

## 과학탐구활동을 위한 천문 관측 자료의 실시간 전송 및 영상 구현 실험 방법 개발

김 순 욱<sup>\*†</sup>

한국천문연구원, 305-348, 대전광역시 유성구 대덕대로 776

### Developing Experimental Method of Real-time Data Transfer and Imaging using Astronomical Observations for Scientific Inquiry Activities

Soon-Wook Kim<sup>\*†</sup>

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

**Abstract:** Previous Earth Science textbooks have mostly lacked the latest astronomical phenomena frequently being reported in mass media such as popular science magazines. One of the main directions in the revision of the 2009 National Curriculum of Korea is to actively include those phenomena. Furthermore, despite a close link between astronomy and physics, the concept of modern physics has not been actively introduced in Earth Science textbooks and at the same time the linkage of physics to astronomy has rarely been studied in physics textbooks. Therefore, the concept of integration among different fields in science is emphasized in the new National Curriculum. Transient phenomena in the high energy astrophysical objects are examples that reflect such issue. The purpose of this study is to introduce transferring a real-time data and making imaging of astronomical observations using e-Science. As a first step, we performed the first experiment for a large data transfer of astronomical observation between Korea and Japan using KOREN, a National Research and Education Test Network. We introduce actively on-going fields of e-Science in observational activities of astronomy and astrophysics, and their close interrelationship with scientific inquiry activities and public outreach activities. We discuss our experiment in the scientific and educational aspects to the primitive e-Science activity in the Korean astronomical society and, in turn, provide a prospective view for its application to the scientific inquiry activities and public outreach activities in the upcoming commercial Gbps-level internet environments.

**Keywords:** astronomy education, 2009 Revised National Science Curriculum: earth science and physics, e-Science, high energy astronomy and astrophysics, astrophysical transients

**요 약:** 종래의 지구과학 교과서에서는 대중 과학잡지를 비롯한 각종 언론 매체에서 자주 다루는 최신 천문 현상들에 대한 내용이 매우 부실하였다. 2009 개정 과학과 교육과정에서는 이러한 내용들을 적극 수용하자는 것이 주요 개정 방향 중 하나이다. 추가로, 천문학과 물리학의 깊은 연관성에도 불구하고 그동안 지구과학 교과에서는 현대 물리학의 개념, 물리 교과에서는 천문학과의 연관성에 대한 내용이 많이 다루어지지 않았다. 따라서 2009 개정 과학과 교육과정에서는 과학의 융합 개념을 강조하고 있다. 위의 두 가지를 모두 포함하는 분야들 중 하나로서 고에너지 천체의 격변광 현상을 들 수 있다. 본 연구는 e-Science를 이용한 천체 관측의 실시간 자료 전송 및 영상화를 소개하였다. 그 첫 단계의 실험으로서 우리는 국가 연구 교육 시험망의 하나인 KOREN을 이용한 국내 최초의 한·일간 천문 관측 자료의 대용량 자료 전송 실험을 실시하였다. 또한 천문학 및 천체물리학 관측 분야에서 활발하게 진행되는 세계 각국의 e-Science 분야들을 소개하고, 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동과 어떻게 연결되어 진행되는지 소개하였다. 아직 걸음마 단계인 국내 천문 분야의 e-Science에 있어서 우리의 실험이 가지는 과학적 및 교육적 의미를 짚어보고, 머지않아 상용화될 Gbps급 인터넷 환경에 있어서 이와 같은 실험의 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동에 있어서의 활용을 전망해 보았다.

**주요어:** 천문학 교육, 2009 개정 과학과 교육과정: 지구과학 및 물리, e-Science, 고에너지 천문학 및 천체물리학, 격변광 천체

\*Corresponding author: skim@kasi.re.kr

Tel: +82-42-865-3213 Fax: +82-42-865-2020

<sup>†</sup>교육과학기술부 교육과정심의회 위원(2009-2011 및 2011-2013)

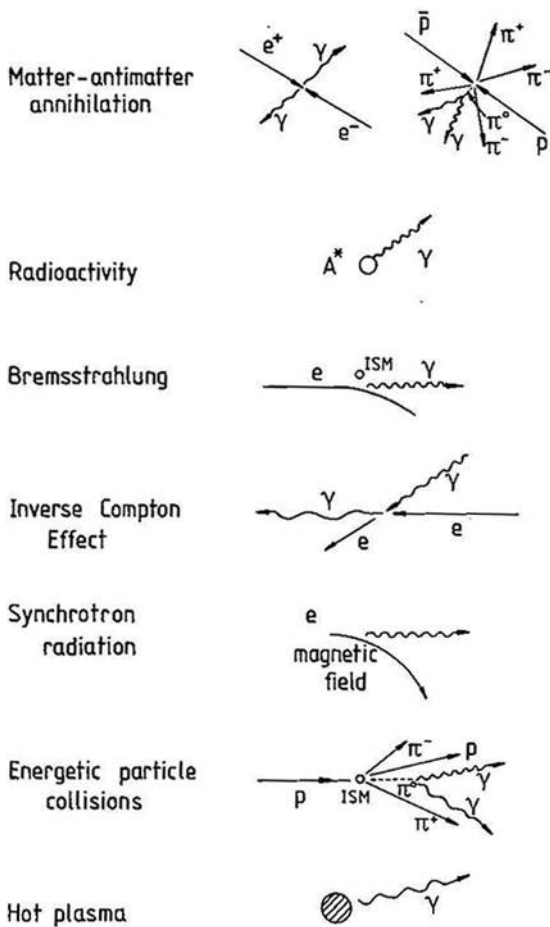
## 서 론

천문학은 고대로부터 관측을 기반으로 연구하는 학문이다. 천구 상에서 움직이는 별들의 관측적 위치에 대한 수학적 기술로 출발하여 코페르니쿠스에 의해 우주에서의 지구의 위치가 재정립됨으로써 천문학이 다루는 사과의 범위가 확장되었다. 그 후 천체분광학이 20세기 초에 상대성 이론과 양자역학의 탄생과 함께 재해석됨으로써 천체물리학이라는 이름으로 재탄생하였다(Osterbrock, 1995; Kaler, 1998). 따라서 현대 천문학은 우주에서 일어나는 현상을 물리학적 개념과 접목하여 연구하는 학문이 되었다(Longair, 2011; Carroll and Ostlie, 2006). 예를 들면, 우주의 형성에 대한 연구에서는 기본적인 힘들 및 기본입자들의 성질에 대한 의문에 답하려 하고 있다. 별의 내부 반응에 대해서는 핵 및 통계 물리학적 기작을, 성간 물질 및 별의 형성에 대해서는 원자, 분자 및 빛의 물리, 화학적 상호작용 등을 다루고 있다. 그럼에도 불구하고 그 동안 고등학교의 지구과학과 물리 교육과정들은 이와 같은 서로의 깊은 연관성이 강조되지 않은 채로 한동안 거의 독립적으로 기술되어 왔다(Longair, 2006). 특히 국내의 중등교과에서는 여러 가지 이유로 그 연관성이 거의 다루어 지지 않았다(정진수와 오원근, 2011).

최근 교육과학부에서 추진해온 2009 개정 고등학교 과학과 교육과정은 사실상 처음으로 물리학과 천문학의 연관성을 적극적으로 고려하고 있다(정진수와 오원근, 2011). 그 예로써 융합의 관점에서 제안된 융합과학 교과인 ‘우주와 생명’ 중에서 ‘우주의 기원과 진화’ 영역은 우주의 기원, 빅뱅과 기본입자, 원자의 형성, 별과 은하를 주요 교과 내용으로 하고 있다. 특히 별과 은하 단원에서는 별의 탄생과 진화, 무거운 원소의 합성, 은하의 구조 등의 핵 및 입자 물리학 관련 내용뿐만 아니라 성간(星間) 화합물, 공유결합 및 반응속도 등의 화학 교육과정과도 밀접한 내용을 다루고 있다. 또한 물리 I에서는 시공간의 새로운 이해라는 주제 아래 중력의 발견, 상대성 이론, 블랙홀과 중력렌즈, 우주 모형, 4가지 상호작용과 기본입자들을 다루도록 제시되었다. 한편 지구과학 II에서는 별의 특성, 우리 은하 및 은하와 우주 단원들의 내용들을 전통적인 천문학 내용에 추가하여 최근의 현대 천문학 내용을 기술하고 있다(정진수와 오원근, 2011). 따라서 2009 개정 고등학교 과학과 교육

과정은 융합과학과 물리 교과과정에서 현대 천문학 및 천체물리학의 내용을 심층적으로 추가함으로써 지구과학 II의 천문학 내용을 천체물리학적으로 보충하여 심화 교육과정이 이루어지도록 구성되어 있다. 이러한 물리, 화학 및 지구과학과 천문학간의 상호보완적 기술은 2009 개정 고등학교 과학과 교육과정의 필요성의 하나로 기술되어 있는 융합형 과학 교육의 필요성에 그 근거를 두고 있다. 특히, 개정의 중점 내용 중 하나로서 ‘우주는 천문학과 같은 특정 학문 분야의 탐구 대상이 아니라 여러 분야의 학문적 개념과 탐구 방법이 두루 사용되고 융합되어야만 올바른 이해에 도달함을 배울 수 있다는 사실을 알게 된다’고 강조하여 기술하고 있다(Longair, 2011).

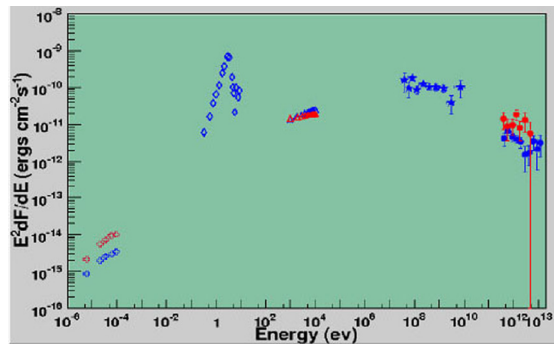
지구과학과 물리 교과과정에 공통적으로 연관되는 천문학 및 천체물리학 분야로는 특히 고에너지 천문학 분야를 들 수 있다(Longair, 2011; Murthy and Wolfendale, 1993; Schönfelder, 2001; Cheng and Romero, 2004; Aharonian et al., 2009). 고에너지 천문학은 상대성 이론, 소립자 물리학 및 원자핵 물리학 등을 천문 현상에 응용하는 분야이다. 가벼운 기본 원소들을 만드는 우주 초기에 관련된 현상들(예: 우주 배경 복사)뿐만 아니라 중원소들을 만드는 별의 진화의 현상들(예: 초거성, 초신성) 및 고중력 천체들, 그에 따른 여러 가지 고에너지 복사 현상들(예: 제동복사, 싱크로트론 복사, 컴프턴 산란 및 핵의 파쇄) 및 우주선의 발생 등은 특히 지구과학 및 물리 교육 과정 모두에 직접적으로 연관된 현상들이다. Fig. 1은 고에너지 천체들에서 만들어지는 열복사로부터 소립자의 상호작용까지 가능한 복사 기작의 예이다. 주로 저에너지 영역에서 관측되는 다른 천체들과는 달리, 고에너지 천체들에서는 현재의 기술로 검출할 수 있는 모든 가능한 파장 영역이 그 연구 대상이다. Fig. 2는 대표적인 고에너지 천체인 마이크로퀘이사(microquasar)에서 관측되는 파장 영역이 얼마나 광범위 한지 보여준다. 마이크로퀘이사는 보통의 별, 고중력별(블랙홀 또는 중성자별) 및 고중력별 주변에 형성된 강착원반(accretion disk)으로 이루어진 근접 이중성계로서, 광속에 가까운 분출물(제트)이 관측된다. 고에너지 천체들에서의 전파에서 감마선에 이르는 광범위한 복사 현상은 지구과학 교과서에 나오는 지상(ground-base) 망원경 또는 지구 대기로 인하여 차단되어 우주에서 관측하는 자외선, X선 및 감마선 망원경 등을 이용한 다양한 다파장(multi-



