

# 탄소 나노 튜브-팁 제작을 위한 다자유도 나노 정렬 시스템 개발

강경수<sup>†</sup> · 이준석\* · 최재성\* · 곽윤근\*\* · 김수현\*\*

## Development of Multi-DOF Nano Aligner System for CNT-Tip

Gyungsoo Kang, Junsok Lee, Jaiseong Choi, Yoon Keun Kwak and Soohyun Kim

**Key Words :** Aligner system, dual type stage system, carbon nanotube, picomotor, piezotube

### Abstract

AFM tip has been used for surface profiling with a fine resolution, but there is a barrier to improve its performance because of the low aspect ratio. Many researchers have solved this problem with attaching carbon nanotube (CNT) to Si-tip. In this paper, we proposed the aligner system that composed of dual type stage system, and these stages could attach a carbon nanotube to tungsten-tip in vacuum condition. We used tungsten tip instead of Si-tip because of its conductivity. The aligner system proposed in this paper has 10 degree-of-freedom that 3 in the first stage and 7 in the second stage. With picomotors and piezotube, the first stage has the resolution about several tens of nm and the second stage has a resolution about a nm. We experimented on characterization of Nano Aligner System and operated picomotors in SEM environment.

### 기호설명

$\Delta L$ : 길이방향의 스캔 범위 [m]  
 $d_{31}$ : 변형 상수 [m/V]  
 $L$ : 피조튜브의 길이 [m]  
 $U$ : 구동 전압 [V]  
 $D$ : 피조튜브의 두께 [m]  
 $\Delta X$ : 수평방향의 스캔 범위 [m]

### 1. 서론

매우 높은 aspect ratio로 인해 CNT-tip은 좁고 깊은 언덕 구조를 지니고 있는 고집적 반도체 표면 프로파일을 측정하는데 매우 유용하다.[1] 또한 CNT는 두 개의 CNT-Tip을 이용해서 나노 트 위저를 만들 수 있게 하며 이는 나노 크기의 물질은 붙잡고 이동할 수 있게 한다.[2]

Figure 1에서 보는 바와 같이 CNT-Tip을 만들기 위해서는 다루는 CNT의 두께가 수십 nm이므로 CNT와 텅스텐 팁을 정렬하기 위한 정교한 구동 시스템이 필요하게 된다.

또한 구동 시스템은 SEM 내에 영상 영역에 위치시키기 위해서 CNT와 텅스텐 팁을 움직일 수 있는 충분한 자유도를 가질 수 있어야 한다.

### 2. 나노 정렬 시스템을 위한 필요사항과 구동기

#### 2.1 나노 정렬 시스템을 위한 필요사항

텅스텐 팁과 CNT를 붙이는 과정을 구동하기 위하여 나노 aligner는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

- 1) 텅스텐 팁과 CNT를 각각 다른 부위에 놓고 실험을 해야 하므로 dual-type two-stage를 가져야 함
- 2) CNT와 텅스텐 팁 접합 과정시 SEM으로 볼 수 있는 영역에 위치시키기 위해 스테이지 1과 스테이지 2 모두 X, Y 운동 필요
- 3) CNT를 텅스텐 팁에 붙이는 작업을 하는데 있어서 서로 높이를 맞추어야 하므로 두 스테이지

<sup>†</sup> KAIST 기계공학과  
 E-mail : gskang@kaist.ac.kr  
 TEL : (042)869-3252 FAX : (042)869-5201

\* KAIST 기계공학과

\*\* KAIST 기계공학과 교수

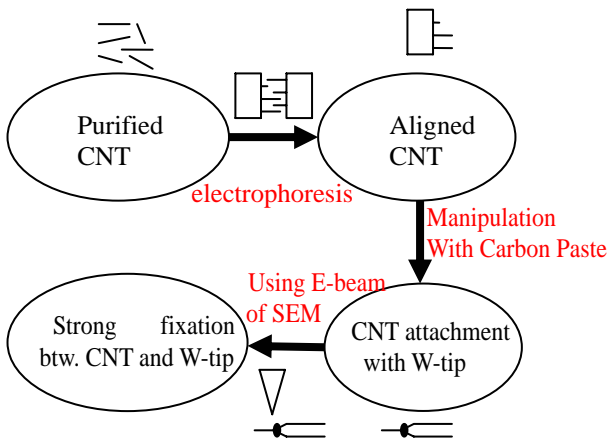


Fig. 1 Schematic diagram to make CNT-Tip

모두 Z 운동 필요

4) CNT 를 텅스텐 팁에 붙인 후 축방향 부착 상태를 알기 위하여 텅스텐 팁이 놓이는 스테이지 부에 회전 운동 필요

5) 다루는 CNT 의 두께가 대략 50 nm이고 CNT 를 텅스텐 팁에 붙이는데 피코모터의 운동보다 정밀한 X, Y, Z 운동을 텅스텐 팁에 가할 수 있는 피조튜브 이용

