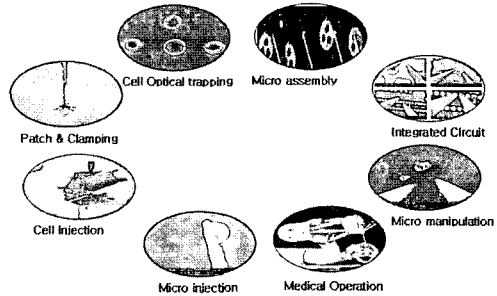


## 미세 작업을 위한 마이크로-나노 로봇

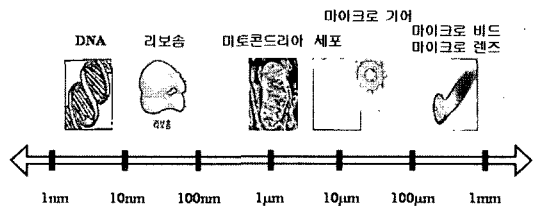
문찬우, 김봉석(전자부품연구원 지능메카트로닉스 연구센터), 박준식(전자부품연구원 나노메카트로닉스 연구센터)

### 1. 서론

마이크로-나노 로봇은 일반적으로 마이크로 또는 나노미터 정도의 크기를 갖는 극소형 로봇 또는 고 정밀도를 갖는 매크로 로봇(macro robot)을 말한다. 사람의 혈관을 따라 이동할 수 있을 정도의 극소형 로봇은 현재 연구 초기 단계로, 에너지원이나 구동, 제어에 있어 해결해야 할 문제가 아직 많이 남아있다. 이에 비해 고정밀도를 갖는 매크로 로봇은 마이크로미터에서 나노미터 수준까지의 정밀도를 갖는 초정밀 로봇으로, 마이크로 스텝모터, 보이스코일 모터, 압전 소자 등에 의해 구동되는 산업용 로봇의 일종이다. 그림 1은 초정밀 로봇의 응용 가능 분야로, 바이오 분야나 미세 가공 분야에서 응용이 확대될 것으로 기대되고 있다<sup>[1][2][3]</sup>. 초정밀 로봇에 있어 작업에 필요한 정밀도를 갖도록 하는 것이 중요한데, 대표적인 작업 대상의 물리적인 크기는 그림 2에서 비교하였다. 초정밀 로봇 중에서 마이크로미터 내외의 정밀도를 갖는 매니플레이터는 바이오용으로 마이크로 스텝 모터 기술을 사용한 제품들이 Narishige, Sutter, RI 등의 회사에서 시판되고 있으며 나노미터 정밀도





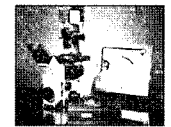

〈그림 1〉 마이크로 나노 로봇의 응용 분야



〈그림 2〉 대상 물체의 크기 비교

를 갖는 로봇은 Kleindiek 등의 회사에서 반도체 테스트를 포함한 다목적용으로 개발하여 판매하고 있다. 본 연구에서는 압전소자를 이용하여 마이크로미터 이하의 정밀도를 가지며, 클린룸과 같이 공간적으로 제한된 환경에서 작업하는데 유리한 소형의 로봇 매니플레이터 (manipulator)와

〈표 1〉 초정밀 로봇 시스템

| 로봇  | 제작사          | 용도      |
|---|--------------|---------|
|  | Sutter (미)   | 바이오 실험용 |
|  | MMI (스위스)    | 바이오 실험용 |
|  | RI (미)       | 바이오 실험용 |
|  | Kleindek (독) | 반도체 용   |

그 끝에 부착하여 사용할 수 있는 마이크로 그리퍼를 개발한다. 로봇 매니플레이터에 있어서, 압전소자의 단점인 작은 행정거리를 극복하기 위해 행정거리 확대 메커니즘에 의한 직선형과 회전형 구동 모듈을 개발하고, 각 구동 모듈을 결합하여 매니플레이터를 구성할 수 있도록 한다. 마이크로 그리퍼는 작업에 적합한 형상의 그리퍼를 저가로 생산할 수 있도록 MEMS 기술을 사용하여 4종류의 마이크로 그리퍼를 제작하고 특성을 평가한다.

