

고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법을 이용한 철근콘크리트 골조구조물의 실시간 하이브리드실험

Real-Time Hybrid Testing Using a Fixed Iteration Implicit HHT Time Integration Method for a Reinforced Concrete Frame

강대흥¹⁾ · 김성일²⁾

Kang, Dae Hung · Kim, Sungil

국문 요약 >> 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법을 이용하여 3층 3경간 철근콘크리트 골조구조물을 수치해석모형과 물리적 부분구조모형으로 나누어 실시간 하이브리드실험을 실시하였다. 물리적 부분구조모형으로는 1층 내부 비연성기둥 1개소가 선택되었고, 수치해석모형에 일축 방향의 지진하중을 시편이 심한 손상에 의하여 파괴에 이를 때까지 작용시켰다. 비선형 유한요소해석 프로그램인 Mercury가 실시간 하이브리드실험을 위하여 새로이 개발 및 적용되었다. 실험결과는 물리적 부분구조모형의 상부 수평방향 층간변위비를 OpenSees에 의한 수치해석시뮬레이션과 진동대실험의 그것과 비교하였다. 본 실험은 가장 복잡한 실시간 하이브리드실험 중의 하나이고, 하드웨어, 알고리즘 그리고 모형에 대한 기술적인 내용을 본 논문에서 자세히 설명하였다. 수치해석모형의 개선, 물리적 부분구조 모형 접선강성행렬의 유한요소해석 프로그램에서의 평가 그리고 하중기반 보-요소의 요소상태결정의 연산시간을 줄이기 위한 소프트웨어의 개선이 이루어진다면 실시간 하이브리드실험과 진동대실험결과의 비교는 권장할 만하다. 그리고 “지진과 같은 동적하중하의 복잡한 구조물의 수치해석시뮬레이션”이라는 목적을 위하여 실시간 하이브리드실험은 동적하중에 대한 실험적 검증을 점진적으로 수치해석모형으로 대체하기 위한 저비용-고효율 실험법으로서의 가치를 충분히 가지고 있다고 할 수 있다.

주요어 비선형 유한요소해석, 실시간 하이브리드실험, 진동대실험, 철근콘크리트 골조구조물, 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법

ABSTRACT >> A real-time hybrid test of a 3 story-3 bay reinforced concrete frame which is divided into numerical and physical substructure models under uniaxial earthquake excitation was run using a fixed iteration implicit HHT time integration method. The first story inner non-ductile column was selected as the physical substructure model, and uniaxial earthquake excitation was applied to the numerical model until the specimen failed due to severe damage. A finite-element analysis program, Mercury, was newly developed and optimized for a real-time hybrid test. The drift ratio based on the top horizontal displacement of the physical substructure model was compared with the result of a numerical simulation by OpenSees and the result of a shaking table test. The experiment in this paper is one of the most complex real-time hybrid tests, and the description of the hardware, algorithm and models is presented in detail. If there is an improvement in the numerical model, the evaluation of the tangent stiffness matrix of the physical substructure model in the finite element analysis program and better software to reduce the computational time of the element state determination for the force-based beam-column element, then the comparison with the results of the real-time hybrid test and the shaking table test deserves to make a recommendation. In addition, for the goal of a “Numerical simulation of the complex structures under dynamic loading”, the real time hybrid test has enough merit as an alternative to dynamic experiments of large and complex structures.

Key words Nonlinear Finite Element Analysis, Real-Time Hybrid Test, Shaking Table Test, Reinforce concrete frame, Fixed iteration implicit HHT time integration method

¹⁾ 정회원·한국철도기술연구원
(교신저자: daehung71@krii.re.kr)

²⁾ 정회원·한국철도기술연구원

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2011. 6. 21 / 수정일 : 2011. 8. 9 / 게재확정일 : 2011. 8. 9)

© 2011EESK www.eesk.or.kr

1. 개요

지진하중과 같은 동적하중에 대한 구조물 성능평가기법에 관한 연구는 (a) 유한요소모형의 컴퓨터시뮬레이션과 (b) 재료 또는 요소에 대한 실내실험으로 크게 나눌 수 있다. 전

자의 경우 구조물의 복잡성과 비선형성으로 인하여 여전히 많은 문제점을 내포하고 있다. 후자의 대표적인 실험 방법 중 하나는 진동대실험이다. 그러나 진동대의 규모 및 용량의 한계성으로 인하여 구조물의 크기가 제한되거나, 전체 구조물을 축소하여 실험을 수행하고 있다. 이러한 접근법은 상호 단점을 보완하기 위하여 Takanashi 등⁽¹⁾에 의하여 하이브리드실험으로 통합되었다.

하이브리드실험의 중요성은 미국의 NRC 보고서⁽²⁾의 “NEES의 주요 목적 중의 하나는 통합된 컴퓨터시뮬레이션과 물리적 실험 연구 장려”라는 기술에서 쉽게 인식할 수 있으며, 물리적 실험을 컴퓨터시뮬레이션으로 대체하기 위한 과정의 산물이라고 말할 수 있다. 하이브리드실험에 관한 최근의 연구 동향은 (a) 분산 하이브리드실험과 (b) Hard/Soft 실시간 하이브리드실험으로 나눌 수 있다.

분산 하이브리드 실험은 지형학적으로 분산된 실험 장비를 효율적으로 활용하기 위한 실험방법으로 SIMCOR⁽³⁾ 또는 OpenFresco⁽⁴⁾가 미들웨어로 사용되어진다. 이러한 미들웨어는 단일 실험실의 실시간 하이브리드실험을 수행하기에는 제한적인 요소를 가지고 있다.⁽⁵⁾

실시간 하이브리드실험의 수치해석모형과 물리적 부분구조모형은 시뮬링크와 유사한 모형으로 HIL(Hardware In the Loop)로 개발되고 통합될 것이다.

국내의 경우 5자유도의 건축구조물을 상부 2개 자유도에 대해서는 물리적 부분구조모형으로 하부 3개의 자유도에 대해서는 수치해석모형으로 나눈 실시간 하이브리드실험⁽⁶⁾과, 실시간 하이브리드실험법을 이용한 MR감쇠기가 설치된 건축구조물의 응답 제어성능 평가⁽⁷⁾ 등이 수행되었다. 그러나 자유도의 수가 증가하고 수치해석모형에 비선형성이 심각해질 경우 위의 연구에서 사용된 수치해석법 및 제어알고리즘은 실시간 하이브리드실험을 위해 수정되어야 할 것이다. 그리고 지진하중에 의한 전단파괴형 철근콘크리트 기둥의 손상메커니즘을 연구하기 위하여 유사동적실험이 실시되었다.⁽⁸⁾ 그러나 유사동적실험은 시간의존변수(관성력, 감쇠력 등)에 대한 실시간 반영이 어렵다.

국내의 경우 하이브리드실험에 대한 중요성은 연구 인 프라 조성 현황에 관한 보고서⁽⁹⁾를 통하여 확인할 수 있으며, 소형 선형 평면배대모형의 진동대실험을 통한 하이브리드실험 기법의 검증에 대한 연구⁽¹⁰⁾와 비선형성이 포함되지 않은 실시간 또는 비실시간 하이브리드실험 등이 수행되었다. 하지만, 비선형재료와 복잡한 구조적 거동을 보이는 실험대형 구조물에 대한 실시간 하이브리드실험을 수행하기 위해서는 연산속도를 향상시킬 수 있는 수치해석 프로그램의 개발과 물리적 부분구조모형과 수치해석모형간의 인터페이

스에서의 거동을 제어할 수 있는 제어기법에 대한 연구가 필요하다.

실시간 하이브리드실험을 위한 수치해석모형의 해석시간은 컴퓨터의 성능에 상당히 의존적이다. 따라서 이러한 제한적 요소를 제거하기 위하여 Shing⁽¹¹⁾은 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법을 제안하였고, OpenSees⁽¹²⁾안에 추가되어 MR 댐퍼 사용에 관한 연구⁽¹³⁾ 등의 실시간 하이브리드실험에 적용되었다.

고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법을 활용한 실시간 하이브리드실험은 자유도 수의 제한이라는 문제점을 가지고 있다. 이는 요소상태결정에 많은 수치해석시간이 소요되기 때문에 발생하며, Stauffer 등⁽¹⁴⁾은 효율적인 Hard 실시간 하이브리드 실험을 위한 자유도의 수는 140개 이내라고 제안하였다.

본 연구는 이러한 제한 사항을 개선한 수치해석프로그램인 Mercury⁽¹⁵⁾를 이용하여 철근콘크리트 골조구조물에 대한 실시간 하이브리드실험을 수행하였다.

2. 수치해석 프로그램

실시간 하이브리드실험을 위하여 새로이 개발된 수치해석프로그램인 Mercury의 주요 특징은 다음과 같다.