6) SEM chamber (지름과 높이가 약 22~24cm 인 원통형 모양) 안에서 작업을 해야 하므로 스테이지 크기가 가능한 작아야 함

이를 위해 Zyvex 에서는 스테이지 한쪽 부분 (스테이지 1)에 피코모터를 이용하여 X,Y 운동을 할 수 있게 하고, 다른 쪽 부분 (스테이지 2)에 Z 및 회전 운동을 할 수 있게 하였다. 또한 피조튜브도 이용하여 STM Probe 에 CNT 를 붙이는 실험과 CNT 의 기계, 전기적 성질을 측정하는 실험을 하였다.[3] 한국표준과학연구원(KRISS)에서는 피조튜브는 사용하지 않고 스테이지 1 과 스테이지 2 모두에 대해 X, Y, Z 운동을 할 수 있게 하여 AFM 끝에 CNT 를 붙이는 실험을 수행하여 CNT-Tip 을 만들었다.[4] 이 밖에 Arai 연구팀에서도 구동 시스템을 만들었다.

그러나 실제 Zyvex 에서 제안한 모델로 실험을 하기에는 몇 가지 문제점이 있다. 두 스테이지 모두 X, Y, Z 축 운동이 되지 않으므로 SEM Chamber 의 스테이지를 이용해야만 한다. 이는 사용하기에 불편하고 능숙한 손놀림을 요구한다. 또한 사용하는 팁에 따라 접합 부위가 달라지게 되므로 다양한 팁에 대한 신속한 실험이 불가능하다.

또한 실험시 다루어야 할 CNT 의 두께가 대략 50 nm 정도이고, 구동 시스템의 분해능이 작으면

작을수록 좋기 때문에 피조튜브를 스테이지 시스템에 추가하면 더 나은 결과를 얻을 수 있다. 스테이지를 움직이게 하기 위해 사용하는 피코모터의 분해능이 대부분 수십 nm이므로 약 1 nm의 정밀한 분해능을 갖는 피조튜브를 추가하여 전체 시스템의 분해능을 향상시킬 수 있다.

## 2.2 피코모터의 구동원리

이 때 스테이지에 X, Y, Z 운동을 가하기 위해 screw 가 운동을 하면서 앞으로 나아가는 운동을 하는 병진형 피코모터를 쓰고 회전 운동을 해주기 위해서는 회전형 피코모터를 사용한다.

병진형 피코모터의 안쪽에는 PZT 가 있어서 높은 정마찰을 통해 느리게 힘을 가하면 screw 가 움직이지만 낮은 정마찰을 통해 빠르게 힘을 가하면 screw 가 움직이지 않는다.[5] 예를 들어 만약 긴 rising time 을 가하면서 짧은 falling time 을 주면 screw 가 시계방향으로 돈다. 반대로 짧은 rising time 을 가하면서 긴 falling time 을 주면 screw 가 반시계방향으로 돈다. 병진형 피코모터는 screw 를 가지고 있어서 만약 screw 가 시계방향으로 돌면 피코모터의 앞 축이 전진운동을 하고 screw 가 반시계방향으로 돌면 피코모터의 앞 축이 후진운동을 한다.

회전형 피코모터는 일반적인 모터의 구동원리가 같다. Screw 가 없어서 앞뒤의 병진운동은 하지 않고 회전운동만 할 수 있다.

## 2.3 피조튜브의 구동원리

한편 병진형 피코모터의 분해능이 약 30 nm 정도이므로 4 등분 피조튜브를 사용해서 보다 정밀한 운동을 가능하게 한다.

피조튜브는 PZT-Scanner Tube(압전스캐너)라고도 불리고 lead-zirconium-titanate(PZT)를 소재로 원통형 모양으로 만든 것으로 PZT 가루를 압착하여 고형 및 성형 시켜 만든 다결정 고체이다.

