

초고전압 투과전자현미경의 원격시범운영

김영민, 김진규, 김윤중*, 허만회¹, 권경훈¹
한국기초과학지원연구원 나노환경연구부, ¹생명화학연구부

First Remote Operation of the High Voltage Electron Microscope Newly Installed in KBSI

Young-Min Kim, Jin-Gyu Kim, Youn-Joong Kim*,
Man-Hoi Hur¹ and Kyung-Hoon Kwon¹

Division of Nano-Material & Environmental Sciences,

¹Division of Biological and Chemical Sciences, Korea Basic Science Institute,

52 Yeoeun-Dong, Yuseung-Ku, Daejeon, 305-333 Korea

(Received January 3, 2004; Accepted February 6, 2004)

ABSTRACT

The high voltage electron microscope (HVEM) newly installed in KBSI is an advanced transmission electron microscope capable of atomic resolution ($\leq 1.2 \text{ \AA}$ point to point resolution) together with high tilting function ($\pm 60^\circ$), which are suitable to do 3 dimensional atomic imaging of a specimen. In addition, the instrument can be controlled by remote operation system, named as "FasTEM" for the HVEM, which is favorable to overcome some environmental obstacles resulting from the direct operation. The FasTEM remote operation system has been established between the headquarter of KBSI in Daejeon and the Seoul branch. The server system in the headquarter has been connected with a portable client console system in the Seoul branch using an advanced internet resource, "KOREN" of 155 Mbps grade. Most of the HVEM functions essential to do remote operation are available on the portable client console. The experiment to acquire the high resolution image of [001] Au has been achieved by excellent transmission of control signals and communication with the HVEM. Real time reaction like direct operation, such as controls of the illumination and projection parameters, acquisition and adjustment of each detector signal, and electrical steering of each motor driven system has been realized in remote site. It is positively anticipated that the first remote operation of HVEM in conjunction with IT infrastructure engineering plays an important role in constructing the network based e-Science Grid in Korea for national user's facilities.

Key words : Advanced internet resource, Atomic resolution, FasTEM, High voltage electron microscope (HVEM), Remote operation

* Correspondence should be addressed to Dr. Youn-Joong Kim, Division of Nano-Material & Environmental Sciences, Korea Basic Science Institute, 52 Yeoeun-Dong, Yuseung-Ku, Daejeon, 305-333 Korea. Ph: (042) 865-3596, FAX: (042) 865-3939, E-mail y-jkim@kbsi.re.kr
Copyright © 2004 Korean Society of Electron Microscopy

서 론

국가적 첨단 공동 활용 장비로서 한국기초과학지원연구원(KBSI) 대전본원에 설치된 초고전압 투과전자현미경은 원자분해능(점분해능 1.2 Å 이하)의 구현과 고경사각 tilting 기능($\pm 60^\circ$)에 의해 시편의 원자배열 구조를 3차원적으로 관찰할 수 있는 고성능 투과전자현미경이다. 일반 저전압 및 중전압 TEM으로는 관찰하기 어려운 비교적 두꺼운 시료도 1,250 kV라는 가속전압에 의해 얻어지는 고투과력으로 생물시료로서는 약 2 μm 두께의 시료까지 관찰 가능하게 한다. 다양한 시편 홀더들의 보유로 액체 헬륨온도에서 최고 1,500도까지 시편의 온도를 조절할 수 있기 때문에 in-situ 실험도 가능하다. 이에 더하여 FasTEM이라는 원격 운영 시스템이 갖춰져 있어서 장비의 직접 운영에 따른 여러 제약을 극복할 수 있게 한다. 작업자의 직접 운영에 따른 환경 요인들의 배제로 분해능 저하를 막을 수 있고 장소의 제약을 극복한 역동적인 연구가 가능해지므로 실시간 연구결과 처리 및 전송과 쌍방향 원격리 토의 및 분석이 용이해 진다. 이러한 원격 기능은 IT 인프라 및 기술의 접목이 뒷받침되어야 실현될 수 있는데 최근 국가적 첨단 공동 활용 장비들을 하나의 network 하에 묶는 e-Science 그

