

## 정량적 전자토폴그래피를 위한 Beer's law의 실험적 검증

김진규, 송 경, 이수정<sup>1</sup>, 주형태<sup>2,\*</sup>, 김윤중

한국기초과학지원연구원 전자현미경연구부

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 광물자원연구본부

<sup>2</sup>한국해양연구원 해양위성·관측기술연구부

## Experimental Examination of the Beer's law for Quantitative Electron Tomography

Jin-Gyu Kim, Kyung Song, Sujeong Lee<sup>1</sup>, Hyeong-Tae Jou<sup>2,\*</sup> and Youn-Joong Kim

Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute, Daejeon 350-333, Korea

<sup>1</sup>Mineral Resource Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,  
Daejeon 305-350, Korea

<sup>2</sup>Ocean Satellite Remote Sensing & Observation Technology Research Department,  
Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 426-744, Korea

(Received April 20, 2010; Revised June 15, 2010; Accepted June 18, 2010)

### ABSTRACT

This study has examined experimentally the Beer's law which is a precondition for quantitative electron tomography. We used carbon support film and latex spheres, which have similar absorption coefficients with biological samples, as the test samples to take a tilt-series of images for electron tomography. First, the 3D information of carbon film and latex spheres was obtained by electron tomography. Then, the regression analysis on the relationship between the intensities of the incident and the transmitted beams in a tilt series was carried out to examine the Beer's law. The regression results with RMS error of 0.976 show the linear intensity variations of the transmitted beam as the tilt angles were increased. In addition, the relative absorption coefficients of carbon support film and latex spheres calculated experimentally through the Beer's law were 1.71 (5) and 2.67 (6)/ $\mu\text{m}$ , respectively. The absorption coefficients remained constant within a full tilt range. Therefore, it is expected that quantitative electron tomography could be performed for biological samples by applying Beer's law provided the exact intensity of incident beam can be obtained under the thoroughly controlled experimental conditions.

**Keywords** : Beer's law, Electron tomography, Latex sphere

### 서 론

Transmission electron microscope (TEM)를 이용하여 획득한 일련의 2차원적 영상들로부터 3차원적 정보를 추출해내는

전자토폴그래피는 시료의 구조를 입체적으로 관찰할 수 있기 때문에 구조분석 오류를 피할 수 있고 더 나아가 새로운 정보를 획득할 수 있어 유용하게 사용되는 분석기법 중의 하나이다. 이러한 토폴그래피 기법은 시료에 입사되는 빔의 강도와 시료를 투과한 빔의 강도의 관계를 나타내는 Beer's law

본 연구는 기초기술연구회 협동과제 "나노·바이오 융합소재의 EM분석법 개발"의 지원을 받아 수행되었습니다.

\* Correspondence should be addressed to Dr. Hyeong-Tae Jou, Ocean Satellite Remote Sensing & Observation Technology Research Department, Korea Ocean Research and Development institute, Ansan 426-744, Korea. Ph.: (031) 400-6278, Fax: (031) 408-5822, E-mail: htjou@kordi.re.kr

를 기반으로 하고 있다(Gilbert, 1972). 현재 정성적인 해석에 머물고 있는 토모그래피를 정량적 해석의 단계로 올리기 위해서는 물질의 특성과 전자빔과의 관계를 나타내는 Beer's law에 대한 보다 다양한 실험 및 검증이 필요하다. 이에 대하여, Pozsgai(1997)는 Ti, Ge, Ag, Au의 박막의 경우 100 또는 200 nm의 두께까지 Beer's law가 허용 될 수 있음을 실험적으로 보고하였다. 또한 보다 두꺼운 시료에 대하여 투과빔의 다중회절을 고려한 토모그래피의 시도가 있었다(Levine, 2005). 그러나 이러한 시도들은 단순한 실험에 머물거나 시뮬레이션을 통한 이론적인 접근으로 실제 의생물 토모그래피 환경과는 차이가 있기 때문에 의생물 시료의 정량적 토모그래피 적용을 위해서 별 도움이 되지 못한다.

정량적 토모그래피를 위한 Beer's law의 검증 중 가장 중요한 것이 정확한 입사빔과 투과빔의 강도변화를 구하는 것이다. 현재까지 나와 있는 많은 토모그래피 S/W는 대부분 입사빔의 강도에 대한 정확한 정보를 사용하지 않아 그 결과는 단지 정성적인 해석단계에 머물고 있다.

이 논문에서는 전자빔 흡수계수가 크지 않은 의생물 실험 환경에서 Beer's law를 검증하기 위해서 carbon 막상에 존재하는 latex sphere에 대한 TEM 실험을 통해 여러 가지 다양한 방법으로 입사빔의 강도 및 Beer's law를 검증하여 정량적 토모그래피를 위한 기초자료로 이용하고자 한다.