## II. 초정밀 매니플레이터 및 마이크로 그리퍼

### 1. 초정밀 매니플레이터

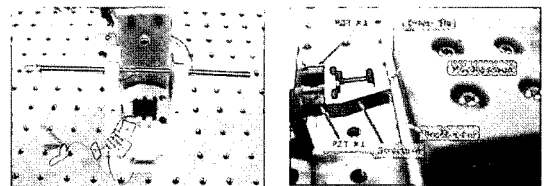
초정밀 매니플레이터는 압전소자에 의한 구동 방식을 채택하였는데, 압전소자는 크기가 작고

나노미터 수준의 정밀도를 얻을 수 있는 반면, 행정 거리가 짧아 기구적으로 행정 거리를 확대할 필요가 있다. 본 연구에서는 선형 2중 (P-type 1,2)과 회전형 2중 (R-type 1,2)의 구동기 모듈을 개발하고 각각의 조합에 의해 매니플레이터를 구성하도록 하였다.

#### 가) 선형 구동기

매니플레이터의 작업범위를 넓히기 위해서, 첫 번째 선형 구동기 모델인 P-TYPE 1에서는 충분한 스트로크를 가지며 추력이 큰 구조인 인치웸 방법으로 샤프트를 구동시키는 구조를 채택하였다<sup>4)</sup>. 직선 구동부분은 샤프트를 고정시키는 부분과 고정부분사이의 거리를 늘려주는 부분으로 구성되어 있다. 두 번째 선형 구동기인 P-Type 2는 2개의 압전소자를 이용하였는데, 압전소자를 조동(Coarse)운동에서는 초음파 구동 방식을 이용하고 미동(fine)운동에서는 압전소자의 변위를 제어하여 정밀도를 구현하였다. 운동 구현을 위해 두 개의 압전소자에 sin파와 cos파를 입력하여 마찰점을 움직인다.

구조체의 중심부에는 알루미늄 재질의 구가 고정되어 이동자와 접촉을 하도록 한다.



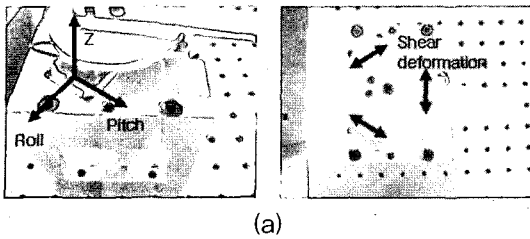
P-type 1

P-type 2

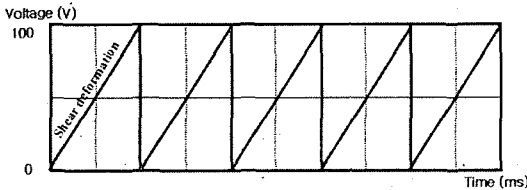
〈그림 3〉 선형 구동기

#### 나) 회전형 구동기

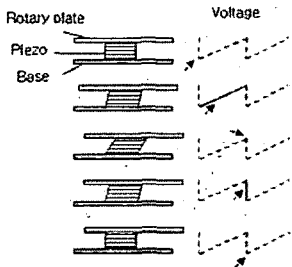
회전형 구동기는 일정 범위 이상의 구동범위를



(a)



(b)



〈그림 4〉 전단변형 압전소자 기반 회전 메커니즘,  
R-type 1

가지며 정밀한 회전운동이 가능한 구조가 되어야 한다. 이를 위해서 전단변형을 하는 압전소자와 인장변형을 하는 압전소자를 사용하여 정밀한 회전운동이 가능한 회전 구조를 구현하였다.