일반적으로 피조튜브는 구조가 단순한 원통형을 많이 사용하는데 이러한 구조는 속이 빈 대나무와 유사하다. 원통형 구조에 전극판(Electrode)을 원통 안쪽과 바깥쪽에 입히고 바깥쪽은 원주 방향으로 3 등분(tripod type) 혹은 4 등분(4-quadrant type) 하여 쓴다. 4 등분의 경우 바깥쪽의 전극을 +X, +Y, -X, -Y 라 부른다. +X, -X 전극판에 교류전압을 가하면 piezotube 가 X 방향으로 좌우로 흔들리고, +Y, -Y 전극에 전압을 가하면 피조튜브가 앞뒤로 휘게 된다.

피조튜브가 스캔 할 수 있는 최대 영역은 원통

	PT 130.14
Length (mm)	30
Outside dia. (mm)	6.5
Inside dia. (mm)	5.35
Max. operating voltage (V)	500
$d_{31}$ (m/V)	$2.1 \times 10^{-10}$

Table 1 : Specification of the piezotube

스캐너의 길이, 직경, 원통벽의 두께, 사용되는 압전 세라믹의 팽창계수 등에 의해 좌우된다. 일반적으로 피조튜브는 수평 방향으로 수십 Å에서 100 μm 이상까지 구동 가능하며, 수직방향으로는 Å이하부터 약 10 μm까지 움직임이 가능하다.

피조튜브의 가운데 전극에 접지를 인가하고, 4개의 바깥쪽 전극 중 한곳의 전극에 양 전압을 반대편엔 음 전압을 인가하면 피조튜브가 한쪽 방향으로 휘게 된다. 한편 안쪽 전극에 접지를 인가하고 바깥쪽 4개 전극 모두에 대해 양 전압을 인가하면 피조튜브가 길이방향으로 늘어나게 되고 늘어난 길이는 다음과 같은 식을 통해 얻을 수 있다.[6]

$$\Delta L \approx d_{31} \cdot L \cdot \frac{U}{d} \quad (1)$$

이때, 피조튜브의 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 과 (1)식과 같은 사양을 가진 피조튜브를 이용해서 축 방향으로 2.3 μm의 구동범위를 얻을 수 있었다. 이 때 피코모터와 고정된 쪽의 길이는 5 mm라고 보았다.

똑같은 이유로 같은 길이만큼 수축될 수 있고 그래서 최종 구동범위가 ±2.3 μm가 되었다. 수평방향의 구동 범위는 아래 (2)식을 통해 구할 수 있다.

$$\Delta X \approx \frac{2\sqrt{2} \cdot d_{31} \cdot L^2 \cdot U}{\pi \cdot ID \cdot d} \quad (2)$$

(2)식을 이용해서 X, Y 방향으로의 구동범위는 9.6 μm로 계산되었다. 그러므로 수평방향의 전체 구동범위는 ±9.6 μm 가 된다.

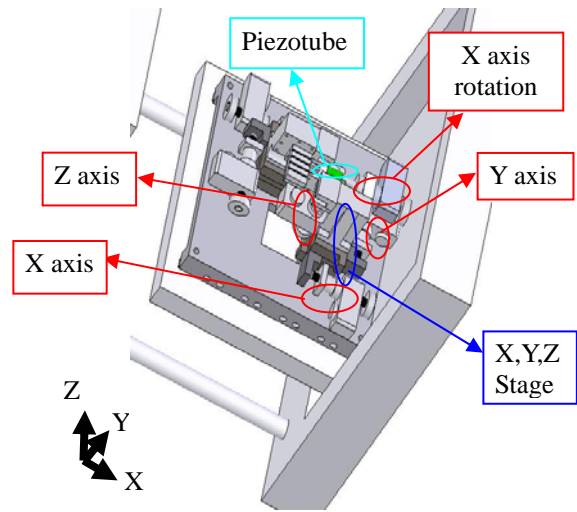


Fig. 2 The nano aligner in SEM

### 3. 나노 정렬 시스템 설계

#### 3.1 시스템 구조

나노 정렬 시스템에 대한 디자인 결과는 Fig. 2 와 같다. 스테이지 시스템중 한 쪽 스테이지 1 에서는 X, Y, Z 운동을 할 수 있게 하고 여기에 정렬된 CNT 를 놓는다. 여기서 X, Y, Z 운동을 해주기 위해 X, Y, Z 스테이지 몸체에 구동부는 병진형 피코모터를 달아 약 30 nm 이내의 분해능을 갖게 한다. 다른 쪽 스테이지 2 에서는 역시 X, Y, Z 운동을 할 수 있게 하고 여기에 회전(Theta) 운동을 할 수 있게 하는 피코모터를 추가한다. 그리고 회전형 피코모터끝에 미세한 X, Y, Z 운동이 가능한 피조튜브를 놓는다. 피조튜브는 약 1 nm의 분해능을 가지며 회전 운동을 하는 회전형 피코모터는 약 2mrad 의 각분해능을 갖는다.

