

강 뼈대 구조물의 다자유도 실시간 하이브리드 동적 실험

김세훈* · 나옥빈** · 김성일***

Kim, Sehoon*, Na, Okpin**, Kim, Sungil***

Multi-DOF Real-time Hybrid Dynamic Test of a Steel Frame Structure

ABSTRACT

The hybrid test is one of the most advanced test methods to predict the structural dynamic behavior with the interaction between a physical substructure and a numerical modeling in the hybrid control system. The purpose of this study is to perform the multi-directional dynamic test of a steel frame structure with the real-time hybrid system and to evaluate the validation of the results. In this study, FEAPH, nonlinear finite element analysis program for hybrid only, was developed and the hybrid control system was optimized. The inefficient computational time was improved with a fixed number iteration method and parallel computational techniques used in FEAPH. Furthermore, the previously used data communication method and the interface between a substructure and an analysis program were simplified in the control system. As the results, the total processing time in real-time hybrid test was shortened up to 10 times of actual measured seismic period. In order to verify the accuracy and validation of the hybrid system, the linear and nonlinear dynamic tests with a steel framed structure were carried out so that the trend of displacement responses was almost in accord with the numerical results. However, the maximum displacement responses had somewhat differences due to the analysis errors in material nonlinearities and the occurrence of permanent displacements. Therefore, if the proper material model and numerical algorithms are developed, the real-time hybrid system could be used to evaluate the structural dynamic behavior and would be an effective testing method as a substitute for a shaking table test.

Keywords : Real-time Hybrid Test, Multi-DOF, Dynamic Test, Steel Frame Structure, Sub-structure

초 록

하이브리드 실험은 수치해석 모형과 물리적 부분구조 모형사이의 상호작용을 통하여 구조물의 거동을 예측하는 실험법이다. 본 연구에서는 지진하중 재하시 1경간 2층 강 뼈대 구조물에 대한 다자유도 하이브리드 실험을 수행하고 유효성을 확보하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 전용 하이브리드 수치해석 프로그램인 FEAPH을 개발하였으며, 최적화된 시스템을 구축하였다. FEAPH은 고정 반복법(Fixed iteration)과 병렬화(Parallelization) 기법을 적용하여 순차적 해석에서 발생하는 비효율적 연산을 개선하였다. 또한, 종전에 데이터 통신과 부분구조물과 해석프로그램간의 인터페이스를 간략화하여 하이브리드 시스템 구성을 최적화 하였다. 그 결과, 입력 가진시간(30초) 대비 약 10%의 실험시간이 소요되었다. 시스템의 신뢰성을 검증하고 선형실험과 강 뼈대 구조물의 동적거동을 예측하기 위해 비선형 실험을 수행하였으며 수치해석과의 변위 응답이력은 거의 일치 하였다. 그러나 최대변위에 대한 응답은 다소 차이를 보였으며, 이는 재료 비선형성에 대한 해석상의 오차와 영구변형에 의해 발생한 것으로 판단된다. 따라서 적절한 재료 비선형 모델과 알고리즘의 개선이 이루어지면, 실시간 하이브리드 시스템은 구조물의 동적 거동을 예측하는데 유용하게 활용될 것이며, 추후 진동대 실험을 대체할 수 있는 효과적인 실험 방법이 될 것으로 판단된다.

검색어 : 실시간 하이브리드 실험, 다자유도, 동적실험, 강 뼈대 구조, 부분구조

* 정회원 · 한국철도기술연구원 학연석박사연구생, 경희대학교 토목공학과 석사과정 (kimsem0979@krri.re.kr)

** 교신저자 · 한국철도기술연구원, 박사후 연구연구원 (Corresponding Author · Korea railroad research institute, Post-doc · nao@krri.re.kr)

*** 정회원 · 한국철도기술연구원, 책임연구원 (sikim@krri.re.kr)

Received November 5 2012, Revised December 6 2012, Accepted December 13 2012

1. 서론

지진 하중과 같은 빠른 동적 하중에 의한 구조물의 동적 거동을 좀 더 정확하게 평가하기 위한 연구가 수 년 동안 수행되고 발전해왔다. 이러한 연구는 크게 수치해석 방법과 실험적 방법으로 분류되며, 컴퓨터와 전자·기계·공학 분야의 발전에 힘입어 두 가지 방법 모두 큰 발전을 이루었다. 수치해석 방법의 경우 구조시스템을 이산화 된 형태의 운동방정식으로 표현하고, 이에 대한 해를 구함으로써 구조물의 동적 특성을 평가한다. 하지만 구조물의 복잡성과 재료모형의 다양성 및 정확성에 아직 의문점이 존재한다. 실험적 방법은 일반적으로 준정적 실험(Quasi-static test), 유사 동적 실험(Pseudo-dynamic test), 진동대(Shaking table test)를 이용한 방법이 있다. 준정적 실험은 사전에 수치 해석을 통해 얻어진 구조물의 변위 이력을 그대로 실험 부재에 가하는 실험법으로 기존의 실험 장비를 활용할 수 있고 비교적 실험이 간편하며 비용이 저렴하다는 장점이 있지만, 시간에 따른 강성의 변화를 고려할 수 없으므로 동적 효과를 고려할 수 없는 단점이 있다. 유사 동적 실험은 각 시간단계에 따라 수치 해석을 통해 얻어진 구조물의 변위 이력을 실험 부재에 가하고, 얻어진 복원력을 수치해석에 반영하여 다음 시간단계의 변위 이력을 구하여 실험 부재에 가하는 실험법이다. 따라서 준정적 실험에 비해 시간에 따른 강성의 변화를 고려할 수 있지만 여전히 기존의 실험 장비를 사용하기 때문에 액추에이터 응답의 기계적인 지연과 데이터 변환에 소요되는 시간 때문에 지진 하중과 같은 실시간 동적 하중에서의 동적효과를 구현하지 못한다는 단점이 있다. 이에 반해 진동대 실험은 지반 운동과 흡사하게 모사할 수 있으므로 가장 이상적인 실험법이다. 하지만 장비의 규모와 용량에 따라 제한적이며, 실험 장비 구축과 실험 시편 제작에 많은 비용이 발생한다. 또한 대형구조물의 경우 진동대의 규모에 따라 축소모형 사용해야 함에 따른 오차가 발생하며, 실험체 제작에 많은 비용이 발생하므로 반복적인 수행에 어려움이 따르는 단점이 있다.(조성민 등, 2010)

최근에는 이러한 단점을 극복하기 위해서 실시간 하이브리드 동적실험에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 실시간 하이브리드 동적실험은 구조물의 거동을 합리적으로 예측 가능한 수치해석 모형과 수치해석의 불확실성 또는 심각한 손상이 예견되는 물리적 부분구조 모형으로 나누어 동시에 수행되는 실험법으로 기존의 유사 동적 실험과는 달리 시간의존성 변수를 실제 거동과 유사하게 반영할 수 있으며, 물리적 부분구조 모형을 이용하여 실험이 진행되기 때문에 진동대를 이용한 실험에 비해 저비용으로 구조물의 동적특성을 파악할 수 있으므로 매우 효율적인 실험 법이다.

