

광핀셋의 원리 및 응용기술

글 · 김 중 호/한국표준과학연구원 물리표준부
 질량 · 힘그룹, 선임연구원
 e-mail · jhk@kriss.re.kr

이 글에서는 마이크로/나노 스케일의 생체분자를 제어하거나 생체 분자의 기계적 물성치 측정 그리고 더 나아가 생체분자 상호간 작용력을 측정할 수 있는 광핀셋(optical tweezers) 원리 및 응용 예를 소개한다.

레이저광을 이용한 광핀셋의 원리를 이해하는 데 자주 인용되는 유명한 공상과학 드라마가 있다. 국내에서도 TV 시리즈로 인기리에 방영된 '스타트랙(Star Trek)' 이 그것이다. 그림 1은 스타트랙의 한 에피소드에서 발췌한 사진으로 보그(Borg) 우주함선이 소형 엔트프라이즈(Enterprise)호를 광선을 이용하여 조정하는 모습을 보여준다. 현재는 마이크로/나노 스케일의 입자를 제어하기 위하여 광핀셋을 사용하고 있지만 먼 미래에는 보다 강력한 빛을 이용하여 소형 우주선을 조작할 수 있는 시대가 올 것으로 기대한다. 한편 17세기 초반에 독일 천문학자인 케플러(Johannes Kepler)는 그림 2에서 보이는 혜성(comet)의 꼬리가 태양의 반대쪽으로 생기는 이유를 태양의 복사열이 혜성을 밀고 있기 때문에 발생하는 것이라고 생각하였다. 1873년의 전자기에 관한 그의 이론에서 맥스웰(James Clerk Maxwell)은 빛 그 자체는 광력(optical force)을 발생시킬 수 있다고 것을 이론적으로 보여주었다. 그러나 이것이 세기가 바뀌기 전까지는 실험적으로 증명이 되지 않았다. 이후 거의 300년 동안 빛의 광력에 대한 가설과 증명 사이에서 나온 유일한 결론은 빛의 광력은 터무니없이 작다는 것이었다. 즉 몇 밀리와트를 가지는 빛이 하나의 물체에 집중되었을 경우 수 pN($1\text{pN} = 10^{-12}\text{N}$)에 해당한다는 것이었다.

1960년대 들어서면서 레이저의 개발은 연

구자들에게 레이저광의 강도 그리고 빛의 물체에 대한 초점 거리를 통해 광력에 대한 연구를 할 수 있는 길을 열어 주었다. 이러한 연구들의 선두주자가 AT&T(Bell) 연구소의 A. Ashkin이었다. 그는 레이저광을 집중시키면 직경이 몇 마이크로미터인 구모양의 폴리스티렌 입자들이 조작 및 제어 될 수 있고