첫 번째 회전형 모델 R-type 1은 그림 4와 같이 베이스, 압전세라믹, 회전판으로 구성되어 있으며, 베이스에 120도 간격으로 배치된 압전소자에 전압이 가해지게 되면 압전소자에 전단변형이 발생하면서 회전판을 밀어주게 된다. 입력 전압을 순간적으로 0V로 낮추게 되면 압전소자는 원래 모습으로 복원을 하게 되지만, 압전소자 위에서 회전을 발생한 구동체는 관성력에 의해 회전한 위치에 정지하게 된다. 이러한 과정을 반

복하게 되면 구동체는 회전 운동을 하게 된다.

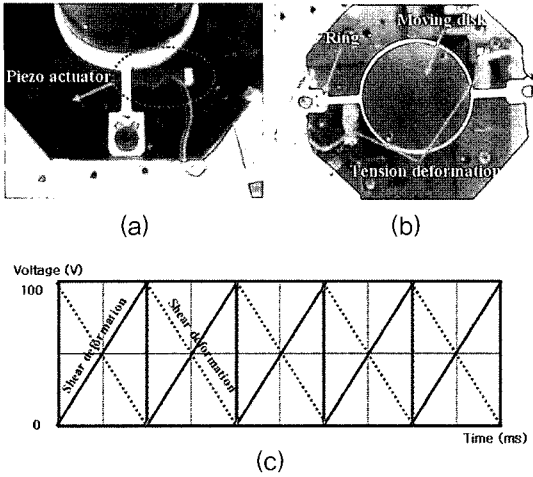
이 메커니즘에서 가장 중요한 부분은 압전소자와 회전체의 마찰력 확보 문제인데, 120도 간격으로 배치된 압전소자가 동시에 회전체와 접촉하기 위해서는 다음의 세 가지 조건을 만족해야 한다.

- (ㄱ) 각각의 압전소자의 크기가 동일할 것.
- (ㄴ) 각각의 압전소자를 동일하게 장착할 것.
- (ㄷ) 각각의 압전소자와 구동체가 동일한 힘으로 균일하게 접촉할 것.

이 조건을 만족하기 위해서 각각의 압전소자를 고정하는 부분에 roll, pitch, z방향의 3자유도를 조절 할 수 있는 메커니즘을 추가함으로써 조절을 통하여 위의 세 가지 조건을 만족시킬 수 있다.

두 번째 회전형 모델 R-type 2에서는 인장변형 압전소자를 사용하여 그림 5(b)와 같이 압전소자를 링과 일체형으로 부착되어 있는 보와 접촉하도록 장착한다. 이 두 개의 인장변형 압전소자가 보의 변화를 발생시키고 보의 변화는 전체적인 링의 형상을 변화시키기 때문에 링 안에 미세한 간격을 확보하며 장착되어 있는 구동체(moving disk)를 회전하게 한다. 이때에 압전소자에 가해지는 전압의 파형은 그림 5(c)와 같다. 실선의 파형은 구동체의 정회전을 발생시키고 점선의 파형은 구동체의 역회전을 발생시킨다. 그림 6은 구조해석프로그램을 사용하여 파형에 따라 링의 변형되는 모습을 표현한 것으로 파형이 천천히 증가할 경우 링은 그와 같은 속도로 변형이 일어나게 되는데 이 변형은 링과 구동체를 접촉하게 함으로써 구동체를 회전 할 수 있게 한다.