**Fig. 1.** Production mechanism in high energy astrophysical objects to generate radiation from the radio to gamma-rays (Murthy and Wolfendale, 1993).

wavelength) 관측 프로젝트가 왜 필요한지를 잘 보여 준다. 이러한 다양한 고에너지 복사 현상의 내용들은 중등 교과과정에서 충분히 교육 가능하게 되었는데, 그것은 바로 이번 개정의 10학년 과학 과목 개정의 중점 목표 중의 하나인 ‘어렵더라도 꼭 필요한 내용은 추가해서 분과별 지식의 완성도를 높여 이공계 대학으로 진학하는 학생들에게 도움이 되도록 하였다’에 근거한다(정진수와 오원근, 2011).

초신성 폭발, 퀘이사 및 마이크로퀘이사의 플레어(flare)와 초광속 제트(superluminal jet), 감마선 폭발체(Gamma-ray Bursts), 펄서의 글리치(glitch) 및 거대 맥동(giant pulse) 현상 등의 다양한 고에너지 현상들을 10학년 과학 과목의 과학탐구활동 등에서 소개할 필요가 있는 또 하나의 이유는 이러한 고에너지



**Fig. 2.** Multi-wavelength observation of a black hole microquasar LSI 61°303 (Smith, 2007).

현상들이 언론 매체나 대중 과학잡지에 매우 비중 있게 자주 다루어지는 현대 천문학의 중심 주제 들임에도 불구하고, 과거의 교육 과정에서는 거의 잘 다루지 않았기 때문이다. 2009 개정 고등학교 과학과 교육과정에서는 우주론의 내용이 많이 추가 되었으나, ‘첨단 과학 소개를 통한 과학에 대한 흥미 제고’라는 10학년 과학 과목의 개정 취지를 고려할 때, 새로운 지구과학 교과에서는 여전히 별의 진화 단원에서 초신성 폭발 이후의 진화 단계인 고에너지·고중력 천체에 대한 내용은 아주 빈약하다.

천문 관측에서는 종종 실험실 규모에서는 구현 할 수 없는 크기, 밀도, 질량, 에너지 등에 있어서 아주 작거나 또는 아주 큰 척도에 도달해서야 나타날 수 있는 새로운 종류의 현상들을 마주치게 된다(Longair, 2011; Longair, 2006). 이러한 천문학에서의 관측의 의존성에 미루어 볼 때 현재의 교과 과정에서의 관측 실습 과정은 현실적으로 많은 제약이 따르고, 미흡한 실정이다. 따라서 현재 초·중·고 교과 과정에서 광범위하게 쓰이는 소형 광학 망원경이나, 몇몇 학교 또는 특수목적 고등학교에서 제한적으로 사용하고 있는 디지털 카메라(서태오와 류성룡, 2009), 소형 전파 망원경(Park et al., 2006) 등을 이용할 수 있을 뿐이어서, 관측할 수 있는 천문 현상들이 제한적 일 수밖에 없다.

따라서 이 논문에서는 교과과정에서는 다루어지지 만 실제 교육실습현장에서 접하기 어려운 천체에 대한 천문현상 관측 및 관측 자료들을 초·중·고 교과 과정이나 일반인들이 쉽게 인터넷을 통해 접할 수 있는 방법과 그에 따른 과학탐구활동 및 과학대중화 활동에의 활용에 대하여 기술한다. 그 한 예로 우리

가 연구시험망인 KOREN을 이용해 처음으로 시행한 천문학 및 천체물리학 관련 e-Science 실험의 결과를 바탕으로 앞으로 과학탐구활동으로서의 다과장 천문 관측 자료 활용의 가능성을 논하고자 한다.

## 연구 자료 및 배경 지식

### 천문 관측과 e-Science

현대 과학 및 공학에서는 IT산업의 눈부신 발전과 더불어 보다 빠른 컴퓨팅 기술과 그에 따른 대규모 자료 생산, 처리 및 송수신을 보다 빠른 시간 내의 실행이 중요해지고 있다. 이에 따라서 대두되는 분야 중 하나가 바로 e-Science이다. e-Science는 영국의 John Taylor가 1999년에 처음 명명한 용어로서 초고속 네트워크 환경을 사용하거나 또는 그리드컴퓨팅(grid computing)이 요구되는 대용량의 자료를 사용하는 전산과학을 말한다(Hey and Trefethen, 2005). 최근에는 점점 더 분산된 자료들을 신속하게 취합하여 분석하고, 분석한 자료를 다시 물리적으로 멀리 떨어진 곳으로 보내는 작업들을 수행할 경우가 많아지고 있다. 그리고 각각 다른 곳에서 개발하여 계산한 자료, 실험 또는 관측한 대용량 자료들을 서로 공유하고 분석할 필요가 있다. 하지만 이러한 대용량 자료들을 다루는 과정을 수행하기 위해서는 고속의 안정된 네트워크, 그에 따른 대용량 저장장치 및 고속 연산 처리 능력 등이 필수적이다. 또한 서로 다른 환경에서 개발된 소프트웨어를 기반으로 생산된 계산, 실험 및 관측 자료들을 어려움 없이 접근하게 하고, 상호간에 실험 및 관측 장비들을 조종 할 수 있는 소프트웨어도 필요하다. 이와 같이 복잡한 소프트웨어와 백엔드 기반구조(backend infrastructure)의 필요성 때문에 연구소, 대학교 및 국가 단위 단체들의 주도에 e-Science의 개발과 운영이 이루어지고 있다.

현재 e-Science는 입자 물리학, 지구과학 및 유전정보처리(bio-informatics), 의학 등의 자연과학으로부터, 사회 현상의 시뮬레이션, 문화 및 예술 활동 등의 실시간 시연(display)까지 점점 더 다양한 분야로 그 적용범위가 확장되고 있다(Hey and Trefethen, 2005; 조금원 외, 2005; 조기현, 2005; 광재식과 노경태, 2005; 오재호, 2005; 강희중, 2011; 신명기, 2007). 천문학 및 천체물리학 분야에서도 e-Science의 필요성이 절실하게 대두되어, 현재 여러 분야에서 e-Science가 활용되고 있다. 그 대표적인 예로는 가상

관측소(virtual observatory)와 e-VLBI (electronic Very Long Baseline Interferometry)가 있다.

### 가상 천문대(Virtual Observatory)

가상 천문대는 지상 및 우주에서 관측된 다양한 천문 관측 자료들을 온라인(on-line) 상에서 전문가뿐만 아니라 과학 교육가 및 일반대중들도 쉽게 자료에 접근하여 자료 분석을 할 수 있게 하려는 취지에서 개발하게 되었다. 따라서 가상 천문대에서는 전 세계에 흩어져 있는 크고 작은 망원경들의 관측 데이터를 직접 방문하지 않아도 언제 어디서나 쉽게 사이트에 접근하여 자료를 전송받아 각종 소프트웨어와 처리 기술을 이용하여 처리할 수 있다.

가상 천문대의 툴(tool)로서 가장 대표적인 예는 1999년 프랑스의 CDS (Centre de Données astronomiques de Strasbourg)에서 개발하여 운영하고 있는 알라딘 성도(Aladin Sky Atlas)이다(Aladin homepage). 알라딘은 JAVA 컴파일러에서 구동되며, 리눅스, 윈도우 및 맥(Mac) 운영체제(operating system) 모두에서 사용 가능하다. 영어뿐만 아니라 프랑스어, 독일어, 이태리어, 중국어, 러시아어, 페르시아어, 일본어 등 다양한 언어를 제공하고 있으며, 다른 언어권 사용자 그룹이 번역하여 신청하면 그 외의 언어로도 제공할 수 있게 되어 있다. 사용자가 데이터나 명령을 입력하는 상호적 소프트웨어 성도(interactive software sky atlas)로서 사용자가 디지털 영상을 구현하고, 카탈로그나 데이터베이스로부터 엔트리(entry)들을 합성하여, 필드(field)안에 주어진 천체들에 대한 아카이브(archive) 데이터베이스들로부터 천체 정보들을 불러 모아서 동시에 획득할 수 있게 해준다. 우선 데이터베이스들은 CDS에서 제공하는 대표적인 아카이브들인 All sky survey, Aladin image server, Simbad (Set of Identifications, Measurements, and Bibliography for Astronomical Data), VizieR Catalog Service 등을 비롯하여, 미국의 NED (NASA/IPAC Extragalactic Database), SkyView, FIRST (Faint Image of the Radio Sky at Twenty-cm) survey, NVSS (NRAO VLA Sky survey), SDSS (Sloan Digital Sky survey), CADC (Canadian Astronomical Data Center) 등의 천문 데이터 아카이브들이 있다. 예를 들면, VizieR를 이용하여 허블 망원경의 자료인 HST 자료들의 영상을 얻을 수 있다. 관측자료 분석에 필요한 소프트웨어들도 제공하여, 공개된 관측 자