그림 1 '스타트랙'에서 우주선의 제어 모습

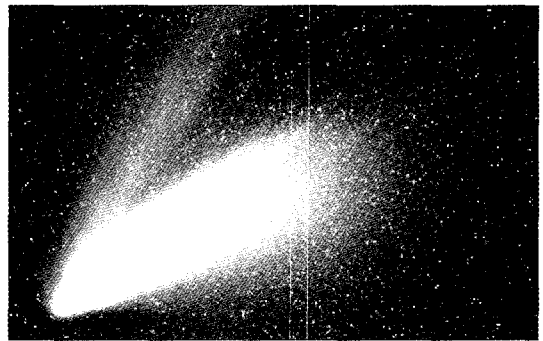


그림 2 혜성의 모습

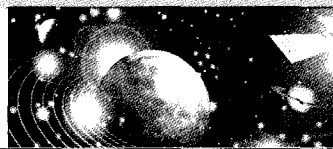


심지어는 광력을 사용하면 입자들이 중력에 대하여 부양(levitation)될 수 있음을 보여주었다. A. Ashkin의 초창기 연구결과는 오늘날의 물리학자들에 의해 연구되고 있는 원자를 포획(trapping) 및 냉각(cooling)할 수 있는 기반기술을 만들어주었다. 실제로 1980년 중반까지는 광핀셋을 이용한 연구를 살펴보면 원자 포획 및 냉각에 대한 연구가 주를 이루었다. 한편 광핀셋을 이용한 생체분자 및 세포에 대한 연구가 시작된 것은 1985년에 A. Ashkin이 개별적인 바이러스와 E-Coli 박테리아를 포획하면서부터이다. 여기에 사용된 광핀셋의 장치는 레이저광을 대물렌즈를 통해 집속시킬 수 있는 비교적 간단한 것으로 수 나노에서 수 마이크로미터 스케일의 유전체 입자를 3차원으로 안정하게 포획할 수 있었다. 반면 이 장치는 상온에서 원자를 포획하기에는 적합한 장치가 아니었다. 1987년 A. Ashkin과 동료 연구자들은 살아 있는 대상체에 손상을 주지 않는 1,064nm 파장을 갖는 CW Nd:YAG 레이저를 사용하여 바이러스, 효모, 박테리아를 포획하였다. 최근에 발표된 연구들을 보면 세포나 박테리아와 심지어 상당히 운동성이 좋은 세포들조차 포획, 조작하는 것이 가능할 뿐만 아니라, cell sorting, classification, cell fusion 과 intracellular surgery 등 세포 생물학에 있어서도 없어서는 안 될 도구로 자리잡아가고 있다.

레이저광을 이용한 광핀셋의 원리

일반적으로 실험실의 레이저를 흰 종이에 비추어 보면 가운데가 가장 밝고 가장자리로 갈수록 어두워진다. 이렇게 하나의 밝은 점을 가지고 있는 진동 모드는 TEM₀₀로서 이론적

인 밝기 분포는 그림 3과 같이 가우시안 분포를 가진다. 이 빔의 분포 중간으로부터 떨어진 위치에 높은 굴절률을 가지는 유전체 구가 있다고 하고 대칭적으로 빛 'a'와 'b'가 유전체 구 중심에 대하여 입사된다고 하자. 구 표면에서의 비교적 적은 반사를 무시하면 대부분 빛은 유전체 구를 통과하면서 굴절한다. 따라서 빛 'a'와 'b'는 운동량 변화로 인하여 유전체 구에 힘 F_a와 F_b를 발생시킨다. 여기서 빛 'a'의 강도는 빛 'b'의 강도보다 높기 때문에 힘 F_a는 힘 F_b보다 크다. 따라서 유전체 구에 입사되는 이런 대칭적인 빛들의 효과를 합했을 때 구에 작용하는 순수한 힘은 두 개의 성분 F_{scat}, F_{grad}으로 나눌 수 있다. 산란력(scattering force) F_{scat}은 입사된 빛의 방향으로 작용하는 빛을 의미하며, 경사력(gradient force) F_{grad}은 레이저광의 강도세기 변화에 의해 발생하는 것으로 입사된 빔의 분포 중간 쪽으로 작용한다. 따라서 유전체 구가 빛의 분포 중간에 있을 경우 입자는 작용하는 힘 F_a와 F_b는 똑 같으며 경사력이 발생하지 않는다. 구에 입사하는 모든 빛 광선에 대하여 힘을 계산해 보면 그림 3에서 보이는 것처럼 유전체 구가 움직이는 속도와 일치함을 보여주고 있다. 한편 낮은 굴절률을 가지는 유전체 구가 그림 3과 같은 위치에 있을 때 힘 F_a가 F_b보다 작아 구가 빛으로부터 이탈하게 된다. 이런 현상은 글리세롤(glycerol) 속에서 마이크로 크기의 공기방울을 보면 알 수 있다. 이런 두 힘 성분의 크기 및 방향에 대한 이해는 유전체 입자들을 3차원적으로 포획하는 장치를 개발하는데 도움을 줄 수 있다. 한편 그림 3은 개구수(N.A. : Numerical Aperture) 값이 크지 않은 대물렌즈를 통해 레이저광을 유전체 구에 입사를 시켰기 때문에 입자를 빛의 중간으로 끌어



당길 수는 있을지라도 움직이지 못하도록 포획을 할 수 없다. 따라서 초창기 레이저광을 이용한 입자 포획에는 두 개의 레이저를 입자 사이에 놓는 방법을 사용하였다. 그러나 1986년 A. Ashkin은 한 개의 레이저와 대물렌즈를 사용하여 입자를 포획하는 것을 보여 주었다. 그림 4는 레이저 하나를 사용하여 입자를 포획하는 개념을 보여준다. 대물렌즈를 통해 광선 'a'와 'b'를 입자의 중심 위에 집속시키면 입자에 작용하는 힘은 F_a 와 F_b 로 크기가 같다. 이 두 힘을 합하면 입자를 포획할 수 있는 힘 F 가 되어 입자를 끌어당길 수 있다. 일반적인 경우에는 그림 3처럼 산란력이 경사력보다 크지만, 레이저광을 개구수 값이 1.2~1.3이 되는 이 큰 대물렌즈를 통해 미세입자에 강하게 집속되면 그로 인한 광의 경사력이 더욱 커져서 미세입자는 레이저광의 진행방향의 반대방향으로 끌려가게 되므로 광은 초점부근에 입자를 잡아줄 수 있게 된다. 이처럼 광핀셋은 하나의 레이저광만 있어도 미세입자의 포획과 조작이 가능하며, 어떠한 물리적 접촉없이 미세입자나 세포 등을 선택해서 모니터로 관측하면서 포획하고 조