텅스텐 팁은 피조튜브 끝단에 배치하여 피조튜브의 자유도를 충분히 전달 받을 수 있게 하고, 텅스텐 팁에 CNT 를 부착한 뒤 회전형 피코모터를 이용하여 부착 정도를 확인한다.

결국, 전체 시스템은 스테이지 1 에서 3 개의 자유도, 스테이지 2 에서 7 개의 자유도를 가져 총 10 개의 자유도를 가진다.

#### 3.2 전체 시스템 구성

전체적인 시스템 구성은 Fig. 3 과 같다. SEM chamber 내에 스테이지 1 과 스테이지 2 가 있고, 스테이지 1 은 피코모터 3 개로 구성되며, 스테이지 2 에는 피코모터 4 개와 피조튜브로 구성된다. 다섯 개의 입력 채널이 피조튜브를 구동하기 위

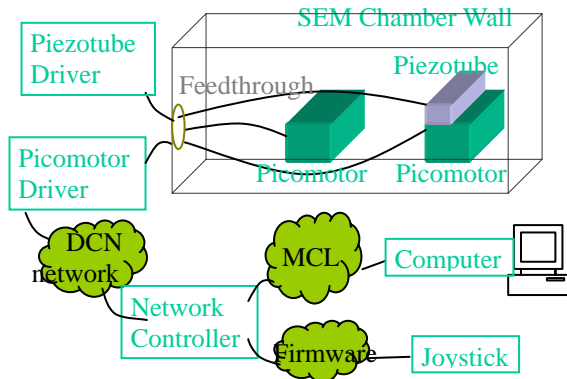


Fig. 3 Schematic Diagram of the System

해서 필요하고 이를 위해 3 개의 출력 채널을 가지고 있는 PI 사 E-463.00 PZT 드라이버 두 개를 이용한다. 또한 7 개의 피코모터를 구동하기 위해 9 개의 채널을 가지고 있는 New Focus 사의 Model 8769 를 이용한다.

#### 4. 나노 정렬 시스템 제작

홀더, 마운팅과 스테이지를 이용하여 Fig. 4 와 같은 나노 정렬 시스템을 만들었다. SEM Chamber 안에 나노 정렬 시스템을 구동하기 위하여 Chamber 벽의 구멍을 이용하여 electrical feedthrough 를 만들었다.

이와 같이 만들어진 전체 시스템 중 피코모터 구동부 쪽은 피코모터 드라이버와 같이 제공된 DCN (Distributed Control Network)을 통해 일정한 속도로 원하고자 하는 변위에 도달할 수 있게 하거나, 원하는 속도를 유지할 수 있게 한다. 또한 조이스틱으로도 작동을 가능하게 해서 잡아당기는 lever 에 따라 원하는 속도로 움직일 수 있다. Labview 프로그램을 통해서도 위치, 속도 제어가 가능하고 Visual C++로도 제어를 할 수 있다.

피코튜브쪽은 직접 피코튜브 드라이버(PI, E-463)의 전압 다이얼을 돌려 원하는 전압값을 주어 위치를 제어하거나 Matlab 으로 만든 파형을 D/A 보드를 통하여 피코튜브 드라이버를 거쳐 전압 증폭을 하여 원하는 위치를 제어할 수 있다.

