

# Micro Mechatronics 관련 기술의 최근 연구동향



김 일 환

(KIMM 자동화연구부)

- '78-'82 서울대학교 공과대학 제어계측과(학사)
- '85-'88 서울대학교 공과대학 제어계측과(석사)
- '89-'93 일본 東北大學 기계공학과(박사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



정 광 조

(KIMM 자동화연구부)

- '73-'77 연세대학교 공과대학 전기공학과(학사)
- '81-'83 연세대학교 공과대학 전기공학과(석사)
- '91-'94 경남대학교 전기공학과(박사)
- '79-'83 한국과학기술원 연구원
- '83-현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서 론

Micro Mechatronics란, 최근의 발달된 IC 제조 기술을 이용하여 마이크로 세계에서 기계와 전자를 결합하여 Mechatronics를 실현하는 기술이다. 이러한 Micro Mechatronics 기술은 다음과 같은 응용분야가 기대되고 있다.

- (1) 세포, DNA와 같은 생체 고분자를 다루는 의용생체 분야
- (2) 자기 헤드 및 프린터 헤드 등의 정보기기 분야
- (3) 광 fiber, 광 간섭계 등의 미소 광학 분야
- (4) 마이크로 밸브, 마이크로 펌프 등의 유체 제어 분야
- (5) 진공 manipulator 및 초정밀 위치 결정기구를 이용한 VLSI 제조기술 분야
- (6) 차세대 로봇트 즉, 마이크로 로봇트 분야.

한편, Mechatronics 분야에 있어서 Actuator에 관한 연구는, 1970 년대에 NC 공작기계 및 로봇트 구동용의 서보 모터와 자기 디스크 기억장치 헤드용 Linear DC 모터 개발 등 자체를 이용한 전동 모터의 연구 개발이 진행되어 왔으나, Micro Mechatronics 분야에 있어서는 기존의 Actuator 로서는 목표의 기능을 만족 시키는 것이 거의 불가능하여 새로운 Actuator의 연구 개발의 중요성에 대한 인식이 크게 높아지고 있다. 최근의 새로운 구동 원리의 Actuator의 대표적인 예는 표 1과 같다.

본 고에서는, Micro Mechatronics의 새로운 Actuator로서, 변위 분해능이 높고 소형 경량이며 전자 noise를 내지 않는 미소 변위 제어용 소자로서

표 1. Micro Actuator 시작 예

분 류	개발자	크 기	발생력	변위	재 료
정전모터	UC 버클리	60~120 $\mu$ m	수PNm	회전	다결정Si
〃	MIT	100 $\mu$ m	10PNm	〃	〃
정전Linear 모터	동경대	10mm $\times$ 50 $\mu$ m	4gf	15 $\mu$ m	단결정Si
Piezo Bimorph	스탠포드대	8 $\mu$ m $\times$ 0.2 $\times$ 1mm	23 $\mu$ N	7 $\mu$ m	ZnO
초전동 Linear 모터	동경대	5mm	1mgf	3mm	단결정Si

가장 적합한 압전 Actuator(Piezo electronic Actuator) 및 소형화에 적합하며 정전력을 이용하는 정전 Actuator(Electro-static Actuator)에 관한 최근의 연구 개발 동향에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 압전 Actuator의 최근의 연구

최근, 반도체 제조장치 및 표면 분석장치 등에 있어서 마이크론 단위 이하의 고 분해능 위치 결정 정도가 요구되어, 변위 분해능이 높고, 소형 경량인 압전 Actuator에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 압전 Actuator는 압전 세라믹의 역압전 효과를 이용한 Actuator로서, 다음과 같은 특징을 가진다.

- (1) 최대 strain은  $1\sim 2 \times 10^{-3}$  정도 즉, 10mm의 길이로 약 10~20 $\mu$ m 신축가능
- (2) 탄성률이 강의 약 0.5 정도로 높음
- (3) 소자 자체가 작아, 제어를 필요로 하는 기구가 가까이 위치 가능하여 backlash 및 고유 진동의 저하 등을 막을 수 있음
- (4) 전압을 인가하는 것만으로 제어가 가능하여 취급이 용이함
- (5) 전자 noise를 내지 않음
- (6) 습도의 영향을 받기 쉬움
- (7) 인장 부하에 약함.

