

## 가상장갑으로 제어되는 광핀셋 시스템을 이용한 마이크로 구조물의 제작

박인용\*, 이종현\*, 이용구\*\*

### Manufacturing Micrometer Scale Structures by an Optical Tweezers System Controlled by CyberGlove

Park, I. Y.\*, Lee, J. H.\* and Lee, Y. G.\*\*

#### ABSTRACT

In recent years, researchers are actively investigating new methods that are applicable for manufacturing micrometer to nanometer scale structures. Among them, optical tweezers that can manipulate microscopic objects using a laser is receiving one of the key attentions. Optical tweezers have been used actively in the field of science. For example, for measuring mechanical characteristics in the scale of piconewtons or for manipulating and sorting large numbers of particles, bacteria, cells, etc. However, little works have been reported for "manufacturing" objects. In this paper, we present a new method for manufacturing micrometer scale structures using micrometer scale biotin coated polystyrene particles. Particles will be controlled with a user interface that utilizes a CyberGlove and glued together by the bonding force between biotin and streptavidin.

**Key words :** optical tweezers, CyberGlove, microassembly, streptavidin, biotin

#### 1. 서 론

마이크로/나노 크기의 물체의 특성, 제어 및 제작에 관한 연구가 최근 들어 빨라지고, 다양한 분야에서 활발하게 응용 및 연구되고 있다. 그 중에서도 제작 및 제어에 가장 많이 쓰이는 방법으로는 Scanning Probe Microscope(SPM)<sup>[1]</sup>와 광핀셋(optical Tweezers)<sup>[2]</sup>이 있다. 그리고 마이크로/나노 구조물을 만들기 위한 재료는 gold nanorods<sup>[1]</sup>, colloidal Au and Ag nanoparticles<sup>[3]</sup>, polystyrene particles, streptavidin-biotin linkage<sup>[4]</sup>, DNA-DNA linkage<sup>[5]</sup> 등이 많이 쓰이고 있다. 대표적인 두 제작 방법 중 STM은 접촉식 방법으로, 물체를 잡고 옮기는 것은 비교적 쉽지만, 상대적으로 원하는 위치에서 대상물체를 놓는 것이 어렵다. 또한, 접촉식 방법이므로 대상물체에 흠집을 낼 수 있어 세포같이 부드러운 상처를 입기 쉬운 물체에

는 적합하지 않다. 반면 광핀셋은 1986년도에 A. Ashkin에 의해 소개된 방법으로 레이저를 이용한 비접촉식 방법이다. 광핀셋은 소개된 이래로 마이크로 크기의 물체, 세포, colloidal particles를 잡거나 제어하는데 광범위하게 사용되고 있다.

광핀셋은 현미경에 쓰이는 Objective Lens(OL)를 이용하여 고도로 집광시킨 레이저로 대상물체를 포획한다. 이 때 렌즈 및 거울을 이용하여 OL에 입사하는 레이저 경로를 변화시키면 OL에 의해서 생긴 레이저 초점도 따라서 움직이므로 레이저의 초점에 의해 포획된 물체 역시 이동하게 된다. 즉, 포획된 물체의 제어는 OL에 입사하는 레이저 빛의 경로를 제어함으로써 이루어진다. OL에 입사하는 레이저 빛의 경로 제어 외에 OL 자체를 움직여도 OL의 초점은 변화하므로 OL을 움직이며 포획된 물체를 제어하는 것도 하나의 방법이다. 즉, OL에 의해서 생긴 레이저 초점의 움직임을 제어하여 포획된 물체를 제어하는 것이다.

광핀셋이 세포의 탄성측정이나 cell sorting<sup>[6]</sup>과 같이 단순히 포획 물체를 이동시키거나 잡아 늘이는 정

\*광주과학기술원 정보기전공학부  
\*\*교신저자, 정희원, 광주과학기술원 정보기전공학부  
- 논문투고일: 2007. 01. 10  
- 심사완료일: 2007. 07. 10

도의 용도로 이용될 경우에는 정교한 제어방법이 필요하지 않다. 하지만 본 논문과 같이 광핀셋을 이용하여 나노/마이크로 물체의 제조에 이용하는 경우에는 단순히 이동을 시키는 정도의 제어 방법으로는 쉽고 빠르게 만들기가 힘들다. 하지만 아직도 광핀셋을 이용해서 정교하게 제어하여 제작하는 방법에 대한 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 광핀셋을 나노/마이크로 크기의 구조물제작에 응용하기 위하여 가상장갑<sup>7)</sup>을 이용하였다. 이 가상장갑은 사용자가 실제로 장갑을 착용하고 움직이면 장갑의 손가락 및 손등에 부착된 22개의 센서에 의해 각 손가락 및 손등의 움직임이 측정되고, 이 데이터가 컴퓨터로 전송되어 가상공간에서 사람 손동작을 구현하는 장비이다. 이 장비는 가상공간에서 시뮬레이션을 통해 물체를 만지거나 이동시킬 수 있으므로 나노/마이크로 구조물의 제작 및 제어에 응용이 가능하다. 가상장갑의 다섯 손가락이 움직이면 각 손가락의 움직임 데이터가 컴퓨터로 전송이 되는데, 이 손가락 움직임 데이터와 레이저 포커스의 움직임이 일치하도록 제어시스템이 만들어져 있다. 즉, 사용자가 직접 장갑을 착용하여 움직이면 손가락의 움직임 경로를 따라서 레이저 초점이 이동된다. 이때 사용자는 실시간으로 자기의 손가락 움직임과 레이저 경로가 매칭되어 움직이는 상황을 컴퓨터 모니터를 통해 확인할 수 있다. 다시 말하면, 사용자의 손가락 움직임과 레이저 경로의 일치하는 제어 프로그램으로 구현되어 있어서 사용자는 사진의 계산이나 준비없이, 실시간으로 제어되는 물체를 모니터로 확인할 수 있는 사용자 중심의 인터페이스이다.

광핀셋의 사용자 인터페이스에 관한 연구가 X. Xun *et al.*<sup>18)</sup>에 의해 있었다. 이 방법은 디지털 펜과 SLM(Spatial Light Modulator)을 이용한다. 좀 더 자세히 설명하면, 사용자가 디지털 펜으로 자신이 원하는 레이저 빔 경로를 그리면 내부 프로그램이 계산하여 SLM으로 레이저 빔의 경로를 만들어 주어 사용자로 하여금 복잡한 실험장비를 제어하는 부담을 덜어 주었다. 반면에, 본 논문에서 소개하는 가상장갑을 이용하는 방법은, 사람이 일상생활에서 물건을 잡듯이 실험물체를 잡고 조립하는 것으로 디지털 펜 방식보다 직관적인 사용자 인터페이스라고 할 수 있다.