리드(Grid) 구축 사업이 진행되고 있으며 장비를 현장에서 운영하는 것과 같은 가상 연구 환경이 가능해지고 있다. 이는 국가적 공동 연구시설의 활용도를 극대화시킬 수 있고 연구 생산성 또한 크게 향상시킬 수 있는 토대가 된다. 미국, 영국, 유럽, 일본 등의 정보 선진국들은 IT를 활용한 연구 개발의 고속화 및 고도화를 꾀하기 위하여 이미 그리드 인프라를 활용한 e-Science 프로젝트에 대해 집중적인 투자가 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 목적의 일환으로 prototype의 원격 운영 시스템이 보고 되었으며(Yoshida et al., 1998; Yoshida et al., 1999; Takaoka et al., 2000), 미국 샌디에고 대학의 NCMIR (National Center for Microscopy and Imaging Research)과 일본 오사카대학 초고전압 전자현미경 센터의 3MV 초고전압 투과전자현미경을 잇는 APAN (Asia Pacific Advanced Network)을 이용하여 오사카의 전자현미경을 샌디에고 대학에서 원격 운영하여 거대 뇌신경 세포를 촬영한 바 있었다(Yoshida et al., 2002). 일반적인 전자현미경을 이용한 원격 운영 시스템 구성에 대한 연구는 telescience microscopy라는 이름으로 불려져서 단일 고가의 장비에 대한 접근성을 확장하고 장비를 활용한 교육과 연구를 병행할 목적으로 미국의 일부 그룹에서 개발이 되어왔다(Fan et al., 1993; Voelkl et al., 1997). 그러나 초고전압 투과전자현미경과 같은 국가적 대형 첨단기

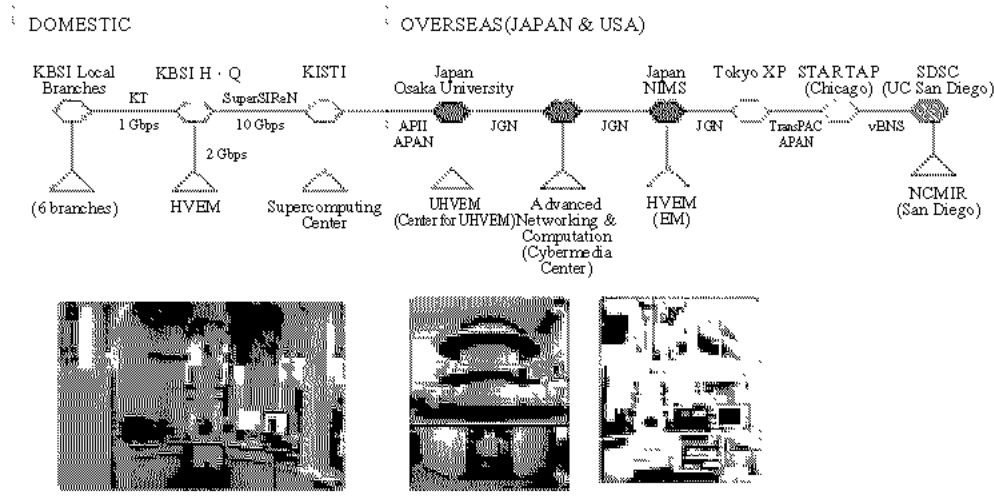


Fig. 1. A scheme of e-Science Grid construction on HVEMs for international collaboration.

기의 원격 운영 구축에 대한 연구는 유일하게 오사카 대학의 초고전압 투과전자현미경을 중심으로 이루어져 왔으며 초기에는 첨단 기기의 공동 활용을 위한 목적보다 초고전압을 사용하기 때문에 발생하는 X-ray radiation으로부터 작업자를 보호하기 위함이었다 (Ura, 1991; Takaoka et al., 1997). 현재 한국기초과학지원연구원에 설치된 초고전압 투과전자현미경의 원격 운영시스템 역시 작업자 보호 및 원자분해능 구현에 저해되는 작업자의 직접 운영을 최대한 배제하고자 FasTEM이라는 원격 운영 시스템이 도입되었다. 그러나 이러한 원격 운영 환경에 더하여 IT기술의 발달에 따른 network engineering의 급속한 기술 진보를 통해 원격리 실험실에서도 마치 장비를 직접 제어하고 있는 것과 같은 가상 운영 환경을 실현할 수 있었다. 현재는 Fig. 1에서와 같이 국내에서 e-Science 그리드 구축 사업의 모델 장비로서 초고전압 투과전자현미경에 대한 공동 활용 기반 구축사업이 추진되고 있고 국내뿐만 아니라 미국 샌디에고 대학 NCMIR의 international telescience 기반 환경으로 일본 오사카대학과 NIMS (National Institute for Materials Science)의 초고

전압 투과전자현미경과 KBSI의 초고전압 투과전자현미경을 하나의 network으로 연결하고 공동연구 기반을 구축하는 사업이 진행되고 있다.

본 연구에서는 우리나라에 최초로 설치된 초고전압 투과전자현미경의 원격 운영기능에 대한 소개와 문제점들을 파악하고 개선책을 고찰하고자 수행하였고 나아가 e-Science 그리드 구축 사업의 모델 장비로서 prototype의 원격 운영환경 구축을 위한 조건들을 모색하고자하였다. 원격 운영 점검은 원격운영지에서 운영자가 제어할 수 있는 전자현미경의 각종 기능들과 동작 상태, 각종 detector 이미지 전송 및 손실 여부, network 조건의 적합성 등의 관점에서 수행되었다.

