

마이크로 - 나노 로봇 메커니즘 기술의 동향

한 창수*, 최 현석**

*한양대학교 공학대학 기계정보경영학부, **한양대학교 정밀기계공학과 박사과정

1. 서론

21세기에 들어서면서 MEMS와 나노 분야에 대한 관심과 연구가 더욱 활성화 되기 시작했다. 이들 연구 분야에서는 조작하는 대상의 크기가 아주 미세한 것이 특징으로 수 마이크로 단위에서 나노 단위의 크기를 가진 부품이나 입자들이다. 이러한 미세한 대상을 조작하기 위한 로봇이 마이크로-나노 로봇이다. 미세한 대상체를 조작하기 위한 로봇은 나노 단위의 정밀도가 필요하며 이러한 높은 정밀도를 얻기 위해 로봇 관절부품, 링크, 기구 구조, 구동기, 센서, 제어기, 환경제어 등의 분야에 대한 연구가 필요하다. 마이크로-나노 로봇의 이러한 요소들 중 특히 관절부품, 링크, 기구구조, 구동기, 제어기부분을 마이크로-나노 로봇 메커니즘으로 분류하며 일반적인 산업용 로봇의 메커니즘 요소와는 구조와 특성면에서 다른점을 가지고 있다. 마이크로-나노 로봇 메커니즘은 마이크로-나노의 정밀도를 가지며 마이크로-나노 크기의 첨단부(End effector)를 사용하여 마이크로-나노 크기의 대상체를 조작할 수 있어야 한다.

마이크로-나노 로봇 메커니즘은 기술적으로 매크로(Macro) 메커니즘의 설계에서 고려하지 않았던 여러 가지 물리 현상을 포함하게 된다. 매크로 메커니즘은 일반적인 산업용 로봇으로써 마이크로 단위 이상의 정밀도를 가지며 수 밀리단위 이상의 대상물을 취급하는 로봇 메커니즘이다. 매크로(macro) 로봇 메커니즘에서는 물리적으로 약력에 속하는 표면장력이나 정전기력 등을 시스템 모델에서 고려하지 않으며 관절을 연결하는 링크에서의 변형은 미세하여 링크를 강체로써 취급한다. 또한 매크로 로봇의 작업은 외부 환경에 대해 민감하게 반응하지 않는다. 마이크로-나노 로봇 메커니즘은 매크로 로봇 메커니즘에서 미세하여 무시하였던 물리적인 현상들을 고려해야만 한다. 미세한 물리력들이 마이크로-나노 메커니즘에서는 충분히 큰 물리력으로써 작용하기 때문이다. 특히 나노 소자나 나노 튜브와 같이 미세한 입자를 다루는 작업일수록 이러한 물리현상에 대한 연구의 필요성은 증가한다.

로봇의 정밀도를 매크로에서 나노 단위로 향상시키고자 할 때 마이크로 단위에서 나노 단위로 정밀도를 향상시키기 위한 노력은 매크로에서 마이크로 단위로 정밀도를 향

상시키기 위한 노력보다 훨씬 많은 노력이 필요하다. 그 이유는 나노 단위의 세계에서는 예기치 못한 다양한 현상이 나타나며 이러한 현상에 대해 아직 구체적인 규명이 안되어 있고 다양한 문제들이 복합적으로 발생하기 때문이다. 그림 1.은 매크로-마이크로-나노 로봇에 있어서 고려해야 될 중요한 연구 분야에 대한 설명이다.

