강 뼈대 구조물의 단자유도 하이브리드 동적 실험

Single Degree of Freedom Hybrid Dynamic Test with Steel Frame Structure

김세훈 · 나옥빈* · 김성일 · 이재진 · 강대흥

Schoon Kim · Okpin Na · Sungil Kim · Jaejin Lee · Daehung Kang

Abstract The purpose of this study is to evaluate the structural dynamic behavior under hybrid control system. The hybrid test is to consider the interaction between the numerical and physical models. In this paper, single degree of freedom hybrid test was performed with one-bay, two-story steel frame structure. One column at the first floor was selected as a physical substructure and one actuator was used for applying the displacement load in horizontal direction. El Centro as earthquake waves was inputted and OpenSees was employed as the numerical analysis program for the hybrid real-time simulation. As a result, the total time of the hybrid test was about 9.6% of actual measured seismic period. The experimental results agreed well with the numerical one in terms of the maximum displacement. In nonlinear analysis, however, material nonlinearity made a difference of residual strain. Therefore, this hybrid dynamic test can be used to predict the structural dynamic performance more effectively than shaking table test, because of the spatial and economic limitations.

Keywords : Hybrid test, Steel frame structure, SDOF, Dynamic test, Sub-structure

초 록 하이브리드 실험은 구조물의 거동을 수치해석 모델과 물리적 부분구조 모델로 나누어 동시에 수행되는 실험법으로써 본 논문에서는 지진하중에 의한 1경간 2층 강 뼈대 구조에 대한 하이브리드 시험을 수행하였다. 1층 기둥 1개소를 물리적 부분구조모형으로 선택하고, 한 개의 액추에이터를 이용해 수평방향으로 변위를 가하여 수치해석과 하이브리드 실험결과 사이의 거동추이를 분석하였다. 입력 지진데이터로는 El Centro를 사용하였으며, OpenSees를 이용하여 강구조물의 선형 또는 비선형 거동을 비교 분석하였다. 그 결과, 선형해석은 수치해석과 하이브리드 응답형상이 매우 잘 일치하였으며, 비선형 해석은 재료 비선형성에 의한 영구변형의 차이는 발생하였으나 최대변위 및 전체응답형상은 매우 유사하였다. 또한, 하이브리드 실험 소요시간은 실제 가진 시간에 약 9.6%의 속도로 현재 국내에서 수행된 실험 중 가장 실시간에 근접한 실험이라 할 수 있다. 따라서, 본 하이브리드 실험은 구조물의 동적 거동을 예측하는데 적절하게 활용될 수 있으며, 공간적, 경제적 제약이 있는 진동대 실험을 대체할 수 있으리라 판단된다.

주요어 : 하이브리드 실험, 강 뼈대 구조, 단자유도, 동적 실험, 부분구조

1. 서 론

지진하중을 받는 구조시스템의 동적 거동을 좀 더 정확하게 평가하기 위한 연구가 수 년 동안 수행되고 발전해왔다. 이러한 연구는 크게 수치해석 방법과 실험적 방법으로 분류되는데, 컴퓨터분야와 컨트롤 시스템을 포함한 전자·기계공학 분야의 발전함에 따라 두 방법 모두 큰 발전을 이루었다.

수치해석 방법과 비교해 실험적 방법은 구조물의 동적 거동을 평가하는데 있어서 보다 직접적이지만 실험에 따라 비용이 많이 들고 거대한 실험 시설이 필요하다. 일반적으로 지진하중에 대한 구조시스템의 거동을 평가를 위해 유사정적 실험(quasi-static test), 유사동적 실험(pseudo-dynamic test),

진동대 실험(shaking table test)이 사용되어 왔다[1].

하이브리드 실험은 구조물의 거동을 합리적으로 예측 가능한 수치해석 모형과 수치해석의 불확실성 또는 심각한 손상이 예견되는 물리적 부분구조 모형으로 나누어 동시에 수행되는 기본 개념을 제안되었으며, Takanashi[2]에 의해 현재의 하이브리드 실험 형태를 확립하였다. 그는 최초로 지진하중에 대한 구조물의 비탄성 동적 거동을 연구하기 위하여 디지털 컴퓨터를 이용한 유사 동적 실험 기법을 개발하였다. 이후 일본의 Okada, Takanashi, Yamazaki, 미국의 Mahin & Shing[3]에 의해 유사동적 실험이 이루어졌다.