#### 5. 시스템 성능 평가

용량형 센서인 MicroSense 3401 ( $2.5 \mu\text{m}/\text{V}$  Sensing)를 이용하여 피코모터부에 대한 성능평가를 수행하였다. Fig.5 의 윗 그림에서 보는 바와 같이 noise level 4 nm이하의 환경에서 실험을 수행하였

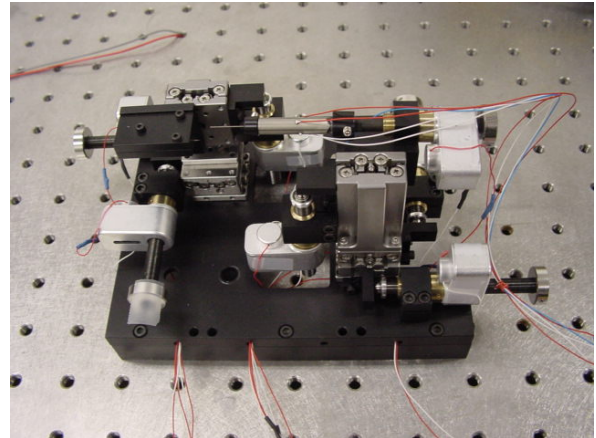


Fig. 4 The Nano Aligner Fabrication

고, 수평방향의 피코모터를 구동하였을 때 수직방향의 피코모터의 움직임은 변위(XZ Interaction)는 Fig.5 의 아래 그림과 같이 6 nm이하로 나왔다.

그리고 피코모터를 1pulse 의 속도로 5step, 10step 의 거리를 전진한 후 되돌아오게 하는 분해능 실험을 한 결과(Fig.6) 피코모터 안에 있는 PZT 의 영향으로 인해서 전진운동과 후진운동시의 성능이 다르게 나왔으며 전진 운동시 분해능은 한 스텝당 약 23 nm, 후진 운동시 분해능은 약 18 nm가 나왔다.

#### 6. CNT-Tip 제작 시뮬레이션

피코튜브에 있는 텅스텐 팁을 다른 쪽 스테이지에 있는 CNT 에 붙이기 위한 구동 알고리즘은 다음과 같다

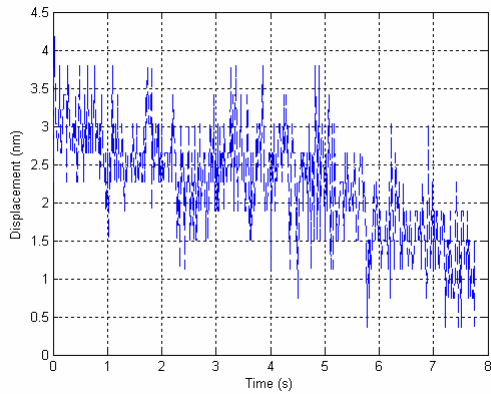
먼저 양쪽 스테이지의 Z 축 피코모터를 움직여서 SEM 내에 focus 를 맞춘다. 이를 통해 부착하고자 하는 CNT 와 텅스텐 팁의 높이를 일치시켜주게 된다.

두번째로 여러 텅스텐 팁에 붙어있는 CNT 중 부착하고 싶은 CNT 를 골라 피코튜브의 텅스텐 팁과 일직선을 이루도록 만든다. 이때는 Y 축 피코모터를 이용한다.

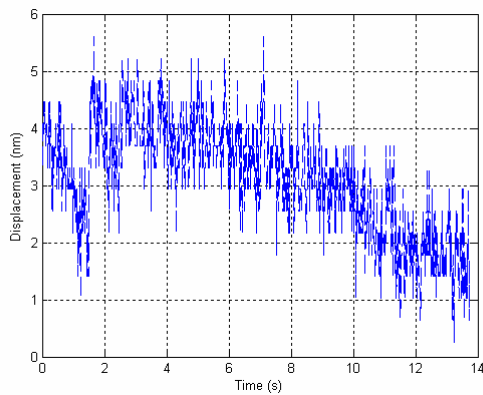
세번째로는 X 축 피코모터를 이용하여 CNT 와 텅스텐 팁간의 거리를 피코튜브로 움직여서 닿을 수 있을만큼 만들어준다.

그리고 대개의 경우에는 CNT 의 각도가 텅스텐 팁과 평행하지 않으므로 네번째 과정으로 피코튜브 Z 축에 대한 회전운동을 통해 CNT 와 텅스텐 팁 축을 일치시킨다.