재료 및 방법

원격운영시스템의 구성

장비의 원격운영시스템은 FasTEM이라 하여 JEOL사에서 개발한 시스템으로서 Fig. 2와 같이 초고전압 투과전자현미경(JEM-ARM 1300S)에 장착된 FasTEM

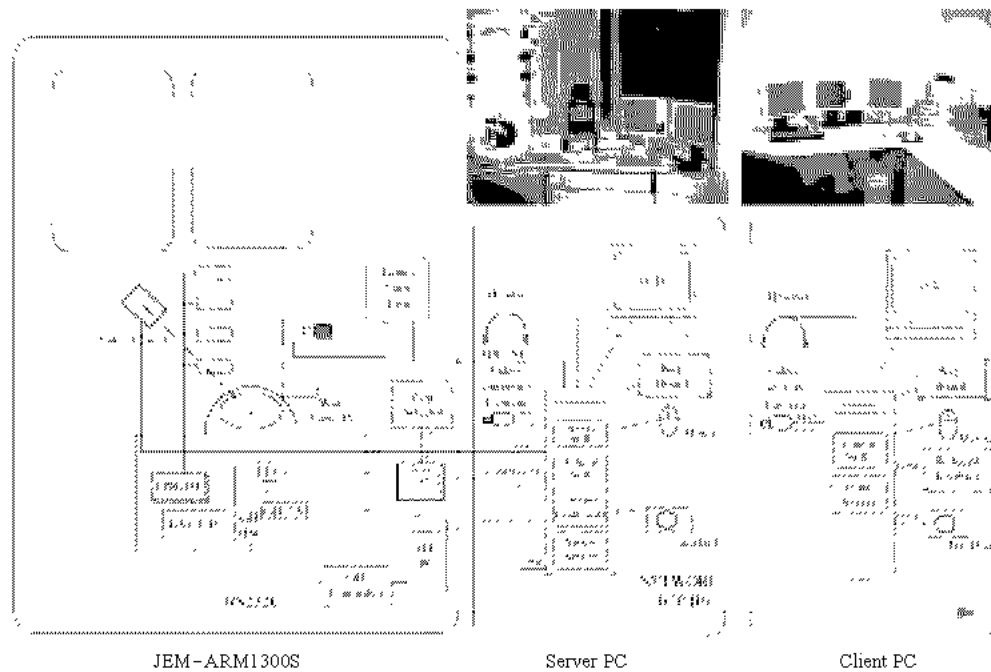


Fig. 2. Configuration of FasTEM remote operation system of JEM-ARM 1300S.

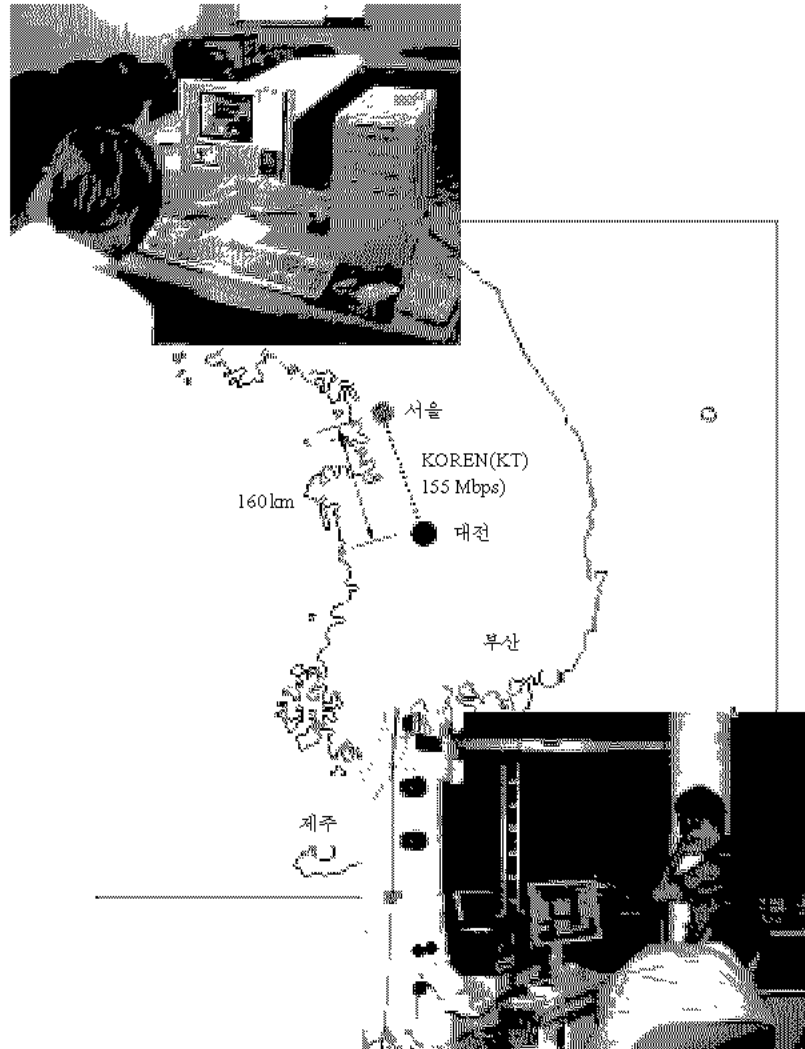


Fig. 3. An outline of the remote operation of HVEM.