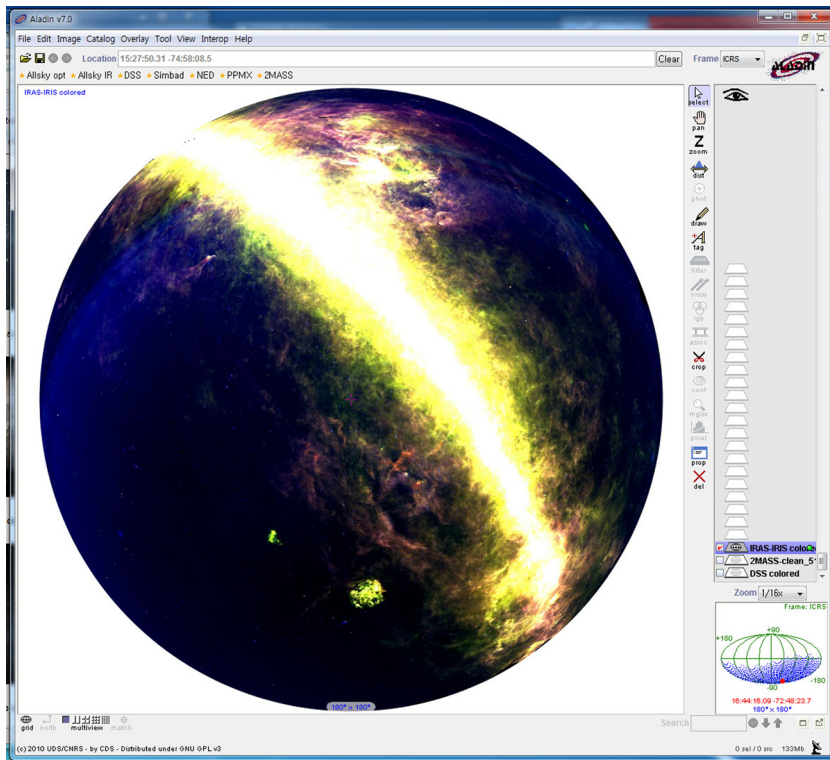


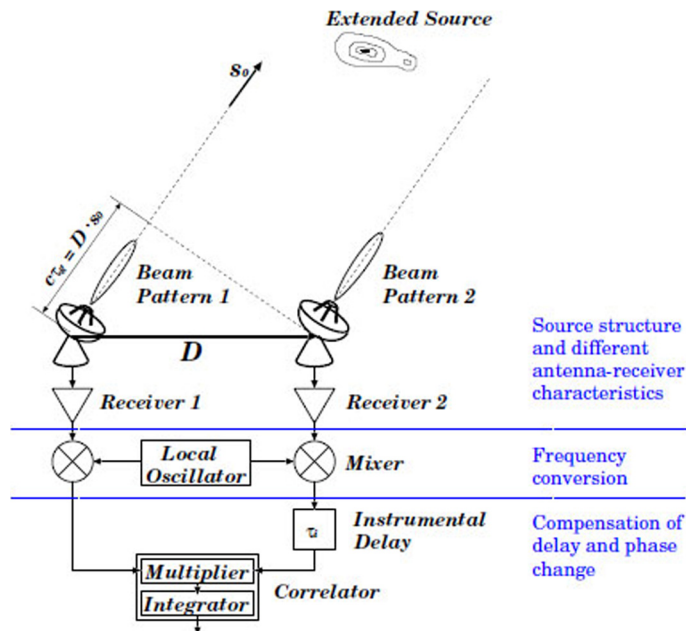
Fig. 3. An example of IRAS-IRIS colored image for the infrared all sky map using Aladin v7.0 (Aladin homepage).

료의 획득 및 다파장 관측 자료의 영상 구현 등을 수행함으로써 현재 가장 널리 쓰이는 가상 천문대의 표준적인 틀이 되어있다. 알라딘에서 구현할 수 있는 관측 매개변수들은 천체의 좌표, 속도, 적색편이, 고유 운동, 각 관측 파장 영역의 플럭스(flux), 표면 밝기(surface brightness), 분해 가능한 천체의 영상을 얻기 위한 각종 매개변수들 및 시간에 따른 밝기의 변동 정보 등 다양하다. Fig. 3은 우리가 알라딘을 이용하여 얻은 전천(全天: all sky) 적외선 하늘의 예이다. 이렇게 제공되는 관측 자료들과 소프트웨어들을 이용하여 누구든지 자료 분석과 영상을 구현할 수 있다. 특히 다파장 관측 자료들을 서로 원활히 연계시킴으로써 보간법(interpolation)과 적분(integration)을 하여 과학적 결과를 도출 할 수 있는 강력한 성능도 틀이다.

알라딘의 과학탐구활동 및 일반인들을 위한 대중화라는 측면에서 중요한 기능 중 하나는 전문가들 외에도 학생들이나 아마추어 전문가들도 쉽게 사용할 수 있도록 하는 public outreach 기능으로서, 전문가들을 위한 professional mode 외에도 undergraduate

mode 및 preview mode 등 두 가지 모드가 더 있다. Undergraduate mode에서는 일반 사용자가 전문가들이 쓰는 다양하고 복잡한 관측자료 처리방법들에 당혹스럽지 않게 따라갈 수 있게 가장 중요한 관측 자료들을 선정하여 영상과 카탈로그의 선택의 수를 줄여서 기능이 간단하게 조작되도록 하였다. Preview mode에서는 다른 작업 중에도 디폴트인 영상과 카탈로그로 단번에 돌아갈 수 있도록 간소화하였다. 또한 다양한 방법으로 제공되는 관측 자료들을 비전문가용으로 쓸 수 있도록 다양한 구체적인 스스로 학습과정(tutorial)을 제공하고 있다.

알라딘 외에도 대표적인 가상 천문대로서는 영국의 astroGrid, 유럽의 Euro-VO, 미국의 국립 가상 천문대(National Virtual Observatory) 등이 있다. 2002년에는 국제 가상 천문대 연맹(IVOA: International Virtual Observatory Alliance)이 결성되어 세계 각국 가상 천문대간의 표준화 작업을 시작하게 되었고, 국내에서도 2003년에 한국천문연구원과 국내 대학교 천문 관련 학과들이 모여 결성한 한국 가상 천문대(Korean Virtual Observatory)가 발족하였다. 한국 가



**Fig. 4.** Schematic view of VLBI. To transfer the frequency-converted data to the correlator, a wideband ~Gbps facility is usually required in VLBI.  $D$  is the baseline vector. A geometrical delay of the wave coming from the reference direction,  $s_0$ , is given by  $D \cdot s_0/c$  where  $c$  is the speed of light (Sasao and Fletcher, 2012).

상 천문대 프로젝트에서는 지난 수년간에 걸쳐 보현산 광학 천문대 및 소백산 광학 천문대의 관측 자료를 위한 천문 데이터 아카이브를 구축해오고 있다 (Sung, 2009).

이러한 소프트웨어적인 용이성에도 불구하고 가상 천문대의 관측 자료들은 종종 대용량인 경우가 있다. 예를 들어, 알라딘의 경우 천체 당 영상구현에 약 500 bytes가 소요되므로, 만약에 설정한 범위의 성도 안에 2백만 개의 천체들이 있다면 이들 영상을 불러들이는데 큰 자료 용량과 더불어 최대 약 1 GB의 램이 요구된다. 따라서 보통의 상용화된 인터넷 접속으로는 자료의 전송이 용이하지 못할 때가 있다. 따라서 실제의 과학탐구활동 및 일반대중들을 위한 영상의 시현에 있어서 방대한 자료를 보다 빠르게 전송하고 전송 받는 방법이 필요하다.

**Electronic Very Long Baseline Interferometry (e-VLBI)**

초장기선 간섭계(Very Long Baseline Interferometry: VLBI)란 천체가 복사하는 전파를 아주 멀리 떨어져 있는 2개 이상의 전파망원경들에서 동시에 수신하여 전파가 도달하는 시간차(delay time)와 위상(phase)을

정밀하게 측정하고, 각 망원경이 수신한 신호들을 상관기 처리센터에서 합성하여 푸리에변환을 거쳐 영상 처리를 통해 천체의 신호를 검출하는 기법을 가진 관측계이다(Fig. 4). 망원경의 분해능은 망원경의 구경이 크고 관측 파장이 짧을수록 높아지는데, 간섭계의 원리를 이용하면 망원경간의 수직에서 수만 km 떨어진 거리가 하나의 거대한 망원경의 직경과 같은 역할을 하게 됨으로써 광학 망원경이나 X-선 관측과 같은 그 어떤 다른 관측 기기를 이용한 관측보다 훨씬 정밀한 고분해능의 영상을 얻을 수 있다. 현재 VLBI 기기와 기법의 발달로 밀리 초각(milliarcsecond) 이하로 보이는 천체들의 영상을 구현할 수 있다. VLBI 기법은 서로 멀리 떨어져 있는 전파 망원경에 각각 도달하는 전파의 시간차를 나노 초(nanosecond)의 단위로 측정하는 정밀성을 이용하므로 역으로 지구 자전, 밀리미터 내의 정확도로 측정하는 구조판(tectonic plate)의 이동 지도와 측지 분야에도 활발하게 쓰인다.

1980-90년대로부터 현재까지도 각 망원경 사이트에서 자기 테이프(magnetic tape) 또는 특수한 하드 디스크에 저장된 Giga-byte에서 Tera-bytes 급의 관측 자료를 상관기 센터(correlator center)로 사람이 직접

운반하거나 우편으로 배달하고 있다. 따라서 수백에서 수천 킬로미터 떨어져 있는 각 전파 망원경 사이 트로부터 관측 자료가 중앙 처리 장치(상관기 센터)까지 오는데 상당한 시간이 걸린다. 특히 대륙 간의 관측인 경우 지리적인 거리와 운반비용으로 인해 그 시간이 몇 주에서부터 때로는 몇 달이 넘게 걸린다. 이렇게 관측된 자료를 얻기까지 소요시간이 길어지면 관측대상의 현재 상태파악을 할 수 없어 시시각각 급변하는 격변광 현상(감마선 폭발, 초신성 폭발, 블랙홀 주변의 제트 분출 등)에 대한 추적관측(follow-up observation) 또는 Target-of-Opportunity (ToO) 관측여부의 판단이 어려워진다. 하지만 최근에는 인터넷 망의 발달로 인해 각 전파 망원경에 광통신섬유 케이블을 연결하여 관측 자료를 실시간(real-time) 또는 준실시간(near real-time)으로 상관기 센터에 전송할 수 있다. 이것을 e-VLBI (electronic VLBI 또는 electronic transmission of VLBI)라고 한다. e-VLBI가 기존의 VLBI에 비하여 과학적 및 기술적으로 가지는 장점들은 다음과 같다(Kim and Kim, 2009).

(1) 관측 전과 관측 중의 시스템의 빠른 진단 및 수정: 종래의 VLBI 관측은 상관처리 된 관측자료 처리 후에야 관측과정 중 시스템의 이상 유무 및 관측자가 설정한 관측조건의 적합성을 확인할 수 있다. 하지만 e-VLBI는 각 망원경들로부터 관측 자료를 실시간 또는 준실시간으로 전송하여 상관처리 할 수 있기 때문에 기기의 오작동과 시스템 상태의 확인 및 잘못된 관측설정에 대한 즉각적인 확인 및 교정이 가능하다. 따라서 성공적인 관측이 수행 되도록 해준다.

(2) 고감도(high sensitivity): 기존 VLBI 관측이 자기 테이프나 하드 디스크의 저장용량 한계에 따라 관측 용량이 제한되는 것과는 다르게, e-VLBI 관측은 인터넷 망의 전송 대역폭에 따라서 관측용량이 제한된다. 수 Gbps급의 대용량의 자료전송이 가능해지면서 관측대역폭을 광대역으로 넓힐 수 있어 이전보다 훨씬 고감도의 측정이 가능하다. 일반적으로 VLBI의 감도는 데이터 전송률의 제곱근에 비례한다 (Thompson et al., 2001; Sasao and Fletcher, 2012).