### 2.1 압전 Actuator의 분류

주로 사용되고 있는 대표적인 압전 Actuator로서,

- (1) 적층형
- (2) Bimorph 형
- (3) Inchworm 형

### (4) 초음파 모터

등이 개발되어 있다. 먼저, 적층형은, 그림 1에 나타낸 것과 같이, 변위는 비교적 작으나 큰 힘을 필요로 하는 경우 즉, STM의 미소 이동장치, 초정밀 가공기 등에 이용되고 있다. 반면, Bimorph형은(그림 2) 힘은 비교적 작으나, 큰 변위가 필요한 경우 즉, 카메라의 셔터, VTR의 헤드 등에 실용화 되고 있다. 이상의 두가지 Actuator는 구조가 간단하나, 압전 효과에 의한 변위를 직접 이용하고 있으므로 변위가 작아, 응용 범위가 크지는 않았다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 작은 변위를 반복함으로써 큰 변위를 얻는 방식이 개발되었다. 특히, 초음파 모터는 구조가 간단하고, 고속 동작이 가능하여 앞으로 발전이 기대되는 Actuator의 하나이다.

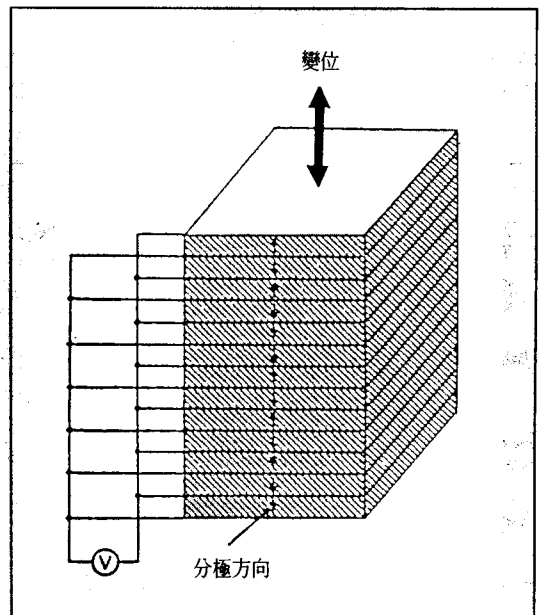


그림 1. 적층형 압전 Actuator

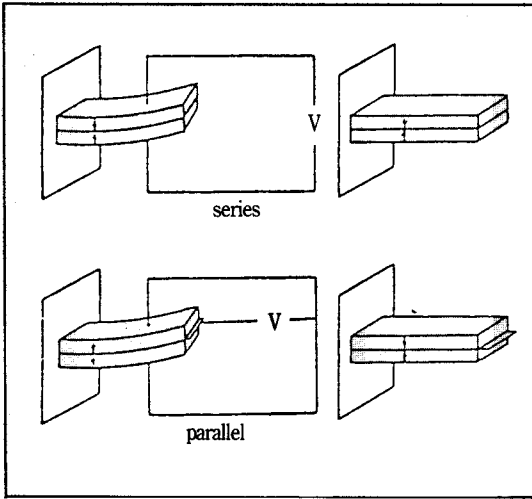


그림 2. Bimorph 형 압전 Actuator

## 2.2 주요 연구 예

### 2.2.1 초정밀 이송기구

그림 3은, 반도체 집적 회로의 Lithography 장치용으로, 위치 결정의 고속화 및 고정도화를 목적으로 개발된 초정밀 X-Y 테이블이다.<sup>[8]</sup> 이 테이블은, 120mm×120mm의 가동 범위에 있어서 5 μm 정도의 coarse 위치 결정을 고속으로 행하는 coarse 테이블과, 그 위에 적재되어 coarse 테이블의 위치 오차와 yawing을 보정하기 위해 직선 이동

