

그리드 기반의 토목공학 원격실험 시스템

이 장 호[†] · 정 태 경^{**}

요 약

최근 공학 분야에서 실험 시설에서 진행된 실험에 대한 실험 결과를, 지리적으로 떨어진 곳에 있는 연구자들이 직접 해당 실험 시설을 방문하지 않고서도 효과적으로 공유할 필요가 늘어나고 있다. 특히 토목 공학의 경우, 연구자들이 원격지의 실험 시설에서 진행 되는 실험에 참여할 필요성이 점점 증가하고 있다. 게다가 구축 비용이 매우 높은 실험 시설의 경우 보다 많은 연구자들에 의해 원격으로 사용되는 것을 가능하게 함으로써 이용률을 높일 필요성이 제기되고 있다.

본 논문에서는 그리드 기술을 이용하여 분산된 주요 토목 공학 실험 시설들을 연결하여, 지리적으로 떨어져 있는 연구자들에게 원격 실험에 참여할 수 있게 하고, 실험 시설들에서 이루어진 실험들의 결과들이 자동적으로 원격지의 연구자들에게 공유될 수 있게 하는, KOCED(Korea Construction Engineering Development)라고 불리는 프로젝트에서 개발 중인, 토목 공학 분야의 원격 실험 환경을 제안하였다. 그리고, 이를 기반으로 하여, 지리적으로 떨어져 있는 2개의 물리적 실험 장비 사이트와 1개의 수치해석 시뮬레이션 사이트를 연동시키는 하이브리드 실험 시설에 대한 설계를 하고 그 프로토타입의 구현 및 테스트를 통하여 그리드 기반의 토목 공학 실험의 가능성을 보여주었다

키워드 : 그리드, 분산 컴퓨팅, 협업 컴퓨팅, 원격 실험

Grid-Based Civil-Engineering Remote Experiment System

Jang Ho Lee[†] · Taikyeong Jeong^{**}

ABSTRACT

Recently, in the engineering area, there is an increasing need for researchers at a distance to share the result of the experiment, without having to visit the experiment facilities. Especially in the civil engineering, researchers feel the need for participating in a experiment conducted at a distant location. In addition, it is suggested that high-cost facilities should be used by remote researchers thereby increasing the utilization rate.

This paper proposes a remote experiment environment in civil engineering that are being developed in a project called Korea Construction Engineering Development(KOCED), which connects major civil engineering experiment facilities using grid technology, allows researchers to participate in a remote experiment, and has the experiment results shared by remote researchers automatically. Then, based on the suggested environment, we designed a hybrid test facility that involves two physical experiment facility sites and one numerical simulation site that are geographically apart. Then, we implemented its prototype and ran some tests, which showed a possibility of grid-based civil engineering experiment.

Key Words : Grid, Distributed Computing, Collaborative Computing, Remote Experiment

1. 서 론

최근 지리적으로 떨어져 있는 컴퓨팅 자원과 데이터 저장소, 그리고 실험 장비 등을 네트워크를 통해서 분산 시스템으로 연결하여 사용자들이 공유할 수 있게 해주며, 분산되어 있는 사용자들 간에 의사소통과 협업을 지원해 주는 그리드 시스템이 등장하고 있다[1, 2].

그리고 이러한 그리드 시스템들이 의학, 천문학, 토목 공학 등과 같이 다양한 학문 분야에서 분산된 컴퓨팅 자원,

데이터베이스 그리고 실험 시설을 이용하여 지리적으로 떨어져 있는 연구실들 간에 공동 연구를 수행하는데 이용되는 경우가 생겨나고 있다. 국내의 대표적인 예로는 토목 공학 분야의 공동 원격 실험 연구 환경을 제공하는 KOCED(Korea Construction Engineering Development) 프로젝트가 2004년 하반기에 시작되어 현재 진행 중에 있다[3]. 구축 비용이 매우 높은 대형 토목 실험 시설의 경우, 연구자들이 자신의 연구 기관에 구축하기는 경제적인 면에서 쉽지 않으며, 실험 시설이 있는 지리적으로 떨어진 다른 연구 기관에 직접 방문해서 실험하는 것도 불편하다. 또한, 연구자 자신이 관심 있는 실험 데이터가 이미 다른 연구자에 의해 실험되었는지 검색할 수 있는 통합된 실험 데이터 베이스도 존

[†] 정 회 원 : 홍익대학교 컴퓨터공학과 조교수

^{**} 정 회 원 : 명지대학교 통신공학과 조교수

논문접수 : 2006년 11월 13일, 심사완료 : 2007년 3월 12일

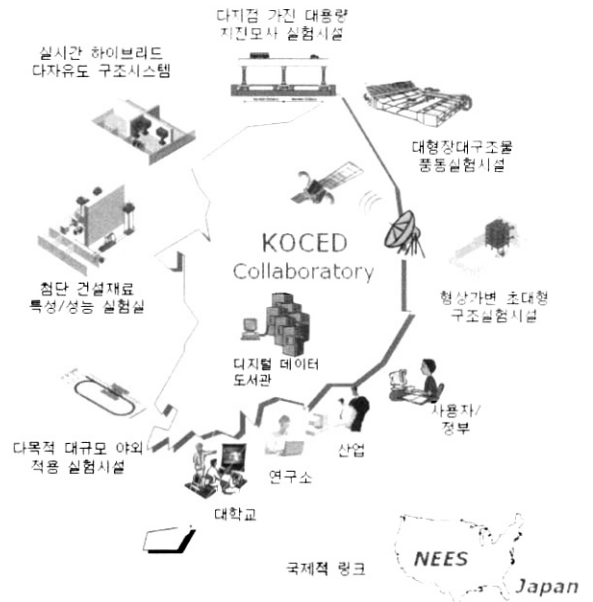
제하지 않아서 실험 결과가 효율적으로 공유되지 못하고 있다.

