

RC교각을 이용한 실시간 하이브리드 실험 시스템의 적용성 연구

Verification of Real-time Hybrid Test System using RC Pier Model

이진행¹⁾ · 박민석¹⁾ · 채윤병²⁾ · 김철영^{1)*}

Lee, Jinhaeng¹⁾ · Park, Minseok¹⁾ · Chae, Yunbyeong²⁾ · Kim, Chul-Young^{1)*}

¹⁾명지대학교 토목환경공학과, ²⁾올드도미니언대학교 토목환경공학과

¹⁾Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, ²⁾Department of Environmental Engineering, Old Dominion University

/ A B S T R A C T /

Structure behaviors resulting from an earthquake are experimentally simulated mainly through a shaking table test. As for large-scale structures, however, size effects over a miniature may make it difficult to assess actual behaviors properly. To address this problem, research on the hybrid simulation is being conducted actively. This method is to implement numerical analysis on framework members that affect the general behavior of the structure dominantly through an actual scale experiment and on the rest parts by applying the substructuring technique. However, existing studies on hybrid simulation focus mainly on Slow experimental methods, which are disadvantageous in that it is unable to assess behaviors close to the actual level if material properties change depending on the speed or the influence of inertial force is significant. The present study aims to establish a Real-time hybrid simulation system capable of excitation based on the actual time history and to verify its performance and applicability. The hybrid simulation system built up in this study utilizes the ATS Compensator system, CR integrator, etc. in order to make the target displacement the same with the measured displacement on the basis of MATLAB/Simulink. The target structure was a 2-span bridge and an RC pier to support it was produced as an experimental model in order for the shaking table test and Slow and Real-time hybrid simulations. Behaviors that result from the earthquake of El Centro were examined, and the results were analyzed comparatively. In comparison with the results of the shaking table test, the Real-time hybrid simulation produced more similar maximum displacement and vibration behaviors than the Slow hybrid simulation. Hence, it is thought that the Real-time hybrid simulation proposed in this study can be utilized usefully in seismic capacity assessment of structural systems such as RC pier that are highly non-linear and time-dependent.

Key words: Slow hybrid test, Real-time hybrid test, Earthquake behavior, Evaluation of seismic performance

1. 서론

구조물의 내진성능을 실험적으로 평가하기 위해 많은 연구자들은 오랜 기간 연구를 수행하였으며 실험방법을 발전시켜왔다. 동적 응답을 파악하기 위한 기존의 내진성능 평가 방법에는 진동대실험 (Shaking Table Test)과 함께 준정적실험 (Quasi-static test) 및 유사동적실험 (Pseudo-dynamic test)이 주로 사용되어 왔다. 진동대실험은 진동대 테이블 위에 실험체를 설치하고 실제 지반거동을 모사하여 실험하는 방법으로서 구조물의 거동을 가장 실제와 가깝게 파악할 수 있는 장점이 있는 반면에, 대상 구조물이 대형일 경우

진동대의 규모에 따른 실험체 크기의 제약으로 인하여 축소 모형을 사용하게 되며 이에 수반되는 오차 (size effect)가 크다는 단점이 있다. 준정적 실험은 대상 구조물의 수치해석을 통해 얻어진 특정 반복 하중을 부재에 가하여 나타나는 하중-변위 이력으로 구조물의 성능과 부재 자체의 탄소성 및 극한 강도를 나타낼 수 있는 실험이다. 기존 유압장치 및 실험시설을 이용하기 때문에 비교적 실험비용이 저렴하지만 정해진 변위로 실험을 수행하기 때문에 시간에 따라 변화하는 강성과 구조물의 동적 특성을 파악하기 어렵다. 유사 동적실험은 수치 해석을 통해 얻어진 구조물의 변위 이력을 실험 부재에 적용하게 되며, 측정된 복원력을 다음 단계의 수치해석에 반영하여 다음 시간 단계 변위이력을 실험 부재에 가하는 실험방법이다. 기존의 유압장치를 사용하여 대형구조물을 실험할 수 있으며 이전 실험들 보다 구조물의 비선형 거동을 고려할 수 있는 장점이 있다. 하지만 직접 실험을 수행하는 부재 이외의 구조물의 거동을 고려할 수 없으며 기존의 실험장치의 한계로 인한 데

*Corresponding author: Kim, Chul-Young

E-mail: cykim@mju.ac.kr

(Received March 5, 2018; Revised April 24, 2018; Accepted April 25, 2018)

이터 변환에 지연 현상이 발생되어 실시간 실험을 수행하기 어렵다.

