

e-Science 워크벤치 기능 설계

Functionality design of the e-Science workbench

이준학, 남덕윤, 김병상, 서영균, 황순욱
한국과학기술정보연구원 e-Science 사업단 기술개발팀

June H. Lee, Dukyun Nam, Byungsang Kim,
Youngkyoon Suh, Soonwook Hwang
e-Science Division, Korea Institute of Science and
Technology Information

요약

기존의 그리드 환경에서 독립적으로 개발된 단위 e-Science 응용 서비스가 효율적으로 활용되기 위해서는, 기 개발된 단위 e-Science 응용 서비스들을 협업 환경에서 일련의 워크플로우로 통합할 수 있고 이를 실행할 수 있는 기술 및 관련 기술의 개발이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 실제 활용되고 있는 e-Science 응용 환경 중 하나인 항공우주분야의 e-Science 환경의 연구 시나리오로부터 e-Science 워크벤치가 갖추어야 할 요구사항을 분석하였다. 또한 이렇게 분석된 요구사항을 바탕으로 실제 e-Science 워크벤치의 기능 및 아키텍처의 설계를 수행하였다.

Abstract

To efficiently utilize an e-Science application service which is built on a grid computing environment, it is vital to develop technologies for integrating each e-Science application services into a workflow and for executing the workflow on a cooperative environment. In this paper, we analyze the requirements of e-AIRS system, one of the e-Science environment of aerospace research community. From the requirement analysis, we propose the required functionality and the architecture of e-Science workbench for effective utilization of e-Science services on cooperative environment.

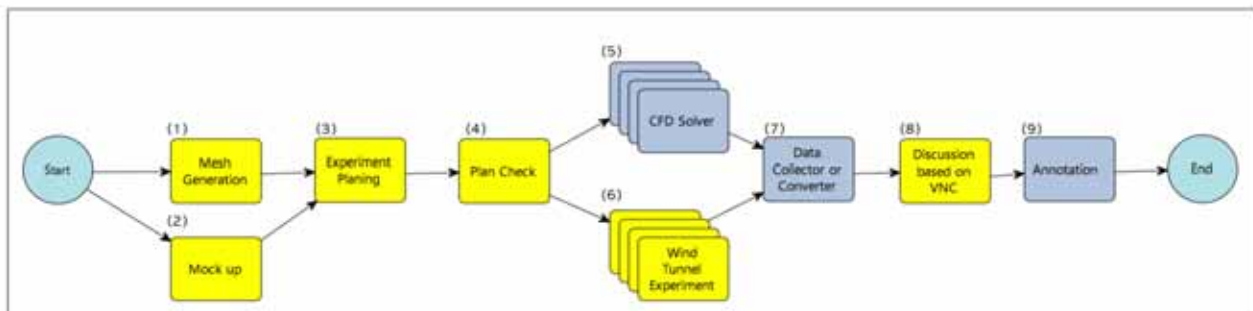
I. 서론

e-Science는 인터넷으로 연결되어 원격지에서도 사용가능한 광역의 협업 환경을 통해, 점진적으로 수행될 대규모 과학 [1]으로 정의된다. 현재 e-Science는 천체 물리, 입자 물리, 생명정보학, 의료 공학 분야, 항공 우주 분야 등등 폭넓은 분야에 시도되어지고 있으며 그에 따른 성과도 알려지고 있다. 다양한 e-Science 연구 분야에서 연구를 수행하기 위한 일련의 과정을 정형화 하고 공유하기 위한 노력으로 워크플로우 기술을 다양하게 사용하고 있다.