본 논문에서는 다양하게 응용되고 있는 광핀셋을 이용하여, biotin이 코팅된 polystyrene 입자를 streptavidin-biotin linkage 방법으로 결합시킴으로써 마이크로 크기의 구조물을 제작하는 방법을 소개한다.

## 2. 광핀셋(Optical Tweezers)

### 2.1 Optical tweezers theory

광핀셋은 기존의 물리적으로 접촉하여 제어하던 방법과 달리 빛을 이용하여 포획하고 제어하는 방법이다. 수 mW에서 수백 mW의 레이저 파워를 이용하면 광핀셋으로 수 pN에서 수백 pN 이상의 포획력을 만들어 낼 수 있는데, 이 정도의 힘이면 수  $\mu\text{m}$ 의 물체가 액체 용액 속에 있을 때는 비접촉 식으로도 충분히 포획할 수 있는 힘이 된다<sup>19)</sup>. 광핀셋의 포획 원리는 다음과 같다.

광자가 물체에 부딪히면 모멘텀  $p$ 를 물체에 전달하게 된다.

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

$E = hv$ 는 빛의 에너지로  $h$ 는 플랑크 상수( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ), 주파수가  $\nu$ 인 빛이고,  $c$ 는 빛의 속도로  $2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$ 이다.  $\lambda$ 는 물체에 부딪히고 있는 빛의 파장이다. 수식 (1)과 같이 빛이 물체에 부딪히면 모멘텀이 물체에 전달되면서 힘으로 작용하게 된다.

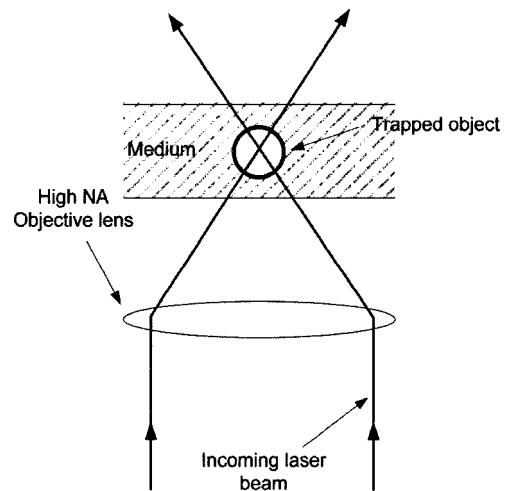


Fig. 1. Schematic diagram of basic optical tweezers. A particle is trapped at the laser focus.

레이저를 높은 NA(Numerical Aperture)의 OL를 이용하여 polystyrene 입자에 조사하면 Fig. 1과 같이 입자에 조사되는 빛의 변화된 모멘텀 평형에 의해서 입자가 포획된다. Fig. 1에서는 OL에 입사하는 레이저 빛을 두 개의 레이저 빔 경로만으로 단순화시켜 표현한 것인데, 입자가 OL에 의해 형성된 초점에서 포

획된다. 레이저 빛을 미디엄 속에 담겨있는 입자에 조사하게 되면, 레이저가 입자의 표면에서 일부는 반사하고 일부는 투과하게 된다. 이 때 반사하는 빛에 의해 생기는 힘을 scattering force라고 하는데 빛의 진행방향으로 입자에 힘을 주고, 투과하는 빛에 의해서 생기는 힘을 gradient force라고 하는데 레이저 빛 세기의 변화방향으로 힘을 주게 된다. 이 때 입자의 굴절률이 미디엄의 굴절률보다 크면 두 힘의 평형은 OL의 초점에서 형성되어 초점에 입자가 안정되게 포획된다. 만일 입자의 굴절률이 미디엄의 굴절률보다 작으면 초점에서 멀어지는 방향으로 힘이 평형을 이루어 초점에서 입자를 포획할 수 없다. 하지만 최근에는 이 경우에도 포획을 할 수 있는 방법이 연구되고 있다<sup>[10]</sup>.

광핀셋을 사용할 때는 NA, 레이저의 파장, 레이저의 편광, 레이저의 TEM(Transverse Electromagnetic Mode) 모드, 입자와 미디엄의 상대적인 굴절률차이, 입자의 형상 등이 가장 큰 영향을 미친다. 이 때 높은 NA를 가진 OL과 TEM<sub>00</sub>의 레이저를 사용하면 높은 효율로 입자를 포획할 수 있다. 광핀셋은 레이저 빛의 모멘텀 평형에 의해서 포획하는 비접촉식 방법이므로, 굴절률이 물보다 큰 광투과성의 세포에 흡집을 내지 않고 포획할 수 있어 biology<sup>[6]</sup> 분야에 많이 응용되고 있다. 또한 포획한 물체를 레이저의 극성을 이용하여 회전시키는 연구도 진행되고 있다<sup>[11,12]</sup>. 그 외에도 chemistry<sup>[13]</sup>, colloidal science<sup>[14]</sup>, membrane technology<sup>[15]</sup> 등 다양한 분야에 쓰이고 있다.

## 2.2 Scanning the beam path

한 개의 레이저 소스로 여러 개의 물체를 포획하여 제어하는 방법은 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 Holographic Optical Tweezers<sup>[16]</sup>로 하나의 레이저 소스를 회절을 이용해서 여러 개의 레이저로 나누어 한번에 많은 물체를 잡는 방법이다. 그리고 다른 방법은 Scanning Optical Tweezers(SOT)<sup>[17,18]</sup>로 하나의 레이

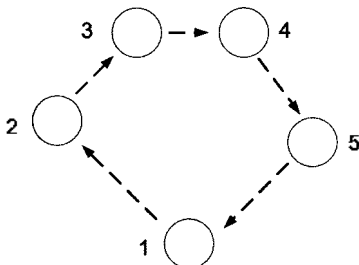


Fig. 2. Schematic diagram showing the SOT.

저 소스를 거울등과 같은 반사체를 빨리 움직여서 레이저 빔 경로를 스캔함으로써 많은 물체를 시간 분할 방법으로 잡는 것이다.