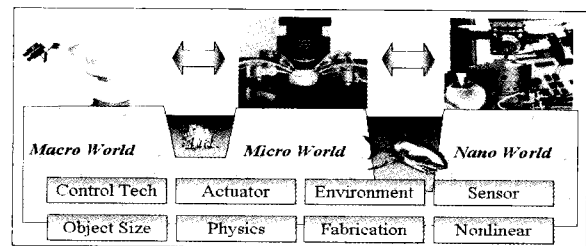


그림 1. 마이크로-나노 로봇의 연구분

마이크로-나노 로봇 메커니즘은 구성 형태에 따라 다음 표 1.과 같이 분류 할 수 있다. 현재 전 세계적으로 마이크로-나노 로봇에 대한 연구에서 사용되는 메커니즘은 크게 두 가지로 SPM 형과 일반적인 로봇형으로 구분할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 연구되고 있는 마이크로-나노 로봇 메커니즘의 구조의 특징과 형태에 따른 분류와 각각의 특성에 대해 기술하였다. 3장에서는 마이크로 나노 로봇 메커니즘의 기구 메커니즘의 종류와 설계 요소에 대해 기술하였다. 4장에서는 마이크로-나노 로봇 메커니즘의 몇 가지 개발사례를 소개한다. 마지막으로 마이크로-나노 로봇 메커니즘의 향후 발전 방향과 연구개발 방향에 대해 논하였다.

표 1. 마이크로 나노 로봇 메커니즘 종류

Structure Type	세부구분	특 징
SPM Type	STM	대기나 진공환경에 적합 도체나 반도체 물질취급
	AFM	다양한 환경에서 이용 다양한 작업대상물
Robotic type	Serial	자유도가 낮고 평면작업 개발용이 / 제어기 간단
	Parallel	다자유도에 사용 3차원공간 작업에 유효

2. 마이크로-나노 로봇 메커니즘의 구분

마이크로-나노 로봇 메커니즘은 위의 표 1과 같은 구조의 특징으로 구분할 수 있다. SPM(Scanning Probe Microscope) 형태의 로봇과 일반적인 로봇의 구조인 조인트와 강체의 링크로 구성된 로봇으로 구분된다. SPM은 물질의 표면을 관측하기 위해 개발된 현미경의 일종이지만 마이크로-나노 로봇에서는 나노 단위의 미세한 대상물을 조작하기 위한 메커니즘으로 응용된다. STM(Scanning Tunneling Microscope)와 AFM(Atomic force Microscope)형의 두 가지로 나눌 수 있다. AFM은 STM에 비해 세포, DNA 등 다양한 대상물을 다룰 수 있다.

일반적인 로봇 형태의 마이크로 나노 로봇 메커니즘(Robotic type)은 강체의 링크(link)와 각각의 링크를 연결하는 관절(joint), 그리고 센서와 구동기로 메커니즘을 구성하고 있다. 구성형태에 따라 직렬형(serial)과 병렬형(parallel) 로봇 메커니즘과 직렬형과 병렬형을 혼합한 하이브리드형으로 나눈다.

2.1. SPM형 마이크로-나노 로봇 메커니즘

SPM형은 주로 표면 작업을 수행한다. Micro probe를 이용하여 작업물을 조작하고 원하는 위치로 이동시키는 작업을 한다. Micro probe와 작업테이블을 이동시키는 구동기로 PZT가 사용되고 있다. SPM형은 작업을 하면서 메커니즘에 작용하는 힘과 위치변위 등의 물리량을 측정할 수 있다. SPM형 메커니즘의 구성은 그림 2와 같으며, Micro probe와 구동기, 센서(near field, far field), 제어기, 그리고 인터페이스로 구성된다.

Far field 센서와 near field 센서 두 가지는 사용하는 측정 범위와 정밀도에 따라 적용된다. 좁은 측정범위와 높은 정밀도의 부분에서는 near field 센서를 사용하며 넓은 측정 범위를 만족하기 위해서 far field센서를 사용하게 된다. 구동기는 micro probe용 구동기와 테이블용 구동기가 있다. 테이블은 필요에 따라 3자유도 혹은 이상의 자유도를 가지고 X-Y-Z축 방향의 이동과 회전을 할 수 있도록 설계 하고 있다.