- (1) 표 1에 보이는 바와 같이, 강재 및 콘크리트 구조물의 복잡한 비선형 거동을 시뮬레이션하기 위하여 보편적으로 사용되어지는 재료 및 요소 모형과 정-동적 해석을 위한 해석 알고리즘이 포함되었다.
- (2) 많은 자유도 수를 갖는 복잡한 구조물의 실시간 해석을 위하여 멀티쓰레딩기법에 의한 요소상태결정의 병렬연산이 가능하도록 하였다.
- (3) 미들웨어를 사용하지 않고 액추에이터와 데이터 통신이 가능하도록 수치해석프로그램 안에 이를 포함시켰다.
- (4) 교육 및 알고리즘의 검증을 위한 MATLAB 버전과 하

〈표 1〉 Mercury의 주요 모형 및 해석 알고리즘

재 료	강재	Hardening, Bilinear, Modified Giuffre-Monegotto-Pinto ⁽¹⁶⁾
	콘크리트	Modified Kent-Park ⁽¹⁶⁾ , Anisotropic Damage ⁽¹⁷⁾
	요소	변위기반 Fiber 단면 보-기둥 하중기반 Fiber 단면 보-기둥
	해석 알고리즘	Newton-Raphson 계열 반복법, 고유값 해석, 혼합 반복법
	Integrator	변위 및 하중 제어, Newmark, HHT, 고정 반복법에 의한 HHT
	인터페이스	Zero-Length 및 Zero-Length Fiber 요소

이브리드실험을 위하여 최적화된 C++ 버전으로 나누어 개발되었다.

- (5) 객체지향프로그래밍기법을 활용한 재료 모형의 사용자 함수 작성이 용이하도록 하였다.

2.1 MATLAB 버전

2009년 Faniel의 조사⁽¹⁸⁾에 의하면 MATLAB은 NEES 연구자들이 대부분 사용하는 프로그래밍 언어로 보고되었으며, 사용상의 편의성을 가지고 있다. 이러한 이유로 MATLAB 버전은 교육 및 최적화된 C++ 버전을 위한 재료 및 요소 모형, 그리고 해석 알고리즘의 테스트를 목적으로 개발되었다.

MATLAB 버전은 주요 특징은

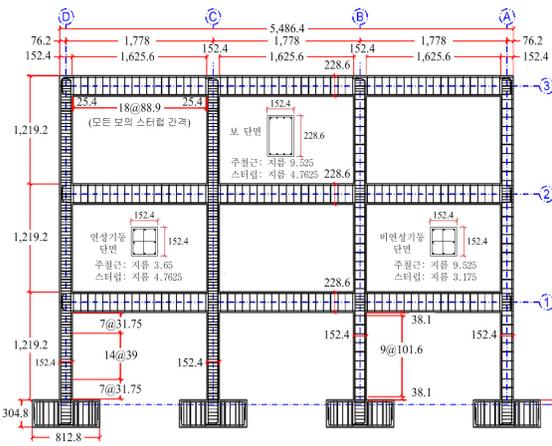
- (1) 비선형 유한요소해석 및 하이브리드실험의 교육을 위하여 특성화되었다.
- (2) 유사정적실험 및 TCP/IP 통신을 통한 비실시간 분산 하이브리드 실험이 가능하다.

2.2 C++ 버전

C++ 버전은 MATLAB 버전을 통하여 검증된 재료, 요소 모형, 그리고 해석 알고리즘 등을 시스템 메모리의 한계성을 갖는 실시간 OS(리눅스 또는 윈도우), LabVIEW, 그리고 Simulink/xPCTarget를 이용하여 실시간 하이브리드 실험이 가능하도록 최소화 및 최적화되었다. 따라서 OpenSees, Abaqus 등의 유한요소해석프로그램과는 달리, 2차원 골조 구조물의 비선형해석 이외의 요소는 배제하였다.

C++ 버전의 주요 특징은

- (1) 입력 데이터의 작성을 위하여 프로그래밍 언어의 특성을 가지는 스크립트 언어인 ‘Lua’를 선택하였다. 이는 유사 스크립트 언어(TCL, Python, Ruby 등)보다 이식성이 뛰어나고, 용량이 작은 장점을 가지고 있다. 또한 ‘Lua’의 문법 및 형태는 MATLAB의 Cell Array 및 Structure 구문과 유사하여 사용자가 작성한 입력 데이터의 MATLAB 버전과 C++ 버전사이의 전환이 용이하다.
- (2) 최적화된 행렬연산을 수행하기 위하여 “Intel Math Kernel Library”를 사용하였으며, 요소상태결정에 걸리는 연산 시간을 향상시키기 위하여 멀티프로세서 시스템에서 사용이 가능한 “Intel Threading Building Block”을 사용하여 멀티쓰레딩기법을 적용하였다.



〈그림 1〉 3층 3경간 철근콘크리트 골조구조물 상세도⁽¹⁹⁾ (단위: mm)

3. 대상 구조물

새로이 개발되어진 수치해석프로그램인 Mercury의 실시간 하이브리드실험에서의 유효성 및 적합성을 검증하고, 실시간 하이브리드실험을 통한 철근콘크리트 골조구조물의 물리적 부분구조물의 구조적 거동을 평가를 위하여, Ghannoum의 진동대실험에 의하여 구조적 거동이 평가되었던 철근콘크리트 골조구조물⁽¹⁹⁾이 선정되었다.

3.1 진동대실험

내진설계가 반영되지 않은 철근콘크리트 구조물의 하부 기둥은 적절한 전단보강철근을 가지지 않는다. 따라서 이러한 구조물에서 발생하는 문제점을 관찰하기 위하여 그림 1과 같이 Ghannoum은 1/3 축소 3층 3경간 철근 콘크리트 골조 구조물의 진동대실험을 실시하였다. 이 실험의 주요 목적은 내진 설계가 반영되지 않은 기둥을 갖는 철근콘크리트 골조구조물의 붕괴 거동과 기둥의 전단 및 축력에 의한 파괴를 관찰하는 것이었다. 이러한 기둥은 전단 강도에 의한 전단 파괴가 발생하기 전 휨에 의해서 항복하고, 공칭전단강도의 손실을 초래하는 전단 파괴는 소성힌지영역이 심각하게 손상되었을 때 발생한다. 대상 구조물은 그림 1과 같이 3층 3경간 철근콘크리트 골조구조물이고, C와 D열의 기둥은 기둥의 붕괴 거동을 제어하고, 심각한 지진 하중 하에서 예측할 수 있는 가로방향의 파괴(Lateral Failure)를 모사하기 위하여 연성기둥¹⁾으로 설계되었으며, A와 B열의 기

1) 연성기둥은 기둥의 회전성능을 향상시켜 구조물의 변형 능력을 커지게 함으로서 밀면전단력을 줄일 수 있다. 이를 위해서는 코어콘크리트를 구속하는 스테럽의 간격을 적절하게 배치하여 구속효과를 증대시켜야 하며, 기둥의 축방향 성능과 축하중의 비율을 적절하게 유지하도록 하여야 한다. 따라서 항복한 부재가 최대 변형한계에 이르러 파괴되기 전에 다른 부재들도 함께 항복하도록 유도하

등은 비연성기둥으로 설계되었다.

26.7kN 하중이 모든 보에 등분포로 작용하도록 정적하중을 추가하였으며, 대상 구조물 안에 하나 또는 다수의 기둥이 심각한 손상에 의한 파괴에 도달할 때까지 일축 지반 가속도를 진동대에 적용하였다.

3.2 실시간 하이브리드실험

3.2.1 물리적 부분구조모형

Ghannoum의 진동대실험에 근거하여 일축 지반 가속도에 의하여 심각한 손상에 의한 파괴가 발생하였던 그림 1의 1층 B열 비연성기둥을 실시간 하이브리드실험을 위한 물리적 부분구조모형으로 선정하였다. 물리적 부분구조모형의 크기 및 상세 철근 배근은 진동대실험에 사용되었던 기둥의 상세 철근 배근과 동일하다. 그림 2 (a)는 물리적 부분구조모형의 크기 및 철근 배근 상세이며, 그림 2 (b)는 이에 의하여 제작되어진 시편들이고, 그림 2 (c)는 실시간 하이브리드실험을 위한 설치를 보여준다.

진동대실험에서 물리적 부분구조모형으로 선정된 기둥은 그림 1에서 보이는 것처럼 8개의 지름이 9.525mm의 주철근과 101.6mm간격으로 지름이 3.175mm인 스티럽이 배근되었으며, 20개가 제작되었다.

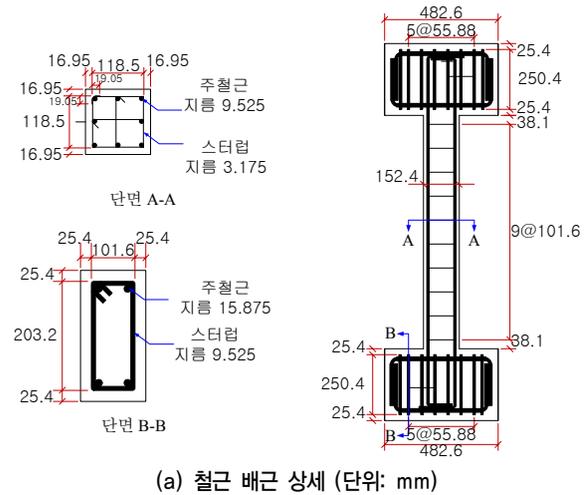
실시간 하이브리드실험을 위한 물리적 부분구조모형은 진동대실험에서 사용되었던 실물 크기의 1층 B열의 기둥을 반력상 위의 보강 기초 위에 두 개의 앵커로 고정하였다. 물리적 부분구조모형의 상부는 강제 거동을 할 수 있도록 19.05mm의 뒷개위에 상부 압연 보(4.7625mm의 스티프너를 갖는 W14x43 - USA) 플랜지와 볼트로 체결하였다. 그리고 상부 압연 보는 3개의 액추에이터에 연결되었다.