작할 수 있다는 것이 가장 큰 장점이다. 한편 광핀셋 장치를 구성하는 데 있어서 가장 중요한 것이 레이저의 사양과 대물렌즈의 사양이다. 레이저의 경우 빛의 흡수에 의한 손상을 시료에 주지 않기 위해서는 근적외선(780nm~1,330nm)의 파장을 갖는 Nd:YAG, Nd:YLF 등의 레이저를 사용하는 것이 중요하다. 그리고 레이저의 파워는 1W 정도를 갖는 것이 일반적이다. 한편 대물렌즈의 경우 앞 절에서도 언급했듯이 1.2~1.3의 개구수를 가지는 렌즈가 적당하다.

한편 포획하고자 하는 입자의 크기 및 모양은 광핀셋의 성능과 효율에 상당한 영향을 미친다. 일반적으로 광핀셋의 경우 입자들의 직경과 레이저광의 파장에 대하여 두 종류의 입자들이 포획될 수 있다. 즉 파장이 입자의 직경보다 매우 작을 때($\lambda \ll d$)를 Mie 영역이라 하고 파장이 입자의 직경보다 매우 클 때($\lambda \gg d$)를 Rayleigh 영역이라 한다. 특히 Mie 영역일 경우 입자의 모양은 빛의 반사와 굴절 때문에 광핀셋의 성능에 큰 영향을 미치므로 구 모양 또는 타원 모양의 입자를 포획하기가 쉽다.

