

Introduction to soft x-ray microscopy based on synchrotron radiation.

신현준*, 정병갑

790-784, 경북 포항시 남구 지곡동, 포항공과대학교, 포항가속기연구소, 빔라인부*
606-701, 부산광역시 영도구 동삼동, 고신대학교 생명과학과

방사광가속장치 시설이 한국에 설치됨으로써 50 nm 이하의 공간분해능을 가지며 원소 및 결합상태에 대한 정보를 제공해 줄 수 있는 soft x-ray microscopy 실현의 토대가 이루어졌다. 본 발표에서는 방사광을 이용한 soft x-ray microscopy의 특징을 간단히 소개하고자 한다.

Soft x-ray microscopy는 soft x-ray (약 0.5 nm - 35 nm 의 파장)를 시료에 집속하고 시료를 통과하고 나온 soft x-ray를 x-ray lens를 사용하여 확대하는 것으로 기본적으로 가시광선을 이용하는 광학현미경의 원리와 같다 (그림 1 참조). 사용하는 파장이 가시광선보다 수십 - 수백 배 짧으므로 x-ray lens와 기타 조건이 충족이 되면 이론적으로는 0.6 - 40 nm의 공간분해능을 얻을 수 있다. 그러나 x-ray lens 제작기술, 진동의 영향 제거 기술 등 기술력의 한계로 인해 현재 세계적으로 약 25 nm의 공간분해능을 구현하고 있으며, 이보다 좋은 공간분해능(10 nm의 공간분해능)을 갖는 장비를 구현하기 위해 전세계적으로 경쟁을 하고 있는 상황이다.

Soft x-ray microscopy는 공간분해능에서는 가시광선(공간분해능: 250 nm 이상)과 전자현미경(공간분해능: ~ 1 nm)의 간격을 메워주지만 이외에 매우 중요한 정보를 주는데, 그것은 원소와 결합상태에 대한 정보이다. 그 이유는 x-ray의 에너지가 각 원소 및 결합정보를 탐구하는데 적합하기 때문이다. 예를 들어 입사하는 x-ray의 에너지가 탄소의 흡수단에 있으면 탐구하고자 하는 시료에서 탄소의 분포를 얻을 수 있다. 이때 탄소가 단일 결합, 이중 결합, 산소와의 결합을 이루고 있는가에 대한 정보를 각 각 얻을 수도 있다. 이러한 이유로 시료를 별도로 처리하지 않고도 내부의 원하는 구조를 연구할 수 있는 장점을 갖고 있다. 또한 x-ray의 에너지를 선별하게 되면 (water window에 해당하는 에너지) 시료를 물 속에 존재하는 상태로 연구할 수 있다. 그림 2 - 4에 제시한 것은 외국의 soft x-ray microscopy 시설에서 이미 연구한 예를 인용한 것으로 가시광선이나 전자현미경에 비해 가지고 있는 장점을 보여주고 있다.

그림 2는 황소의 정충 내의 단백질과 DNA에 대한 분포를 soft x-ray microscopy로 얻은 결과이다. 그림에서 보듯이 원소/기능성 분포를 얻을 수가 있다. 그림 3은 금속을 산화/분해시킬 수 있는 박테리아의 역할을 연구할 수 있는 가능성을 보여주고 있는 결과로 사용하는 x-ray의 에너지를 바꿈으로써 물 속에 존재하는 Manganite와 박테리아 위치를 각 각 분리하여 나타내주고 있다. 그림 4는 말라리아에 감염된 적혈구와 건강한 적혈구를 x-선 현미경으로 관측한 결과로 특별한 시료 처리 없이 수용액 속의 적혈구 내의 감염된 부위의 구조를 연구할 수 있음을 보여주고 있다. 그림 5는 전자현미경으로도 볼 수 없었던 새로운 구조를 보여주고 있다. 이때 새로 발견된 구조는 x-선 damage에 매우 민감한 것으로 나타났으며, 이러한 정보들은 세포내부의 구조/기능에 대한 정보를 보다 정확하게 알 수 있게 하는 단서들이 되고 있다.

이러한 장점을 갖는 soft x-ray microscopy가 그 동안 현실화되어 활발하게 응용이 되지 못하였던 이유는 coherency가 좋은 고휘도(highly brilliant)의 soft x-ray 광원의 개발과 집속 lens 개발에 있어 한계가 있었기 때문이다. 그러나, 제2-3세대 방사광시설이 건설됨으로써 고휘도의 x-ray 광원의 공급이 가능하여졌고 x-ray lens의 제작기술이 반도체기술과 더불어 발전하여 이제 전 세계적으로 방사광 시설을 이용한 수십 nm의 공간분해능을 갖는 soft x-ray microscopy가 개발 운영되고 있다. 한편 국내의 포항에도 제 3세대 방사광 시설이 건설되어 soft x-ray 영역에서 고휘도의 광원을 제공하고 있다. 포항에 설치된 이러한 좋은 광원을 이용하여 soft x-ray microscopy를 설치하여 운영한다면 국내 현미경학자들에게 기존의 광학현미경과 전자현미경으로 연구할 수 없었던 정보를 얻을 수 있게 하여 보다 다양하고 정확한 연구를 할 수 있는 기회가 될 것이라 판단한다.