server와 장비 원격 운영실에 설치된 FasTEM client로 구성된다. FasTEM server는 현미경 제어 보드와 제어 정보를 교환하며 외부 client간에도 정보를 주고받는 server 관리 프로그램과 전자총 및 가속전압, aperture나 goniometer 등을 제어하는 motor-driven systems, 조사계 및 결상계 조정 parameter 신호들을 입력하고 현재의 현미경 상태를 표시하는 client 프로그램이 설치되어 있다. 또한, 기계적으로 움직이는 goniometer의 구동을 제어하는 goniometer control 프로그램과 여러

detector들의 영상 신호를 별도로 분리 전송하여 주는 video server 프로그램이 장착되어 있다. FasTEM server PC에는 총 4가지 프로그램이 설치되어 현미경과 정보를 교환하고 TCP/IP network를 이용하여 원격지에 설치된 client PC와 현미경간의 정보 전송 관리를 담당하고 있다.

초고전압 투과전자현미경의 원격운영 실험 구성은 Fig. 3과 같이 대전본원의 초고전압 투과전자현미경실과 고려대학교 내 서울분소 회의실을 연결하는 전용

망인 155Mbps급 초고속 선도망 KOREN (Korea Advanced Research Network)을 이용하여 구성하였다. 원격지에서 독립적으로 장비를 원격 제어하기에는 여러 위험요소로 인해 장비에 무리를 줄 수 있기 때문에 본원 전자현미경에 원격 운영보조 및 장비 안전 감시를 맡는 보조 운영요원을 두고 서울분소에서 원격 운영요원과 화상통신에 의해 상호 정보를 주고받도록 하였다. 지금까지 선행된 초고전압 투과전자현미경을 이용한 원격 운영실험에서 가장 큰 장애가 되었던 것은 100 Mbps 이하의 network 속도 하에서 실험을 수행하였기 때문에 (Yoshida et al., 1999; Takaoka et al., 2000) 이미지 전송에 따르는 고용량 데이터 전송 속도의 확보와 network traffic에 의한 이미지 정보 손실의 최소화를 만족하지 못하는데 있었다. 이미지 신호의 전송 및 처리를 위해서 수년 전만 해도 network 인프라가 이러한 조건을 충족시켜주지 못하였으나 본 실험에서 사용한 network의 정보 전송 속도는 155Mbps급 초고속 network이다. 이러한 초고속 전용선을 이용하면 장비 제어를 위한 각종 현미경 기능 명령 수행과 함께 고용량의 detector 이미지 전송이 보다 원활히 이루어질 수 있다. 이미 우리나라의 인터넷 인프라가 정보 전송 응답속도에서 일본이나 미국보다 우수한 사례가 일본에서 이루어진 webSEM이라는 주사전자현미경 원격운영 실험에서 보고되었다 (Yamada et al., 2003). 참고로 현재 대덕 본원에서 각 분소로 연결된 network은 본 실험에서 사용된 속도보다 향상된 1 Gbps급으로 모두 upgrade되어 있는 상태이다.

결과 및 고찰

1. 원격 고분해능 영상 작업

원격 운영자에 의해 제어될 수 있는 초고전압 투과전자현미경의 기능들을 Table 1에 요약하여 나타냈다. 원격지에서의 초고전압 투과전자현미경 제어는 alignment에서부터 영상 focusing 및 adjustment, 그리고 recording에 이르기까지 TEM 작업 전반을 수행할 수 있도록 구성이 되었다. Table 1에 열거된 원격 조정 기능들을 이용하여 amorphous Ge film 위에 형성된 Au