하이브리드 실험은 일본의 Hakuno 등(1969)에 의해 운동방정

식 풀이용 아날로그 컴퓨터와 액추에이터를 사용하여 지진 하중을 받는 단자유도 시스템을 해석하여 진동대를 대신해 구조물의 거동을 해석할 수 있다는 기본 개념이 제안되었으며, Takanashi 등(1975)은 최초로 지진 하중에 대한 비선형 동적 거동을 연구하기 위해 디지털 컴퓨터를 이용한 유사 동적 실험법을 개발하였다. 이후 일본과 미국을 중심으로 많은 연구자들의 노력으로 유사 동적 실험기법의 이론적 정당성을 입증하였다. Dermitzakis 등(1985)은 구조물을 수치해석 모형 및 물리적 부분구조 모형으로 구분하고, 분할 하이브리드 실험을 실행하기 위하여 부분구조 기법을 이용할 것을 제안하였으며, 적분법의 안정성 문제를 해결하기 위하여 혼합 알고리즘을 제안하였다. Thewalt 등(1987)는 하이브리드 실험을 위하여 최초로 암시적 적분법과 구조물에서 측정된 하중 복원력을 수치해석모형에 통합시키는 알고리즘을 제안하였다. 또한 Shing 등(1991)은 운동방정식의 해를 구하기 위하여 초기 강성행렬을 이용하는 HHT(Hilber-Hughes-Taylor)방법에 근거한 수치해석 알고리즘을 제안하였다. Thewalt 등(1994)은 측정된 변위와 하중 복원력으로부터 물리적 부분구조 모형의 접선 강성행렬을 계산하는 방법을 개발하였다. Dorka 등(1991), Dorka(2002) 그리고 Bayer 등(2005)은 수치해석을 위한 내부 루프에서 Sub-stepping 접근법을 이용한 Newmark 암시적 적분법을 제안하였다. 하이브리드 실험은 하드웨어의 발전과 더불어 2000년 전후를 기준으로 좀 더 활발히 진행되었으며, 실시간 하이브리드 실험 시스템이 Nakashima(2001)에 의해 제안되었으며 Jung 등(2007)에 의해 실시간 하이브리드 실험을 위한 고정된 반복수를 갖는 수치해석 알고리즘이 개발되었다.

McKenna(1997) 과 Fenves 등(2004)에 의해 개발된 OpenSees는 PEER 센터를 중심으로 C++언어를 기반으로 개발되었으며, Schellenberg 등(2006)이 OpenFresco를 개발하여 공간적으로 떨어진 곳에서의 분산 하이브리드 실험에 대한 강력한 협력체계를 구축하였다. 현재까지 OpenSees와 OpenFresco는 많은 연구자들에 의해 실시간 하이브리드 실험에서 가장 많이 활용되어지고 있으며, 연계된 연구가 진행되고 있다. 또한, Jung 등(2006)은 NEES 프로젝트 일환으로 실시간 하이브리드실험 시스템을 개발하였고, 2007년에는 단자유도 모델과 2자유도 모델에 대한 비선형 거동실험을 수행하였다. 이를 바탕으로 Saouma 등(2011)이 실시간 하이브리드 실험이 가능한 단일 사이트를 위하여, 수치해석 및 하드웨어 제어에 최적화된 컴퓨터 환경을 가지는 Mercury를 개발하여 콘크리트 구조물에 대한 실시간 하이브리드 실험을 수행하였다.

국내에서는 최인규 (2009)와 조성민 등(2010, 2011)은 소형강재모형을 이용하여 미니모스트 시스템을 기반으로 소형 하이브리드 실험을 수행하였으며, 이재진 (2012)와 김세훈 등(2012)은 실물

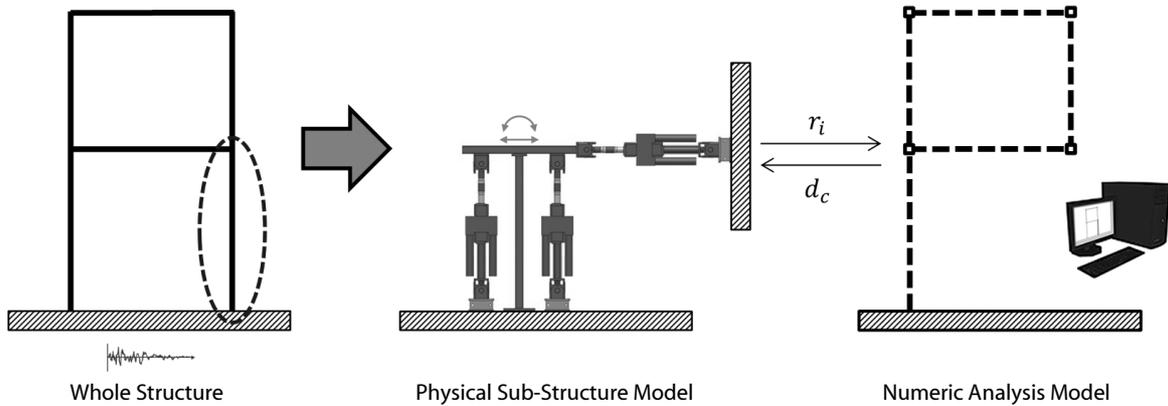


Fig. 1. Hybrid test system

크기의 부분구조물을 이용한 1경간 2층 강 뼈대 구조물에 대한 단자유도 하이브리드 실험에 대한 연구도 수행되었다. 그 결과 OpenSees와 OpenFresco로 구성된 하이브리드 시스템과 데이터 통신을 이용한 실험은 실시간에 근접한 하이브리드 실험결과를 도출하였으며, 그에 대한 타당성을 검증하였다.

그러나 현재까지 국내에서 수행된 하이브리드 실험은 단자유도에 의한 단순화된 실험만이 진행되었으며, 실제 내력의 영향이 고려되지 못하였으며, 지진하중 이력시간에 비해 상당한 실험시간이 소요되어 실시간 하이브리드 실험에 근접한 결과만을 도출하였다. 좀 더 실시간에 가까운 실험을 수행하기 위해서는 부분구조물에 다자유도에 대한 고려가 필요하며 하이브리드 시스템의 최적화뿐만 아니라 해석알고리즘이 개선되어야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 하이브리드 시스템을 최적화하기 위하여 기존의 제어시스템을 간략화하며, 이를 운용하는 수치해석 프로그램 FEAPH (Finite Element Analysis Program for Hybrid)을 자체 개발하여 그 적용성과 신뢰성을 확보하는데 있다. 이를 검증하기 위하여 실제 구조물의 거동에 대해 더 정확하게 모사하기 위하여 하이브리드 부분구조물에 병진변위와 회전변위하중을 가력 하여 1경간 2층 강 뼈대 구조물에 대한 다자유도 실시간 하이브리드 비선형 동적실험을 수행하였으며, 그 결과를 수치해석 결과와 비교하였다.

2. 하이브리드 실험 시스템

2.1 하이브리드 실험 기법

기존의 유사 동적 실험은 전체구조물 중 중요한 요소에 대해서만 수치해석을 수행하고 계산된 변위를 실험체에 적용하여 발생된 하중복원력을 다음 단계의 수치해석에 반영하는 방식으로 실험이 수행된다. 각 시간 단계별로 측정하중이 포함된 수치해석이 이루어 지므로 물리적 부분구조 모형의 동적 거동으로 실제 지진하중에 대한 관성력을 유추한다는 점에서 준정적 실험보다 유리하고, 진동

대 실험에 비해 실험체의 크기 제약이 적고 전체구조물 중 일부만 제작하면 되기 때문에 경제적이라는 장점이 있다. 하지만 여전히 기존의 실험 장비를 사용하기 때문에 지진 하중과 같은 빠른 동적 하중에서의 거동을 구현하지 못한다는 단점이 있다. 반면, Figure 1에 나타난 하이브리드 실험은 구조물의 거동을 합리적으로 예측 가능한 수치해석 모형은 수치해석을 수행하고 수치해석의 불확실성 또는 심각한 손상이 예견되는 물리적 부분구조 모형은 실험을 수행하는 방식으로 진행 된다. 유사 동적 실험과 동일하게 수치해석을 수행하여 계산된 명령변위(d_c)를 물리적 부분구조 모형에 적용하고 이로 인해 발생된 하중복원력(r_i)을 수치해석에 반영하여 다음 단계의 명령변위를 구하게 되는 것은 동일하나, 하이브리드 실험은 전체구조물의 동적 거동을 모사할 수 있다는 장점이 있다.

