

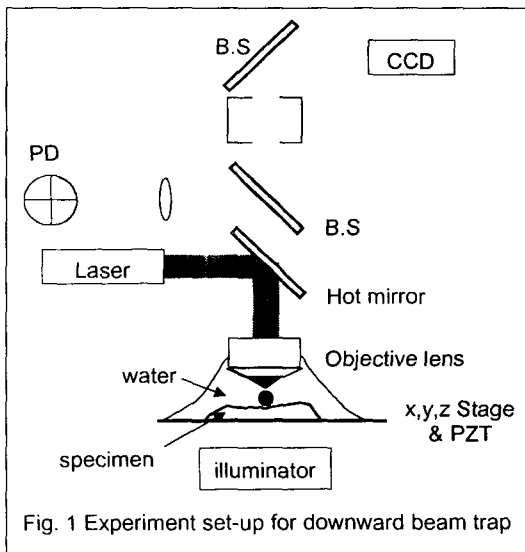
# 광포획된 마이크로 입자를 이용한 표면형상 측정

## Surface profile measurement with optically trapped micro-particles

주지영, 김준식, 김승우  
한국과학기술원 기계공학과  
chjy@kaist.ac.kr

정밀 삼차원 미세 형상 측정기에서 성능의 관건은 고속, 고분해능으로 측정하는 것이다. 그러기 위해서는 공진주파수가 높아야 하고 스프링 상수가 작아야 한다. 광포획 현미경(optical trap microscope, OTM)은 광포획된 마이크로 입자를 프로브로 사용하는 것으로 입자에 작용하는 복원력이 광에 의한 힘뿐이므로 스프링 상수가 낮다. 또한 공진주파수는  $f = \sqrt{k/m}$  으로 입자의 질량이 매우 작으므로 공진주파수도 비교적 높다. 그러므로 고속, 고분해능의 측정이 예상된다. 여기서 광포획이란 집속된 레이저광을 이용하여 마이크로 입자를 공간상에 띄우는 것을 말한다. 광포획된 입자를 프로브로 사용하는 시도는 Ghislain과 Friese 등에 의해 이루어졌다. Ghislain은 수중에서 바늘 모양의 물체를 광포획해 프로브로 사용하였고<sup>(1)</sup> Friese는 수중에서 광포획된 구형의 입자를 프로브로 사용해 입자의 위치 변화에 따른 광량 변화를 이용하여 표면 측정 결과를 발표하였다<sup>(2)</sup>.

이 연구에서는 수중에서 2차원적 하향광포획된 마이크로 입자를 이용하여 표면형상을 측정하였다. 3차원적 포획의 경우 입자가 공간상에 떠므로 불연속적인 표면의 측정이 가능하고 낮은 스프링 상수와 높은 공진주파수를 가진다. 반면 2차원적 포획은 입자가 바닥면에 붙어서 움직이는 것으로 연속적인 표면만 측정 가능하다. 입자를 프로브로 사용할 때의 장점을 확인하기 위해서 3차원적 광포획이 필요하지만 포획이 되지 않아 2차원적 포획된 입자를 이용하여 프로브로써의 사용 가능성을 알아보았다.



실험장치는 Fig. 1과 같다. 레이저 광이 hot mirror에서 반사되어 대안렌즈를 거쳐 입자에 조사되고 다시 입자표면에서 반사된다. 이 반사된 광은 광분할기에서 나뉘어져 포토다이오드와 CCD로 들어가게 된다. 대물렌즈가 대안렌즈의 역할도 동시에 수행하여 광의 초점이 시각의 초점과 일치하게 된다. 입자가 놓여지는 유리판은 x, y, z 스테이지에 장착된 PZT에 붙여 거시구동과 미세구동이 가능하도록 하였다. 레이저 광은 고정되어 있고 바닥쪽의 유리판을 움직여 입자의 위치를 바꾼다. 대물렌즈는 커버글라스의 영향을 없애기 위해서 커버글라스 없이 직접 물에 담근 채 실험하였다. 대물렌즈는 NA=1.25, ×100인 oil-immersion 렌즈를, 입자는 폴리스티렌 입자를 사용하였다.

2차원적 광포획된 입자를 프로브로 사용하기 위해 광량 변화를 측정의 기준으로 삼았다. 입자의 위치와 광량은 초점 위치에서 거의 선형적인 관계를 가진다.