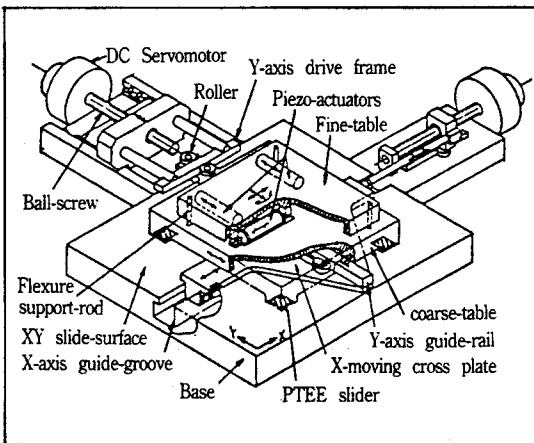


그림 3. 초정밀 이송기구

±8μm 및 회전량 180μ rad의 가동 범위를 가진 fine 테이블로 구성되어 있다. fine 테이블의 위치는, 레이저 간접계에 의해 검출되어, 3개의 압전 Actuator에 feedback되어, 보정된다. 이와 같이 하여, 위치 결정 정도 ±0.05μm, yawing ±1μ rad이하의 고정도와, 10mm이동에 요구되는 이동시간20ms 이하라는 고속 성능을 얻을 수 있다.

### 2.2.2 Inchworm 방식 정밀 운동기구

그림 4는, 압전 Actuator를 사용한, 광범위의 회전이 가능하고  $4.8 \times 10^{-7}$  rad 이하의 극히 미소한 회전 위치 결정이 가능한 고정도 회전기구이다<sup>[9]</sup>. 전체 크기는 125mm×125mm×25mm로, 최대 90 deg 회전 가능하다. 2개의 반원판은, 중앙의 bearing 지지부와 탄성판으로 연결하여 하나의 회전원판으로 되어 있다. 반원판의 사이에 있는 압전소자가 clamp 용 Actuator이다. 동작원리는, 그림 5에 나타낸것 같이, 이들 압전 소자의 신축에 의해 반원판과 중앙의 bearing 지지부가 회전한다. 이 기구의 회전 정도는  $1.67 \times 10^{-7}$  rad이다. 또한, 회전 토오크는 3.5Kg-cm 정도가 얻어진다.