현재에는 고성능 액추에이터 개발과 제어시스템의 발전과 같은 전자·기계·공학 분야의 눈부신 발전으로 인해 실시간에 가까운 하이브리드 실험을 수행할 수 있으며, 공간적으로 제약이 있거나 또는 다른 실험시설을 인터넷과 같은 네트워크를 통해 연동하여 실험을 수행하는 분산 하이브리드 실험도 가능하다.

2.2 실시간 하이브리드 실험 시스템

전체 실시간 하이브리드 실험을 위한 제어시스템 모식도는 Figure 2와 같이 Dell사의 워크스테이션(Quadcore 2.33GHz, 1GB Ram) 2대로 구성되고, 각각의 Hybrid host, FEAPH window로 명명된다. 특히 FEAPH window와 MTS사의 Controller는 SCRAMNet(Shared Common RAM Network)으로 연결되어 있어 실시간으로 데이터를 공유할 수 있다. FEAPH window는 실시간 하이브리드 실험을 위한 수치해석 프로그램(FEAPH)이 구동되는 시스템으로 프로그램에서 해석된 결과는 SCRAMNet 메모리에 저장되고, 그와 동시에 네트워크에 연결된 각 제어시스템이 그 결과를 공유하게 된다. Controller는 내부의 SCRAMNet의 메모리에 저장된 명령변위를 액추에이터를 통해 물리적 부분구조

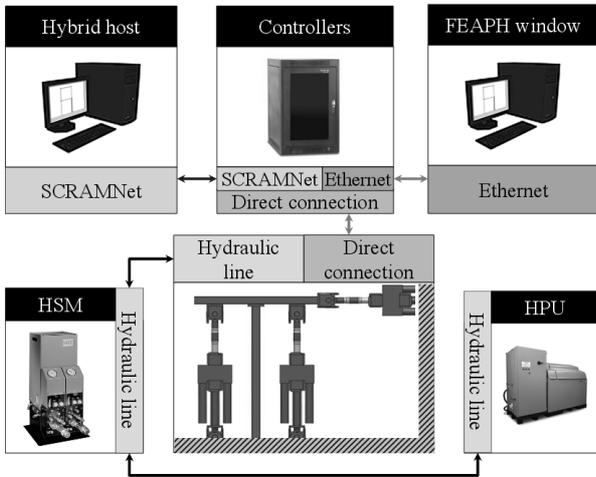


Fig. 2. Flow chart of Real-time hybrid system

Table 1. Performance of hydraulic dynamic actuator

Capacity	250kN
Stroke	250mm (±125mm)
Hydraulic Performance	±5mm at 50Hz/250kN

모형에 적용하고, 이에 따른 변위에 의한 물리적 부분구조 모형의 하중복원력(내력)은 다시 SCRAMNet을 통해 공유하여 수치해석 모형으로 전달 및 통합되어 실시간 하이브리드 실험을 구현하게 된다.

본 실시간 하이브리드 실험과 같이 매우 빠른 동적 실험의 경우 실험에 사용되는 액추에이터의 응답성능이 결과에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 본 실험에는 Figure 4와 Table 1에 나타난 바와 같이 높은 동적 성능을 보유한 MTS사의 동적 액추에이터를 사용하였다.

2.3 수치해석 프로그램

본 연구에서 사용된 소프트웨어(FEAPH)는 기존의 OpenSees 프로그램과 달리 데이터 통신을 담당하는 Simulink와 물리적 부분 구조물과 상호 응답을 가능하도록 하는 OpenFresco를 프로그램 내부에 포함시킴으로써 실험 수행과정의 간략화를 도모하였다. FEAPH은 C++를 기반으로 유한요소해석 방법을 적용한 하이브리드 실험을 위한 전용 수치해석 프로그램으로서, Figure 3와 같이 사용자의 필요에 따라서 요소나 해석방법을 선택하여 사용하는 프레임워크 구조로 구성되어 있다. 이식성이 뛰어나고 용량이 작은 장점이 있는 Lua 스크립트를 입력파일 형식으로 사용하였으며, SCRAMNet의 메모리에 데이터 값을 직접 읽고 쓸 수 있도록 구성되어 있다. 또한 최적화된 행렬연산을 위해 Intel사의 MKL (Math Kernel Library)를 사용하여 연산 수행시간을 최소화하였으

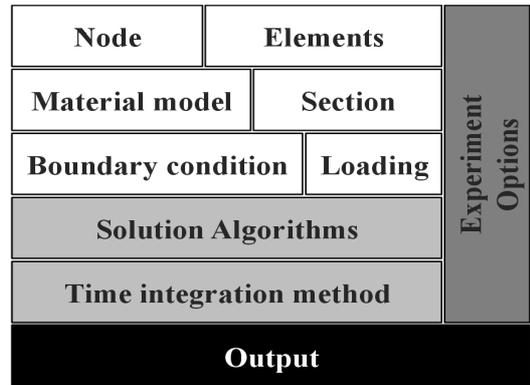


Fig. 3. FEAPH framework



Fig. 4. Hydraulic dynamic actuator

며, 병렬화를 최적화하는 멀티스레딩기법을 사용하였다. 본 소프트웨어는 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 모델링파트에서는 일반적인 유한요소해석 프로그램과 동일한 구성을 가지고 있으며, 하이브리드 실험을 위한 요소로는 Hybrid2Dtruss와 Hybrid2Dbeam이 있다. 해석파트에서는 본 논문에서 사용된 고정반복법을 적용한 HHT기법을 포함한 다양한 정·동적 해석 알고리즘과 시간적분법을 포함하고 있다(나옥빈 등, 2012).

2.4 수치해석 적분법

하이브리드 실험은 수치해석 모형의 동적해석을 위하여 시간증분법과 반복법을 이용하며 크게 명시적 방법(Explicit method)과 암시적 방법(Implicit method)으로 구분된다. 명시적 방법은 운동방정식의 해를 구하기 위한 반복과정이 필요 없기 때문에 초기 하이브리드 실험에 주로 이용되었다. 하지만 암시적 방법이 해의 안정성과 정확성에 있어서 명시적 방법보다 우수하기 때문에 주로 사용되고 있다.

암시적 방법에는 Newmark- β method, Implicit HHT method (Implicit α method), Operator-Splitting method 등이 있으며,