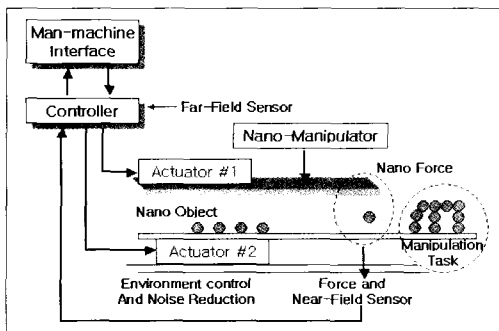


그림 2. SPM형 마이크로-나노 로봇 메커니즘 구조

2.2. 일반 로봇형 마이크로-나노 로봇 메커니즘

병렬형과 직렬형으로 구분된 일반적인 형태의 로봇 메커니즘은 구조적으로, 기구학적으로 조인트와 링크로 연결되었다는 점에서 전통적인 산업용 로봇과 같은 구조라고 볼 수 있다. 그러나 마이크로-나노 로봇에서 요구되는 높은 정밀도를 구현하기 위해서는 조인트나 링크, 구동기, 그리고 센서 등을 일반적인 산업용 로봇에서 이용되는 것을 사용하는 안 된다. 그 이유는 허용오차나 백래쉬(backlash), 변형이 마이크로-나노 로봇의 정밀도를 상회하기 때문이다.

병렬형 메커니즘은 구조적으로 직렬형보다 강인한 구조를 가지고 있으며 정밀도가 우수하다. 또한 구조의 크기를 작게 하면서도 높은 자유도를 얻을 수 있어 3차원공간의 입체적인 작업에 적합하다. 병렬형(parallel)의 나노 메커니즘으로 일본 나고야 대학(Nagoya univ.)의 Arai교수 등이 개발한 로봇 메커니즘과 독일의 Klocke Nanotechnik에서 개발한 메커니즘이 있다. 일반적으로 구동은 PZT를 이용하고 있다.

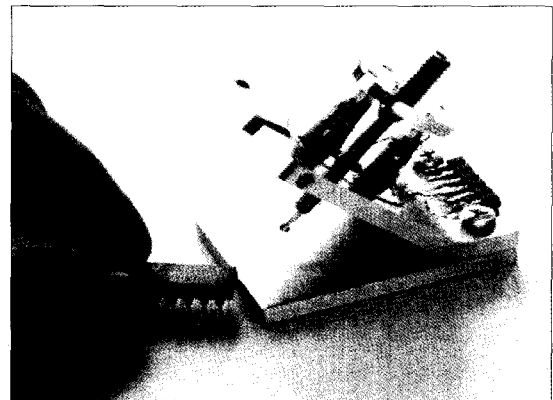


그림 3. (a)병렬형 마이크로-나노 로봇 메커니즘

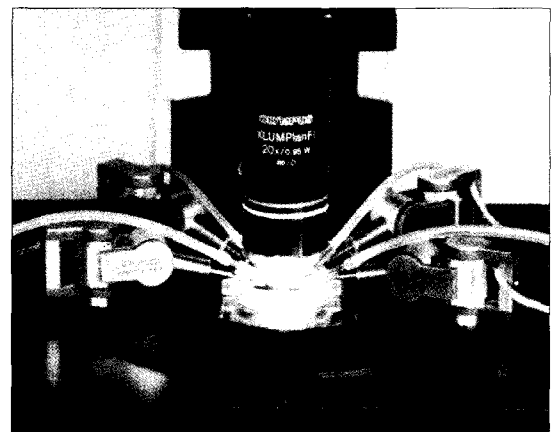


그림 3. (b)직렬형 마이크로-나노 로봇 메커니즘

직렬형(serial) 마이크로-나노 메커니즘은 직선운동이나 회전운동을 하는 단일 운동 모듈을 연속적으로 연결한 형태이다. 직교 좌표형의 위치 결정 테이블 로봇 메커니

증이 여기에 속한다. 직렬형 메커니즘은 운동 보풀이 연속적으로 연결되면서 오차가 누적되어 정밀도가 낮아지는 단점이 있다. 이러한 이유로 로봇 메커니즘에서 발생하는 오차를 보상하여 정밀도를 향상시키는 연구를 하고 있다. 구동기의 히스테리시스, 관절에서의 백래쉬와 가공 오차, 마찰 등 오차의 요인을 정의하고 모델링 함으로써 제어에서 이러한 오차를 보상하여 정밀도를 높이고 있다.