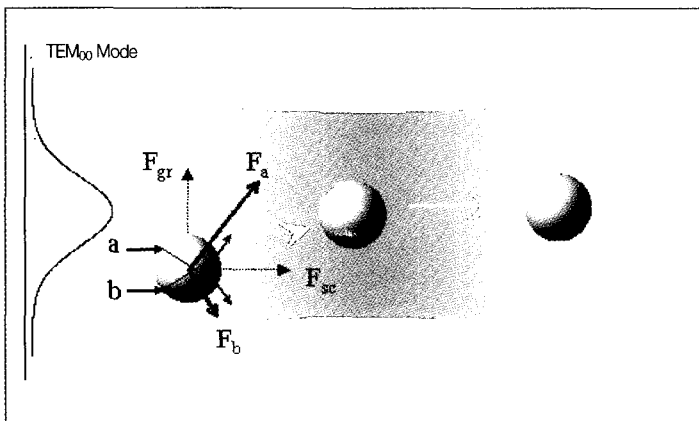


그림 3 TEM₀₀ 빔에 의해 제어되는 유전체 구형입자

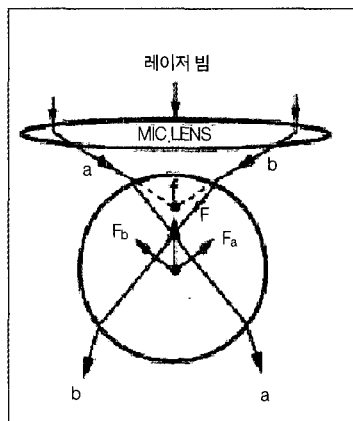


그림 4 광핀셋 도식도

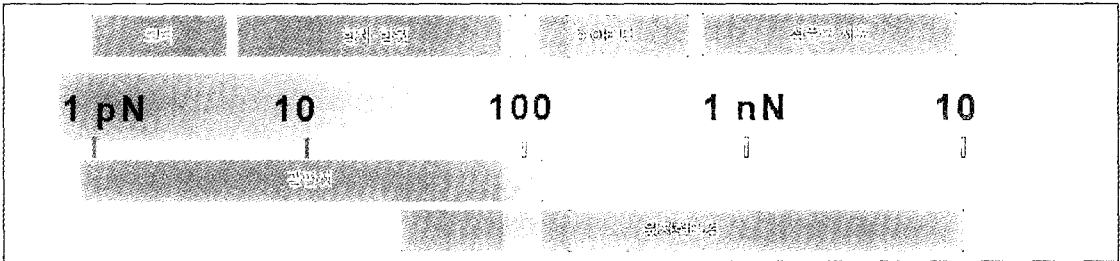
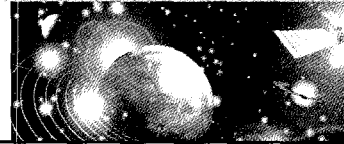


그림 5 바이오분야에서 힘의 크기와 측정 장비와의 관계

또한 이 영역에서 입자는 빛을 통과시킬 수 있도록 투명해야 한다. 입자의 모양이 중요한 반면 Mie 영역에서는 Ray-Optics 모델을 사용하여 입자에 작용하는 산란력과 경사력을 이론적으로 구할 수 있다. 그러나 Rayleigh 영역에서는 맥스웰 응력텐서(Maxwell tensor stress)와 일반화된 Lorentz-Mie 이론으로 이루어진 전자기(electromagnetic) 모델을 사용하여 입자에 작용하는 힘을 계산할 수 있다. 한편 레이저광의 파장과 입자의 직경이 비슷한 지역에서 산란력과 경사력을 이론적으로 계산하는 것이 쉽지 않다. 이루어진다. 더욱 더 불행한 것은 대부분 생물학적인 작업들이 Mie영역과 Rayleigh영역의 중간에서 발생한다는 것이다. 그림 5는 바이오 분야에서 힘의 크기에 따른 힘 측정장치를 개략적으로 보여주고 있다. 광핀셋은 레이저의 파워를 조정함으로써 수 pN에서 수백 pN까지 측정할 수 있는 장치이다. 따라서 단백질 모터의 메카니즘, 항체와 항원과의 상호작용 그리고 바이오틴(biotin)과 아비딘(avidin) 등의 단백질 상호작용을 연구에 이용할 수 있다. 그러나 광핀셋 장치를 구성하는 데는 고가의 장비가 요구될 뿐만 아니라 셋업된 장치가 상당히 크며 일반 사용자가 사용하기에는 적합하지 않는 단점이 있다. 한편 최근 널리 알려진 AFM

장치는 반도체공정기술로 제작한 마이크로 크기의 캔틸레버를 이용하기 때문에 힘의 측정범위 폭이 수십 pN에서 수십 nN까지 상당히 넓다. 그러나 광핀셋에 비하여 극미세의 힘 즉 수 pN을 측정하는 것이 캔틸레버 제작, 노이즈 문제 등으로 인해서 쉽지는 않은 상태이다.

한편 광핀셋의 경우 매우 작은 힘을 측정할 수 있는 장점은 있으나 광핀셋 장치를 셋업했을 경우 어떻게 힘을 측정하느냐가 중요한 문제이다. 특히 앞 절에서 언급한 이론들은 포획하고자 하는 특정한 물체의 형상에는 적용하기는 쉽지 않기 때문에 이런 입자에 작용하는 극미세의 힘은 실험적으로 측정하는 것이 타당하다. 일반적으로 대부분 광핀셋의 힘 측정은 그림 6과 같이 유체흐름에 야기된 항력을 이용한다. 힘의 측정은 마이크로 크기의 입자에 대한 레이놀드 수(Reynolds number) 즉 $Re = vdp / \eta$ 이 대략적으로 10^{-5} 정도가 된다는 사실에 근거하여 이루어진다. 참고로 레이놀드 수에서 v 는 유체의 속도를 나타내며, d 는 입자의 크기를 나타내며, ρ 는 입자의 밀도 그리고 η 는 유체의 점성을 나타낸다. 관성력이 무시된다고 가정했을 때 그림 6에서 유전체 구는 유체에 의하여 항력 $F_{\text{fric}} = \beta v$ 을 받는다. 여기서 β 는 항력계수이고 v