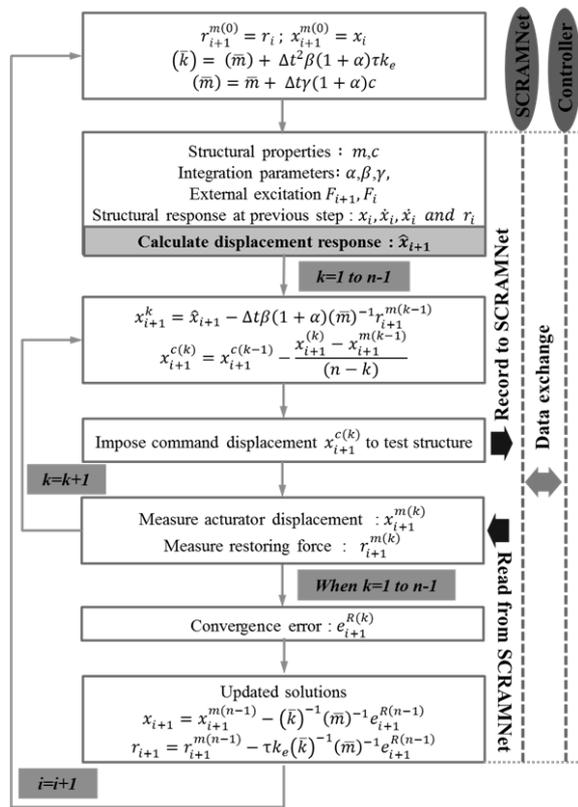


Fig. 5. Numerical analysis algorithm for hybrid test

본 연구에서는 하이브리드 실험을 위해 Figure 5에 나타난 고정 반복법에 의한 암시적 HHT 시간 적분법(Fixed iteration implicit HHT time integration method)을 사용하였다. Newton-Raphson, Initial stiffness 같은 반복법은 정확한 해를 구하기 위해 여러 번의 반복과정이 필요하고 이것은 컴퓨터의 계산시간을 길게 만드는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 피하기 위해 Shing이 제안한 암시적 HHT 시간 적분법의 각 시간단계에서 반복과정에 고정반복수와 2차 보간법을 적용한 반복법을 사용하였다(Shing, 2008). 반복수의 제한과 초기강성행렬을 사용한다는 점에서 해의 정확성에 잠재적 오차를 가질 수 있다는 단점이 있지만 비선형 해석에 대해 반복수를 고정할 수 있다는 점에서 하이브리드 실험과 같은 빠른 동적실험에 적합한 장점을 가지고 있다. 또한, Wei(2005)가 비선형 구조물 하이브리드 실험의 경우 10번의 반복과정만으로도 만족스러운 수렴 값을 제공한다고 제안하였다.

3. 실시간 하이브리드 실험

3.1 실험모델

3.1.1 대상 구조물

본 실시간 하이브리드 실험에서 사용된 대상 구조물은 폭 2.45m,

Table 2. Properties of cross-section

	A	3031mm ²
	I _x	8.47e + 6mm ⁴
	I _y	2.93e + 6mm ⁴
	E	200kN/mm ²
	Weight	7.70kN/mm ³
	F _y	0.25kN/mm ³
	v	0.26

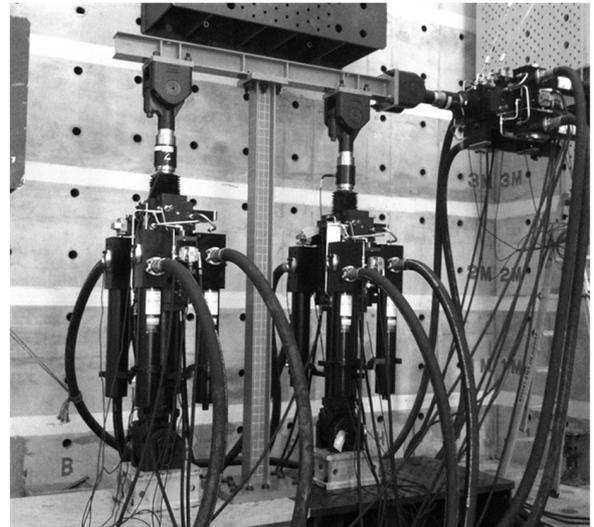


Fig. 6. Installation view

1층 높이 2.4m, 2층 높이 2.0m의 1경간 2층의 강 뼈대 구조이며, FEAPH 내에서 2차원 3자유도로 구현하였다. 1층의 기둥 중 하나는 물리적 부분구조 모형으로, 나머지 부분은 수치해석 모형으로 정의하였다. 물리적 부분구조 모델은 Table 2와 같이 일반구조용 압연강재인 SS400을 사용한 H형강으로 구성되어 있으며, 수치해석 모델 또한 동일한 단면 및 재료특성을 가지고 있다.

기존의 단자유도 하이브리드 실험은 한 대의 액추에이터를 사용하여 병진변위를 구현하고, 하이브리드 요소의 상단에 회전변위의 영향을 무시할 수 있도록 Zero-Length 요소를 사용하여 하이브리드 실험을 구현하였다(이재진, 2012; 김세훈, 2012). 하지만 이는 실제 구조물의 거동과는 상이하다. 따라서 실제 구조물에서 발생할 수 있는 회전변위를 구현할 수 있도록 2대의 액추에이터를 추가로 사용하고 이를 전달할 수 있도록 강체를 제작하여 설치하였다. Figure 6에 3대의 액추에이터를 이용한 실시간 하이브리드 실험의 설치 전경을 나타내었다. 또한 실험에 앞서 실험체 단부의 변형을 검토하기 위하여 시험체 하단에 변형률계를 하중재하방향의 2개의 플랜지와 웹에 설치하였으며, 실험체 상단에 발생한 가속도를 검토하기 위해 가속도계를 설치하였다.

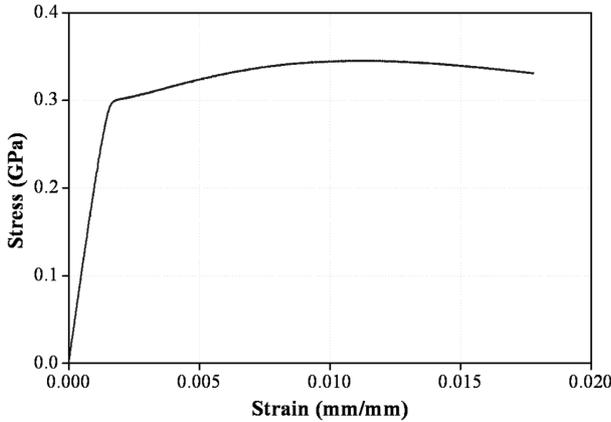


Fig. 7. Stress-Strain Curve

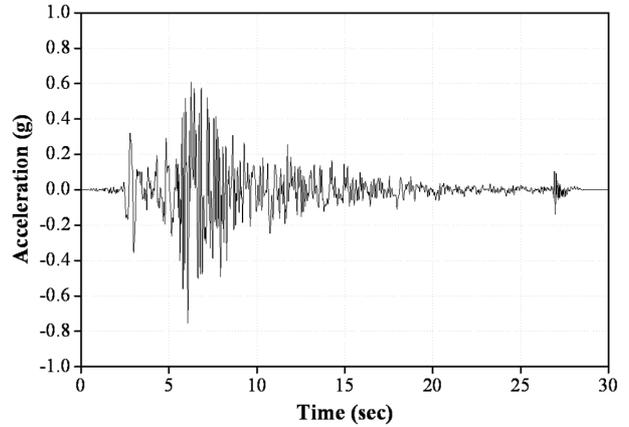


Fig. 8. El Centro

3.1.2 재료 실험

본 실시간 하이브리드 실험에 앞서 물리적 부분구조 모형에 사용된 재료의 재료특성을 얻기 위해 인장실험을 실시하였다. 인장 실험은 MTS사의 만능시험기(322 Load unit)를 통해 실시하였다. 인장실험에 사용된 시편은 한국 산업 규격 금속 재료 인장 시험편 (KS B 0801)에 적합하게 제작하였으며, 한국 산업 규격 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802)에 적합한 방법으로 인장실험을 실시 하였다. 부재로 사용된 강재 SS400의 공칭 탄성계수와 항복응력은 각각 200kN/mm²(GPa), 0.25kN/mm²(GPa)로 알려져 있으나 Figure 7에 응력-변형을 곡선에서 나타나듯이 본 실험에 사용된 강재의 인장시험 결과 탄성계수 230kN/mm²(GPa), 항복응력 0.30kN/mm²(GPa)으로 나타났으며, 이를 수치해석 모형과 물리적 부분구조 모형에 적용하였다.

3.2 실시간 하이브리드 실험 및 결과

본 실시간 하이브리드 실험에 사용된 지진 하중은 미국 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) 센터의 El Centro를 사용하였다. 본 논문에서는 실험을 위해 10%로 축소된 데이터를 사용하였으며 사용된 지진 하중의 절대 최대 가속도는 0.76g이다. 지진하중의 총 가진 시간은 30초로 시간 간격은 0.01초이다. 사용한 입력 지진 가속도의 시간이력그래프를 Figure 8에 나타내었다.