연구자의 연구 활동은 일련의 업무과정인 하지만, 자동화 하는 데에는 현실적인 문제가 있다. 본 기관에서는 2005년부

터 e-Science 환경 구축 사업을 진행하고 있는데 [2]. 이 중 고가 장비를 활용한 실험 부분이 포함된 과제들에서 우리는 워크플로우로 연구 활동을 자동화 하는 데에 현실적인 어려움을 겪었다. 고가의 실험 장비를 사용하는 연구 활동의 경우, 원격 조정 시스템 등을 통해 연구자가 직접 원격 조정을 하는 활동을 워크플로우에 포함시킴으로써 자동화가 되어야 한다. 그러나 타 기관에서 관리하는 고가의 실험 장비들은 원격 조정이 허가 되지 않을 뿐만 아니라, 장비 조정의 전문가가 아니면, 활용하기도 힘들었다.

본 논문에서는 과학자가 연구 활동을 함에 있어, 그리드 자원을 활용하여 컴퓨팅 시뮬레이션을 수행하고, 실험 장비를 장비 전문가에게 실험 의뢰를 하는 매뉴얼 활동(Manual



▶▶ 그림 1. 항공 수치 풍동 실험 시나리오

activity)를 지원함으로써, 비즈니스 워크플로우의 성숙한 부분[3]을 바탕으로 과학 워크플로우를 지원하는 e-Science 워크벤치를 제안한다. 이를 위해 과학 워크플로우가 미리 정해진 방식으로 만들어지는 것이 아닌 만큼, 국가 e-Science 사업에서 추진되었던 항공우주분야 과제의 시나리오에서 요구사항을 도출하고, 이러한 요구사항을 만족시키는 시스템 구조 및 기능들을 설계 하였다.

II. 응용시나리오 및 요구사항 도출

1. 시나리오

우리는 e-Science 사업 중 항공 우주 분야의 문제 해결 방법 중 하나인 CFD(computational fluid dynamics)를[4] 통한 수치 풍동 해석을[5] 위한 e-Science 환경인 e-AIRS 시스템[6]의 시나리오를 기반으로 e-Science 워크플로우의 요구사항을 도출하였다. 이 논문에서 분석을 하게 된 항공 수치 풍동 실험 시나리오는 그림 1과 같다.

그림 1에서 설명하고 있는 시나리오는 특정 형상을 결정하고 그 형상에 대한 특정 변수의 변화에 따른 다른 유동 특성의 변화를 관찰하고 파악하기 위함이다. 이러한 실험을 위하여 wind tunnel을 이용하게 되는데 실험을 위한 비용이 상대적으로 많이 들기 때문에 특정 변수의 제한된 값들에 대해서만 wind tunnel을 이용한 실험을 수행하며 나머지 값들에 대해서는 CFD를 통한 수치 풍동 해석을 이용한다. 각 단계를 살펴보면 다음과 같다.

- **Mesh 생성** - 우선 CFD를 이용한 실험을 하기 위하여 형상 격자(Mesh)를 생성하여야 한다. 이 작업은 CAD와 같은 방식으로 나타나 있는 형상을 기반으로 이루어지며 특정 연구자가 직접 작성하고 미리 정해진 저장장소에 저장하게 된다.
- **형상 제작** - Wind tunnel 실험을 수행하기 위하여 실제 형상을 제작하는 작업이며 형상 제작을 전문적으로 하는 연구자가 수행하게 된다.
- **실험 설계** - 이 단계에서는 만들어진 형상과 mesh를 이용하여 어떠한 변수에 대한 유동 특성을 관찰할 것인지에 대한 전체적인 실험 설계를 하게 된다. 변동을 줄 변수에 대하여 어떠한 값에 대해 실험을 하게 될지 설정하고 나머지 변동되지 않는 변수에 대해서는 특정 값을 설정하게 된다.
- **실험 설계 검토** - Wind tunnel을 이용한 실험은 상당히 비용이 많이 들며 CFD를 이용한 실험 역시 상당히 많은 컴퓨팅 자원을 사용하게 되므로 상위 연구자의 실험 설계 검토 과정이 필요하다.