본 논문에서는 빠르게 움직일 수 있는 piezo actuator에 거울을 부착하여 레이저 빔의 경로를 X, Y 축 두 방향으로 스캔함으로써 OL의 초점을 제어하는 SOT 방법을 이용한다. 예를 들면, Fig. 2에서 1번부터 5번까지의 동그라미는 5개의 포획된 입자를 의미하고, 점선은 레이저 빔의 경로를 나타낸다. 먼저 1번 입자를 포획한 후, 레이저 초점이 2번 입자를 포획하기 위해서 이동한다. 5번 입자까지 레이저 초점이 포획을 위해서 이동하는데, 1번부터 5번까지의 레이저 초점 이동이 33 Hz로 반복된다. 즉, 하나의 레이저 초점이 여러 개의 입자를 동시에 포획하지 않고 이동해 가며 시간 분할 방식으로 포획하는 것이다. 이 때 각 입자를 포획하기 위해서 레이저 빛이 각 입자에서 머무르는 시간을 dwell time이라 부르고, 각 입자 사이를 레이저 빛이 이동하는 시간을 interpolating time이라 부르는데, 본 실험에서는 dwell time과 interpolating time을 7:3의 시간비율로 하여 스캔하였다. 이 비율은 많은 실험을 통하여 직접 찾아낸 값으로 이 비율에서 실험이 가장 잘 되었다. 다시 말하면 SOT 방법은 레이저 빛의 스캔 경로를 제어함으로써, 하나의 레이저 초점으로 여러 개의 입자를 고정된 위치에 포획할 수 있고 입자를 원하는 위치로 이동시킬 수도 있다.

## 3. 실험 장치

본 연구에서는 미세한 진동도 실험 결과에 큰 영향을 미치므로 방진시스템이 외부 진동을 차단하는 광학테이블 위에 모든 실험장치를 설치하였다. 그리고 CCD(Charge Coupled Device) Camera는 빛에 매우

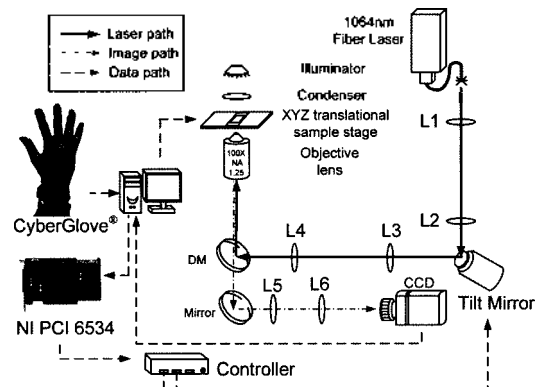


Fig. 3. Schematic representation of the optical setup.

민감하므로 illuminator 소스 외에는 외부의 빛이 CCD Camera로 들어가지 않도록 최소화하였다. Fig. 3은 본 논문에서 사용한 실험장치 구성을 단순화하여 보여주고 있다.

실험장치 구성은 크게 광학부, 제어부, 영상획득부 3부분으로 나뉘어 진다.

### 3.1 광학부

실험에 사용된 레이저는 BWC<sup>19)</sup>의 1064 nm의 파장을 갖는 fiber laser로 가우시안의 에너지 분포를 갖는 TEM<sub>00</sub>이다. 광핀셋 광학부에서 가장 중요한 OL은 Edmund사의 100배율을 갖고 NA는 1.25인 oil immersion 타입을 사용하였다. 렌즈 L1, L2, L3, L4는 bi-convex 렌즈로 두 렌즈간의 초점거리를 이용하여 약 2.4 mm의 직경 레이저를 3.3배로 확대하고, OL로 레이저 빛이 들어갈 때는 OL의 back aperture (6.5 mm)를 가득 채우도록 한다. 그리고 L3, L4는 OL의 back aperture와 TM(Tilt Mirror)면이 conjugate plane이 되도록 해준다<sup>20)</sup>. Conjugate plane에 의해 OL의 back aperture로 들어가는 레이저 빔의 직경은 항상 일정하고, TM의 움직임에 따라서 OL로 들어가는 레이저 빔의 경로는 X, Y축으로 정확히 바뀌게 된다.

### 3.2 제어부

X, Y, Z translational 샘플 스테이지는 약 50 nm의 해상도로 각 축 방향의 제어가 가능한데, 이 스테이지는 샘플을 찾고 관측하기에 좋은 위치로 옮기며 영상 및 레이저의 초점을 맞추는 용도로 사용된다. 가상장갑에서 나오는 손가락 끝 움직임의 좌표 데이터는 컴퓨터로 전송되고, 이 데이터는 NI PCI-6534 (NATIONAL INSTRUMENTS)<sup>21)</sup> 카드로 보내지게 된다. 이 데이터는 HSP(High Speed Parallel) 전송방식으로, C-300 Series controller<sup>22)</sup>로 빠르게 전달되고, C-300 Series controller는 TM이 X, Y축의 2 자유도의 회전을 갖도록 제어하기 위해서 두 개의 채널로 나누어 데이터를 전송한다.

### 3.3 영상 획득부

샘플이 제어되는 영상을 얻기 위하여 fiber 타입 램프를 illuminator로 사용한다. DM(Dichroic Mirror)는 1064 nm 레이저 빛은 반사하고 가시광선영역의 파장은 투과시키는 거울이다. 레이저 빛이 CCD Camera로 들어가는 것을 막아주고 레이저 빛을 OL로 보내는 역할을 하는데, 광핀셋의 특징인, 한 개의 OL로 포획을

하는 동시에 샘플 영상을 얻도록 하는데 있어 매우 중요한 부품이다. 렌즈 L5, L6 사이 거리를 조절하면 영상의 배율을 조절할 수 있다. 실시간으로 영상이 컴퓨터로 전송이 되는데 사용자는 자신이 작업하고 있는 샘플의 상황을 실시간으로 관찰이 가능하다. 실험장비 구성에 관한 추가적인 내용은 참고문헌<sup>12),23)</sup>에서 참고하면 된다.