본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되는 Rayleigh 감쇠를 사용하였으며, 식 (1)과 식 (2)에 나타난 것처럼 Rayleigh 감쇠계수를 산정하기 위해서는 고유진동수와 감쇠비를 결정해야 한다.

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (1)$$

$$a_0 = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j}, \quad a_1 = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2)$$

여기서, $[C]$:감쇠행렬, $[M]$:질량행렬, $[K]$:강성행렬, a_0 :질량비례감쇠상수, a_1 :강도비례감쇠상수, ζ :감쇠비, ω_i : i 번째 모드의 고유진동수, ω_j : j 번째 모드의 고유진동수이다. 고유진동수는 하이브리드 실험의 특성상 전체 구조물이 아닌 물리적 부분구조 모형을 이용하기 때문에 충격해머 또는 Quick release 실험을 이용한 자유진동실험과 같은 직접적인 방법으로는 정확한 감쇠비를 구하기는 어렵다. 따라서 상용 유한요소해석 프로그램을 이용해 대상구조물과 동일한 구조물을 모델링하여 수치해석을 통해 고유진동수를 5.34Hz, 17.47Hz로 결정하였다. 또한 탄성영역 내에서 감쇠비를 4~6%로 변화시키며 수치해석과 실험을 반복 수행하여 비교함으로써 감쇠비를 6%로 결정하였다.

3.2.1 선형 동적실험을 통한 시스템 검증

구조물의 탄성영역 내에서 실시간 하이브리드 실험을 수행하여 최적화된 실시간 하이브리드 실험 시스템과 자체 개발된 수치해석 프로그램인 FEAPH이 구조물의 동적거동을 모사하는데 유효함을 검증하였다.

선형실험 시 명확한 응답을 얻기 위해 El Centro 지진 하중을 2배 증분 하여 실험을 수행하였다. 선형구간 수치해석의 재료 특성은 실험의 의한 값인 230kN/mm²(GPa)을 사용하였다. 선형실험 결과 총 3000스텝에 소요된 시간은 300초로 1스텝에 0.1초의 시간이 소요되었다. 실험 결과를 수치해석과 비교 검토함으로써 본 실시간 하이브리드 시스템의 유효성을 검증하였다. 각 층의 선형구간 수치해석과 실시간 하이브리드 실험의 응답을 결과를 Figure 9에 시간이력그래프로 나타내고, Table 3에 절대 최대 변위 값을 비교 정리하였다. 실험 결과 절대 최대 변위를 비교해보았을 때 약 7.8%의 오차가 확인되었으나 수치해석과 실시간 하이브리드 실험의 전체적인 응답 양상은 유사한 것으로 판단된다. 실험이 종료된 후 실제 강 뼈대 구조물이 탄성영역 내에서 거동하

Table 3. Maximum value of real-time hybrid test (Linear)

Entries	Node No.	Numerical Analysis (A)	Real-time Hybrid Test (B)	Error (%) $ (A-B)/(A) $
Displacement (mm)	Node 3 (1st story)	14.84	13.68	7.8%
	Node 5 (2nd story)	20.98	21.92	4.5%

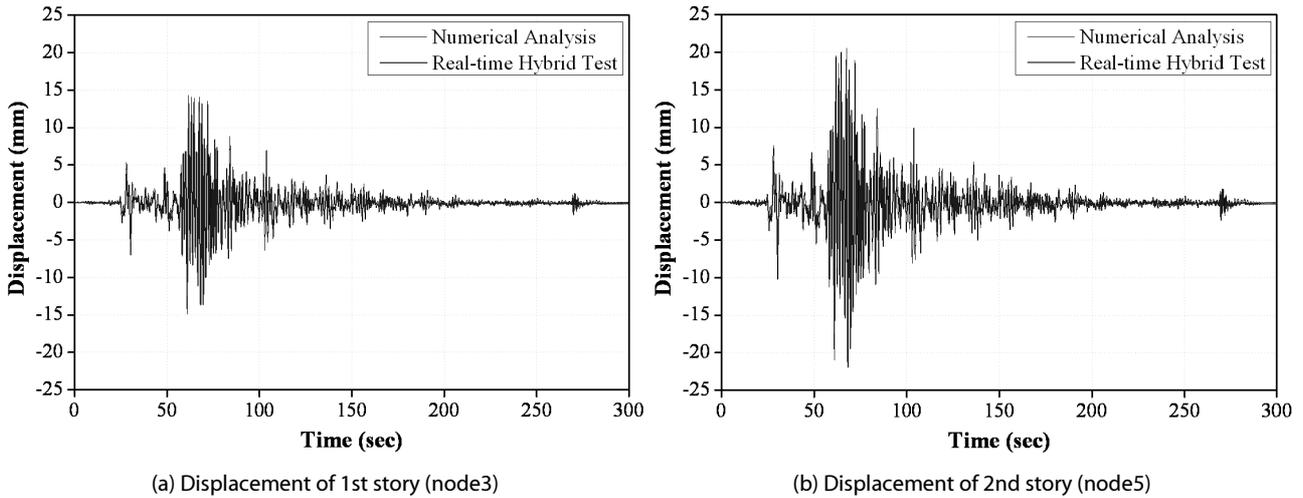


Fig. 9. Comparison of numerical and real-time hybrid test results

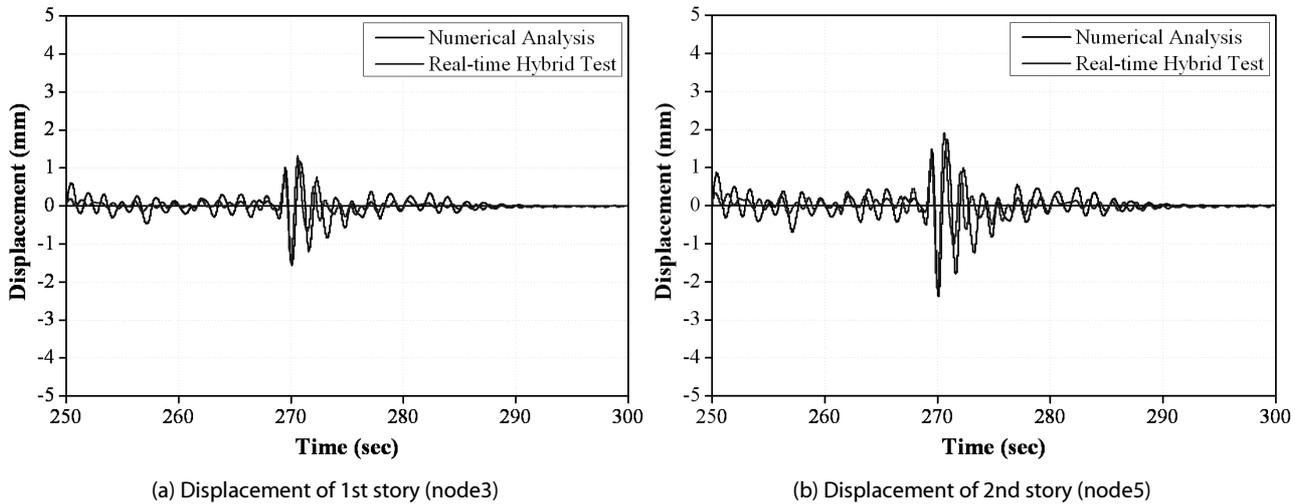


Fig. 10. Comparison of end range (250~300sec)

였는지를 확인하였다. Figure 10에서 확인할 수 있듯이 수치해석과 실시간 하이브리드 실험 모두 잔류변위가 거의 발생하지 않았으며, Figure 11의 하중-변위 그래프에서 나타나듯이 탄성영역 내에서 수행되었음을 확인할 수 있다.