이러한 기존의 내진성능평가실험의 한계를 극복하기 위한 대안으로써 최근 하이브리드 실험기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 실험 (Hybrid Test Technique)이란 지진이 발생하였을 때 전체 구조물의 거동에 큰 영향을 미치는 부재는 직접 유사동적실험을 수행하고 나머지 구조물은 부구조계기법 (Sub-structuring technique)을 사용하여 수치해석을 수행하며, 이들 각각의 결과를 동시에 연계함으로써 보다 실제에 가까운 구조물의 내진거동을 모사하는 것이다. 하이브리드 실험기법 중에서도 저속 하이브리드 실험은 기존의 유압 및 제어 시스템과 수치해석 알고리즘을 이용함으로써 수행시간이 상대적으로 길어 콘크리트 구조물의 관성력과 감쇠력을 고려하지 못하는 단점이 있다. 이에 반해 실시간 하이브리드 실험기법은 실시간으로 변위를 제어함으로써 구조물의 실제 거동을 보다 실제에 가깝고 효과적으로 모사할 수 있다 [1].

위와 같은 하이브리드 실험의 개념은 Hakuno et al. [2]에 의해 제안되었다. 진동대를 사용하지 않고 구조물의 거동을 예측할 수 있는 대안을 제공하였다. 아날로그컴퓨터를 사용하여 운동방정식을 풀어냈으며 구조물의 하중을 가력하기 위한 액츄에이터를 사용하여 단자유도 시스템을 분석하였다. Takanshi et al. [3]은 디지털 컴퓨터를 이용하여 선형 가속법을 적용한 미분방정식을 풀어내 비선형 동적거동을 연구하였으며 지금의 하이브리드 시뮬레이션의 기초를 확립하였다. 1980년대에 들어 미국, 일본 등에서 하이브리드 실험의 개발 및 유효성 입증에 대한 연구가 수행되었다. Takanashi and Nakashima [4], Shing and Mahine [5]는 하이브리드 실험 알고리즘을 개발하였으며 실험에 대한 신뢰성에 관련하여 분석하였다. 이와 같이 하이브리드 실험에 대한 기본개념을 정립하는 연구들이 진행되었으며, 동시에 실험의 정확도와 효율성을 높이기 위해 적절한 수치적분법과 실험적 오류를 줄이기 위한 연구들이 진행되었다. Tanaka et al. [6]은 중앙차분법을 이용한 하이브리드 실험을 수행하였으며, Thewalt et al. [7]은 암시적 적분 방법을 이용하여 측정된 복원력을 수치모형에 대입하여 실험을 수행하였다. Nakashima et al. [8]은 Operator-Splitting 방법을 적용하여 비선형해석을 반복계산 없이 실험을 수행하였다. Shing and Vannan [9]은 수정된 Newton method의 기반인 HHT (Hilber-Hughes-Talor)를 이용하여 α -method with Initial Stiffness 수치해석 알고리즘을 제안하였다. Nakashima et al. [10]은 단자유도 강재 전단 판넬을 명시적 적분 방법을 적용하여 실험 수행을 하였다. 하이브리드 실험은 1990년 후반에 전기 전자 분야의 발전으로 인해 실시간 하이브리드 실험의 연구가 활발히 이루어졌다. Nakashima and Masaoka [11]는 초기 하이브리드 시뮬레이션 시스템을 개선하였으며, 디지털 서보 컨트롤러와 C언어 프로그래밍을 이용한 응답 해석과 변위 신호 생성을 따로 분리하여 복잡했던 구조실험 시스템에 적용하였다. 또한, 보정 시스템을 통해 바로 전 단계변위와 현 단계변위만으로 연속적인 변위 신호를 생성하는 보정 시스템이며 빠르게 진행되는 실시간 실험에 기본이 되는 실험 방법을 구축하였다.

실시간 하이브리드 실험에 대한 개념 정립은 Nakashima [12]에 의하여 제시되었으며 이후 실시간 실험 시 발생하는 지연현상에 대한 보정 연구들이 진행되었다. Zhao [13]은 PLC를 이용하여 실시간 실험의 오차를 줄였으며, Jung and Shing [14]은 비선형 응답을 고려한 고정 반복수를 실시간 하이브리드 실험에 적용하여 실험을 수행하였다. Cheng [15]은 비선형 응답을 고려하여 고정된 반복수를 가지는 실시간 실험을 실시하였다. Chae et al.

[16]은 ATS Compensator 시스템을 이용한 실시간 하이브리드 시뮬레이션 보정시스템을 제안하였다. 또한 실시간 하이브리드 실험은 진동대를 통한 연구도 수행되어왔다. Reinhorn et al. [17]은 진동대를 이용한 부분구조물 실시간 하이브리드 실험을 진행하여 전체 구조물의 거동을 구현하였으며, Xiaoyun et al. [18]은 3층 구조 모델을 이용하여 진동대를 이용한 실시간 하이브리드 실험을 실시하였다.

