

# 마이크로 - 나노 모니터링 기술의 현황

강동균, 권대갑

한국과학기술원 기계공학과 Nano Opto Mechatronics 연구실

## 1. 서론

21 세기에 들어서면서 과학 기술의 발전은 소위 3T라고 불려지는 IT, NT, BT를 중심으로 이루어지고 있다. IT, NT, BT 분야를 통해 개발된 고 부가가치 제품들의 특징은 크기가 수 mm 에서 작게는 수  $\mu\text{m}$  정도로 기존의 제품에 비해서 현격하게 줄어들었다는 점이다. 이러한 제품을 생산 및 조립하기 위해서는 기존의 산업용 로봇을 이용한 접근은 불가능하며 정밀도가 높은 신 개념의 생산 시스템이 필요하게 되며 이것이 바로 마이크로-나노 로봇 시스템이다. 고 부가가치 산업인 IT, NT, BT 분야의 산업화를 위해서는 생산 설비로서 마이크로-나노 로봇 시스템이 반드시 필요하게 되며, 이 분야에서 향후 5년 동안 로봇의 수요가 매년 30~40%씩 증가할 것으로 예상되고 있다[1].

마이크로-나노 로봇 시스템은 로봇 메커니즘, 매니플레이션 모니터링 시스템, 말단 효과기 (End-Effector), 제어 시스템으로 구성되어 있다. 본 논문에서는 이 요소 기술 중 매니플레이션 모니터링 기술에 대해서 논하고자 한다. 먼저 2장에서는, 마이크로-나노 로봇에서 매니플레이션 모니터링 시스템에 요구되는 사양이 어떤 것인가를 논하고, 이러한 사양을 달성하기 위해서 어떤 모니터링 시스템의 구조가 필요한지에 대하여 서술한다. 3장에서 부터는 수백에서 수 nm 수준의 대상물 관찰 시 이용되는 Fine monitoring system 중 공초점 주사 현미경, 근접장 주사 광학 현미경, 원자간력 현미경의 원리 및 응용 분야에 대해서 논한다. 6장에서는 각 측정 시스템의 성능을 서로 비교하여 보고 7장에서 결론을 맺고자 한다.

실시간 측정이 가능해야 한다. 그런데, 단일 측정 장비로 상기의 사양을 만족시키는 것은 불가능하며 따라서 그림 1과 같이 이중 복합 구조의 모니터링 시스템을 사용하게 된다. 여기서 Fine monitoring system이란 측정 영역은 작으나 (수  $\mu\text{m}^3$ ) 정밀도가 높은 (수 nm) 측정 시스템을 말하며, Coarse monitoring system이란 넓은 측정 영역을 가지나 ( $\text{cm}^3$ ) 정밀도가 낮은 측정 시스템을 말한다. Coarse monitoring system에는 CCD등을 이용한 비전(Vision) 시스템이 사용되는데 이는 기존의 로봇 시스템에서도 많이 사용되어 왔던 것이기 때문에 본 논문에서는 더 이상 언급하지 않기로 한다. Fine monitoring system으로 사용되는 측정 장비에는 공초점 주사 현미경 (Confocal Scanning Microscopy), 근접장 주사 광학 현미경 (Near-field Scanning Optical Microscopy), 원자간력 현미경 (Atomic Force Microscopy)이 있으며 지금부터 각 측정 장비의 원리 및 응용 분야에 대해 다루기로 한다.

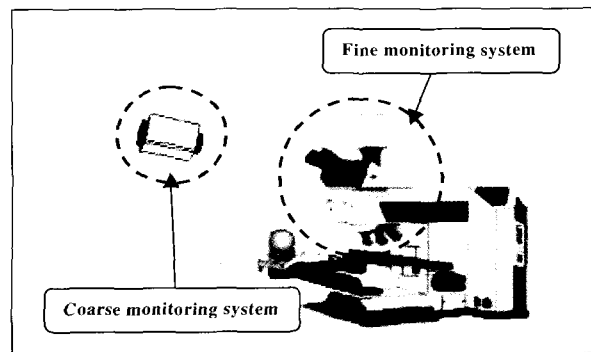


그림 1. 매니플레이션 모니터링 시스템의 구성[2]

## 2. 매니플레이션 모니터링 시스템의 구조

매니플레이션 모니터링 시스템이란 조작 대상물과 말단 효과기 사이의 상대적인 위치와 대상물의 형상을 실시간으로 관찰하는 시스템을 말한다.

