

소형선형 평면뼈대모형의 진동대실험을 통한 하이브리드실험 기법의 검증

Verification of Hybrid Structural Test Technique by Shaking Table Test of a Linear 2-Dimensional Frame Model

조성민¹⁾ · 최인규²⁾ · 정대성³⁾ · 김철영⁴⁾

Cho, Sung Min · Choi, In Gyu · Jung, Dae Sung · Kim, Chul Young

국문 요약 >> 본 논문은 지진에 의한 구조물의 거동을 평가하기 위한 실험방법 중 최근 국내에 도입되어 연구되고 있는 하이브리드실험에 대한 시스템을 구축하고, 그에 따른 모델개발과 하이브리드실험을 실시하여 하이브리드실험기법의 타당성과 정확도를 평가하기 위한 것이다. 이를 위해 NEESgrid의 미니모스트 시스템을 벤치마킹하여 여건에 맞게 수정, 보완하였으며 2차원 평면뼈대모형을 개발하여 실험에 적용하였다. 그리고 하이브리드실험 결과의 평가를 위해 국내에서는 거의 시도되지 않았던 진동대실험과 비교를 함으로써 결과의 신뢰도를 높였다. 진동대실험에는 하이브리드실험과 동일한 크기의 실물모형을 제작, 실험하여 크기효과의 영향을 최소화하였다. 두 실험의 결과는 거의 비슷한 것으로 나타나 하이브리드실험이 진동대실험을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 하이브리드실험, 진동대실험, 미니모스트시스템, 부구조계기법, OpenSees, OpenFresco

ABSTRACT >> This paper deals with the hybrid structural test technique which has been introduced and studied currently in Korea. In this study, a Mini-MOST system which was developed as a part of NEES research was modified and improved to reduce the total simulation time to half of the original system. Using the proposed system together with the 2 dimensional small steel frame specimen, the validity and efficiency of the hybrid test technique is investigated. Even though the hybrid test has been developed as an alternative to the shaking table test and has been studied and applied for a long time in several countries, no attempt has been made to compare it directly with the shaking table test. Therefore, in this study, the hybrid test results are compared with those of the shaking table test as well as with a numerical simulation for the verification of hybrid test. From the comparison and analysis of the test results, it is concluded that the hybrid test can simulate the actual seismic behavior of structural systems very accurately and it can be a good alternative to the shaking table test.

Key words Hybrid test, Shaking table test, Mini-MOST system, Sub-structuring method, OpenSees, OpenFresco

1. 서론

지진에 의한 구조물의 거동을 실험을 통하여 평가하는 방법으로는 전통적으로 준정적실험(Quasi-static Test), 유사동적실험(Pseudo-dynamic Test), 그리고 진동대실험(Shaking Table Test)을 많이 적용해왔다. 준정적실험은 미리 수치해

석에 의하여 결정된 구조물의 변위 이력을 그대로 실험부재에 가하는 방법으로서, 많은 연구자들이 단순한 구조물이나 부재의 실험에 적용하여 왔다.⁽¹⁻⁴⁾ 이 방법은 기존의 실험시설을 이용할 수 있고 실험이 비교적 간편하며 실험비용이 저렴하다는 장점이 있지만, 미리 해석적으로 얻어진 응답이력대로만 가력하기 때문에 시간에 따라 변하는 실험모형의 강성의 변화를 고려할 수 없으므로 비선형 및 파괴 거동을 정확히 모사할 수 없고, 또한 동적효과를 고려할 수 없는 단점이 있다.

이에 반하여 진동대실험은 실제의 지반운동을 거의 흡사하게 모사할 수 있기 때문에 구조물의 응답, 붕괴절차, 잔류변형 등 지진이 발생했을 때의 영향을 가장 실제에 가깝게 파악할 수 있는 이상적인 실험방법이다. 하지만 실험시설의

¹⁾ 명지대학교 토목환경공학과, 석사과정
(교신저자: ratmkitn@naver.com)

²⁾ (주)인터컨스텍 기술연구소 연구원, 공학석사

³⁾ 명지대학교 하이브리드구조실험센터, 연구교수

⁴⁾ 정회원·명지대학교 토목환경공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2010. 6. 9 / 수정일 1차 : 2010. 8. 31, 2차 : 2010. 10. 25/
게재확정일 : 2010. 10. 25)

구축비용이 매우 고가이어서 진동대의 용량이 제한적이다. 따라서 모형의 크기나 실험체 중량에 대한 제약이 존재하여 대형구조물일 경우에는 축소모형을 사용하거나 부분구조로 실험하여야만 한다. 이 때 축소모형을 사용하면 크기효과(Size-effect)에 따른 오차가 발생하며 부분구조일 경우에는 경계조건의 구현이 어렵다는 단점이 있다.⁽⁵⁾

유사동적실험은 매 시간단계마다 운동방정식을 풀어서 이때의 응답을 실험체에 가해줌과 동시에 각 시간단계에서의 복원력을 측정하여 이를 다시 운동방정식에 입력함으로써 다음 시간단계에서의 응답을 계산하는 기법이다. 이 방법에서는 지진 하중에 의하여 구조체에 발생하는 비선형 거동과 이에 따른 강성의 변화를 실험과정에서 고려할 수 있으므로 준정적 실험에 비하여 비교적 정확한 파괴 거동의 모사가 가능하다. 또한 기존 실험시스템의 소규모 개선만으로도 수행할 수 있으며 진동대 실험에 비하여 실험체의 크기에 제한이 적다는 장점이 있다. 하지만 전체 구조계의 일부 부재만 실험하는 경우에는 여전히 경계조건의 구현이 힘들어서 전체 구조계의 지진거동을 파악하는 데는 문제가 있으며 기존의 실험장비들로는 실시간 지진이력을 모사할 수 없어서 동적효과를 구현하지 못한다는 단점이 있다.⁽⁶⁻⁸⁾

최근 들어, 이러한 기존 실험방법들의 단점을 극복하기 위하여 미국과 일본 등을 중심으로 하이브리드실험기법(Hybrid Test Technique)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{(9),(10)} 하이브리드실험은 부구조계기법(Sub-structuring Technique)^{(11),(12)}을 폭넓게 적용함으로써 파괴 또는 비탄성 거동이 발생하여 전체 구조물의 응답에 크게 영향을 미치는 주요 부재에 대하여는 직접 실험으로 거동을 모사하고 나머지 부분은 수치해석에 의하여 거동을 모사하면서 수치해석의 결과가 실험의 입력값으로, 그리고 다시 실험의 결과가 수치해석의 입력값이 되도록 연동시키는 방법이다. 하이브리드실험기법은 구조모형의 크기에 대한 제한이 비교적 덜하면서 구속조건을 용이하게 모사할 수 있으며, 동시에 시간에 따른 구조물의 강성 변화를 직접 고려할 수 있다는 장점을 가지고 있어서 매우 효율적인 실험기법으로 주목받고 있다.

이러한 하이브리드실험기법에 대한 개념은 Hakuno 등(1969)⁽⁶⁾, Takanashi 등(1975)⁽⁷⁾, Takanashi & Nakashima(1987)⁽¹³⁾, Shing and Mahin(1983)⁽¹⁴⁾, Mahin and Shing(1985)⁽⁸⁾ 등에 의해 제안되고 정립된 유사동적실험기법에 기반을 두고 있다. 유사동적실험에 관한 초기 연구들은 실험의 정확성을 높이기 위하여 실험의 오차를 줄이고 그 특성을 규명하기 위한 실험적인 접근^{(14),(15)}과 수치적분 알고리즘을 통해 해의 수렴성을 향상시키기 위한 수치해석적 접근⁽¹⁵⁻²²⁾에 초점이 맞춰져 있었다면, 최근의 하이브리드실험기법은

적은 수의 자유도를 갖는 구조모델에 적용되었던 초기의 유사동적실험을 첨단 기술의 예측, 제어 및 통신기술과 접목시켜 다자유도 실험과 부구조계기법을 확대 적용시킨 Multi-site 하이브리드실험, 고속하이브리드실험 및 실시간 하이브리드 실험기법으로 발전하고 있다.