Figure 12에 수치해석과 실시간 하이브리드 실험의 응답 값을 이용하여 FFT 분석한 결과를 나타내었다. 주파수 분석 결과 진폭이

가장 크게 나온 주파수를 비교하였으며, 진폭의 크기의 차이는 있지만 수치해석과 실시간 하이브리드 실험 모두 6.87Hz로 동일하게 분석되었다. 따라서 본 논문에서 사용된 하이브리드 실험을 위한 전용 수치해석 프로그램과 최적화된 실시간 하이브리드 시스템을 이용한 다자유도 실시간 하이브리드 실험은 강 뼈대 구조물의 동적 거동을 예측하는데 유효하다고 판단된다.

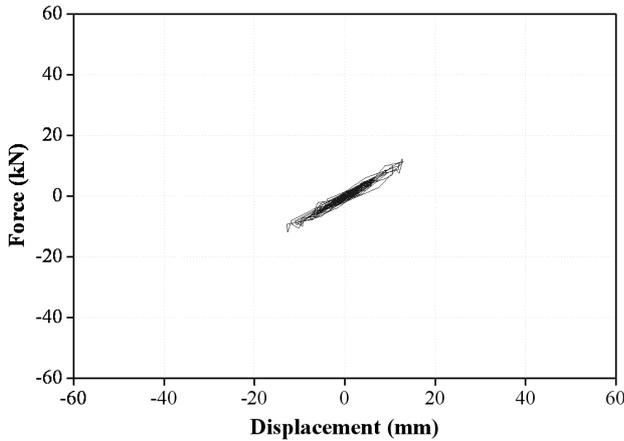


Fig. 11. Force-displacement graph (Linear)

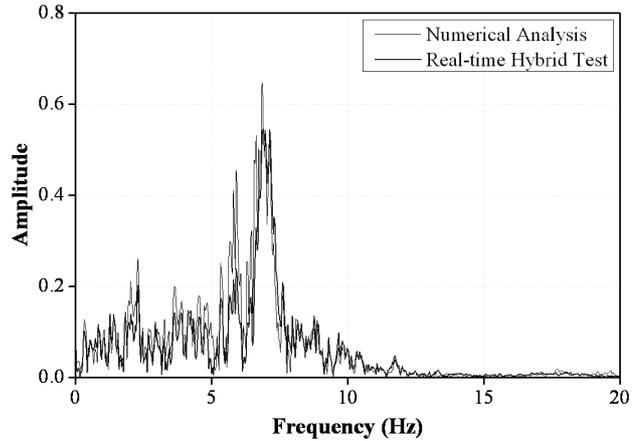
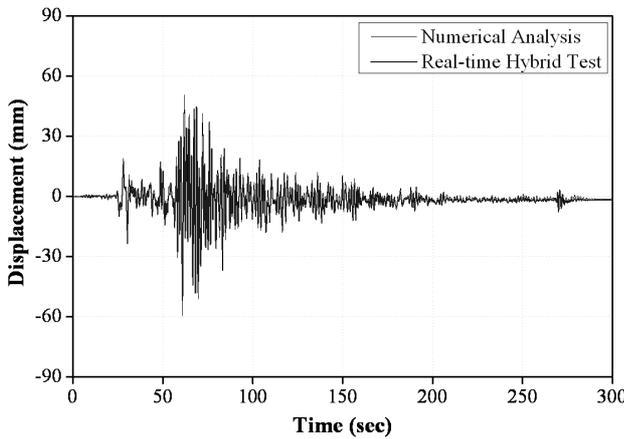
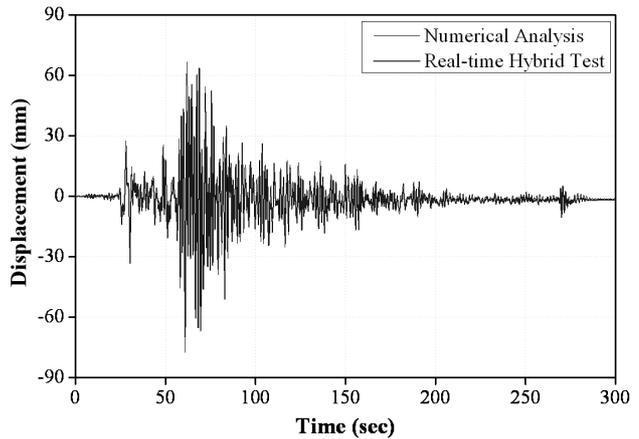


Fig. 12. FFT of 1st story displacement (Linear)



(a) Displacement of 1st story (node3)



(b) Displacement of 2nd story (node5)

Fig. 13. Comparison of numerical and real-time hybrid test results

3.2.2 비선형 동적실험

실제 강 뼈대 구조물의 동적 거동을 예측하기 위해 비선형 실험을 수행하였다. 비선형구간 해석의 재료 모델은 사전에 실시한 재료실험의 결과를 바탕으로 재료특성이 가장 유사한 Giuffre-Menegotto-Pinto model을 사용하였다. 비선형 구간 실험 시 강 뼈대 구조물에 항복이 발생할 수 있도록 8배 증분한 El Centro 지진 하중을 사용하여 실험을 수행하였다. 총 실험 시간은 선형구간과 동일하게 300초가 소요되었다. 비선형 구간의 수치해석과 실시간 하이브리드 실험의 결과를 Figure 13에 시간이력그래프로 나타내었다. 또한 각층의 절대 최대 변위 값을 Table 4에 비교 정리하였다. 1층에서의 절대 최대 변위를 비교한 경우 약 12.9%의 오차가 발생했으며, 이는 물리적 부분구조 모형에 발생된 영구 변형에 의해 것으로 판단된다. 하지만 선형구간에서의 실험과 마찬가지로 나머지 전체적인 응답 양상은 유사하며 최대 변위가 발생한 이후 구간에서도 유사한 응답을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

Table 4. Maximum value of real-time hybrid test (Non-linear)

Entries	Node No.	Numerical Analysis (A)	Real-time Hybrid Test (B)	Error (%) $ (A-B)/(A) $
Displacement (mm)	1st story (Node 3)	59.49	51.81	12.9
	2nd story (Node 5)	77.35	69.27	10.4

선형 구간에서 잔류변위가 거의 발생하지 않았던 것에 비해 Figure 14와 같이 실제 강 뼈대 구조물에 잔류 변위가 발생해 원점에서 벗어나 있음을 확인할 수 있다. 이로써 강 뼈대 구조물에 영구변형이 발생하였음을 유추할 수 있다. Figure 15은 실험체 상단에 설치한 가속도계와 실험체 하단부에 설치한 변형률 게이지에서 계측된 시간이력그래프로 선형실험에서의 응답과 달리 비선형 실험에서의 응답은 최대변위가 발생한 후 플랜지와 웹 모두 탄성에서 소성으로 전이됨을 알 수 있다. 따라서 Figure 14에서