일반적인 요구를 만족하는 마이크로-나노 로봇 시스템에 사용되기 위해서는 매니플레이션 모니터링 시스템의 측정 영역이 수  $\text{cm}^3$ 이고 분해능이 수십에서 수 nm가 되며

## 3. 공초점 주사 현미경

공초점 주사 현미경은 1957년 Minsky에 의해 처음 제안되었다[3]. 그 후, 이 분야에 관한 다양한 연구가 진행되다가 1987년에 컴퓨터와 레이저의 발달에 힘입어 최초의 상업적인 공초점 주사 현미경이 개발되었다[4].

오늘날 공초점 현미경은 많은 분야에서 응용되고 있으며, 광학적 절편 효과(Optical sectioning)를 이용한 3차원

이미지 복원 능력은 다른 측정 장비에서는 볼 수 없는 독특한 것으로 다양한 분야에서 그 중요도가 강조되고 있다. 본 장에서는 공초점 주사 현미경의 원리 및 성능, 응용 사례에 대해서 논하고자 한다.

공초점 주사 현미경의 원리는 그림 2와 같다. 시편에 입사된 빛은 반사되어 검출기에 도달하게 된다. 이때 그림 3의 실선과 같이 대물렌즈의 초점 평면에 시편이 위치하는 경우 시편에서 반사된 빛이 핀홀을 통과하여 반사광의 많은 부분이 검출기에 입사하게 된다. 그러나 점선과 같이 대물렌즈의 초점 평면에서 높이 방향으로 벗어나 있는 시편에서 반사된 빛은 핀홀이 있는 곳에서 초점을 형성하지 못하고 그보다 전이나 후에 초점을 형성하게 되어 대부분의 빛이 핀홀에 의해 막혀 검출되는 광량이 줄어들게 된다. 이와 같이 시편의 높이에 따라 광량이 변하는 것을 이용하여 시편 표면의 형상을 측정하는 것이 공초점 주사 현미경의 일반적인 형태이다. 형광 공초점 주사 현미경의 경우 시편에서 나오는 형광을 이용한다는 점에서는 차이가 있으나, 핀홀에 의해 초점 평면 밖에서 나온 신호를 제거한다는 점에서 같은 원리를 가진다.

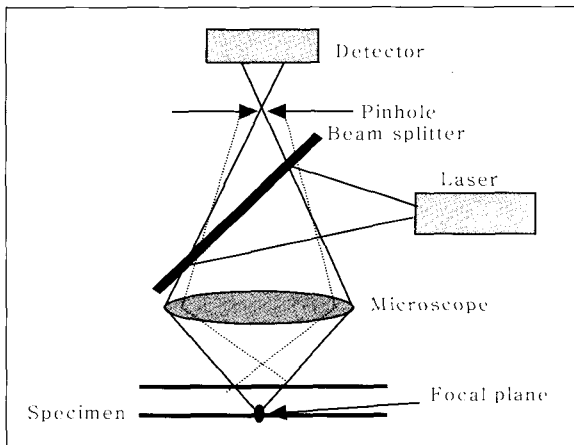


그림 2. 공초점 주사 현미경의 구조

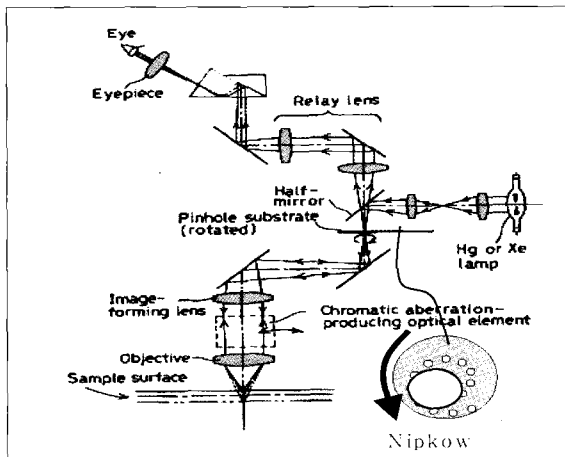


그림 3. 회전 원판 공초점 주사 현미경의 구조(5)