3. 마이크로-나노 로봇의 기구 메커니즘

3.1. 마이크로-나노 기구 메커니즘의 정의

마이크로-나노 로봇 메커니즘은 고정밀도를 얻기 위해 일반적인 매크로(Macro)로봇 메커니즘과는 다른 구성 부품을 사용하고 있다. 메커니즘 기구는 두가지로 나누어 정의된다. 한가지는 에너지의 전달과 운동특성 변화를 목적으로 하는 "Transmission"과 기구의 연결을 목적으로 하는 "compliance"가 있다.

이러한 기구적인 메커니즘을 설계하는데 있어서 다양한 설계 변수를 결정해야 한다. 메커니즘 설계에서 고려해야 할 설계 변수들을 다음 그림 4에서 보여주고 있다. 다음 표2.는 기구 메커니즘의 분류와 종류를 표시하고 있다.

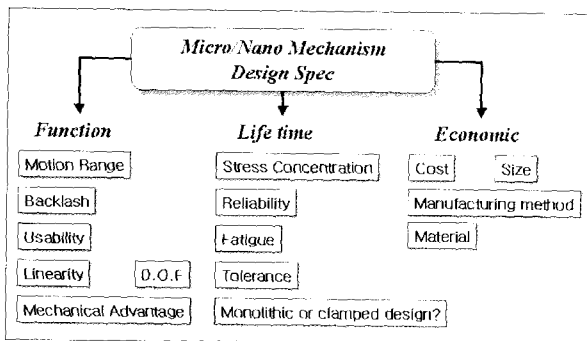


그림 4. 메커니즘 설계 사양

3.2. 트랜스미션 메커니즘(Transmission mechanism)

트랜스미션 메커니즘(Transmission mechanism)은 마이크로-나노 로봇 메커니즘에서 직선운동을 회전운동으로 변환하거나 회전운동을 직선운동으로 변환시키기 위한 기구 구조와 운동 범위의 확장이나 운동범위를 축소하고 분해능을 향상을 위해 설계된 기계적인 앰프(Mechanical amplifier) 구조로 정의할 수 있다.

Transmission mechanism은 설계에서 링크의 회전 중심과 관절(joint)의 위치를 결정함으로써 운동량의 변화를 조절한다. 원하는 운동을 얻기 위해 설계 시점에서 모델링과 시뮬레이션을 통해 기구 메커니즘을 검증하며 이때 성능뿐만 아니라 수명, 가공성, 경제성의 측면을 모두 고려 한다. 다음 그림5.는 두 메커니즘에 대한 원리에 대한 도식이다.

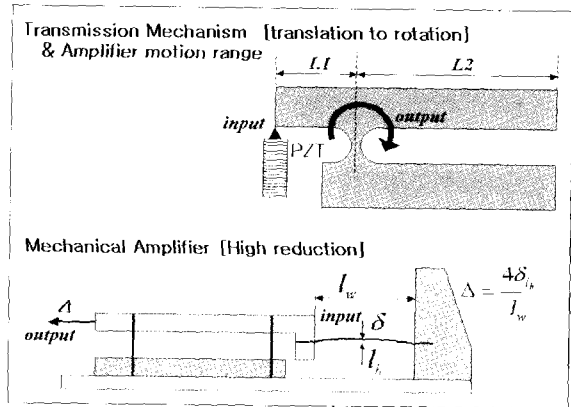


그림 5. 트랜스미션 메커니즘 개념

3.3. 컴플라이언스 메커니즘(Compliance mechanism)

컴플라이언스 메커니즘은 로봇 메커니즘의 링크와 링크를 연결하거나 로봇 메커니즘을 베이스에 연결하는 역할을 하며 관절의 역할을 한다.