따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 KOCED는 (그림 1)에서 보는 바와 같이 국내에 6개의 대형 토목 실험 시설을 구축함과 동시에 이들을 그리드 시스템으로 연결하여 공동 연구 환경을 제공하는데 그 목적이 있다. 대학교, 연구소, 산업체, 정부 기관 등에 있는 토목 연구자들은 KOCED에서 제공하는 그리드 기반의 공동 연구 환경에서 실험자로서 원격 실험을 수행하거나 관찰자로서 원격 실험을 실시간 모니터링할 수 있다. 또한, 실험의 결과는 데이터 저장소에 자동적으로 저장되어, 실험 후에도 연구자들이 원하는 실험 결과를 검색하여 볼 수 있다. 지리적으로 떨어져 있는 연구자들은 이러한 그리드 기반의 공동 연구 환경에서 실시간으로 진행되는 실험을 같이 보면서, 혹은 이미 수행이 끝난 실험 결과를 보면서 토론을 하며 공동 연구를 진행할 수 있다.

본 논문의 내용은 KOCED에서 구축 중인 6개의 대형 토목 실험 시설 중에 하나인 그리드 기반의 실시간 하이브리드 다자유도 구조 실험 시스템의 설계와 그 프로토타입의 개발 및 실험에 관한 것이다.

우선 본 연구에서 대상으로 하고 있는 그리드 기반의 토목 실험 시설에 관한 사용자 요구 분석의 진행이 단순하지 않았다. 왜냐하면 기존의 토목공학 분야의 연구자들이 아직까지 그리드 기반의 실험 시설에 관한 경험이 적었기 때문에 사용자 요구 사항을 정확히 제시해 주는 것이 쉽지 않았기 때문이다. 데이터 모델링 작업에서도 토목공학 분야의 연구자들이 향후 구축될 그리드 기반 실험 시스템의 데이터 모델의 기본 요소들을 제시하는 것이 쉽지 않았다. 따라서 구축될 최종 시스템의 프로토타입을 간단한 데이터 모델링을 거쳐 개발하여 토목 연구자들에게 수개월간 사용을 하게 하였다. 그리고 이러한 프로토타입의 사용 경험을 갖게 된 연구자들과의 사용자 회의를 여러 번 개최하고 토목공학 분야의 여러 연구자들로부터 여러 번에 걸친 자문회의를 통하여 최종적인 시스템의 데이터 모델링을 하였다.

본 연구에서 목표로 하고 있는 그리드 기반의 실시간 하이브리드 다자유도 구조 실험 시스템은 실제 구조물이 있는 사이트와 수치 시뮬레이션을 수행하는 컴퓨터가 있는 사이트를 네트워크를 통해서 서로 연동하여 실험을 진행하는 형태이다. 이러한 경우, 코디네이터라는 모듈이 존재하여 전체적인 실험 명령을 제어 서버를 통하여 각 사이트에 내리는 경우가 발생하게 되므로 실제 구조물이 있는 사이트는 원격 제어 명령을 처리할 수 있는 구조로 설계되었다. 실제 구조물이 있는 사이트에는 실제 구조물에게 제어 명령을 내리고 변위 등을 측정하기 위해서 실제 구조물에 PC가 연결되어 있다. 이 PC에는 카메라도 연결되어 있으므로, 수집된 수치 데이터는 동영상과 함께 이 PC로부터 스트리밍 서버로 전송되게 된다. 스트리밍 서버는 실험이 수행되는 동안에 실시간으로 클라이언트에게 수치데이터와 동영상을 동기화하여 보내게 되며, 클라이언트는 받은 수치데이터를 그래프 등의 형태로 시각화하여 동영상과 함께 사용자에게 보여주



(그림 1) KOCED의 개념도

게 된다. 실험 내용인 수치데이터와 동영상은 클라이언트에게 스트리밍됨과 동시에 자동적으로 데이터 저장소에 저장(recording)되며 나중에 그리드 포털을 통하여 사용자가 요청할 경우 스트리밍 서버를 통해서 그 사용자에게 재연(replay)될 수 있다.

수치데이터, 동영상, 분석 자료 등과 같은 실험 결과는 데이터 모델에 기반하여 데이터 저장소에 자동적으로 저장되므로, 나중에 연구자가 그리드 포털 등을 통하여 검색을 하여 원하는 실험 결과를 볼 수 있으므로 지리적으로 분산되어 있는 연구자들 간에 실험 데이터를 상당히 효율적으로 공유할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장은 관련연구를 정리하며, 3장은 KOCED에서 제공되는 기능에 대하여 소개한다. 4장은 원격 실험 환경의 설계 및 프로토타입의 설계 및 구현을 보여준다. 마지막으로 결론에서 본 논문의 내용을 정리하며, 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

2. 관련연구

그리드를 기반으로 하는 협업 연구 체계는 2000년 이후에 미국과 유럽 등지에서 개별적으로 시작되었다. 미국의 대표적인 그리드 프로젝트에는 NEES(Network for Earthquake Engineering Simulation)[4], BIRN(Biomedical Informatics Research Network)[5], NVO(National Virtual Observatory)[6] 등이 있고, 유럽의 대표적 그리드 프로젝트는 EUROGRID[7]와 G-Civil[8] 등이 있다. 이 중에서 미국의 NEES와 영국의 G-Civil은 건설연구실험에 그리드를 적용한 프로젝트라는 점에서 본 논문에서 제시한 KOCED와 유사하다.

NEES는 미국에서 NSF(National Science Foundation)가 지원하여 1999년에 국가적인 지진 공학 관련 실험장비들을 연결한, 그리드 기반의 공유연구시설(collaboratory)이며, 하나의 컨소시엄(consortium)에 의해서 운영되고 있다. NEES에서는 진동대(shake table)와 반력벽(reaction wall) 등과 같은 주요 대규모 지진 공학 테스트 설비를 구축하고 대규모의 커뮤니티를 형성하여 이 커뮤니티로 하여금 이러한 설비를 이용하여 원격 실험의 수행 및 원격 모니터링, 컴퓨팅 자원을 이용하여 수치 시뮬레이션의 수행, 실험 데이터 저장소의 공유, 그리고 협업 도구 [9]의 사용 등을 통하여 공동 연구를 수행하는 것을 가능하게 하고 있다[10]. 이러한 기능들은 NEESgrid라고 불리는 그리드 기반의 공유연구시설을 통해 가능하며, NEESgrid는 표준 그리드 기술을 이용하여 구축되었다.