는 속도를 나타낸다. 직경 d 를 가지는 유전체 구의 경우 Stokes의 법칙에 의하여 항력계수 β 는 $3\pi\eta d$ 이다. 항력과 같은 크기의 힘이 광핀셋에 의하여 작용된다면 유전체 구는 마침내 정지하게 되고 유체에 의한 항력을 이용하여 광핀셋에 의한 포획력을 측정할 수 있다. 힘을 측정하는 구체적인 방법은 다음과 같다. 먼저 유전체 구가 유체 챔버 내에서 광핀셋에 의하여 포획되어 있을 때 유체를 강제적으로 흘러보내 포획된 구가 광핀셋으로부터 이탈되도록 한다. 이탈되는 순간의 유체의 속도를 Stokes의 식에 넣으면 포획력을 쉽게 구할 수 있다. 이 측정방법은 비디오 카메라와 유체챔버 그리고 펌프만을 이용하기 때문에 비교적 간단한 방법이다. 그러나 유체의 흐름이 포획된 구를 바닥면 쪽으로 밀기 때문에 입자에 작용하는 순수한 수평방향의 포획력을 얻는 것이 쉽지 않다. 수평방향의 포획력을 측정하는 방법에는 이것 이외에도 유체챔버를 모터나 피에조로 움직여서 힘을 측정하는 방법도 있다. 한편 수직방향의 포획력을 구하기 위해서는 포획된 유전체 구에 대한 무게를 이용하면 가능하다.

광핀셋 응용 예 : 분자모터

근육 등의 운동을 담당하는 분자와 같은 생물기계의 기능을 분자 레벨로 해명하기 위해서는 크기가 수십 나노미터의 단백질분자의 개개의 거동을 계측 제어하는 것이 필요하다. 이 때문에 광 핀셋 등의 나노 테크놀로지를 구사한 구도의 계측 및 분자 조작기술의 개발 응용이 진행되고 있다. 이 단분자 계측기술을 이용해 분자기계의 일종인 분자모터가 활발히 연구되고 있다. 이러한 연구로부터 분자기계의 독특한 구조가 서서히 밝혀지고 있다. 분자모터의 예로서 미오신이라고 하는 단백

질운동의 구조를 보면 미오신은 그림 7과 같이 액틴으로 불리는 다른 단백질이 체인으로 연결된 액틴 필라멘트(filament) 위를 움직인다. 이 운동에는 생체중의 에너지원인 ATP(아데노신 3인산)와 결합 처리할 때 생기는 화학에너지를 사용하고 있다. 최근 광핀셋 기술에 의해 미오신 분자의 운동 모습과 ATP와의 화학에너지의 교환이 밝혀졌다. ATP로부터 에너지를 받기 전에는 미오신은 액틴 필라멘트 위를 브라운운동으로 확률적으로 이동한다. 이 경우 미오신은 전후에 동일한 확률로 랜덤하게 움직이므로 운동의 방향은 정해져 있지 않다. 그러나 광핀셋 계측기술을 이용한 연구에 의해 ATP의 화학에너지를 이용해 브라운운동을 하는 미오신의 운동으로부터 한 방향의 운동을 효율적으로 사용하는 것이 밝혀졌다. 이것은 지금까지의 정설을 뒤집는 발견으로 이 연구로부터 인공기계와는 다른 분자기계의 독특한 메카니즘이 밝혀졌다. 향후 인공근육이나 로봇기계에 이용되는 액츄에이터에 응용이 기대된다.

한편 미국 스탠포드 대학의 생물물리학자들로 구성된 연구그룹은 과거 약 20년간 수수께끼로 남아 있던 분자 모터 '키네신(kinesin)'의 보행기구를 해명하였다. 키네신은 세포분열, 세포운동, 신경세포에 있어 축삭수송 등을 담당하는 분자이다. 두 개의 분자가 DNA와 같은 2중 나선구조를 취하고 있으며, 한쪽 끝이 세포활동에 필요한 물질을

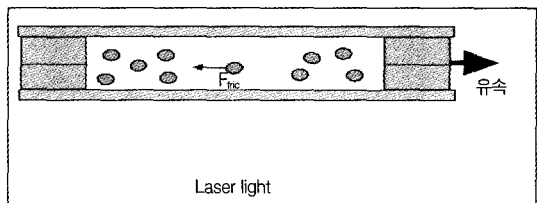
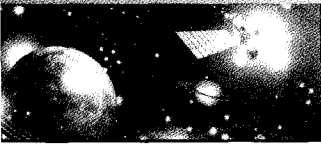