## 재료 및 방법

본 연구에 사용한 시료는 대략 75 nm 직경의 polystyrene latex sphere (Ted pellar Inc.)이며, 200 mesh의 holey carbon Cu 그리드(EMS Com.)위에 분산시켜 관찰하였다. TEM은 120 kV에서 작동하는 EM912  $\Omega$  (Carl Zeiss, Germany)를 사용하였다. 전자총(LaB<sub>6</sub>)의 특성을 고려하여 전류밀도의 불안정도에 의한 영향을 최소화하기 위해 약 1시간 동안 안정화시켰다. 영상을 획득하기 위해 사용되는 대물렌즈 조리개는 크기에 따라 고경사각에서 자연적인 투과빔의 강도저하가 발생하기 때문에 이에 대한 영향을 방지하고자 사용하지 않았다(Kim et al., 2008). 또한 에너지 여과장치인 슬릿 조리개를 제거하여 슬릿 조리개의 유동에 의한 전자빔의 불안정도의 영향을 억제하였다. 연속 기울기에 따른 영상은 +55° ~ -55° 범위 내에서 5°간격으로 16 bit의 동적범위를 가지고 있는 2k CCD 카메라(F224HD, TVIPS)를 이용하여 획득하였다. Beer's law의 검증에 앞서 사용된 시료인 latex sphere의 상태 및 카본 막의 기울어짐 정도를 확인하기 위해 전자 토모그래피를 수행하였으며, 이러한 토모그래피 작업에 사용되는 각 영상의 정렬, z-축 tomogram 구현, 그리고 3D visualization 작업은 TEMography (JEOL Ltd.) 프로그램을 이용하였다. 이렇게 구해진 토모그래피 결과를 고려하면서 획득

영상으로부터 추출된 입사빔의 강도( $I_0$ )와 투과빔의 강도( $I_t$ )를 이용하여 Beer's law의 검증을 시도하였다.

## 결과 및 고찰

서론에서 언급한 바와 같이 토모그래피에서 적용하는 Beer's law는 시료에 조사되는 입사빔의 강도에 대해 시료와 상호작용을 한 후의 투과빔의 강도는 지수 함수적으로 감소되는 현상을 설명한다. Beer's law에 의해 투과된 입사빔의 강도( $I_t$ )는 다음과 같이 표시할 수 있다(Levine, 2005).

$$I_t = I_0 \exp \left[ - \int_0^{z_0} dz \beta(z) \right] \quad (1)$$

여기서  $I_0$ 는 입사빔의 강도이며,  $z_0$ 는 입사빔에 대하여 투영된 시료의 두께이고, 그리고  $\beta$ 는 시료의 흡수계수를 의미한다. 위 식에서 적분항은 전자토모그래피에서는 "projection"으로 구분하여 입사빔과 투과빔의 강도의 비선형 변환에 의해 계산될 수 있다.

$$-\ln T = - \int_0^{z_0} dz \beta(z) \quad (2)$$

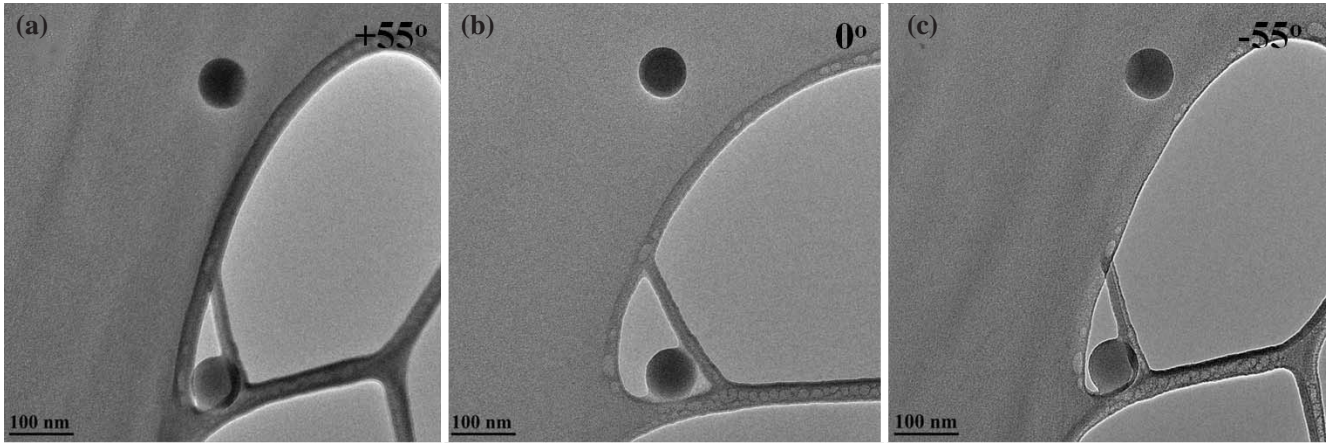
여기서,  $T = I_t/I_0$ 이다. 또한 흡수계수( $\beta$ )가 시료의 두께( $z$ )에 독립적이면, 다음과 같이 간소화 할 수 있다.