## 4. 실험 방법

### 4.1 실험 샘플 제작

마이크로 구조물을 만들기 위해서 사용된 입자는 BCPP(Biotin-Coated Polystyrene Particle, Sperotech, 3.27 um in diameter)이다. 그리고 streptavidin(Pierce, model No. 21125)은 두 개 이상의 BCPP가 광핀셋으로 포획되어 모양을 이루었을 때 BCPP들을 붙이는 접착제 역할을 한다. 한 개의 streptavidin 분자는 4개의 biotin 분자와 반데르발스 힘과 수소결합에 의해 비공유결합임에도 불구하고, 상당히 강한 힘(해리상수  $K_d \sim 10^{13} M^{-1}$ )으로 결합한다<sup>25)</sup>. Biotin과 streptavidin

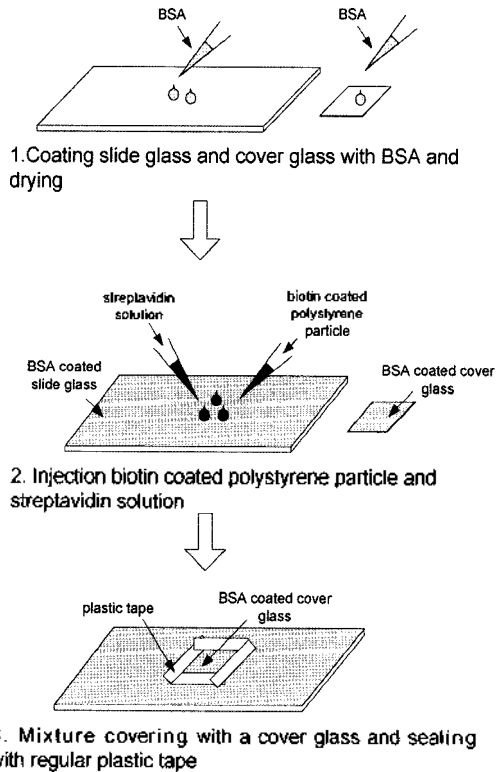


Fig. 4. The process for making the mixture of streptavidin solution and biotin-coated polystyrene particle.

은 서로 만났을 때 self-assembly하려고 하는 성질이 있으며, 이 두 물체간의 결합력 측정을 위해서 OT가 이용되기도 한다<sup>[26]</sup>. 본 실험에서는 원하는 구조물을 만드는데 OT, BSPP, streptavidin을 이용하였다. Fig. 4는 마이크로 구조물을 만들기 위한 샘플 제작 순서를 보여준다.

BCPP는 실험에 사용하는 cover glass와 slide glass의 표면에 잘 달라붙는 성질이 있는데, BCPP가 글라스에 붙어 버리면 OT로 원하는 형상을 만들기가 어려우므로 BCPP가 글라스에 달라 붙지 않도록 해야 한다. BSA(Bovine Serum Albumin, Sigma, Cas No. 9048-46-8)를 cover glass와 slide glass에 BSPP가 놓이기 전에 코팅하면, BSA가 glass와 공유결합하여 BSPP가 glass에 달라붙는 것을 막아준다. BSA를 코팅하는 방법은 BSA를 DI(deionized) water에 약 1%의 농도로 녹인 용액을 cover glass와 slide glass에 얇게 펴서 바른다. BSA가 코팅된 cover glass와 slide glass를 상온에서 말리는데, 이 때 외부에서 강한 열을 가하여 급히 건조하면 코팅면이 고르지 않아 실험에 사용할 수 없으므로 주의해야 한다. BSA가 잘 건조되어 코팅된 slide glass 위에 0.1%의 phosphate buffered saline(ph 7.4) 용액속에 담긴 BCPP를 넣고, 동시에 streptavidin solution을 넣는다. 두 물체가 주입된 순간부터 self-assembly가 시작되므로 가급적 빨리 OT를 이용하여 원하는 형상을 만들도록 해야 한다. 그리고 실험 시에는 반드시 BCPP가 미디엄 속에 있어야 OT를 이용하여 포획할 수 있으므로 미디엄이 증발하여 마르지 않도록 plastic tape으로 밀폐시킨다.

4.2 가상장갑과 광핀셋의 연결

본 논문에서는 가상장갑을 이용해서 SOT 방법을 제어하여 구현한다. SOT 방법은 하나의 레이저 소스를 시간 분할 방법으로 동시에 많은 물체를 포획해야 하므로 레이저 경로를 바꾸어 주는 TM의 스캔속도가 무척 중요하며, 이 스캔을 위한 데이터의 전송속도 역

시 중요하다. 빠른 데이터 전송을 위해서 HSP(High Speed Parallel) 방법을 이용하는데, 이 방식은 최대 초당 41,666개의 위치 데이터를 TM으로 보낼 수 있다.

Fig. 5는 가상장갑으로 SOT를 구현하기 위한 데이터 흐름도를 보여주고 있다. 사용자가 가상장갑을 착용하고 손가락을 움직이게 되면, 다섯 개의 각 손가락 움직임 데이터가 가상장갑의 움직임과 TM의 움직임을 연동시켜주는 프로그램으로 보내진다. C++.NET<sup>[27]</sup>로 연동 프로그램을 만들었는데, 가상장갑의 움직임에 따른 손가락 데이터를 얻을 수 있는 API(Application Programming Interface)가 C++에 적합하므로 C++.NET 이용하였다. 이 프로그램에서는 데이터의 전송 속도, dwell time, interpolating time을 사용자가 원하는 비율로 실험에 맞게 설정할 수 있다. 프로그램에 의해서 만들어진 데이터는 HSP 방식으로 NI PCI-6534 카드를 거쳐 C-300 Series controller로 보내진다. 이 C-300 Series controller에서는 병렬 방식으로 들어온 데이터를 X, Y축 데이터로 분리하여 TM으로 전송한다. 가상장갑을 움직이면 X, Y, Z축 3자유도의 데이터가 나오는데, 본 논문은 2차원에서 제어 및 마이크로 구조물 제작을 하므로 Z축 데이터 값을 무시하고 X, Y 값만 사용한다. 그리고 C-300 Series controller 역시 3개의 채널을 가지고 있어서 3개축의 데이터를 전송할 수 있는데, 본 실험에서는 2개의 채널만 TM과 연결하여 이용하였다. X, Y, Z축, 즉 3자유도로 제어하려면 OL을 움직이거나, OL에 의해서 만들어지는 초점 거리를 조절하면 되는데, 이 분야는 지금 연구 중이다. TM은 전송된 데이터에 의해서 구동되며, 스캔에 의해서 레이저 빔 스팟이 X, Y축으로 움직이는 모습은 CCD Camera로 관찰할 수 있다. 이 영상은 실시간으로 컴퓨터 화면에 보이므로 사용자는 자신이 작업하는 모습을 실시간으로 볼 수 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 data 흐름이 closed-loop로 되어 있으며, 이것은 사용자가 제어 loop에 속해서 feedback 데이터로써 역할을 한다는 것을 의미한다. 즉, 사용자는 실시간으로 자신이 하는 작업 모습을 보면서 순간 상황에 맞게 반응하여 적절하게 대응하며 능동적으로 작업할 수 있다.