Table 1. Remote functions in the FasTEM client console system

Remote control item	Function
HT and Beam	Accelerating voltage selection
	High tension step
	Filament ON/OFF
Electron optical parameter	Spot size, Brightness and Illumination angle
	MAG/LowMAG, Diffraction, BF / DF
	Gun alignment (Gun 1/Gun 2/SPOT/ Image2 /Projection)
	Lens current control (SHIFT/TILT/ANGLE)
	Illumination centering (CONDENSER 1; beam shift and 2; beam tilt)
	CL/OL/IL Stigmator
	HT/IMAGE X and Y Wobbler
	Focus step and OL current display
	Minimum dose system for beam sensitive specimen
	Beam blanking
Auto brightness	
Motor-driven system	Free lens control (Freely change the excitation condition of each lens)
	Goniometer control ($\pm Z$, $\pm X$ and Y stage moving, $\pm \alpha$ and β tilting)
	Goniometer position recording and display
	CL/OL/SA 1/SA 2 aperture selection and alignment
Detector selection	Fluorescent viewing screen up/down
	Top TV (Specimen image)/Bottom TV CCD (High resolution specimen image)
	Fluorescent viewing screen (Specimen Image/Diffraction)
	Gatan Imaging Filter (High resolution specimen image, MS-CCD, 1024 × 1024 pixels)
	Film recording
Microscope parameter display	Magnification/Spot size/Accelerating Voltage/Current density
	Specimen position/Specimen tilt
	Focus step
	Lens current (each focusing coil of the illumination system)
	Illumination system coil current (Shift/Tilt)
	Imaging system coil current (Shift/Tilt)

particle의 고분해능 영상을 획득하는 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 서울분소에 설치된 FasTEM client system을 이용하여 대전본원의 초고전압 투과전자현미경에 장착된 Au particle 시편을 관찰한 결과이다. 먼저 고분

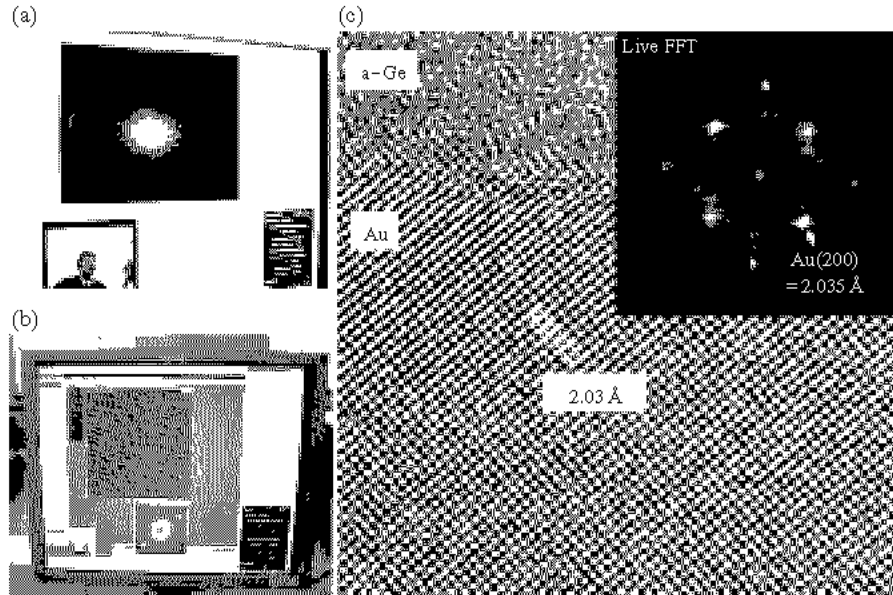


Fig. 4. Remote experiment to acquire a high resolution image of Au particle on a-Ge film. (a) Finding the [001] Au zone axis using remote control of goniometer, (b) Image focusing and adjustment using remote operation of DM, and (c) A high resolution image of Au crystal structure.

해능 영상을 얻기 전 alignment는 미리 현장 운영보조자가 실시하였고 top (in column) TV 영상으로 시편의 적당한 위치를 찾았다. 이를 확대하여 diffraction mode로 영상을 바꾼 후 형광 스크린에 결상된 회절 패턴을 관찰하였다. 형광스크린 영상은 TV영상과는 달리 115만 화소급 디지털 캠코더에서 촬영된 영상이 S-video 케이블을 통해 FasTEM 이미지 서버에서 전달되며 모든 영상은 FasTEM server에서 관리하는 window's netmeeting 프로그램을 기반으로 표현된다. [001] Au 정대축 조정은 goniometer($\pm\alpha$)와 holder($\pm\beta$) tilting 원격 기능을 이용하여 적당히 맞추었고 보다 정밀한 작업은 현장 운영자의 지원에 의해 이루어졌다.