증가하던 파형이 0V로 급격하게 떨어지는 구

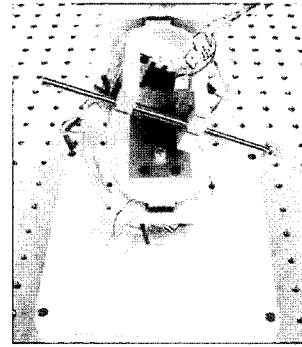


〈그림 5〉 인장변형 piezo actuator 기반 회전메카니즘



〈그림 6〉 링의 변화

간에서 구동체는 관성력에 의해 회전한 위치에 남아 있게 되고 링만 원래의 형태로 복원된다. 이러한 과정을 일정한 주파수로 반복하게 되면 구동체는 회전하게 된다. 이와 같은 경우 순간적으로 파형을 100V로 증가하게 되면 구동체는 관성력에 의해 원래의 위치에 있게 되고, 파형을 서서히 0V로 감소시키게 하면 그림 6에서 나타난 링의 변화 순서가 반대로 발생되기 때문에 구동체를 역방향으로 회전 시키게 된다. 이와 같은 메커니즘은 압전체와 구동체가 직접 접촉하는 것이 아니라 중간의 링을 매개체로 이용하여 구동력을 전달하는 방식이며 압전소자와 구동체의 접촉력을 보다 쉽게 확보할 수 있고 비교적 큰 부하를 회전 시킬 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 이 경우는 링의 설계가 매우 까다롭고 링과 구동체 사이의 원하는 간격을 확보하기 위하



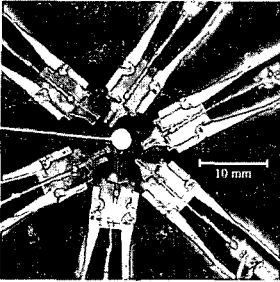
〈그림 7〉 R-R-P형 매니플레이터

여 실제로 제작하는데 있어서의 발생하는 가공상의 오차가 문제가 될 수 있다.

앞에서 개발된 각 모듈의 조합에 의해 매니플레이터를 구성할 수 있는데, 그림 7은 R-type 1과 P-type 1을 조합하여 구성된 R-R-P형 매니플레이터이다. 이와 같이 모듈 형태로 매니플레이터를 구성하기 위해서는 각각의 구동 모듈이 충분한 추력을 갖고 있어야 한다.

## 2. 마이크로 그리퍼

마이크로 그리퍼는 마이크로 로봇에 장착하여 미세한 부품을 다루기 위해 사용된다. 그림 8은 독일의 Clocke Nonotechnik에서 개발한 마이크로 그리퍼로 금속 가공에 의해 제작된 그리퍼이다. 마이크로 그리퍼는 MEMS 기술을 사용하여 제작할 수 있는데, MEMS 기술을 사용하면 극소형의 마이크로 그리퍼를 다양한 형상으로, 저가격에 대량 생산할 수 있지만 내구성과 강도가 약한 단점이 있다<sup>[4][6][7]</sup>. 본 연구에서는 MEMS 그리퍼의 형태를 그리퍼의 턱이, 생성된 같은 평면상에서 동작하면 In-plane 형, 서로 수직인 평면상에서 동작하면 Out-of-plane형으로 정의하고, 이러한 기준으로 2종의 In-plane형 마이크로

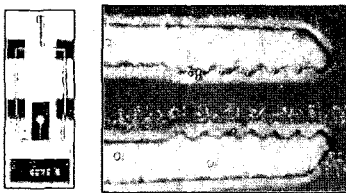


〈그림 8〉 Clocke Nanotechnik(독) 마이크로그리퍼

그리퍼, 2종의 Out-of-plane형 마이크로 그리퍼를 개발하였다.

#### (가) In-plane 압전형 마이크로 그리퍼

그림 9는 압전소자에 의해 구동되는 In-plane형 마이크로 그리퍼로 Carrozza가 제안한 구조를 MEMS로 제작하였다<sup>8)</sup>. 그리퍼의 중앙부분은 고정되고, 하단부의 압전소자에 의한 변위가 양 턱의 운동으로 변환된다. 그림 10은 이 그리퍼를 사용하여 금속 마이크로비드를 포획하여 이동하는 실험 장면이다.