- **CFD solver를 이용한 실험** - CFD를 이용한 실험은 그리드 자원을 이용하여 계산을 수행하게 된다. 설정된 각 변수 값에 대해 각각 실험이 수행되게 된다. 이 각 실험은 각기 다른 컴퓨팅 자원에서 수행될 수 있게 된다.
- **Wind tunnel을 이용한 실험** - 설정된 각 변수 값에 대해 실험 케이스가 생성되고 각 실험 케이스를 실제 wind tunnel operator에게 전달하게 된다. Wind tunnel operator는 전달된 실험 케이스를 세팅하고 실험을 수행한 후 결과를 특정 저장장소에 저장하게 된다.
- **실험 결과 수집 및 통합** - 이 단계에서는 CFD를 통해 도출된 실험 결과와 wind tunnel을 이용해 도출된 실험 결과를 수집하고 하나의 데이터로 통합하는 일을 수행한다. 이렇게 통합된 데이터는 추후 분석 및 공유 작업을 수월하게 할 수 있다.
- **결과 공유 및 토론** - 앞 단계에서 통합된 데이터를 관련된 연구자들이 서로 함께 공유하고 분석하는 과정을 거친다. 연구자간의 데이터 공유와 분석을 통해 실험 결과에 대한 의견을 수렴하고 조율 할 수 있다.
- **실험 결과에 대한 주석 작성** - 앞 단계의 데이터분석에 대한 수렴된 의견을 실험 결과 데이터와 함께 데이터베이스화 하여 저장한다. 추후 다른 실험 계획 등에 참고 사항으로 사용할 수 있다.

2. 요구사항 도출

앞 절에서 설명한 항공우주분야의 수치 풍동 실험의 실험 시나리오를 워크플로우 시스템을 이용하여 구현하기 위해서 다음과 같은 요구사항을 도출 할 수 있다.

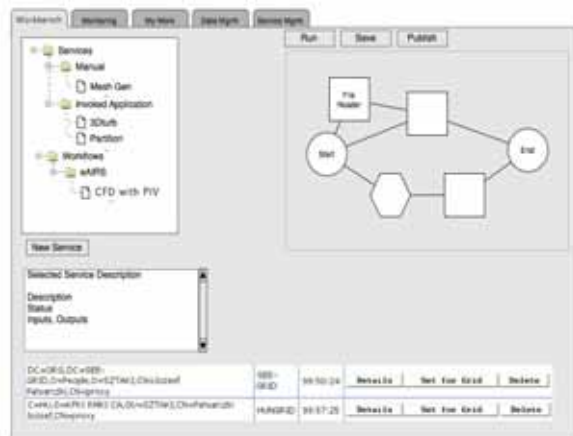
- **워크플로우 모델링** - 앞 절에서 설명한 시나리오의 실험을 지원하기 위해 시나리오를 설계하고 실험에 맞는 설계를 할 수 있는 모델링 기능이 지원되어야 한다.
- **보안** - e-Science 환경에서는 다양한 컴퓨팅 자원, 데이터 등이 존재하고 각각 자체적인 보안 체계를 가지고 있다. 이러한 자원 및 데이터에 접근 할 수 있는 보안 기능이 지원되어야 한다.
- **분산 데이터 관리** - 앞의 수치풍동 관련 실험에서도 볼 수 있듯이 각각의 연구자의 컴퓨터, 계산 자원 등등에 분산되어 있는 데이터를 관리하고 사용할 수 있는 환경이 제공되어야 한다.
- **그리드 자원 접근** - 위의 예에서는 단 CFD solver를 이용한 계산만이 존재 하지만 실제 연구 환경에서는 다양한 계산 자원에 접근하여 계산 작업을 수행할 수 있어야 한다. 이러한 요구사항을 만족시키기 위하여 그리드 자원에 접근

하고 작업을 수행할 수 있는 환경이 필요하다.