Dermitzakis와 Mahin[4]는 구조물을 수치해석 모형 및 물리적 부분구조 모형으로 구분하고, 분할 하이브리드 실험을 실행하기 위하여 부분구조 기법을 이용할 것을 제안하였으며, 적분법의 안정성 문제를 해결 하기 위하여 혼합 알고리즘을 제안하였다. Thewalt와 Mahin[5]는 하이브리드 실험을 위하여 최초로 암시적 적분법과 구조물에서 측정된 하중 복원력을 수치해석모형에 통합시키는 알고리즘을 제안하였다.

*Corresponding author

Tel.: +82-10-5269-2375, E-mail : nao@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.413

이후 Dorka와 Heiland[6], Dorka[7] 그리고 Bayer[8] 등은 수치해석을 위한 내부 루프에서 Sub-stepping 접근법을 이용한 Newmark 암시적 적분법을 제안하였다. 또한 Shing 등[9]과 Shing과 Vannan[10]은 운동방정식 의해를 구하기 위하여 초기강성행렬을 이용하는 HHT(Hilber-Hughes-Taylor)방법에 근거한 수치해석 알고리즘을 제안하였다. Thewalt와 Roman[11]은 측정된 변위와 하중 복원력으로부터 물리적 부분구조모형의 접선강성행렬을 계산하는 방법을 개발하였다.

Takahashi와 Fenves[12]는 하이브리드 실험에 이용되는 하드웨어와 다양한 수치해석 프로그램의 원활한 사용을 위하여 객체지향 소프트웨어 프레임워크를 개발하였으며, 실시간 하이브리드 실험을 위한 고정된 반복수를 갖는 수치해석 알고리즘이 Jung과 Shing[13], Shing[14]에 의해 개발되었다.

최근까지 실시간 하이브리드 실험은 미국과 일본을 중심으로 활발히 진행되었으며, 국내에서는 최인규[15], 조성민 등[16]이 소형강재모형에 대한 하이브리드 실험을 수행하였으나, 아직 그 실험방법에 대한 적용이 미비한 상태이다. 따라서, 본 논문에서는 하이브리드 실험을 위한 시스템을 구축하고 지진하중을 1경간 2층 강 뼈대 구조물에 적용하여 그 유효성을 검증하고자 한다. 더불어 구조물에 대한 선형과 비선형 실험을 수치해석 결과와 비교하여 하이브리드 실험의 적용성 및 신뢰도를 확보하는데 그 목적이 있다.

2. 단자유도 하이브리드 동적 실험

2.1 하이브리드 시스템

본 하이브리드 실험에 사용된 MTS사의 Dynamic Actuator는 높은 주파수의 동적 성능을 가지고 있으므로 본 하이브리드 실험에 적합하다. 장비의 모습과 제원을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

하이브리드 실험 제어시스템을 위한 하드웨어는 크게 4개의 PC(Hybrid Host PC, xPC Target PC, Simulink Host PC

Table 1 Performance of hydraulic dynamic actuator

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

Fig. 1 Hydraulic dynamic actuator

그리고 DAQ Host PC)가 있으며, Actuator로 명령을 전달하는 FlexTest 100과 실험에 필요한 입력 값 및 결과 값을 저장하는 data acquisition system으로 구성되어 있다. 또한 각각의 하드웨어들은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 SCRAMNet(Shared Common RAM Network)에 의해 내부 네트워크로 연결되어 실시간 데이터 통신을 가능하게 했다. 이는 네트워크 상의 컴퓨터들 사이에 메모리를 공유하고 한 컴퓨터의 로컬 메모리에 기록된 데이터를 동시에 네트워크상의 다른 메모리에도 기록되어 공유하게 된다.