이러한 하이브리드 실험은 미국의 NEES, 일본의 E-Defence, 대만의 NCREC 등에 의해 지속적으로 연구되고 있다. 국내의 경우 국외의 비례 다소 늦게 하이브리드 연구가 수행되었다. 2004년부터 KOCED의 사업의 일환으로 국외 사례들을 참고하여 실험 및 연구를 수행하고 있다. 국내에서는 Kim [19]이 원격 하이브리드 실험의 공동연구 개발 환경을 구축하였으며, Choi [20], Cho et al. [1]은 미니모스트 기반 소형강재모형을 이용한 실제 지진에 대한 구조물의 거동을 하이브리드 실험과 진동대실험을 비교 분석하였다. Kang et al. [21]은 HHT 시간 적분법을 사용하여 3층 3경간 철근 콘크리트 골조 구조물 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다. Lee [22]와 Kim et al. [23]은 부분 구조 모형을 사용하여 1경간 2층 강 뼈대 구조물에 대한 단 자유도 하이브리드 실험에 대한 연구를 진행하였으며 Opensees, OpenFresco를 이용하여 실시간에 근접한 실험을 수행하였다. Na et al. [24]은 병렬 제어 알고리즘과 최적 하이브리드 시스템을 적용하여 실시간 구조물 동적실험을 수행하였으며, Park et al. [25]은 소형 강재 모델을 이용한 실시간 하이브리드 실험과 진동대실험을 비교하는 실험을 실시하였으며 소형 RC교각을 이용하여 실시간 하이브리드 시스템을 구축하고 수치해석과 비교하는 연구를 수행하였다. Park et al. [26]은 유사동적 하이브리드 지진응답 시뮬레이션 시스템을 구축하여 단 자유도계 구조물에 대한 유사동적 하이브리드 온라인 실험 연구를 수행하였다.

기존연구들의 분석에서 보듯이 국내에서는 주로 저속 또는 고속 하이브리드 실험에 관한 연구들이 수행되어왔으며 일부 수행된 실시간 하이브리드 실험도 주로 선형 부재를 대상으로 실시되었다. 외국에서는 실시간 하이브리드 실험의 알고리즘 개발이 많이 진행되었으나 실제 비선형 RC 부재를 이용하여 진동대실험과 하이브리드실험을 함께 수행하고 그 적용성을 검증한 연구는 전혀 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 Chae et al. [16]이 제시한 ATS Compensator를 적용한 MATLAB기반의 최적 하이브리드 시스템을 구축하고, 이의 적용성을 검증하기 위해 RC교각을 이용하여 저속 및 실시간 하이브리드 실험을 수행하고 진동대실험과 그 결과를 비교 분석하였다.

2. 하이브리드 실험

2.1 하이브리드 실험 개요

하이브리드 실험은 유사동적실험에서 IT기술을 접목시켜 발전시킨 실험 방법이다. 기존의 유사동적실험의 경우 Fig. 1과 같은 알고리즘으로 진행된다. 단자유도 구조물에 대해 수치해석을 수행하며 유압가력기를 통해 실험체에 계산된 변위를 가력하게 된다. 이후 실험체에 측정된 응답변위를 다시 다음단계의 수치적분에 반영한다. 기존의 실험장비의 한계로 인한 유압장비와 데이터변환에 지연 현상이 발생되어 실시간 거동을 예측하기에는 한

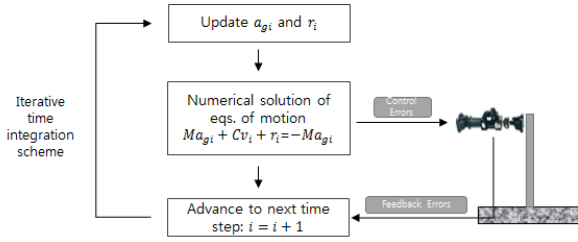


Fig. 1. Mimic of pseudo-dynamic test

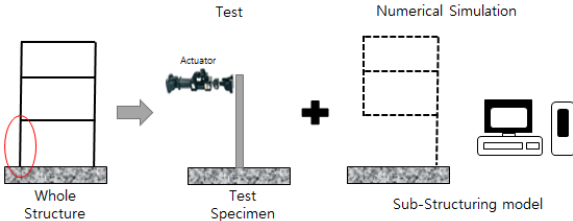


Fig. 2. Mimic of hybrid simulation

계가 있다.

하이브리드 실험은 부구조계기법을 적용하여 내진거동에 가장 큰 영향을 받는 부재를 실험하고 나머지 구조계는 수치해석을 수행하여 전체 구조물의 거동을 파악하는 실험방법이다 (Fig. 2 참조).

하이브리드 실험은 진동대실험 및 유사동적실험의 단점을 개선하여 보다 실제와 유사하게 거동을 파악할 수 있으며, 부분구조물을 이용하여 전체 구조물의 거동을 파악하기 때문에 상대적으로 비용이 저렴하다. 현재는 고성능 유압 가력기와 제어 및 보정시스템의 발달로 실제 지진가속도를 제어할 수 있는 실시간 하이브리드 실험이 가능하다.