그림 6 입자의 항력을 이용한 광력 측정 방법



함유하고 있는 막소포와 결합되어 있고, 다른 끝은 미소관(microtubule)과 상호작용하며, 두 개의 발이 교대로 미소관을 붙잡바 막소포를 잡아당기면서 미소관 위를 이동한다. 연구그룹은 그림 8과 같이 막소포 대신 입자를 부착하여 매초 100코마(coma)로 키네신 단분자의 움직임을 측정할 수 있는 현미경을 개발하였다. 이것을 이용하여 일부의 키네신 분자가 다리를 끌면서 미소관 위를 걷고 있는 것을 발견하였다. 이 성과는 알츠하이머병(Alzheimer's disease)과 헌팅턴병(Huntington's disease) 질환 및 암 연구에 새로운 길을 열어줄 것이다.

광핀셋 응용 예 : DNA 기계적 물성치 측정
최근까지 DNA에 대한 물리적 화학적 연구는 벌크한 상태에서 측정되었기 때문에 생물

학적 반응과정에서 DNA가 받는 시간과 관계된 응력과 변형률을 해결할 수가 없었다. 그러나 광핀셋을 그림 9에서처럼 생체분자 인장시험기로 활용하면 DNA 기계적 물성치 측정을 할 수 있었다. DNA는 폴리머로서 수용액에서 열적인 변동에 의해 국소적으로 굽혀져서 코일 배치를 가진다. 이와 같은 열적인 변동은 외부에서 힘이 작용하더라도 DNA의 양쪽 끝의 길이를 최소화시키는 역할을 한다. 이런 용수철 같은 탄성적 거동은 순수하게 엔트로피(entropy) 때문이다. 그림 9의 데이터는 한 쪽 끝을 바닥면에 고정하고 잡아당겼을 때 변위와 힘의 관계를 보여 준다. 대략 8pN 정도까지는 엔트로피가 지배적인 모습을 보여준다. 그리고 70pN까지는 스프링을 잡아당길 때와 같은 Hook's 법칙을 따르는 탄성영역 특성을 보여 준다. 이 영역을 넘어서면 그림 9의 데이터에서도 보이는 바와 같이 DNA는 영구적인 구조적으로 변형을 하게 된다. 참고로 길이 16.2nm를 가지는 단일 DNA의 엔트로픽 탄성(entropic elasticity)의 측정은 1992년 Smith와 그의 동료 연구자들에 의해 처음 시도되었다. 그들은 단일 DNA가 붙은 상자성체의 구형 입자를 자기장으로 잡아당기는 방법을 사용하였다. 이 측정은 FJC(Freely Jointed Chain) 모델 즉 DNA를 자유롭게 연결된 막대로 취급하는 모델이 문제점을 가지고 있다는 것을 보여 주었다. 한편 DNA를 유연성 있는 벌레 모양의 연결 방식 즉 WLC(Worm-Like Chain) 모델에 대한 해는 Marko와 Siggia에 의해서 얻어졌다. 이 모델은 FJC의 모델보다 더 현실적으로 엔트로피 변화를 계산할 수 있다. 이 WLC 모델을 이용한 예측은 그림 9에서처럼 Smith 등에 의해 얻어진 실험결과와 유사함을 보여 주었다. 이와 같은 이상적인 플

