investigate the seismic performance of this building. The objective of this study is to evaluate the correlation between the experimental and analytical responses of this irregular building structure subjected to the earthquake excitation by using OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation). The results of analyses simulate well the effect of axial forces on the shear force of column and axial deformation. However, some discrepancy between analytical and experimental results in the distribution of shear forces and overturning deformation were observed.

---

## 1. 서론

1995년 고베지진과 1999년 터키와 대만지진에 이어 지난 2월에 발생한 이란지진 등에서 보듯이 대형지진에 의한 피해는 국가의 경제, 사회적인 면에서 큰 손실을 주고 있다. 이러한 가운데 근래 우리나라에서 급증하고 있는 상부벽식-하부골조의 형태를 띠는 비정형 구조물은 모멘트 저항골조나 벽식구조와는 달리 하부골조에서 연약층 파괴가 발생할 가능성이 높으므로 지진에 의한 대형 피해가 우려되는 대표적인 건물의 형태라고 할 수 있다. 따라서, 향후 발생할 수 있는 지진에 대비할 수 있도록 이와 같은 건물을 설계하기 위해 건물의 동적특성을 명확히 파악하는 것은 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 이미 수행된 1/12 축소 17층 주상복합 건물의 진동대 실험에서 얻어진 비정형 건물의 반응과 비선형 시간이력해석을 통해 얻은 건물의 반응을 비교함으로써 해석 프로그램의 한계와 실험에서 발견하지 못한 동적특성을 파악하고자 한다.

---

\* 정회원 · 고려대학교 건축공학과, 교수

\*\* 학생회원 · 고려대학교 건축공학과, 박사과정

## 2. 대상건물의 선정과 설계

우리나라의 대표적인 비정형건물에 해당하는 주상복합건물에 대한 실제 시공사례를 조사<sup>(1)</sup>하여 그림 1과 같은 전형적인 비정형 건물을 정하였다. 하부골조는 보-기둥 골조로 2개층으로 이루어져 있고, 상부층은 벽식구조로서 15개층으로 이루어져 있다. 이 건물에 대한 지진거동을 파악하기 위해 1/12 축소모델을 이용한 진동대 실험을 수행하였다. 상부구조물의 강성이 하부골조부분보다 훨씬 크므로 실험체 상부구조물은 콘크리트 더미(dummy)로 제작하고, 하부골조부분은 실제 구조물에 최대한 가깝도록 상사성에 맞추어 정확히 제작하였다. 상사성의 원리에 따라 줄어든 무게를 보정할 부가질량용 철판을 상부구조물에 설치하였는데, 진동대성능의 한계로 인해 상부부가질량은 실제 요구량의 1/2만 설치하였다. 실험체 제작, 상사성의 원리 및 세팅에 대한 사항은 참고문헌<sup>(2)</sup>에 언급되어 있다. 그림 1은 대상건물의 입면과 평면, 그리고 설계된 부재단면을 보여준다.

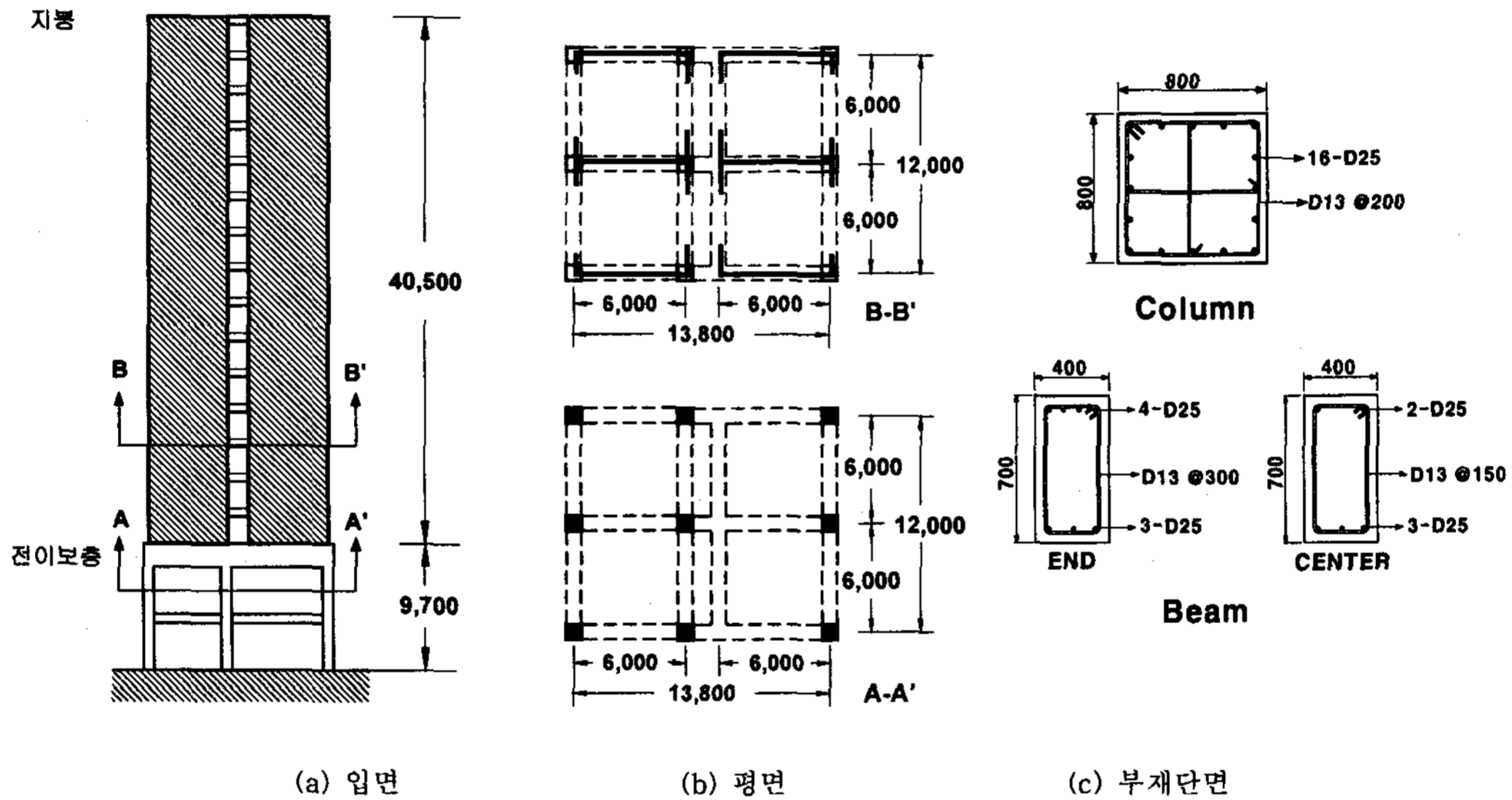


그림 1 대상건물과 부재설계결과

## 3. 해석모델

대상건물의 비선형시간이력 해석을 수행하는 프로그램으로 U.C. Berkeley의 PEER Center에서 제공하는 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)<sup>(3)</sup>를 사용하였다. OpenSees는 지진에 의한 구조, 지반 시스템의 거동을 모사하기 위한 소프트웨어 frame work로 여러 명의 이용자와 관리자가 원격적으로 연계되는 공동활동영역의 하나로 구상된 시스템으로서 기본적으로 사용하는 비선형 지진해석프로그램은 Objective-oriented Finite Element Analysis program이다. OpenSees는 보-기둥요소, zero-length요소, 트러스요소, quad 요소등을 포함하고 있으며, 12가지 비선형 이력모델을 4가지 단면모델에 적용함으로써 비선형적인 거동을 나타낼 수 있어 일반건축물 뿐만 아니라 교량, 댐 등과 같은 토목구조물, 지반의 운동에 대한 해석까지 가능하다.