2.2 수치적분법

구조물의 동적거동해석은 직접적분법을 이용하여 해를 도출하게 된다. 적분법에는 명시적 방법, 암시적 방법이 있다. 명시적 방법의 경우 각 시간 단계에서 실험체 변위를 바로 전 단계의 변위를 통해 구할 수 있으며 반복계산이 필요 없으며 실험속도가 빠르다. 암시적 방법의 경우 각 시간단계에서 실험체 변위를 구하기 위해 바로 전 단계, 현 단계의 거동들도 필요하며 안정성과 정확성은 우수하지만 해석시간이 비교적 길다. 명시적 방법의 경우 Chen and Ricle’s (CR)법, 중앙차분법, KR법, Newmark법 등이 있으며 암시적 방법의 경우 HHT법, Operator-Splitting법, α -OS법, Newmark- β 등이 있다. 이번 논문에서는 실시간 실험을 정확하고 빠르게 구현하기 위한 명시적 방법인 CR 법이 사용되었다.

CR법은 실험체에 대한 강성 매트릭스와 변위의 곱으로 실험체의 복원력을 계산하여 운동방정식에 대입한다. 본 연구에 사용된 하이브리드 실험의 운동방정식 CR 법은 다음 식 (1)과 같다.

$$M\ddot{u}_{i+1} + C\dot{u}_{n+1} + r_{n+1}^{c,a} + r_{n+1}^{c,e} = F_{n+1} \quad (1)$$

여기서, M 은 질량 C 는 감쇠계수이며, $\ddot{u}_{n+1}, \dot{u}_{n+1}, F_{n+1}$ 는 각 시간단계에서의 가속도, 속도 및 외력에 관련된 벡터이다. $r_{n+1}^{c,a}$ 와 $r_{n+1}^{c,e}$ 각 해석과

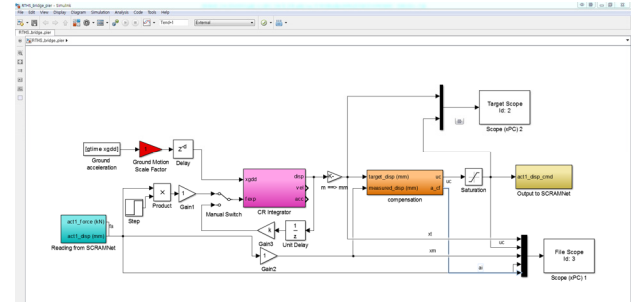


Fig. 3. MATLAB/simulink block diagram

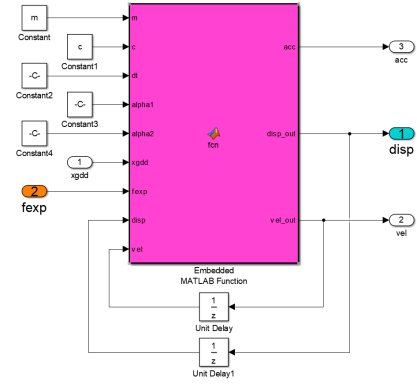


Fig. 4. Input-output of MATLAB/Simulink numerical integration

실험을 통해 얻어진 복원력 벡터이다.

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \alpha_1 \Delta t \ddot{u}_n \quad (2)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \alpha_2 \Delta t^2 \ddot{u}_n \quad (3)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = [4M + 2\Delta t C + \Delta t^2 (k^e + k^a)]^{-1} \cdot 4M \quad (4)$$

실험에 사용된 속도와 변위는 식 (2), (3)을 통해 계산된다. Δt 는 시간간격을 나타내며 α_1 는 식 (4)를 통해 계산된다. k^e, k^a 은 각각 실험과 해석을 통해 얻어진 선형 탄성 강성계수이다.

2.3 하이브리드 시스템

이번 실험에서 사용된 하이브리드 실험은 Fig. 3과 같이 MATLAB/Simulink를 이용하여 구조물 모델링 및 1자유도 구조계의 운동방정식을 이용한 수치해석을 실시하였으며, 이는 Fig. 2에서 Sub-Structuring model에 해당된다. MATLAB /Simulink Model에서는 Fig. 4와 같이 수치적분을 통해 출력되는 변위를 Control PC를 통해 실험체에 제어되며 측정된 복원력을 입력받아 다음 스텝의 변위를 계산하고 이와 같은 과정을 반복하여 실험을 수행한다. 하이브리드 시스템은 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 Real-time Target PC에서 SCRAMNet을 이용하여 시스템간 통신을 광속으로 연결하고 Host PC에서는 통신을 담당하는 Real-time Target PC를 제어하며 Controller PC에서 MTS 793 Station Manager를 사용하여 유압가력기를 제어한다.