Fig. 4의 (a)에서 보듯이 중앙의 강한 빔에 의해 영상이 saturation되는 문제점이 발생하여 실제로 현장에서 육안 관찰 시엔 잘 보이던 kikuchi 라인과 같은 미세 영상들이 원격지에서는 식별 할 수가 없기 때문에 시편의 정확한 정대축 조정은 실질적으로 한계가 있었다. 사진작업 시에도 현장에서선 일반적으로 1초 노출에 beam current density는 23~25 pA/cm²을 기준으로

하나 원격지에서 획득한 고분해능 영상은 beam current density가 70~90 pA/cm²일 때 식별 한계에 이른다. 즉 실제 사진 촬영 조건으로 빔의 강도를 감소시키게 되면 원격지에서는 아무것도 볼 수 없게 된다. 따라서 실질적인 원격 운영을 위해서는 장비의 원격 조정 가능한 interface의 확보와 network 인프라의 뒷받침 못지않게, 고해상도뿐만 아니라 고대비 영상 인식 성능이 뛰어난 카메라가 확보되어야 원활한 원격 운영을 할 수 있을 것으로 사료되었다. Fig. 4의 (b)는 초고전압 투과전자현미경의 부수 장비로서 설치된 GIF (Gatan Imaging Filter)의 MS-CCD (MultiScan-Charge Coupled Device, 1024×1024 pixels) 영상과 이를 제어하는 DM (Digital Micrograph) 프로그램 하에서 원격운영을 통해 고분해능 영상을 획득하는 상황을 나타낸 그림이다. 원격지에서도 FasTEM client와 연동된 Gatan사의 DM 프로그램의 모든 기능을 통제할 수 있으며 live FFT (Fast Fourier Transformation)를 이용한 이미지 focusing 및 조정이 가능하여 고분해능 영상을 보다 쉽게 획득할 수 있었다. 반면 DM 프로그램 구동은 FasTEM client 프로그램과 연동하여 동작하

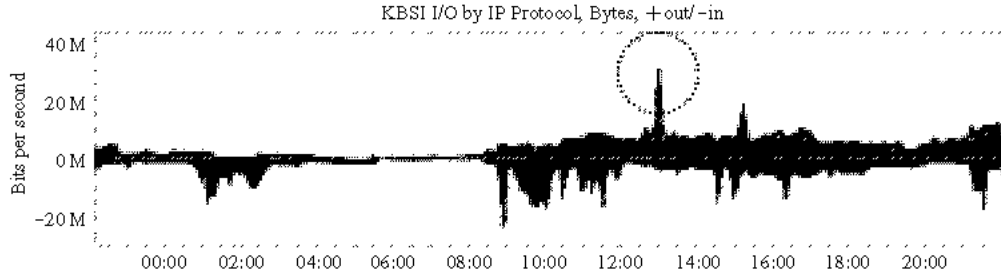


Fig. 5. The network traffic monitoring between the headquarter of KBSI in Daejeon and the Seoul branch. A severe network traffic to cause much loss of data packets happens at the time indicated by the dotted circle.

프로 이미지 조정에 응답지연 현상이 발생하기 때문에 DM 프로그램의 영상만을 독립적으로 분리 및 전송해 주는 별도의 서버를 설치한다면 보다 원활한 고분해능 작업을 할 수 있을 것으로 사료되었다. Fig. 4의 (c)는 원격지에서 실시한 고분해능 영상작업의 결과로서 [001] Au 방향에서 본 Au의 (200) 면간 거리 2.03 Å을 분해한 그림이다. 이전의 원격운영에서는 crystal lattice fringe를 획득하는 정도였으나(Yoshida et al., 1999), 본 결과로부터 원자들의 배열구조를 관찰하는 원자분해능의 구현까지 원격지에서 작업이 가능할 것으로 전망되었다.

본 실험에서 사용된 155Mbps급의 초고속 선도망 KOREN은 미국을 중심으로 Asia 및 Europe을 이어 international telemicroscopy 구축작업에 쓰이는 약 100Mbps급의 APAN(Takaoka et al., 2000)보다 빠른 초고속 network이다. 그러나 초고전압 투과전자현미경만을 위한 고정 bandwidth를 확보하지 않고 원격시범 운영을 하였기 때문에 원격작업은 network traffic에 영향을 받았다. Fig. 5는 원격 시범 운영 시 monitoring 한 KBSI 본·분소 간 KOREN 선도망의 network traffic 상황을 나타낸다. Fig. 5의 점선으로 표시된 원은 점심시간 이후 급격하게 증가하는 인터넷 사용자로 인하여 network traffic이 증가한 시점을 나타내고 해당시간에는 microscope parameter 조정 작업 등은 영향이 없었으나 detector의 종류 변경이나 화상 회의 등과 같은 이미지 정보의 교환에는 손실이 발생하여 깨끗한 영상을 획득할 수 없었다. 따라서 국가적 대형 장비의 원격 공동 활용을 위해서는 network의 속도 확보도 중요하지만 network 상에서 다른 이용자의 점

속 폭증에 대한 영향을 받지 않도록 고정 bandwidth를 확보하는 것이 보다 중요한 것으로 사료되었다.