(3) 관측 결과에 대한 빠른 판단 및 수반되는 추적 관측 또는 ToO 관측에의 결정: e-VLBI 관측은 실시간 자료 확인이 가능하므로 격변광 천체의 추적관측 및 ToO 관측 판단 여부가 용이하다. 반면에 기존의

VLBI 관측에서는 앞서 언급했듯이 모든 데이터의 집합 및 상관처리 과정까지의 시간이 빠르면 수 주에서 몇 달까지 걸렸다. 따라서 특히 격변광 천체(예: 초신성, 마이크로퀘이사 등)처럼 그날그날의 물리적 변화를 관찰하여 그 다음 날의 관측 여부를 결정해야 하는 경우, 관측의 결과를 신속하게 알 수 없기 때문에, 즉각적인 추적 관측 또는 ToO 관측을 요구할 타당성을 얻기 힘들고, 그로 인해 격변 천체현상을 추적하는데 있어서 중요한 기회를 놓치게 된다.

(4) 낮은 가격(경제성): e-VLBI는 값비싼 대용량의 자기 테이프나 하드 디스크가 필요하지 않기 때문에 기존의 VLBI 시스템을 운용하는 것에 비해 비용을 낮출 수 있다.

이러한 e-VLBI 관측의 장점들은 원활한 자료의 송수신을 바탕으로 하기 때문에 광대역의 안정적인 인터넷망이 뒷받침되어야 한다.

### 국내외 네트워크 현황

국내 초고속 연구 및 교육망에는 크게 국가과학기술연구원(KREONET: Korea Research Environment Open Network)과 미래네트워크 연구 시험망(KOREN: Korea Advanced Research Network)의 두 가지가 있다. KREONET은 1988년부터 교육과학기술부 지원하고 한국과학기술정보원(KISTI)이 관리하는 국가 R&D 연구망으로서 주로 과학기술 정보자원, 슈퍼컴퓨팅, 그리드, e-Science 응용 분야 등의 연구자원을 위한 네트워크 인프라를 지원한다(KREONET homepage). KREONET은 서울부터 제주도에 이르기까지 전국 16개 지역망 센터로 구성되어 있으며, 수 내지 수십 Gbps망을 지원한다. KREONET은 50여개의 1 Gbps급 회선 뿐만 아니라, 대전의 대덕 연구단지에 7개 정부출연기관 및 대학교가 참여하는 10 Gbps급의 대덕 첨단 과학기술연구망(SuperSiReN)이라는 첨단응용연구망 서비스를 제공하고 있다. 국제적으로는 글로리아드(GLORIAD) 프로젝트가 있는데, e-Science가 글로벌 사이언스 게이트웨이(global science gateway) 역할을 하도록 세계 20여 개국의 300여개 기관이 참여하고 있다. 2005년 8월에 개통하여 미국, 중국, 러시아 등과 함께 한국이 핵심 국가로 참여하고, 10 Gbps급 광통신의 연결을 목표로 하고 있다. 글로리아드 코리아(GLORIAD-KR)를 통하여 홍콩, 중동, 유럽 및 미국으로의 연결망을 지원하고 있다.

KOREN은 방송통신위원회가 지원하고 한국정보화진흥원(NIA)이 관리하는 미래 네트워크(future network) 관련 기술 및 첨단 응용분야 연구개발 등에 관련된 비영리 선도시험 네트워크 인프라를 지원한다. KOREN은 서울, 수원, 대전, 광주, 대구 및 부산 등 전국 6개 도시를 10~20 Gbps로 연결하고 있다(KOREN homepage 1). KOREN은 상용망에서는 할 수 없는 네트워크의 상호연동, 대용량 응용서비스, 기가급 회선 서비스, 국제연구망과의 연동 등을 지원하고 있다. 국제적으로는 해외 연구기관들과 국제 공동연구 및 정보교환을 위한 인프라를 제공하고 있는데, 중국, 일본, 미국, 호주, 동남아시아 국가들 및 30여개의 유럽 국가들과 연계되어 있다. 국제적으로 연동되어 있는 대표적인 국제연구망에는 APII (Asia Pacific Information Infrastructure)와 TEIN (Trans-Eurasia Information Network)이 있는데, APII 테스트베드는 1998년부터 한·일간을 시작으로 싱가포르, 미국, 중국 등에 연결되어 있다. TEIN 망에 있어서는 현재 TEIN3가 한국과 유럽, 일본, 미국 및 캐나다를 수에서 수십 Gbps로 연결하고 있다. 일본과는 JGN2plus (Japanese Gigabit Network) 및 SuperSINET 등과 10 Gbps급으로 연결되어 있다(KOREN homepage 2).

## 연구 방법

### e-VLBI와 KOREN을 이용한 최초의 한일간 천문관측 자료 전송실험의 취지

실시간 e-VLBI 관측, 자료처리 및 영상 구현이 성공하기 위해서는 여러 단계의 과정들이 필요하다. 우선 e-VLBI가 이루어지기 위해서는 대용량의 자료전송이 얼마나 빠른 속도로 안정적으로 이루어 질 수 있는가에 대한 검증절차가 필요하다. 이에 가장 초보적인 방법으로 이미 관측된 자료를 가지고 전송 실험을 하는 것이다. 사용한 연구망의 안정적인 자료전송 속도를 측정함으로써 보낼 수 있는 자료의 양이 정해지고, 그에 따라 각 망원경에서 기록할 수 있는 관측자료 용량을 알 수 있게 된다. 다음 단계로는 각 관측소에서의 실시간 관측 자료를 중앙처리장치로 전송해서 상관처리까지 실시하는 것이다. 그 다음으로는 각 관측소의 실시간 관측 자료를 실시간으로 중앙처리장치에 전송하고(제 1차 e-VLBI), 실시간 상관처리를 한 후, 실시간으로 원하는 곳에 자료전송(제

2차 e-VLBI)하는 방법이다. 이 방법은 이미 유럽의 초장기선 간섭계인 EVN (European VLBI Network)를 이용한 e-EVN에서 일부 활용되고 있으며(EVN homepage), 클라이언트인 관측자 측에서는 대용량 자료 수신이 가능해야 한다. 궁극적인 e-VLBI의 목표는 실시간으로 전송된 관측자료(raw data)를 실시간 상관처리하고, 다시 스크립트를 이용하여 상관처리 자료를 실시간으로 자료를 처리한 후, 역시 실시간으로 영상 구현을 하는 것이다. 현재 일부 시험관측에서 이와 같은 실시간 관측에서 실시간 영상 구현까지의 과정을 실현하고 있다(예: JIVE homepage 1).

국내에서는 이미 대륙 간 자료전송 실험이 입자물리학 등의 분야에서는 활발하지만 천문학 분야의 e-Science 실험은 초보적인 단계에 있다. 우리는 그 첫 단계로서 이미 관측된 자료를 전송하는 가장 초보적인 단계의 실험을 실행하였다. 일본의 VLBI로 관측하여 중앙처리장치에서 상관 처리한 자료를 한국으로 보내는 가장 초보적인 자료 전송 실험이다. 본 실험은 한국의 NIA와 일본의 정보통신연구기구(NICT: National Institute of Information and Communication Technology)간에 실행된 KOREN을 이용한 한·일간 최초의 천문분야 관측자료 전송 실험이다.

### 천문관측자료 전송실험에 사용한 소프트웨어들

이번 실험에는 대용량 천문관측 자료의 실시간 전송에 많이 쓰이는 대표적인 프리웨어(free ware)인 Iperf와 Tsunami 등을 사용하였다. Iperf는 네트워크 링크의 성능과 대역폭(bandwidth)를 측정하기 위한 네트워크 검진 수단(testing tool)이다. Iperf는 TCP (transmission control protocol)와 UDP (user datagram protocol)의 자료흐름(data stream)을 만들어 내고, 전송하는 네트워크의 스루풋(throughput)을 측정한다. 클라이언트와 서버의 기능을 모두 가지고 있어 둘 사이의 스루풋(throughput)을 한 방향 또는 양방향에서 모두 측정할 수 있는 양방향 플랫폼(cross-platform) 기능이 있다. 사용자가 발신자로부터 수신자 컴퓨터로 전송되는 자료의 실체인 데이터그램(datagram)을 명시하여 그에 따른 스루풋과 패킷 손실(packet loss)을 얻을 수도 있다. Iperf의 아웃풋(output)으로는 보통 전송된 데이터의 양과 측정된 스루풋을 시간에 따라 기록한 그림(timestamped report)이 있다. 이 소프트웨어는 C++을 기반으로 National Laboratory for Applied Network Research에 의하여 지원되며 구동



체계(OS)는 리눅스와 윈도우 모두 가능하다. 공개된(open) 소프트웨어이므로 사용자에게 의한 개량이 가능하다. 또한 사용자가 네트워크 검진을 위해 쓰는 여러 가지 매개변수 조작이 가능하여 네트워크의 최적화(optimization)나 튜닝(tuning)을 할 수 있다. 사용법이 비교적 간단하고 웹에서도 다양하게 소개되어 있으므로 굳이 네트워크 전문가가 아니더라도 기본적인 구동은 쉽게 할 수 있다(예: Iperf homepage).

다음으로 Tsunami UDP 프로토콜은 대용량 자료를 물리적으로 멀리 떨어진 사용자와 클라이언트 사이에서 1 Gbps 이상의 고속으로 주고받을 때 사용하는 TCP 제어 및 UDP 데이터를 사용하는 자료 전송 프로토콜이다. 2002년 인디애나 대학교의 Pervasive Technology Labs에서 개발되었으며, 현재는 핀란드의 Metsähovi 전파 관측소에서 관리하고 있다. 공개된 소스 프로그램이므로 누구나 개발에도 참여할 수 있다(Tsunami homepage). Tsunami는 리눅스와 유닉스만 사용 가능하다. Tsunami는 현재 사용되고 있는 다른 UDP를 기반으로 하는 비슷한 프로토콜들에 대하여 여러 가지 장점들이 있다. 첫 번째로 자료의 일관성을 유지하는 데이터 무결성(data integrity)을 얻는 디폴트 프라이어리티(default priority)를 가지고 데이터를 전송한다. 따라서, 유사한 UDP 기반의 프로토콜들보다 더 안정적이다. 두 번째로 Tsunami는 사용자의 공간에 심어짐으로써 그 어떤 리눅스 커널 확장에도 좌우되지 않는다. 따라서 보통의 사용자 또는 게스트 어카운트(guest account)에서도 컴파일 할 수 있어서, 루트 프리빌리지(root privilege)가 필요하지 않다. Tsunami에서는 자료 전송에 대한 전체적인 세팅이 클라이언트에 의하여 제어될 수도 있다. 클라이언트는 마치 ftp 명령어를 쓰듯이 유사하게 명령어들을 손쉽게 사용할 수 있다는 장점이 있다.