$$T = e^{-\beta z_0} \quad (3)$$

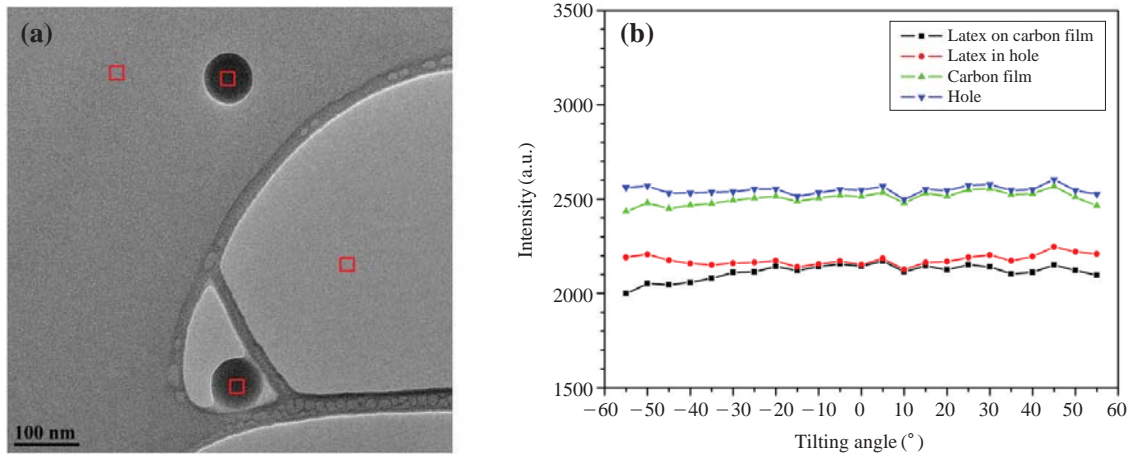
한편 보다 두꺼운 시료에 대해서는 정량적인  $I_0$ 의 도출을 위해서는 투과빔의 다중회절과 시료내의 구성 원자들에 의한 영향을 고려해야만 하지만(Levine, 2005), 본 연구에서는 일반적인 Beer's law의 적용에 대해서 논의하고자 한다.

Fig. 1에는 Beer's law의 검증을 위해 사용된 latex sphere에 대한 +55°에서 -55°까지 연속 기울기 이미지를 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, Beer's law의 검증을 위해서는 시료를 통과하지 않고 바로 투과된 전자빔( $I_0$ )에 대한 강도가 필요하며, 이를 측정하기 위해선 카본 지지막내에 존재하는 hole이 필요하다. 또한 기울기에 따른 카본 지지막의 두께 변화에 따른 전자빔의 강도변화를 측정하는 것이 필요하며, 마지막으로 카본 지지막위에 존재하는 latex sphere와 hole의 가장자리에 걸쳐 있는 latex sphere를 동시에 관찰하여 latex sphere의 강도변화를 관찰하는 것이 필요하다. Fig. 1을 살펴보면 이러한 여러 가지 조건을 만족할 수 있도록 적절한 시료의 영역이 선택된 이미지가 얻어 졌음을 알 수 있다.

Fig. 2(a)에는 0° 기울기 이미지에 대해 연속기울기에 따른 영상 강도 변화를 측정하기 위해 사용된 영역( $\square$ )과 각각의 영역에 대하여 기울기 각도가 변환에 따라 영상강도의 변



**Fig. 1.** Tilt series images of latex spheres on a holey carbon film in the range of the tilt angles from  $+55^\circ$  to  $-55^\circ$ . All images include the optimum regions for measuring beam intensities, so that one latex sphere lies on a carbon film and the other is caught in a hole.