공초점 주사 현미경은 시편을 주사하는 방식에 따라 몇 가지 형태로 나눌 수 있으나, 산업용 응용 분야와 같이 빠른 검사 속도를 요구하는 경우 회전 원판형 공초점 주사 현미경이 많이 사용된다. 회전 원판형 공초점 주사 현미경의 구조는 그림 3과 같다. 핀홀이 여러 개 뚫려 있는 Nipkow disk에 그림 3의 반투명 회색 부분이 조명 되면 이것과 공역점 (Conjugate point)이 되는 물평면 (Object plane)에 초점이 맺히게 된다. 시편에서 반사된 빛은 다시 Nipkow disk 상의 핀홀을 통과하여 광 검출부 또는 관찰자의 눈 쪽으로 가게 된다. Nipkow disk를 회전시킴으로써 시편 상에서 조명 되는 점을 이동시킬 수 있고 이를 이용하여 시편 상의 전 영역을 관찰할 수 있게 된다. 이러한 회전 원판 공초점 주사 현미경은 속도가 매우 빠르고 (700frames/sec) [6], 눈으로 직접 관찰이 가능하다는 장점이 있다. 그림 4는 공초점 주사 현미경과 일반 광학 현미경을 이용하여 관찰한 결과를 비교한 것이다.

공초점 주사 현미경은 산업용 검사 장비, 생의학용 검사 장비로 많이 사용되고 있으며, 이 외에도 거리 측정 센서 등, 다양한 분야에서 응용되고 있다[8][9].

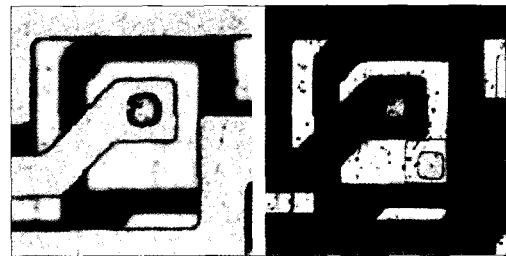


그림 4. 기존 광학 현미경과 회전 원판형 광학 현미경을 이용한 관찰 결과의 비교(7)

#### 4. 근접장 주사 광학 현미경

근접장 주사 광학 현미경은 회절 한계(Diffraction limit)를 극복하여 기존의 광학 현미경에서 얻을 수 없었던 수십 nm의 분해능을 얻게 되었다. 본 장에서는 근접장 주사 광학 현미경의 원리와 응용분야에 대해서 서술하기로 한다.

근접장 주사 광학 현미경의 구조는 그림 5와 같다. 전술한바와 같은 높은 분해능을 얻기 위해서는 파이버의 끝단과 시편 사이의 거리를 100nm수준으로 유지하는 것이 필요하다. 이를 위해서 파이버를 진동시키면서 진폭이 시편과 파이버 끝단 사이의 거리에 따라 변하는 성질을 이용한다. 이 거리가 일정하도록 만들기 위해 스테이지를 이용하여 시편을 이동시키고, 이동 거리를 측정하면 시편 표면의 모양을 측정할 수 있다. 스테이지를 평면 운동시키면서 각 점의 높이를 측정하면, 물체 표면의 3차원 형상을 얻을 수 있게 된다.

근접장 주사 광학 현미경은 마이크로 렌즈, 단일 분자, 메모리 반도체 등의 표면 형상 측정에 사용되고 있으며, 노광 장치 등에도 응용되고 있다[11].

### 5. 원자간력 현미경

원자간력 현미경(Atomic Force Microscopy)은 나노미터 이하의 수직 및 수평 분해능을 가지고 시편의 표면 형상을 3차원으로 측정하는 기술이다. 현재 원자간력 현미경은 나노미터 이하의 분해능을 요구하는 측정, 입자의 조작 등 다양한 분야에서 응용되고 있으며, 그 원리에 대해서도 많이 알려져 있다. 따라서 본 장에서는 원자간력 현미경의 원리와 응용 분야에 대해서 간략하게 살펴 보기로 한다.

원자간력 현미경의 구조는 그림 6에 잘 나타나 있다. 원자간력 현미경에서는 캔틸레버(Cantilever) 끝단의 탐침(probe)을 이용하는데, 이 탐침의 끝은 원자 몇 개 정도로 뾰족하게 되어 있다. 이 탐침을 시편의 표면에 접근시키면 탐침 끝단의 원자와 시편 표면의 원자 사이에 작용하는 힘이 탐침과 시편 사이의 거리에 따라서 인력 또는 척력으로 작용하게 된다. 이 힘에 의해서 캔틸레버가 휘는 정도를 캔틸레버 뒷면에서 반사되어 PSD에 들어가는 레이저빔을 이용하여 측정할 수 있다. 이 신호를 되먹임(Feedback)하여, 캔틸레버가 휘는 정도가 일정하게 유지되도록 시편과 탐침 사이의 거리를 스테이지를 이용해서 제어하면, 스테이지의 이동량을 이용하여 시편의 높이를 측정할 수 있다. 시편을 스테이지를 이용하여 2차원 평면상에서 움직이면서 각 점에 대해서 높이를 측정하면 시편의 3차원 형상을 측정할 수 있게 된다.