- **협업지원** - 위 e-AIRS 케이스에서도 알 수 있듯이 대부분의 연구 프로세스는 연구자 혼자서 진행하는 경우보다 다수의 연구자가 연구 프로세스에 참여하는 경우가 많다. 즉, e-Science 환경에서 이러한 연구자들의 협업 연구 환경을 지원하여야 한다.
- **서비스 관리** - 연구자가 자신이 원하는 연구 프로세스를 워크벤치 상에서 나타내고 수행하기 위해서는 하나의 단위가 되는 서비스를 생성하고 관리 할 수 있는 환경이 제공되어야 한다.
- **워크플로우 모니터링** - 특정 연구 프로세스를 워크플로우를 이용하고 정의하고 수행하게 되면 이후 수행된 워크플로우의 진행상황을 파악할 수 있어야 하며 진행 상태에 따라 알맞은 조치를 취할 수 있어야 한다.

III. e-Science 워크벤치 설계

본 장에서는 e-Science 워크벤치의 요구사항 별 세부 기능 및 설계에 대해 설명하고 전체적인 e-Science 워크벤치의 아키텍처의 디자인에 대해 설명한다.



▶▶ 그림 2. 워크플로우 모델링을 위한 사용자 화면

1. 요구사항 별 기능 설계

1.1 워크플로우 모델링

워크플로우 모델링을 지원하기 위해서 그림 2와 같은 사용자 인터페이스를 설계하였다. 우선 연구자는 디자인하고자 하는 연구 프로세스를 왼쪽의 리스트에 나열되어있는 단위 서비스를 이용해서 정의할 수 있다. 연구자는 오른쪽의 빈 공간에 그래프의 형식으로 각 단위 서비스를 나열하고 각 단위 서비스간의 순서와 연관 관계를 정의 하는 방법으로 연구 프로세스를 워크플로우로 나타낼 수 있다. 또한 각 단위 서비스를 실

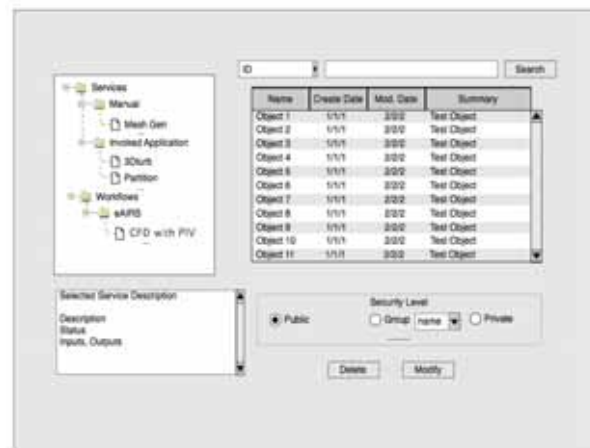
행하는데 필요한 각종 파라미터 등도 연구자가 직접 설정 할 수 있으며 이러한 설정이 끝난 후 모델링한 워크플로우를 저장하고 실제로 수행할 수 있도록 설계하였다.

1.2 보안

본 논문에서 설계한 e-Science 워크벤치 시스템에서는 각 계산 자원 및 데이터 스토리지 자원들이 GSI[7]에 기반을 둔 보안체계를 갖추고 있다고 가정하였다. GSI에 기반을 둔 보안 체계에서는 사용자의 인증서를 이용하여 자원에 접근하게 된다. e-Science 워크벤치와 같은 구조를 갖는 경우 e-Science 워크벤치가 사용자를 대신하여 자원에 접근해야하므로 사용자의 인증서를 이용해 만들어진 proxy credential을 e-Science 워크벤치에 전달하여 e-Science 워크벤치가 각 자원에 사용자의 권한으로 접근할 수 있게 해야 한다. 또한 여러 사용자마다 서로 다른 인증서를 가지고 있으며 서로 다른 자원에 대한 권한을 가지고 있으므로 체계적인 proxy credential 관리 시스템이 필요하다. 본 e-Science 설계에서는 myProxy[8]를 이용하여 사용자의 proxy credential을 관리하는 방식으로 시스템을 설계하였다.