그림 2는 해석에 적용한 콘크리트와 철근의 이력모델, 그리고 기둥의 비선형 Fiber 단면모델을

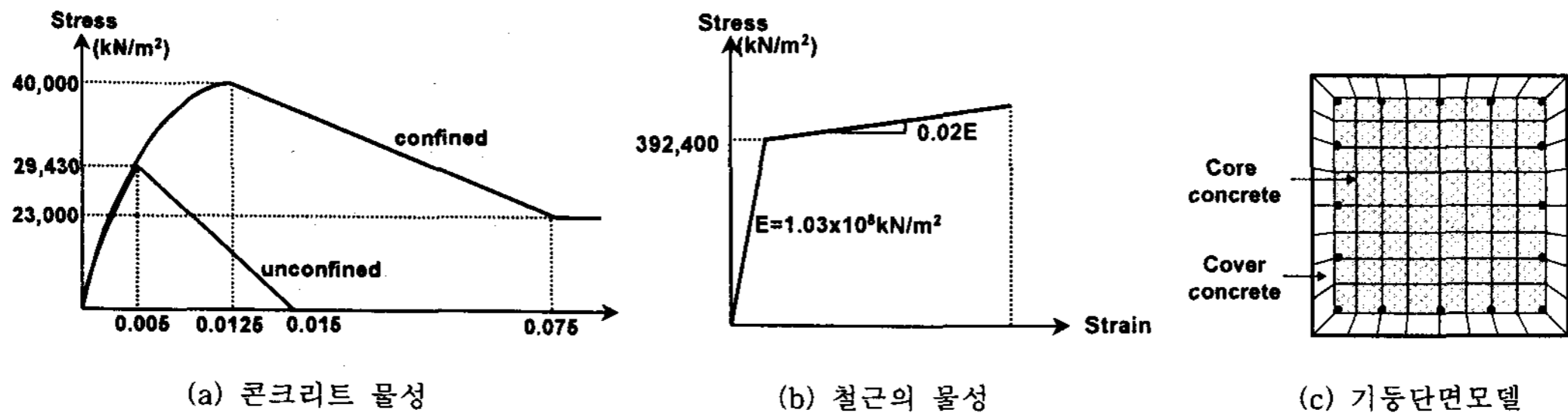


그림 2 재료의 물성과 기둥의 단면 모델

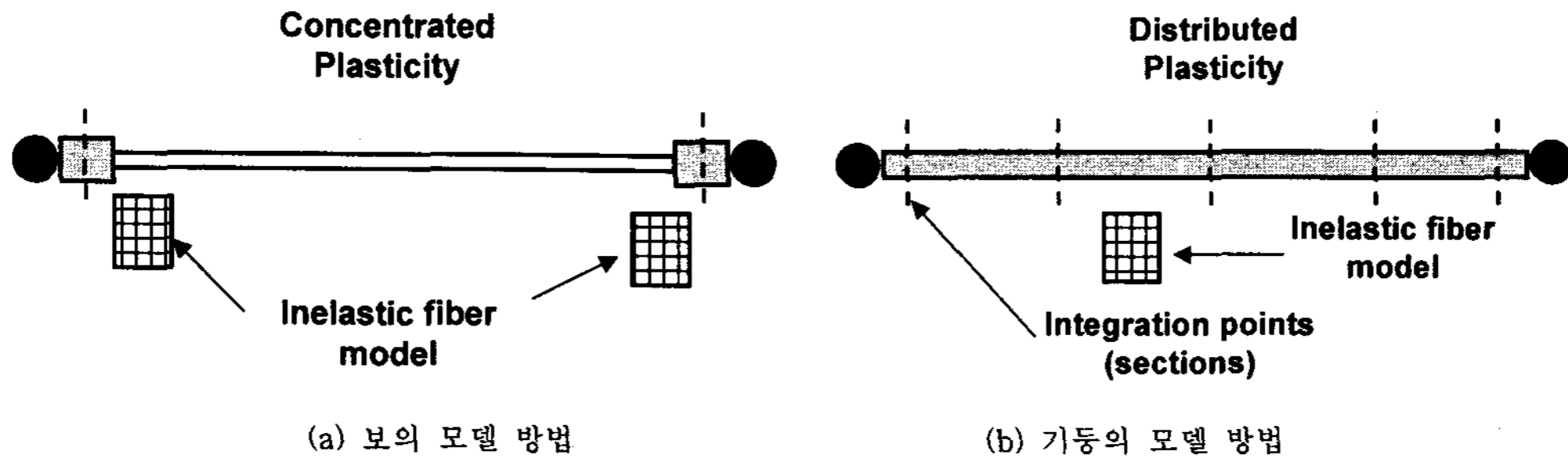


그림 3 보와 기둥의 모델 방법

보여준다. 기둥의 피복과 보의 경우 비구속콘크리트의 물성을 적용하였으며, 기둥의 코어부분은 횡철근에 의해 구속되기 때문에 구속콘크리트의 물성을 적용하였다. 단, 모델콘크리트의 경우 실물콘크리트보다 탄성계수가 낮기 때문에, 최대강도 시 비구속콘크리트의 변형률을 0.005로 정하고, 철근의 탄성계수는  $1.03 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 으로 철근의 탄성계수의 1/2을 적용하였다. 구속콘크리트의 경우 횡철근의 배근에 따라 구한 유효 최대횡압력과 구속콘크리트의 압축력을 이용하여 구속콘크리트의 응력-변형률 관계를 구하는 Paulay와 Priestley의 방법<sup>(4)</sup>을 따랐다. 그림 2 (c)는 기둥의 비탄성거동을 묘사하기 위한 fiber모델을 보여준다. 주근 안쪽은 구속콘크리트로, 피복부분은 비구속콘크리트로 모델하였다.

OpenSees는 그림 3과 같이 부재의 양 단부에 비탄성거동을 묘사하는 부분이 집중되는 concentrated plasticity모델과 부재 전체에 걸쳐 비탄성거동을 발생시키는 distributed plasticity 모델로 보-기둥 요소를 나타낸다. 대상건물의 경우 보는 concentrated plasticity모델을, 기둥은 distributed plasticity 모델을 적용하였다. 이상의 요소를 이용하여 그림 4와 같이 건물을 모델하였다. 하부골조부분은 비선형부분을 상세히 모델한 반면, 상부골조부분의 탄성계수는  $2.06 \times 10^9 \text{ kN/m}^2$ 로서 하부골조부분보다 약 20배 큰 값을 적용하였으며, 각층의 질량중심에 X, Y, RZ성분의 층질량을 집중시킨 후 각 층의 절점을 rigid link로 구속시켰다. 해석에 사용된 지진파는 실험 시 적용한 파와 동일한 Taft파의 최대가속도를 조정하여 사용하였다.

#### 4. 실험과 해석의 상관성

본 논문에서는 우리나라의 설계지진하중에 해당하는 Taft030과 Taft080의 결과를 바탕으로 해석결과와 비교하였다.