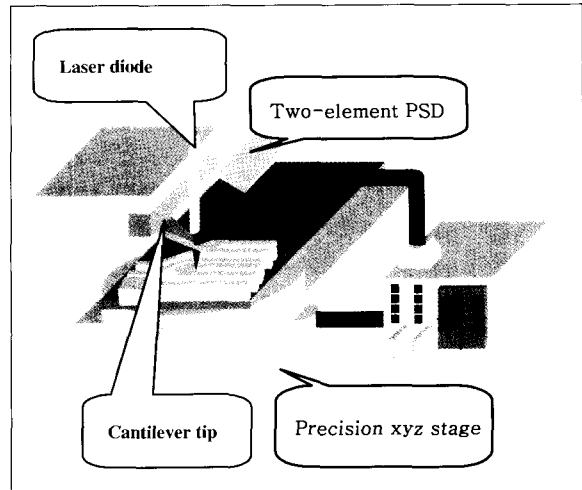
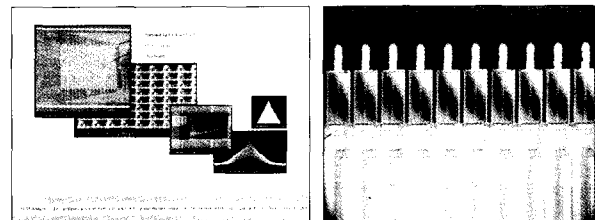


그림 6. 원자간력 현미경의 구조

이런 원자간력 현미경은 나노미터 이하의 분해능을 얻을 수 있다는 큰 장점이 있으나, 속도가 느리다는 단점이 있기도 하다. 최근에는 어레이(Array) 형태의 탐침을 이용하여 속도를 향상시키는 연구도 진행되고 있다. 그림 7은 이런 연구의 예를 보여주고 있다. 원자간력 현미경은 웨이퍼 검사, 표면 조도 검사뿐만 아니라 탄소 나노 튜브와 DNA 조작 등, nm수준의 측정 및 조작이 필요한 많은 분야에 응용되고 있다[14].



(a) IBM, Zurich[12] (b) Stanford University[13]  
그림 7. 탐침 어레이 모듈에 관한 연구 예

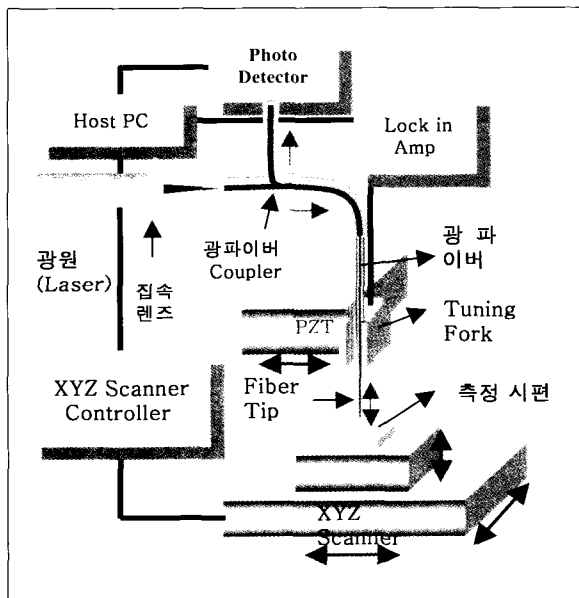


그림 5. 근접장 주사 광학 현미경의 구조 [10]

### 6. Fine monitoring system 성능 비교

Fine monitoring system은 응용 분야에 따라 필요한 성능이 달라진다. 따라서, 본 장에서는 Fine monitoring system의 성능을 분해능과 속도면에서 비교해 보기로 한다.

그림 8은 일반적으로 많이 사용되는 모니터링 시스템의 성능을 비교한 것이다. 가로축은 측정 분해능을 나타내고, 세로축은 측정 속도를 나타낸 것이다. 측정 속도는 512×512 픽셀의 프레임을 하나 얻는데 걸리는 시간을 나타낸 것이다. 공초점 주사 현미경의 경우 최대 초당 700프레임이라는 빠른 속도를 가지나 분해능에서 다른 장비에 비해 성능이 떨어진다. 근접장 주사 현미경의 경우 수 nm의 분해능이 가능하지만 측정 속도가 매우 느리다는

단점이 있다. 원자간력 현미경의 경우도, 나노 미터 이하의 분해능이 가능하지만 측정 속도가 느려서 전수 검사 장비로는 불가능하고, 샘플 검사에 쓰이게 된다.