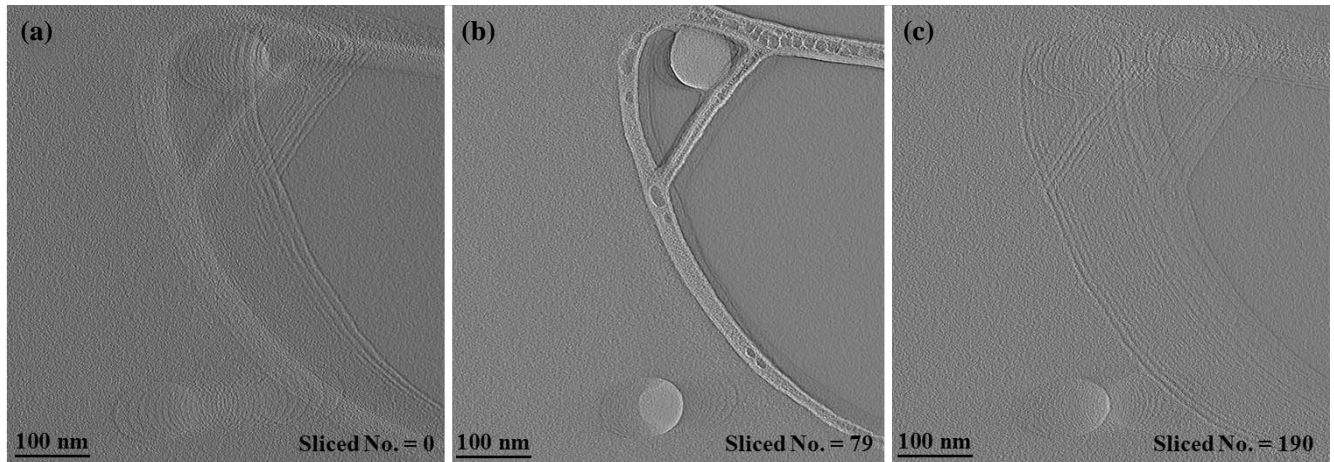


**Fig. 2.** (a) TEM image obtained at  $0^\circ$  tilt angle. Four regions marked with small red squares were selected for the measurement of intensity variation of electron beam. (b) Intensity distributions in four different areas with the tilt angles.

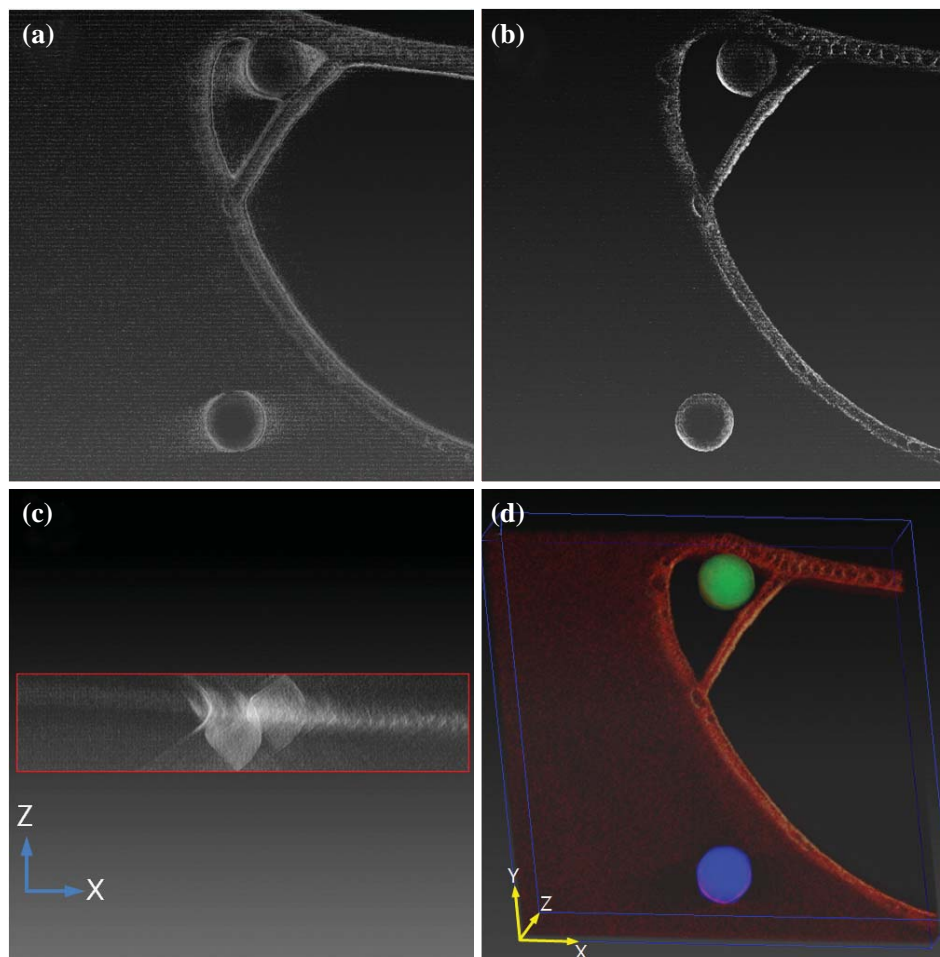
화양상에 대한 결과를 나타내었다. 각각의 측정 영역은 앞서 언급한 바와 같이,  $I_0$ 를 측정하기 위한 hole 영역,  $I_1$ 를 측정하기 위한 카본 지지막영역, 카본 지지막 위에 위치한 latex sphere, 그리고 hole의 가장자리에 위치한 latex sphere의 4곳을 선택하였다. 선택한 영역의 크기는 각각의 영역에 대하여 최대한 균일한 곳을 선택하여  $61 \times 61$  픽셀 영역을 기준으로 삼았다.