1.3 분산 데이터 관리

요구사항에서 설명한대로 e-Science 워크벤치에서는 다양한 자원에 접근하여 데이터를 다운로드하고 업로드 할 수 있는 환경이 제공되어야 한다. 또한 각 자원에서 제공하는 다양한 데이터 전송 프로토콜을 제공하여야 하며 각 자원에 접근 가능한 데이터를 브라우징 할 수 있는 기능이 제공되어야 한다. 이러한 이유 때문에 일반적인 FTP client와 같은 UI를 제공하고 SCP, FTP, GridFTP 등등의 프로토콜을 지원 가능하도록 설계하였다.



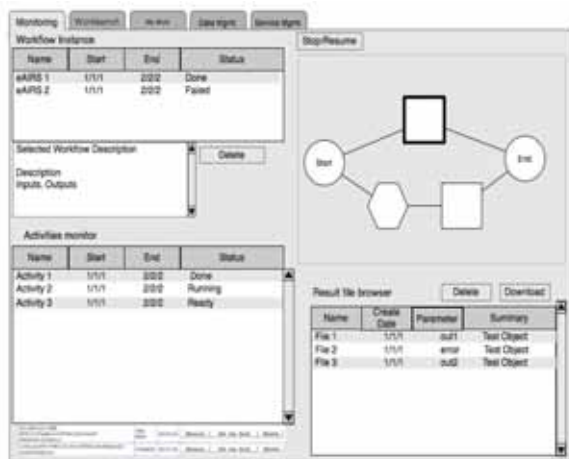
▶▶ 그림 3. 서비스 관리를 위한 사용자 화면

1.4 그리드 자원 접근

그리드 자원을 이용하는데 있어서 가장 큰 이슈가 되는 문제는 각 자원에 존재하는 사용 가능한 소프트웨어가 제한되어 있다는 것과 각 자원에 접근을 제공해주는 미들웨어가 다양하다는 것이다. 각 그리드 자원은 각자 다른 관리자에 의해 관리되고 있으므로 첫 번째 문제는 해결할 수 없다고 가정한다. 본 설계에서는 서로 다른 그리드 미들웨어를 통해 작업을 실행할 수 있도록 설계하였으며 첫 단계 개발에서는 Globus[9]를 통한 작업 실행을 가능하게 할 예정이다.

1.5 협업지원

앞 수치풍동 실험에 관련한 시나리오에서도 알 수 있다시피 대다수의 실험 프로세스에는 한 명 이상의 연구자가 참여하여 실험을 수행하게 된다. 이러한 실험 프로세스 안에서 각 연구자는 자신에게 할당된 작업에 대한 정보를 확인하고 그에 알맞은 작업을 수행하고 그 결과를 업로드 할 수 있어야 한다. e-Science workbench는 실험 디자인을 하는 연구자가 다른 연구자에게 작업을 요청할 수 있는 환경을 구성할 수 있도록 설계하였으며, 각 연구자는 자신에게 할당된 작업을 확인하고 관련된 데이터를 다운로드 받을 수 있으며 작업을 모두 완료한 후 결과 데이터를 업로드 할 수 있는 환경을 제공한다. 이러한 환경은 기존 비즈니스 분야에서 활용되고 있는 Business process management engine을 기반으로 e-Science workbench를 설계함으로써 제공이 가능하다.



▶▶ 그림 4. 워크플로우 모니터링을 위한 사용자 화면

1.6 서비스 관리

연구 프로세스의 가장 작은 단위를 다룰 수 있는 단위 서비스를 등록할 수 있는 환경을 제공하기 위해 e-Science workbench에서는 1.4와 1.5에서 알아본 것과 같이 그리드 자원의 작업 실행을 위한 단위 서비스와 협업을 위한 manual

activity 단위 서비스를 등록할 수 있는 환경을 제공하도록 하고 있다. 또한 이렇게 등록된 단위 서비스들을 그림 3과 같이 브라우징하고 각 단위 서비스에 대한 정보를 확인할 수 있으며 각 단위 서비스에 대한 접근 제한 등을 설정할 수 있는 환경을 제공할 수 있도록 설계하였다.