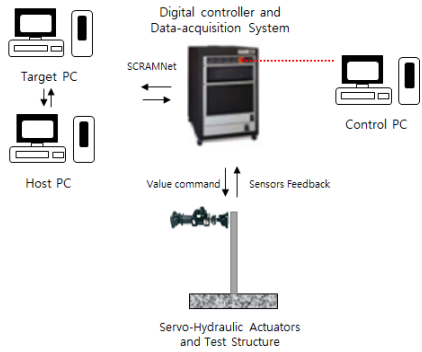


Fig. 5. Mimic of hybrid system

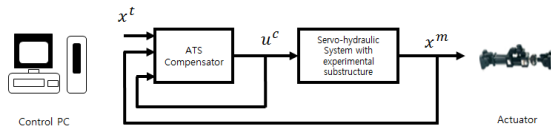


Fig. 6. ATS Compensator block diagram

2.4 ATS (Adaptive Time series) Compensator

실시간 하이브리드 실험은 각 시간단계마다 실시간으로 구조적 변위를 계산하여 실험이 수행된다. 실시간으로 빠른 실험이 수행될 때 유압 가력기의 동적 특성에 의하여 목표변위와 측정변위 사이에 응답 지연 현상이 생기며 이로 인해 부정확한 실험결과를 얻을 수 있다. 이를 보정하기 위해 Chae et al. [16]가 제시한 ATS Compensator를 사용하였다. ATS Compensator의 경우 실시간 하이브리드 실험을 수행하도록 설계되었으며 목표변위와 측정 변위를 잘 일치시키는 보정 시스템이다. Fig. 6는 ATS Compensator Block Diagram의 개략도를 나타내고 있다. 목표변위 (x^t)와 ATS Compensator 통과한 변위 (u^c), 액추에이터 측정변위 (x^m)를 받아들여 매시간 실시간 최적의 업데이트를 통해 정확한 실험을 수행한다 [16].

3. 진동대, 저속 및 실시간 하이브리드 실험

3.1 실험모델

본 연구의 실험 및 해석 대상은 Fig. 7과 같이 한 개의 사각형 RC교각에 상부구조는 질량에 의한 영향만 고려한 단자유도 모델이다. 실험장비의 용량을 고려하여 Fig. 8과 같은 단면을 가지는 유효높이 1.55 m의 교각과 6.6 ton의 부가질량을 임의로 설정하였다.

진동대 실험의 경우, Figs. 7 및 9와 같이 콘크리트 블록을 제작하여 부가 질량을 고려하였으며, 저속 및 고속 하이브리드 실험에서는 RC교각은 실험으로, 부가질량은 해석적으로 고려하여 모사하였다.

3.2 진동대실험

진동대 실험은 부산대학교의 지진방재연구센터에서 Fig. 9와 같이 설치하여 수행되었다. 진동대 실험 시 입력 지진 가속도는 미국 UC Berkeley PEER

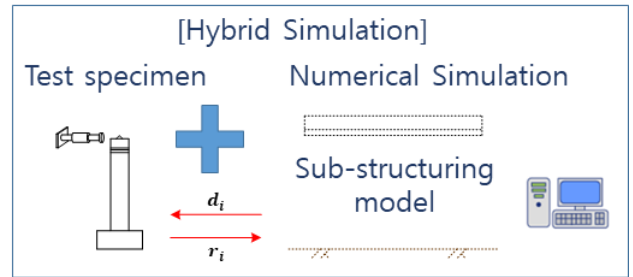
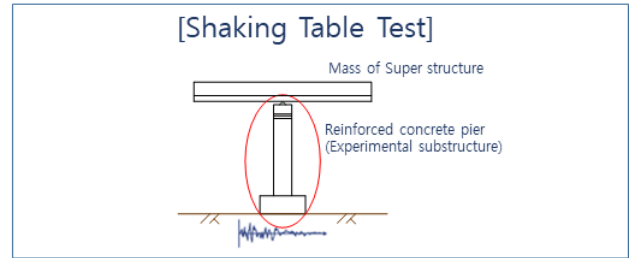


Fig. 7. RC pier experimental model

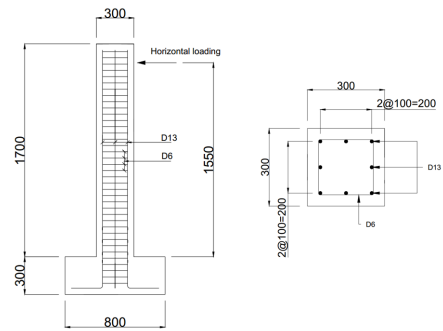


Fig. 8. Drawing for reinforcement bars (unit:mm)