CCD 카메라를 이용하여 얻은 시료를 통과하지 않은 빔의 강도는 거의 입사빔의 강도  $I_0$ 로 볼 수 있으며, 이는 시료를 통과한 전자빔의 강도에 영향을 주기 때문에 이상적으로는 매우 일정하게 유지되는 것이 중요하다. 그러나 Fig. 2(b)와 같이, hole 영역에 대한 전자빔의 강도( $I_0$ )를 측정된 결과 불특정 다수의 기울기 각도에서 불규칙하게 분포되고 있는 것을 알 수 있었다.  $I_0$ 의 경우에 대해 평균 전자빔의 강도 ( $2548.447 \pm 22.074$ )를 구해 보면 약 0.8%의 표준편차를 보

이고 있으며 각도에 따라 최대 4.1% 범위 내에서 불규칙한 틱 현상을 나타내었다. 이것은 열전자 방출 방식의  $\text{LaB}_6$  gun의 특성으로 여겨지며 일반적인 field emission gun (FEG)의 전류밀도의 안정도가 약 5%인 점을 감안할 때,  $\text{LaB}_6$ 의 불안정도는 피할 수는 없으며 무시할 수 있을 것으로 판단된다 (Williams & Carter, 1995). 이러한 전자총에 의한  $I_0$ 의 불안정도를 개선하기 위해서는  $\text{LaB}_6$  비해 Wehnelt 오염도를 개선하고, 저온 필라멘트 셋팅이 가능한  $\text{CeB}_6$  gun을 사용하는 것도 고려할 수 있다 (APTECH Co.). Hole 영역의 강도 측정을 통해 간접적으로  $I_0$ 의 강도변화를 측정된 후, 카본 지지막을 통과한 전자빔의 강도 변화를 측정하였다. 카본 지지막을 통과한 전자빔의 강도변화는  $I_0$ 의 강도변화에 대한 영향과 기울기 각도에 따른 카본 지지막의 두께 변화에 따른 강도변화의 영향이 포함되어 나타난다고 간주할 수 있다. Fig. 2(b)에서 나타난 것처럼 카본 지지막을 통과한 전자빔



**Fig. 3.** Z-axis tomogram of latex specimen obtained from aligned tilt-series images. (a) The slice image of the top of the latex sphere located at hole edge. (b) The slice image of the top of the lower latex sphere on a carbon film with its diameter of 59 nm. (c) The slice image of the bottom of the latex sphere located on a carbon film.



**Fig. 4.** Volume rendering of 3D tomograms for the various contrast ranges. (a) The weak contrast range shows only the carbon supporting film. (b) The high contrast range shows two latex spheres and the edges of holes. (c) The X-Z plane view for examining the inclination of carbon film. (d) The RGB visualization for 3D volume reconstruction for overall contrast range.

의 강도는  $I_0$ 의 강도변화 및 tilting의 영향을 반영하고 있다. 또한 고정사각 영역에서는 (-)경사방향의 값이 (+)경사에

비해 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 이는 지지막이 경사축에 대하여 (-) 방향으로 기울어져 있음을 암시하

고 있다.