5. 실험 결과

5.1 가상장갑으로 제어되는 스캐닝 레이저 빔 경로 SOT 방법으로 실제 대상 물체를 포획하기 전에 거쳐야 하는 과정이 있다. 다섯 개의 손가락에 해당하는

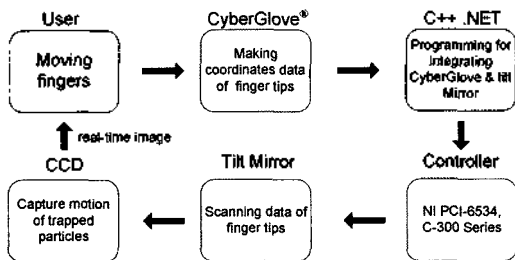


Fig. 5. Schematic of the system architecture and the flow of the streaming data.

레이저 빔 스팟이 정확하게 만들어 지는지, 손가락의 움직임에 의해 제대로 제어가 되는지 확인해야 한다. Fig. 6은 시간 분할 방법으로 가상장갑에 의해 제어되는 다섯 개의 레이저 빔 스팟 모습이다. 번호순서대로 사용자의 손가락에 해당하는데, 1번이 엄지손가락의 움직임에 의해서 제어되는 빔 스팟이고 5번이 약지 손가락의 움직임에 의해서 제어되는 빔 스팟이다.

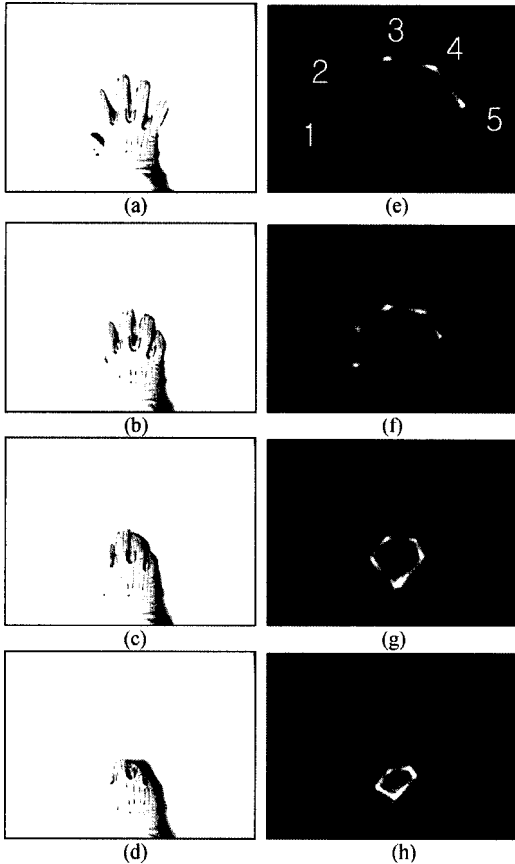


Fig. 6. The image of scanning laser beam path while folding fingers: (a)-(d) denote CyberGlove® motion; (e)-(h) denotes the scanning laser beam motion.

실제로는 매 순간 하나의 레이저 포인트만이 찍히고 있는데 사용자가 스캔 경로를 쉽게 확인하도록 하기 위해서 Fig. 6은 CCD 카메라의 노출시간을 길게 하여 찍은 것이다. 그래서 다섯 개의 빔 스팟과 함께 스캔 경로를 한꺼번에 볼 수 있도록 하였다. Fig. 6 (a)-(d) 순서로 사용자가 가상장갑을 착용하고 손가락을 오므리는 모습이고, Fig. 6(e)-(h)는 그에 따라 제어되는 레이저 스캔 경로를 보여주고 있다. Fig. 6에

서 보듯이 손가락의 움직임에 따라 5개의 빔 스팟이 정확히 움직이고 있다. 레이저 스캔이 손가락의 움직임을 따라서 제어가 되지 않는다면, 사용자의 손에 맞게 가상장갑을 조정해야 한다. 가상장갑은 가상장갑에 부착된 센서값을 조정할 수 있는 자체 조정 프로그램을 제공하는데, 사용자의 손 크기가 다르므로, 실제 사용자의 손 크기에 맞게 조정하면 된다. 그리고 사용자가 제어할 수 있는 작업영역은 실제 샘플영역에서는 가로 세로 55  $\mu\text{m}$   $\times$  55  $\mu\text{m}$  정도 크기에 해당하는데, 이 작업 공간 안에서 가상장갑을 착용하고 자유롭게 손가락으로 레이저 빔을 제어할 수 있다.

### 5.2 가상장갑으로 제어되는 다섯 개의 BCPP

Fig. 6의 과정이 끝나면 실제로 포획하고자 하는 대상 물체를 포획하면 된다. Fig. 7에서 다섯 개의 polystyrene particles이 5개의 스캐닝 빔 스팟에 의해

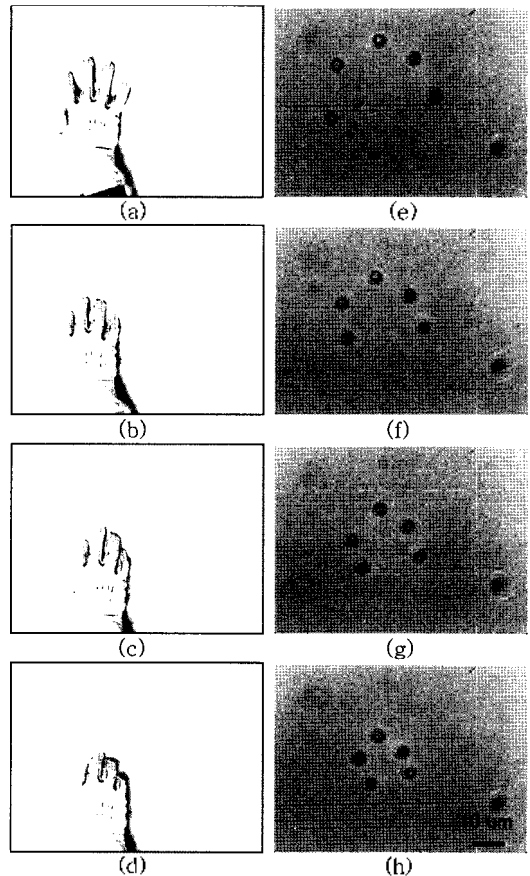


Fig. 7. The image of 5 trapped particles taken while folding fingers. (a)-(d) denote CyberGlove® motion; (e)-(h) denotes 5 trapped polystyrene particles motion (SpheroTech, 4.45  $\mu\text{m}$  in diameter).