더불어 하이브리드 시스템을 구동할 프로그램은 OpenSees(Open System for Earthquake Engineering Simulation)이며, Simulink Host PC에서 사용된다. 이 프로그램은 Fig. 3과 같이 일반적인 범용 구조해석 프로그램과 같이 프로그램 패키지 방식이 아닌 소프트웨어 프레임워크 방식이라는 특징을 가지고 있다. 또한 구조해석 프로그램과 제어시스템간의 가교 역할을 할 프로그램은 OpenFresco(Open source Framework for Experimental Setup and Control)를 사용하였다. 이 프로그램은 Fig. 4와 같이 별도의 소프트웨어 인터페이스 형식

Fig. 2 Hardware network of hybrid system

Fig. 3 Framework of OpenSees

Fig. 4 Component of OpenFresco

Fig. 5 Simulink model for hybrid system

이 아닌 OpenSees 내부에서 플러그인 형식으로 불러와 쓸 수 있도록 되어 있다.

하이브리드 실험의 수행은 Fig. 5와 같이 그래픽 블록 다이어그램 도구 및 사용자 정의 블록 라이브러리 인터페이스로 구성된 MATLAB/Simulink 환경에서 진행되며, Simulink에 내장된 모델을 물리적 부분 구조 모형과 실시간으로 연결해주는 xPC Target내에서 구동된다.

2.2 하이브리드 실험 대상 구조물

2.2.1 대상 구조물의 구성

본 하이브리드 실험에서 사용된 대상 구조물의 구성은 OpenSees를 이용하여 폭 2.45m, 1층 높이 2.4m, 2층 높이 2.0m의 1경간 2층의 강 뼈대 구조로 2차원 3자유도 안에서

Fig. 6 1bay-2story steel frame structure

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	7.7kN/mm ³
	F _y	0.25kN/mm ³
	Poisson ratio	0.26

모델링 하였다. Fig. 6과 같이 1층의 좌측 기둥을 물리적 부분구조 모형으로, 나머지 부분은 수치해석 모형으로 정의하였으며 부재는 SS400 H형강(125×125×6.5×9mm)을 사용하였다. 단면 및 재료의 특성은 Table 2과 같다.

2.2.2 수치해석모델 설정

논문의 하이브리드 실험을 위해 사용된 수치 해석 적분법은 고정 반복법에 의한 암시적 HHT 시간 적분법으로 Newton-Raphson, Initial stiffness 같은 반복법은 정확한 해를 구하기 위해 여러 번의 반복과정이 필요하고 이것은 컴퓨터의 계산시간을 길게 만든다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 피하기 위해 Shing이 제안한 암시적 HHT 시간 적분법을 사용하였다. 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 실험에 적합한 장점을 가지고 있다. 또한 비선형 구조물 하이브리드 실험에서 10번의 반복과정 만으로도 만족스러운 수렴 값을 확보할 수 있다고 Wei[17]가 제안하였다.

OpenSees 입력 파일에는 Rayleigh 감쇠가 사용되므로, Rayleigh 감쇠의 계수를 산정하기 위해 감쇠비와 고유진동수를 결정해야 한다. 감쇠비는 탄성영역 내에서 수치해석과 하이브리드 실험을 반복 수행하여 응답을 비교함으로써 감쇠비를 5%로 결정하였다.

고유진동수는 상용 유한요소 프로그램을 이용하여 5.34Hz, 17.47Hz로 결정하였다. 실험에서 사용된 재료 특성은 인장 실험을 통해 얻어진 결과를 적용하였다. 인장 실험에 쓰인

Fig. 7 Fixed iteration method for hybrid test

Fig. 8 Stress-strain curve

Fig. 9 Zero-length element

시편은 금속 재료 인장 시험편(KS B 0801)에 따라 제작하였고, 실험결과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 탄성계수 230kN/mm², 항복응력 0.3kN/mm²을 얻었다.

본 논문에서 수행한 하이브리드 실험은 한 개의 Actuator를 사용하여 수평변위만을 구현하였으므로 실제 구조물의 거동과는 차이가 발생할 수 있다. 따라서 수치해석 시 하이브리드 요소의 상단에 회전 변위 영향을 무시할 수 있도록 Zero-Length 요소를 사용하였으며, Zero-Length 요소는 같은 좌표 상에 두 개의 절점을 연결하는 길이가 0인 요소로서 각 자유도별로 강성을 조절함으로써 정의된다.

2.3 단자유도 하이브리드 실험 결과

본 하이브리드 실험에 사용된 지진 하중은 미국 PEER (Pacific Earthquake Engineering Research) Center의 El Centro를 사용하였다. 본 논문에서는 실험을 위해 10% 축소된 데이터를 사용하였으며 사용된 지진 하중의 최대 가속도는 0.76g이다. 지진하중의 총 가진 시간은 30초로 시간 간격은 0.01초이며 3000스텝으로 구성 되어 있다.