G-Civil은 공동연구환경과 실험 장비에 대한 원격 관찰을 그리드 기술을 통해 구축한 영국의 프로젝트이다. 현재 진행되고 있는 토목 공학 분야의 실험 사이트에 대하여 인터넷 포털을 통해 실시간으로 데이터를 관측하고 그 결과에 대하여 세계적으로 멀리 떨어져있는 여러 팀들이 공유하고 협업을 할 수 있게 해준다.

건설 분야 외에 다른 분야에도 그리드 프로젝트들이 전세계적으로 진행되고 있으며, 그 예로는 의학 분야의 BIRN, 천문학 분야의 NVO 등이 있다.

BIRN은 2001년 미국의 NIH(National Institutes of Health)에 의해 시작된 프로젝트로써 분산되어있는 생물학적 지식들의 공유와 수집을 통해 질병에 대한 새로운 이해와 치료법을 발견하는 것을 보다 강화하기 위한 공유 가능한 생물학 IT 인프라구조이다. BIRN은 생물학 연구와 임상학 정보 관리에 대한 협업 환경의 모델이며 주요 구성 요소는 전체 조직 관리, 네트워크 관리, 3가지의 신경이미지 테스트베드에 대한 소프트웨어개발로 나눌 수 있다. BIRN은 보안, 정보 서비스, 자원 관리, 데이터 관리 부분에서 그리드 서비스 기술을 사용함으로써 연구 지식과 치료법의 공유를 보다 효율적으로 제공할 수 있게 되었다.

NVO(National Virtual Observatory)는 2001년 미국의 NSF(National Science Foundation)에 의해 시작된 프로젝트이다. NVO는 천문학 부분에 있어서 대용량의 데이터와 많은 양의 연산 등을 보다 쉽게 관리하고 수행할 수 있도록 하기 위하여 시작되었다. 이러한 대용량의 데이터 관리와 자원관리, 연산 관리 등을 위하여 그리드 시스템을 도입하여 성공적으로 수행되고 있다.

앞서 설명한 프로젝트들이 여러 지역에 분산된 실험장비나 실험결과 데이터를 공유하는데 그리드 기술을 사용한 것임에 반해, EUROGRID에서는 생체 고분자 시뮬레이션, 기상 예측, CAE(Computer Aided Engineering) 시뮬레이션, 구조 분석, 실시간 데이터 처리 등의 분산 시뮬레이션 코드를 검증하기 위해 유럽의 여러 나라의 고성능 컴퓨팅 센터를 연계하는 유럽 그리드 네트워크를 구축하고 있다. 이를 위해 EUROGRID에서는 그리드 구축에 필요한 기반 소프트

웨어를 제공하고, 주요 그리드 소프트웨어 요소를 표준화하며 그리드 네트워크의 안정적이고 안전한 접속을 제공하는 역할을 한다.

그리드 시스템이 발전하면서 그리드 기술을 통해 시스템을 구성할 때 그리드 서비스들에 대한 국제적인 표준이 필요하게 되었고 그 결과 제안된 것이 OGSA(Open Grid Services Architecture)[11, 12]이다. OGSA는 개방형 기술 표준으로서 인프라 자원의 공유와 관리를 위한 그리드 미들웨어 표준과 애플리케이션의 공유를 위한 웹 서비스의 표준을 결합한 형태이다. OGSA는 그리드 컴퓨팅의 발전을 위하여 제안된 하나의 표준이며 그리드 환경에 대한 전체 구조와 그리드 서비스들에 대하여 정의 한다. 또한 이러한 서비스들이 이미 업계에서 널리 수용되고 있는 웹서비스 형태와 결합된 형태로서 제공된다. 따라서 기존의 분산 컴퓨팅을 위한 표준들과는 달리 특정 분산 시스템에 종속적이지 않고 특정 운영체제나 시스템 환경에 독립적이다. 또한 서비스에 접근하는 인터페이스로 웹 서비스를 사용함으로써 기존의 분산 컴퓨팅 환경보다 자원이나 서비스로의 접근이 용이하다. 이를 통하여 기존의 분산 컴퓨팅을 위한 표준들과는 차별화 되는 새로운 분산 컴퓨팅 패러다임을 제공한다.

현재 그리드 시스템을 구축하기 위해서는 OGSA 표준 규약을 따르는 경우가 증가하고 있으며 이를 보다 손쉽게 하기 위하여 OGSA에 기반한 툴킷(Toolkit) 들이 등장하게 되었다. 그 중에서 가장 널리 알려지고 표준으로 자리 잡아가는 툴킷이 Globus Toolkit(GT)[13-15]이다. Globus Toolkit은 OGSA가 제공하는 그리드 서비스에 대하여 구성요소별로 독립적인 각각의 서비스를 제공하며 이를 통하여 사용자가 원하는 그리드 서비스에 대한 부분을 손쉽게 재구성하여 하나의 그리드 시스템을 구축 할 수 있다.

본 논문에서 구현한 하이브리드 실험의 프로토타입에서는 OGSA에 기반한 Globus Toolkit 3을 이용하였고, 현재 Globus Toolkit 4를 이용한 프로토타입의 구현 중에 있다.

3. KOCED의 기능

KOCED의 기능들은 다음과 같이 협업 환경, 원격 실험, 자원 관리, 데이터 관리의 4가지로 나눌 수 있다.

3.1 협업 환경

협업은 일반적으로 동기적 협업과 비동기적 협업으로 나눌 수 있다. 동기적 협업은 사용자들이 같은 시간대에 협업 환경에 로그인해서 일을 같이 진행하는 것이고, 비동기적 협업은 서로 다른 시간대에 협업 환경에 들어와서 협업을 진행하는 것이다.