아직까지도 유사동적실험과 하이브리드실험이란 용어 자체가 혼용되어 사용되고는 있으나 최근 들어서 하이브리드실험이란 표현을 많이 사용하고 있다. 이러한 하이브리드 실험기법과 시스템 개발에 관한 체계적인 연구로는 1999년 미국의 NEES(Network for Earthquake Engineering Simulation)에서 본격적으로 시작되었다고 할 수 있다. 이후 일본의 E-Defence(3-D Full Earthquake Testing Facility) 및 대만의 NCREE(National Center for Research on Earthquake Engineering) 등 대형구조실험시설들을 위주로 활발히 연구, 개발되어 왔다. 국내에서는 2004년부터 시작된 KOCED(Korea Construction Engineering Development) 사업의 일환으로 하이브리드실험기법에 대한 연구가 시작되었다^{(23),(24)}. 이 실험기법은 예측, 제어 및 통신 기술의 발전을 기반으로 하여 개발되어 왔으며 다자유도 구조물에 대한 실험과 초고속통신망을 이용한 분산실험이 가능한 발전된 실험방법이다. 국내에서의 유사동적실험에 관한 연구는 Nam-Sik Kim & Dong-Guen Lee(1999)⁽²⁵⁾, Woo-Jung Chung 등(1999)⁽²⁶⁾ 다수의 연구자들에 의해 수행되어 왔으며 지금도 많은 연구에 적용되고 있다. 하이브리드실험과 관련해서는 김태진 등(2006)⁽²⁷⁾이 하이브리드실험 기법에 대한 기존의 연구 사례와 향후 발전 전망을 정리하였고, 박규식 등(2009)⁽²⁸⁾은 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign(UIUC)에서 연구되고 있는 UI-SimCor를 이용한 하이브리드 실험을 소개하였다. 정래영(2006)⁽²⁹⁾은 implicit integration method를 적용한 실시간 하이브리드 실험시스템 개발 연구를 통해 종래의 유사동적해석법에 비해 빠른 속도로 실험이 가능하고 다자유도 구조물에 대해 안정적인 해석환경을 제공하였다. 또한 박은천 등(2008)⁽³⁰⁾은 대형 MR감쇠기가 설치된 건축구조물에 대해서 실시간 하이브리드실험을 연구하였고, 이성경 등(2006)⁽³¹⁾은 진동대를 이용한 건축구조물의 하이브리드실험을 수행하였다.

NEESgrid 참여 대학을 중심으로 개발된 시스템으로는 일리노이즈대학(UIUC)에서 개발한 UI-SimCor 시스템⁽³²⁾과 버클리대학(UCB)에서 개발한 OpenFresco(Open Framework for Experimental Setup and Control)^{(33),(34)} 등이 있다. 이들 시스템에서 사용하는 수치해석 툴로는 Zeus-NL⁽³⁵⁾, OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)⁽³⁶⁻³⁸⁾, FedasLab⁽³⁹⁾, 그리고 ABAQUS 등이

있다. 특히, NEESgrid에 참여한 UIUC, UCB 및 San Diego Supercomputer Center(SDSC) 등이 하이브리드실험 및 분산실험기법을 개발하고 그 타당성을 검증하기 위해 사용한 시스템이 미니모스트(MiniMOST) 시스템이다.

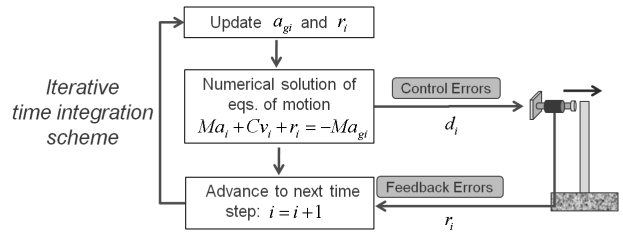
그러나 상기한 연구들이 하이브리드실험 알고리즘의 근본적인 검증에는 소홀한 측면이 있다. 즉, 이론적인 하이브리드 모사 알고리즘에 대한 기술과 이를 바탕으로 한 시스템 개발, 그리고 이의 적용에 관한 연구만 수행되었지 하이브리드실험기법 자체의 효율성과 정확성에 대한 검증은 이루어지지 않았다. 하이브리드실험기법의 중요한 본질 중 하나가 부구조계 적용에 의한 실험과 수치해석의 연동인데, 이전의 연구에서는 부구조계에 대한 하이브리드실험의 결과만 분석되었지 전체 구조계에 대한 결과와의 비교 검증은 전혀 이루어지지 않았다. 더군다나 하이브리드실험이 진동대실험에 대한 일종의 대안으로서 개발된 방법임에도 불구하고 하이브리드실험의 결과를 진동대실험과 비교한 연구도 전무한 실정이다. 또한 상기한 미니모스트 시스템은 하이브리드 모사 알고리즘의 개발과 이의 적용을 위하여 매우 효과적인 소형시스템이지만 효율성 면에서는 다소 개선의 여지가 있는 시스템이다.

따라서 본 연구에서는 미니모스트 시스템을 기반으로 하여 보다 효율적이고 정밀도가 높은 소형 하이브리드실험 시스템을 개발하고 진동대 실험을 통하여 적용된 알고리즘과 개발된 실험시스템을 검증하려고 한다. 수치적분법에서는 해의 안정성과 정확성이 무엇보다 중요하며 크게 명시적 방법(Explicit Method)과 암시적 방법(Implicit Method)으로 나누어진다. 초기 유사동적실험에서는 구조물의 운동방정식을 풀기 위한 반복계산이 요구되지 않아 해의 안정성 측면에서 명시적 방법이 주로 사용되었다. 그러나 매우 많은 자유도를 갖거나 높은 모드를 갖는 구조물, 특히 부구조계기법과의 관계에서 무엇보다도 해의 정확성이 요구되면서 최근의 하이브리드실험 기법에서는 암시적 방법들이 개발되어 적용되고 있다.⁽²⁹⁾ 최근 들어, 이들 암시적 방법들에 대한 적용도 많이 이루어지고 있으며, 특히 본 논문에서 수치해석 툴로 사용한 OpenSees에는 이들 기법들이 다수 포함되어 있고 개발자들에 의해 이미 검증된 상태이다.^{(18-20),(40),(41)} 따라서 본 논문에서는 OpenSees에 포함된 Newmark 방법을 사용하여 수치적분을 수행하였다.

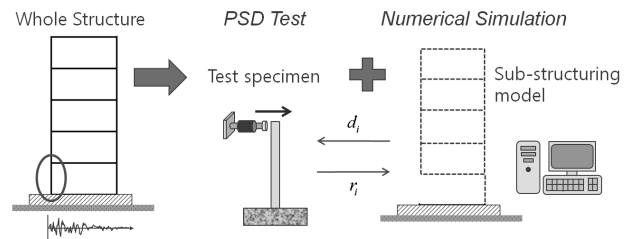
2. 하이브리드실험 시스템

2.1 하이브리드실험 기법

유사동적실험은 그림 1과 같이 운동방정식을 이용하여



〈그림 1〉 유사동적실험의 모식도



〈그림 2〉 하이브리드실험의 모식도

지진가속도에 대한 단자유도 구조물의 응답을 계산한 후, 유압가력기를 이용하여 실험체에 변위를 가한다. 그 후 실험체에서 측정된 복원력을 다시 다음 단계의 수치적분에 반영하게 된다. 이때 제어오차와 측정오차가 발생하게 되며 이 오차들은 실험이 끝날 때까지 누적되기 때문에 오차의 제어가 매우 중요하다.⁽¹⁴⁾

유사동적실험이 기동부재 하나에 대해서만 수치적분을 실시하고 계산된 변위를 실험체에 재하하여 측정된 복원력을 다시 수치적분에 적용하는 방식이었다면, 하이브리드실험은 그림 2와 같이 부구조계기법을 이용하여 중요한 부분은 실험을 하고 나머지 구조계는 수치적분을 실시하는 방식이다. 유사동적실험과 마찬가지로 수치해석에서 계산된 변위를 실험체에 재하하고 측정된 복원력을 다시 수치해석에 적용하는 것은 동일하나, 하이브리드실험은 전체 구조물의 지진에 대한 응답을 모사할 수 있는 장점이 있다.