2.3.1 선형구간 실험 결과

선형구간 해석의 재료 특성은 Elastic material을 사용하였다. 선형실험 결과 총 3000스텝에 소요된 시간은 305초였으며, 1스텝에 약 0.1초의 시간이 소요 되었다. 비선형구간 수치해석과 하이브리드 실험의 결과를 Fig. 11에 시간이력그래프로 나타내고, Table 3에 각층의 최대 변위 값과 절대 최대 가속도 결과 값을 비교 정리하였다.

Fig. 12에 수치해석과 하이브리드 실험의 1층의 변위 결과 값을 이용하여 FFT 분석한 결과를 나타내었다. 응답 주파수 분포는 크기에서 다소 차이가 있지만 분포 양상이 매우 유사하며 가장 큰 진폭이 나온 주파수 또한 5.34Hz로 동일하였다. 또한, Fig. 13은 하중-변위 그래프로 구조물이 선형상태에서 거동 하고 있음을 확인할 수 있다.

수치해석과 하이브리드 실험 결과를 비교 분석하기 위해서 1층과 2층에서의 변위 및 가속도 응답이 최대인 구간을 확대하여 Fig. 14에 시간이력그래프로 나타내었다. 변위와 가

Fig. 10 Installation of physical sub-structure with 1 actuator

(a) Displacement of 1st story (Node 3)

(b) Displacement of 2nd story (Node 5)

(c) Acceleration of 1st story (Node 3)

(d) Acceleration of 2nd story (Node 5)

Fig. 11 Comparison of numerical analysis and hybrid test (Linear)

Table 3 Maximum value of Linear hybrid test

Node	Entries	Numerical analysis (A)	Hybrid test (B)	Error (%) $ A-B /A$
Node 3 (1 st story)	Displacement (mm)	9.77	9.35	4.3
	Acceleration (g)	1.33	1.41	6.0
Node 5 (2 nd story)	Displacement (mm)	14.09	12.65	10.2
	Acceleration (g)	1.99	1.95	2.0

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

Fig. 13 1st story Reaction force-displacement graph (Linear)

속도 응답 모두 수치해석과 하이브리드 실험의 응답 양상이 매우 유사함을 확인할 수 있다. 따라서 본 하이브리드 실험

이 강 뼈대 구조물의 동적 거동을 예측하는데 유효함을 알 수 있다.

Fig. 14 Comparison of maximum range (30~130sec)

Fig. 15 Comparison of numerical analysis and hybrid test (Non-linear)

2.3.2 비선형구간 실험 결과

실제 강 뼈대 구조물의 동적 거동을 예측하기 위해서 비

선형 실험을 수행하였다. 비선형구간 해석의 재료 특성은 Giuffre-Menegotto-Pinto steel material을 사용하였다. 구조물

Table 4 Maximum value of non-linear hybrid test

Node	Entries	Numerical Analysis (A)	Hybrid Test (B)	Error (%) $ A-B /A$
Node 3 (1 st story)	Displacement (mm)	60.64	63.66	5.0
	Acceleration (g)	6.43	6.53	1.6
Node 5 (2 nd story)	Displacement (mm)	78.82	75.80	3.8
	Acceleration (g)	9.05	8.26	8.8

Fig. 16 FFT of 1st story displacement (Non-linear)

Fig. 17 1st story Reaction force-displacement graph (Non-linear)

(a) Displacement of 1st story (Node 3)

(b) Displacement of 2nd story (Node 5)

(c) Acceleration of 1st story (Node 3)

(d) Acceleration of 2nd story (Node 5)

Fig. 18 Comparison of maximum range (30~130sec)

에 항목이 발생할 수 있도록 6배 증분한 El Centro 지진하중을 사용하였으며 실험 결과 총 3000스텝의 실험 시간은 322초로 기록되었다. 1스텝에 소요된 시간은 약 0.11초이다.

비선형구간 수치해석과 하이브리드 실험의 결과를 Fig. 15에 시간이력그래프로 나타내었다.