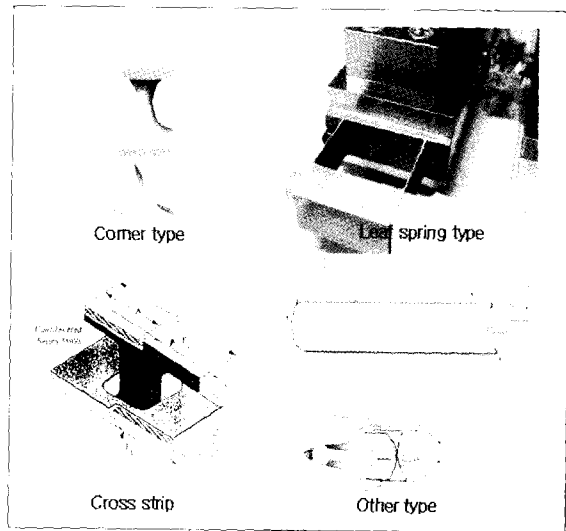


그림 6. 컴플라이언스 메커니즘 예

표 2. 마이크로 나노 로봇 메커니즘 기구의 종류

구분	기능	내용
Transmission	운동에너지의 전달과 운동 방향에 대한 변환 기능	- Mechanical amplifier - Translation to rotation motion and vice versa
Compliance	링크들을 연결하여 관절 역할을 함.	- Flexure hinge joint - Air bearing - Cross strip

종류에는 flexure hinge joint와 cross strip joint, leaf spring, flexure pin 등 다양한 형태가 개발되고 있다. 그림 6.은 컴플라이언스 메커니즘의 몇 가지 예를 보여주고 있다.

컴플라이언스 메커니즘은 재료의 탄성을 이용하는 것이 대부분이다. 재료의 물성과 형성에 따른 강성, 크랙, 발생 응력등에 의해 성능이 결정된다. 컴플라이언스의 요구 조건은 다음과 같다.

- ① 일정한 강성을 가질 것
- ② 작동 범위 내에서 영구변형이 없을 것
- ③ 피로 수명이 긴 것
- ④ 변형 위치가 동일할 것
- ⑤ 높은 주파수 응답특성

위의 요구 조건에 적합한 컴플라이언스 메커니즘을 개발하기 위해 새로운 재료와 구조를 개발하여 적용하고자 연구하고 있다. 최근에는 SMA(Shape Memory Alloy)의 초탄성 특성을 이용하여 영구 변형이 없으며 넓은 동작범위를 가진 메커니즘에 대한 연구가 활발하다. 독일의 Jurgен hesselbach은 초탄성재료를 이용함으로써 변형율 15%의 flexure hinge joint를 설계하고 논문에서 SMA를 이용한 정밀 스테이지를 개발하였다[21].

일반적으로 가공 방법은 방전가공(EDM)을 많이 사용하고 있다. EDM의 가공 특성상 가공 표면의 거칠기가 매우 높다. EDM 가공에서 발생할 수 있는 가공 표면에서의 마이크로 노치(Micro Notch)는 로봇 메커니즘의 수명을 단축시키고 특성 변화를 가져온다. 가공 후 후처리를 통하여 마이크로 노치를 저감 시키기 위한 노력이 필요하다.