또한 고성능 가력기와 제어시스템의 발달로 실시간 하이브리드실험이 가능하며 실험시설에서 수치해석과 실험을 동시에 수행하는 실험은 물론, 초고속통신망을 이용하여 수치해석과 실험을 다른 곳에서 수행하거나 여러 실험시설을 동시에 연동하여 실험을 진행하는 분산실험도 가능하다.⁽³⁴⁾

2.2 직접적분법

외부 동적하중에 대한 구조물의 운동방정식은 통상적으로 직접적분법에 의해 해를 구한다. 명시적 방법으로는 중앙차분법(Central Difference Method), Newmark법 계열⁽¹⁶⁾ 등이 있고, 암시적 방법으로는 Newmark-β법, Modified

Newmark법, HHT- α 법⁽¹⁸⁾ 그리고 α -OS법⁽⁴¹⁾이 사용된다.

기존의 유사동적실험에서는 시간단계에서의 수치해를 구하기 위해 주로 명시적 방법을 사용하였다. 특히 비선형 구조물의 경우에도 운동방정식의 해는 매 시간단계에 따라 순차적으로 계산되며 반복계산이 필요 없고 각 단계의 변위 응답을 이전 단계의 해들만의 함수로 가정하기 때문에 빠른 계산이 가능하다는 장점이 있으나, 매우 작은 하중단계에서 조건적 수렴을 하기 때문에 최근의 하이브리드실험에서는 긴 해석단계 동안 안정성과 정확성이 확보되는 암시적 방법이 주로 적용되고 있다. 대부분의 암시적 방법은 임의의 $\omega \cdot \Delta t$ 값에 대해서 안정하다. 여기서 ω 는 구조물의 고유진동수이다. 본 논문에서는 이들 방법 중에서 가장 일반적인 방법인 Newmark- β 법을 적용해 보았다. Newmark- β 은 Wilson- θ 법과 유사하며 해의 정확도와 수치적 안정성을 보장하는 범위 내에서 β 와 γ 라는 두 가지 계수를 가정하여 사용한다. 여기서 $\beta=1/6$, $\gamma=1/2$ 이면 $\theta=1$ 을 사용한 Wilson- θ 방법 즉, 선형가속도법(Linear Acceleration Method)과 동일하다. 이러한 직접적분법의 계산 소요시간은 시간단계의 수에 비례하기 때문에 계산시간이 적게 소요되도록 적분 시간간격이 충분히 커야하고, 정확한 결과를 얻기 위해서는 적분 시간간격이 충분히 작아야 한다. 이러한 상반되는 두 조건을 만족하기 위해서 적절한 적분 시간간격을 선택하여야 한다. 특히, 적분 시간간격의 선택은 해의 안정성을 고려하여 결정되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 적분 시간간격을 0.005초로 사용하였고, Newmark가 수치적 안정성을 보장하는 것으로 제안한 $\beta=1/4$, $\gamma=1/2$ 을 사용하였으며 이는 평균가속도법(Average Acceleration Method)과 같은 방법이다.

하이브리드실험 알고리즘에 적용되는 구조물에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{X}_{i+1} + C\dot{X}_{i+1} + KX_{i+1} = F_{i+1} \quad (1)$$

여기서, \ddot{X}_{i+1} , \dot{X}_{i+1} , X_{i+1} 및 F_{i+1} 는 각각 시간단계 $i+1$ 에서의 가속도, 속도, 변위 및 외력에 관한 벡터이며 KX_{i+1} 는 복원력 벡터로서 R_{i+1} 로 나타낼 수도 있으며 실험체에 설치된 로드셀로부터 직접 값을 얻는다. M , C , K 는 각각 질량, 감쇠계수, 구조계의 강성 매트릭스이다.

본 연구에서 사용된 Newmark- β 법에 대한 매 시간 단계별 변위와 속도는 아래와 같이 계산된다.

$$\dot{X}_{i+1} = \dot{X}_i + [(1-\gamma)\Delta t]\ddot{X}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{X}_{i+1} \quad (2)$$

$$X_{i+1} = X_i + (\Delta t)\dot{X}_i + [(0.5-\beta)(\Delta t)^2]\ddot{X}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{X}_{i+1} \quad (3)$$

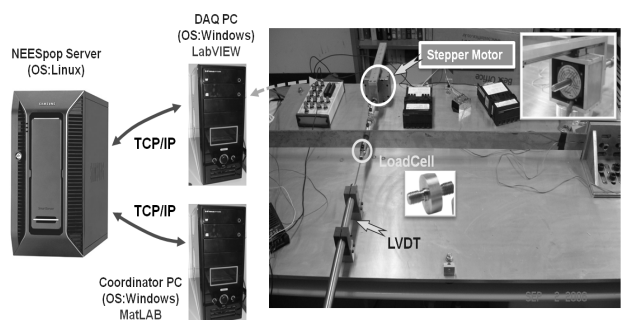
여기서, Δt 는 시간간격의 크기이고 β 와 γ 는 적분상수이다.

비선형거동을 보이는 구조물에 대한 수치해석을 수행할 경우, 매 시간단계마다 강성매트릭스 K 를 정확히 계산하는 것은 매우 어려움이 많다. 그래서 변위벡터 X_{i+1} 를 가력기로 실험체에 직접 가하여 복원력 R_{i+1} 를 운동방정식에 적용시키는 하이브리드실험은 지진에 의한 응답을 수치해석보다 정확하게 예측 할 수 있는 것이다.

2.3 미니모스트 시스템

2003년 미국의 NEESgrid에서는 축소모형을 사용한 하이브리드실험기법 연구 및 실제 실험의 가능성을 검토하기 위한 MOST(Multi-site Online Simulation Test) 시스템의 축소모형인 미니모스트 시스템을 개발하였다. 해석과 실험진행에 사용되는 Coordinator 컴퓨터에는 수치해석에 MATLAB 기반으로 작성된 프로그램이 사용되며, 제어와 계측에 사용되는 컴퓨터는 LabView로 작성된 4개의 프로그램이 사용된다. 그림 3에서 보듯이 실험영역과 해석영역의 중간에는 NEESpop서버가 있고 각각 TCP/IP로 연결되며, MATLAB과 LabView의 플러그인이 설치되어 있다. 가력기로는 스텝퍼 모터를 사용하며 로드셀과 LVDT를 설치하였다.

초기 미니모스트 시스템을 이용하여 하이브리드실험을 수행하던 중, 다소 문제점이 발생하였다. MATLAB으로 작성된 해석프로그램을 사용하다보니 새로운 모델의 모델링이 복잡하고 제한적이어서 지진하중에 대한 구조해석이 가능한 보다 범용적인 구조해석 프로그램이 필요하게 되었다. 또한, 전반적으로 시스템이 복잡해 사용자들이 이용하기에



〈그림 3〉 초기 미니모스트 시스템

어려워 좀 더 다루기 쉬운 시스템의 구축이 요구되었다.