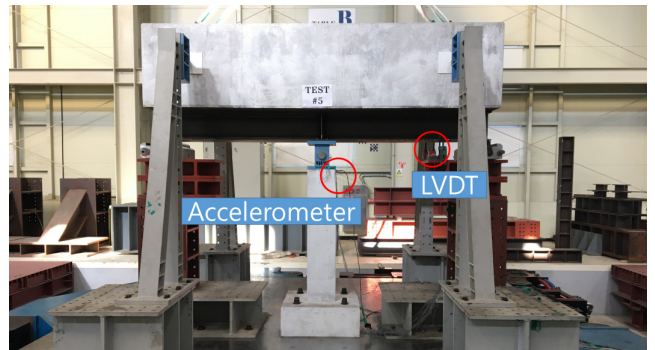


Fig. 9. Shaking table test setup

(Pacific Earthquake Engineering Research Center)센터의 Database에서 El Centro 지진 가속도 (Duration=53.74 sec, Peak=0.34 g)를 사용하였다. 그러나, 진동대에 설치된 실험체의 무게와 특히 진동대 면에서 1.55 m 이상의 편심을 가지고 설치된 6.6 ton의 부가질량 때문에 실험 수행 시 진동대 내부에 설치된 가속도계에서 측정된 진동대의 실제 가진 가속도는 입력 가속도와 차이가 있다. 실제 계측된 진동대의 가진 가속도는 Fig. 10과 같으며, 실험 수행 전후 대기 및 정지시간까지 포함하여 총 85초, 512 Hz 샘플링속도로 45,321 Step이며 최대가속도는 0.63 g이다.

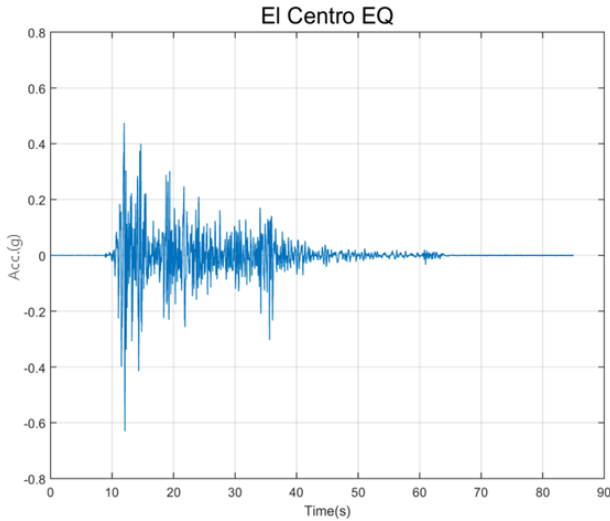


Fig. 10. Measured acceleration of shaking table test



Fig. 11. Hybrid Simulation setup

3.3 저속 및 실시간 하이브리드 실험

저속 및 실시간 하이브리드 실험에서는 진동대 실험에 사용된 콘크리트 블록은 수치해석모델로 고려하였으며, 이 경우 부가질량으로만 고려하고 강성과 감쇠비는 무시하였다. 실험에 사용된 장비는 가진속도 1000 mm/s 까지 가능한 250 kN 액츄에이터를 사용하였다. 수치해석은 CR법을 이용하였으며 하이브리드 실험의 설치 모습은 Fig. 11과 같다.

하이브리드 실험 시의 가진가속도는 El Centro 지진을 입력가속도로 한 진동대 실험에서 실제 계측된 Fig. 10의 진동대 가속도를 사용하였다. 실시간 하이브리드 실험은 Fig. 10의 85초간의 가속도 시간이력에 대하여 동일한 시간 동안 수행되었으며, 저속하이브리드 실험에서는 일반적인 정적 액츄에이터 및 컨트롤러로 구현이 가능한 속도로서 입력 시간이력의 64배인 5,440초로 수행하였다.

3.4 실험결과 및 분석

본 연구에서는 실시간 하이브리드 실험시스템의 적용성을 검증하기 위하여 부가질량을 가지는 단일 RC교각모형을 제작하고 이의 진동대 실험을 실시한 후, 이를 기준으로 저속 하이브리드 실험과 실시간 하이브리드 실험의 결과를 비교하였다. 결과 비교를 위하여 시간이력에서의 최대변위와 주파수 영역에서의 고유진동수와 스펙트럼의 크기를 분석하였다. 각 실험의 가속도

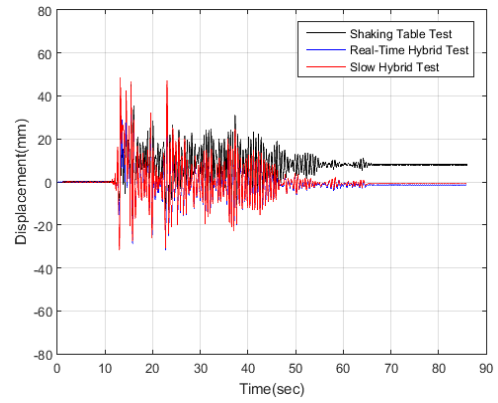


Fig. 12. Comparison of displacement history of slow, real-time hybrid simulation and shaking table test

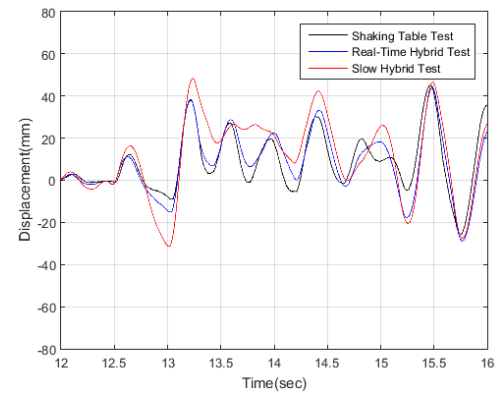


Fig. 13. Close-up view of displacement history of slow, real-time hybrid simulation and shaking table test (12~16 s)