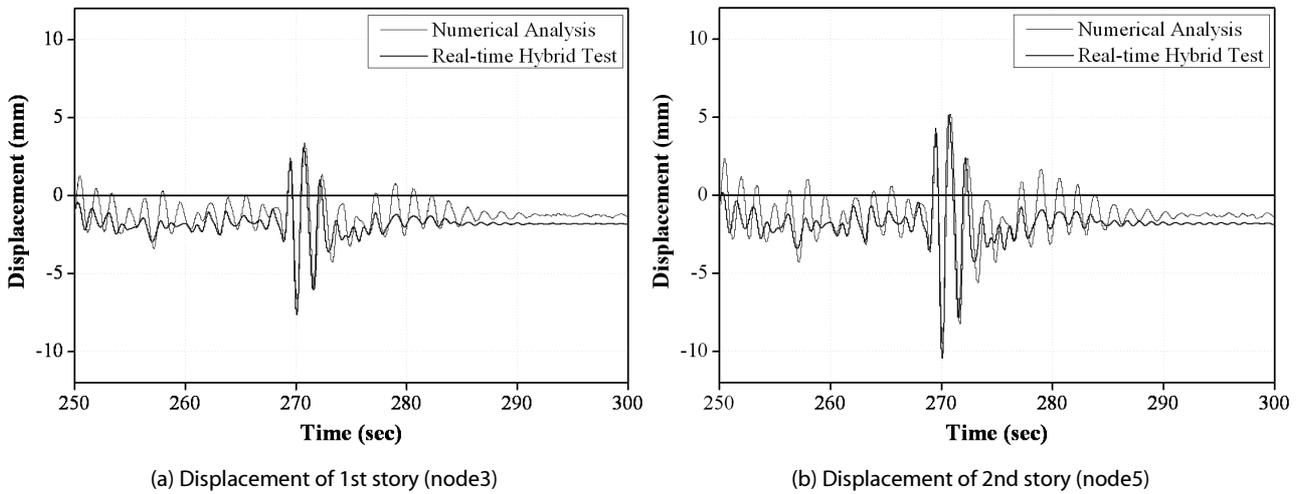


Fig. 14. Comparison of end range (250~300sec)

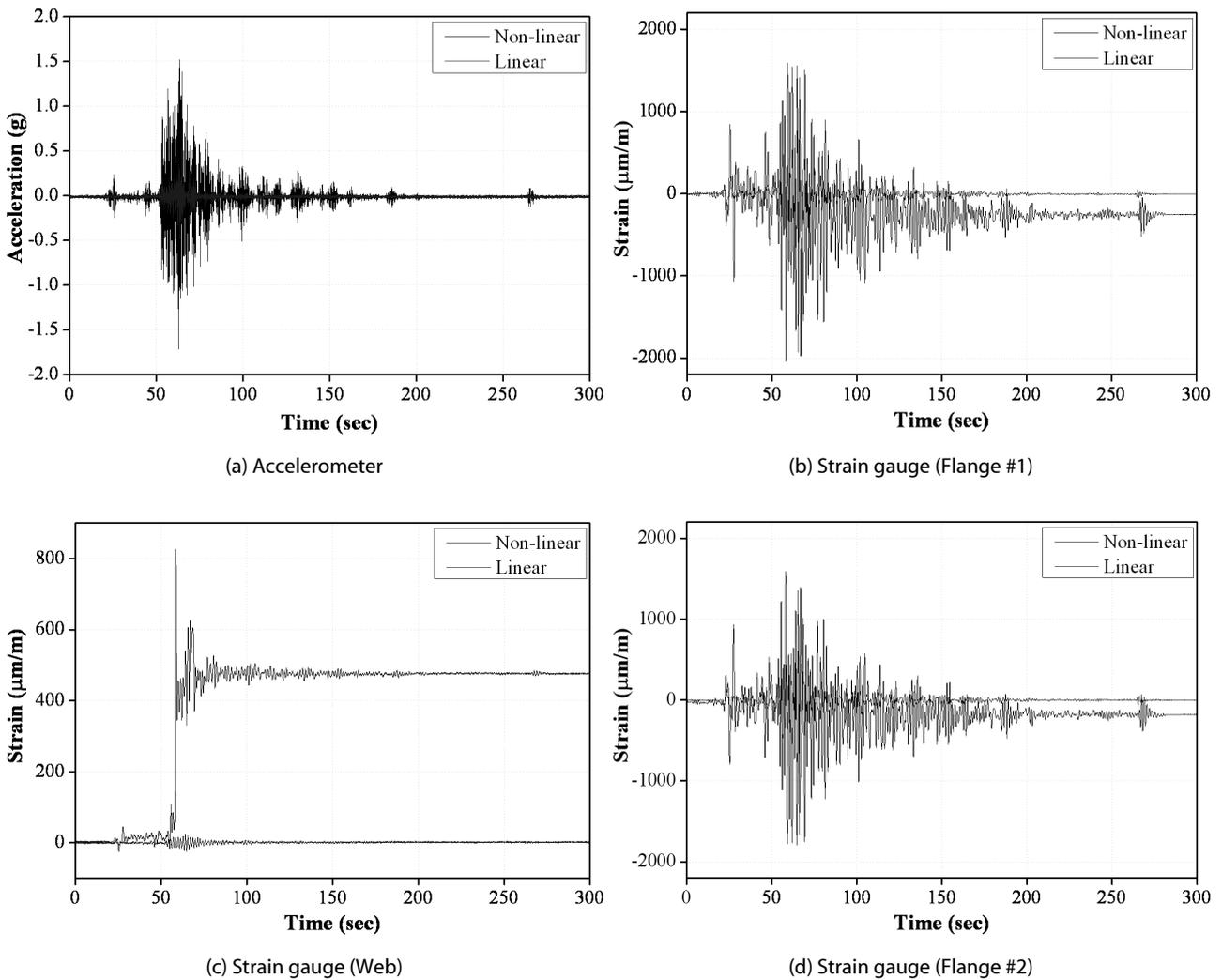


Fig. 15. Time history graph of accelerometer and strain gauge

발생된 잔류변위는 실험체 단부의 변형에 기인함을 유추할 수 있다. 이 때 플랜지에서 측정된 영구 변형률은 약 $250\mu\text{m}/\text{m}$ 이며, 웹에서 약 $490\mu\text{m}/\text{m}$ 이다. 또한 상단의 가속도계에서 측정된 절대 최대 가속도는 선형실험의 경우 $0.56g$, 비선형 실험의 경우 $1.72g$ 가 측정되었다.

수치해석과 실시간 하이브리드 실험을 비교해 보았을 때, 실험을 수행한 경우가 더 큰 잔류변위가 발생하였다. 잔류변위의 차이가 발생한 이유는 수치해석에서 구조물의 비선형 동적 거동을 파악하기 위해 사용한 재료 비선형 모델의 정확도가 한 원인이라고 판단된다. Figure 16에 하중-변위 그래프를 나타내었다. 형상으로 볼 때 강 뼈대 구조물이 비선형 거동을 하였으며, 1층에서 약 50mm 의 최대 변위 발생 시 약 40kN 의 하중이 발생하였음을 확인할 수 있다. 선형실험과 동일하게 비선형실험의 1층 변위 결과를 이용하여 FFT 주파수 분석을 하였으며, 이를 Figure 17에 나타내었다. 진폭이 가장 크게 나온 주파수가 6.87Hz 로 선형실험과 동일한 결과를 얻었다. 이로써 실시간 하이브리드 실험이 구조물의 비선형 동적 거동을 적절하게 구현하였음을 알 수 있었다.