그림 2 (c)의 두 개의 수직 방향의 액추에이터는 상부 질량, 수직 변위 그리고 회전의 제어 목적으로 사용되어지며, 한 개의 수평 방향 액추에이터는 수평 변위의 제어 목적으로 사용되어 진다. 세 개의 액추에이터는 180GPM HPU에 의하여 구동되었으며, 이에 대한 사양은 표 2에 나타내었다.

3.2.2 수치해석모형

수치해석모형은 그림 3 (a)에 보이는 것처럼 11개의 기둥과 9개의 보로 구성된다. 기둥과 보 요소의 구성은 그림 3 (b)에 보이는 것과 같으며, Fiber 단면에 대한 구성은 그림 3 (c)와 같다. 여기서 1층의 모든 기둥은 그림 3 (b)의 하부

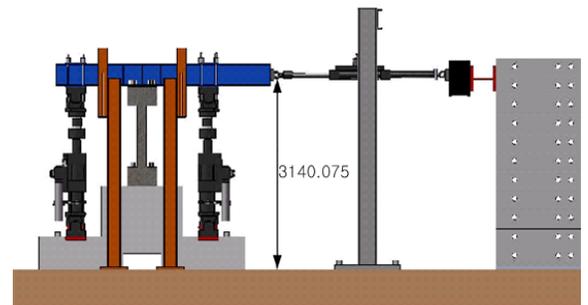
는 것이 바람직하다. 이는 전체 구조물이 연성에 의하여 내력을 분배시킬 수 있으며, 많은 양의 에너지를 소산시킬 수 있기 때문이다. 반면, 비연성기둥은 변형 능력의 저하로 인하여 다른 부재가 항복하기 전에 취성파괴를 일으켜 구조물을 붕괴에 이르게 한다.



(a) 철근 배근 상세 (단위: mm)



(b) 시편 제작



(c) 시편 설치 (단위: mm)

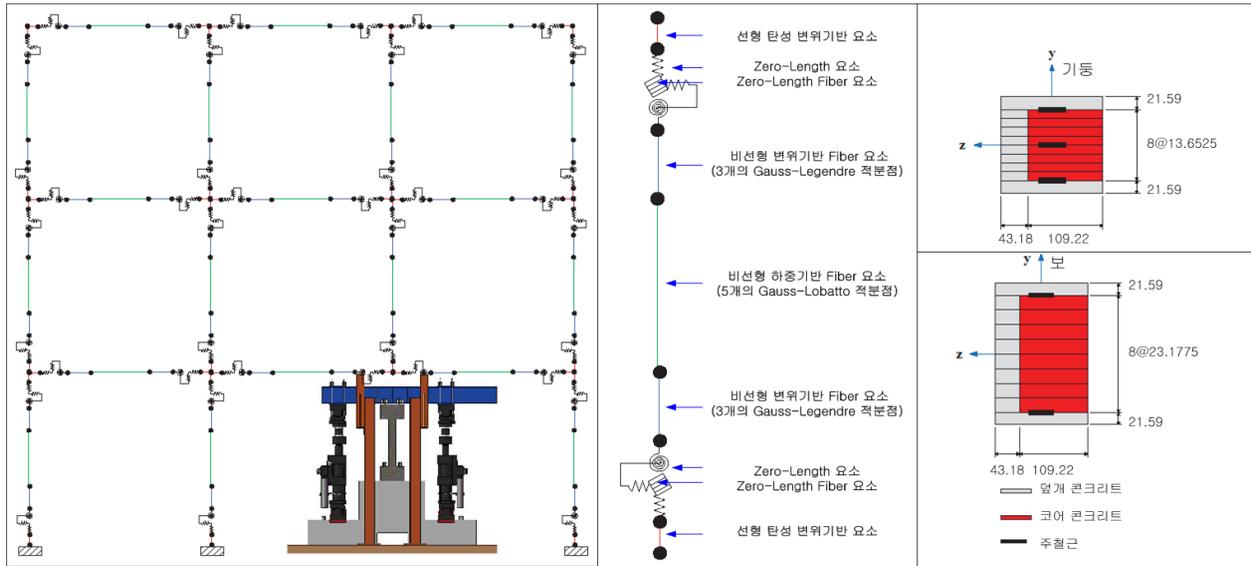
〈그림 2〉 물리적 부분구조모형 제작 및 설치⁽²⁰⁾

〈표 2〉 액추에이터 사양

액추에이터	용량(kN)	스트로크(mm)	속도(m/sec)
수직방향	489.5	254(±127)	0.508
수평방향	97.9	609.6(±304.8)	2.54

에 보이는 선형 탄성 변위기반 요소가 제외되었다. 이에 대한 특성을 요약하면,

- (1) 보-기둥 연결부의 선형 탄성 변위기반 요소
- (2) 콘크리트와 철근의 부착-슬립에 대한 거동 구현을 위한 Zero-Length 그리고 Zero-Length Fiber 요소



(a) 하이브리드 요소를 갖는 수치해석 모형

(b) 기둥과 보 요소의 구성

(c) Fiber 단면의 구성

〈그림 3〉 수치해석 모형⁽²⁰⁾ (단위: mm)

(3) 3개의 Gauss-Legendre 적분점을 갖는 비선형 변위기반 Fiber 요소; 심각한 비선형 범위 내에서 하중기반 요소는 변위기반의 알고리즘으로부터 구해진 변위에 대한 적합방정식을 만족시키기 위한 반복법을 사용하기 때문에 비선형성이 심각하여질 경우 수렴시간이 길어지는 경향을 보였으며, 이럴 경우 비선형성이 심한 구간에 요소 길이가 짧은 변위기반의 Fiber 요소를 추가하여 사용함으로써 전체적인 수렴율을 향상시키고, 요소상태결정에 걸리는 소요시간을 줄일 수 있었다.

(4) 5개의 Gauss-Lobatto 적분점을 갖는 비선형 하중기반 Fiber 요소; 하중 보간 함수에 의한 요소상태결정을 수행하기 때문에 변위기반 요소(1차 또는 2차 보간 방정식에 의한 형상 함수의 사용)와는 달리 요소의 길이와 관계없이 정확한 해를 구할 수 있다. 그러나 비선형 요소의 경우 정확성의 향상을 위하여 적분점의 수를 증가시켜야 할 것이다.⁽²¹⁾

(1)에서 (4)의 요소는 그림 3 (b)에 보이는 것처럼 하나의 부재에 대칭으로 배치되었다. 비선형 요소를 위해서는 Fiber 단면이 사용되었다. Fiber 단면은 코어 콘크리트를 위하여 8개, 덮개 콘크리트를 위하여 10개, 그리고 보의 주철근의 경우 2개와 기둥의 주철근을 위하여 3개로 구성되었다.

각각의 Fiber 단면의 응력-변형률 이력을 확인할 수 있도록 Modified Kent-Park 재료 모형(콘크리트)과 Modified Giuffre-Monegotto-Pinto 재료 모형(주철근)이 사용되었다.

최종적인 수치해석 모형은 20개의 부재, 140개의 요소, 135개 절점 그리고 405개의 자유도를 갖는다.

3.2.3 수치해석

실시간 하이브리드실험을 위한 시간적분법은 그림 4의 Shing에 의해서 개발되어진 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법이 사용되었다. 이 방법의 안정성과 감쇠 특성, 그리고 유사동적실험에 성공적으로 적용되었다.

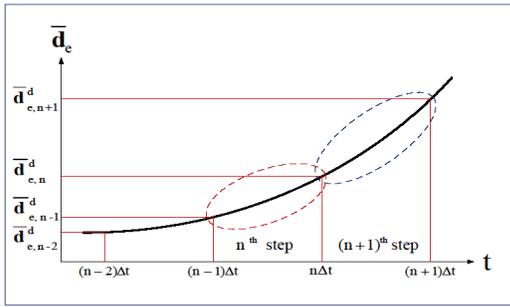
단점은 반복수의 제한과 초기강성행렬을 사용한다는 점에서 해의 정확성에 잠재적 오차를 가질 수 있다는 점이다. 그럼에도 불구하고 비선형해석을 위하여 고정수의 반복만을 가진다는 점에서 실시간(또는 빠른) 실험 시스템에 적합하다.⁽²²⁾

그림 4에서 보이는 $\bar{\alpha}_L^2$ 에 대한 설명은 3.2.4절에 나타내었다.

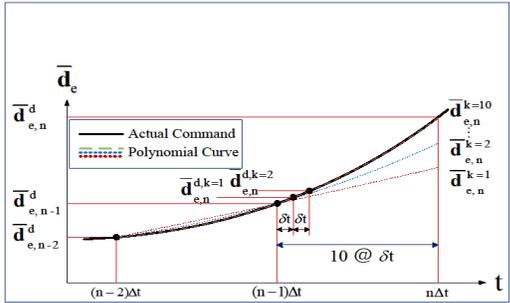
실시간 하이브리드실험의 핵심 요소는 수치해석모듈이다.

본 실험을 위하여 8개의 코어(두 개의 쿼드 코어)를 갖는 인텔 프로세서, 액추에이터 컨트롤러와의 통신을 위한 SCRAMNet 카드, 그리고 연산 속도 향상을 위하여 두 개의 인텔 라이브러리(Intel Math Kernel Library, Intel Threading Building Blocks)가 추가된 Mercury가 사용되었다.