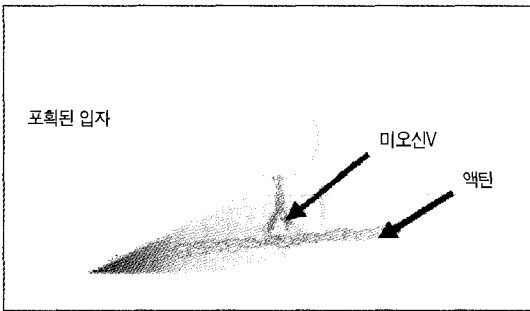


그림 7 분자모터 : Myosin

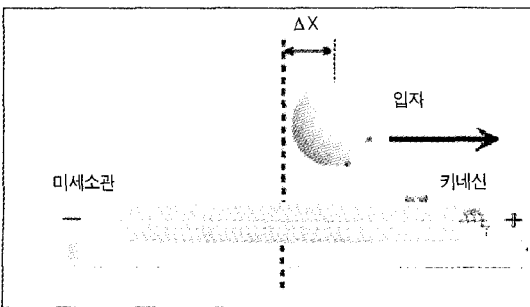


그림 8 분자모터 : Kinesin

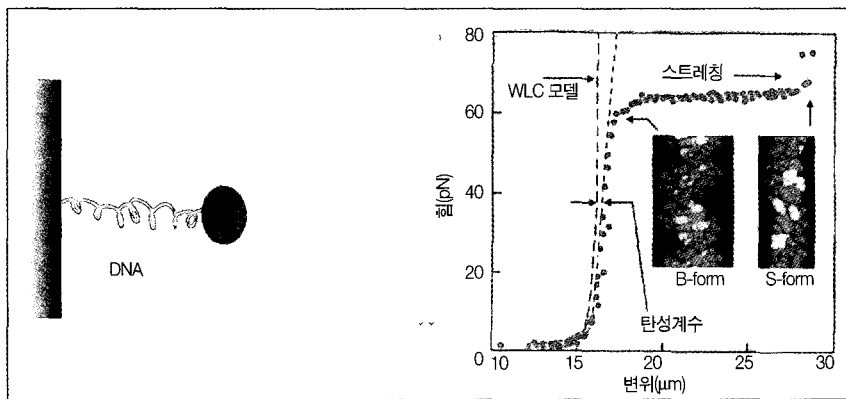
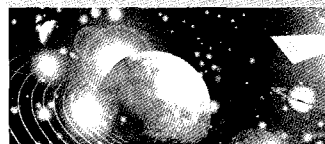


그림 9 광핀셋을 이용한 DNA 인장실험

리머의 탄성이론과 DNA에 대한 측정과의 일치는 DNA와 같은 모든 단일분자에 대한 초석을 제공해주었다. 또한 이것은 큰 힘이 작용할 경우 DNA에서 관측되는 영구적 구조변형을 이해하는 기초를 세웠으며 단백질과의 상호작용을 연구하는 데 도움을 주었다.

광핀셋 응용 예 : 세포이동과 선별

세포 같은 생물학적인 샘플을 이동하거나 선별을 위해 미세유체채널(microfluidics) 같은 MEMS 소자를 광핀셋 장치와 연결하는 연구가 큰 관심을 끌고 있다. 현재까지 바이오칩 기술들은 생물학적인 샘플을 수송하거나 선별하기 위해 정전기적 또는 기계적 힘에 의존하였다. 따라서 비접촉식, 비파괴적, 비오염적으로 샘플을 다룰 수 있는 이점을 가지고 있는 광핀셋 장치는 MEMS 소자와의 통합에 적절한 것으로 판명되고 있다.

Wang과 그의 연구진들은 마이크로 유체채널을 활용하여 그림 10과 같은 두 가지 형태의 광학 스위치 소자를 개발하였다. 그림 10의 왼쪽 그림은 5마이크로 크기의 직경을 가지는 구형입자들이 T 자모양의 채널 쪽으로 움직이고 있을 때 광핀셋으로 입자들을 포획

하여 이동시키는 것을 보여주고 있다. 이것은 광핀셋의 경사력을 이용한 것으로 세포의 선별에도 사용될 수 있는 장점이 있다. 폭이 40 마이크로이고 깊이가 20마이크로인 T자 모

양의 마이크로 채널은 PDMS으로 제작되었다. 이 고분자는 유연성이 있고 생체 적합성을 가지는 실리콘 고분자이므로 채널 제작에 많이 사용되고 있다. 그림 10의 오른쪽은 경사력을 이용한 것이 아니라 산란력을 이용하여 위의 채널(input 1)에서 유체를 따라 흐르고 있는 구형입자를 아래 채널(output 2)로 이동시키는 것을 보여준다. PDMS로 제작한 채널의 크기는 40마이크로미터의 폭을 가지며 선택된 구형입자의 크기는 5마이크로 크기이다. 이런 종류의 입자 선별장치의 이점은 다른 선별기와 달리 레이저광을 액츄에이터 할 필요가 없다는 것이다. 반면 이것의 단점은 선별할 때 뭉쳐서 움직이는 입자들을 선택적으로 선별하기는 쉽지 않은 단점을 가지고 있다.