#### 4.1 전체거동

그림 5와 그림 6은 각각 Taft030과 Taft080일 때 해석결과와 나타난 전이보층과 지붕변위를 실험결과와 비교하고 있다. Taft030일 때 지붕과 전이보층 변위의 형태는 거의 유사하였으나, 해석결과 최대 전이보층 변위는 실험결과의 1.3배이나, 지붕변위는 해석결과가 실험결과의 83%에 불과하였다. Taft080의 경우도 Taft030과 마찬가지로 전이보층의 경우 해석값이 실험값보다 큰 반면, 지붕변위는 해석결과가 실험결과에 76%에 불과하였다. 특히, Taft080일 때는 7초를 넘기면서 해석과 실험결과의 위상이 서로 엇갈렸다. 실험체의 경우 이전단계 실험에서 누적된 손상이 존재하는 상태에서의 지진반응이나, 해석의 경우 초기 손

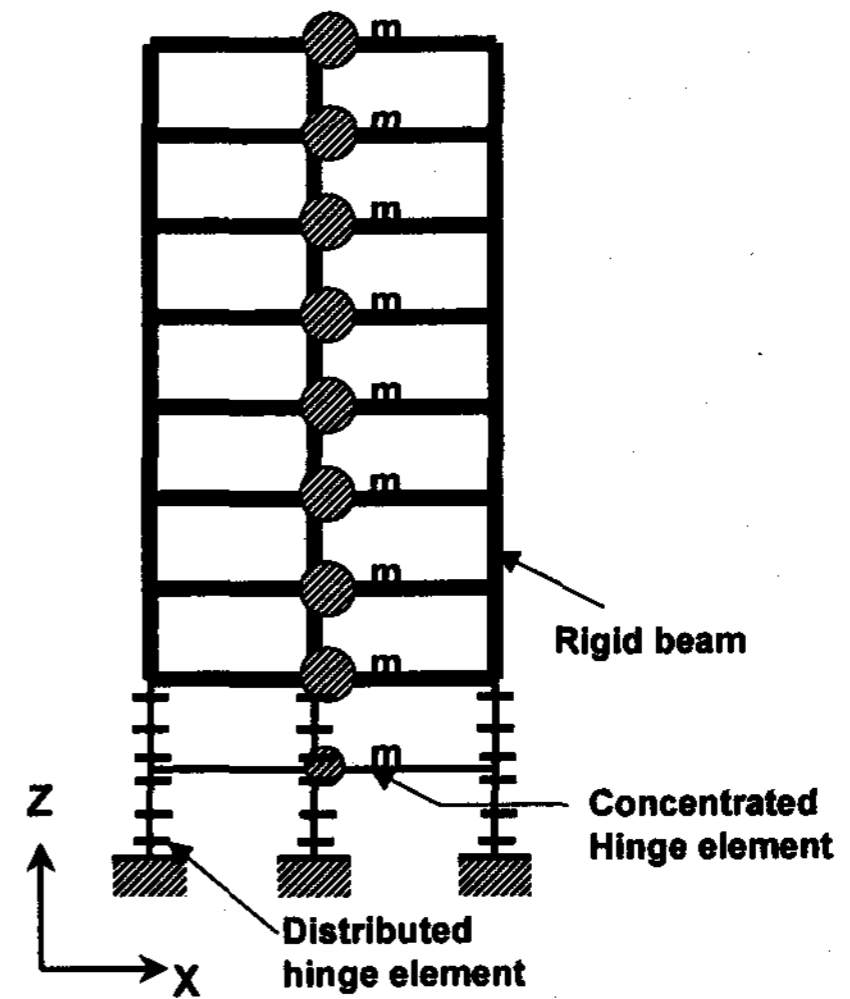
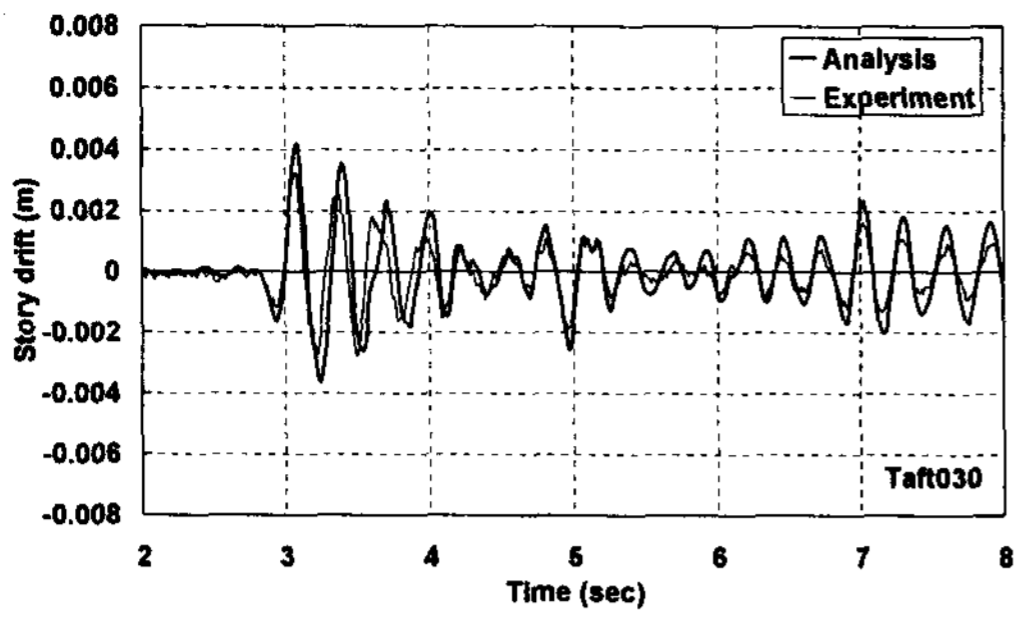


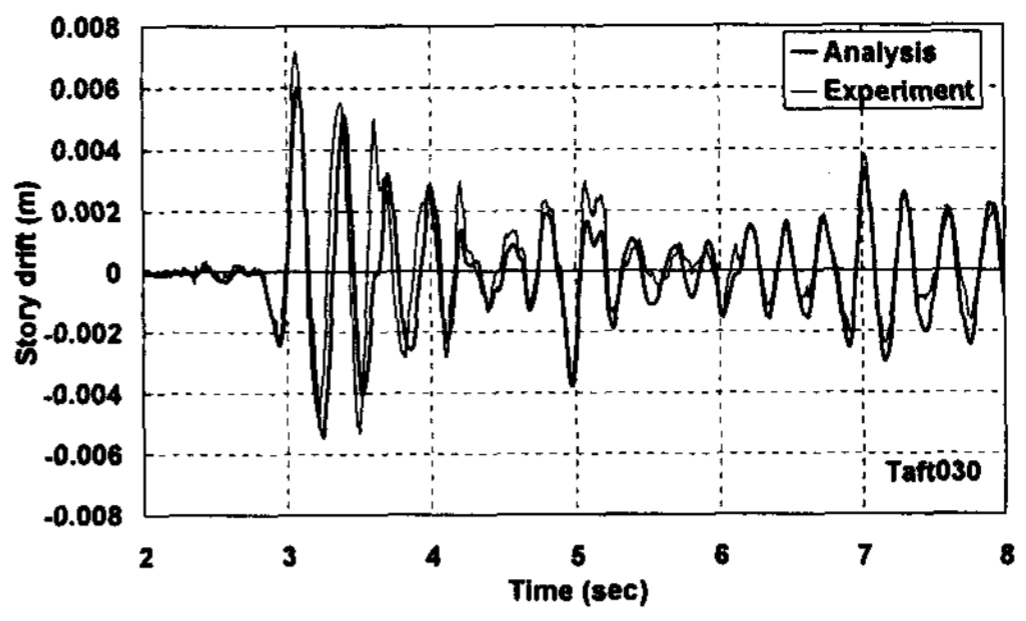
그림 4 전체 모델 방법

상은 무시된 채, Taft080에 대한 지진해석을 수행하여 실험에서와 같은 구조물의 감소된 강성을 제대로 묘사하지 못하였기 때문에 이와 같은 차이가 나타난 것으로 보인다. 건물의 상부부분이 충분히 강하여 하부골조에서 대부분의 변형이 발생한다면, 지붕변위는 필로티층에서 전단변형에 의한 변형과 전도변형에 의한 변형으로 나눌 수 있다. 그림 7은 Taft030일 때와 Taft080일 때 전도변형각의 변화를 비교하고 있다. 전도변형각이 최대일 때, 해석값은 실험값의 44% ~ 47%에 불과하였다.