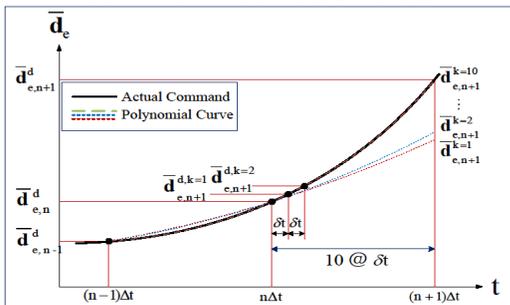
비선형해석을 수행하기 위하여 반복수를 10으로 고정하였을 경우 실시간 하이브리드실험을 효율적으로 수행하기 위한 해석에 소요되는 목표 시간은 1회 반복에 0.97ms(액추에이터에 명령변위를 전달하는 시간 간격 - 1024Hz)이다.



(a) 암시적 고정반복법에 의한 시간 적분법

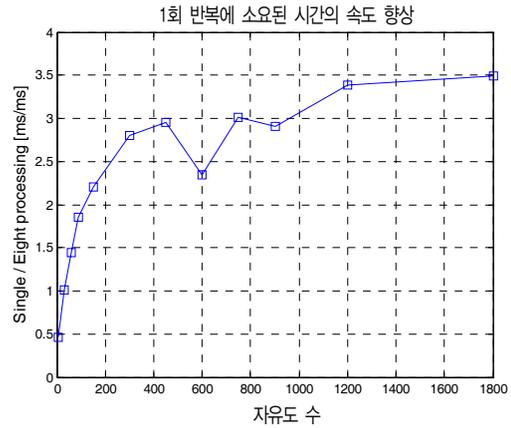


(b) nth 시간 간격에서의 명령변위 생성



(n+1)th 시간 간격에서의 명령 변위 생성

〈그림 4〉 고정반복법⁽¹⁵⁾



〈그림 5〉 멀티쓰레딩을 통한 요소상태결정의 속도 향상⁽²⁰⁾

초과하는 경우가 발생하였다. 이는 하중기반 요소의 요소상태결정을 위한 많은 수의 반복이 필요하기 때문에 발생하였다. 따라서 실시간 하이브리드실험을 위하여 연산 시간의 초과를 피하기 위하여 Elkhoraibi와 Mosalam⁽²³⁾ 처럼 입력 지반 가속도의 시간 간격을 0.01초에서 0.02초로 증가시켰다.

차후의 신뢰할 수 있는 멀티쓰레딩기법을 활용한 속도 향상을 얻기 위해서는 심각한 비선형성이 예상되는 부분에 대한 요소 배치(하중기반요소와 변위기반요소의 균형 배치)의 최적화 방법에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다.

3.2.4 하이브리드 요소

하이브리드 요소는 물리적 부분구조모형을 수치해석모형에 통합하기 위하여 수치해석모형에 포함되어진 요소이다. 하이브리드 요소의 절점변위와 절점하중(하중복원력)은 그림 6에 보이는 수치해석모형과 물리적 부분구조모형사이의 변환행렬을 통하여 정의된다. 그림 6에서 \bar{d}_e^c 는 수치해석모형으로부터 얻어진 명령변위이고, 변위변환행렬을 통하여 액추에이터의 변위인 p_e^c 로 전달된다. 물리적 부분구조모형으로부터 측정되어진 측정하중과 측정변위인 P_e^m 과 p_e^m 는 변위 및 하중변환행렬을 통하여 \bar{f}_e^m 과 \bar{d}_e^d 로 전달된다. 측정되어진 하중은 수치해석모형의 하중복원력 \bar{f}_e^d 로 사용되어지기 위하여 식 1에 의하여 보정^{(11),(22)}된다.

$$\bar{f}_e^d = \bar{f}_e^m + \bar{k}_e^{ini} (\bar{d}_e^c - \bar{d}_e^d) \quad (1)$$

여기서 \bar{k}_e^{ini} 는 물리적 부분구조모형의 초기강성행렬이다.

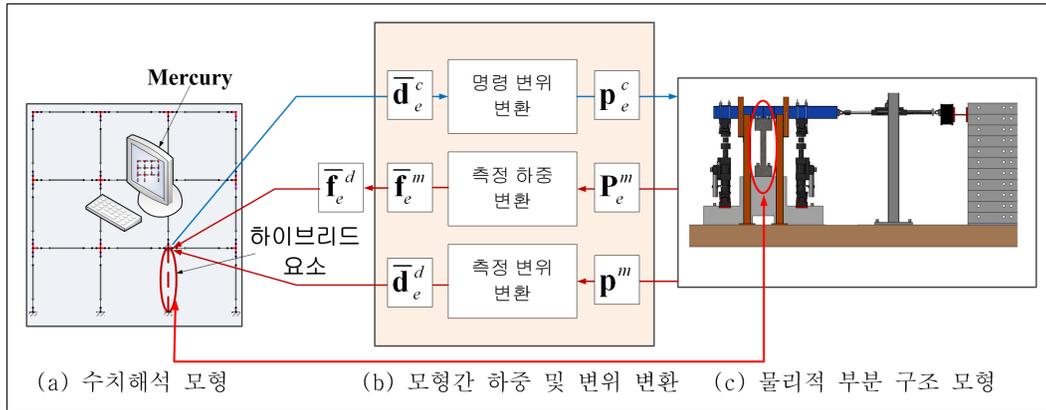
변위변환행렬과 하중변환행렬은 그림 7(a)의 캔틸레버 보-기둥 요소의 3개의 자유도와 그림 7(b)의 3개의 액추에이터에 의해서 측정되어지는 변위와 하중의 관계로 나타낼 수 있다.

그러나 큰 변형이 발생할 때 목표 해석시간 안에 해석을 완료하지 못하는 경우가 발생하였다. 이는 수치해석모형에 비선형 변위기반 요소를 추가한 이유에서 언급했던 것처럼 하중기반 요소의 요소상태결정에 소요되는 연산 시간이 증가하였기 때문이다.

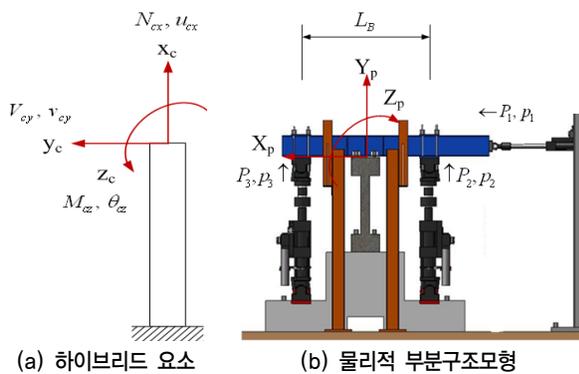
행렬연산 측면에서 연산 속도의 개선을 위하여 Intel Math Kernel Library를 사용하였음에도 불구하고, 전체 연산 시간에 끼치는 영향은 상대적으로 작았다. 반면에 요소상태결정을 위하여 멀티쓰레딩기법을 사용하였을 경우 그림 5에서 알 수 있듯이 상당한 연산 속도의 감소를 확인할 수 있었다.

그림 5는 자유도 수에 따른 요소상태결정을 위하여 1회의 반복에 소요된 시간을 단일 프로세싱에 대한 8개의 병렬 프로세싱의 비로서 나타내었다.

멀티쓰레딩을 통한 병렬연산은 요소상태결정을 위한 연산 속도의 향상을 얻을 수 있었지만, 콘크리트가 파괴에 도달하였을 때 수치해석 시뮬레이션 동안 연산 시간의 증가를 초래하였고, 여러 시간 간격에서 목표 소요시간인 0.97ms을



〈그림 6〉 하이브리드 요소의 절점 하중 및 절점 변위⁽¹⁵⁾



〈그림 7〉 하이브리드 요소와 물리적 부분구조모형 사이의 변위 및 하중 변환행렬⁽¹⁵⁾

식 (2)는 액추에이터로부터 측정된 하중 P_e^m 과 하이브리드 요소로 전달되는 측정하중 \bar{f}_e^m 의 관계를 나타내며, 식 (3)은 수치해석에 의하여 얻어진 명령변위 \bar{d}_e^c 와 액추에이터에 전달되는 변위 p_e^c 의 관계를 나타낸다. 식 (4)는 액추에이터에서 측정되어진 변위 p_e^m 과 수치해석모형에서 하중복원력 \bar{f}_e^d 을 계산하기 위하여 사용되는 변위 \bar{d}_e^d 와의 관계를 나타낸다.

$$\bar{f}_e^m = [N_{cx}, V_{cy}, M_{cz}]^T, P_e^m = [P_1, P_2, P_3]^T$$

$$\bar{f}_e^m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_B}{2} & -\frac{L_B}{2} \end{bmatrix} P_e^m \quad (2)$$

$$p_e^c = [p_1, p_2, p_3]^T, \bar{d}_e^c = [u_{cx}, v_{cy}, \theta_{cz}]^T$$

$$p_e^c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \frac{L_B}{2} \\ 1 & 0 & -\frac{L_B}{2} \end{bmatrix} \bar{d}_e^c \quad (3)$$

$$\bar{d}_e^d = [u_{mx}, v_{my}, \theta_{mz}]^T, p_e^m = [p_{m1}, p_{m2}, p_{m3}]^T$$