연구자들 간에 동기적 협업 환경으로서는 기본적으로 텍스트 기반의 채팅 애플리케이션이 필요하며, 공유 화이트보드도 글로 표현하지 못하는 그림들을 공유하게 함으로써 단순한 텍스트 기반의 의사소통을 보강해 준다. 이외에 비디오와 오디오를 이용한 컨퍼런싱 기능은 채팅 도구와 공유

화이트보드보다 더 높은 인지성(awareness)을 제공한다고 할 수 있다. 그러나 오디오 및 비디오는 높은 네트워크 대역폭을 요구하기 때문에 많은 사용자들이 동시에 협업하는데 사용하는 경우, 필요한 성능을 보이지 못하는 문제가 있으므로 확장성(scalability)이 낮다고 할 수 있다.

연구자들 간에 비동기적 협업 환경을 제공하기 위해서는 연구자들이 자신의 연구 내용 등을 파일의 형태로 협업 환경에 업로드하여 다른 연구자들이 언제든지 협업 환경 상에서 공유할 수 있도록 할 수 있어야 한다. 이 외에도 게시판 등과 같은 도구도 비동기적 협업에 이용될 수 있다. 그리드 시스템 상에서 수행된 실험의 결과(수치데이터, 동영상 등)는 데이터 저장소에 저장되었다가 나중에 협업 환경에 들어온 연구자에 의해서 재연될 수 있게 하는 기능도 비동기적인 협업 환경에 포함된다.

협업 환경은 그리드 포털의 형태로 제공될 수 있으며, 이 그리드 포털을 통해 원격 실험, 자원 관리, 데이터 관리 등과 같은 나머지 KOCED의 기능들도 협업 기능과 아울러 역할 기반의 접근제어(role-based access control)에 기반하여 사용할 수 있도록 것이 바람직하다.

3.2 원격 실험

원격 실험은 일반적으로는 원격지에 있는 연구자가 관찰자로서 현재 진행되고 있는 실험을 실시간으로 모니터링하는 경우가 대표적이다. 이를 위해서는 실험 장비를 DAQ(Data Acquisition System)를 통해 PC로 측정된 수치 데이터를 전달하고 이 데이터를 다시 스트리밍 서버로 보내는 기능이 필요하다. 일반적으로 실험이 진행 상황은 카메라를 이용하여 동영상으로도 촬영이 되므로 동영상 데이터도 스트리밍 서버에 전달이 되어야 한다. 스트리밍 서버는 수치 데이터와 동영상 데이터를 동기화하여 클라이언트에게 전달하는 역할을 수행한다.

실시간 원격 모니터링은 실험이 진행되는 시간에 연구자가 참여하여 실험을 관찰하게 되지만, 연구자가 기존에 수행되었던 실험들을 검색하여 다시 보는 경우에 대비하여 스트리밍 서버로 보내어진 실험 내용인 수치 데이터와 동영상 데이터는 원격 모니터링 클라이언트 이외에도 데이터 저장소의 저장 서버로도 보내어질 필요가 있다. 저장된 데이터는 나중에 연구자에 의해 검색되어 재연될 수 있다. 연구자 입장에서는 실시간 원격 모니터링이건 실험 후 검색해서 재연하여 보는 경우이건 간에 동일한 클라이언트를 이용하여 스트리밍 서버를 통해서 전달되는 실험 내용을 보게 된다.

연구자는 그리드 포털에 로그인하여 협업 환경에 들어가서 뷰어 클라이언트를 수행시켜서 실험 데이터를 보게 된다. 뷰어 클라이언트는 스트리밍 서버로부터 받은 수치 데이터를 그래프 등으로 시각화하여 동영상 데이터와 함께 동기화하여 사용자에게 보여주게 된다. 과거의 실험 내용을 보는 경우, 사용자가 시간 프레임 상에서 시점을 자유롭게 조정할 수 있게 하여 재연되는 현 시점의 5분 전 또는 5분 후로 가서 그 당시의 수치 데이터와 동영상 데이터를 볼 수

있는 기능도 제공되어야 한다.

그리고, 실험이 실시간으로 진행되는 동안 원격지에서 참여하고 있는 연구자들 간 또는 연구자들과 실험센터에 있는 현장 실험자간의 의사소통이 가능해야 하며, 이는 협업 환경의 채트 애플리케이션, 공유 화이트 보드, 오디오 및 비디오 컨퍼런싱 등과 같은 도구 등을 이용하여 가능하게 할 수 있다.

그 외에는 장비의 특성 상 원격 조작으로 인한 문제의 발생 소지가 없을 경우에는 원격지에 있는 연구자가 실험자로서 원격 실험을 주도하는 제한적인 원격 제어를 가능하게 할 수 있다. 그러나 이는 극히 제한적인 제어에만 가능하며, 안전상 등의 문제가 발생할 소지가 많기 때문에 아직까지 원격 제어는 프로토타입 시스템의 경우에 적용되는 사례가 일반적이다. 단, 하이브리드 실험의 경우는 실험의 성격상 코디네이터가 실제 구조물이 있는 사이트에게 제어 명령을 보내어 구조물에게 부하를 가하는 등의 원격 제어가 필수적으로 포함된다.