서 포획되었고, 각 손가락의 끝의 움직임에 따라 제어되고 있다.

Fig. 7(a)~(d) 순서로 사용자가 자신의 손가락을 움직이는 모습이고, Fig. 7(e)~(h)는 포획된 다섯 개의 polystyrene particles이 움직이는 모습을 보여준다. Fig. 7과 같이 각 손가락 끝의 움직임에 따라서 실제로 포획된 물체가 정확히 이동하고 있다. 그러므로 가상장갑의 작업영역에 해당하는  $55\text{ um} \times 55\text{ um}$  안에서는 자유롭게 포획된 물체를 이동하면서 제어할 수 있다.

### 5.3 육각형 모양의 마이크로 구조물 제작

Fig. 6, 7의 과정을 거치면서 레이저 빔 스팟의 정확한 움직임과 포획된 물체의 제어를 확인한 후, 사용자는 마이크로 크기의 구조물을 정확하고 빠르게 만들 수 있는 준비가 되었다. Fig. 8(a)~(f)는 7개의 BCPP로 이루어진 6각형 모양의 마이크로 구조물을 만드는 모습이다.

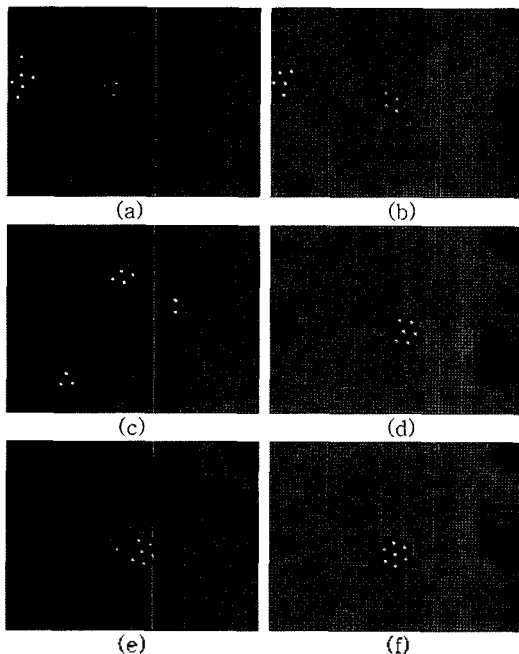


Fig. 8. Making the hexagon shape of micrometer scale structure made by biotin coated polystyrene particles (Spherotech,  $3.27\text{ um}$  in diameter) and streptavidin.

6각형 모양 구조물을 만들기 위해서 5개의 손가락을 모두 이용하여 레이저 스캐닝을 하는데, Fig. 8(a)에서와 같이 처음 단계에서는 엄지, 검지, 중지로서 세

개의 BCPP를 포획하여 삼각형 모양을 만든다. 6각형의 구조물을 만들기 위해서는 총 7개의 BCPP가 필요하므로 4개의 BCPP를 더 포획해야 한다. 3개의 BCPP로 만든 구조물을 포획하여 이동하며 하나씩 BCPP를 결합하며 구조물을 조금씩 크게 만들어 간다. Fig. 8(c)에서 화살표로 가리키는 것은 self-assembly로 두 개의 BCPP가 결합하여 만들어진 것이다. 앞에서 언급했듯이 BCPP와 streptavidin은 슬라이드 글라스에 주입되는 순간부터 self-assembly가 시작되는데, 실험자가 원하는 형상으로 self-assembly가 되었다면 그것을 이용함으로써 실험자의 노력을 줄일 수 있다. Fig. 8(d)에서 self-assembly로 만들어진 것을 결합하여 6개의 BCPP로 구조물을 만들었고, 마지막 한 개의 BCPP를 포획하여 결합하면 되는데, 그림에서 보듯이 주변에 BCPP가 보이지 않는다. 각 그림은 약  $80\text{ um} \times 60\text{ um}$ 로 가상장갑의 작업영역보다 크다. 즉, 가상장갑의 영역보다 넓은 곳에서 나머진 개의 BCPP를 찾아야 하므로, 이런 경우는 샘플 스테이지를 움직이면 된다. 다시 말하면, 가상장갑으로 미세하게 제어하는 작업 영역은 약  $55\text{ um} \times 55\text{ um}$ 이지만, 샘플 스테이지를 움직이면 이 작업영역 전체를 이동시킬 수 있으므로 자신이 원하는 어느 영역에서도 작업을 할 수 있다. 만들어진 구조물을 포획하여 이동하는 경우에는 엄지를 제외한 4개의 손가락을 이용해서 구조물을 안정되게 포획하여 이동하다가 주변에 떠다니는 BCPP가 있으면 엄지로 포획하여 이며 만들어진 구조물에 덧붙인다. Fig. 8(f)는 최종적으로 6각형 모양의 구조물이 만들어진 모습이다. 이 구조물은 biotin과 streptavidin이 결합하여 단단하게 굳어진 것으로, SOT로 포획하여 형상을 고정하지 않아도 모양을 유지하는 완전한 구조물을 형성하고 있다.

### 5.4 NT 글자 모양의 마이크로 구조물 제작

스캐닝 제어를 위해서 5개의 손가락을 모두 이용한 Fig. 8과 달리 Fig. 9에서는 엄지와 검지 두 개의 손가락만 스캐닝 제어를 위해 사용하였다. 저자가 만든 프로그램 내에서는 5개의 손가락 중 실험자가 사용하고자 하는 손가락만 이용할 수 있도록 쉽게 설정할 수 있다. Fig. 9는 Nano Technology를 뜻하는 'NT' 글자 모양을 만드는 과정을 보여준다. 먼저 'N' 모양을 만들고, 'T'를 만들기 위해서 다른 곳에서 'T'를 형성하는 구조물을 만들어 가지고 와서 'N' 옆에 만들었다. 엄지와 검지를 이용하여 두 손가락 사이에 라인 스캐닝을 하면 BCPP로 쉽게 막대형상 구조물을 만들

수 있는데, 이 방법을 이용해서 'T' 구조물을 형성하였다. 'N'은 라인 스케닝으로 막대 구조물을 만들거나 하나의 BCPP를 덧붙이는 두 가지 방법이 이용되었다. 'N' 구조물 중 유독 큰 BCPP가 있는데 이것은 입자 제조회사 공정과정에서 조금 큰 것이 만들어진 것인데 크기만 다를 뿐 성질은 다른 BCPP와 같다. 'T'가 약간 기울어져 있는데 결합과정 중 기울어진 상태에서 결합이 된 것이다.