4. 마이크로-나노 로봇의 메커니즘 연구사례

4.1. Miniman microrobot

(독일, 스웨덴, 스페인, 이탈리아)

독일 등 4개 국가의 협력에 의해 개발한 Miniman micro 로봇 메커니즘은 관성(inertia driving)과 stick-slip동작을 이용하여 구동하는 메커니즘이다. 구형의 알루미늄 강체를 PZT를 이용하여 회전운동 하도록 설계되었다. 구형의 강체에 3개의 PZT와 베이스에 3개의 PZT를 부착하여 5자유도를 구현하였다(그림 7). 총5자유도를 가지게 함으로써 공간상에서의 작업도 가능하게 하였으며 또한 소형화를 하여 현미경이나 전자현미경 내에서도 사용할 수 있다

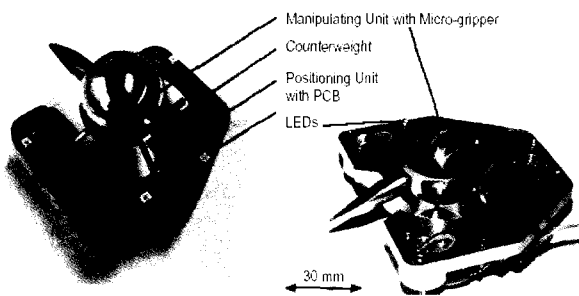


그림 7. Micro robot. "Miniman"의 구조

4.2. 병렬형 마이크로-나노 로봇 메커니즘

독일의 Kleindiek Nanotechnik에서는 PZT를 이용하여 나노 단위의 정밀도를 가진 구동기를 개발하였고 이를 이용한 병렬형의 로봇을 개발하였다. 그림 8은 Klocke Nanotechnik에서 개발한 나노 모터와 병렬 스테이지를 보여준다. 스테이지와 구동기는 탄성재료의 핀으로 연결되어 있으며 핀이 탄성 변형으로 관절 역할을 하고 있다.

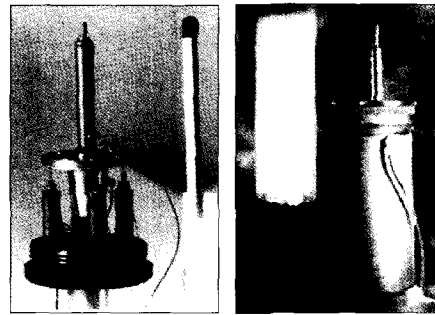


그림 8. 나노 스테이지와 나노 모터

4.3. AFM을 이용한 Nano-robot mechanism

미국의 CISMM은 AFM을 이용한 로봇메커니즘을 개발하였다. DNA나 박테리아 탄소 나노 튜브를 조작할 수 있는 로봇 메커니즘으로 로봇 메커니즘으로 AFM사용하고 있으며 원격제어로 AFM Tip을 조작하여 작업을 수행하게 된다. 다음 그림 9는 AFM 나노 로봇 시스템의 구성을 보여준다.

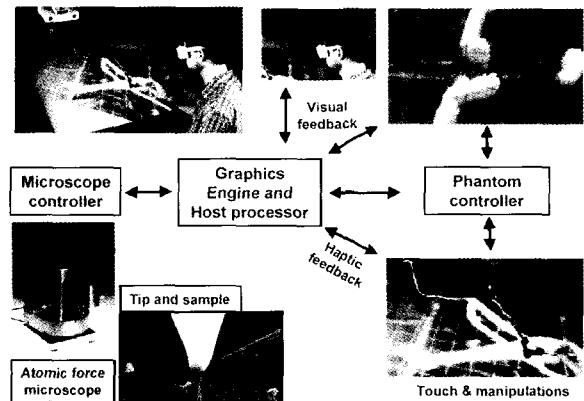


그림 9. AFM type nano-robot 시스템 구성

4.4. Flexure hinge joint 를 이용한 로봇 메커니즘

미국 DSN사에서는 flexure hinge를 이용한 기구학적 메커니즘을 고안하여 PZT 구동기의 구동 범위를 2mm 까지 확대시킨 PZT 모듈을 개발하였다(그림 10). 또한 개발한 구동 메커니즘을 병렬형 로봇 메커니즘에 활용하여 그림 11과 같이 6자유도 나노 로봇을 구현하였다. 로봇 메커니즘의 구성 재질은 알루미늄, SUS, 타이타늄(Titanium) 중에서 로봇 메커니즘의 운동범위에 따라 선택적으로 사용

하고 있다. 동작범위에 따라 flexure hinge joint의 변형량이 다르므로 영구 변형이 일어나지 않는 범위에 맞추어 재료를 선택하고 있다.