2. 원격운영의 필요요건

Au의 고분해능 영상을 획득하는 원격 실험을 통해서 전자현미경의 조사계 및 결상계 parameter들과 같은 전기적 신호에 대한 원격 조정은 network 속도나 band width에 큰 영향을 받지 않고 원활하게 이루어진다는 것을 알았다. 반면에 전자현미경의 aperture나 goniometer를 동작하기 위한 motor-driven system들에 대한 기계적 조정과 detector의 고용량 이미지 전송 처리 등은 network의 속도와 band width에 큰 영향을 받으므로 응답지연 현상이나 정보 손실이 발생할 우려가 있었다. 이외에도 network 기반의 초고전압 투과전자현미경의 원격운영에 의해 고분해능 작업을 수행하기 위해선 아래의 환경 요건들이 만족되어야 함을 본 실험을 통해서 알 수 있었다.

- 1) Aperture motor-driven system과 goniometer specimen stage 등과 같은 기계적 운영 요소들의 원활한 원격 운영
- 2) 각종 CCD (charge coupled device) detector에서 촬영된 고분해능 이미지의 응답지연 및 정보 손실 배제와 부수 장비인 GIF 이미지 필터의 운영 프로그램인 DM의 FasTEM 연동 원격 운영 시 나타나는 latency의 극복(이미지 전송 전용 서버의 별도 운영 필요)
- 3) 고분해능 영상 관찰을 위해 수행하여야 하는 시편의 정대축 조정 작업 시 회절 영상의 고대비 이미지를 인식할 수 있는 wide gain range를 갖는 detector

의 확보

4) 원격 운영자의 장비 운영 수준에 따른 user level 배정과 원격운영 시 유발될 수 있는 무리한 장비 조정과 원격 운영자의 실수에 대비한 제한적 접근허용 등과 같은 최소한의 장비 보완책 마련

5) 100Mbps이상의 초고속 network 사용과 원격 운영 장비 전용 고정 band width의 할당

FasTEM 원격 운영 기반의 초고전압 투과 전자현미경의 각종 aperture들은 motor-driven system으로 원격 구동되며 goniometer의 specimen stage는 track ball과 같은 조종 인터페이스에 의해서 X, Y 방향으로 움직일 수 있으며 goniometer stage control window 내에서 X, Y 방향키 조작에 의해서도 동일한 동작을 수행할 수 있고, 시편의 α (goniometer tilt), β (holder tilt)의 tilting 조작 또한 가능하다. 원격운영자는 FasTEM client 프로그램 상에서 vacuum system control을 제외하고 전자현미경의 모든 부분을 장악할 수 있다. 따라서 원격지에 있는 원격운영자가 숙련되지 않으면 급격한 장비 parameter 변화에 따른 장비부담이나 detector 손상 등의 문제들이 발생할 수 있기 때문에 현장 FasTEM server 운영자는 user의 사용자 기능을 제한할 수 있는 권한을 갖고 있다. Basic user로 설정된 경우에는 가속전압 control 및 free lens control이 불가하여 고전압 탱크 가속관과 각종 렌즈계들을 보호한다. Advanced user로 설정된 경우는 상기의 두 가지 조작을 할 수 있어 이른바 현장 운영자와 동일한 장비 access 권한을 갖는다.

현재 장비를 원격운영 하는데 가장 큰 장애 요소는 detector 이미지 전송 해상도와 gain control의 제약에 따라 회절 패턴 관찰 시 정교한 영상 획득이 어렵다는 것이다. 즉 시편의 정대축 조정 작업을 할 때, 밝은 중앙빔에 의해 CCD detector 이미지의 saturation이 일어나 정확한 시편방위를 맞추기 어려운 문제가 있다. 본 실험에서는 시편의 대략적인 정대축 조정을 원격 운영자가 실시하고 정교한 정대축 조정작업은 현장 운영자의 도움을 받았다.

FasTEM 원격운영 시 고분해능 영상은 film으로도 기록할 수 있으나 본원의 초고전압 투과전자현미경은 Gatan사의 이미징 필터를 장착하고 있으므로 이를 제어하는 DM 프로그램 상에서 1024×1024 pixels의 MS

-CCD 영상을 이용하여 획득하였다. 이로 인해 FasTEM server를 거친 FasTEM client 프로그램이 Gatan사의 DM 프로그램을 제어하는 이중적인 정보 전송 문제 때문에 DM 프로그램상에서 나타나는 MS-CCD 영상의 응답 지연과 정보 손실이 야기되었다.