### 7. 결론

본 논문에서는 마이크로-나노 로봇에서 필요한 매니퓰레이션 모니터링 시스템의 구조와 Fine monitoring system으로 사용되는 공초점 주사 현미경, 근접장 주사 광학 현미경, 원자간력 현미경의 원리와 성능에 대해서 알아보았다. Fine monitoring system으로 쓰이는 각 측정 장비들은 분해능과 측정 속도에 있어 각 측정 장비마다 장단점이 있으며 응용 분야에 맞는 측정 장비를 사용하여 마이크로-나노 로봇 시스템에서 요구되는 성능을 낼 수 있을 것으로 기대된다.

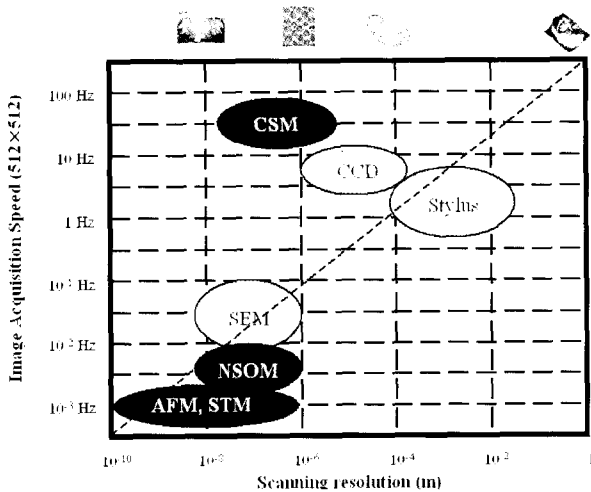


그림 8. 모니터링 시스템의 성능 비교

### 참고문헌

1. 이중엽, "반도체, 광부품, 바이오 분야 자동화 급부상", 월간 21C FA VISION, 기획특집, 2002.
2. Stephan Fahlbusch, Sergej Fatikow, "Implementation of self-sensing SPM cantilevers for nano-force measurement in Microrobots", Ultramicroscopy, Vol. 86, pp. 181-190, 2001.
3. M. Minsky, "United states patent 3.013.467", Dec. 19, 1961.
4. C.J.R. Sheppard, D.M. Shotton, Confocal Laser Scanning Microscopy, Springer Verlag, New York, 1997.
5. Yoshiharu Saito, Hiroyuki Nishida, "United states patent 6,188,514", Feb. 13, 2001.
6. James B. Pawley (Ed.), Handbook of Biological Confocal Microscopy, Plenum press, 1995.
7. "PDF catalogue-Confocal Scan Module for wafer inspection", Zeiss.
8. Carl Zeiss 홈페이지 <http://www.zeiss.de>
9. K. Konig, "Multiphoton microscopy in life science", Journal of Microscopy, Vol.200, Pt.2, pp. 83-104, 2000.
10. 이준희, "NSOM의 Shear Force 특성 분석 및 3차원 표면 형상 측정에 관한 연구", 한국과학기술원 기계공학과 석사학위논문, 1999.
11. TM Microscopes 홈페이지 <http://www.tmmicro.com/>
12. IBM Zurich research lab. 홈페이지 <http://www.zurich.ibm.com>
13. Stanford university Quate group 홈페이지 [http://www.stanford.edu/group/quate\\_group/](http://www.stanford.edu/group/quate_group/)
14. UNC nanoManipulator 홈페이지 <http://www.cs.unc.edu/Research/nano/>

### 저자소개



#### 〈강 동 균〉

- 2000년 한국과학기술원 기계공학과 (공학사).
- 2002년 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사).
- 2002년~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정.
- 주요 관심분야 : 공초점 주사 현미경, 적용 광학계, 비선형 광학, Photonic force microscopy.



#### 〈권 대 갑〉

- 1975년 한양대학교 기계공학과(공학사).
- 1977년 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사).
- 1987년 독일 Stuttgart대학(공학박사).
- 1978년~1982년 부산대학교 기계공학과 교수.
- 1982년~1987년 독일 Institute for Production technology and automation에서 연구원.
- 1989년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수.
- 주요 관심분야 : 정밀 구동 시스템, 정밀 측정 시스템.