### 최초의 KOREN을 이용한 한일간 대용량 천문관측 자료 전송 실험

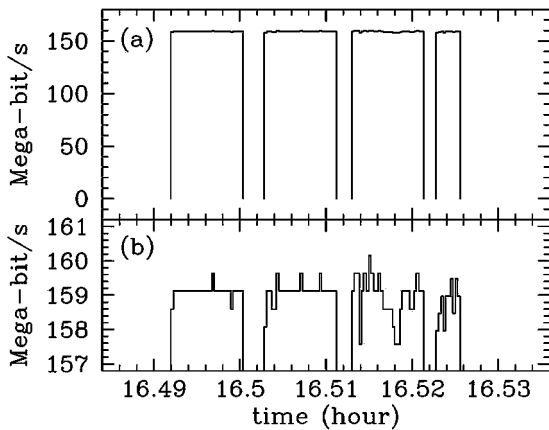
이번의 준실시간 e-VLBI 실험의 개요는 다음과 같다. 자료 전송에 쓰인 자료는 일본국립천문대(National Astronomical Observatory of Japan)가 보유한 VLBI 시스템인 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry)를 이용하여 관측한 메이저 관측 자료이다. VERA는 Ishigaki-jima, Ogasawara, Iriki 및 Mizusaw의 4개의 사이트에 각각 20미터 전파 망원경이 위치해 있다(VERA homepage 1). 각 사이트의 관측 자료는 우편

으로 보내져서 일본국립천문대의 본부인 Mitaka 캠퍼스에 있는 상관기 센터에서 처리되었다. 이렇게 전형적인 VLBI 관측의 과정을 거쳐 얻어진 자료를 가지고 지난 4월 30일에 자료 전송 실험을 실행하였다. 상관 처리된 자료는 Mitaka 캠퍼스에서 1시간 정도 걸려 일본 측에서 인편(차편)으로 NICT의 Koganai 캠퍼스로 실험 당일 날에 가져왔으며, 이미 자료 전송 준비 중이던 일본의 NICT의 전산실에 전송할 자료가 도착한 즉시 자료 전송 실험이 실행되었다. 일본 NICT Koganai 캠퍼스와 서울의 NIA간의 JGN2plus와 KOREN을 이용한 실험은 오전 10시부터 오후 5시까지 실시되었다. 일본 NICT에서 10 Gbps 망을 통하여 부산, 대전을 거쳐 서울의 NIA로 전송되었다. 이번 실험은 KOREN을 이용한 최초의 천문관측 자료 전송 실험으로 NIA에 보고되었다.

## 연구 결과 및 해석

실험 당시 NIA 전산실에는 원인 모를 문제로 인하여 우리의 실험 시간 내의 10 Gbps급의 자료 송수신 복구가 불가능하였기 때문에, 만일에 대비하여 지참한 노트북을 이용한 1 Gbps급 송수신 하드웨어 사용만 가능했다. 노트북은 델(DELL)사의 XPS M1530 였는데, 프로세서는 Intel (R) Core (TM)2 Duo CPU 에 2.6 GHz이고, 64 비트로 운영되며, 메모리는 4 GB이다. Iperf와 Tsunami 소프트웨어의 운용 및 자료 전송 실험은 모두 리눅스에서 시행하였다. 내장된 이더넷(Ethernet)의 사양이 100 Mbits/s이어서 외부 슬롯(slot)에 1 Gbit/s PCI 외장 카드(C-210 Express Card, 강원전자주식회사 홈페이지)를 장착하였다. 상관처리전의 자료는 수 백 GB급이지만, 우리는 상관 처리가 끝난 수 십 GB의 자료를 가지고 전송 실험을 하였으므로, 준비한 500 GB의 외장 하드로 충분하였다. 결과적으로, NICT에서는 10 Gbps급으로 자료가 전송 되었으나, 실제로는 1 Gbps급으로 자료를 전송 받았으며, 노트북과 외장 하드디스크의 속도(5,400 rpm)로 인하여 자료전송이 느려진 효과도 나타났다.

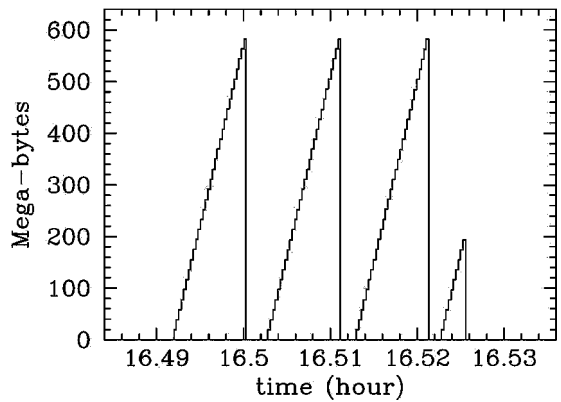
자료 전송 실험 도중에 NIA 또는 NICT 쪽에서의 다른 자료 전송실험들로 인한 교통체증(traffic jam) 현상이나 인터넷 자체의 끊김 현상이 자주 발생하여 3-4번의 연속적인 전송만을 반복적으로 수행할 수 있었다. 이러한 어려움으로 인하여 우리는 일본 측에



**Fig. 5.** Result of the transmission rate for the first Japan-Korea data transfer experiment between NIA and NICT using JGN2plus and KOREN. Fig. 5(b) is a zoomed-up version of Fig. 5(a) to display the detailed behavior near the maximum rate. The horizontal axis represents time in units of 24 hours, and each small tick for time is 7.2 s. The vertical axis is transmission rate in units of Mega-byte/s. The duration of transmission of the first three experiments is 30 s, while the data was transferred for 10 s for the fourth transmission.

30초 또는 그 이하의 간격으로 자료를 전송할 것을 요청하고 실험을 수행하였다. Fig. 5는 이번 실험의 대표적인 결과 중 하나이다. 한동안의 끊김 현상이 지속된 후 16.492시에 자료 전송이 다시 재개되어 NICT에서 30초에 걸쳐 각각 세 번, 10초에 걸쳐 한번의 자료 전송 실험을 수행하였다. Fig. 5b에서 보듯이 일단 전송이 성공적으로 수행되면 초당 159.1 Mega-bytes를 중심으로 99.1-100.7%의 값의 범위를 유지하며 비교적 안정된 자료 전송이 이루어졌다. Fig. 6은 자료를 전송한 단위시간 당 전송 받은 자료의 양을 측정한 것이다. 처음 네 번의 30초 동안의 실험에서는 모두 약 582 Mega-bytes 정도를, 마지막 10초 동안의 실험에서는 약 200 Mega-bytes의 자료를 전송받았음을 알 수 있다.

이번 실험에서 원래는 관측 자료의 전송과 동시에 일본국립천문대의 VERA관측소 및 전파연구부에서 제공한 실시간 영상 구현용 소프트웨어를 사용하여 실시간 영상 구현도 시도하려 하였다. 그러나 불규칙적인 자료전송 시간으로 인하여 제공된 소프트웨어에서 필요로 하는 자료의 적분시간의 고정이 용이하지 않아서 실시간 영상 구현은 실시하지 않았다.



**Fig. 6.** Total amount of data transferred in each data transfer experiment, presented in Fig. 5, in the first Japan-Korea data transfer experiment between NIA and NICT using JGN2plus and KOREN.

## 토론 및 제언

### 국외의 실시간 e-science 실험과 교육현장에서의 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동의 적용 사례들

대륙간 e-VLBI 관측에서 네덜란드에 있는 JIVE (Joint Institute for VLBI in Europe)가 중요한 역할을 하고 있는데 그 이유는 유럽이나 대륙 간 e-VLBI 관측 자료의 상관처리가 이곳에서 이루어지기 때문이다. 2004년 9월 22일 미국과 유럽의 여러 나라 간의 20시간에 걸친 e-VLBI 실험에서 실시간 영상을 얻는데 성공하였는데(Internet2 homepage), 이 관측에서 관측 자료가 모아져 상관처리가 되어 영상을 얻은 곳이 바로 JIVE였다. 이 실험에 참여한 유럽의 각 전파 망원경들은 각 나라의 연구망(advanced research network)에 연결되어 있고, 유럽을 연결하는 GEANT, pan-European research network와 네덜란드의 SURFnet을 통하여 각 전파 망원경당 32 Mbps로 데이터가 JIVE로 송신되었다. 이 관측에 참여한 푸에르토리코의 Arecibo 망원경의 관측 자료는 AMPATH와 Internet2의 Abliene Network를 써서 유럽으로 전송되었다. 취합된 자료들은 모두 9 Tera-bytes로 실시간으로 상관처리 되어 최종 분석 자료가 실시간으로 연구자들에게 전송되어 실험이 성공적으로 종료되었다.

2007년 8월 29일에 실시된 호주-중국 및 유럽-중국 간의 대규모, 긴 기선들 간의 e-VLBI 실험들이 EXPReS (Express Production Real-time e-VLBI

Service) 프로젝트의 일부로 수행되었다. EXPReS 프로젝트는 EU에 의하여 지원되는 유럽 대륙 및 대륙 간의 거대 스케일의 천문 기기에 의한 실험 및 관측을 수행하는 e-VLBI 프로젝트로서 지구상의 각종 초고속 통신망을 이용하는 것을 골자로 한다(EXPReS homepage 1). 이 실험에서 유럽-중국 간의 e-VLBI 관측은 중국의 Sheshan 전파 망원경과 함께 유럽에서는 영국 Merlin VLBI 전파 망원경계의 하나인 Darnhall, Jodrell Bank, 스페인 국립 천체물리 연구소의 Medicina, 폴란드 니콜라스 코페르니쿠스 대학교 Torun 전파 망원경 및 네덜란드의 Westerbork 전파 간섭계의 망원경들이 사용되었다. 호주-중국 간의 e-VLBI 실험에는 호주의 Morpa와 중국의 Sheshan 전파 망원경이 사용되었다. 중국 Sheshan의 관측 자료는 중국의 국가 연구 및 교육망인 CSTNET을 시발점으로 하여 시베리아를 걸쳐 가는 ORIENT와 TEIN2망들을 통해 유럽 대륙의 GEANT2 네트워크를 거쳐 최종적으로 네덜란드의 SURFNet망을 따라 JIVE에 관측 자료가 송신되었다. 두 실험 모두 실시간으로 중국 시안에서 개최된 제 24차 APAN (Asia-Pacific Advanced Network) 미팅에서 시연되었다(APAN homepage).

메사추세츠 공과대학교(MIT)의 Haystack 관측소는 e-VLBI 실험에 있어 개척자와 같은 역할을 한 곳이다(Whitney and Ruszczyk, 2006). 중요한 e-VLBI 실험들은 2002년 Haystack의 Westford 전파 망원경과 NASA의 GGAO (Goddard Geophysical and Astronomical Observatory)간의 800 Mbps 준실시간 VLBI 실험을 시작으로 같은 해 Westford와 일본 Kashima간의 최초의 대륙 간의 20 Mbps e-VLBI 실험, GGAO와 Haystack 간의 288 Mbps 실시간 e-VLBI 실험 등이 있다. 2003년에는 Westford와 일본 Kashima 간에 최초의 24시간 e-VLBI 실험을 수행하였다. 2004년에는 Westford와 스웨덴의 Onsala 간의 최초의 실시간 e-VLBI 실험을 수행하였고, 2005년에는 Westford와 Onsala 간의 최초의 실시간 256 Mbps급 e-VLBI를 수행하여 실시간 프린지(fringe)를 얻는데 성공하였다. 같은 해 일본의 Tsukuba와 Kashima에서 Haystack으로 256 Mbps급으로 15일 연속 e-VLBI 자료를 연속으로 송신 받는데 성공하였다. 역시 같은 해 Westford-GGAO-Onsala간의 512 Mbps급 실시간 e-VLBI 실험에서는 실시간으로 결과를 일반인들에게 공개하였다. 2007년에는 일본 NICT

와 스웨덴의 Onsala 관측소간의 128 및 256 Mbps급 e-VLBI 데이터 전송 실험도 성공적으로 수행되었다.