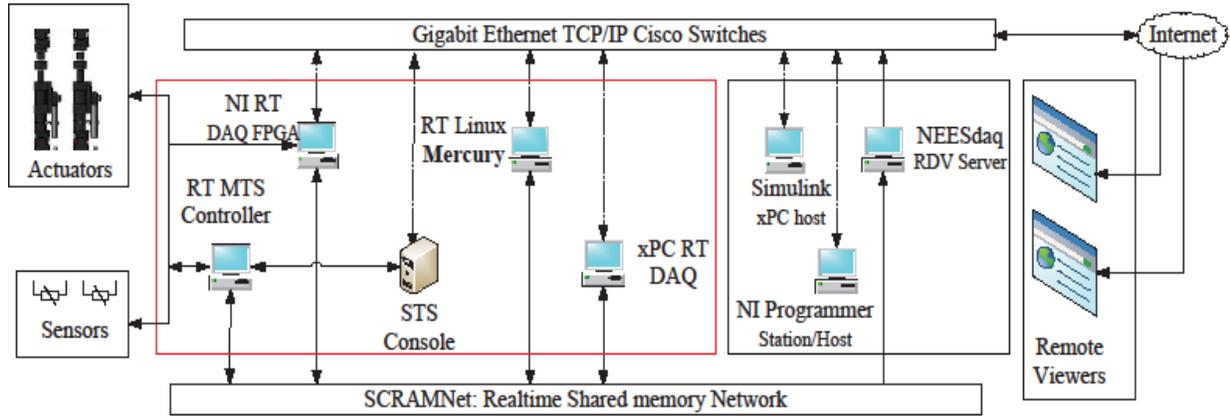
$$\bar{d}_e^d = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_B} & -\frac{1}{L_B} \end{bmatrix} p_e^m \quad (4)$$

여기서 위첨자 c 는 명령변위, m 은 측정변위 또는 하중 그리고 d 는 수정된 변위를 나타낸다.

4. 실험 절차

콜로라도 대학교 Fast Hybrid Testing Lab.의 전체 네트워크 시스템은 그림 8에 보이는 것과 같으며, 실시간 하이브리드실험을 위하여 실시간 Linux위에서 Mercury를 실행하였다. 실시간 하이브리드실험 수행 중 소프트웨어의 간섭 및 충돌을 피하기 위하여 Mercury에 모두 우선권을 주어야 한다. 그럼에도 불구하고 시스템의 네트워크 통신, 입출력 등에 의한 간섭을 받을 수 있다. 따라서 원활한 실험을 수행하기 위하여 실험을 진행하는 동안 모든 프로세스는 정지되거나 멈추도록 설정하였으며, 디스크에 기록될 모든 데이터의 버퍼를 실험 시작 전에 미리 할당하여 메모리 할당에 의한 지연을 사전에 방지하였다.

본 실험은 크게 두 부분으로 나누어 실행되었다. 첫 번째는 10개의 시편을 사용하여 캔틸레버 보-기둥 요소의 상부 3개의 자유도를 3개의 액추에이터를 통하여 제어를 할 수 있는 최적의 방법을 찾는 시스템 식별과, 저 보강 철근 콘크리트 기둥에 대한 시준 의존성 효과를 평가하기 위한 실험이 수행되었다. 두 번째, 시편 10개는 시스템 식별을 통하여 그림 2 (c)와 같은 물리적 부분구조모형을 설치하여 실시간 하이브리드실험을 수행하였다.



〈그림 8〉 CU-FHT Lab. 전체 네트워크 시스템^{(15),(20)}

4.1 초기정적하중

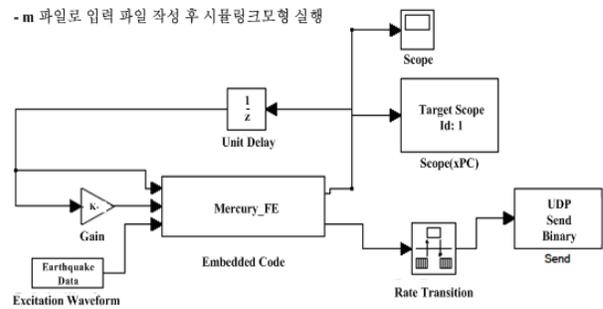
초기정적하중(진동대실험과 동일한 물리적 부분구조모형에 작용하는 상부 구조물의 자중)을 지반 가속도를 작용시키는 시작 시간인 0초에 적용하였을 경우 불안정 및 초기 진동에 의한 큰 변위가 발생하였다. 따라서 초기정적하중을 0초에서 20초까지 점진적으로 증가하여 목표로 하는 초기정적하중 값에 도달할 수 있도록 하였다. 이를 통하여 초기 단계에서 발생할 수 있는 진동과 불안정성을 제거할 수 있었다.

초기 수치해석시뮬레이션을 통하여 축 방향에 대한 반력이 그림 1의 A열부터 D열 순서로 44.5-89-89-44.5kN으로 분포될 것이라고 예측하였으나, 실시간 하이브리드실험을 위하여 초기정적하중이 목표 값에 도달하였을 때의 반력을 확인한 결과 44.5-97.9-71.2-53.4kN으로 측정되었다. 이에 대한 원인은 물리적 부분구조모형의 상부 가로보에서의 초과 힘의 발생으로 인접 기둥으로의 하중 재분배가 발생하였다고 인식되었다. 따라서 이를 보정하기 위하여 44.5~66.75 kN의 하중을 2개의 수직 액추에이터를 사용하여 사전 재하함으로써 예측했던 초기정적하중에 대한 반력의 패턴을 구현할 수 있었다.

4.2 시물링크모형

실시간 하이브리드실험을 수행하기 전 시물링크모형에 의하여 물리적 부분구조모형과 수치해석모형의 상호 작용을 평가하여야 한다. 그림 9에 보이는 시물링크모형은 Mercury와 함께 동시에 실행되며, 물리적 부분구조모형의 응답을 가상으로 구현하도록 하였다. 이는 실제 실험에서 발생될 지도 모르는 오차 또는 불안정성을 예측하기 위함이다.

실험을 위한 불안정성 요인과 실험의 결과에 영향을 미치는 요인들을 제거한 후 액추에이터를 사용하지 않고 시물링



〈그림 9〉 Mercury가 임베드된 시물링크 모형⁽²⁰⁾

크모형을 통한 시물레이션이 실행되었다. 여기서 얻어진 물리적 부분구조모형의 상부 절점 수평방향에 대한 층간변위비는 진동대실험의 그것과 비교되었다.

4.3 액추에이터의 튜닝 및 하중복원력의 보정

최소한의 Overshoot 또는 액추에이터의 lag를 방지하기 위해서는 적절하게 액추에이터가 튜닝이 되어 있어야 한다. 이를 위한 첫 번째는 변위제어모드에서 액추에이터 컨트롤러의 PID 변수들에 대한 튜닝이 선행되어야 한다. 다음으로 측정된 하중이 수치해석모형의 하중 복원력으로 사용되기 위한 보정은 식 (1)을 따랐다.

실시간 하이브리드실험을 통하여 기록되어지는 대상 구조물의 하중이외에 증가된 하중을 유발하는 요인은 대상 구조물과 수평방향 변위를 전달하기 위한 액추에이터에 연결된 보의 질량에 의한 관성력이다. 따라서 수평방향의 관성력에 대한 보정을 위하여 보의 질량을 측정하여 수평 방향의 액추에이터를 통하여 이를 부질량(Negative Mass)으로 물리적 부분구조모형에 적용함으로써 이에 대한 영향을 제거하고자 하였으며, 이에 따른 불안정성은 실험이 진행되는 동안 발생하지 않았다.

4.4 감쇠 계수

수직 방향의 액추에이터에 의한 물리적 부분구조모형의 회전 자유도와 관계되는 감쇠계수의 보정이 필요하다.

그림 7 (b)에서 물리적 부분구조모형과 상호작용하는 상부 보에 의해서 발생하는 큰 힘은 하이브리드실험 중에 바람직하지 않은 고주파 회전을 발생시켜 발진을 유발할 수 있다. 따라서 상부 보의 전체 질량과 고주파 진동을 줄이기 위하여 가능한 짧고 간략화 하였다. 이러한 회전을 억제할 수 있는 방법은 회전에 대한 자유도를 0으로 구속하는 것이다. 그러나 하이브리드실험 중에 이러한 구속을 명확하게 실현하는 것은 불가능하였다. 따라서 하이브리드 실험 중 회전 자유도를 구속하는 것 대신에 수치해석모형에 포함된 하이브리드 요소의 회전 자유도를 갖는 절점에 수치해석모형에 포함되어진 Rayleigh 감쇠와 더불어 질량을 추가함으로써 추가 감쇠를 적용하였으며, 이를 통하여 회전을 억제시켰다. 이러한 방법은 안정성을 확보하기 위한 PID 제어변수의 보정과 동일한 방법을 따랐다.