그림 8은 밀면전단력의 시간이력을 비교하고 있다. 층변위반응과 마찬가지로 Taft030의 경우 전체적인 반응은 일치하였으나, 밀면전단력이 최대일 때, 해석값은 실험결과의 80%수준에 불과하였으나, 5초 이후부분에서는 해석결과가 실험결과보다 오히려 큰 값을 보여주었다. 그림 9 (a)와 (b)는 각각 외부골조와 내부골조의 전단력을 보여주는데, 외부골조의 경우 해석결과와 거의 비슷한 값을 보여주었으나, 내부골조는 해석결과가 실험결과의 65%정도에 불과하였다. 따라서, 밀면전단력, 특히 내부골조의 전단력의 차이로 인해 전체 밀면전단력이 차이가 발생하였음을 알 수 있다. 그림 10은 지진방향에 직각방향의 양측 외부골조의 전단력을 보여준다. 대상건물의 경우 상부구조물에 작용하는 전도모멘트에 의해 하부골조의 기둥에서는 급격한 축력의 변화가 발생하고, 이는 기둥에 작용하는 전단력과 모멘트에도 영향을 미친다. 그림 10 (a)는 실험결과로서 전단력이 (+)방향일 때는 X1 골조가 큰 전단력을 받는 반면, 전단력이 (-)방향일 때는 X3 골조가 큰 전단력을 받아 축력에 따라 전단력의 편향을 확인할 수 있다. 그림 10 (b)의 해석결과도 그 크기는 다르지만, 이와 같은 경향을 분명히 보여주고 있다. 일반적인 프로그램에서는 축력의 변화에 따른 전단력과 모멘트의 변화를 제대로 묘사를 못하지만, Opensees에서 비선형 fiber모델은 이 현상을 비교적 정확하게 묘사함을 보여주었다. 그림 11은 전이보층 변위와 밀면전단력의 관계를 보여준다. 해석결과는 실험결과와 마찬가지로 Taft030일 때 탄성적인 거동을 보여주었으나, 전단력이 증가함에 따라 강성이 다소 감소하는 비선형적인 모습을 보여주었다. 이는 축력을 고려했을 때 발생하는 현상으로 이와 같은 현상이 발생한 원인에 대해서는 규명할 필요가 있다. Taft080에서는 실험결과와 마찬가지로 해석결과도 에너지흡수 및 비탄성 거동을 보여주었다.

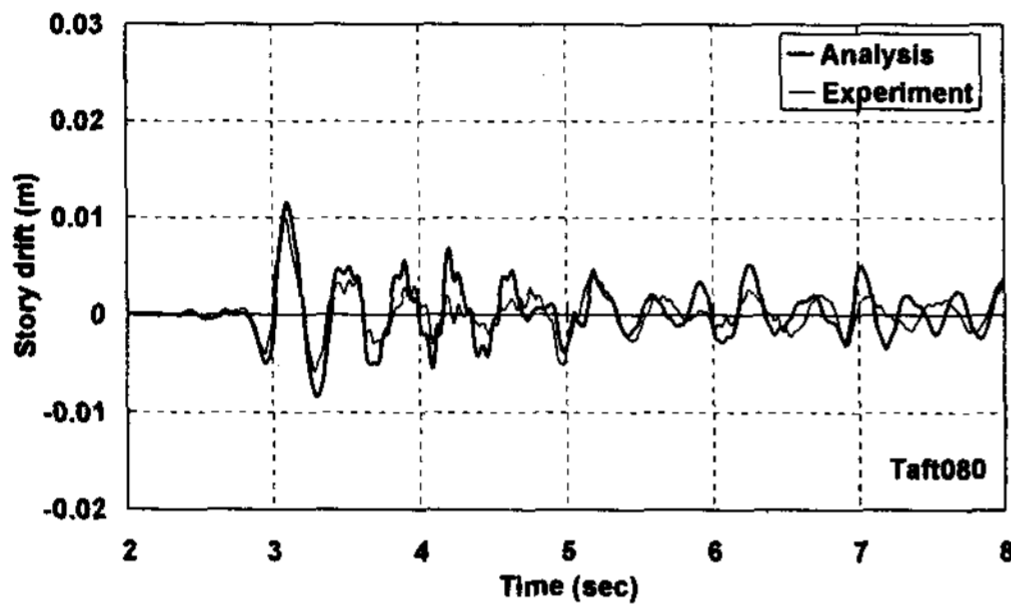


(a) 전이보층

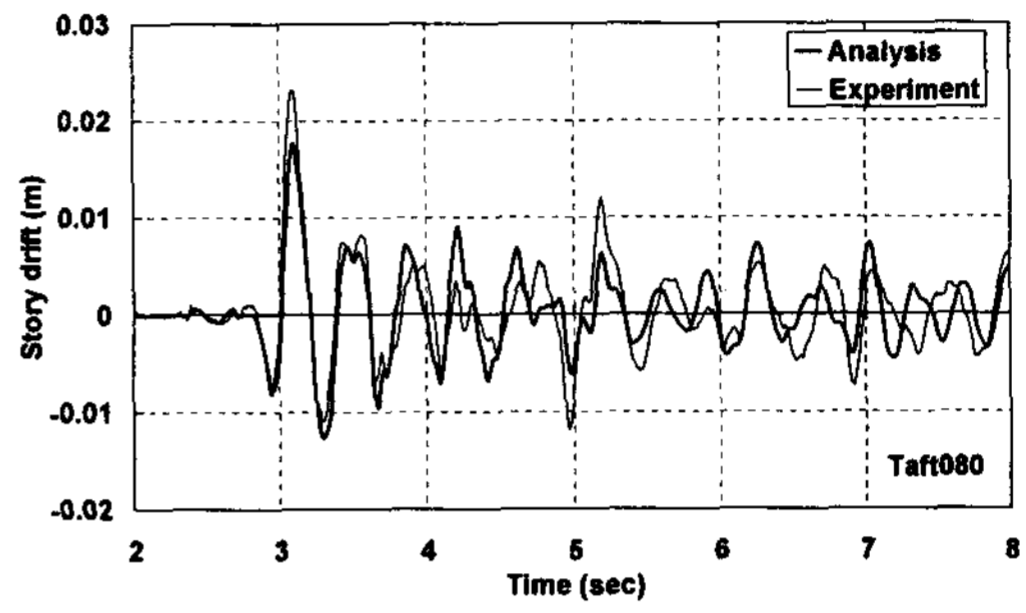


(b) 지붕

그림 5 층변위 비교 (Taft030)