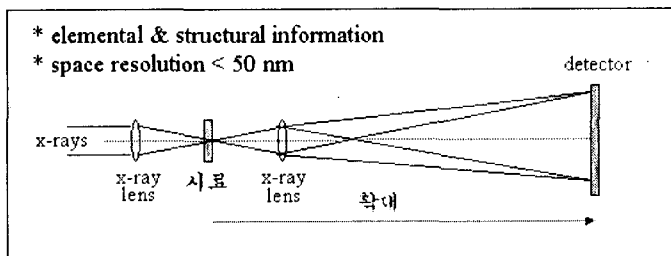


그림 1. Schematic of a soft x-ray microscope.

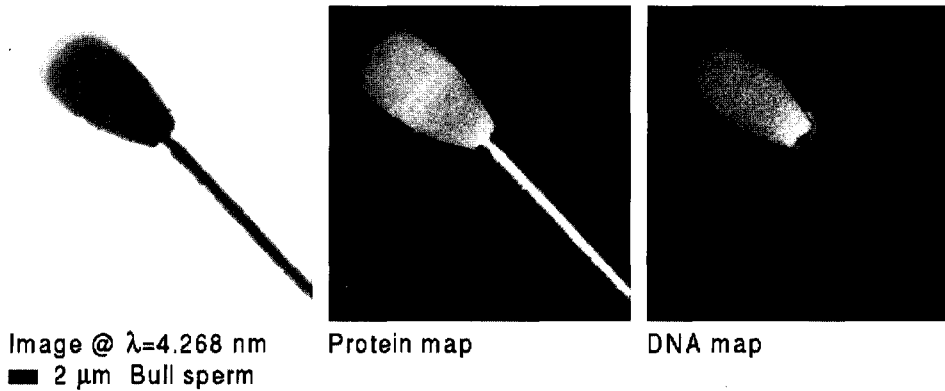


그림 2. Soft x-ray microscope image, and protein and DNA map, of air-dried bull sperm (prepared by R. Balhorn, LLNL). Images were taken by X. Zhang (Stony Brook) at six x-ray absorption resonance wavelengths, and were used to derive the quantitative maps. See Zhang et al., J. Struct. Biol. 116, 335 (1996). (Data and caption are from NSLS website, <http://nslsweb.nsls.bnl.gov>)

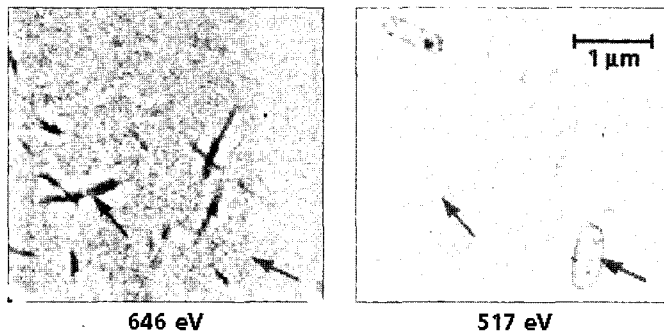


그림 3. Soft x-ray microscope images taken in the same area of a sample, (left) at x-ray wavelengths (photon energies) absorbed by the manganese atoms in needle-shaped particles of manganite ($MnOOH$), and (right) at wavelengths absorbed by the carbon atoms in bacteria. The two arrows in each image show the locations of a manganite needle and a bacterium. (Data and caption from ALS website <http://www-als.lbl.gov>).

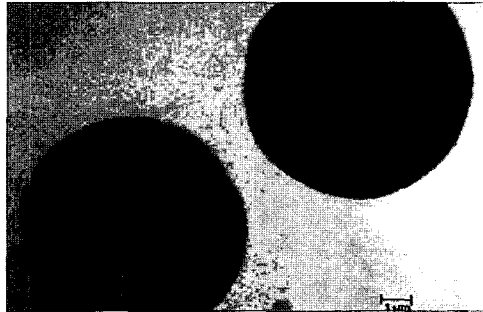


그림 4. 말라리아에 감염된 적혈구와 건강한 적혈구를 보여주고 있는 이미지.
(Data from ALS website <http://www-als.lbl.gov>).

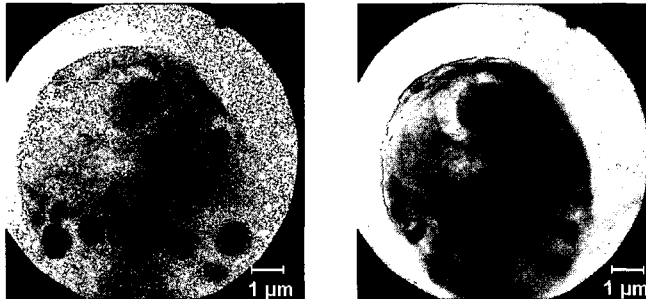


그림 5. Images of *Chlamydomonas*, a unicellular green alga, taken with the soft x-ray microscope on Beamline 6.1 at the Advanced Light Source. Both images are of the same cell, which was imaged four times. Above is the second of two initial 1-second exposures, showing 1-micron spherical inclusions that are not seen with electron microscopy. Below, the second of two 8-second exposures taken immediately thereafter shows degradation of the inclusions with longer exposure to radiation. (Data and caption from ALS website <http://www-als.lbl.gov>).