Beer's law의 검증에 앞서 latex sphere의 상태 및 카본 막의 기울어짐 정도를 확인하기 위해 토모그래피를 수행하여 latex sphere와 카본 지지막의 3차원적 구조 복원을 시도하였다. 각각의 연속 기울기 이미지를 경사각에 따라 cross correlation 방법을 이용하여 정렬을 수행하였다. 정렬된 이미지는 filtered back projection 방법을 이용하여 z축 tomogram을 생성하였다. Fig. 3에는 상기와 같은 방법을 통하여 수행된 tomogram 결과를 나타내었다. Tomogram은 z축 방향으로 약 125 nm의 두께에 대하여 190개의 slice image를 이용하여 구축하였다. Fig. 3(a)에 나타난 slice image는 hole의 가장자리에 위치한 latex sphere가 보이기 시작하는 지점을 나타내고 있다. Fig. 3(b)에 나타난 slice images는 카본 지지막의 위치를 나타내고 있으며, hole의 가장자리에 위치하고 있는 latex sphere는 이미 상당히 큰 직경을 나타내고 있어 latex sphere의 중심부분이 카본 지지막의 hole에 걸쳐있음을 보여주고 있다. 특히, 카본 지지막위에 위치하고 있는 latex sphere는 카본 지지막 시작부분에서 이미 59 nm의 직경을 나타내고 있으며 이것은 latex sphere의 직경에 대하여 약 3/4에 해당이 되며, latex sphere의 무게에 의해 상대적으로 매우 얇은 카본 지지막이 z축 방향으로 늘려서 latex sphere의 일부분(23 nm)이 카본 지지막에 묻혀 있음을 시사하고 있다. Fig. 3(c)는 carbon 지지막상의 latex sphere의 최상부 끝을 보여주고 있다.

Fig. 4에는 생성된 tomogram으로부터 각각의 관심 영역에 대하여 volume rendering을 수행한 결과를 나타내었다. 전자빔의 강도 분포에 따른 volume rendering은 특정구조물에 대한 contour stack rendering에 비해 연구자의 주관성이 배제되기 때문에 보다 직접적이고 신빙성이 부여된 결과물을 제공한다는 장점이 있다. 특히, Fig. 2(b)에서 제시한 것과 같이 일반적으로 카본 지지막은 매우 얇으며 흡수계수가 매우 낮기 때문에 시료를 통과하지 않은 전자빔의 강도와 큰 차이를 나타낼 수 없기 때문에 카본 지지막에 대한 3차복원은 contour stack rendering을 수행하기가 쉽지 않다. 그러나 히스토그램 분석을 통해서 정렬된 tomogram내에서 가장 약한 콘트라스트를 가지고 있는 범위에 대한 volume rendering을 수행한 결과, Fig. 4(a)과 같이 약 30 nm의 카본 지지막에 대한 3D volume을 추출해 낼 수 있었다. 또한, Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 tomogram의 히스토그램에서 강도 분포가 높은 영역에 대하여 volume rendering을 수행한 결과, 약 75 nm의 두께를 지닌 2개의 latex spheres와 카본 지지막에 hole을 형성하면서 카본 지지막과 hole의 경계면의 다소 두꺼워진 영역에 대한 volume이 동시에 추출이 되었음을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 추출된 volume을 회전시켜 x-z 평면을 나타낸 것이며, 이로부터 카본 지지막이 대략 4° 정도 기울어졌음을 알 수 있다. 각각의 기울기 각도에 카본 지지막의

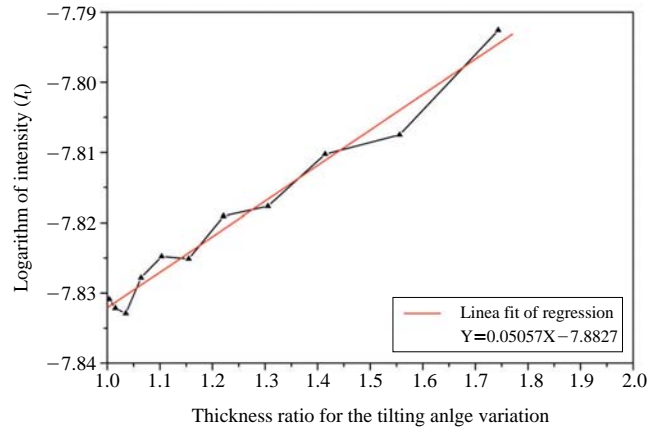


Fig. 5. A diagram for regression analysis on the beam intensities on a carbon film with the tilt angles.

기울어진 각도 만큼의 보정을 하면 입사빔이 통과하는 카본막의 두께 변화를 유추할 수 있다. Fig. 4(d)는 전체 히스토그램 영역에 volume rendering을 수행한 결과를 나타내었다.

앞서서 획득한 토모그래피의 결과가 Beer's law를 만족하는지 검증하기 위해 기울기 각에 따른 카본 지지막 및 latex sphere에 대한 입사빔 통과 두께 및 투과빔의 관계를 이용하여 회귀분석을 실시하였으며 상술하면 다음과 같다.