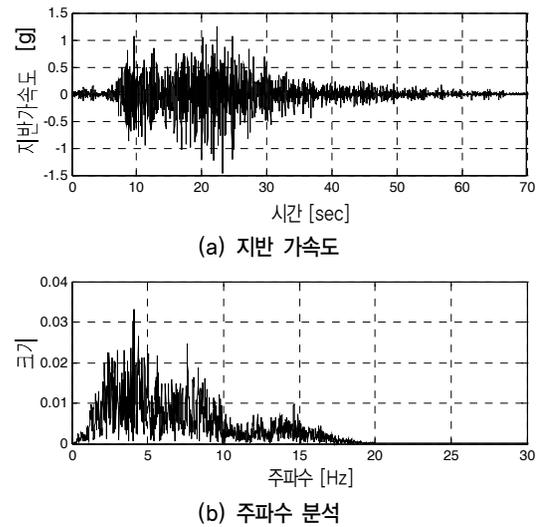
추가된 회전에 대한 감쇠는 회전에 대한 안정성을 향상시켰고, 바람직하지 않은 회전을 제거하였을 뿐만 아니라, 진동대실험과 동일한 바람직한 회전을 허락하였다. 회전에 대한 자유도에 대하여 추가된 감쇠는 바람직한 또는 바람직하지 않은 회전에 영향을 준다. 그러나 실험 장비에서 생성된 바람직하지 않은 고주파 진동이 물리적 부분구조모형에 의해서 생성되어지는 저주파의 회전보다 더 큰 영향을 끼치는 경향을 보이기 때문에 추가 감쇠는 필요할 것으로 판단되었다. 그리고 물리적 부분구조모형의 진동 모드에 의하여 생성되는 저주파 회전은 이미 수치해석모형의 모든 절점에 적용된 Rayleigh 감쇠에 의하여 영향을 받고 있기 때문에 한 절점의 회전 자유도를 위하여 추가된 감쇠의 영향은 매우 미비하다.

4.5 지반 가속도

진동대실험, 실시간 하이브리드실험 그리고 수치해석시 물레이션에 적용된 지반 가속도는 그림 10에 보이는 것처럼 Ghannoum에 의해서 진동대 위에서 직접 측정되어진 값을 사용하였고⁽³⁾, 진동대실험 결과에 근거하여 물리적 부분구조모형의 상부에서 측정되어진 수평변위에 대한 층간변위비(Story Drift Ratio)를 비교하였다.

4.6 명령변위와 측정변위의 오차 및 실험의 반복성

복잡한 실험에 대한 반복적 실험이 가능하다는 것은 최종



〈그림 10〉 실시간 하이브리드 실험에 사용된 지반 가속도

〈표 3〉 명령변위와 측정변위의 최대 및 최소값

실험명	A		B		상대 오차 (%)	
	변위 (mm)	오차 (%)	변위 (mm)	오차 (%)		
명령	최대값	21.006	-	19.025	-	9.43
	최소값	-27.229	-	-24.613	-	9.61
측정	최대값	21.692	3.26	19.406	2.00	10.54
	최소값	-27.700	1.40	-25.298	2.79	8.37

실험 결과의 신뢰성을 향상시키기 위한 필요 요소일 것이다. 비용적인 면을 고려할 때 진동대실험과는 달리 실시간 하이브리드실험은 이러한 반복성을 제공할 수 있다.

표 3은 본 연구를 통하여 실행되었던 두 개의 동일한 실험을 비교하였다. 먼저 오차는 식 (5)에 의해서 구했으며, 상대오차는 식 (6)에 의해서 구하였다.

$$\text{오차}(\%) = \left| \frac{\text{측정변위} - \text{명령변위}}{\text{명령변위}} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$\text{상대오차}(\%) = \left| \frac{B\text{변위} - A\text{변위}}{A\text{변위}} \right| \times 100 \quad (6)$$

먼저 명령변위와 측정변위 사이의 오차는 1.4~3.26% 사이였다. Nakashima와 Masaoka⁽²⁵⁾에 의하면 명령변위와 측정변위 사이의 오차는 3%이하로 하였을 때 정확한 제어로서 간주된다고 하였다.

A실험과 B실험 사이의 상대오차는 8.37~10.54%이었다. 여기서 상대오차의 범위는 두 실험을 비교하였을 때 2.17% 이내로 일관성 있는 결과를 보여주었다. 두 실험 사이의 이러한 상대오차는 콘크리트 재료의 이방성과 두 실험 사이의 제어 오차에서 발생하였다.

5. 비교 고찰

진동대실험의 결과를 근거로 하여 실시간 하이브리드실험의 결과를 비교하였다.

그림 1의 1층 B열에서의 비연성기둥의 수평 변위에 대한 최대 층간변위비(최대 수평방향변위비/시편길이)를 비교하였다(최대 지반 가속도가 적용된 22초에서 24초 시간 영역이 포함된 10초에서 30초 사이).

5.1 진동대실험을 통한 수치해석모형

Ghannoum에 의한 진동대실험의 구조적 거동에 근거한 수치해석모형이 수치해석시뮬레이션을 통하여 실행되었다.

진동대실험 전 일차적인 수치해석모형에 대한 시뮬레이션이 실행되었으며, 진동대실험 후 수치해석모형의 수정 및 보완을 통하여 이차적인 수치해석모형에 대한 시뮬레이션이 수행되었다.⁽¹⁹⁾

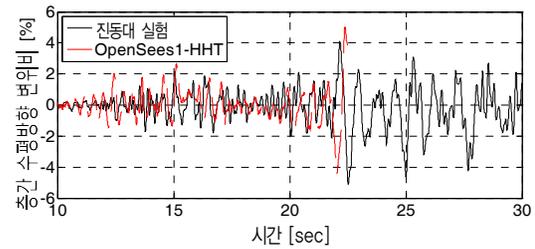
운동방정식의 해를 구하기 위해서 암시적 HHT 시간적분법을 사용하였다. Newmark β 시간적분법은 고주파 노이즈가 해 속에 지속되는 경향을 보이는 단점을 가지고 있다. 반면에 HHT 시간적분법을 이용할 경우 정확도를 감소시키지 않고 고주파성분의 수치해석에 의한 손실을 향상시킬 수 있다. 식 (7)은 $n+1$ 번째 시간 간격에서의 HHT 시간적분법의 운동방정식이다.⁽²⁶⁾

$$(1 + \alpha)P_{n+1}^{ext} - \alpha P_n^{ext} = M\ddot{u}_{n+1} + (1 + \alpha)C\dot{u}_{n+1} - \alpha C\dot{u}_n + (1 + \alpha)P_{n+1}^{int} - \alpha P_n^{int} \quad (7)$$

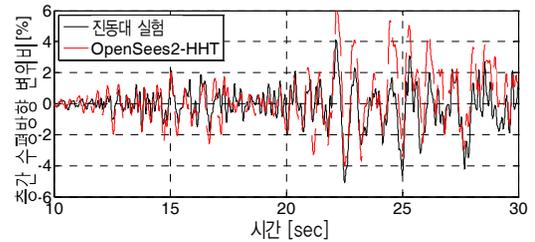
여기서 M 과 C 는 질량과 감쇠행렬이고, P^{ext} 과 P^{int} 은 동적 하중과 구조물의 하중복원력이다. \ddot{u} , \dot{u} 그리고 u 는 가속도, 속도 그리고 변위이다.

식 (7)은 $-1/3 \leq \alpha \leq 0$, $\beta = (1 - \alpha)^2/4$ 그리고 $\gamma = (1 - 2\alpha)/2$ 을 만족하면, 무조건적 안정이며 2차 정확도를 갖는다. 여기서 β 와 γ 는 Newmark β 시간적분법에서 안정성과 정확도를 결정짓는 변수이다.

$\alpha = -1/3$ 일 때 최대 감쇠를 가진다. Hilber et al.⁽²⁶⁾의 연구에 의하면 시간 간격이 모드의 진동주기의 40%일 때 약 6%의 감쇠율을 보이고, 진동주기가 증가한다면 더 작아질 것이라고 하였다. 이러한 인위적인 감쇠는 실제 시간 간격과 저주파수에서는 중요하지 않지만, 고주파수에서는 무시할 수 없다. 따라서 수치해석시뮬레이션을 위한 시간 간격은 그림 10의 지반가속도가 기록되어진 시간 간격인 0.01



(a) 진동대실험 전 수치해석 모형과의 결과 비교



(b) 진동대실험 후 수치해석 모형과의 결과 비교

〈그림 11〉 진동대실험 결과에 대한 OpenSees 수치해석 결과 비교 (1층 B열 비연성기둥에 대한 수평 방향 최대 층간변위비 비교)

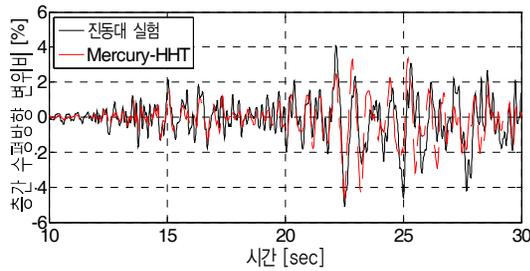
초로 하였으며, HHT 시간적분법을 위하여 α 는 -0.2(OpenSees에서의 입력 값은 0.8)를 사용하였다.

그림 11 (a)는 진동대실험 결과에 대한 OpenSees를 이용한 일차적인 수치해석모형의 결과를 비교한 것이다. 이 모형은 22초 후 수렴에 실패하여 실행이 중지되었다. 그러나 최대 지반 가속도에 의한 최대 변위가 측정되었고, 콘크리트 기둥 단부 코어 콘크리트에 대한 응력-변형률 선도를 통하여 콘크리트 기둥이 파괴에 도달하였다는 것을 확인할 수가 있었다.