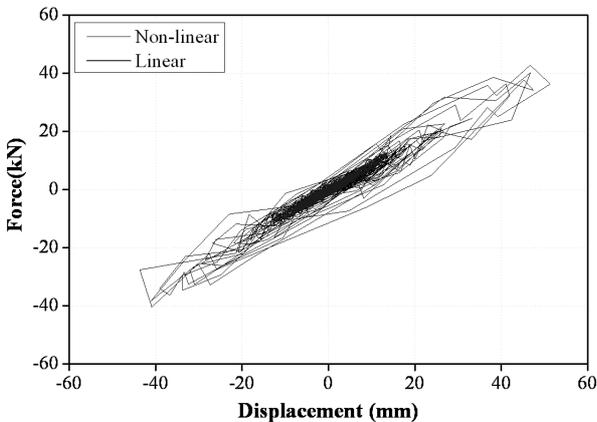


Fig. 16. Force-displacement graph (Non-linear)

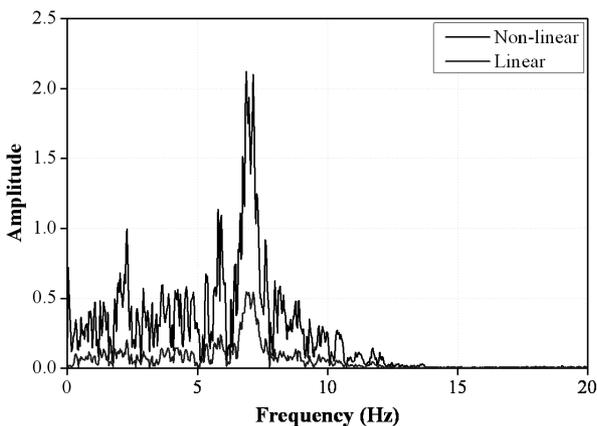


Fig. 17. FFT of 1st story displacement (Non-linear)

4. 결론

본 연구는 1경간 2층 강 뼈대 구조물의 비선형 동적 거동을 3개의 동적 액추에이터를 이용하여 다자유도 하이브리드 실험을 구현하고 적용성 및 신뢰도를 확보하는데 그 목적이 있다. 제안된 수치해석 프로그램과 최적화된 실시간 하이브리드 실험 시스템을 이용하여 구조물의 비선형 동적 거동을 검토하였으며 이를 비교 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실시간 하이브리드 실험은 모두 전체적인 응답의 경향은 비교적 안정된 결과를 보여주었다. 실험 수행시간이 300초로 입력하중 대비 10%의 속도를 가지므로 국내에서 수행되었던 하이브리드 실험 중 가장 빠른 실시간 하이브리드 동적실험이다.
- (2) 실시간 하이브리드 실험의 변위 응답은 수치해석과 거의 유사한 응답을 보였다. 하지만 비선형 구간에서의 최대 변위 응답 후 잔류변형이 발생하였으며, 최대변위에서 약간의 오차가 발생하였다. 이는 실험체에 하단에서 영구변형이 발생하여 실험체 구조물 전체 거동에 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 수치해석과 실시간 하이브리드 실험의 잔류변위의 차이가 발생하였는데 이는 수치해석에 사용된 재료 비선형 모델의 정확도가 떨어지기 때문이라 판단된다.
- (3) 더불어 구조물의 복잡성과 재료모형의 다양성 및 정확성에 대한 문제로 인해서 실시간 하이브리드 실험의 신뢰성 향상과 유효성을 검증하기 위해 콘크리트 구조물에 대한 실험비교 분석이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 본 실험결과는 실험시간의 단축과 더불어 기존 유사 동적 실험 (Pseudo-dynamic)에서 예측할 수 있는 관성력뿐만 아니라 비선형 재료적 특성을 포함한 구조물의 거동을 수치해석과 동적실험이 상호보완하여 좀 더 정확하고 실제적인 값을 얻을 수가 있는 장점이 있다고 판단된다.
- (5) 기존의 강 뼈대 구조물의 회전변위를 무시한 단자유도 하이브리드 실험에서 발전하여 회전변위를 고려한 다자유도 하이브리드 실험을 구현함으로써 의미 있는 실험이라 할 수 있으며, 오차를 줄일 수 있는 수치 해석적 연구와 시스템 기술적 발전이 선행된 다면 진동대를 대신해 건축구조물 및 토목분야의 교량의 동적 거동을 검증하는데 적절히 활용될 수 있는 효율적이고 경제적인 실험법이라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국철도기술연구원 기본연구사업 (과제코드 PK13 004C)의 지원으로 수행되었으며, 이에 진심으로 감사 드립니다.

References

- Bayer, V., Dorka, U. E., Fullekrug, U., Gschwilm, J. (2005) On real-time pseudo-dynamic sub-structure testing: algorithm, numerical and experimental results, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 9, No. 3, pp. 223-232.
- Cho, S., Choi, I., Jung, D., Kim, C. (2010) Verification of Hybrid Structural Test Technique by Shaking Table Test of a Linear 2-Dimensional Frame Model, *EESK*, Vol. 14, No. 6, pp. 33-43.
- Cho, S. (2011) *Improvement of Hybrid Test System and Its Application Small Experimental Model*, Thesis, Myongji University, Yongin (in Korean).
- Choi, C. (2009) *Development and Verification of Hybrid Test System using Small Column Mode*, Master's Thesis, Myongji University, Yongin (in Korean).
- Dermitzakis, S. N. and Mahin, S. A. (1985) *Development of sub-structuring techniques for on-line computer controlled seismic performance testing*, UCB/EERC-85/04, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.
- Dorka, U. E. and Heiland, D. (1991) Fast online earthquake utilizing a novel PC supported measurement and control concept, *4th Conference on Structural Dynamics*, Southampton, UK.
- Dorka, U.E. (2002) Hybrid experimental-numerical simulation of vibrating structures, *International Conference WAVE2002*, Okayama, Japan.
- Fenves, G. L., McKenna, F., Scott, M. H., and Takahashi, Y. (2004) An object-oriented software environment for collaborative network simulation, *Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
- Hakuno, M., Shidawara, M., and Hara, T. (1969) Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by an analog-computer, *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 171, pp. 1-9 (in Japanese).
- Jung, R. Y. and Shing, P. B. (2006) Performance evaluation of a real-time pseudodynamic test system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 35, No. 7, pp. 789-810.
- Jung, R.Y. and Shing, P.B. (2007) Performance of a real-time pseudodynamic test system considering nonlinear structural response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 36, No. 12, pp. 1785-1809.
- Kim, S., Na, O., Kim, S. et al. (2012) Single Degree of Freedom Hybrid Dynamic Test with Steel Frame Structure, *KSR*, Vol. 5, No. 4, pp. 413-421.
- Lee, J. (2012) *Evaluation of Applicability and Reliability for Hybrid Testing*, Thesis, Inha University, Incheon (in Korean).
- McKenna, F.T. (1997) *Object-oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing*, Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.
- Nakashima, M. (2001) Development, potential, and limitations of real-time online (pseudo-dynamic) testing, *Royal Society of London Philosophical Transactions A*, Vol. 359, No. 1786, pp. 1851-1867.
- Na, O., Kim, S., Kim, S. (2012) Real-time Structural Dynamic Test Using Parallelized Control Algorithms and Optimized Hybrid System, *KSHM*, Vol. 12, No. 5, pp.63-73 (in Korean).
- Saouma, V., Kang, D. H., and Haussmann, G. (2011) A Computational Finite-Element-Program for Hybrid Simulation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41, No. 3, pp. 375-389.
- Schellenberg, Andreas and Mahin, Stephen (2006) Integration of Hybrid Simulation within the General-Purpose Computational Framework OpenSees, *Proceedings 8th National Conference on Earthquake Engineering*, EERI, San Francisco, CA.
- Shing, P. B. and Vannan, M. T. (1991) Implicit time integration for pseudodynamic tests: convergence and energy dissipation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 20, No. 9, pp. 809-819.
- Saouma, V. and Sivaselvan, M. (2008) *Hybrid simulation : theory, implementation and applications*, Taylor & Francis, UK.
- Takanashi, K. (1975) Non-linear earthquake response analysis of structures by a computer actuator on-line system - Part I details of system, *Transactions of the Architectural Institute of Japan*, Vol. 229, pp. 77-83 (in Japanese).
- Thewalt, C. R. and Mahin, S. A. (1987) *Hybrid solution techniques for generalized pseudodynamic testing*, UCB/EERC-87/09, Earthquake Engineering Research Institute, University of California, Berkeley, California.
- Thewalt, C. R. and Roman, M. (1994) Performance parameters for pseudodynamic tests, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 9, pp. 2768-2781.
- Wei, Z. (2005) *Fast Hybrid Test System for Substructure Evaluation*, Ph.D. thesis, University of Colorado, Boulder.