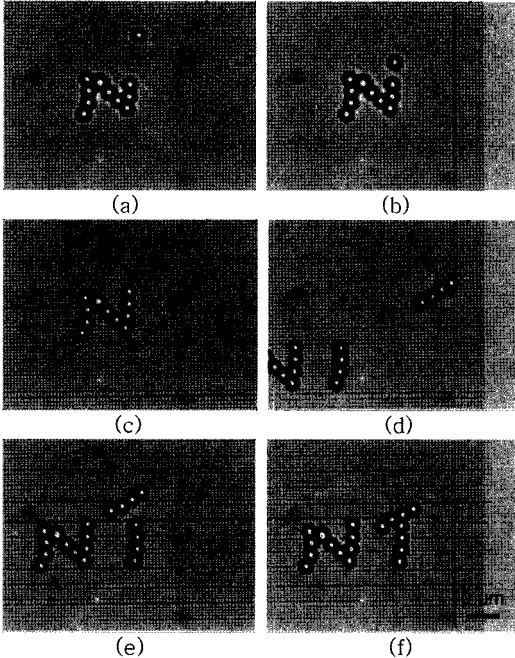


Fig. 9. Making a 'NT' lctter with micrometer scale structure made by biotin coated polystyrene particles (Spherotech, 3.27  $\mu\text{m}$  in diameter) and streptavidin.

## 6. 결 론

본 논문에서는 가상장갑에 의해서 제어되는 광핀셋과 biotin-streptavidin의 결합을 이용하여 마이크로 크기의 구조물을 만들었다. 가상장갑으로 제어하는 방법의 가장 큰 장점은 사용자가 실시간으로 자신이 작업하는 모습을 보면서 제어한다는 것이다. TM에 반사해서 바뀌는 레이저 빔의 경로는 실시간으로 사용자의 손가락움직임에 따라 제어가 되므로, 작업하기 전에 미리 레이저 빔의 경로를 계산하거나 입력할 필요가 없으며, 외란에 의해서 작업 대상물이 영향을 받을 때 사용자가 즉각 반응하여 조절할 수 있다. 그리고 사용자는 자신의 5 손가락 움직임으로 제어하므로

쉽게 적용하여 이 시스템을 이용할 수 있고, 임의의 형상을 만들 때에도 일상생활에서 물건을 다루듯이 동작하면 된다. 즉, 사용자를 위한 특별한 장비의 제어교육이나 적응기간이 필요가 없는 사용자 중심의 인터페이스이다.

특히, 직경 3.27  $\mu\text{m}$ 의 BCPP를 이용해서 육각형, 직선 모양의 구조물을 만들었는데, 이 방법은 나노 구조물의 bottom-up 제조방법과 유사하다. 간단한 구조물에서 복잡한 구조물을 만드는 이 방법은 그 동안 각각의 구조물을 제어하는 것이 문제였다. 하지만 본 논문에서 제안한 가상장갑을 이용한 방법은 사용자가 실시간으로 작업과정을 보면서 자신의 손가락으로 제어하므로 보다 발전된 bottom-up 방법이라고 할 수 있다.

그리고 이 방법은 기존의 광핀셋의 단점인, 포획이 가능한 물체만의 제어에서 벗어나 간접제어 방법의 응용에도 이용될 수 있다. 빛이 투과하기 힘든 물체나, 굴절률이 미디엄의 굴절률보다 작아서 트랩이 힘든 물체 같은 경우에도 5개의 포획된 입자로 포획이 되지 않는 물체를 잡으면 된다. 즉, 사람이 일상생활에서 손가락으로 물체를 잡듯이, 손가락의 역할을 하는 5개의 포획된 입자로 제 2의 물체를 간접적으로 잡는 것이다<sup>28)</sup>. 특히, 이 방법은 광핀셋으로 잡을 경우, 레이저에 의해서 파괴되거나 변형을 일으키는 세포의 경우에 간접적으로 세포를 잡으면 파괴를 피할 수 있으므로 많은 응용 가능성을 갖고 있다.

향후의 연구과제로는, 어느 정도의 streptavidin solution 농도가 biotin과의 결합에 가장 적합인지와, streptavidin solution 농도에 따른 biotin과의 결합시간 측정 등을 들 수 있다. Biotin과 streptavidin의 결합 시간을 늘리면, 작업시간 역시 늘어나므로 복잡한 형상을 정확히 만들 수 있고, 단순한 형상의 경우는 긴 작업시간이 필요하지 않으므로 biotin과 streptavidin의 결합시간을 단축하여 빠른 시간 내에 구조물을 만들면 된다. 그리고 지금의 작업영역은 2차원인데, 이것을 3차원의 영역으로 확대하여 실제 기계 부품에 가까운 형상도 만들 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-003-D00028). 그리고 "한국 Bio-IT 파운드리 서울센터의 Bio-Chip MPC(Multi Project Chip) 프로그램" 지원으로 수행된 연구임.