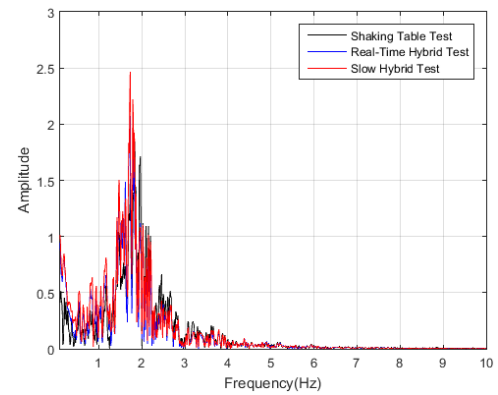


Fig. 14. Comparison of FFT analysis result

시간이력은 Fig. 12에 나타내었고, 최대변위, 고유진동수 및 스펙트럼의 크기는 Table 1에 비교하여 나타내었다.

Fig. 12의 전체적인 진동양상에서 진동대 실험의 응답이 최대진폭구간 이후에 일정 수준의 DC 성분을 보이는 것은 최대진폭구간에서 항복이 발생하였기 때문이다. 이 그림에서는 변위이력의 유사성을 검토하기 힘들기 때문에 Fig. 13에 12~16초의 최대변위구간을 확대하여 나타내었다. 여기에서 저속하이브리드 실험이 진동대 실험에 비하여 큰 값을 보이며 진동의 세부적인 양상을 정확히 모사하지 못하고 있는 것에 반하여, 실시간 하이브리드 실험은

Table 1. Comparison of shaking table test and hybrid simulation results

Comparisons		Shaking table test (A)	Real-time hybrid simulation (B)	Error (%) (B-A)/A	Slow hybrid simulation (C)	Error (%) (C-A)/A
Time domain	Maximum displacement (mm)	45.33	43.90	3.15	48.30	6.15
Frequency domain	Natural frequency (Hz)	1.82	1.72	5.65	1.73	5.20
	Amplitude (mm ² /Hz)	1.87	2.07	10.75	2.46	31.6
Time (sec)		85	85	-	5440	-

상대적으로 진동대실험의 결과와 매우 유사하게 거동하는 것을 확인 할 수 있다. 저속 및 실시간 하이브리드 실험의 최대변위를 진동대실험의 최대변위와 비교한 결과, 실시간 하이브리드 실험은 3.15%의 오차를, 저속 하이브리드 실험은 6.15%의 오차를 보였다.

주파수영역 분석결과 고유진동수의 경우 저속 하이브리드 실험의 경우 1.73 Hz, 실시간 하이브리드 실험의 경우 1.72 Hz로서, 두 결과는 거의 동일하나 진동대실험의 결과인 1.82 Hz와는 약 5% 정도의 오차를 보였는데, 이는 하이브리드 실험에서는 액츄에이터의 가진과 이로 인한 시험체의 상호작용의 영향이 있는 것으로 판단된다. Amplitude 비교결과 진동대실험과 실시간 하이브리드 실험의 오차 10.75%, 저속 하이브리드와의 오차는 31.6%로서 저속 하이브리드 실험이 진동대실험에 비하여 거동을 과대 평가하고 있는 현상을 수치적으로 다시 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 실제와 동일한 시간이력을 가진할 수 있는 실시간 하이브리드 실험 시스템을 구축하고 이를 이용한 실험결과를 저속 하이브리드 실험 및 진동대실험과 비교 하여 이의 성능을 검증하고 적용성을 검토하였다.

ATS Compensator와 MATLAB/Simulink를 이용한 최적화된 실시간 실험 시스템을 활용하여 실시간 하이브리드 실험을 수행하였으며 실험모델은 2경간 교량을 지지하는 RC교각을 이용하여 비선형 거동을 하는 구조물에 대한 시스템 검증을 실시하였다.

최대변위 비교 결과 진동대실험과 실시간 하이브리드 실험은 3.15%, 진동대실험과 저속 하이브리드 실험은 6.15%의 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 최대변위구간(12~16초)에서의 전체적인 거동 양상이 저속 하이브리드 실험 보다 실시간 하이브리드 실험이 진동대실험과 더 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

주파수영역 분석 결과 고유진동수는 진동대실험에 의한 1.82 Hz와는 약간의 차이는 있으나 실시간 하이브리드 실험이 1.72 Hz, 저속 하이브리드 실험이 1.73 Hz로써 거의 유사한 결과를 보였으며, 스펙트럼의 최대값의 차이는 실시간 하이브리드 실험이 10.75%로써 저속 하이브리드 실험의 31.6%에 비하여 더 근사한 값을 보였다.