그 결과, Table 4에서 보이는 바와 같이 절대 최대 변위

값과 절대 최대 가속도 값이 수치해석과 하이브리드 시험이 유사하게 나타나 비선형 동적 하이브리드 실험이 강 뼈대 구조물의 동적 거동을 예측하기 위해 적절히 활용될 수 있음을 보여주고 있다. 비선형 실험의 경우 Fig. 15(a), Fig. 15(b)에서 나타나듯이 선형구간 실험과 달리 실험이 끝난 후에도 영구 변형이 발생한 것을 확인할 수 있다. 이는 하중-변위 그래프인 Fig. 17에서도 동일한 결과를 확인할 수 있다.

또한, 1층의 변위 결과를 이용하여 FFT 주파수 분석결과를 Fig. 16에 나타내었다. 주파수 분석 결과 진폭이 가장 크게 나온 주파수를 비교하였으며, 수치 해석의 결과가 5.34Hz 인데 비해 하이브리드 실험의 결과 값이 5.64Hz로 다소 크게 나왔다. 결과에서 나타나듯이 다른 주파수 대역은 거의 비슷하나 수치 해석의 경우 5.34Hz 분포가 높음에 비해 하이브리드 실험의 경우엔 5Hz와 6Hz사이의 응답이 고르게 분포 되어 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 18은 수치해석과 하이브리드 실험 결과를 비교 분석하기 위해서 1층과 2층에서의 변위 및 가속도 응답이 최대인 구간을 확대하여 시간이력그래프로 나타내었다. 가속도 응답의 경우 선형실험 결과와 마찬가지로 수치해석과 하이브리드 실험의 응답 양상이 유사함을 확인할 수 있다. 하지만 변위 응답의 경우 최대값 이전의 응답은 유사하나 최대값 이후 영구변형이 발생하여 후반부로 갈수록 잔류 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 하이브리드 실험이 수치해석에 비해 변위가 많이 발생하고 실험이 종료된 후에도 하이브리드 실험의 잔류변형이 더크게 발생하였다. 이는 수치해석에 사용한 재료 비선형 모델의 정확도가 떨어지기 때문이라고 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 연구는 단자유도 하이브리드 실험을 구현하기 위해 수행되었다. 대상구조물은 1경간 2층 강 뼈대 구조물이며, 재하 하중으로 El Centro 지진하중을 사용하였다. 또한 하이브리드 실험을 위해서 전용 하이브리드 수치해석 프로그램인 OpenSees를 사용하였다.

(1) 선형구간 하이브리드 실험의 경우 수치해석과 하이브리드 실험의 전체적인 응답 형상이 잘 일치 하였으며, 이로써 하이브리드 시스템이 유효함을 알 수 있다. 비선형구간 하이브리드 실험의 경우 수치 해석과 하이브리드 실험의 전체적인 응답 형상이 유사하나 후반부로 갈수록 하이브리드 실험이 잔류 변형이 더 많이 발생하였다. 이는 수치해석에 사용한 재료 비선형 모델의 정확도가 떨어지기 때문이라고 판단되며, 구조물의 항복 이후 거동을 잘 표현할 수 있는 재료 비선형 모델의 개선이 필요하다.

(2) 본 연구에서는 1기의 Actuator만을 이용하여 실험이 진행되었기 때문에 수치해석모형과 물리적 부분구조모형의 접합부를 힌지로 모델링 하였다. 이것은 실제 구조물의 거동과 차이가 있으므로 실제 구조물의 거동 파악을 위해서는 회전 자유도를 포함 할 수 있는 3기의 Actuator를 이용한 다

자유도 하이브리드 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

(3) 본 연구에서 수행한 하이브리드 실험은 평균 약 313초로 이는 지진하중의 하중빈도 대비 약 9.6%의 속도이다. 10% 이상의 속도를 갖는 하이브리드 실험을 실시간이라고 할 때, 본 연구에서 수행한 하이브리드 실험은 실시간 하이브리드 실험에 근접한 실험이라고 할 수 있으며, 현재까지 국내에서 수행되었던 하이브리드 실험 중 실시간에 가장 근접한 실험이다.

(4) 현재 구축되어있는 하이브리드 시스템을 간소화 및 최적화하고 수치해석을 수행하는 컴퓨터의 성능을 개선한다면 실험 수행속도는 더욱 빨라질 것으로 기대된다.