3.3 자원 관리

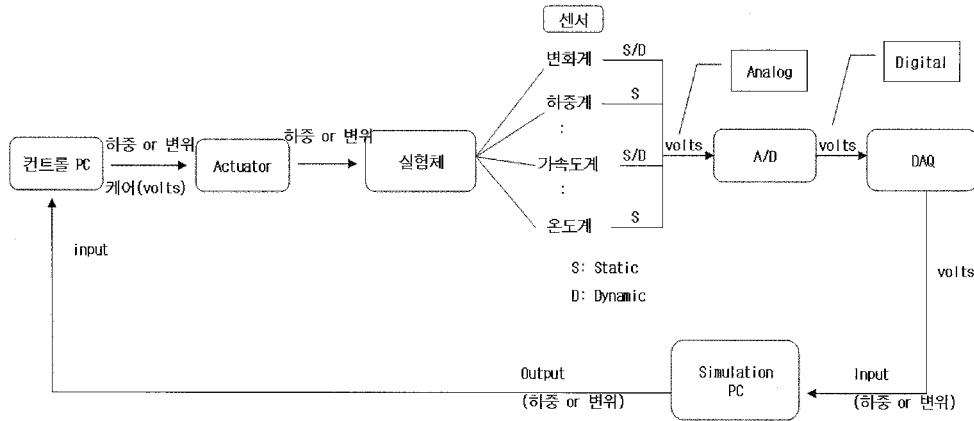
자원에는 컴퓨팅 자원, 실험 데이터 저장소, 실험 장비 등이 있으며, 이러한 자원을 기술하는 메커니즘이 제공되어야 하며, 이를 기반으로 사용자가 원하는 자원을 찾을 수 있는 기능(resource discovery)이 제공되어야 한다. 자원들은 현재 사용 가능한지의 여부 등의 상태를 모니터링 할 수 있는 기능이 제공되어야 한다. 또한, 수치 시뮬레이션과 같은 작업을 그리드 시스템에 연결되어 있는 적절한 컴퓨팅 자원에 할당(resource allocation)할 수 있어야 한다. 그리고, 자원에 사용자가 접근할 경우에 사용자 인증이 이루어져야 하며, 역할 기반의 접근 제어를 통하여 사용자가 해당 자원에 대한 어떠한 접근 권한을 갖고 있는지를 체크하는 기능이 필요하다.

3.4 데이터 관리

연구자들이 실험 데이터를 검색할 수 있는 데이터 관리 시스템이 기본적으로 제공되어야 한다. 관리하는 데이터에는 메타데이터 그리고 수치 데이터, 동영상 데이터, 분석 자료 등의 데이터가 있다. 그리고 실험의 검색에 이용될 수 있는 메타데이터를 생성할 수 있는 기능도 제공되어야 한다. 이러한 데이터 관리 시스템의 구축을 위해 가장 먼저 수행되어야 할 부분이 데이터 모델링이다. 데이터 모델링에서는 실험 데이터 중에서 어느 부분을 검색 가능한 부분에 포함 시킬 것인가가 앞으로의 데이터 관리 시스템의 효율성에 가장 결정적인 영향을 끼치므로 실제로 실험을 진행할 연구자들과 이에 대한 충분한 토의가 필요하다.

4. 원격 실험 환경의 설계 및 프로토타입의 구현 및 실험

본 논문에서는 실제적으로 하이브리드 실험 시설의 설계와 하이브리드 실험시설의 프로토타입의 설계와 구현을 통



(그림 2) 하이브리드 실험 모델

해 그리드 기반의 건설연구실험의 가능성을 테스트하였다.

4.1 하이브리드 실험 모델

하이브리드 실험은 전체 실험 대상이 되는 구조물의 일부를 실제로 제작하여 물리적 구조 실험을 하는 부분 그리고 나머지 구조물에 대해 수치 해석 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 부분의 두 가지 부분을 합성한 의사동적실험(Pseudodynamic test)을 기본 개념으로 하고 있다[16]. 따라서 하이브리드 실험은 물리적 실험 노드(Experimental Node)와 수치 시뮬레이션 노드(Numerical Simulation Node)로 구성된다. 일반적으로 물리적 실험 노드와 수치 시뮬레이션 노드는 지리적으로 떨어져 위치해 있게 된다. 물리적 실험 노드는 구조물의 일부를 실제로 제작한 실험체와 실험체에게 압력을 가하는 유압기(Actuator) 및 압력이 가해졌을 때의 변화를 계속할 수 있는 변화계, 하중계, 가속도계, 온도계 등의 여러 센서들로 구성되는 데이터 획득 시스템으로 이루어져 있다. 수치 시뮬레이션 노드는 물리적 실험 노드의 데이터 획득 시스템에서 나오는 값들을 수치 시뮬레이션 노드의 입력 값으로 제공받아 가상의 나머지 구조물과의 상호 작용을 계산하는 시뮬레이션 과정을 거쳐서 물리적 실험 노드의 유압기에게 압력 값을 전달하게 된다. 이렇게 물리적 실험 노드에서의 출력을 수치 시뮬레이션 노드에게 보내어 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 물리적 실험 노드로 보내는 과정을 반복함으로써 하이브리드 실험은 수행되게 된다. (그림 2)는 하이브리드 실험 모델을 보여준다.

4.2 하이브리드 실험 모델의 프로토타입의 설계와 구현

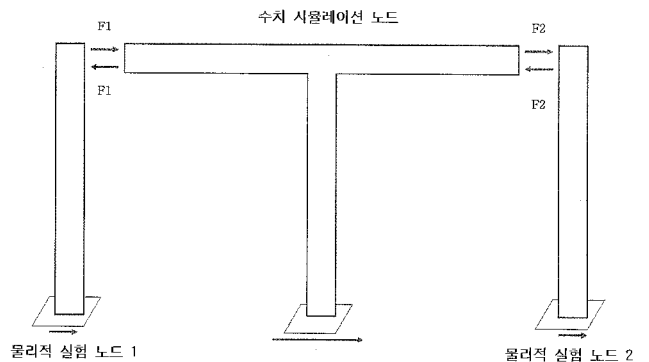
(그림 3)은 지진파의 영향을 받는 간단한 하이브리드 실험 모델의 프로토타입을 보여준다. 기본적인 아이디어는 미국 NEESgrid의 Mini-MOST[17] 실험이고, 대상 모델은 철골 구조의 단층 건물이다. Mini-MOST 실험은 지진파에 대한 건물의 반응을 조사하기 위한 MOST(Multi-site Online Simulation Test)의 규모를 축소한 형태의 실험이다. 이 모델의 기본구조는 세 개의 하부 노드로 구성되어 있으며 각 노드는 물리적 실험 노드이거나 수치 시뮬레이션 노드이다.