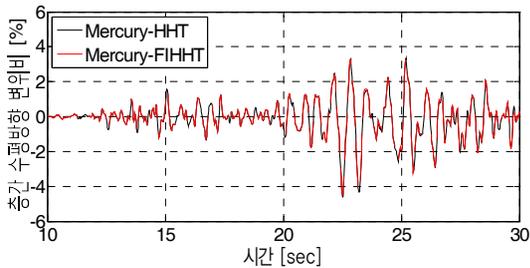
일차적인 수치해석모형에는 Zero-Length Fiber 요소(그림 3 (b) 참조)가 삽입이 되지 않았으나, 이차적인 수치해석에는 부착-슬립 효과를 고려하기 위하여 이에 대한 요소가 삽입되었다. 진동대실험 결과에 대한 비교는 그림 11 (b)에 나타내었다.

5.2 실시간 하이브리드실험을 위한 수치해석모형

실시간 하이브리드실험을 위한 최종적인 수치해석모형은 진동대실험에 의한 이차적인 수치해석모형을 기반으로 하여 기둥과 보의 연결부는 강체 거동을 할 수 있도록 선형 탄성 변위기반요소로 치환하였으며, 비선형성이 심각하게 고려되어야 할 것으로 예측되는 부재의 양 단은 비선형 변위기반 Fiber 요소가 추가되었다. 이렇게 최종적으로 수정되어진 수치해석모형은 그림 3 (a)와 같으며, 새로이 개발되어진 Mercury안에서 OpenSees에서 이용하였던 암시적 HHT 시간적분법을 사용하여 수치해석시뮬레이션이 먼저 실행되었다.



(a) 진동대실험과 Mercury HHT를 이용한 수치해석 결과 비교



(b) Mercury HHT와 FIHHT 수치해석 결과 비교

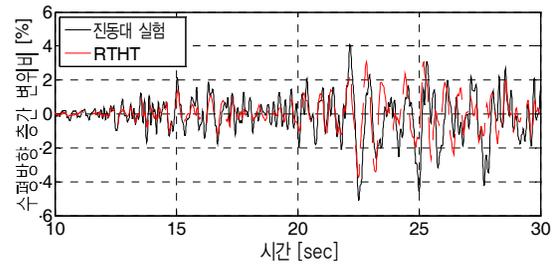
〈그림 12〉 진동대실험 결과에 대한 Mercury 수치해석 결과 비교
(1층 B열 비연성기둥에 대한 수평 방향 최대 증간변위비 비교)
* FIHHT: Fixed Iteration Implicit HHT Integration

암시적 HHT 시간적분법에 의한 수치해석 평가 후 고정 반복법을 통한 암시적 HHT 시간적분법을 사용하여 최종적인 수치해석모형에 대한 평가가 실행되었다.

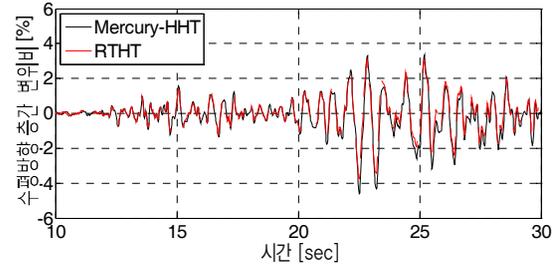
그림 12 (b)는 Mercury의 암시적 HHT 시간 적분법을 사용한 수치해석 결과에 대한 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간 분법의 수치해석 결과를 비교하여 놓았으며 이에 대한 오차는 2.31%이었다. 이 오차는 작은 것으로 간주될 수 있다고 판단되며, 실시간 하이브리드실험에 많은 장점을 가지고 있는 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 그림 12 (a)에 비교하여 놓은 진동대실험의 결과와 Mercury의 암시적 HHT 시간적분법을 사용한 수치해석의 오차는 최대 18.11%로 수치해석모형의 수정이 필요한 것으로 판단되었으나, 진동대실험을 통한 Ghannoum에 의한 수치해석모형⁽¹⁹⁾을 기반으로 하였고, 수치해석모형의 수렴성과 실험의 불안정성에 대한 시스템 식별에 대한 보정이 다시 이루어져야 하기 때문에 최종적으로 사용되어진 수치해석모형을 그대로 실시간 하이브리드실험에 사용하기로 결정하였다.

5.3 실시간 하이브리드실험

가장 중요한 진동대실험의 결과에 대한 Mercury의 암시적 HHT 시간 적분법을 사용한 수치해석과 실시간 하이브리드실험결과 비교는 그림 13부터 15 그리고 표 4에 나타내었다.



(a) 진동대실험과 Mercury HHT를 이용한 수치해석 결과 비교



(b) Mercury HHT와 RTHT 수치해석 결과 비교

〈그림 13〉 진동대실험 결과에 대한 실시간 하이브리드 실험 결과 비교
(1층 B열 비연성기둥에 대한 수평 방향 최대 증간변위비 비교)
* RTHT: Real-Time Hybrid Testing

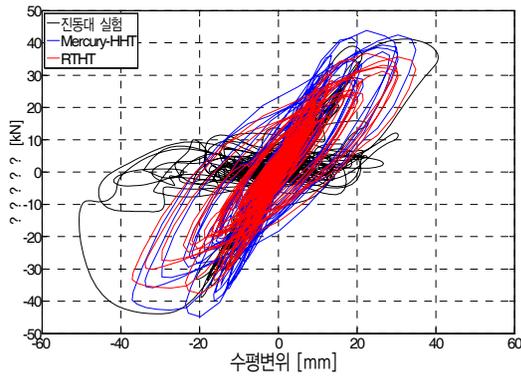
〈표 4〉 진동대실험 결과를 기준으로 한 실험오차

구분	증간 최대 수평방향변위비 [%]	오차(%)
진동대실험	최대	4.11
	최소	-5.10
Mercury-HHT	최대	3.36
	최소	-4.60
Mercury-FIHHT	최대	3.34
	최소	-4.48
RTHT	최대	3.07
	최소	-3.75

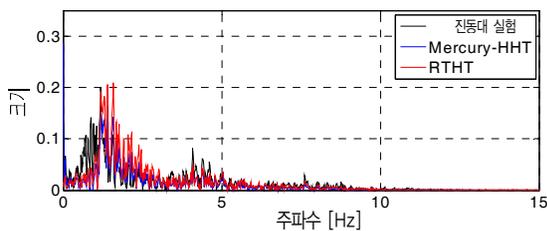
최종적인 수치해석모형인 그림 3 (a)에 대하여 고정반복법을 통한 암시적 HHT 시간적분법을 사용하여 실시간 하이브리드실험이 수행되었다. 수치해석 평가에서 목표 연산 시간인 0.97ms를 초과하는 경우가 발생하여, 3.2.3절에서 언급했던 것처럼 지반 가속도의 입력 시간 간격을 0.01초 대신 0.02초를 사용하였다.

그림 13은 시간영역에서의 수평방향증간변위비를 비교하였는데, 진동대실험 결과에 대한 실시간 하이브리드실험 결과의 오차는 최대 26.46%으로 신뢰 수준을 만족할 만한 결과를 얻지 못하였으나 수평방향변위에 대한 거동형상은 유사하게 관찰되었다.

그림 14는 1층 B열 비연성기둥의 상부 수평방향변위와 하부에서 발생하는 밀면전단력의 이력을 비교하여 놓았다. 그림 14에서 알 수 있듯이 기둥의 손상이 심각해질수록 수치해석모형에서 발생하는 오차가 계속 누적되는 현상을 관



〈그림 14〉 수평변위 vs 밀변전단력



〈그림 15〉 수평변위에 대한 주파수영역에서의 비교

찰할 수 있었으며, 이러한 현상은 실시간 하이브리드실험의 결과에까지 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

그림 15는 수평방향층간변위에 대한 주파수영역의 결과의 비교는 대체적으로 유사함을 관찰할 수 있었다.

5.4 실험 오차 분석

진동대실험과 Mercury의 암시적 HHT 시간 적분법을 사용한 수치해석의 결과와의 불일치는 중요하지만, 기존의 실시간 하이브리드실험과 비교하여 놀라운 사실은 아닐 것이다. 이러한 불일치는 다음과 같은 요인에 의하여 발생하였을 것이다.

(1) 같은 배합비를 사용하였음에도 불구하고, 진동대실험에 사용된 콘크리트 재료와 물리적 부분구조모형에 사용된 콘크리트 재료의 상이성과 다른 장소에서 제작되어짐으로서 발생하는 환경적 요인(양생 등)

(2) 콘크리트 골구조물의 비선형성과 복잡한 구조적 거동을 모사할 수 있는 최적화된 수치해석모형의 부재; 심각한 비선형성을 가지는 철근콘크리트 골구조물의 수치해석모형에는 많은 잠재적 오차 요인을 가지고 있을 것이다. 이러한 연관된 오차는 실험 전 사전 해석, 실시간 하이브리드실험에 적용될 수치해석모형의 최적화 그리고 시편의 설치에 위한 시스템 식별에 영향을 미치는 변수들의 보정 등이 진동대실험의 결과를 근거로 하여 철저하게 수정 및 보완되어야 할 것이다.

(3) 모든 실험은 연속된 손상에 의하여 파괴에 도달할 때까지 수행되었으며, 물리적으로 기둥의 파괴를 통하여 확인하였다. 손상이 심각해질수록 수치해석 과정 중에 Mercury가 수렴에 어려움을 겪는 것을 수치해석시뮬레이션을 통하여 관찰할 수 있었으며, 이러한 이유로 변위기반의 보-기둥 요소를 부재의 양단에 추가하였다. 이는 고정반복법에 의한 암시적 HHT 시간적분법이 가지는 잠재적인 오차를 증가시킬 수 있다.