1.7 워크플로우 모니터링

e-Science workbench에서는 진행 중이거나 이미 완료된 연구 프로세스의 진행 상황을 실시간으로 모니터링 할 수 있는 환경을 그림 4와 같이 제공한다. 연구자는 각 서비스 단위로 진행 상황을 모니터링 할 수 있으며 각 단위 서비스의 입력 데이터와 결과 데이터를 확인하고 다운로드 받을 수 있는 환경 역시 제공한다. 또한 진행 중인 연구 프로세스를 중지시키거나 중지한 연구 프로세스를 다시 시작하는 기능 또한 제공할 수 있도록 설계하였다.

2. 시스템 아키텍처

앞 절에서 알아본 것과 같이 e-Science workbench에서 필요한 기능들을 구현하기 위하여 그림 5와 같은 전체적인 e-Science workbench의 아키텍처를 설계할 수 있다. 이 아키텍처는 WfMC의 Workflow reference model[10]을 기반으로 변형된 형태로 설계되었다. 전체 적으로 크게 연구자가 직접 사용하게 되는 e-Science workbench가 존재하며 대부분의 작업을 실제로 수행하고 관리하는 e-Science workbench enactment service 그리고 전체적인 관리를 위한 administration tools로 나뉘게 된다.

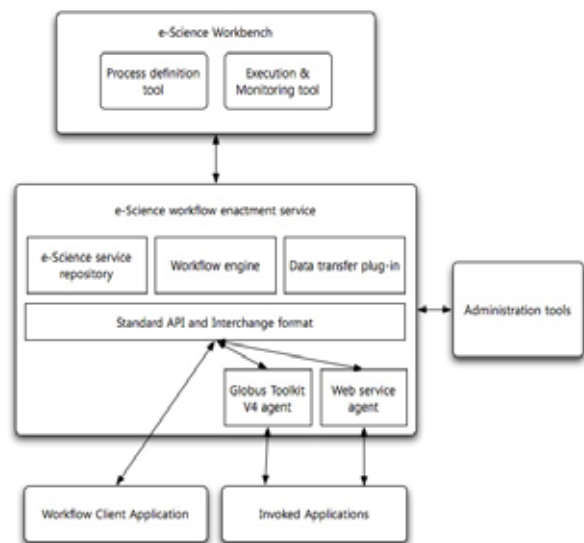


그림 5. e-Science 서비스 통합 워크 벤치 시스템 구성도

e-Science Workbench는 워크플로우 모델링, 실행, 모니터링 기능을 담당하며 e-Science workflow enactment service는 기본적인 workflow engine의 기능에 추가적으로 서비스 등록 및 관리 기능을 하는 e-Science service repository, 분산 데이터 관리 기능을 위한 data transfer plug-in, 그리드 자원 접근을 위한 Globus toolkit v4 agent 등의 모듈을 포함하고 있다. 협업에 대한 기능은 기본적인 Business process management의 workflow engine에서 제공하는 기능을 사용하고 e-Science 환경에 알맞은 workflow client application을 제공함으로써 지원가능하다.

IV. 관련 연구

DAGMan (Directed Acyclic Graph Manager) [11]은 사용자에게 Condor에 다수의 워크플로우를 제출할 수 있게 해주며, 다양한 워크플로우를 표현할 수 있는 인터페이스를 제공한다. DAGMan의 목표는 많은 작업이 포함된 복잡한 워크플로우의 제출 및 관리를 자동화하는 것이다. DAGMan에서 지원하는 워크플로우 모델은 DAG (Directed Acyclic Graph)으로 작업 사이의 의존성을 표현함으로써 지원하는데, 조건문과 반복문 같은 컨트롤 플로우 (Control flow)는 지원하지 못한다.