서로 다른 두 개의 위치에 존재하는 latex sphere를 통과한 전자빔의 강도 변화를 측정하였다. 만약 latex sphere가 완벽한 sphere의 성질을 지니고 있다면, 고니오미터의 기울기가 증가 또는 감소하더라도 latex sphere의 중심 부분의 두께는 변하지 않기 때문에 투과전자빔의 강도( $I_t$ )는 일정하게 유지되어야 한다. 그렇기 때문에 hole의 가장자리에 위치한 latex sphere를 통과한 전자빔의 강도변화는  $I_0$ 의 강도변화에 대한 영향만이 반영되어 있어야 하며, 카본 지지막위에 위치한 latex sphere를 통과한 전자빔의 강도변화는  $I_0$ 의 강도변화에 대한 영향과 기울기 각도에 따른 카본 지지막의 두께 변화에 따른 강도변화의 영향이 함께 포함되어 있어야 한다. Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 두 개의 latex sphere를 통과한 전자빔의 강도는 전체 경사각 범위에서 일정한 전자빔의 강도의 감소가 보일 뿐,  $I_0$ 와 카본 지지막의 경우와 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

첫 번째로 카본 지지막에 대한 투과빔의 강도에 대하여 선형회귀분석을 실시하였으며, Fig. 5에 카본 지지막의 빔 통과 두께와 투과빔의 강도에 대한 관계를 나타내었다. Beer's law가 성립한다면 기울기 각에 따라 시료의 두께 및 흡수계수의 일정한 변화에 따라  $I_t$ 가 달라지기 때문에  $I_t$ 는 각도 변화에 따른 투과빔의 지지막 통과 길이(두께)와 연관된다. 다시 말해서 앞의 (3)식에서  $I_0$ 가 일정하다고 가정하면 상수로 취급할 수 있기 때문에  $I_t$ 는 지수 함수적으로 감소를 하

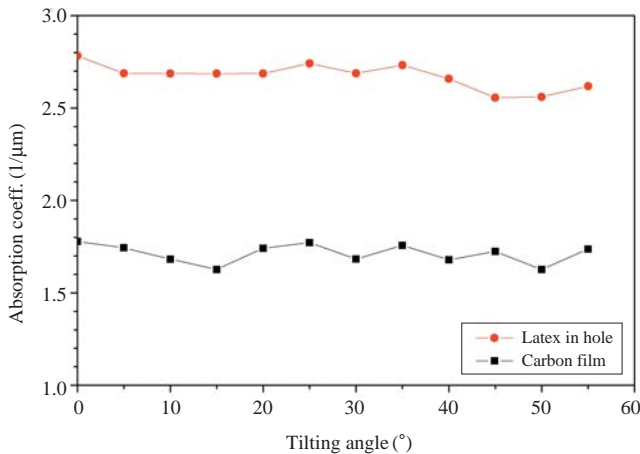


Fig. 6. The absorption factor of the carbon film and the latex sphere obtained through the Beer's law.

게 되고  $I_0$ 에 로그를 취하면 시료의 반응계수(시료의 두께 및 흡수계수)에 대하여 선형관계를 이루게 되어 회귀분석이 가능해진다. 따라서 Fig. 5에서 y축은 카본 지지막의 각도에 따른 투과빔 강도( $I_t$ )에 로그를 취한 값을 나타내며, x축은 각도에 따라 변화하는 시료의 두께에 대한 비율을 나타내어 선형적 관계를 보이도록 하였다. 결과적으로 회귀분석은 RMS값이 0.976의 정확도를 가지고 수행이 가능하였고 회귀 분석을 통해 "0"도에서의  $I_t$ 값(2520.216)을 구한 결과, 실제 측정된  $I_t$ 에 대하여 약 0.2%의 오차내에서 일치함을 알 수 있었다.

두 번째로 측정된  $I_0$  및 빔투과 두께 등을 이용해 두 물질에 대한 흡수계수를 구해 보았다. 카본 지지막과 hole의 가장자리에 위치한 latex sphere의 영역은 각각 동일 물질에 대한 강도가 분포되어 있으므로 기울기 경사각에 대한 두께를 고려해 주면 같은 흡수계수를 나타내어야 한다. 흡수계수를 구하기 위해 (3)식은 다음과 같은 식으로 바꾸어 표현할 수 있다.

$$\beta = \frac{\ln(I_0) - \ln(I_t)}{z} \quad (4)$$

카본 지지막의 두께(z)는 평평한 상황에서의 초기 두께 30nm에 대해 카본 지지막의 경사각  $\theta$ 에 따라  $30/\cos\theta$ nm을 적용하였고, latex sphere는 두께가 변하지 않기 때문에 모든 경사각에 대하여 75nm를 적용하였다. 각각에 대하여 흡수계수를 구한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