2.4 수치해석 프로그램

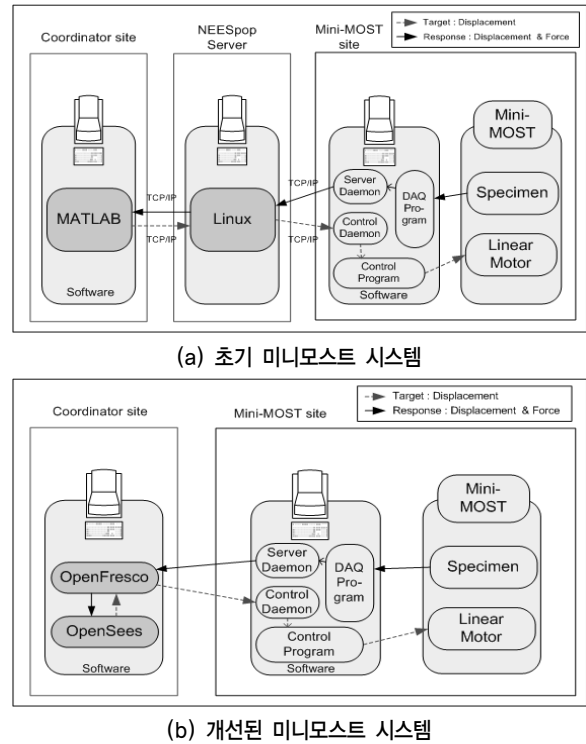
하이브리드실험에는 수치해석과 통신에 필요한 프로그램이 필요하다. 이 두 가지 프로그램은 OpenSees와 OpenFresco이다. OpenSees는 버클리대학의 PEER Center에서 지진공학에 대한 연구를 위해 C언어 기반으로 개발된 소프트웨어 프레임워크이다. 소프트웨어 패키지의 경우 구성요소들이 하나의 틀 안에 견고하게 엮여 있는 반면 소프트웨어 프레임워크는 여러 가지 구성요소들이 프로그램 인터페이스를 통해서 다소 느슨하게 엮여있기 때문에 사용자들이 직접, 원하는 구성요소만을 쉽게 추가 또는 대체할 수 있다. 또한 광범위한 재료, 부재 그리고 해석 알고리즘을 사용한 비선형 모델링과 해석에 대해 뛰어난 능력을 가지고 있다. OpenSees는 ModelBuilder, Domain, Analysis 그리고 Recorder로 구성되어 있으며 모델링, 해석, 결과저장 등을 수행한다.

OpenFresco는 OpenSees의 해석영역과 실험장비와의 실험영역을 연결시켜주는 역할을 하며 4가지 영역으로 이루어져 있다. Experimental Control은 실험시설의 가력기를 구동하는 프로그램과 데이터 수집에 관여하고, Experimental Site는 실험영역과 연결시켜주는 통신에 관여를 하며, Experimental Setup은 가력기와 실험부재의 연결상태 등을 설정하는데 관여한다. 그리고 Experimental Element는 수치해석상의 절점의 연결과 초기 강성에 대해 관여한다.⁽³⁴⁾

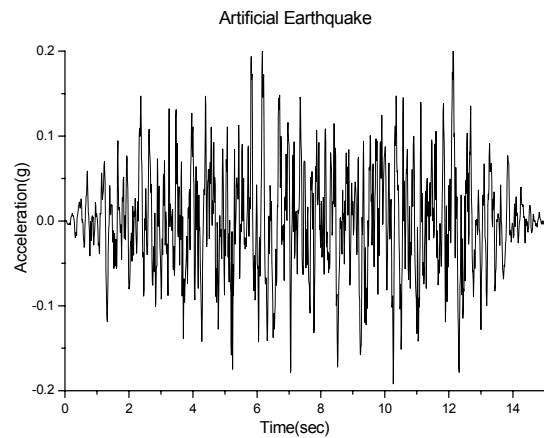
2.5 제안된 소형 하이브리드실험 시스템

2.3 절에서 소개한 초기 미니모스트 시스템의 문제점을 개선하기 위하여 수치해석 프로그램은 전용 프로그램인 OpenSees로 대체하였으며 통신에 관한 부분은 OpenFresco를 이용하였다. 이 과정에서 OpenSees와 OpenFresco를 하나로 통합하였으며, 미니모스트 시스템에서 사용할 수 있도록 수정하였다. 시스템을 수정함으로써 수치해석이 간편해졌으며 NEESpop 서버가 필요 없게 되었다. 이후 모든 시스템에 OpenSees와 OpenFresco를 적용하였다. 초기 미니모스트와 개선된 미니모스트 시스템에 대한 모식도를 그림 4와 같이 나타내었다. 그림 4에서도 보듯이 미니모스트 시스템은 초기 시스템과 동일하나 수치해석부분이 OpenSees와 OpenFresco로 대체된 것을 볼 수 있다.