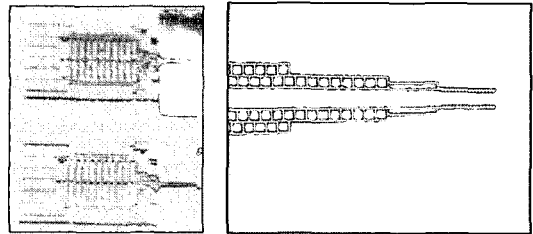
〈그림 9〉 In-plane 압전형 마이크로 그리퍼



〈그림 10〉 In-plane 압전형 마이크로 그리퍼를 사용한 금속 마이크로 비드(직경 200 $\mu$ m) 그리핑 장면

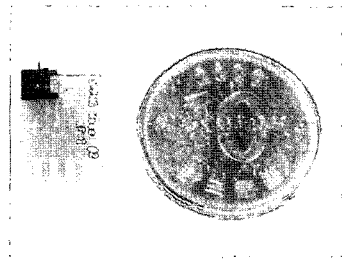
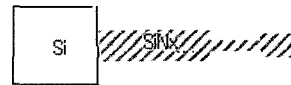
#### (나) In-plane 압전형 마이크로 그리퍼

그림 11은 정전형 In-plane 마이크로 그리퍼로 그리퍼 내부에 빗(Comb) 구조를 볼 수 있다. 빗 구조에서 발생한 정전기력은 힌지 구조를 통해 마이크로 그리퍼의 양 턱을 여닫는 힘으로 변환된다. 개발된 마이크로 그리퍼는 전압을 15V 인가하였을 때 최대 63  $\mu$ m의 변위를 얻을 수 있다.



〈그림 11〉 In-plane 압전형 마이크로 그리퍼

#### Top View



〈그림 12〉 Out-of-plane 캔틸레버형 마이크로 그리퍼

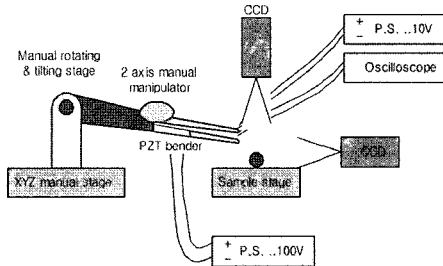
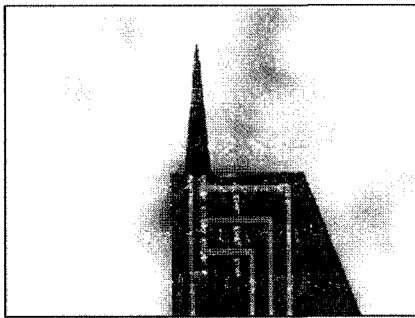
#### (다) Out-of-plane 캔틸레버형 마이크로 그리퍼

그림 12는 캔틸레버형 Out-of-plane 마이크로 그리퍼이다. 실리콘으로 그림에 표시된 것과 같은 캔틸레버를 두 쌍 제작하고 두 캔틸레버를 서로 마주보게 조립하여 제작한다. 전압을 인가하

면 캔틸레버가 서로 마주보고 휘게 되어 물체를 그리평하게 된다. 인가전압 7V에서 약 100  $\mu\text{m}$  정도의 변위를 가진다. 그림 12의 아래 그림은 Out-of-plane 캔틸레버형 마이크로 그리퍼를 패키징하여 전극을 부착한 것이다.

(라) Out-of-plane 힘 센서 내장 마이크로 그리퍼

그림 13은 압전 벤더로 동작하는 힘 센서 내장 마이크로 그리퍼이다. 그리퍼의 동작은 압전 벤더에 전압을 가함으로써 이루어지고 압전 벤더 끝단에 부착되어 있는 핑거팁은 Si로 제작되며 압저항 센서가 내장 되어 있다. 그리퍼의 파괴력은 압저항의 변화로부터 측정 가능하다.