갈릴레이 갈릴레오가 직접 제작한 망원경으로 천체를 관측한지 400주년을 기념하여 국제천문연맹(International Astronomical Union)과 유네스코(UNESCO)가 일반인들에게 우주에서의 스스로의 위치와 천체 발견의 기쁨을 느끼게 하려는 취지로 세계 135개국이 참여한 2009 세계 천문의 해(International Year of Astronomy 2009: IYA2009) 행사는 ‘우주, 당신을 기다립니다’(The Universe, Yours to Discover)라는 공식 표어를 가지고 2009년에 다양한 행사들을 개최하였다(세계천문의 해 홈페이지). 2009 세계 천문의 해의 주요 행사 중 하나는 ‘100시간의 천문학’(100 Hours of Astronomy)이었는데, 2009년 4월 2일부터 5일에 걸쳐 전 세계 천문대들이 보유한 80개의 대형 망원경들을 연결하여 여러 가지 관측을 하고 결과를 인터넷으로 생중계하는 ‘전 세계 80대의 망원경’(Around the World in 80 Telescopes)이 바로 그것이다(백 시간 홈페이지). 이 프로그램에서는 행사기간 중 24시간 내내 세계 각국의 관측소들이 웹캠(webcam)으로 생중계되었다. 세계 각국에서는 같은 시간에 일반인들을 대상으로 각종 천체 관측 행사를 개최하였다. 여기에는 ENV이나 VLBA와 같은 대형 전파 관측 장비들도 포함되었다(예: IYA homepage; EXPReS homepage 2; USTREAM homepage).

같은 행사 기간 중인 2009년 4월 3일과 5일에는 일반인들을 대상으로 한다는 같은 취지에서의 대규모의 실시간 e-VLBI 관측 실험도 실시되었다(European VLBI Network Newsletter, 2009). 이 실험에는 프에루토리코 아레시보(aareceb)의 305 미터 초대형 전파 망원경을 비롯하여 영국의 Cambridge, 독일의 100 미터 Effelsberg 망원경, 타스매니아의 Hobart 망원경, 영국 Jodrell Bank 관측소의 Jb2, 스페인의 Medicina, 핀란드의 Metsähovi, 호주의 Morpa, 스웨덴의 Onsala, 중국의 Sheshan, 칠레의 TIGO, 폴란드의 Torun, 네덜란드의 Westerbork 및 독일의 Yebe 등 14개의 전파 망원경들이 동원되었다(Fig. 7). 관측은 네덜란드의 JIVE에 의하여 지휘되었으며 암스테르담의 NEMO Science Center에서 실시간으로 생중계되었다(JIVE homepage 2, EXPReS homepage 3). JIVE에서는 동시에 과학 교육과 과학 대중화를 위한 VLBI 소개 사이트도 개설하여 학생들 및 일반인들이



**Fig. 7.** Telescopes used in the IYA 2009 project. 14 telescopes in the World participated in the e-VLBI observations as a part of ‘Around the World in 80 telescopes, Live 24-hour Research Observatory Webcasts.’ (JIVE homepage 3).

VLBI 및 e-VLBI에 대하여 알기 쉽도록 과학 대중화 사이트도 개설하였다(JIVE homepage 2). 과학탐구활동과 대중화를 위한 가상 전파 천문학자(Virtual Radio Astronomer)라는 프로그램도 진행되었다(JIVE homepage 3). 이번 e-VLBI 실험은 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동을 목표로 하는 사상 최대 규모의 실시간 e-VLBI 실험이었다.

Haystack 관측소는 보유하고 있는 전파 망원경들과 장비들을 이용하여 초·중·고 각급 학교의 과학탐구활동 및 과학 대중화를 위한 여러 가지 활동을 활발하게 하고 있다(Haystack homepage). 고등학생, 교사 및 대학생들을 위한 전문 과정으로는 2 미터급의 소형 전파 망원경(Small Radio Telescope: SRT) 및 37 미터급 전파 망원경을 이용한 단일경 또는 한 기선(one-baseline) 간접계 관측을 실시하여, 실시간으로 관측, 자료 분석 및 영상 구현을 해보는 과학탐구활동을 한다(Fig. 8). 희망하는 교사들에게는 SRT를 무상으로 제공하여 그들이 학교에서 직접 학생들과 함께 과학탐구활동을 할 수 있도록 돕고 있다. 보다 어린 학생들을 대상으로는 여러 가지 전파 관측을 실현해 보여준다. SRT를 이용한 Haystack의 과학탐구활동 중 일부는 이미 국내의 몇몇 과학 고등학교에서도 실시하고 있다(Park et al., 2006).

국외의 천문학 및 천체물리학 분야의 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동은 물론 전파 천문학 분야에 국한되어 있지는 않다. 예를 들면, 미국항공우주국



**Fig. 8.** Demonstration of the remote observing the 37-m radio telescope by a high school teacher in the Haystack Observatory (Haystack homepage).

(NASA), 유럽우주기구(ESA) 및 일본국립천문대(NAOJ) 등의 천문 관련 기관들에서는 전파로부터 고에너지 감마선에 이르기 까지 세계 각국에서 진행 중인 다파장 천문 관측 및 이론에 대하여 학생, 교사 및 일반인들을 위한 다양한 프로그램들이 마련되어 있다(NAO homepage 1 and 2; NASA homepage). 1911년에 결성된 미국변광성관측자협회(AAVSO)는 다양한 종류의 변광 천체의 관측 자료를 시시각각 모아서 공개하는 기관인데, 관측 자료는 전문가들보다는 세계 각국의 아마추어 천문학자들이 제공하는 관측 자료가 더 많은 비중을 차지하고 있다. 특히 잘

알려진 바와 같이 고에너지 천체인 초신성의 발견에 있어서 아마추어 천문학자들의 역할은 아주 중요하다 (Longair, 2006). 따라서 AAVSO는 학생, 교사 및 일반인들을 위한 다양한 과학탐구활동 및 과학 대중화에 많은 노력을 기울이고 있다(AAVSO homepage). 최근에는 전문가들이 아마추어 천문학자들과의 직접 교류를 위하여 결성한 ‘아마추어 천문학을 위한 뒷마당 천문학’(Backyard Astronomy for Amateur Astronomers) 단체는 AAVSO와 연계하여 활발한 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동을 진행하고 있다 (Backyard Astronomy homepage). 한편, 전문가들의 가시광선 파장의 변광 천체 관측 연구 분야에서는 e-Science를 과학탐구활동이나 과학 대중화에 적극적으로 접목하려는 시도가 있는데 대표적인 사례 중의 하나는 미국 캘리포니아 공과대학(CalTech)에서 추진 중인 Catalina Real-Time Transient Survey(CRTS) 프로젝트를 들 수 있다(CRTS homepage). CRTS 프로젝트는 약 2,000개 이상의 초신성 폭발, 신성 폭발, 왜신성의 광폭발, 펄서, 퀘이사, 마이크로퀘이사 등의 짧은 수 초안에 격변광하는 다양한 격변광 천체들을 관측과 동시에 영상 구현하여 전문가들뿐만 아니라 일반인들도 볼 수 있도록 하는 대형 e-Science 프로젝트를 진행 중이다(Djorgovski et al., 2010). 이 프로젝트에는 천문학자, 천체물리학자들뿐만 아니라 다양한 분야의 네트워크, 소프트웨어 및 하드웨어 전문가들이 참여 중인데, 다양한 스크립트, 파이프라인 등을 개발하여 실시간 관측 자료를 처리하여 실시간으로 격변광 현상의 영상을 전문가들뿐만 아니라 일반 대중에게 보여주는 것이 주요 목표 중 하나이다.

**KOREN을 이용한 최초의 한일간 대용량 천문관측 자료 전송 실험의 의의와 학교 현장에서의 과학탐구 활동에 미칠 영향**

국내의 대표적인 초고속 연구 및 교육망인 KREONET과 KOREN은 각각 1988년과 1995년에 발족되었다. 그동안 KREONET이 슈퍼컴퓨터 사업과 연동하여 주로 과학 및 기술 분야에 주력해 온 반면에, KOREN은 차세대인터넷 기술, 기상, 의료 등의 응용 분야 연구를 지원해왔다. 자연과학 분야에서는 그동안 특히 물리학의 입자 물리학 실험 분야에서 활발하게 이루어져 왔다(조기현, 2005). 그 외에도 생명과학 및 대기과학에서도 e-Science를 구현하려는 시도가 꾸준히 진행되고 있다(곽재식과 노경태,

2005; 오재호, 2005). 천문학에서는 앞서 기술한 바와 같이 2004년부터 국제적인 e-Science의 실험이 전파 천문학의 e-VLBI 관측실험을 중심으로 활발하게 진행되고 있는 반면에, 국내에서의 활동은 걸음마 단계의 수준에 있다. 따라서 이번 실험은 대표적인 초고속 연구 및 교육 시험망인 KOREN과 JGN2plus를 이용한 최초의 한·일간 대용량 천문관측 자료의 실시간 전송 실험으로서 큰 의미가 있다.

이번 실험에서 1 Gbps망에서의 자료전송에 이용한 실험 장비들은 우리주변에서 흔히 사용되는 네트워크 장치, 노트북 컴퓨터와 외장형 저장장치가 사용되었다. 그렇기 때문에 실생활에서 접근이 쉬운 장비들의 이용으로 광대역 인터넷망을 이용하여 대용량의 자료 송수신이 가능하다는 사실을 보여주었고 있다. 또한 1 Gbps급의 망은 머지않아 상용화될 것이므로, 우리가 실험한 환경은 각급 학교가 멀지 않은 미래에 갖출 것으로 예상되는 인터넷 환경과 비슷하다. 그러므로 이러한 대용량의 천문학 자료를 이용하여 물리학과 천문학이 융합되어 교육되어야 하는 격변광 고에너지 천체 현상 관측의 실시간 영상화를 통한 흥미진진한 과학탐구활동이라는 교육적 접근이 더욱더 용이해질 것으로 예상된다.

이에 우리는 이러한 고에너지 천체 현상에 대한 실험과 그에 수반되는 초고속 대용량 자료전송을 다음과 같이 실시할 계획을 가지고 있다.