광핀셋 응용 예 : 다중 광포획

1991년 Sasaki 등은 1마이크로미터 크기의 폴리스티렌 입자들을 galvano-mirror로 스캔하여 원하는 모양으로 배열할 수 있음을 증명하였다. 그는 레이저광의 스캔 속도가 입자들의 브라운 운동(Brownian motion)보다 빠르면 어떤 형태의 모양도 만들 수 있

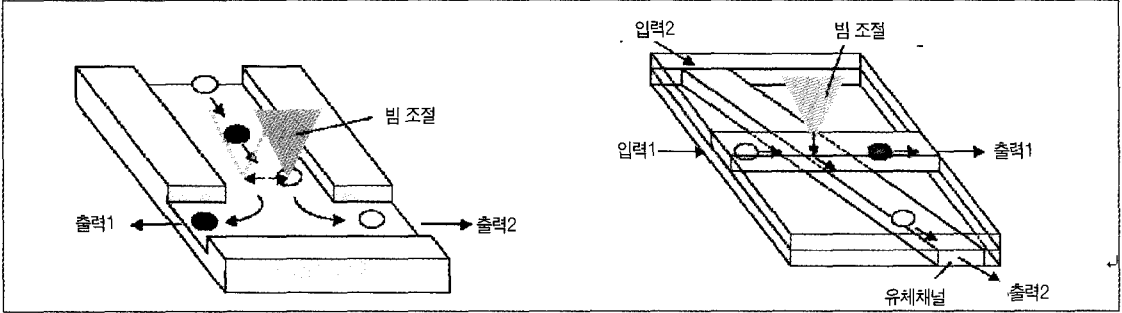
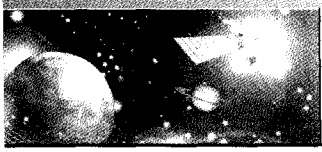


그림 10 광핀셋을 이용한 미세유체채널에서 세포선별

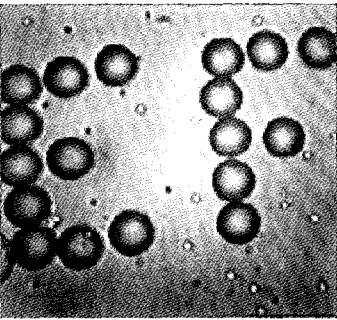


그림 11 광핀셋을 이용한 10마이크로미터의 입자들을 배열한 모습

다고 하였다. Umea 대학 연구진들은 그림 11에서 보이는 것처럼 광핀셋을 사용하여 10마이크로미터의 구들

을 조작하여 배열하는 것을 보여주었다. 이 실험은 N.A.가 1.3인 60x의 대물렌즈를 사용하여 수행되었다. 한편 1998년 Dufresne 등은 하나의 레이저광을 회절(diffraction)시켜 다중의 광핀셋을 만들 수 있는 방법을 고안하였다. 이 접근방법은 하나의 레이저를 사용한다는 측면에서 기존의 방법에 비해 장점이 있다. 그는 이 방법을 통해 16개의 입자들을 4x4어레이 형식으로 배치시킬 수 있음을 보여 주었다. 회절방법은 레이저빔의 파면을 곡면으로 만들 수 있기 때문에 임의의 3차원 어레이를 만들 수 있다. 최근 Dufresne 등은 많은 수의 입자들을 포획하기 위하여 홀로그래픽 광핀셋을 개발하였다. 이 장치는 편광된 레이저빔을 회절 광학 장치(DOE)에 의

해 형체가 얻어지도록 하는 것이다. 이와 같은 다중의 광핀셋을 만들 수 있는 기술은 향후 복합재료의 제조 또는 포토닉스(photonic), 광전자 그리고 센서에 필요한 콜로이드 입자들을 제어하는 데 도움을 줄 것으로 기대하고 있다.

맺음말

A. Ashkin이 광핀셋 장치를 개발한 이후로 나노/마이크로 크기의 입자들을 포획 또는 조작할 수 있는 정밀 제어 기술은 다양한 분야 특히 원자 물리학 그리고 생물학에 관련된 실험학자들에게 상상 속에서만 가능했던 연구의 길을 열어 주었다. 비파괴적이고 비접촉식인 이 광핀셋은 지금까지는 주로 마이크로 생물학에서 생체분자들의 상호작용 그리고 세포의 조작 및 제어 할 수 있는 중요한 도구로 활용되었다. 그러나 향후에는 반도체 기술과 표면과학의 발달로 인하여 광핀셋 장치는 화학, 물리학, 공학 등 다양한 분야에 활용될 것으로 전망한다. 또한 레이저 기술의 발달로 형광기술, 공초점 현미경(confocal microscopy) 같은 이미지 기술이 발달되어 수 나노 크기의 생체분자들의 메카니즘을 규명할 수 있을 것으로 기대한다.