결 론

국가적 첨단 공동활용장비의 e-Science Grid 구축 사업의 일환으로 우리나라 최초로 실시한 초고전압 투과 전자현미경의 원격 시범운영은 비록 인터넷 사용자가 많은 낮 시간대에는 network traffic에 의해 이미지 정보 전송에 손실이 발생하는 문제가 있었지만 초고전압 투과전자현미경의 조사계 및 결상계 시스템 파라메타들의 조정 및 각각의 detector 시스템 조정과 이미징, goniometer 및 aperture 조정을 위한 motor-driven system들의 동작 등은 마치 원격 작업자가 현장에 있는 것과 마찬가지로 실시간 운용이 가능하였다. 본 원격 시범운영 결과를 통해 초고전압 투과전자현미경과 IT 기반기술의 접목에 의해 실현된 원격운영 기능이 원격지 전문 연구자들과의 동시 협업 및 공동 연구 개발을 가능하게 할 것으로 기대하며 국가적 첨단 공동 연구 장비로서의 활용도가 크게 향상될 것으로 예상하고 있다. 이에 더하여 국내뿐만 아니라 international telemicroscopy의 구축과 상호 공동연구를 위해 인터넷 기반의 원격 운영환경인 telescience portal의 구축이 완성 단계에 있으며, 한국기초과학지원연구원 (KBSI), 한국과학기술정보연구원 (KISTI) 슈퍼컴퓨팅 센터, 미국 샌디에고 NCMIR, 일본 오사카대학 사이버 미디어 센터 및 초고전압 전자현미경 센터, 일본 국립재료연구소(NIMS)와의 공동연구를 추진 중이다.

감사의 글

초고전압 투과전자현미경의 FasTEM 원격 시범운영을 도와주신 JEOL USA의 Robert M. O'donnell씨, JEOL 본사 및 JEOL Datum의 Mitsuaki Ohsaki씨와 Kazuma Kanbayashi씨 그리고 JEOL Korea의 심효식

씨께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Fan GY, Mercurio PJ, Young SJ, Ellisman MH: Telemicroscopy. *Ultramicroscopy* 52 : 499-503, 1993.
- Takaoka A, Ura K, Mori H, Katsuta T, Matsui I, Hayashi S: Development of a new 3MV ultra high voltage electron microscope at Osaka University. *J Electron Microsc* 46 : 447-456, 1997.
- Takaoka A, Yoshida K, Mori H, Hayashi S, Young SJ, Ellisman MH: International telemicroscopy with a 3MV ultra-high voltage electron microscope. *Ultramicroscopy* 83 : 93-101, 2000.
- Ura K: Design concept of a new ultra high voltage electron microscope at Osaka University. *Ultramicroscopy* 46 : 447-456, 1991.
- Voelkl E, Allard LF, Bruley J, Williams DB: Undergraduate TEM instruction by telepresence microscopy over the internet. *J Microsc* 187 : 139-142, 1997.
- Yamada A, Hirahara O, Tsuchida T, Sugano N, Date M: A practical method for the remote control of the scanning electron microscope. *J Electron Microsc* 52(2) : 101-109, 2003.
- Yoshida K, Takaoka A, Hayashi S, Matsui I: Development of a remote operation system for an ultrahigh voltage electron microscope. *J Electron Microsc* 48 : 865-872, 1999.
- Yoshida K, Mori H, Shimojo S, Kadobayashi Y, Akiyama T, Ellisman MH: Design of a remote operation system for trans Pacific microscopy via international advanced net-

- works. *J Electron Microsc* 51(Suppl.) : S253-S257, 2002.
- Yoshida K, Ura K, Mori H, Katsuta T, Matsui I, Hayashi S: Remote observation system for UHVEM employing communication channels. *Electron Microsc* 33(Suppl. 1) : 58, 1998.

< 국문초록 >

최근에 한국기초과학지원연구원에 설치된 초고전압 투과전자현미경은 원자분해능(점분해능 1.2 Å 이하)의 구형과 고경사각 tilting 기능($\pm 60^\circ$)에 의해 시편의 원자배열 구조를 3차원적으로 이미징할 수 있는 고성능 투과전자현미경이다. 이에 더하여 FasTEM이라는 원격 운용 시스템이 갖춰져 있어서 장비의 직접 운용에 따른 여러 제약 을 극복할 수 있게 한다. 초고전압 투과전자현미경의 원격운용을 위해 FasTEM 원격 시스템은 본원 초고전압 투과전자현미경에 설치된 Server 시스템과 서울분소에 설치된 Client 콘솔 시스템을 155 Mbps급 초고속 선도망 KOREN에 연결하여 구성하였으며 서울분소에서 대전본원의 초고전압 투과전자현미경을 운영하여 Au의 [001] 고분해능 영상을 얻는데 성공하였다. 초고전압 투과전자현미경의 조사계 및 절상계 시스템 파라메타들의 조정, 각각의 detector 시스템 조정과 이미징, goniometer와 aperture 구동을 위한 motor driven system들의 동작 등 초고전압 투과전자현미경의 원격 조정은 원격 작업자가 현장에 있는 것과 마찬가지로 실시간 운용이 가능하였다. 초고전압 투과전자현미경과 IT 기반기술의 접목에 의해 실현된 원격운용 기능은 국가적 공동연구시설에 대한 e Science Grid를 구축하는데 중요한 역할을 하리라 기대된다.