다섯번째로 피코튜브의 Y 축에 대한 회전운동을 통해 CNT 와 텅스텐 팁의 축이 완전히 일치하도록 만든다. 마지막으로 피코튜브의 X 축에 대한 병진운동을 이용해서 CNT 와



Ground Vibration



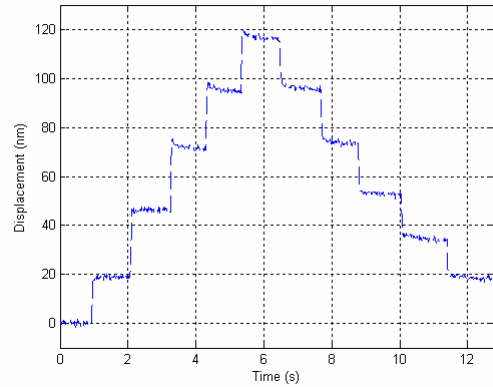
XZ Interaction

Fig. 5 Picomotor Experiment

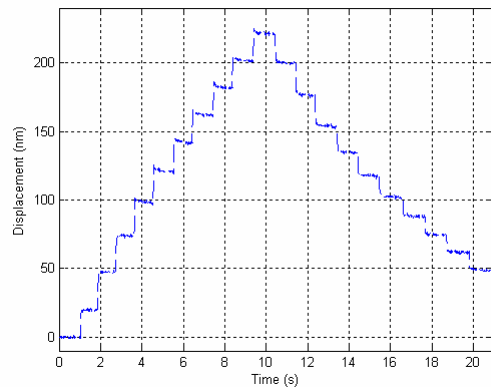
텅스텐 팁을 부착시킨다. 이를 시뮬레이션한 결과는 Fig. 7 과 같으며 위쪽 그림은 초기상태를 아래쪽 그림은 부착하고자 하는 끝단의 궤적을 보여주고 있다.

### 7. SEM 내에서 피코모터 작동

피코튜브에 Fig.8 은 SEM 내에서 피코모터를 이용하여 피코튜브의 끝에 달린 텅스텐 팁을 CNT 가 묻혀져 있는 텅스텐 팁 끝에 align 하는 과정을 보여주고 있다. 처음 Sequence 1 은 200 배로 확대한 처음 상태를 보여주고 있으며 먼저 왼쪽 스테이지에 Y 축에 대해 1000step, X 축에 대해 1500step 의 운동을 가하고 오른쪽 CNT 가 달린 스테이지에 Y 축에 대해 -600step, X 축에 대해 -1100step 의 운동을 가하였다. 이 과정을 통해 전체적으로 축을 일치시킬 수 있었다. 이를 2000 배 하여 사진을 본 결과 오른쪽 텅스텐 팁 끝 부분에 CNT 가 빠져 나와 있는 것을 볼 수 있었다.



Resolution (5Step)



Resolution (10Step)

Fig. 6 Picomotor Resolution

이를 다시 왼쪽 스테이지에 Y 축으로 -250step, X 축으로 -30step 을 가하고 오른쪽 스테이지에 Y 축으로 -200step, X 축으로 300step 을 가하여 부착하고자 영역에 CNT 와 텅스텐 팁 이 들도록 하였다.(Sequence 2) 이를 10000 배 확대한 후 Y 축으로 -70step 만큼 이동시켜 축을 맞추고(Sequence 3) Z 축으로 -7200step 만큼 이동시켜 왼쪽 텅스텐 팁 끝 단과 오른쪽 CNT 의 초점이 일치하도록 하였다.

더 선명한 영상을 얻기 위해 SEM 초점을 다시 맞추고 다시 텅스텐 팁과 CNT 의 축을 일치시키기 위해 왼쪽 스테이지를 Y 축에 대해 -100step 을 가하였고 왼쪽 텅스텐 팁 끝 단의 초점이 잘 맞지 않아 Z 축으로 2357step 의 변위를 가하였다.

다시 CNT 와 텅스텐 팁을 align 하기 위해 X 축으로 -20step, Y 축으로 -50step 의 변위를 주었고 최종적으로 X 축으로 12step 의 입력을