초기 미니모스트와 개선된 미니모스트 시스템의 비교 분석을 위해 그림 5와 같은 15초의 입력지진파를 사용하였으

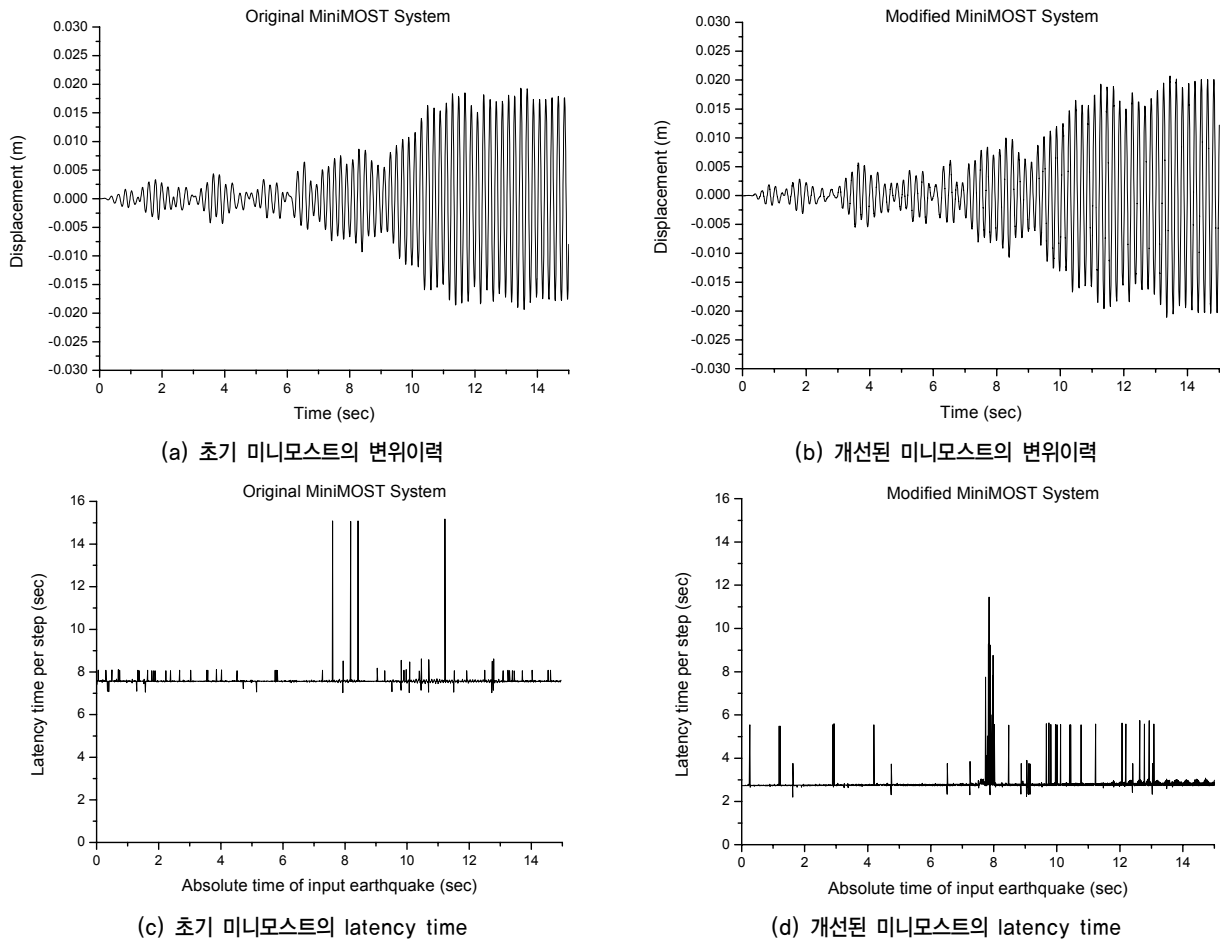


〈그림 4〉 초기 미니모스트와 개선된 미니모스트 시스템의 하이브리드 실험 모식도

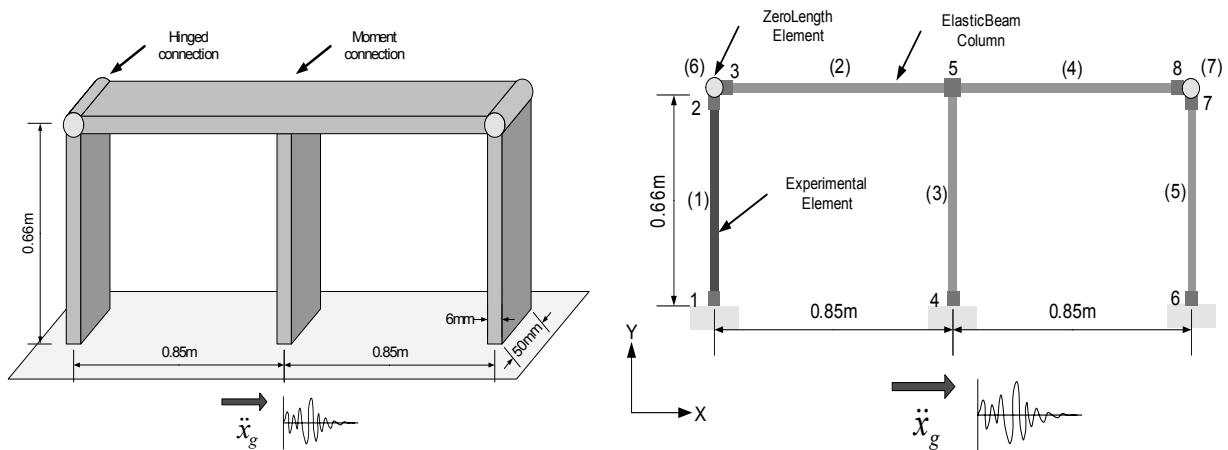


〈그림 5〉 입력지진파

며 해석간격은 0.01초 간격으로 총 1,500 스텝을 고려하였다. 입력지진파는 특정 응답스펙트럼을 푸리에 역변환을 통해 작성한 것은 아니며, NEES 프로젝트의 초기 미니모스트 시스템에 사용됐던 동일한 입력가속도를 적용하였다. 해석 결과, 그림 6에서 보듯이 시간이력 결과는 미소한 차이가 있으나 이는 초기 미니모스트의 수치해석 툴인 MATLAB과 개선된 미니모스트의 수치해석 툴인 OpenSees의 차이로 판단된다. 개선된 미니모스트의 경우, 초기 시스템에서는 스텝당 약 7.6초의 대기시간(Latency Time)을 보여 총 3시간 10분의 실험시간이 소요 되었으나 개선된 시스템에서는 대



〈그림 6〉 초기 미니모스트와 개선된 미니모스트의 해석결과 비교



〈그림 7〉 평면뼈대모형의 일반도(좌)와 이상화된 수치해석 모델(우)

기시간을 대폭 개선하여 스텝당 약 3.0초로 총 실험시간을 1시간 15분으로 단축시켰다. 전체적인 시스템이 스텝퍼 모터를 사용하기 때문에 실제의 유압 액추에이터를 사용하는 것보다는 실험 스텝마다 지연시간이 크게 걸리는 것으로 나타났다.

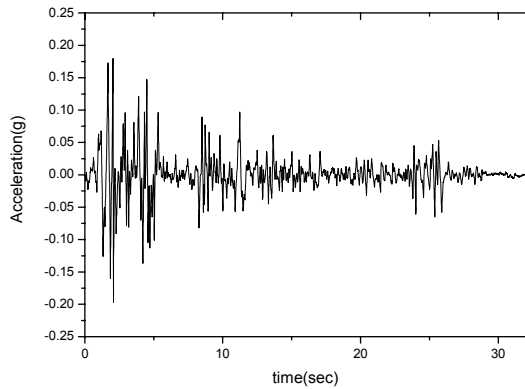
3. 하이브리드실험

3.1 실험모델

미니모스트 시스템을 이용한 하이브리드실험에 사용된 실험모델은 1-story 2-bay를 갖는 2차원 평면뼈대모형이다. 그

〈표 1〉 실험모델의 제원 및 단면특성

종류	단면제원 및 물성값
단면제원	50×6mm
강재종류	SS400
단면적	$3.0 \times 10^{-4} \text{m}^2$
단면2차모멘트	$9.0 \times 10^{-10} \text{m}^4$
탄성계수	$2.0 \times 10^{11} \text{N/m}^2$
단위질량	$7,850 \text{kg/m}^3$



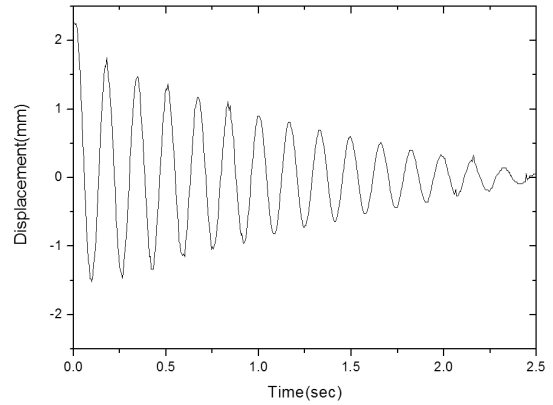
〈그림 8〉 입력 가속도 (EI Centro, NS)

림 7에서 보듯이 기둥의 높이는 0.66m, 기둥간격은 0.85m로 이루어져 있다. 자유도는 절점마다 3자유도(U_x, U_y, R_z)를 갖으며 바깥쪽 2개의 기둥 상부는 힌지로 연결되어 있고 중앙 기둥의 상부는 강절로 연결되어 있다. 각 기둥과 상부 부재는 50×6mm 단면의 SS400 강재를 사용하였다. 하이브리드실험 수행 시 (1)번 부재는 실험을 하고 나머지 부구조계모델에 대해서는 수치해석을 수행하였다. 표 1에 실험모델의 제원 및 단면특성을 정리하였다. 실험모델과 부구조계모델의 각 부재의 단면제원 및 물성값은 동일하며, 각 기둥의 하부는 모두 고정단으로 구속하였다.