## 참고문헌

1. Hsieh, S., Meltzer, S., Wang, C. R. C., Requicha, A. A. G., Thompson, M. E. and Kocl, B. E., "Imaging and Manipulation of Gold Nanorods with an Atomic Force Microscope", *Journal of Physical Chemistry B*, Vol. 106, No. 2, pp. 231-234, 2002.
2. Ashkin, A. J., Dziedzic, M., Bjorkholm, J. E. and Chu, S., "Observation of a Single-beam Gradient Force Optical Trap for Dielectric Particles", *Optics letters*, Vol. 11, No. 5, pp. 816-818, 1986.
3. Kuncicky, D. M., Christesen, S. D. and Velez, O. D., "Role of the Micro- and Nanostructure in the Performance of Surface-enhanced Raman Scattering Substrates Assembled from Gold Nanoparticles", *Applied Spectroscopy*, Vol. 59, No. 4, pp. 401-409, 2005.
4. Hiddessen, A. L., Weitz, D. A. and Hammer, D. A., "Rheology of Binary Colloidal Structures Assembled Via Specific Biological Cross-linking", *Langmuir*, Vol. 20, No. 16, pp. 6788-6795, 2004.
5. Castelino, K., Satyanarayana, S. and Sitti, M., "Manufacturing of Two and Three-dimensional Micro/nano-structures by Integrating Optical Tweezers with Chemical Assembly", *Robotica*, Vol. 23, No. 4, pp. 435-439, 2005.
6. Enger, J., Goksör, M., Ramser, K., Hagberg, P. and Hanstorp, D., "Optical Tweezers Applied to a Microfluidic System", *Lab on a Chip - Miniaturisation for Chemistry and Biology*, Vol. 4, pp. 196-200, 2004.
7. Virtual Technologies Inc., *CyberGlove® Reference Manual*, 2000.
8. Xun, X., Chang, X. and Cohn, R. W., "System for Demonstrating Arbitrary Multi-spot Beam Steering from Spatial Light Modulators", *Optics Express*, Vol. 12, No. 2, pp. 260-268, 2004.
9. Simmons, R. M., Finer, J. T., Chu, S. and Spudich, J. A., "Quantitative Measurements of Force and Displacement Using an Optical Trap", *Biophysical Journal*, Vol. 70, No. 1, pp. 1813-1822, 1996.
10. Prentice, P. A., MacDonald, M. P., Frank, T. G., Cuschieri, A., Spalding, G. C., Sibbett, W., Campbell, P. A. and Dholakia, K., "Manipulation and Filtration of Low Index Particles with Holographic Laguerre-gaussian Optical Trap Arrays," *Optics Express*, Vol. 12, No. 4, pp. 593-600, 2004.
11. Ha, C. I., Wi, H. S. and Pak, H. K., "Rotation of Irregularly Shaped Liposome Using Optical Tweezers", *Journal of the Korean Physical Society*, Vol. 48, pp. S222-S225, 2006.
12. Friese, M. E., Nieminen, N. R., Heckenberg, N. R. and Rubinsztein-Dunlop, H., "Optical Alignment and Spinning of Laser-trapped Microscopic Particles", *Nature*, Vol. 394, pp. 348-350, 1998.
13. Hopkins, R. J., Mitchem, L., Ward, A. D. and Reid, J. P., "Control and Characterisation of a Single Aerosol Droplet in a Single-beam Gradient-force Optical Trap", *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 6, No. 21, pp. 4924-4927, 2004.
14. Valentine, M. T., Dewalt, L. E. and Ou-Yang, H. D., "Forces on a Colloidal Particle in a Polymer Solution: A Study Using Optical Tweezers", *Journal of Physics Condensed Matter*, Vol. 8, No. 47, pp. 9477-9482, 1996.
15. Raucher, D. and Sheetz, M. P., "Characteristics of a Membrane Reservoir Buffering Membrane Tension", *Biophysical Journal*, Vol. 77, No. 4, pp. 1992-2002, 1999.
16. Korda, P., Spalding, G. C., Dufresne, E. R. and Grier, D. G., "Nanofabrication with Holographic Optical Tweezers", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 73, No. 4, pp. 1956-1957, 2002.
17. Vossen, D. L. J., Van Der Horst, A., Dogterom, M. and Van Blaaderen, A., "Optical Tweezers and Confocal Microscopy for Simultaneous Three-dimensional Manipulation and Imaging in Concentrated Colloidal Dispersions", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 75, No. 9, pp. 2960-2970, 2004.
18. Mio, C., Gong, T., Terray, A. and Marr, D. W. M., "Design of a Scanning Laser Optical Trap for Multiparticle Manipulation", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 71, No. 5, pp. 2196-2200, 2000.
19. B&W TEK Inc., *Fiber Laser System BWC-FL-1064-5 Series*, 2004.
20. Fillman, E. and Axner, O., "Design for Fully Steerable Dual-trap Optical Tweezers," *Applied Optics*, Vol. 36, No. 10, pp. 2107-2113, 1997.
21. National Instruments., *653X User Manual*, 2001.
22. nPoint, *C-300 Series Controller Manual*, Version 1.2, 2005.
23. Hwang, S. W., Park, I. Y., Song, J. H., Lee, Y. G., LeBrun, T., Dagalakis, N., Gagnon, C. and Balijepalli, A., "Three-dimensional Scanning Optical Tweezers", *SPIE*, ssapporo, Vol. 6048, pp. 604803, 2005.
24. Song, J. H., Hwang, S. U., Park, I. Y. and Lee, Y. G., "Automatic Focusing System for Optical Tweezers", *SPIE*, ssapporo, Vol. 6048, pp. 60480B, 2005.
25. Freitag, S., Trong, I. L., Klumb, L., Stayton, P. S. and Stenkamp, R. E., "Structural Studies of the Streptavidin Binding Loop", *Protein Science*, Vol. 6, No. 6, pp. 1157-1166, 1997.
26. Ota, T., Sugiura, T. and Kawata, S., "Rupture Force Measurement of Biotin-streptavidin Bonds Using Optical Trapping", *Applied Physics Letters*, Vol. 87, No. 4, pp. 1-3, 2005.
27. Julian Templeman., *VISUAL C++ .NET STEP BY STEP*. Microsoft Press, 2003.
28. Arai, F., Ogawa, M., Fukuda, T., Horio, K., Sone, T., Itoigawa, K. and Atsushi, M., "High Speed Random Separation of Microobject in Microchip by Laser Manipulator and Dielectrophoresis", *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 727-732, 2000.



**박 인 용**

2005년 중앙대학교 기계공학부 학사  
2007년 광주과학기술원 기전공학과 석사  
2007년~현재 한국과학기술원 기계공학전공 박사과정 중  
관심분야: Optical Tweezers, micro/nano assembly, Femtosecond laser



**이 종 현**

1981년 서울대학교 기계설계학과 학사  
1983년 한국과학기술원 기계공학과 석사  
1986년 한국과학기술원 기계공학과 박사  
1992년 Anorad Co. 방문연구원  
1986년~2000년 한국전자통신연구원 책임연구원/실장  
2004년 Univ. Cincinnati 방문연구원

2000년~현재 광주과학기술원 기전공학과 교수  
관심분야: MEMS, micro-optics, microactuators, biomedical MEMS



**이 용 구**

1992년 서울대학교 기계설계학과 학사  
1994년 서울대학교 기계설계학과 석사  
1997년 서울대학교 기계설계학과 박사  
1997년~2000년 삼성SDS 책임연구원  
2000년~2003년 미국 상공부 산하 국립표준기술연구소 객원 연구원  
2003년~현재 광주과학기술원 기전공학과 조교수

관심분야: Nanomanufacturing, Virtual Reality, Haptics