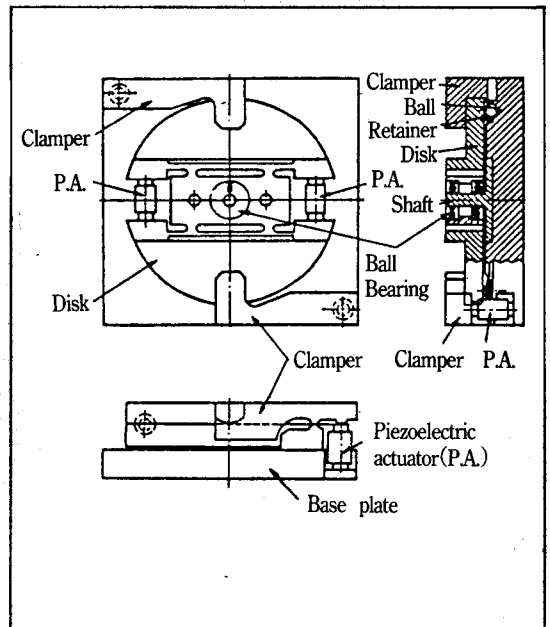


그림 4. Inchworm 기구의 구성

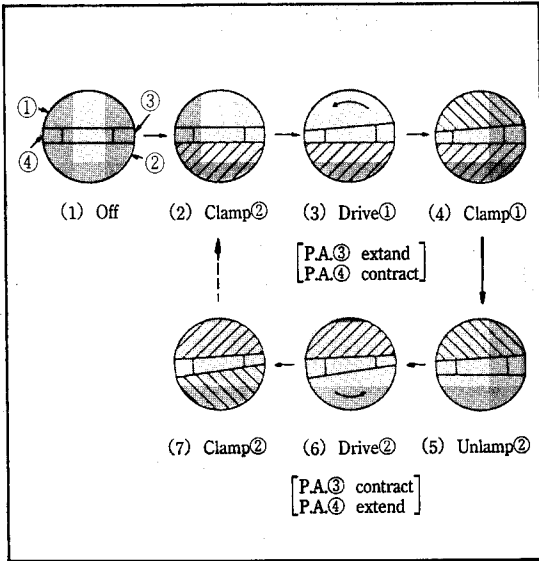


그림 5. Inchworm 기구의 동작원리

### 2.2.3 Impact 구동에 의한 정밀 위치 결정 기구

평면상에 놓인 물체의 한쪽에 가벼운 충격력을 가하는 것에 의해 미소 거리의 이동이 가능하다는 것은 경험적으로 알고 있다. 이러한 현상에 착안하여, 압전 소자의 급속 변형을 이용한, 종래의 서보 기구와 전혀 다른 원리에 의한 초정밀 위치 결정기구가 개발되어, nano meter 정도의 분해능을 가진 미소 이동기구를 실현하고 있다<sup>[5],[6]</sup>. 그림 6에서, 이동체(Moved part)에 압전소자와 관성체(Main weight)를 부착하여, V홈 base 위에 놓는다. 이 이동체가 그림 7에 보이는 원리와 같이, 압전 소자의 급속 변형을 반복함으로써 미소 이동한다. 앞에서 보인 Inchworm 방식과 다른 점은, clamp 동작이 없고 대신 이동체와 base 사이의 마찰력을 이용하고 있는 점이다. 이 기구의 정도는 약 4nm step의 아주 미소한 이동 변위를 얻을 수 있고, 이동 속도는 약 1.3mm/s 정도이나, 상부 관성체(sub weight)의 압전소자를 급속 변형시켜, base와의 마찰력을 제어함으로써 이동속도를 4 mm/s까지 상승 가능하다. 이와 같은 미소 이동 기구의 응용 분야로는 세포 조작용 마이크로 로봇 및 초미소 방전 가공기 등이 기대되고 있다.

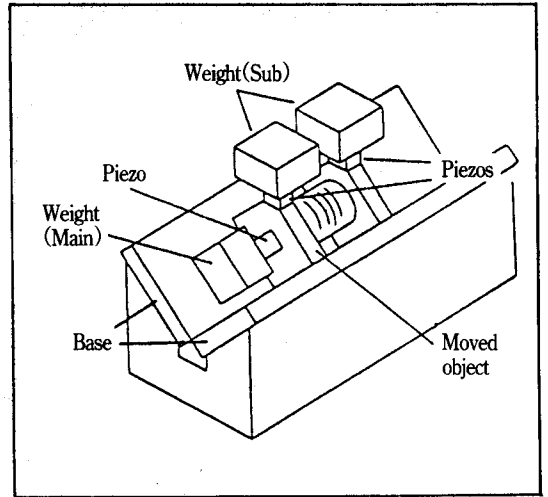


그림 6. Impact 구동기구

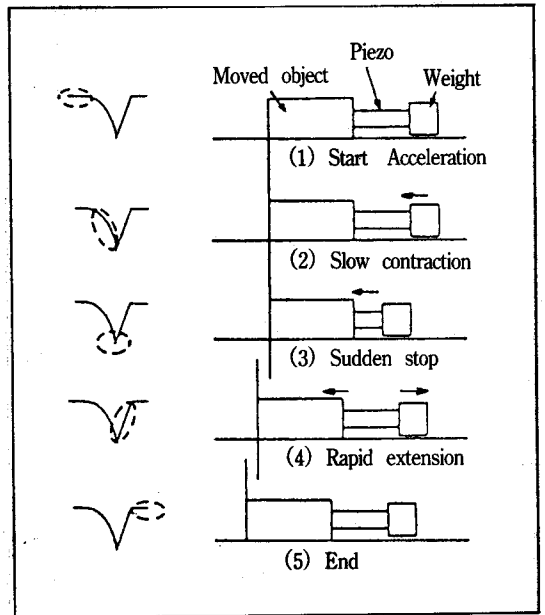


그림 7. Impact 구동의 동작원리

### 2.2.4 초음파 모터

초음파 모터는 압전 재료를 이용한 대표적인 Actuator로서, 그 원리적인 아이디어는 이미 오래 전에 소련에서 여러 형태가 제안 되었으나, 최근 연구 개발에 의해 1980년 초에 안정된 출력이 나오는 초음파 모터가 발표되었고, 1982년에 진행과 방식의 회전형 초음파 모터가 고안되어 카

메라 등에 실용화 되고 있다. 초음파 모터의 주요 특징은,

- (1) 저속, 고 토크이므로 direct drive가 가능함
- (2) 속도 가변이 용이하여 가변 범위가 넓음
- (3) 응답성이 뛰어나
- (4) 비자성 재료로 구성이 가능함

등이 있다.