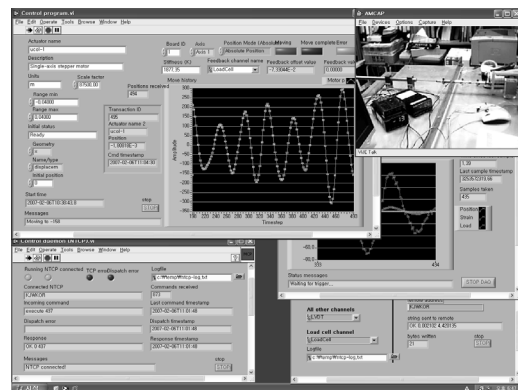
3.2 하이브리드실험 및 결과

하이브리드실험시 입력가속도는 진동대실험시 입력된 지진가속도(EI Centro NS)에 대한 진동대 베이스에서의 실제 피드백(Feedback) 신호를 사용하였으며, 실험부재의 탄성 상태에서의 거동만을 비교하기 위해 PGA값을 앞에서와 동일한 크기의 0.2g로 낮추어 적용하였다. 적분 시간간격은 0.005초이며 총 6400단계로 이루어져 있다.

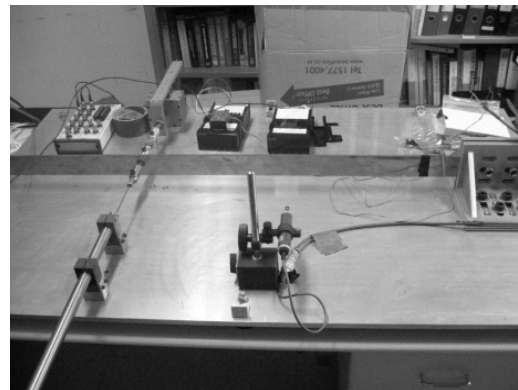
또한, 실험모델의 감쇠비는 자유진동실험을 실시하여 나온 결과로부터 대수감소법을 이용하여 구하였으며, 그림 9에 자유진동실험결과를 그래프로 나타내었다. 계산된 평균 감쇠비는 1.75%로 하이브리드실험시 수치해석에 적용하였



〈그림 9〉 자유진동실험결과

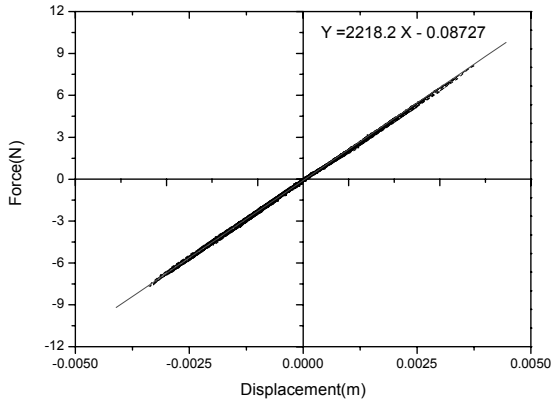


〈그림 10〉 실험진행화면(계측, 제어기)



〈그림 11〉 하이브리드실험 모습(실험체)

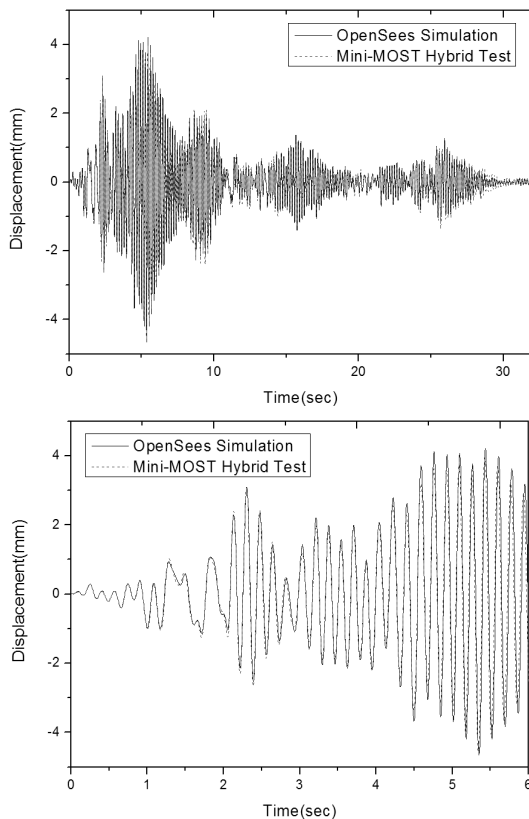
다. 그리고 수치적분법으로는 Newmark- β 법을 사용하였다. 하이브리드실험은 실험영역에서의 세팅이 끝나면 OpenSees 입력파일의 실행으로 시작된다. 그림 10과 그림 11은 각각 DAQ 및 Controller 컴퓨터의 실험진행화면과 하이브리드 실험의 모습을 보여주고 있다. DAQ 및 스테퍼모터의 컨트롤러는 NI 장비의 High-Speed M Series Multifunction DAQ와 NI PCI-7342 motion control hardware를 각각 사용하였고, 2.5절에서 설명한 개선된 미니모스트 시스템의 LabView 프로그램을 사용하였다.



〈그림 12〉 하이브리드실험의 하중-변위이력



〈그림 14〉 진동대실험의 전경



〈그림 13〉 하이브리드실험과 수치해석 결과 비교(상: 전체, 하: 확대)

하이브리드실험에 소요된 시간은 총 6400 스텝에 6시간 37분이 소요되었으며 한 스텝으로 환산하면 약 3.72초이다. 그림 12는 하이브리드실험에 의한 하중-변위이력을 나타낸 것으로 수치해석에 입력한 부재의 초기강성은 1,877.3N/m 인 반면 실제 부재의 강성은 2,218.2N/m로 측정된 것을 확인할 수 있으며 탄성거동을 보이고 있다.

그림 13은 전체 모델에 대한 OpenSees의 수치해석 변위 결과와 하이브리드실험의 변위결과를 비교한 그래프이다. 수치해석결과와 하이브리드실험의 변위양상은 거의 비슷하

지만 강성의 차이로 인해 미소한 변위차이가 발생하였다.

4. 진동대실험 및 검증

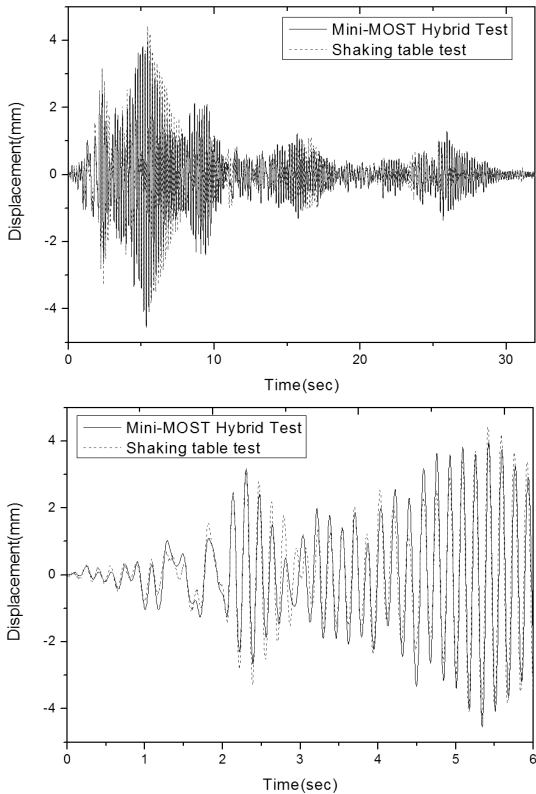
4.1 실험체 설치

NEESgrid의 초기 미니모스트 시스템에 관한 연구에서는 전체 구조계를 가정하고 부구조계인 기둥부재 하나에 대한 하이브리드실험만을 수행하였으나, 본 연구에서는 전체 구조계에 대한 진동대실험도 병행함으로써 그 결과를 비교 분석하여 하이브리드실험의 효율성과 적용성을 검증하고자 하였다. 진동대실험에서 사용한 실험체는 하이브리드실험 모델과 동일한 크기로 제작하여 크기효과에 대한 영향을 배제시켰다. 그림 14와 같이 진동대실험은 현대건설기술연구소의 1축 진동대에서 실시하였으며 실험데이터는 진동대 베이스에서 변위와 가속도를 측정하였으며 기둥상부에 LVDT와 가속도계를 부착하여 변위와 가속도를 측정하였다. 입력 가속도는 실제 지진가속도(EI Centro NS)를 사용하였으며, 실험부재의 탄성 상태에서의 거동만을 비교하기 위해 PGA 값을 앞에서와 동일한 크기의 0.2g로 낮추어 사용하였다.