Pegasus [12]는 워크플로우 인스턴스와 가용 자원에 대한 정보를 활용하여 실행 가능한 워크플로우를 생성하며, 과학자들이 Grid, Condor 풀, 로컬 머신과 같은 실제 실행 환경에 대해 신경 쓰지 않고, 응용 수준 (Application level)에서 워크플로우를 설계할 수 있게 해 준다. 한편 Pegasus는 DAGMan을 실행 엔진으로 사용하기 때문에 DAG 기반 워크플로우만을 지원한다.

Triana[13]는 직관적인 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)와 다수의 서비스 및 인터페이스의 통합을 지원하는 하부 시스템으로 구성된 워크플로우 환경이다. GUI는 전형적인 파일 브라우저와 동일한 모습의 툴 브라우저(Tool browser)와, 그래픽 기반의 연결 툴을 사용하여 데이터 플로우 다이어그램을 제작할 수 있는 작업 창(Work surface)로 구성된다. 하부 시스템은 이종의 미들웨어와 서비스들을 묶을 수 있는 인터페이스의 집합으로 구성되며, 특히 웹 서비스를 통해 그리드에 접근하는 Grid Application Toolkit [14]를 포함한다.

ICENI(Imperial College E-science Networked Infrastructure) [15]는 컴포넌트 저장소와 통합된 그래픽 기반 저작 도구를 이용하여, 사용자 자신의 응용프로그램을 구성하고 정의할 수 있는 환경 제공을 목표로 한다. 컴포넌트 저장소는 개발자가 자신의 소프트웨어를 커뮤니티에 제공하고 다

른 작업을 위해 자신의 컴포넌트 또는 응용프로그램과 쉽게 협력할 수 있게 한다.

Taverna[16]는 현재 생물학 분야에서 활용되고 있는 워크플로우 시스템으로, 유전자 (Gene), 단백질 (Protein), 대사산물 (Metabolite)과 같은 생물학적 구성체 사이의 관계를 표현하는 효소 접촉 반응 (Biological pathway)의 재구성을 자동화하기 위해 분산 데이터베이스에 저장된 데이터 기반의 워크플로우를 지원한다. 이러한 워크플로우는 생물정보학 분야의 컴퓨터 모의(in silico) 실험을 위한 템플릿을 지원한다. Taverna는 생물정보학 분야를 위한 데이터 통합, 결합 감내, 사용자 편의성 인터페이스 제공에 초점을 두고 있다.

P-GRADE 포털[17]은 하부 그리드 시스템의 상세 인터페이스에 대한 정보를 모르더라도 워크플로우로 복잡한 그리드 프로그램을 제작할 수 있게 하고, 그리드 워크플로우 개발 및 실행 과정의 모든 단계를 지원하는 것을 목적으로 하는 워크플로우 기반 그리드 포털이다. 포털 수준에서 다양한 그리드 사이의 상호 운용성을 지원하는 가교 역할을 하며, 순차적인 작업이나, MPI (Message Passing Interface) 작업, PVM (Parallel Virtual Machine) 작업과 같은 실행 가능한 다양한 컴포넌트로 구성되는 DAG 타입의 워크플로우를 제작함에 있어서 그래픽 기반 설계를 가능케 한다.

GridFlow [18]는 사용자 포털, 그리드 워크플로우 관리와 로컬 그리드 하부 워크플로우 스케줄링을 위한 서비스 집합으로 구성된다. 글로벌 그리드 수준에서는, 기존의 에이전트 기반 그리드 자원 관리 시스템 위에서 시뮬레이션, 실행, 기능 모니터링이 제공된다. 한편 각각의 로컬 그리드에서는, 기존의 성능 예측 기반 작업 스케줄링 시스템 위에서 하부 워크플로우 스케줄링 등이 제공된다.