위에서 언급한 수치해석 모형 수정, 시스템 최적화 등이 이루어진다면 경제적, 시간적, 공간적으로 우수한 하이브리드 실험이 진동대 실험을 대체할 수 있을 것이라고 판단되며, 이후 본 하이브리드 시스템에 대한 신뢰성 향상과 유효성 검증을 위해 진동대와 비교 분석이 필요할 것이다.

후 기

본 논문은 한국철도기술연구원 기본연구사업(과제코드 PK12005C)의 지원으로 수행되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S.-K. Park (2010) Estimation of Aseismic Performance of Laminated Rubber Bearing through Shaking Table Tests, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(4), pp. 440-446.
- [2] K. Takanashi (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*, 229, pp. 77-83.
- [3] S.A. Mahin, P.-S.B. Shing, C.R. Thewalt, R.D. Hanson (1989) Pseudo-dynamic test method-current status and future direction, *J. Engng Mech.*, 115, pp. 2113-2128.
- [4] S.N. Dermitzakis, S.A. Mahin (1985) 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.
- [5] C.R. Thewalt, S.A. Mahin (1987) Hybrid solution techniques for generalized pseudodynamic testing, UBC/EERC-87/09, *Earthquake Engineering Research Institute*, University of California, Berkeley, California.
- [6] U.E. Dorka, D. Heiland (1991) Fast online earthquake utilizing a novel PC supported measurement and control concept, *4th Conference on Structural Dynamics*, Southampton, UK, 1991.
- [7] U.E. Dorka (2002) Hybrid experimental-numerical simulation of vibrating structures, *International Conference WAVE2002*, Okayama, Japan.
- [8] V. Bayer, U.E. Dorka, U. Fullekrug, J. Gschwilm (2005) On

- real-time pseudodynamic substructure testing: algorithm, numerical and experimental results, *Aerospace Science and Technology*, 9(3), pp. 223-232.
- [9] P.B. Shing, M.T. Vannan, E. Cater (1991) Implicit time integration for pseudodynamic tests, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(9), pp. 809-819.
- [10] P.B. Shing, M.T. Vannan (1991) Implicit time integration for pseudodynamic tests: convergence and energy dissipation, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 20(9), pp. 809-819.
- [11] C.R. Thewalt, M. Roman (1994) Performance parameters for pseudodynamic tests, *Journal of Structural Engineering*, 120(9), pp. 2768-2781.
- [12] Y. Takahashi, G.L. Fenves (2006) Software framework for distributed experimental computational simulation of structural systems, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(3), pp. 267-291.
- [13] R.-Y. Jung, P.B. Shing (2007) Performance of a real-time pseudodynamic test system considering nonlinear structural response, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(12), pp. 1785-1809.
- [14] V. Saouma, M. Sivaselvan (2008) Integration schemes for real-time hybrid testing, *Hybrid Simulation : Theory, Implementation and Applications*, Balkema, Leiden, pp. 25-34.
- [15] I.C. Choi (2009) Development and Verification of Hybrid Test System using Small Column Mode, Master's Thesis, Myongji University.
- [16] S.M. Cho (2011) Verification of Hybrid Structural Test Technique by Shaking Table Test of a Linear 2-Dimensional Frame Model, *Earthquake Engineering Society of Korea*, pp. 33-43.
- [17] Z. Wei (2005) Fast Hybrid Test System For Substructure Evaluation, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, University of Colorado, Boulder.
- 접수일(2012년 6월 4일), 수정일(2012년 7월 6일),
게재확정일(2012년 7월 17일)
-
- Sehoon Kim** : Kimsem0979@krii.re.kr
Korea Railroad Research Institute, #360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea
- Okpin Na** : Nao@krii.re.kr
Korea Railroad Research Institute, #360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea
- Sungil Kim** : Sikim@krii.re.kr
Korea Railroad Research Institute, #360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea
- Jaejin Lee** : jaejin.lee@MTS.com
MTS Korea. Inc., 5th F., Core B/D, 8-1, Sunae-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-825, Korea
- Dachung Kang** : dhkang@kipo.go.kr
Korean Intellectual Property Office, Government Complex Daejeon Building 4, 189, Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon, 302-701, Korea