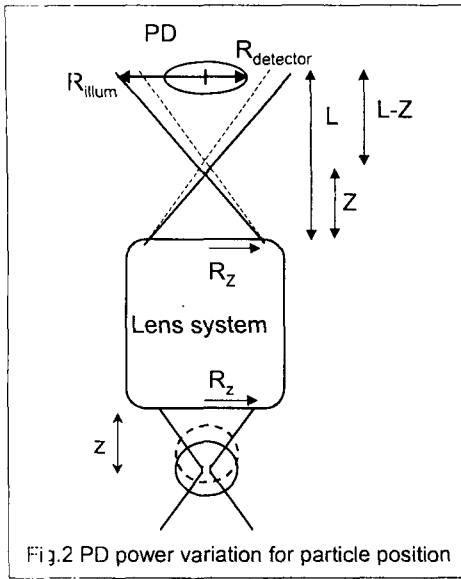
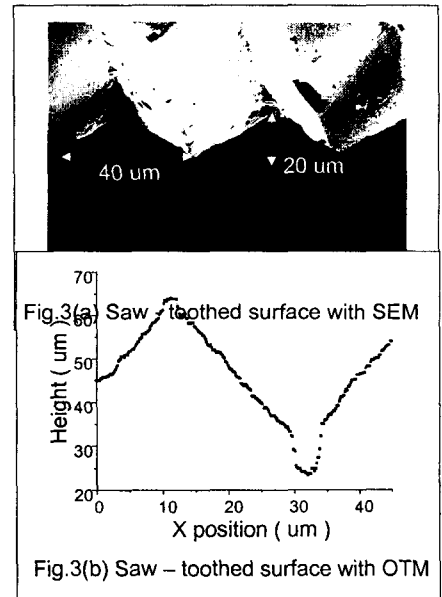


Fig. 2 에서 보듯이 포토다이오드는 결상면의 약간 뒤에 놓여져 광의 지름이 포토다이오드의 지름보다 크다. 초점부근에서 입자의 수직위치가 달라지면 결상면의 광각도가 달라지면서 광의 세기가 변해 포토다이오드의 광량이 달라지게 된다. 고정된 레이저 광에 대해 입자에 초점이 맺히는 위치를 중심으로 입자를 이동시켜 광량 변화를 측정하였다. 초점위치 부근에서 2  $\mu\text{m}$  입자의 경우 약 3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  입자의 경우 약 4  $\mu\text{m}$ 의 선형적인 구간을 가졌다. 이번에는 삼각과 형태로 유리판을 상하로 구동시키면서 광량을 측정하여 최소로 삼각과 형태를 따라가는 구동거리를 구했다. 이 거리는 광포획된 입자를 프로브로 사용했을 때의 분해능에 해당한다. 구분 가능한 최소 선형구간은 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  입자 둘 다 1  $\mu\text{m}$  이하로 비슷하게 나왔다.

시편의 표면을 측정하기 위해 피드백 시스템을 구현하였다. 입자 위치에 따른 광량변화로 높이 변화를 알 수 있긴 하지만 표면의 전체 높이차가 광량이 선형적으로 변하는 3  $\mu\text{m}$  내에서만 가능하다. 그러므로 다양한 시편을 재기 위해서는 피드백 시스템이 반드시 필요하다. 원리는 다음과 같다. 수중에서 시편 위에 놓여진 입자를 2차원적 하향광포획 한 뒤, 광량이 선형인 구간에서 광량을 측정한다. 이 값이 기준값이 된다. 시편을 수평이동시키면 시편표면의 높이에 따라 입자의 수직방향 높이가 변하고 따라서 광량이 변한다. 광량이 처음과 같게 되도록 시편을 수직방향으로 피드백 시킨다. 그 때 PZT의 변화가 높이 변화이다. 이 과정을 반복하면서 표면을 측정한다.

물의 폭이 약 40  $\mu\text{m}$ 이고 높이차가 약 20  $\mu\text{m}$ 인 톱니모양의 굴곡이 있는 시편을 측정하였다. Fig. 3(a)는 SEM으로 찍은 사진이다. 측정 결과는 Fig. 3(b)와 같다. 상당히 비슷한 모양으로 측정이 됨을 알 수 있다. 수평방향으로는 비슷한데 수직방향으로는 측정값이 약 1.5배 정도 차이가 났다. 이것은 최상점과 최하점에서 반사가 심하거나 입자가 잘 빠져나오지 못해 측정이 잘 안되었고 PZT 자체의 히스테리시스의 영향도 있다.

본 연구 과정에서 원래 목표로 했던 3차원적 광포획된 입자를 이용한 표면측정은 하지 못했다. 하지만 2차원적 광포획된 입자를 이용하여 표면측정을 수행하였으며 이것을 통하여 충분히 측정 가능함을 확인하였다. 다만 2차원적 광포획된 입자로 측정을 할 경우 표면이 연속적이어야 한다. 또 높은 분해능은 얻지 못했지만 다른 측정기로는 재기 힘든 경사면을 측정할 수 있음을 확인하였다.



< 참고 문헌 >

1. L. Ghislain and W. Webb, "Scanning-force microscope based on an optical trap," Opt. Lett. 18, 1678-1680 (1993)
2. M. E. J. Friese *et al.*, "Three-dimensional imaging with optical tweezers," Appl. Opt. 38, 6597-6603 (1999)