이 하부 노드들은 서로 지리적으로 떨어져 있는 사이트(Site)에서 동시에 물리적인 실험을 수행하거나 수치 시뮬레이션을 수행한다. Mini-MOST 실험에서는 세 개의 하부 노드 중 1개는 물리적 실험 노드로 제작되었고, 2개의 매트랩(Matlab) 수치 시뮬레이션 노드로 제작되었다.

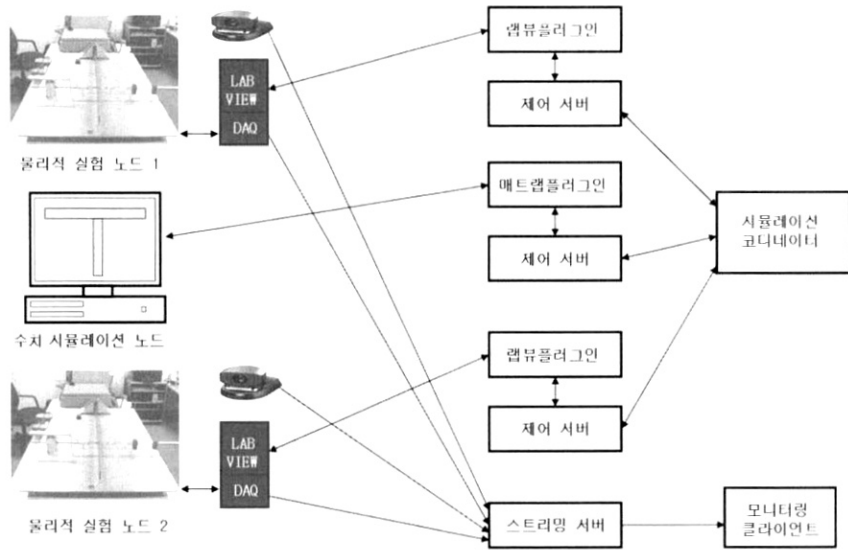
본 논문의 하이브리드 실험 모델의 프로토타입에서는 이를 확장하여 물리적 실험 노드 2개와 수치 시뮬레이션 노드 1개로 구성하였다. 이 실험을 위해서는 1개의 물리적 실험 노드를 추가 제작하고 기존의 시뮬레이션 코드를 수정하였다.

기존의 Mini-MOST 실험에서 물리적 실험 노드1(그림 3 참조)은 매트랩 코드 형태인 수치 시뮬레이션 노드였다. 이 노드는 하중(Force)과 관성(Moment)을 입력으로 받아 변위(Displacement)와 회전(Rotation)을 발생시킨다. 하지만 본 논문의 프로토타입 실험에서는 이 노드를 물리적 실험 노드로 제작하였고, 관성 값을 제거하여 물리적 실험 노드 1,2가 동일한 입출력을 갖도록 변형하였다. 변형된 출력에 맞게 매트랩 코드 형태인 'T'자형 수치 시뮬레이션 노드를 수정하여야 했다.

(그림 4)에서처럼, 소프트웨어 컴포넌트들은 세 하부 노드를 함께 연결하여 하이브리드 실험을 가능하게 해준다. 실험은 크게 제어 명령을 전달하는 부분, 실험을 수행하는 구조부분, 그리고 실험결과를 모니터링 하는 부분으로 나누어진다.



(그림 3) 하이브리드 실험 모델의 프로토타입



(그림 4) 하이브리드 실험 모델의 프로토타입의 소프트웨어 구조

제어 명령을 전달하는 부분을 먼저 살펴보면 시뮬레이션 코디네이터(Simulation Coordinator)와 각 하부노드를 담당하는 제어 서버, 그리고 하부 노드와 제어서버와의 인터페이스(Interface) 역할을 하는

플러그인(Plugin)으로 구성되어 있다. 시뮬레이션 코디네이터는 전체 실험 과정을 관리하며 각 하부 노드에 연결되어 있는 제어 서버로 제어 명령을 전달하는 역할을 한다. 처음 실험이 실행될 때 시뮬레이션 코디네이터는 수치 시뮬레이션 노드에게 실험이 시작됨을 알리고 수치 시뮬레이션 노드로부터 나머지 두 개의 물리적 실험 노드로 전달해야 할 명령을 전달받는다. 시뮬레이션 코디네이터는 그 명령을 각 물리적 실험 노드를 담당하는 제어 서버로 다시 전달하게 되고 실제 그 명령에 대하여 물리적 실험 노드가 움직인 이후 그 측정값을 전달받아 다음 명령 결정을 위해 다시 수치 시뮬레이션 노드에게 측정된 결과를 전달하게 된다. 시뮬레이션 코디네이터로부터 제어 명령을 전달 받은 제어 서버들은 각 하부 구조에서 사용하는 제어 프로그램의 플러그인에 그 명령을 전달하고 그 명령에 대한 결과를 다시 시뮬레이션 코디네이터로 전달하게 된다. 각 제어 프로그램 플러그인은 제어 서버로부터 전달받은 명령을 각 하부구조의 제어 프로그램으로 전달하고 명령의 결과를 다시 제어 서버로 전달하게 된다. 본 논문의 실험에서는 시뮬레이션 코디네이터는 맷랩을 사용하였고 제어 서버로는 NTCP (NEESgrid Tele-operations Control Protocol)[18]를 사용하였으며 제어 프로그램 플러그인으로는 랩뷰 플러그인(Labview Plugin)과 맷랩 플러그인(Matlab Plugin)을 사용하였다.