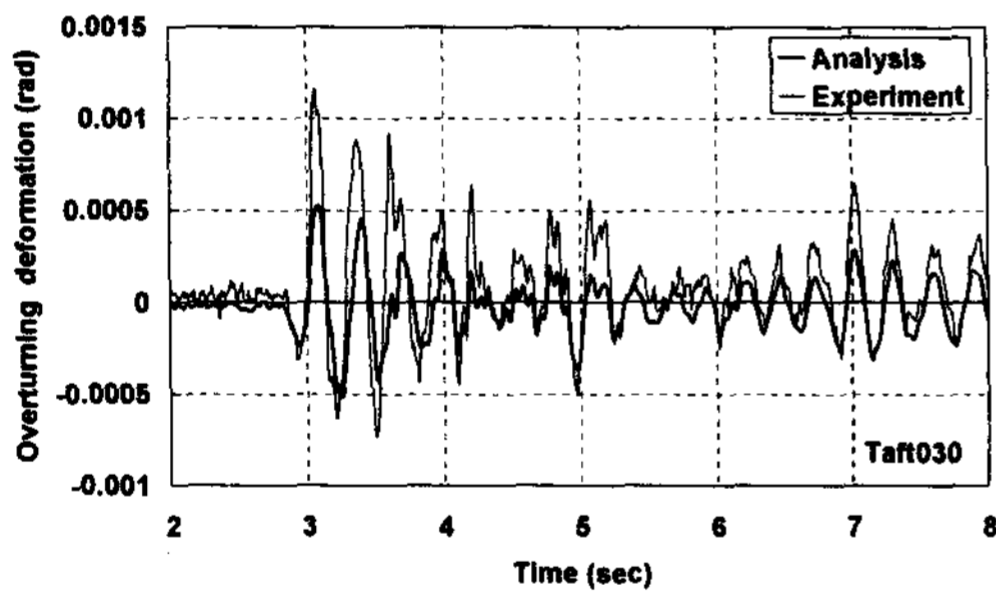


(a) 전이보층

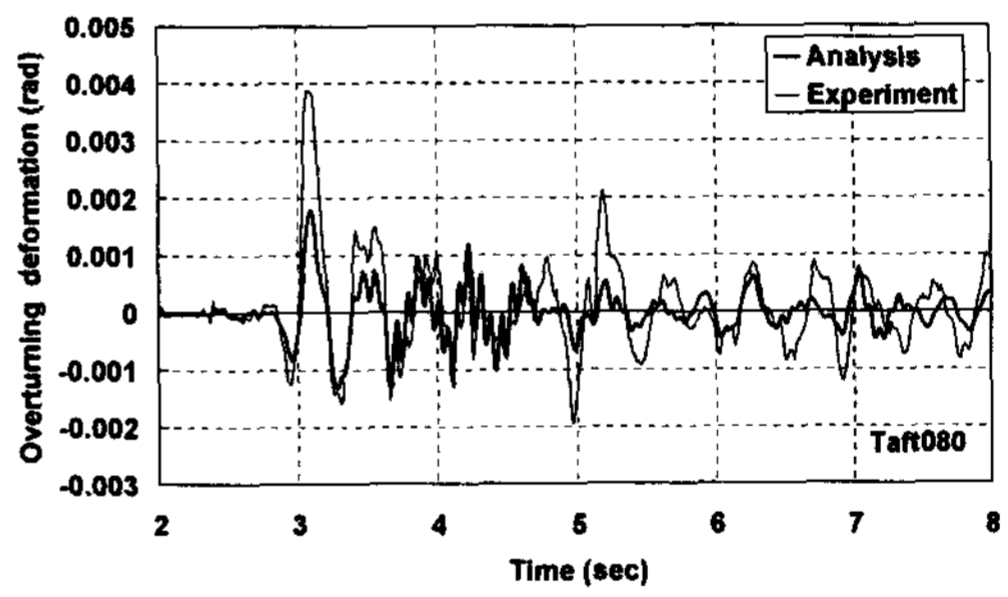


(b) 지붕

그림 6 층변위 비교 (Taft080)

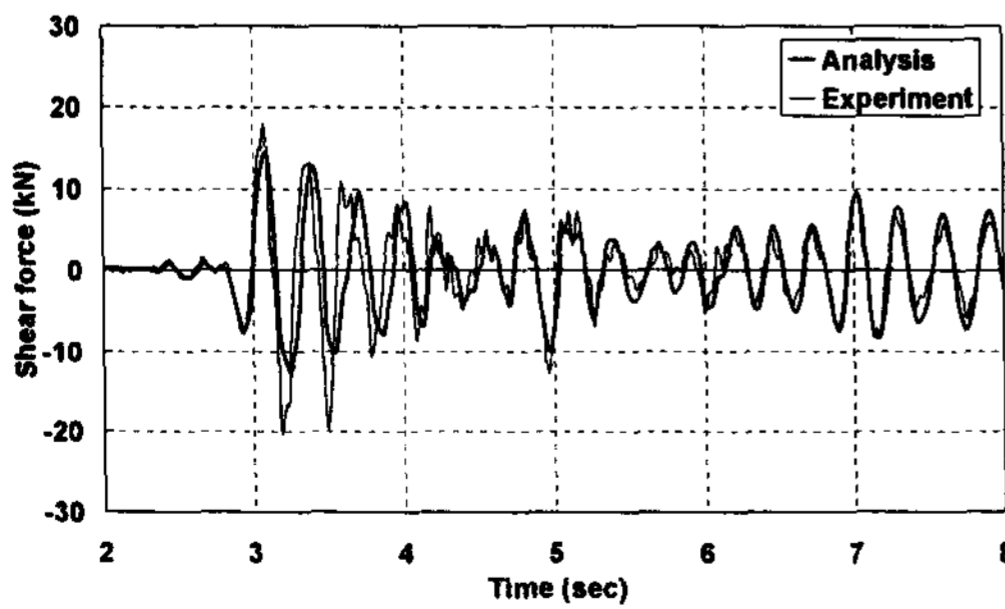


(a) Taft030

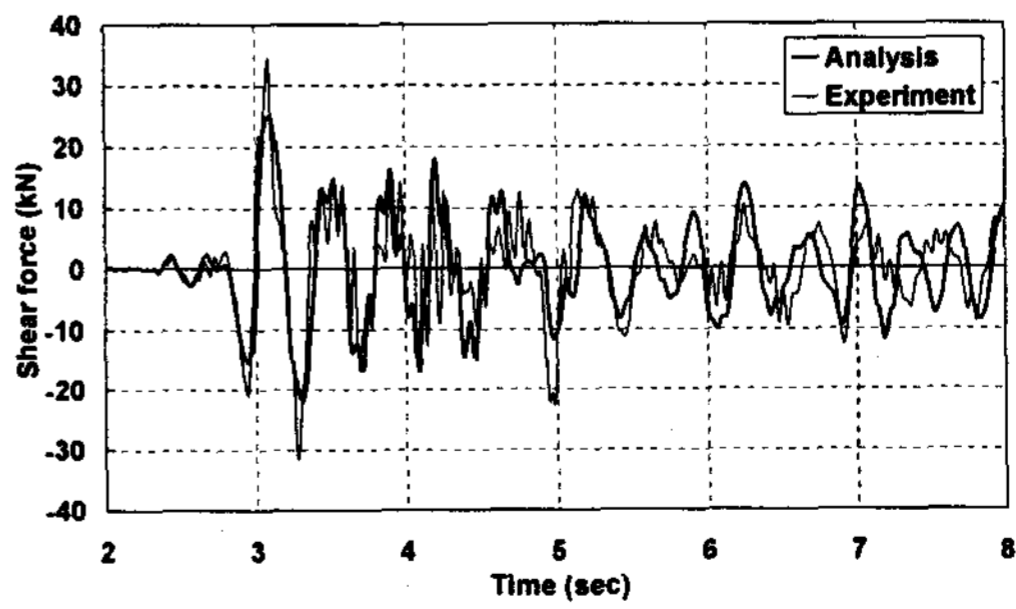


(b) Taft080

그림 7 전도변형각 비교 (Taft080)