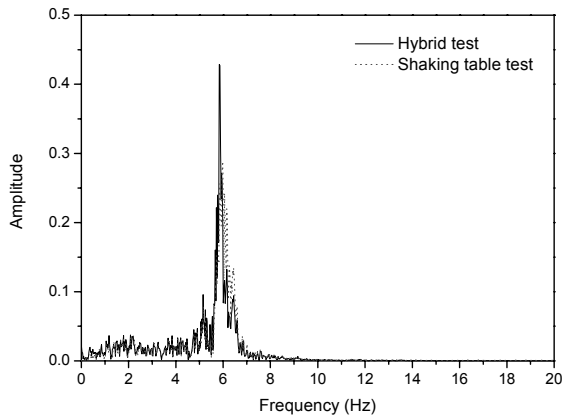
4.2 실험결과 및 분석

하이브리드실험의 변위이력 결과와 비교하기 위해서, 진동대실험의 기둥상부 변위에서 진동대 베이스의 변위를 뺀 상대변위와 비교하였다. 그림 15에 하이브리드실험과 진동대실험의 변위이력 결과를 비교하였다. 전체적인 변위이력은 시간에 따라 다소 오차가 있는 것을 확인할 수 있다.

하이브리드실험과 진동대실험의 결과를 주파수영역에서 비교하기 위하여 각 실험의 변위이력에 대해 FFT 분석을 수행하여 그림 16에 나타내었다. 이때 진동대실험에 의한 변위이력에 대해서는 정적성분(Static Noise)을 제거하기 위해



〈그림 15〉 하이브리드실험과 진동대실험 변위력 결과 비교 (상: 전체, 하: 확대)



〈그림 16〉 FFT 분석 결과 비교

〈표 2〉 진동대실험과 하이브리드실험의 결과 비교

비교항목	진동대실험 (A)	하이브리드실험 (B)	오차(%) (B-A)/A	
시간영역				
최대진폭(mm)	4.35	4.55	4.6	
주파수 영역				
고유진동수(Hz)	5.98	5.84	-2.3	
Amplitude (mm ² /Hz)	0.286	0.429	50.0	
응답에너지				
0~20Hz	0.270	0.266	-1.5	
합계	20~100Hz	0.049	0.001	-

High-pass Filtering 한 결과를 사용하였다. 각 항목에 대한

결과의 차이를 표 2에 비교하였다.

하이브리드실험 결과가 진동대실험 결과와 전체적인 변위양상은 매우 비슷한 거동을 보였다. 표 2에서 보면, 변위에 대한 최대진폭은 4.6%의 차이를 보였으며 고유진동수도 2.3% 낮게 나타났다. 이들 결과로부터, 하이브리드실험이 실제 지진에 대한 응답을 비교적 잘 모사하는 것을 알 수 있다.

그러나 고유진동수에 대한 최대응답크기는 하이브리드실험이 진동대실험에 비해 50% 크고 집중도가 높은 것으로 나타났는데, 이것은 하이브리드실험이 기둥 하나만을 실험하였고, 진동대실험은 전체 구조물에 대한 실험을 하였기 때문에 수치해석에서 반영하지 못하는 실제 구조물의 복잡한 구조적 시스템에 의한 최대응답크기의 저하가 일어난 것으로 판단된다. 또한 진동대실험에서는 특유의 저차모드성분이 포함되어 있는 것도 최대응답크기의 저하의 원인으로 판단된다.

그리고 주파수 분석을 통해 응답에너지의 면적을 계산한 결과, 대부분의 에너지가 20Hz 이내에 집중되어 있고 하이브리드실험과 진동대실험이 서로 비슷한 분포를 보였다. 20Hz 이상에서는 진동대실험의 결과가 하이브리드실험 결과보다 상대적으로 큰 에너지 분포를 보였는데, 이는 하이브리드실험시 속도가 느려서 구조물 자체의 동적효과를 반영하지 못하면서 고차모드의 영향을 모사하지 못하였기 때문으로 판단된다. 그러나 전체적인 크기는 20Hz 미만에 비해 무시할 수 있을 정도로 매우 작았다. 하이브리드실험은 단순히 액츄에이터를 이용하여 변위 또는 회전을 가력하기 때문에 일정부분 이상의 고차모드를 모사하지 못하는 것이다. 반면 진동대실험을 수행할 때에는 실제 지진의 지반운동과 동일한 하중을 받기 때문에 그에 따른 구조물의 고차모드까지 반영이 가능하다.

5. 결론

본 논문에서는 미니모스트 시스템을 구축하여 그에 따른 평면뼈대모형을 개발, 하이브리드실험을 수행하였다. 또한 국내에서는 아직 시도되지 않은 하이브리드실험과 진동대실험의 결과를 비교하여 검증을 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구는 미니모스트 시스템을 이용한 초기 하이브리드 실험기법에 관한 것으로서 가력기로 선형 스텝모터를 사용했기 때문에 수치해석상의 단위시간은 0.005초인 반면 실제 실험에서 한 스텝당 소요된 시간은 약 3.72초로 상