(4) 시간적분법에 사용된 시간 간격은 실제 시간 간격인 0.01초 대신 실시간 하이브리드실험을 성공적으로 수행하기 위하여 0.02초를 사용하였다. 따라서 손실된 지반 가속도에 의하여 오차가 발생하였을 것이다.

5.5 실험의 개선 방향

그림 13 (b)는 Mercury의 암시적 HHT 시간 적분법에 의한 수치해석시뮬레이션의 결과와 실시간 하이브리드실험 결과를 비교하여 놓았다. 이것을 통하여 알 수 있듯이 다른 모형들 간 비교와는 달리 두 모형간의 비연성기둥의 구조적 거동이 거의 유사함을 확인할 수 있다. 이것을 통하여 다음의 실험 개선 방향을 제시할 수 있을 것이다.

- (1) 대상 구조물은 두 개의 비연성기둥을 가지고 있었음에도 불구하고, 물리적으로 한 개만이 실험되었다. 보다 적절한 실험을 위해서는 문제가 되는 부재의 수가 한 개가 되어야 할 것이다. 그렇지 않으면, 문제가 되는 부재들에 대한 물리적 실험이 동시에 실행되어야 할 것이다. 그리고 수치해석을 위하여 검증 또는 최적화된 모형이 사용되어야 보다 정확한 실험이 수행될 수 있을 것이다.
- (2) 물리적 부분구조모형의 측정하중은 명령변위와 측정변위의 차에 초기강성행렬을 곱한 값이 더하여진다. 그리고 이 값이 수치해석모형에 통합된다. 그러나 이에 대한 보정은 물리적 부분구조모형의 접선강성행렬에 의하여 보정되어야 보다 정확할 것이다.

6. 결론

철근콘크리트 골구조물의 실시간 하이브리드실험 결과는 물리적 부분구조모형으로 선택되어진 그림 1의 1층 B열의 비연성기둥의 상부 수평 변위에 대한 최대 층간변위비를 진동대실험과 수치해석시뮬레이션으로부터 얻어진 결과와 비교하였다.

진동대실험 결과에 대한 실시간 하이브리드실험 결과의

오차는 최대 26.46%으로 신뢰 수준에는 미치지 못하였으나, 수평방향변위에 대한 거동은 유사하였다. 이러한 오차는 진동대실험의 결과와 Mercury의 암시적 HHT 시간적분법을 사용한 수치해석의 결과를 비교하였을 때의 최대 오차인 18.11%에 의하여 예상될 수 있었다. 그리고 기동의 손상이 심각해질수록 수치해석모형에서 발생하는 오차가 계속 누적되는 현상을 그림 14의 수평변위와 밀면전단력에 관한 이력을 통하여 확인할 수 있었다. 따라서 실시간 하이브리드실험을 위한 수치해석모형의 최적화가 선행되어야 할 것이다.

본 실험은 가장 복잡한 실시간 하이브리드 실험 중의 하나이고, 하드웨어, 알고리즘 그리고 모형에 대한 상세한 기술적인 내용을 본 논문에 자세히 설명하였다.

진동대실험에 대한 비교 결과가 완벽하지 않았음에도 불구하고 실시간 하이브리드실험의 수치해석모형의 개선과 다음의 사항을 포함한다면, 실시간 하이브리드실험과 진동대실험 결과 비교는 권장할 만하다.

- (1) 관성력들을 제거하기 위하여 Kalman Filters⁽²⁷⁾을 통한 향상된 내부 데이터 필터링
- (2) 물리적 부분구조모형의 접선강성행렬의 유한요소해석 프로그램 내부에서의 평가
- (3) 하중기반 보-요소의 요소상태결정의 연산 시간을 줄이기 위한 소프트웨어 개선

따라서 “지진과 같은 동적하중하의 복잡한 구조물의 수치해석 시뮬레이션”이라는 목적을 위하여 실시간 하이브리드 실험은 동적 하중에 대한 실험적 검증을 점진적으로 수치해석 모형으로 대체하기 위한 저비용-고효율의 실험법으로서의 가치를 충분히 가지고 있다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Takanashi, K. et. al, “Non-linear earthquake response analysis of structures by a computer-actuator online system - Part 1: detail of the system,” *Transactions of the Architectural Institute of Japan* (229), 77-83, 1975.
2. National Research Council, “*Preventing Earthquake Disaster; The Grand Challenge in Earthquake Engineering; A Research Agenda for the Network for Earthquake Engineering Simulation(NEES)*,” The National Academics Press, Washington, D. C., 2003.
3. Kwon, O., Nakata, N., Park, K., Elnashai, A., and Spencer, B., “User manual and examples for ui-simcor v2.6 multi-site substructure pseudo-dynamic simulation coordinator”. *Technical Report*, University of Illinois, Urama-Champaign 2007.
4. Schellenberg, A., Kim, H., Mahin, S., and Fenves, G. “Environment independent implementation of a software framework for fast local and geographically distributed hybrid simulations,” *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, 2008.
5. Haussmann, G., “Evaluation of openfresco and simcor for fast hybrid single site simulation,” *Technical Report CU-NEES-07-02*, Fast Hybrid Testing Laboratory, University of Colorado, Boulder, 2007.
6. 이성경, 민경원, 박은천, “진동대를 이용한 구조물의 하이브리드 실험,” 대한건축학회논문집 구조계, 제22권, 제5호, 2006.
7. 박은천, 이성경, 이현재, 문석준, 정형조, 민경원, “대형 MR감쇠기가 설치된 건축구조물의 실시간 하이브리드 실험 및 준능동 알고리즘 적용,” 한국전산구조공학회 논문집, 제21권, 제5호, 465-474, 2008.
8. 민경민, 김용인, 이강석, “유사동적실험을 이용한 철근콘크리트 단주실험에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 73-76, 2008.
9. 명지대학교 산학협력단, “실시간 하이브리드 다자유도 구조시스템 실험시설 최종보고서,” 국토해양부, 한국건설교통기술평가원, 2009.
10. 조성민, 최인규, 정대성, 김철영, “소형선형 평면대모형의 진동대실험을 통한 하이브리드실험 기법의 검증,” 한국지진공학회논문집, 제14권, 제6호, 33-43, 2010.
11. Shing P. “Integration schemes for real-time hybrid testing” *Hybrid Simulation: Theory, Implementation and Applications*, Saouma, V., and Sivaselvan, M.(eds.), Balkema, 2008.
12. McKenna, F., and Fenves, G., “Open system for earthquake engineering simulation (opensees),” *Technical Report*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley 2004.
13. Karavasilis, T., Ricles, J., Sause, R., and Chen, C., “Use of Real-Time Hybrid Simulation to Evaluate the Performance-Based Seismic Design of Steel MRFS with Compressed Elastomer Dampers,” *Proceedings of the 2010 Structures Congress*, Orlando, FL, 2010.
14. Stauffer, E., and Haussmann, G., “Fast hybrid testing at CU NEES. Benchmark Tests,” *Technical Report CU-NEES-07-19*, Fast Hybrid Testing Laboratory, University of Colorado, Boulder, 2007.
15. Saouma, V., Kang, D.-H., and Haussmann, G., “A Computational Finite-Element-Program for Hybrid Simulation,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Published online in Wiley Online Library, DOI: 10.1002/eqe.1134, 2011.
16. Yassin, M. H. M., Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads, PhD thesis, University of California, University of California, Berkeley, 1994.
17. Ragueneau, F., Souid, A., Delaplace, A., and Desmorat, R., “Anisotropic damage for concrete within multifibre beam finite element theory,” *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2006.
18. Faniel, I., “Unrealized potential: The socio-technical challenges

- of a large scale cyberinfrastructure initiative. Technical Report,” *School of Information*, University of Michigan, 2009.
19. Ghannoum, W. M., Experimental and Analytical Dynamic Collapse Study of a Reinforced Concrete Frame with Light Transverse Reinforcement, PhD thesis, University of California, Berkeley, 2007.
 20. Kang, D.H., An Optimized Computational Environment For Real-Time Hybrid Simulation, PhD thesis, University of Colorado, Boulder, 2010.
 21. Coleman, J., and Spacone, Enrico, “Localization Issues in Force-Based Frame Elements,” *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 11, 1257-1265, 2001.
 22. Shing, P., Wei, Z., Jung, R., and Stauffer, E., “NEES Fast Hybrid Test System at the University of Colorado,” *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, 2004.
 23. Elkhoraibi, T., and Mosalam, K., “Generalized hybrid simulation framework for structural systems subjected to seismic loading,” *Technical Report 2007/101*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2007.
 24. Ghannoum, W., Saouma, V., Haussmann, G., Polkinghorne, K., Eck, M., and Kang, D.H., “Loading rate effects in reinforced concrete columns,” *Tentatively Accepted ASCE J. of Structural Engineering*, 2010.
 25. Nakashima, M., and Masaoka, N., “Real-time on-line test for mdof systems,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 28, 393-420, 1999.
 26. Hilber, H., Hughes, T., and Taylor, R., “Improved numerical dissipation for time integration algorithms in structural dynamics,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 5, 283-292, 1977.
 27. Haussmann, G., Using the unscented kalman filter in fast hybrid testing, *Technical Report CU-NEES-09-01*, Fast Hybrid Testing Laboratory, University of Colorado, Boulder, 2009.