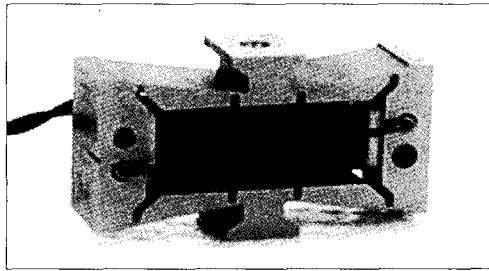


그림 10. Flexure hinge를 이용한 PZT 구동 모듈

DSN에서 개발한 병렬형의 로봇 메커니즘은 관절에 flexure hinge사용하였으며 운동 범위가 수mm 단위이다. 확장은 PZT로 구동하나 수축운동에서는 부착된 스프링의 힘으로 동작하도록 하였다.

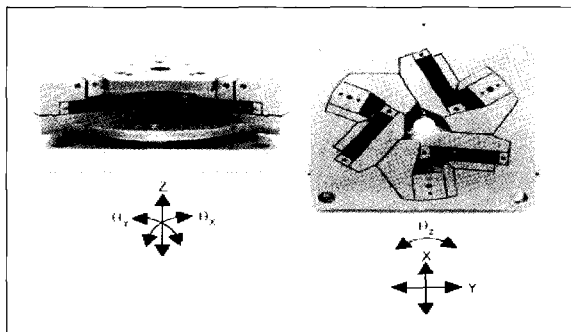


그림 11. Flexure hinge를 이용한 6축 병렬로봇

5. 결론

마이크로-나노 로봇에서 사용하는 메커니즘에 대하여 분류와 기술적인 특징들을 살펴보았다. 마이크로-나노 로봇 메커니즘은 고정밀도를 요구하는 마이크로-나노 로봇에서 필수적인 기술로 로봇의 정밀도에 큰 영향을 미친다. 우수한 성능을 가진 메커니즘을 개발하기 위해서는 재료, 기구학, 가공기술, 해석기술, 신뢰성 기술 등이 종합적으로 필요하다.

현재 마이크로-나노 로봇 메커니즘에 대한 연구 개발은 시작단계로써 세계 여러 국가들에서 연구 되어지고 있는 분야이다. 앞으로 MEMS와 NANO 에 대한 기술발전과 함께 마이크로-나노 로봇의 필요성은 높아질 것으로 예상되며 이에 따라 우수한 성능의 메커니즘 개발이 필요하다. 우수한 성능을 구현하기 위해 메커니즘에 대한 신뢰성 확보와 메커니즘의 안정된 정밀도, 저렴한 개발비용, 긴 수명, 소형화를 위한 연구가 필요하다.

참고문헌

1. M. Sitti, "Survey of Nanomanipulation Systems", IEEE NANO 2001, pp.75-80, 2001.
2. Y. Zhou, B. J. Nelson and B. Vikramaditya, "Fusing Force and Vision Feedback for Micro-manipulation", IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1220-1225, 1998.
3. S. Fahlbushch and S. Fatikow, "Micro Force Sensing in a Micro Robotic System", IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 3435-3440, 2001.
4. World Robotics 2000, IFR(International Federation of Robotics) and UN/ECE(United Nations and Economic Comission for Europe), 2000.
5. World Robotics, IFR 1999.
6. Yoshitaka Tstsue et al., "초소형 정밀기계 기술 개발을 위한 자료", 1995.
7. M. Dickinson, F. Lehmann, S. Sane, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight", Science, vol. 284, June, 1999.
8. C. Mao, W. Sun, Z. Shen, N. Seeman, "A Nanomechanical Device Based on the B-Z Transition on DNA", Nature, January 14, 1999.
9. K. Tsuruta, T. Sasaya, T. Shibata, N. Kawahara, "Control circuit in an In-Pipe Wireless Micro Inspection Robot", International symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.59-64, 2000.
10. T. Sato, T. Kameya, H. Miyazaki, Y. Hatamura, "Hand-Eye System in Nano Manipulation World", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.59-66, 1995.
11. A. Codourey, M. Rodriguez and I. Pappas, "Human Machine Interaction for Manipulations in the Microworld", IEEE International Workshop on Robot and Human Communication, pp. 244-249, 1996.
12. O. Fuchiwaki, H. Ayama, "Flexible Micro-Processing by Multiple Miniature Robots in SEM Vacuum Chamber", International Symposium on Micromechatronics and Human Science, pp.145-150, 2000.
13. H. Woern, J. Seyfried, S. Fahlbusch, A. Buerkle, F. Schmoeckel, "Flexible Microrobots for Micro Assembly Tasks", International Symposium on Micromechatronics and Human