V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 그리드 자원 활용 및 실험 장비를 장비 전문가에게 실험 의뢰를 지원하는 e-Science 워크벤치를 제안한다. 이를 위해 국가 e-Science 사업에서 추진되었던 항공우주 분야 과제의 시나리오에서 요구사항을 도출하고, 이러한 요구사항을 만족시키는 시스템 구조 및 기능들을 설계 하였다. 향후 e-Science 워크벤치는 과학 워크플로우에서 요구하는 동시다발적인 실행, 반복문, 데이터 플로우 등을 함께 조절할 수 있는 컨트롤 플로우 연산자(Control flow operator)를 지원할 것이다. 또한 다른 연구자들이 함께 활용할 수 있도록 의미 있는 기설계 워크플로우를 많이 확보하여 사용자 커뮤니티에 제공함으로써, e-Science 워크벤치의 활용성을 검증할 계획이다.

■ 참고 문헌 ■

- [1] Defining e-Science, <http://www.nesc.ac.uk/nesc/define.tml>, e-Science Institute, UK National e-Science Centre.
- [2] Korea National e-Science Project, <http://www.escience.r.kr/>, e-Science 사업단, KISTI.
- [3] R. Barga and D. Gannon, "Scientific versus Business Workflows," in I.J. Taylor, et al. (Eds), *Workflows for e-Science: Scientific Workflows for Grids*, chapter 2, pp. 9-16, Springer, 2007.
- [4] www.cfd-online.com
- [5] T.Ludewig, J. Hauser, T. Gollnick, H. Paap, "JUSTGrid: A Pure Java HPCC Grid Architecture for Multi-Physics Solvers Using Complex Geometries", 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 2004
- [6] Y. Kim, E.-k. Kim, J.Y. Kim, J.-h. Cho, C. Kim and K.W. Cho "e-AIRS: An e-Science Collaboration Portal for Aerospace Applications", In Proc. of the Int'l Conference on High Performance Computing and Communications, pp. 813-822, 2006.
- [7] <http://www.globus.org/toolkit/docs/4.0/security/>
- [8] J. Novotny, S. Tuecke, and Von Welch, "An Online Credential Repository for the Grid: MyProxy," In Proc. of the HPDC-10, 2001
- [9] <http://www.globus.org/>
- [10] D. Hollingsworth, "The Workflow Reference Mode", The Workflow Management Coalition Specification, Issue 1.1, Document Number: TC00-1003, 1994.
- [11] DAGMan: Directed acyclic graph manager, <http://www.s.wisc.edu/condor/dagman/>, Condor project, University of Wisconsin-Madison.
- [12] E. Deelman, et al., "Mapping abstract complex workflows onto Grid environments," *Journal of Grid Computing*, Vol. 1, No. 1, pp. 25-39, Feb. 2003.
- [13] I. Taylor, M. Shields, I. Wang, and R. Rana, "Triana applications within Grid computing and peer to peer environments," *Journal of Grid Computing*, Vol. 1, No. 2, pp. 199-217, June 2003.
- [14] E. Seidel, G. Allen, A. Merzky, and J. Nabrzyski, "GridLab: A Grid application toolkit and testbed," *Future Generation of Computer Systems*, Vol. 18, No. 8, pp. 1143-1153, Oct. 2002.
- [15] A. Mayer, S. McGough, N. Furmento, W. Lee, S. Newhouse, and J. Darlington, "ICENI dataflow and workflow: Composition and scheduling in space and time," In UK e-Science All Hands Meeting, pp. 627-634, Nottingham, UK, 2003.
- [16] T. Oinn, et al. "Taverna: a tool for the composition and enactment of bioinformatics workflows," *Bioinformatics*, Vol.20, No.17, pp. 3045-3054, June 2004.
- [17] G. Sipos and P. Kacsuk, "Multi-Grid, Multi-User Workflows in the P-GRADE Portal," *Journal of Grid Computing*, Vol. 3, No. 3-4, pp. 221-238, Sep. 2005.
- [18] J. Cao, S. A. Jarvis, S. Saini, and G. R. Nudd, "GridFlow: workflow management for Grid computing," In Proc. of the 3rd Int'l Symposium on Cluster Computing and the Grid, pp. 198-205, May 2003.