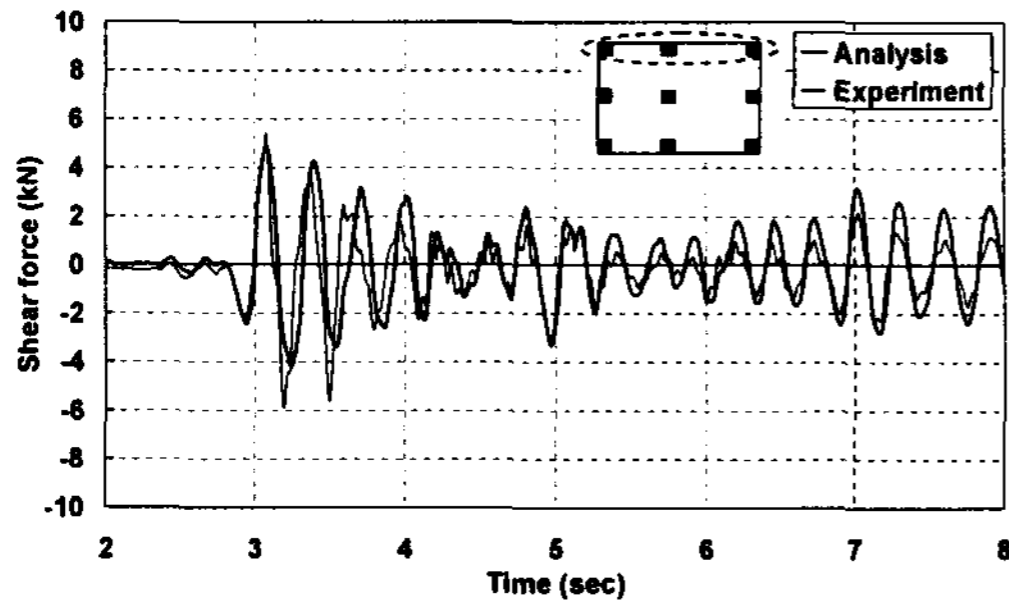


(a) Taft030

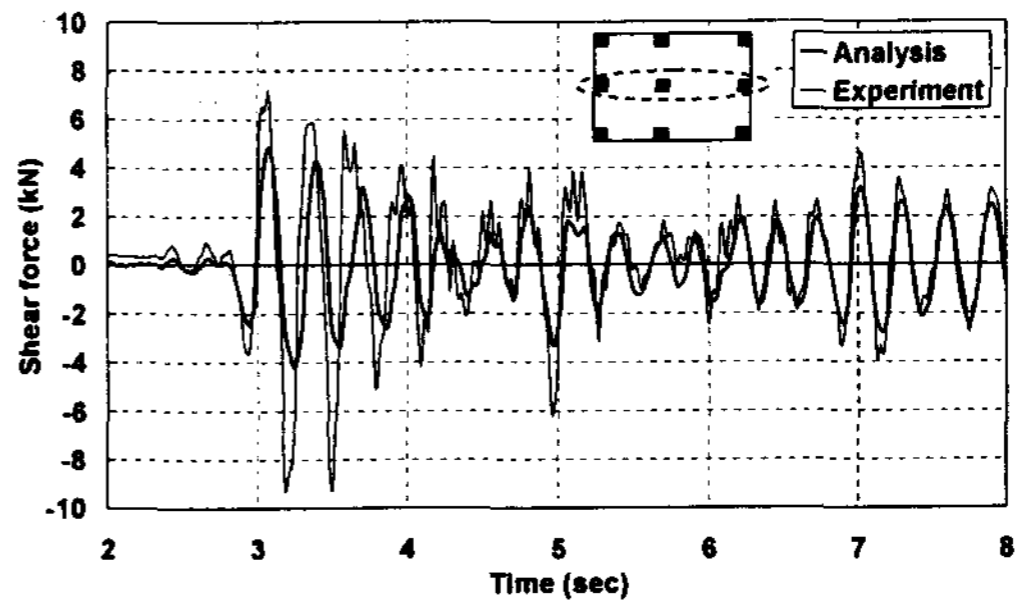


(b) Taft080

그림 8 전단력 시간이력 비교

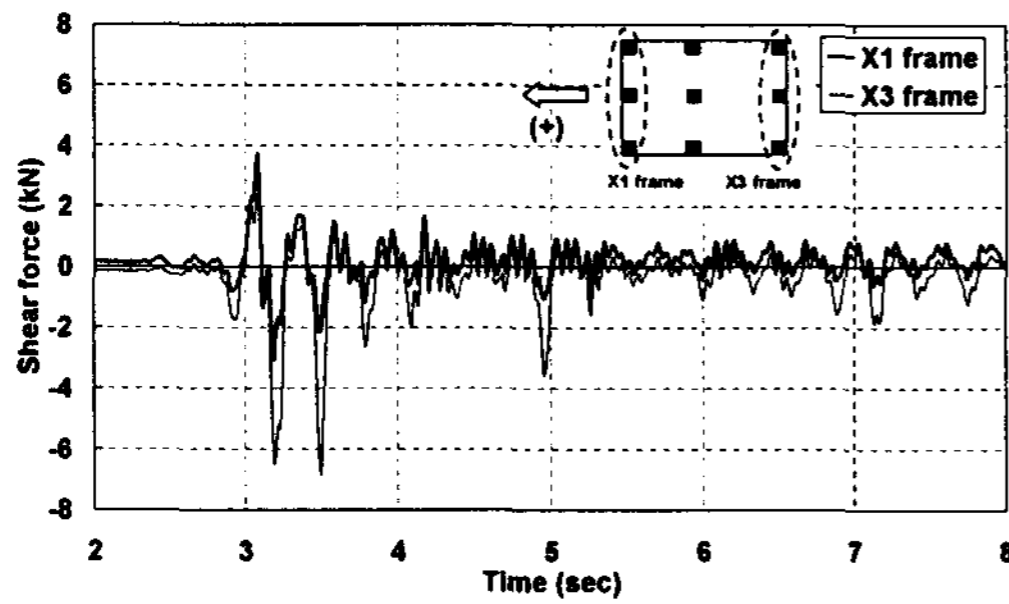


(a) 외부골조

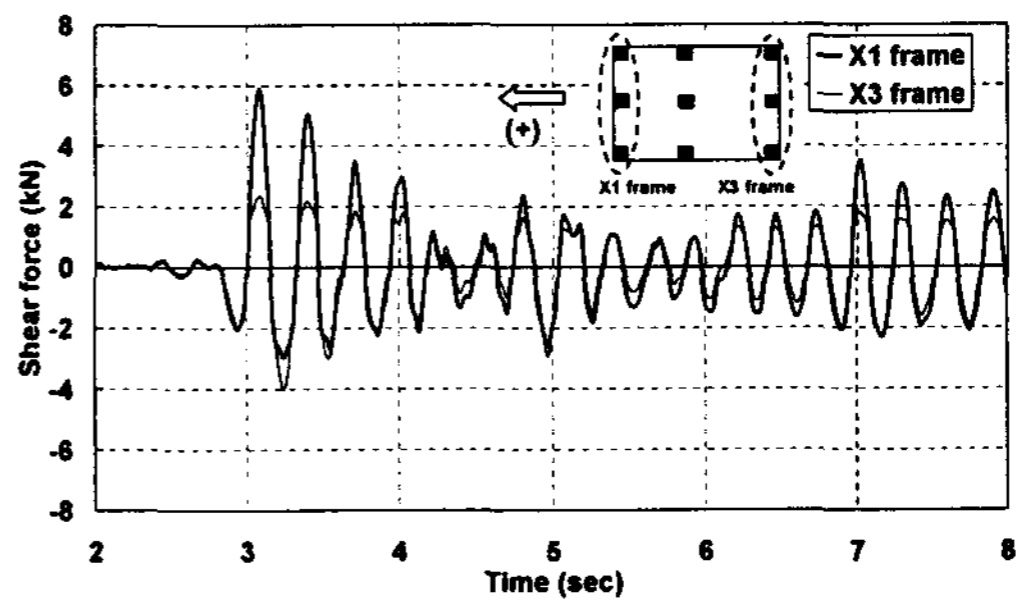


(b) 내부골조

그림 9 골조별 전단력 분포

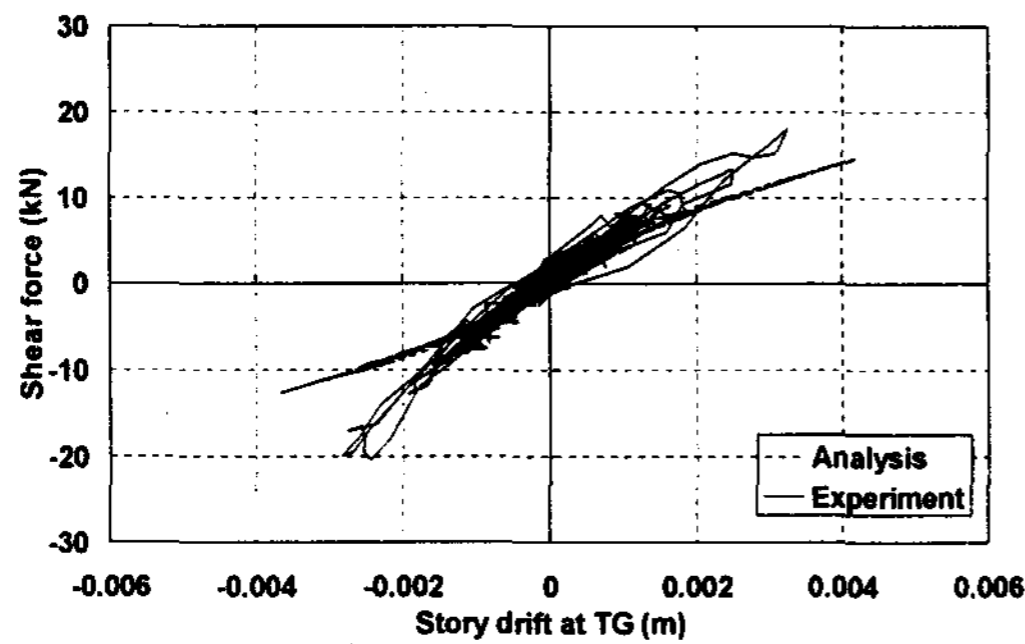


(a) 실험

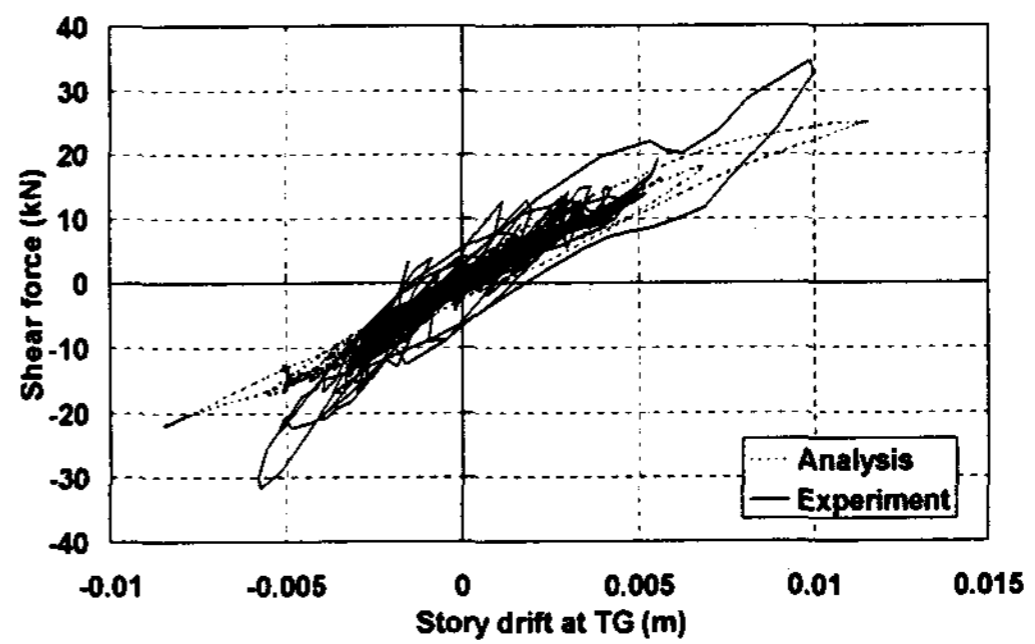


(b) 해석

그림 10 지진방향에 직각방향의 골조별 전단력 시간이력 (Taft030)



(a) Taft030