- Science, pp.135-143, 2000.
14. SRI Consulting, "Technology Map : Micromachining", 1999.
 15. 김덕호, 김경환, 김태송, 박종오, "마이크로 액츄에이터의 연구동향: 마이크로 로봇의 개발사례를 중심으로", 제어·자동화·시스템 공학회지, Vol.7, No.1, pp.42-51, 2001.
 16. P.Rai-Choudhury, "Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication", Vol.1.
 17. Jean-Philippe Bacher, Stefano Bottinelli, Jean-Marc Bregust, Reymond Clavel, "Delta : design and control of a flexure hinges mechanism, Microrobotics and Microassembly", Proc. SPIE, pp.135-142, 2001.
 18. Jurgen hesselbach and Annika Raatz, "Pseudo-elastic Flexure-Hinges in robots for Micro assembly", Proc. SPIE, pp.157-167, 2000
 19. Tomomasa SATO, "Micro/Nano Manipulation World", proc. IROS, pp834-841, 1996.
 20. SunMo Kim, Daegab Gweon, "The optimum design of a pick-up actuator for a minimum seek time" Mechatronics, 2001.
 21. Jurgen Hesselbach and annika raatz, "Compliant parallel robot with 6-D.O.F", Microrobotics and micro-assembly, SPIE, pp143-150, 2001.
 22. Shilong Zhang, "A finite-element-based method to determine the spatial stiffness properties of a notch hinge", Journal of mechanical design, pp.141-147, 2001.
 23. <http://www.spi-robot.de/>
 24. <http://www.sandia.gov>
 25. <http://www.ifr.mavt.ethz.ch>
 26. <http://www.wipr.ira.uka.de/miniman/>
 27. <http://www.mel.go.jp>
 28. <http://dfs.iis.u-tokyo.ac.jp>
 29. <http://www.llnl.gov/>
 30. <http://www.nanotechnik.com/>
 31. <http://robotics.eecs/~ronf/mfi.html>
 32. <http://www.psia.co.kr>
 33. <http://www.zurich.ibm.com>
 34. <http://www.nanotech.wisc.edu/>
 35. <http://www.cs.unc.edu>
 36. <http://www.dynamic-structures.com/>

저자소개



〈한 창 수〉

- 한양대학교 기계공학과(공학사).
- 1989년 univ. of Texas at Austin 기계과(Ph.D.).
- 1996년~1997년 U.C. Berkeley 객원교수.
- 1990년~현재 한양대학교 정교수.
- 주요 관심분야: 로봇 메커니즘, 복지로봇, 마이크로-나노 로봇, 초정밀 제어, 자동차 관련 제어.



〈최 현 석〉

- 1993년 한양대학교 기계공학과(공학사).
- 1995년 한양대학교 정밀기계공학과(공학석사).
- 1995년~2001년 대우전자 품질경영 연구소 주임 연구원.
- 2001년~현재 한양대학교 박사과정.
- 주요 관심분야: 초정밀 제어, 마이크로-나노 로봇, 로봇 신뢰성 공학.