- (1) 일본의 NICT, 일본국립천문대, 가고시마 대학교, 동경의 제경과대학(帝京科學大學) 및 국내의 NIA 등과 협력하여 KOREN과 JGN2plus를 이용한 10 Gbps급의 천문관측 자료전송 실험을 다시 실시할 예정이다.
- (2) 이와 함께 1 Gbps급의 실험도 다시 실시하여 멀지 않은 미래에 곧 상용화 될 예정인 1 Gbps급 인터넷 망의 환경에서 이루어질 초·중·고 교육현장의 과학탐구활동에서도 우리가 사용하는 실시간 영상 구현 소프트웨어가 잘 작동하는지 실험을 할 것이다.
- (3) 우리는 일본의 VLBI 관측 장치인 VERA의 공개관측 프로그램에 제출한 제안서가 채택되어 앞으로 적어도 1년간은 7회에 걸쳐 하루에 8시간씩 마이크로퀘이사 및 퀘이사의 격변광 천체 현상을 관측할 예정이다(VERA homepage 2). 또한 한국천문연구원 이 보유한 VLBI 장치인 KVN (Korean VLBI Network, KVN homepage)을 이용한 마이크로퀘이사 및 페이

지의 변광 현상 관측도 매달 실시 중이다. 이러한 자료들을 관측과 동시에 실시간으로 한일 간에 전송하고 받는 실험을 반복하여 실시간 자료전송 및 실시간 영상 구현을 시도 할 예정이다.

(4) 현재 한국천문연구원 본원(대전)에는 1 Gbps급의 KOREN 및 KREONET망이 들어와 있으며, 한국천문연구원 KVN 연세사이트에는 곧 10 Gbps급 KREONET망이 들어올 예정이며, KVN 연세사이트에서 현재 예비 실험중인 e-VLBI 실험은 한국천문연구원 본원에서도 원격관측이 가능하다. 따라서 위의 1-10 Gbps급 실험들을 한국천문연구원에서도 가까운 장래에 실시할 수 있는 내용들이다. 한국천문연구원은 정기적 또는 비정기적으로 초·중·고 학생들에 대한 견학 프로그램을 실시하고 있으며, 매년 하계 및 동계 교사 천문연수를 실시하고 있다. 따라서 e-VLBI의 실시간 또는 준실시간 관측 및 실시간 영상 시연을 할 때 이와 같은 프로그램들과 접목하여 초·중·고 학생들 및 교사들을 참여시켜 e-VLBI를 이용한 천문현상의 실시간 또는 준실시간 실험 및 영상의 시연을 실시하고, 그 반응을 다각도로 조사하여 교육적 효과를 연구할 예정이다. 예를 들면, e-Science, e-VLBI 및 고에너지 천문학에 관련된 강의 및 설문 조사 등도 함께 실시하여 반응을 알아보고 이를 토대로 학습효과도 연구할 계획이다.

(5) 위에서 언급한 실험이 성공적으로 이루어지면, 머지않은 장래에 앞서 기술한 국외에서 활발하게 이루어지고 있는 과학탐구활동과 과학 대중화를 위한 실시간 실연도 할 수 있게 될 것이다. 특히 과학 고등학교의 지구과학 교과의 천문학 및 물리학 교과의 천체물리에서 다룰 수 있는 고에너지 천체들의 격변광 현상의 실시간 영상 구현을 통한 과학탐구활동의 실현이 가장 가까운 목표이다. 예를 들면, 현재 우리가 VERA와 KVN을 이용하여 수년째 관측 중인 마이크로퀘이스의 VLBI 관측을 이용한 실시간 자료전송, 자료 분석 및 영상 구현을 가장 가능성 있는 예로 들 수 있다. 마이크로퀘이스에서는 약 수 분에서 수 십 분 정도마다의 준주기적 밝기 변화가 수백 배 이상인 격변광 현상(quasi-periodic transient flaring activity)과 그에 따른 상대론적인 제트 현상이 자주 관측된다. Fig. 9는 대표적인 마이크로퀘이스 중의 하나인 SS433에서 관측된 제트의 영상이다. 그림에서 보듯이 불과 3일 만에 광속의 40%의 속도로 블랙홀 주변을 도는 강착원반에 수직한 방향으로 분출

### VLBA Images of SS433

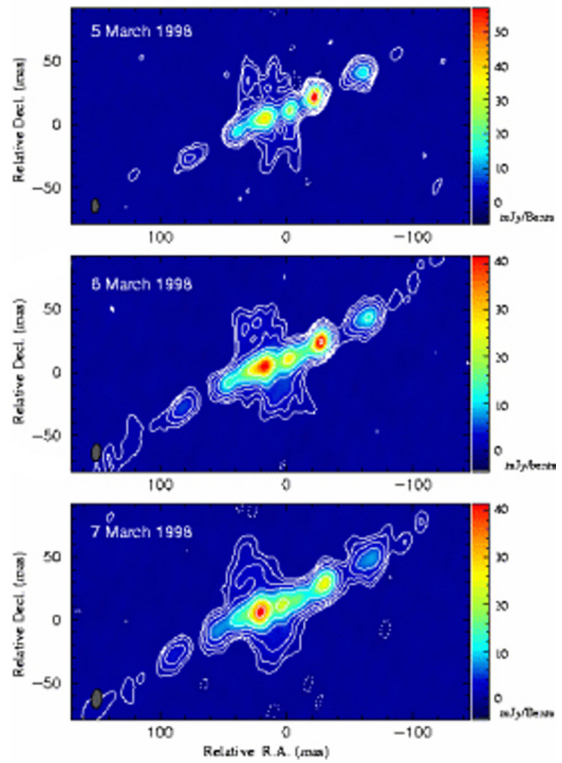


Fig. 9. VLBI images of relativistic jet propagation in a microquasar SS433 on 1998 March 5, 6 and 7 (NRAO homepage 1-3).

되는 제트의 양상이 보인다(동영상을 보면 시시각각으로 변하는 제트의 양상이 더욱 뚜렷하게 보인다 (NARO homepage 1; NRAO homepage 2). SS433의 제트는 그 주변을 둘러싸고 있는 전파 성운 W50의 성간 물질과 상호작용한다. 이러한 현상을 실시간 영상으로 보여주고, 다양한 천체 복사 기작들을 이해하기 쉽게 설명해줄 수 있다면(예: Schönfelder, 2001; Schutz, 2003; Begelman and Rees, 2010; Seward and Charles, 2010), 학생들에게 대중과학잡지에도 자주 등장하는 고에너지 천체들의 시각적으로도 변화무쌍한 격변광 현상들(예를 들면, 실시간의 초신성 폭발, 신성 폭발, 마이크로퀘이스의 초광속 제트 분출 현상)을 통하여 천문학 및 천체물리학에 대한 흥미를 유발시키는데 더욱 효과적일 것이다.

특히 (4)번의 실시간 또는 준실시간 e-Science 실험 및 격변광 천체 현상의 시연은 2009 개정 과학과

교육과정의 내용들과 다양하게 연관되어 학습효과를 얻을 수 있다. 초신성, 마이크로퀘이사 및 퀘이사의 폭발적 고에너지 현상은 다음과 같은 다양한 물리, 화학적 작용들이 일어난다.

별의 질량에 따른 별의 진화와 초신성, 초신성 폭발 과정에서의 다양한 복사 및 입자 상호작용 과정들, 초신성 폭발 잔해 및 마이크로퀘이사와 퀘이사의 제트 분출물의 성간 물질과의 물리화학적 상호작용, 우주의 중원소의 가장 중요한 공급원으로써의 초신성, 고에너지 입자 가속기구로서의 초신성, 마이크로퀘이사 및 퀘이사, 초신성 폭발과 블랙홀 및 중성자별의 탄생, 제트를 만드는 강착원반의 유체역학적 구조 등 수 많은 내용이 가득하다(Aharonian et al., 2009; Begelman and Rees, 2010; Carroll and Ostlie, 2006; Cheng and Romero, 2004; Kaler, 1998; Longair, 2006; Longair, 2011; Murthy and Wolfendale, 1993; Schönfelder, 2001; Schutz, 2003; Seward and Charles, 2010; Smith, 2007). 이와 같은 융합적 주제로서의 고에너지 현상이 2009 개정 과학과 교육과정의 지구과학, 물리 및 화학 교과에 있어서 다음과 같은 내용들과 직접, 간접적으로 연관된다. 우주와 생명 교과에 우주의 기원과 진화 소단원의 우주의 기원 영역(우주의 팽창, 허블의 법칙), 빅뱅과 기본입자(기본입자, 양성자, 중성자, 원자핵의 형성), 원자의 형성 영역(수소와 헬륨 원자), 별과 은하 영역(별의 탄생과 진화, 무거운 원소의 합성, 은하의 구조, 성간 화합물). 물리 I 교과에서는 시공간과 우주 단원의 시공간의 새로운 이해 소단원(중력의 발견, 상대성이론, 블랙홀, 4가지 상호작용과 기본입자), 물질과 전자기장 단원의 물질의 구조와 성질 소단원(에너지 준위와 빛의 방출), 정보와 통신 단원의 소리와 빛 소단원(초음파), 에너지 단원의 에너지의 발생 소단원(핵발전, 핵융합과 태양에너지) 및 힘과 에너지의 이용 소단원(유체의 법칙), 물리 II 교과에서는 전지와 자기 단원의 전류와 자기장 소단원(전류에 의한 자기장, 자기선속과 페러데이 법칙, 로렌츠 힘), 파동과 빛 단원의 파동의 발생과 전달 소단원(도플러 효과와 충격파), 빛의 이용 소단원(엑스선과 감마선, 마이크로파, 레이저) 등과 직접 관련된다. 특히 별의 진화와 그에 따른 초신성 폭발 및 초신성 잔해의 분산 과정은 화학과 매우 밀접한 관계가 있는데 화학 I 교과의 화학의 언어 단원(원소, 화합물, 원자, 분자, 원자량), 개성 있는 원소 단원의 주기적 성질 소단원(이온화

에너지), 화학 II에서는 다양한 모습의 물질 단원의 물질의 상태(분자 간 상호작용, 기체, 이상기체 상태 방정식) 등이 그 것이다. 지구과학 I의 천문학 단원에서는 주로 태양계와 우주탐사를 다루므로 특별히 깊은 상관관계는 없고, 지구과학 II에서는 천체와 우주 단원의 별의 특성 소단원(별까지의 거리, 별의 운동, 별의 물리량, H-R도, 별의 에너지원, 별의 내부 구조, 별의 진화), 은하와 우주 소단원(특이은하, 허블법칙)이 이러한 초신성, 마이크로퀘이사, 퀘이사 등의 고에너지 천체들의 격변광 현상을 설명할 때 들어가야 하는 내용들이다.