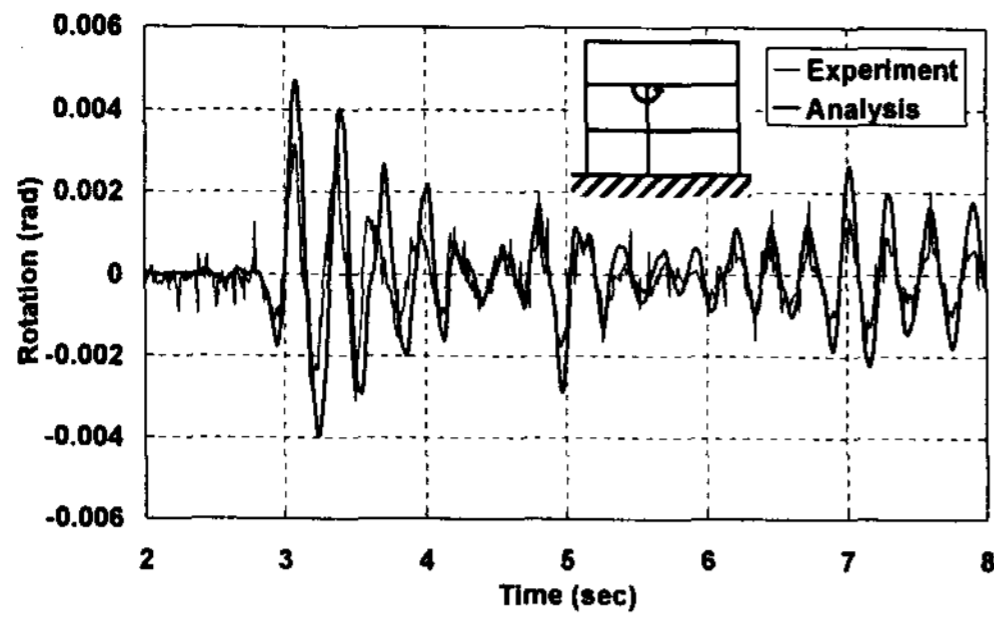


(b) Taft080

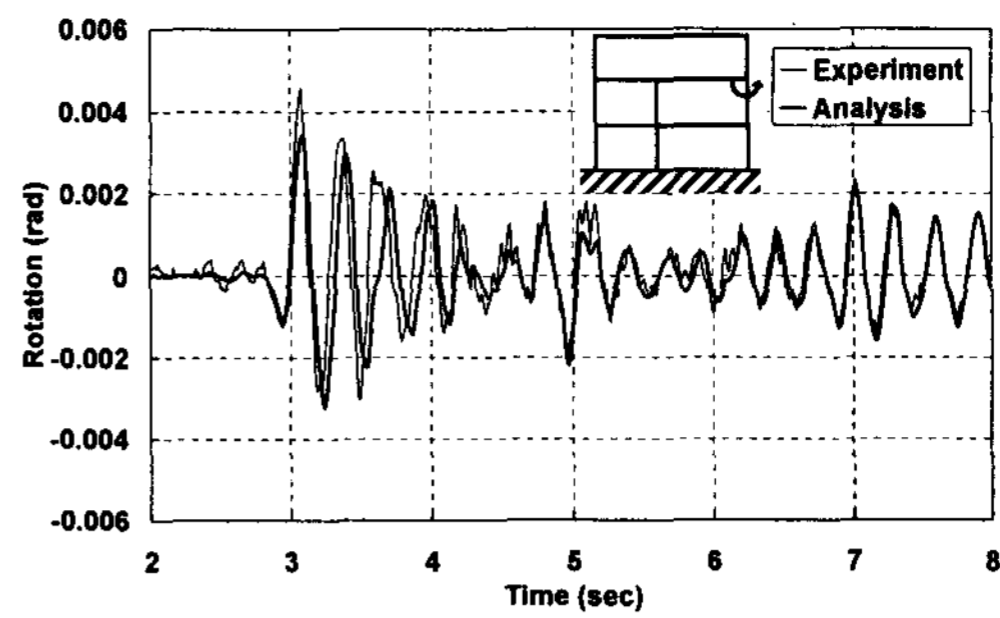
그림 11 밀면전단력과 전이보층 변위 비교

## 4.2 국부거동

그림 12는 Taft030일 때 내부기둥과 외부기둥 상부의 회전각의 변화를 비교하고 있는데, 크기에서 다소 차이를 보여주고 있을 뿐, 실험결과와 거의 일치하는 거동을 보여주었다. 그림 13은 Taft030일 때, 외부기둥의 소성힌지 영역에서 축변형량을 비교하고 있다. 실험에서 축변형이 지속적으로 인장측으로 편향되었는데, 해석결과도 실험결과에서 보여준 인장측 편향현상을 비교적 유사하게 묘사하였다. 이로부터 지진발생 시 대상건물에서 나타나는 동적특성을 국부적인 측면에서도 비교적 정확히 묘사하고 있음을 알 수 있었다.