상기한 결과들을 종합해 볼 때, 구축된 실시간 하이브리드 실험 시스템은 저속 하이브리드 실험에 비하여 보다 실제에 유사한 결과를 주며 진동대 실험의 대안으로서 매우 유효한 방법인 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 국토교통기술촉진연구사업 지원으로 수행되었습니다(과제번호 16CTAP-B067472-04).

/ REFERENCES /

1. Cho SM, Choi IG, Jung DS, Kim CY, Verification of Hybrid Structural Test Technique by Shaking Table Test of a Linear 2-Dimensional Frame Model, EESK, 2010;14(6):33-43.
2. Hakuno M, Shidawara M, Hara T, Dynamic Destructive Test of a Cantilever Beam, Controlled by an Analog-computer, Transactions of the Japan Society of Civil Engineers, 1969;1969(171):1-9.
3. Takanashi K, Udagawa K, Seki M, Okada T, Tanaka H, Non-linear Earthquake Response Analysis of Structures by a Computer Actuator On-line System (details of system), Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1975;229:77-83.
4. Takanashi K, Nakashima M, Japanese Activities on Online Testing, Journal of Engineering Mechanics, 1987;113(7):1014-1032.
5. Shing PB, Mahinm S, Experimental Error Propagation in Pseudo-dynamic Testing, UCB/EERC-83/12, Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkely California, c1983.
6. Tanaka H, A Computer-actuator On-line System for Non-linear Earthquake Response Analysis of Structures, Journal of the Industrial Science, 975;27:15-19.
7. Thewalt CR, Mahin SA, Hybrid Solution Techniques for Generalized Pseudodynamic Testing, UCB/EERC-87/09, Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, California, c1987.
8. Nakashima M, Kaminosono T, Ishida M, Ando K, Integration Techniques for Substructure Pseudodynamic Test, Proc. of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 1990;2:515-524.
9. Shing PB, Vannan MT, Implicit Algorithm for Pseudodynamic Tests: Convergence and Energy Dissipation, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1991;20(9):809-819.
10. Nakashima M, Akazawa T, Igarashi H, Pseudo-dynamic Testing using Conventional Testing Devices, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995;24(10):1409-1422.
11. Nakashima M, Masaoka N, Real-time On-line Test for MODF Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999;28(4):

- 393–420.
12. Nakashima M. Development, Potential, and Limitations of Real-time Online (Pseudo-dynamic) Testing. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 2001;359(1786):1851–1867.
 13. Zhao J, French C, Shield C, Posberg T. Considerations for the Development of Real-time Dynamic Testing using Servo-hydraulic Actuation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003;32(11):1773–1794.
 14. Jung RY, Benson Shing P. Performance Evaluation of a Real-time Pseudodynamic Test System. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006;35(7):789–810.
 15. Chen C. Development and Numerical Simulation of Hybrid Effective Force Testing Method. Ph.D. Civil and Environmental Engineering, Lehigh University. c2007.
 16. Chae Y, Kazemibidokhti K, Ricles JM. Adaptive Time Series Compensator for Delay Compensation of Servo-hydraulic Actuator Systems for Real-time Hybrid Simulation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2013;42(11):1697–1715.
 17. Reinhorn AM, Sivaselvan MV, Liang Z, Shao X. Real-time Dynamic Hybrid Testing of Structural System. *Proc. of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*. c2004.
 18. Shao X, Reinhorn AM, Sivaselvan MV. Real-time Hybrid Simulation using Shake Tables and Dynamic Actuators. *Journal of structural Engineering*, 2011;137(7):748–760.
 19. Kim DW. Development of The Remote Hybrid Experiment and Collaboration Tool in Civil Engineering Collaboratory. Master Thesis, Computer Engineering, Hongik Univ. c2012.
 20. Choi IG. Development and Verification of Hybrid Test System using Small Column Model. Master Thesis, Civil and Environmental Engineering, Myongji univ. c2009.
 21. Kang DH. Real-time Hybrid Testing using a Fixed Iteration Implicit HHT Time Integration Method for a Reinforced Concrete Frame. *EESK*, 2011;15(5):11–24.
 22. Lee JJ. Evaluation of Applicability and Reliability for Hybrid Testing. Master Thesis, Civil Engineering, Inha Univ. c2012.
 23. Kim SH, Na OP, Kim SI, et al. Single Degree of freedom hybrid dynamic test with Steel Frame Structure. *KSR*, 2012;5(4):413–421.
 24. Na OP, Kim SH, Kim SI, et al. Real-time Structural Dynamic Test using Parallelized Control Algorithms and Optimized Hybrid System. *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, 2012;12(5):63–73.
 25. Park MS. Seismic Performance Evaluation of Small RC Bridge Model using Improved Hybrid Test System. Master Thesis, Civil and Environmental Engineering, Myongji Univ. c2015.
 26. Park JW. Study on the Development of Pseudo Dynamic Hybrid Seismic Response Simulation System. Master Thesis, Architectural Engineering, Chosun Univ. c2016.