(4)식으로부터 흡수계수( $\beta$ )는 입사빔 강도의 변화에 민감하게 작용을 하기 때문에 이에 대한 오차를 줄이기 위해 앞서 구한 전자빔의 불안정도(4.1%)를 감안하여  $I_0$ 에 1.041의 scale factor를 곱하여 계산한 결과 카본 지지막은 약  $1.71(5)/\mu\text{m}$ , latex sphere는 약  $2.67(6)/\mu\text{m}$ 의 흡수계수를 나타

내었다. 이 흡수계수는 시료의 두께에 따라 입사빔의 강도가 얼마나 감소하는 지를 나타내는 계수로 각 물질의 질량 등 고유한 성질에 따라 달라지게 된다. 그러므로 기울기 각도에 따라 흡수계수가 일정하지 않다면 Beer's law가 성립되지 않기 때문에 경사각 기울기에 따라 흡수 콘트라스트의 변화가 심하여 결과적으로 정량적인 토모그램을 만들어 낼 수가 없게 됨을 의미한다. 현재까지의 대부분의 전자토모그래피 S/W는 입사빔의 강도 및 Beer's law에 대한 정확한 고려가 없이 정성적인 결과만을 구하고 있는 실정이다.

마지막으로 고려할 사항은 전자토모그래피에서는 각 물질에 대한 흡수계수는 가속전압, 대물렌즈 조리개, 배율, 전자빔 조사량 등에 의해 달라지게 되기 때문에 절대값은 구하기 어려우며 동일한 실험환경에서 각 물질에 대해 상대적인 값을 비교할 수 밖에 없다(Hayat, 2000). 따라서 보다 정확한 상대적인 흡수계수의 산출 및 Beer's law의 적용을 위해서는 본 연구의 실험방법에서 언급한 입사빔의 강도( $I_0$ )의 안정도(가속전압, 집속렌즈 조리개 등의 선택)가 무엇보다 중요하며, 투과빔의 강도( $I_t$ )에 영향을 주는 대물렌즈 조리개, 전자빔 조사량 등의 실험적 변수에 대한 세심한 고려가 수반된 실험이 필요하다. 결론적으로 의생물 시료에 대한 전자토모그래피는 시료에 대한 입사빔의 강도 측정과 Beer's law의 적용을 통해 획득된 토모그램을 이용할 경우 보다 정량적인 3차원적 구조분석을 수행할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- Gilbert P: Iterative methods for the three-dimensional reconstruction of an object from projections. *J Theor Biol* 36(1) : 105-117, 1972.
- Hayat MA: Principles and techniques of electron microscopy-biological applications, Cambridge university press, pp. 158, 2000.
- Kim JG, Lee SH, Kweon HS, Jeong JM, Jeong WG, Lee SJ, Jou HT, Kim YJ: Objective aperture effects for the quantitative analysis in electron tomography. *Korean J Microscopy* 38(4) : 285-291, 2008. (Korean)
- Levine ZH: Theory of bright-field scanning transmission electron microscopy for tomography. *J Applied Physics* 97 : 033101, 2005.
- Pozsgai I: Thickness determination by measuring in the TEM at 200 kV. *Ultramicroscopy* 68 : 69-75, 1997.

## < 국문초록 >

본 연구에서는 의생물 시료에 대해 정량적 전자토모그래피의 기본 전제 조건인 Beer's law를 실험적으로 검증하였다. 시료는 의생물 시료와 비슷한 흡수계수를 갖는 카본 지지막과 latex

sphere의 시료를 선택하였으며, 연속적으로 기울어진 TEM 이미지를 획득하였다. 우선, 전자토포그래피를 수행하여 카본 지지막과 latex sphere의 기본 상태를 파악하였다. Beer's law의 검증을 위해 각각의 물질에 대해 경사각 기울기에 따라 입사빔의 강도와 투과빔의 강도의 변화를 측정하여 회귀분석을 수행하였으며, 그 결과 RMS값 0.976의 범위에서 선형적인 관계를 확인할 수 있었다. 또한 Beer's law를 이용하여 카본 지지막과 latex sphere

에 대한 각각의 상대적인 흡수계수를 구했으며, 그 값은 대략  $1.71(5)/\mu\text{m}$ 과  $2.67(6)/\mu\text{m}$ 으로 경사각 기울기에 대하여 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 따라서, 정밀한 실험조건에서 입사빔의 정보를 유추할 수 있다면 의생물 시료에 대해 엄밀한 Beer's law가 성립하는 정량적인 전자토포그래피가 수행될 수 있을 것으로 기대된다.