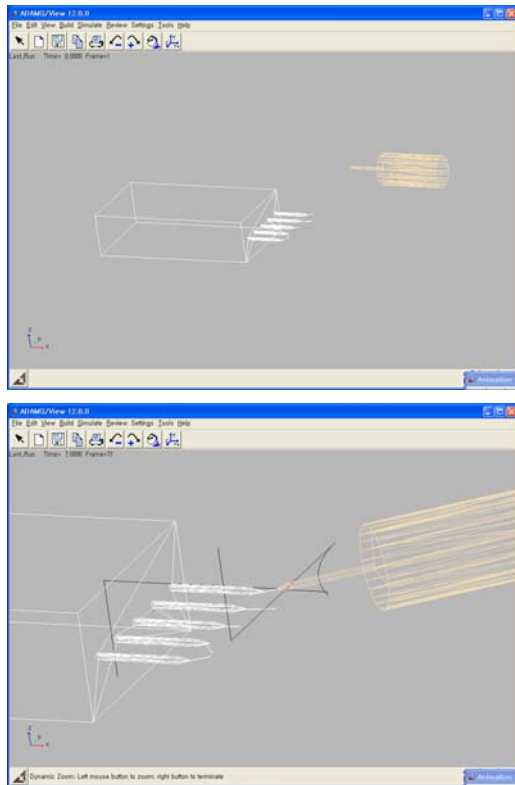


Fig. 7 CNT-Tip Fabrication Simulation

주어 CNT 와 텅스텐 팁 끝이 닿는 결과를 얻을 수 있었다.(Sequence 4)

실험 결과 앞선 피코모터의 성능 실험에 나와 있는 바와 같이 시뮬레이션과는 달리 PZT 의 히스테리시스 성질로 인해 얼마를 이동시키고 다시 돌아오라는 명령을 내렸을 때 정확히 돌아오지 않는 결과를 종종 볼 수 있었다. 또한 처음엔 SEM 의 배율을 낮게 하고 나중에 SEM 의 배율을 높게 하여 축을 일치시키는 과정 각각에서 스테이지의 X, Y, Z coarse, fine 운동을 통해야 하였으며 전체적으로 실험과정에서 Z 축에 대해 초점을 맞추기가 까다로웠으며 향후 개선을 해야 할 점으로 나왔다.

한편 피코모터만을 이용하여도 비교적 괜찮은 X, Y 스캔 분해능을 얻을 수 있었으며 앞으로 피코튜브쪽의 구동을 통해 보다 정밀한 분해능을 얻을 수 있고 실제 CNT 와 텅스텐 팁 부착시에 정밀한 운동을 기대할 수 있다.

## 8. 결 론

본 연구에서는 10 개의 자유도와 작은 크기를 가

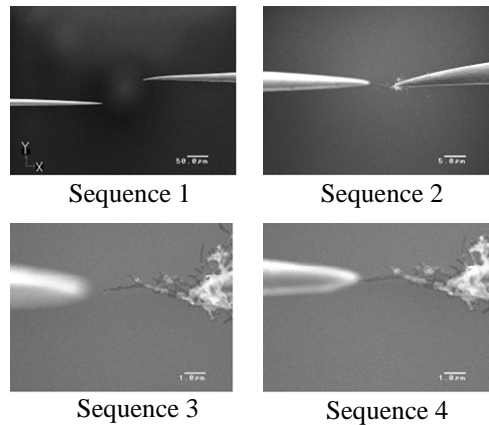


Fig. 8 Nano Aligner Operation in SEM

지는 나노 정렬 시스템을 설계, 제작하였다. 시스템은 수십 nm의 분해능을 가지는 피코모터와 수 nm의 분해능을 가지는 피코튜브로 이루어져 있으며 나노 정렬 시스템을 통해 CNT-Tip 을 만들기 위한 시뮬레이션을 수행하였다.

또한 만들어진 시스템 중 피코모터부에 대한 성능평가를 하였고 SEM 진공 환경을 이용해서 CNT-Tip 을 만들기 위한 실험을 수행하였다.

## 후 기

본 연구는 Center for Nanoscale Mechatronics & Manufacturing of 21<sup>st</sup> Century Frontier Research Program 의 도움(M102KN010001-03K1401-01120) 으로 수행되었으며 이에 감사하다는 말씀을 전해 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Dai, Hongjie and Hafner, Jason H., et al., November 1996, "Nanotubes as nanoprobes in scanning probe microscopy," Nature, Vol.384, No.6605, pp.147-150.
- (2) Kim, Philip and Lieber, Charles M., December 1999, "Nanotube Nanotweezers," SCIENCE, Vol.286, No.5447, pp.2148-2150.
- (3) Yu, MinFeng and Dyer, Mark J, et al., 1999, "Three-dimensional manipulation of carbon nanotubes under a scanning electron microscope," Nanotechnology, Vol.10, No.3, pp.244-252.
- (4) Park, Byoung Chun, et al., 2001, "Development of CNT tip and its application to the high resolution scanning probe microscopy," Development of Advanced Measurement Technology, pp.41-65.
- (5) New Focus, User's guide.
- (6) Physik Instrumente, Catalogue for users..