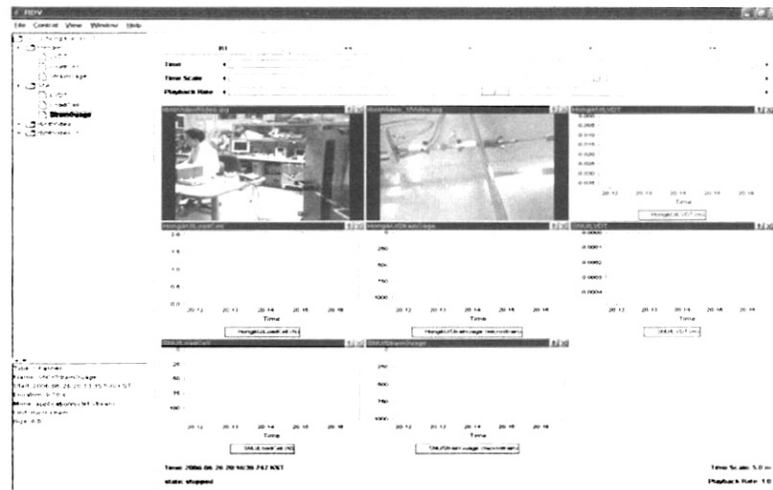
다음으로 실험을 수행하는 구조부분을 살펴보면, 제어 프로그램과 DAQ 프로그램, 수치 시뮬레이션 노드로 구성되어 있다. 제어 프로그램은 제어 프로그램 플러그인으로부터 명령을 전달 받게 되고 해당 노드가 물리적 실험 노드일 경우 실제 구조물을 움직이게 되고 해당 노드가 수치 시뮬레이션

노드일 경우 명령을 수치 시뮬레이션 노드에게 전달하게 된다. 또한 명령이 수행된 결과를 다시 제어 프로그램 플러그인으로 전달하는 역할도 한다. DAQ 프로그램은 물리적 실험 노드가 움직일 경우 센서값들을 측정하여 각 제어 프로그램과 스트리밍 서버로 전송한다. 수치 시뮬레이션 노드는 실험이 시작되면 물리적 실험 노드들에게 전달되어야 할 명령을 수치 해석을 통해 계산하고 그 결과를 다시 받음으로써 다음 명령을 다시 계산하게 된다. 본 논문에서는 물리적 실험 노드들의 제어 프로그램은 랩뷰(Labview)를 사용하였고 수치 시뮬레이션 노드의 제어 프로그램으로는 맷랩을 사용하였으며 수치 시뮬레이션 노드는 맷랩 코드로 작성하였다.

마지막으로 실험 결과를 모니터링 하는 부분을 살펴보면 크게 스트리밍 서버와 모니터링 클라이언트로 구성된다. RBNB(Ring Buffered Network Bus)[19]를 기반으로 하는 스트리밍 서버는 각 하부 구조에서 전달받은 수치 데이터와 비디오 데이터를 RDV(Realtime Data Viewer)[20]기반의 모니터링 클라이언트에 전달 시켜주는 역할을 하며 모니터링 클라이언트는 이 결과들을 종합하여 관측하는 역할을 한다.

(그림 5)는 모니터링 클라이언트를 통해 실험 과정을 관측하는 모습이다. 지진파와 수치 시뮬레이션 노드 사이에서 작용하는 힘의 구조적인 반응이 측정되어 그래프에 표현된다. 실험이 수행되는 동안에 물리적 실험 노드들의 흔들림은 시각적으로 비디오 스트림의 형식으로 표현되며 그 흔들림에 따른 수치 데이터의 변화는 2차원 그래프의 형식으로 표현된다. 그림 5의 8개의 작은 창은 각 실험지의 비디오 영상과 각 실험체로부터 나오는 센서 데이터(변위값, 하중값, 저항값)를 그래프로 보여주고 있다.

수행된 하이브리드 실험에서는 다음과 같은 파라미터를 사용하였다. 최대지반가속도(PGA)를 0.35g로 정의하였고, 실험하려는 지진 지속 시간은 15초, 그리고 한 스텝의 시간은 0.01초로 정의해서 총 1500 스텝으로 실험을 진행하였다.



(그림 5) 하이브리드 실험의 원격 관찰 화면

실제로 1500스텝을 수행하는데 약 2시간이 소요되었다.

본 논문의 하이브리드 프로토타입 실험은 물리적 실험 노드와 수치 시뮬레이션 노드를 사용하는 하이브리드 실험에 있어서 각각의 하부노드들이 지역적으로 국한되지 않고 서로 다른 지역에 떨어져 있더라도 실험자가 원격지에서 하이브리드 실험을 진행하면서 실험 중에 만들어지는 숫자 데이터와 실험체의 동영상상을 실시간으로 원격 모니터링 할 수 있는 가능성을 보여주었다고 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 KOCED(Korea Construction Engineering Development)라고 불리는 원격 실험 환경의 제안을 통해 그리드 기술을 이용하여 분산된 주요 토목 공학 실험 시설들을 연결하여, 지리적으로 떨어져 있는 연구자들에게 원격 실험을 제공하고, 실험 시설들에서 이루어진 실험들의 결과들이 자동적으로 원격지의 연구자들에게 공유될 수 있게 시스템 모델을 제안하고 이의 구축방안에 대하여 논의하였다. 원격지의 연구자들은 주요 실험 시설에서 진행되는 실험을 실시간으로 관찰할 수 있으며, 실험 과정의 특성이 허용하는 경우, 실험 예약을 하여 연구자가 직접 실험을 진행할 수 있다. 또한, 실험이 끝난 후에도 실험 진행 동영상과 결과물을 보는 것이 가능하다. 이러한 기능들은 지리적으로 떨어져 있는 연구자들 간에 공동 연구의 기반 환경을 제공해 준다. 그리고, 이를 기반으로 하여, 지리적으로 떨어져 있는 2개의 물리적 실험 장비 사이트와 1개의 수치해석 시뮬레이션 사이트를 연동시키는 하이브리드 실험시설에 대한 설계를 하고 시뮬레이션 코디네이터와 제어 서버 및 스트리밍 서버를 포함하는 하이브리드 실험시설의 프로토타입의 구현 및 테스트를 통하여 그리드 기반의 토목 공학 공동 연구 환경의 가능성을 보여주었다. 기존의 Mini-MOST에서 한 개의 실험 장비 사이트를 사용하던 점보다는 지리적으로 분산된 두 개의 물리적 실험 장비 사이트를 연계했다는 점에서

기존의 Mini-MOST보다는 분산도를 더욱 높였다고 할 수 있다.