앞에서 언급한 바와 같이 외국의 전과 천문학 분야의 e-science를 이용한 과학탐구활동 및 과학 대중화 활동 등의 다양한 교육활동들이 활발하게 진행되고 있는 반면에, 국내에서는 소구경 광학 망원경을 이용한 극히 제한된 교육활동이 주를 이루어 왔다. 국가적으로 추진 중인 상용화된 수 Gbps급 인터넷 망이 현실화 되면, 천문학 및 천체물리학에서의 전파에서 감마선에 이르는 다양한 파장에 걸친 소형 및 대형 천문 기기를 이용한 관측 자료의 e-Science를 이용한 실시간 영상화가 초·중·고 과학탐구활동 및 과학대중화에 미칠 영향력은 소구경 광학 망원경이 주를 이루는 현재와 비교할 때 접할 수 있는 대상과 현상의 폭이 넓어지는 만큼, 그 파급 효과가 클 것이다. 그 동안 전문가들만 공유하던 아주 짧은 시간에 수천만 배 이상의 밝기가 변하는 초신성 폭발, 펄서의 맥동 및 거대 펄스, 블랙홀 및 중성자별 마이크로퀘이사의 수십 분 정도마다의 격변광 등의 관측 자료를 일반인들도 실시간으로 접할 수 있다는 것은 대중의 흥미를 유발 수 있는 요소가 될 것으로 예측된다. 한편, 과학과 교육과정에 있어서는 대중 과학 잡지에 자주 등장하는 고에너지 천체의 격변현상들의 e-Science를 이용한 영상 구현은 ‘첨단 과학 소개를 통한 과학에 대한 흥미 제고’라는 2009 과학 과목 개정의 방향에서 강조하는 ‘언론매체에서 다루는 현대 과학의 내용은 매우 광범위한데 반하여, 현재의 교육과정에는 이러한 내용이 매우 부실하다’(정진수와 오원근, 2011)는 취지를 적극 살릴 수 있다. 우리가 추진 중인 실시간 자료전송 및 영상 구현 실험이 한 단계씩 차례차례 성공하여 노후우가 축적되면, 머지않아 국내의 천문 관측 장비와 더불어 e-Science의 구현을 위한 소프트웨어를 이용하여 미국의 CRTS 프로젝트처럼 웹사이트를 이용한 초·중·고 과학탐구

활동 및 과학 대중화를 위한 활동을 실현할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

최초의 미래네트워크 연구 시험망(KOREN)을 이용하여 NIA와 NICT간의 한·일 간 KOREAN 및 JGN2plus을 이용한 대용량 천문관측 자료전송 실험을 가능하게 해준 한국정보진흥원, NICT, 가고시마대학교 및 일본국립천문대 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 강원전자주식회사 homepage: <http://www.terawork.co.kr> (검색일: 2012. 3. 2.)
- 강희종, 2011, e-Science 추진동향 및 시사점. 과학기술정책, 21, 110-121.
- 곽재식, 노경태, 2005, 생명과학과 e-Science. 물리학과 첨단기술, 10, 24-29.
- 백 시간 homepage: <http://www.100hoursofastronomy.org> (검색일: 2012. 3. 3.)
- 서태오, 류성룡, 2009, 디지털 카메라를 이용한 학교용 분광기 제작 및 태양 스펙트럼 사진 분석에 관한 연구. 새물리, 58, 171-178.
- 세계천문의 해 homepage: <http://www.astronomy2009.org/> (검색일: 2012. 2. 25.)
- 신명기, 2007, 미래인터넷 기술 및 표준화 동향. 전자통신동향분석, 22, 116-128.
- 오재호, 2005, 대기과학과 e-Science. 물리학과 첨단기술, 10, 30-35.
- 정진수, 오원근, 2011, 2009 고등학교 교육과정의 융합과학에서의 물리학 개념의 적용. 새물리, 61, 1091-1097.
- 조금원, 이상동, 이지수, 2005, 국내외 e-Science 현황 및 동향. 물리학과 첨단기술, 10, 10-16.
- 조기현, 2005, 고에너지 물리학과 e-science. 물리학과 첨단기술, 10, 17-23.
- AAVSO homepage: <http://www.aavso.org/> (검색일: 2012. 2. 11.)
- Aharonian, F.A., Hofmann, W., and Rieger, F., 2009, High Energy Gamma-Ray Astronomy: Proceedings of the Fourth International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy 2009, AIP Conference Proceedings 1085, American Institute of Physics, New York, USA.
- Aladin homepage: <http://aladin.u-strasbg.fr> (검색일: 2012. 2. 13.)
- APAN homepage: <http://www.apan.net> (검색일: 2012. 2. 22.)
- Backyard Astronomy homepage: <http://www.backyard-astro.com/> (검색일: 2012. 2. 21.)
- Begelman, M. and Rees, M., 2010, Gravity's Fatal Attraction, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 312 p.
- Carroll, B.W. and Ostlie, D.A., 2006, Introduction to Modern Astrophysics, 2nd edition. Benjamin Cummings, San Francisco, USA, introduction.
- Cheng, K.S. and Romero, G.E., 2004, Cosmic Gamma-ray Sources. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Germany, chapter 9.
- CRTS homepage: <http://crts.caltech.edu/> (검색일: 2012. 2. 12.)
- Djorgovski, S.G. et al., 2010, Exploring the Variable Sky with the Catalina Real-time Transient Survey, The First Year of MAXI: Monitoring Variable X-ray Sources. <http://maxi.riken.jp/FirstYear/> (검색일: 2012. 2. 20.)
- European VLBI Network Newsletter, 2009, 23. <http://www.oan.es/evnnews/evnnews23.html> (검색일: 2012. 2. 23.)
- EVN homepage: <http://www.evlbi.org/evlbi/> (검색일: 2012. 2. 21.)
- EXPRes homepage 1: <http://www.express-eu.org/> (검색일: 2012. 2. 21.)
- EXPRes homepage 2: <http://www.express-eu.org/iya2009> (검색일: 2012. 2. 21.)
- EXPRes homepage 3: <http://www.express-eu.org/iya2009> (검색일: 2012. 2. 21.)
- Haystack homepage: [http://www.haystack.mit.edu/hay/Haystack\\_Brochure.pdf](http://www.haystack.mit.edu/hay/Haystack_Brochure.pdf) (검색일: 2012. 2. 21.)
- Hey, T. and Trefethen, A., 2005, 협업 물리학, e-Science와 그리드 - Licklider의 꿈을 현실로. 물리학과 첨단기술, 10, 2-9.
- Internet2 homepage: <http://www.internet2.edu/science/vlbi.html> (검색일: 2012. 3. 4.)
- Iperf homepage: <http://openmaniak.com/iperf.php> (검색일: 2012. 3. 4.)
- IYA homepage: <http://iya.express-eu.org> (검색일: 2012. 2. 12.)
- JIVE homepage 1: <http://www.jive.nl/european-vlbi-network-participate-100-hours-astronomy-live-webcast-and-e-vlbi-observations> (검색일: 2012. 2. 12.)
- JIVE homepage 2: <http://srvcies.jive.nl/evlbi> (검색일: 2012. 2. 12.)
- JIVE homepage 3: <http://www.jive.nl/european-vlbi-network-participate-100-hours-astronomy-live-webcast-and-e-vlbi-observations> (검색일: 2012. 2. 12.)
- Kaler, J.B., 1998, Stars. Scientific American Library, New York, USA.
- Kim, S.-W. and Kim, J.-S., 2009, Correction of Target Positions and Prompt Diagnostics with Electronic Very Long Baseline Interferometry. Journal of the Korean Physical Society, 55, 2151-2158.
- KOREN homepage 1: <http://www.koren.kr/koren/kor/net/networkmap.html?cate=3&menu=1> (검색일: 2012. 2. 25.)



- KOREN homepage 2: [http://www.koren.kr/koren/kor/kil/kil\\_network.html?cate=4&menu=2](http://www.koren.kr/koren/kor/kil/kil_network.html?cate=4&menu=2) (검색일: 2012. 2. 25.)
- KREONET homepage: <http://www.kreonet.re.kr/> (검색일: 2012. 2. 25.)
- KVN homepage: <http://kvn-web.kasi.re.kr/> (검색일: 2012. 2. 22.)
- Longair, M.S., 2006, *The Cosmic Century: A history of Astrophysics and Cosmology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Longair, M.S., 2011, *High Energy Astrophysics*, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Murthy, P.V.R. and Wolfendale, A.W., 1993, *Gamma-ray Astronomy*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- NAO homepage 1: <http://www.nasa.gov/home/index.html> (검색일: 2012. 2. 26.)
- NAO homepage 2: <http://www.nao.ac.jp/E/campus/> (검색일: 2012. 2. 7.)
- NASA homepage: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov) (검색일: 2012. 2. 27.)
- NRAO homepage 1: <http://www.aoc.nrao.edu/~mrupen/XRT/SS433/ss433.shtml> (검색일: 2012. 2. 20.)
- NRAO homepage 2: <http://www.nrao.edu/pr/2004/ss433/ss433.movie.gif> (검색일: 2012. 2. 20.)
- NRAO homepage 3: <http://images.nrao.edu/127> (검색일: 2012. 2. 20.)
- Osterbrock, D.E., 1995, *Founded in 1895 by George E. Hale and James E. Keeler: The Astrophysical Journal Centennial*. *Astrophysical Journal*, 438, 1-7.
- Park, Y.S. et al., 2006, *Development of Semi-VLBI System and Observation of Sun at 21 cm*. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 39, 51-56.
- Sasao, T. and Fletcher, A.B., 2012, *Introduction to VLBI Systems: Lecture Note*. Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, Republic of Korea.
- Schönfelder, V., 2001, *The Universe in Gamma Rays*. Berlin, Germany, chapter 3.
- Schutz, B., 2003, *Gravity from the ground up: An Introductory guide to gravity and general relativity*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Seward, F.D. and Charles, P.A., 2010, *Exploring the X-ray Universe*, 2nd edition. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Smith, A.W., 2007, *Multiwavelength Observations of the TeV Binary LS I +61 303*. Ph.D. Thesis, The University of Leeds, UK. [http://veritas.sao.arizona.edu/documents/Theses/Smith\\_Thesis.pdf](http://veritas.sao.arizona.edu/documents/Theses/Smith_Thesis.pdf) (검색일: 2012. 3. 3.)
- Sung, H.I., 2009, *e-Science Applications in Astronomy: Astrometry Using a Virtual Observatory*. *Journal of the Korean Physical Society*, 55, 2145-2150.
- Thompson, A.R., Moran, J.M., and Swenson, Jr., G.W., 2001, *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. New York, USA.
- Tsunami homepage: <http://tsunami-udp.sourceforge.net/> (검색일: 2012. 2. 22.)
- USTREAM homepage: <http://www.ustream.tv/recorded/1336875> (검색일: 2012. 2. 23.)
- VERA homepage 1: <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index-J.html> (검색일: 2012. 2. 12.)
- VERA homepage 2: <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/index.html> (검색일: 2012. 2. 12.)
- Whitney, A.R. and Ruszczyk, C.A., 2006, *e-VLBI Development at Haystack Observatory*. *IVS 2006 General Meeting Proceedings*, 211-215. <http://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2006/Whitney3> (검색일: 2012. 3. 4.)

---

2012년 3월 30일 접수  
 2012년 4월 12일 수정원고 접수  
 2012년 4월 19일 채택