- 당히 많은 시간이 걸렸다.
2. 하이브리드실험과 진동대실험의 결과를 비교하면 하이브리드실험이 진동대실험에 비해 최대진폭은 4.6%, 고유진동수는 -2.3% 오차를 보였고 변위양상도 거의 비슷하게 나타나 하이브리드실험이 진동대실험을 대체할 수 있을 것으로 보인다.
 3. 변위이력의 주파수분석 결과, 최대응답크기는 50%의 차이를 보였으나 대부분의 에너지가 집중되어 있는 20Hz 이하에서의 응답에너지총합은 1.5% 이내로 매우 적은 오차를 보였다. 반면 하이브리드실험은 20Hz이상의 고차모드에 대한 동적효과는 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인으로는 하이브리드실험은 가력기로 계산된 변위만을 제어하기 때문에 진동대실험처럼 실제 지진에서 발생할 수 있는 전체구조물의 복합적인 움직임을 모사하지 못하기 때문인 것으로 판단하였다.
 4. 수치해석에서 결과 값에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 부재 강성과 감쇠비로서 보다 정확한 결과를 위해서는 실제 실험을 통해 실험체의 실제 강성과 감쇠비를 실험에 적용해야 한다.
 5. 본 연구는 선형 모델에 대한 실험으로 상대적으로 모델링이 간편하였으며 결과에 대한 신뢰도가 높았다. 하지만 향후 콘크리트 교각과 같은 비탄성 재료로 이루어져 있는 구조물에 대한 실험을 통해 비선형 거동을 보이는 하이브리드실험에 대한 검증도 이루어져야 할 것이며, 다자유도에 대한 실험도 추가로 검증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 사업의 연구비 지원(10 기술혁신 B01-모듈리교량 기술개발 및 실용화 연구단)에 의해 수행되었습니다. 또한 국가정보연구망(KREONET)의 사용을 지원해주신 한국과학기술정보연구원(KISTI)에도 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Hwang, T.H., and Scribner, C.F., "Effect of load history variation on cyclic response of R/C flexural members," *Proc. of 8th WCEE*, San Francisco, Vol. 6, 13-420, 1984.
2. Kobayashi, K., Kokusho, S., Takiguchi K., and Boo, C.Y., "Study on the restoring force characteristics of RC column to bi-directional deflection history," *Proc. of 8th WCEE*, San Francisco, Vol. 6, 537-544, 1984.
3. Leon, R.T., and Deierlein, G.G., "Considerations for the use quasi-static testing," *Earthquake spectra*, Vol. 12, No. 1, 87-109, 1996.
4. Low, S.S., and Moehle, J.P., "Experimental study of reinforced concrete columns subjected to multi-axial loading," *Report No. UCB/EERC-87/14*, University of California, Berkeley, California 1987.
5. Ohtani, K., Ogawa, N., Katayama, T., and Shibata, H., "3-D full-scale earthquake testing facility and earthquake engineering network," *Proceedings of the 3rd World Conference on Structural Control*, Como, Italy, 2002.
6. Hakuno, M., Shidawara, M., and Hara, T., "Dynamic destructive test of a cantilever beam controlled by an analog-computer," *Journal of JSCE*, Vol. 171, 1-9, 1969. (in Japanese)
7. Takahashi, K., Udagawa, K., Seki, M., Okada, T., and Tanaka, H., "Non-linear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator on-line system," *Transaction of the Architectural Institute of Japan*, Vol. 229, 77-83, 1975.
8. Mahin, S., and Shing, P.B., "Pseudodynamic method for seismic testing," *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 111, 1482-1503, 1985.
9. Sivaselvan, M.V., "A Unified View of Hybrid Seismic Simulation Algorithms," *Proceedings of the 8th. National Conference on Earthquake Engineering*, San Francisco, April 24, 2006.
10. Schellenberg, A., Mahin, S.A., and Fenves, G.L., "A Software Framework for Hybrid Simulation of Large Structural Systems," *Proceedings of Sessions of the 2007 Structures Congress, ASCE*, California, USA, May 16-19, 2007.
11. Nakashima, M., and Takai, H., "Computer-actuator online testing substructure and mixed integration techniques," *Proc. of the 7th Symposium on the Use of Computers in Building Structures, Architectural Institute of Japan*, Tokyo, Japan, 205-210, 1985. (in Japanese)
12. Dermitzakis, S.N., and Mahin, S.A., "Development of substructuring techniques for on-line computer controlled seismic performance testing," *UBC/EERC-85/04, Earthquake Engineering Research Institute*, University of California, Berkeley, California, 1985.
13. Takahashi, K., and Nakashima, M., "Japanese activities on on-line testing," *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, Vol. 113, 1014-1032, 1987.
14. Shing, P.B., and Mahin, S., "Experimental error propagation in pseudodynamic testing," *UBC/EERC-83/12, Earthquake Engineering Research Institute*, University of California, Berkeley, California, 1983.
15. Nakashima, M., Kaminosomo, T., and Ishida, M., "Integration techniques for substructure pseudodynamic test," *Proceedings of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Palm Springs, CA, 515-524, 1990.
16. Newmark, N.M., "A method of computation for structural dynamics," *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, Vol. 85, 67-94, 1959.
17. Nickell, R.E., "On the Stability of Approximation Operators

- in Problems of Structural Dynamics,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 7, 301-319, 1971.
18. Hilber, H.M., Hughes, T.J.R., and Taylor, R.L., “Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 5(3), 283-292, 1977.
 19. Hilber, H.M., and Hughes, T.J.R., “Collocation, Dissipation and ‘Overshoot’ for Time Integration Schemes in Structural Dynamics,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 6, 99-117, 1978.
 20. Chung, J., and Hulbert, G.M., “A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics With Improved Numerical Dissipation: The Generalized- α Method,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 60, 371-375, 1993.
 21. Chung, J., and Lee, J.M., “A new family of explicit time integration methods for linear and non-linear structural dynamics,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 37(23), 3961-3976, 1994.
 22. Hulbert, G.M., and Chung, J., “Explicit time integration algorithms for structural dynamics with optimal numerical dissipation,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 137, 175-188, 1996.
 23. 김철영, 정대성, 신재민, “대형구조물의 내진실험을 위한 하이브리드 실험기법,” 한국지진공학회 2005년 워크샵 발표집, 65-77, 2005.
 24. 최인규, 정대성, 김철영, 박영석, “KOCED 미니모스트 시스템을 이용한 온라인 하이브리드실험,” 대한토목학회 학술대회 논문집, 2430-2433, 2007.
 25. Kim, N.S., and Lee, D.G., “Pseudodynamic test for evaluation of seismic performance of base-isolated liquid storage tanks,” *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 3, 198-208, 1995.
 26. Chung, W.J. Yun, C.B., Kim, N.S., and Seo, J.W., “Shaking table and pseudodynamic tests for the evaluation of the seismic performance of base-isolated structures,” *Engineering Structures*, Vol. 21, 365-379, 1999.
 27. 김태진, 김태완, 박준희, “하이브리드 시뮬레이션 실험기법,” 한국강구조학회지, Vol. 18, No. 2, 42-46, 2006.
 28. 박규식, 권오성, Spencer, B.F. Jr., 윤태양, “UI-SimCor를 이용한 하이브리드 실험 소개,” 한국지진공학회 추계워크샵발표 논문집, 357-378, 2009.
 29. 정래영, “실시간 하이브리드 실험 시스템을 위한 Implicit 시간 적분법,” 한국지진공학회 논문집, 제 10권 제 5호, 99-106, 2006.
 30. 박은천, 이성경, 이현재, 문석준, 정형조, 민경원, “대형 MR감쇠기가 설치된 건축구조물의 실시간 하이브리드 실험 및 준능동 알고리즘 적용,” 한국전산구조공학회논문집, 제 21권 제 5호, 465-474, 2008.
 31. 이성경, 민경원, 박은천, “진동대를 이용한 구조물의 하이브리드 실험,” 대한건축학회지, 제 22권 제 5호, 57-63, 2006.
 32. Kwon, O., Elnashai, A.S., Spencer, B.F. Jr., and Park, K., “UI-SIMCOR: A global platform for hybrid distributed simulation,” *Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Canada, June 2007.
 33. Schellenberg, A., Kim, H.K., Takahashi, Y., Fenves, G.L., and Mahin, S.A., “OpenFresco Framework for Hybrid Simulation: Installation and Getting Started Manual,” *Department of Civil and Environmental Engineering*, University of California, Berkeley, 2007.
 34. Takanashi, Y., and Fenves, G.L., “Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35(3), 267-291, 2006.
 35. Elnashai, A.S., Papanikolaou, V., and Lee, D.H., “Zeus-NL-A System for Inelastic Analysis of Structures,” *MAE Center CD-Release 04-01*, 2004
 36. McKenna, F., “Object oriented finite element analysis: frameworks for analysis algorithms and parallel computing,” *Ph.D. Thesis*, University of California, Berkely, 1996.
 37. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., and Fenves, G.L., “OpenSees Command Language Manual,” *PEER Center*, UC Berkeley, 2005.
 38. McKenna, F., and Fenves, G.L., “OpenSees Manual,” *PEER Center*, <http://OpenSees.berkeley.edu>, 2001.
 39. Filippou, F.C., and Constantinides, M., “FEDEASLab Getting Started Guide and Simulation Examples,” Technical Report NEESgrid-2004-22, 2004.
 40. Subbarai, K., and Dokainish, M.A., “A survey of direct time-integration methods in computational structural dynamics-II. Implicit methods,” *Computers & Structures*, Vol. 32(6), 1387-1401, 1989.
 41. Combescure, D., and Pegon, P., “alpha-Operator splitting time-integration technique for pseudo-dynamic testing, error propagation analysis,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 16, 427-443, 1997.