본 논문에서 구현한 프로토타입의 실험에서는 클라이언트의 일부는 웹기반이 아니기 때문에 현재 클라이언트의 모든 부분을 웹기반으로 제공하는 그리드 시스템을 구현하고 있다. 웹기반의 클라이언트를 제공하게 되면 그리드 기반의 공동 연구 환경을 이용하는 사용자는 특정 클라이언트 프로그램을 설치할 필요 없이 인터넷의 접속이 가능한 환경에서 웹 브라우저만 사용 가능하다면 원격 토목 공학 실험을 수행할 수 있게 될 것이다. 현재 Globus Toolkit 4 를 기반으로 하여 웹 서비스의 구현 작업 중에 있다. 그리고, 본 논문에서 제시된 프로토타입의 연구자들에 의한 사용을 통하여 추가적인 요구사항을 작성하여 실제 실험 장비 구축에 반영할 계획이다. 그리고, 앞으로 더 많은 대형 실험 시설들을 그리드 네트워크에 연결하여 연구자들에게 더욱 많은 실험 시설 및 그 실험 결과들을 공유할 수 있도록 할 계획이다.

본 논문에서 구현된 이러한 고가의 연구 장비를 그리드 기술로 연결하여 원격 실험을 포함한 공동 연구 환경을 제공하는 모델은 다른 공학 분야에도 상당 부분 적용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고 문헌

- [1] I. Foster, C. Kesselman, and S. Tuecke, "The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations", International Journal of Supercomputer Application, vol. 15, No. 3, pp.200-222, 2001.
- [2] K. Czajkowski, S. Fitzgerald, I. Foster, and C. Kesselman, "Grid Information Services for Distributed Resource Sharing", Proceedings of 10th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, pp.181-194, August 2001.
- [3] Korea Construction Engineering Development(KOCED),

<http://www.koced.net>

- [4] The NEESgrid System Integration Team, "Introduction to NEESgrid : Technical Report NEESgrid-2004-13", <http://it.nees.org>, August, 2004.
- [5] Biomedical Informatics Research Network, <http://www.nbim.net>
- [6] US National Virtual Observatory, <http://www.us-vo.org>
- [7] K. Nowinski, B. Lesyng, M. Niezgódka, and P. Bala, "Project EUROGRID", Proceedings of PIONIER 2001 Conference, pp.187-191, 2001.
- [8] G-Civil Project, <http://www.soton.ac.uk/~gcivil/index.htm>
- [9] D. B. Horn, T. A. Finholt, J. Birnholtz, S. Jayaraman, J. Eng, and J. Myers, "Getting Started Guide for Collaboration: Technical Report NEESgrid-2004-15", <http://it.nees.org>, September, 2004.
- [10] C. Kesselman, R. Butler, I. Foster, J. Futrelle, D. Marcusiu, S. Gulipalli, and L. Pearlman, "NEESgrid System Architecture Version 1.1", <http://it.nees.org>, May 13, 2003.
- [11] I. Foster, C. Kesselman, J. M. Nick, and S. Tuecke, "Grid Services for Distributed System Integration", IEEE Computer, vol 35, No.6, pp.37-46, 2002.
- [12] I. Foster, C. Kesselman, J. M. Nick, and S. Tuecke, "The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration", <http://www.globus.org/research/papers/ogsa.pdf>, 2002.
- [13] S. Brunett, K. Czajkowski, S. Fitzgerald, I. Foster, A. Johnson, C. Kesselman, J. Leigh, and S. Tuecke, "Application Experiences with the Globus Toolkit", Proceedings of 7th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, pp.81-89, 1998.
- [14] I. Foster, and C. Kesselman, "Globus: A Metacomputing Infrastructure Toolkit", International Journal of Supercomputer Applications, Vol. 11, No.2, pp.115-129, 1998.
- [15] B. Sotomayor, and L. Childers, "Globus Toolkit 4", pp. 3-39, MORGAN KAUFMANN, 2006.
- [16] M. Nakashima et al., "Integration Techniques for Substructure Pseudodynamic Test", Proceedings of the 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, vol. 2, pp.515-524, Palm Springs, CA, 1990.

- [17] Mini-MOST, <http://cive.seas.wustl.edu/wusceel/minimost/>
- [18] L. Pearlman, M. D'Arcy, E. Johnson, C. Kesselman, and P. Plaszczak, "NEESgrid Teleoperation Control Protocol(NTCP): Technical Report NEESGrid-2003-07", <http://it.nees.org>, 2003.
- [19] Ring Buffered Network Bus, <http://outlet.creare.com/rbnb/>
- [20] Real-Time Data Viewer, <http://it.nees.org/software/rdv/>



이 장 호

e-mail : janghol@cs.hongik.ac.kr

1990년 서울대학교 컴퓨터공학과(학사)
 1992년 서울대학교 컴퓨터공학과(석사)
 2000년 University of Michigan,
 Electrical Eng. and Computer
 Science(박사)

2000년 IBM T. J. Watson 연구소 Postdoctoral Researcher
 2001년~2002년 Ubiquix 수석연구원
 2002년~현재 홍익대학교 컴퓨터공학과 조교수
 관심분야: 협업컴퓨팅, 분산시스템, 그리드컴퓨팅



정 태 경

e-mail : tjeong@mju.ac.kr

1992년 명지대학교(학사)
 2000년 University of Texas at Austin,
 Electrical and Computer
 Eng.(석사)
 2004년 University of Texas at Austin,
 Electrical and Computer Eng.(박사)

2004년~2006년 University of Delaware, NASA Goddard
 Space Flight Center Research Fellow
 2006년 9월~현재 명지대학교 통신공학과 조교수
 관심분야: 통신회로 및 시스템, 반도체, 무선 통신소자 및
 회로설계