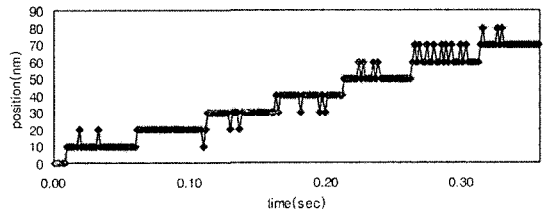


<그림 13> Out-of-plane 힘센서 내장 마이크로 그리퍼

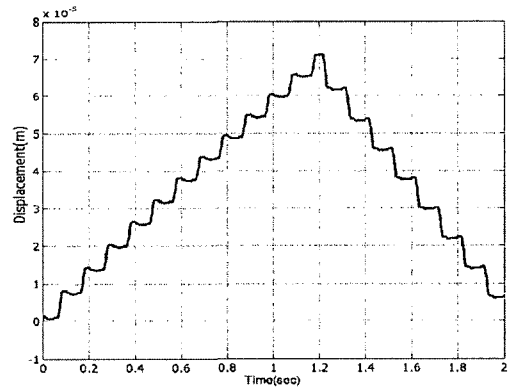
III. 실험

그림 14는 인치웸 타입인 P-type 1의 분해능 시험으로 사용 계측기의 한계인 10nm를 얻었다.

그림 15는 P-type 2의 분해능으로 약 50nm 정도이다.

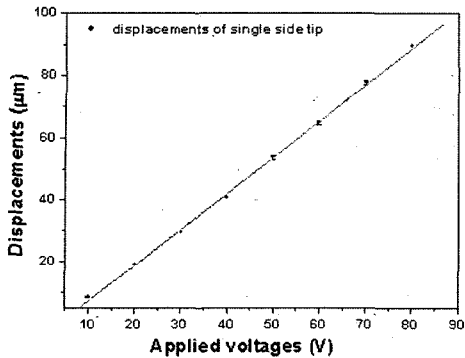


<그림 14> 선형 P-type 1의 분해능



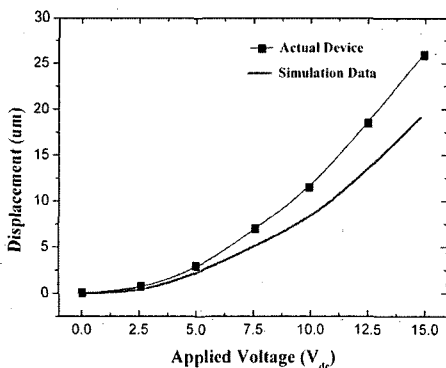
<그림 15> 선형 P-type 2의 분해능

다음은 입력 전압에 대한 그리퍼의 변위를 측정하는 것이다. 측정은 입력 전압으로 정전압 장치의 출력을 인가하고, 바이브로미터(Vibrometer)를 사용하여 변위를 측정하는 방법을 사용하였다. 그림 16은 In-plane 압전형 액추에이터에 전압을 인가하였을 때 그리퍼의 변위를 그린 것으로 선형관계가 있음을 알 수 있다.



〈그림 16〉 In-plane 압전형 마이크로 그리퍼의 입력 전압과 변위의 관계

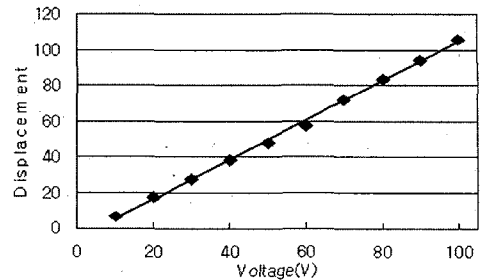
그림 17은 In-plane 정전형 마이크로 그리퍼의 변위 특성으로 입출력 특성이 비선형적이지만 시뮬레이션과 실제 실험 결과가 잘 부합하므로 예측이 가능하다.



〈그림 17〉 In-plane 정전형 마이크로 그리퍼의 입력 전압과 변위의 관계

그림 18은 Out-of-plane 힘 센서 내장 마이크로 그리퍼의 변위 특성으로 마찬가지로 선형 특성을 보인다.