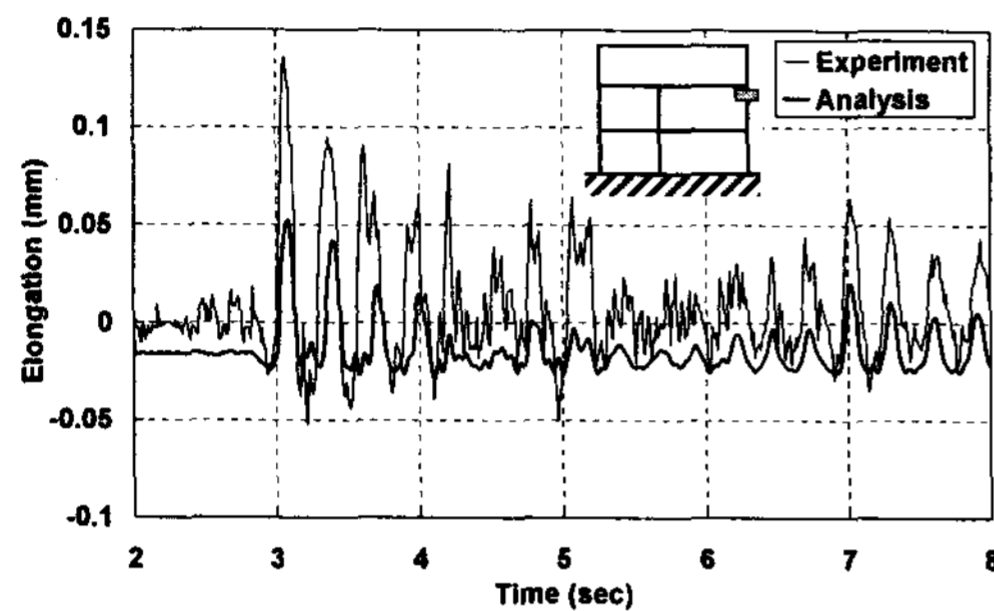


(a) 내부기둥의 회전각

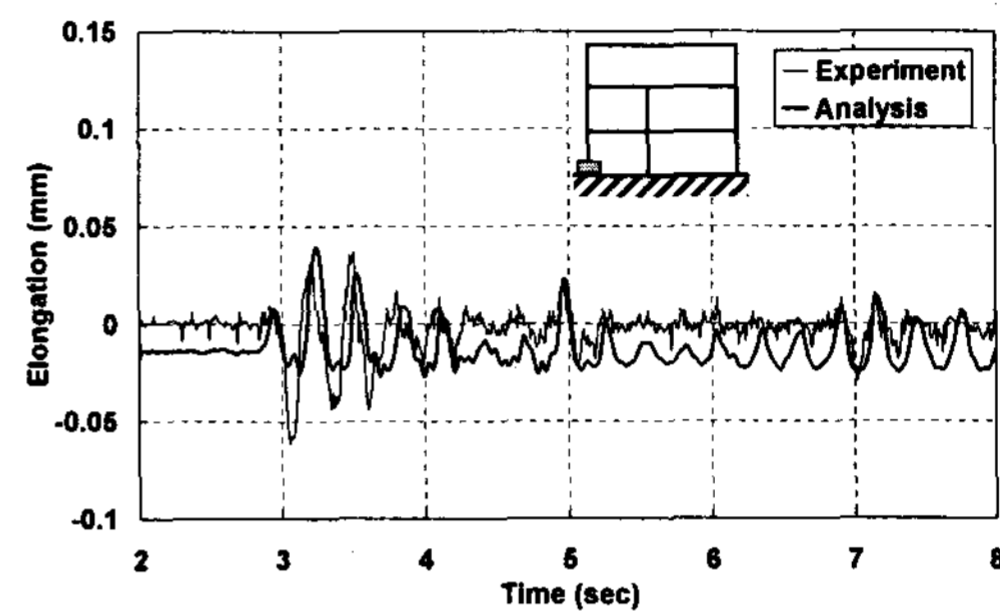


(b) 외부기둥의 회전각

그림 12 기둥 소성힌지부분에서 회전각 시간이력 (Taft030)



(a) 외부기둥 1



(b) 외부기둥 2

그림 13 기둥의 축변형량 비교 (Taft030)

## 5. 결론

OpenSees는 미국 U.C. Berkeley의 PEER Center에서 제공하는 소프트웨어 frame work로서 Objective-oriented Finite Element Analysis라는 비선형 해석프로그램을 기본적으로 사용하고 있다. 철근콘크리트 건물의 경우, 철근과 콘크리트의 응력-변형률 관계를 이용하여 Fiber모델로 비선형단면을 모델링함으로써 횡철근에 의한 구속효과와 부재의 비선형거동을 모사한다. 따라서, 철근콘크리트의 거동특성을 비교적 정확하게 나타낼 수 있으며, 건물의 매크로해석에 유용한 프로그램이라고 할 수 있다. OpenSees를 이용하여 비정형건물에 대한 비선형 시간이력해석을 수행한 결과와 진동대 실험결과를 비교한 결과 다음과 같은 사항을 발견할 수 있었다.

1) OpenSees를 이용하여 구조물의 전체적인 변형을 비교적 실험결과와 비슷하였으나, 해석결과 나타난 전도변형은 실험결과의 1/2수준을 보여주었다. 또한, 실험에서는 내부골조의 전단력이 외부골조 전단력의 최고 1.5배에 도달한 반면, 해석에서는 내부골조와 외부골조가 거의 비슷한 수준의 밀면전단력을 부담하여 실험결과와 차이를 보여주었다. 이와 같이 전도변형과 밀면전단력 부담의 차이는 해석모델에서 유효강성이 부적절하고, 실험은 강한 지진으로 가면서 손상이 누적된 반면, 해석은 초기 강성으로 해석이 수행되었기 때문에 발생한 것으로 보인다. 이를 해석에서 정확하게 반영하기 위해서는 추가보완 연구가 필요하다.

2) 위와 같은 차이를 보임에도 불구하고, OpenSees는 기둥의 소성힌지에서 회전각의 변화 뿐만 아니라 소성힌지영역에서 축변형이 인장축으로 편향되는 현상을 비교적 정확하게 묘사하였으며,

하부골조 기둥에서 발생하는 축력의 급격한 변화로 인해 초래되는 전단력의 편향 등이 해석에서 반영되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-2004-041-D00749)에 의하여 연구되었습니다.

#### 참고문헌

1. 김상연, 이한선, 고동우, "상부전단벽과 하부골조로 구성된 복합구조의 설계실무 현황분석," 한국 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 11권, 제 1호, 1999, pp. 223-228
2. Han-Seon Lee and Dong-Woo Ko, "Shaking table tests of a high rise RC bearing-wall structure with bottom piloti stories," *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Vol. 1, No. 1, 2002, pp. 47-54.
3. OpenSees, "Open System for earthquake engineering simulation([opensees.berkeley.edu](http://opensees.berkeley.edu))," Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2004.
4. T. Paulay and M.J.N. Priestley, "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings," John Willey & Sons, Inc. 1992.