그림 19는 마이크로 기어의 그리핑 테스트 장면으로 중앙에 위치한 것이 마이크로 기어이며,



〈그림 18〉 Out-of-plane 힘 센서 내장 마이크로 그리퍼의 입력 전압과 변위의 관계



〈그림 19〉 마이크로 기어 그리핑 테스트

그리퍼로 포획하여 정해진 위치에 있는 기어 축에 삽입하는 장면이다.

## IV. 결론

본 연구에서는 바이오 응용이나, 마이크로 시스템 제작과 같은 고정밀, 미세 작업을 위한 초정밀 매니플레이터와 마이크로 그리퍼를 제작하고 그 특성을 평가하였다. 매니플레이터는 압전 소자를 사용하여 모듈 형태로 2개의 선형 구동기와 2개의 회전 구동기를 제작하였으며 이들의 조합에 의해 로봇 매니플레이터를 제작할 수 있도록 하였다. 마이크로 그리퍼는 작업에 적합한 형상을 쉽게 제작할 수 있도록 MEMS 기술을 사용하여 2종의 In-plane형 마이크로 그리퍼, 2종의 Out-of-plane형 마이크로 그리퍼를 개발 하였다.

개발된 마이크로 그리퍼는 7~100V 정도의 저전압에서 수십  $\mu\text{m}$  정도의 변위를 가진다. 개발된 로봇 시스템은 미세 작업에 충분한 정밀도를 가지며, 바이오 응용을 포함한 많은 미세 작업 분야에서 로봇의 활용이 증가하기를 기대한다.

micromanipulation tasks”, J. M. Microeng. pp 14, 1998.

저자소개

참고문헌

[1] R. Andrew Russel, “Development of a robotic manipulator for micro-assembly operations”, Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp471-474, 1993.

[2] Alain Codourey, Miguel Rodriguez, Ion Pappas, “A task-oriented Teleoperation System for Assembly in the Microworld”, ICRA 97, pp235-240, 1997.

[3] Fumihito Arai, Akihiko Ichikawa, Hisataka Maruyama, Kouhei Motoo and Toshio Fukuda : Manipulation of Single Cell for Separation and Investigation, International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol.2 No.2, pp135-143, June 2004.

[4] IW-800 Series Inchworm Motor, Stages, And Accessories Operating Manual. Burleigh Instruments Inc 2000.

[5] Jeninifer W. L. Zhou and Wen J. Li, “MEMS fabricated ICPE grippers for aqueous applications”, Transducer, pp 556-559, 2003.

[6] Setae Kim, Sangjun Park and Dongil Cho, “Low-voltage, Large-displacement microgripper fabricated by the SBM technology and LSI isolation technology”, ISC, pp109-110, 2001.

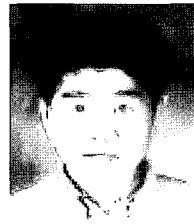
[7] Takayuki Shibata, Yasutaka Kitamoto and Eiji Makino, “Micromacing of diamond film for MEMS applications”, Journal of MEMS, Vol 9. pp 47-51, 2000.

[8] Carrozza M. C, Mencias A and Dario P, “The development of a LIGA-microfabricated gripper for



문 찬 우

1989년 서울대학교 제어계측공학과 학사  
 1991년 서울대학교 제어계측공학과 석사  
 2001년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사  
 2002년-현 재 전자부품연구원  
 주관심분야 지능로봇, 초정밀 메카트로닉스



김 봉 석

2003년 한국항공대학교 항공기계공학과 학사  
 2003년-2005년 한국과학기술연구원 지능로봇센터  
 2005년 고려대학교 기계공학과 석사졸업  
 2005년-현 재 전자부품연구원  
 주관심분야 지능로봇, 매니플레이터 compliance control



박 준 식

1992년 한양대학교 재료공학과 학사  
 1994년 한양대학교 재료공학과 석사  
 2004년 한양대학교 재료공학과 박사  
 1994년-현 재 전자부품연구원 수석연구원  
 주관심분야 마이크로 나노 센서 및 구동기