그림 8은, Liear 형의 초음파 모터에 의해 구동되는 X stage를 나타낸다<sup>[9]</sup>. 초음파 모터의 다리 부분은, 5×5mm의 알루미늄으로, 양 어깨쪽에 압전 소자를 접착시켜, 90deg 위상이 다른 전압을 인가하면, 선단이 타원운동을 발생하고, 이 선단 부분과 접촉하고 있는 stage가 마찰력에 의해 구동된다. 86~105 kHz로 구동하였을때 출력은 600gf 정도가 얻어진다. 이와 같이 마찰력을 이용하는 방식은 수명이 짧은 결점이 있어, 새로이 고안된 기어 구동 방식의 압전 모터도 개발되어 있다<sup>[10]</sup>.

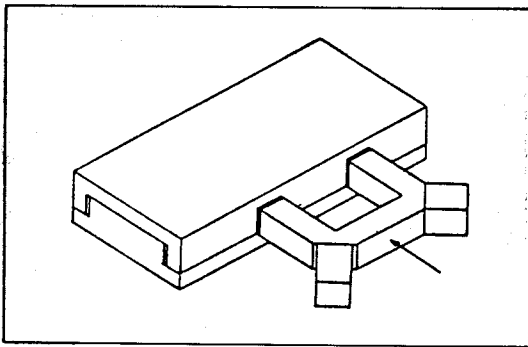


그림 8. 초음파 Linear Actuator

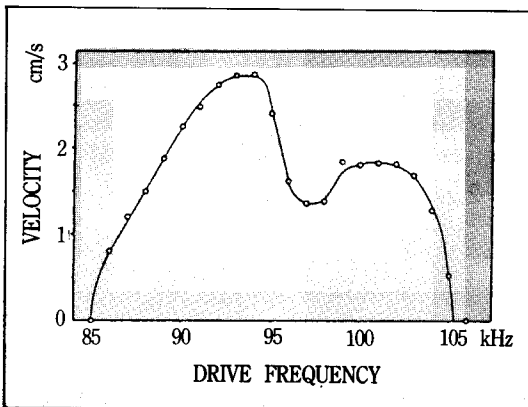


그림 9. X stage의 이송속도

### 3. 정전 Actuator의 최근의 연구

전하 간에 작용하는 Coulomb력을 이용하여 구동력을 발생하는 정전 Actuator는, 일반적인 Actuator에 비해 구조가 간단하여 소형화가 가능하다. 또한, 소형화한 경우에는 전자력을 이용하는 것보다 발생력 및 효율면에서 유리하다고 알려져 있다. 이러한 정전 Actuator에 관한 연구는 일본 동경대학 Higuchi 교수 등에 의해 활발히 연구되어 프린터 및 복사기의 종이 이송 기구 등에 실용화가 기대된다<sup>[11]~[14]</sup>.

그림 10은, 정전 Actuator의 기본구조와 동작 원리를 나타낸다. 고정자와 이동자로 불리는 2장의 필름이 겹쳐져 있으며, 고정자는 절연체 내에 3상의 띠전극을 가진다. 한편, 이동자는 절연체와 고정항체로 구성된다. 동작 원리는, 그림 (1)과 같이 고정자에 전압을 인가한다. 이때 저항체 내에 전하가 이동하여 그림 (2)와 같이 대전 된다. 이상 상태에서, 인가 전압을 그림 (3)으로 전환시킨다. 그러면, 고정자 전극의 전하는 순간적으로 바뀌나, 이동자의 전하는 저항 때문에 잠시동안 원래의 상태로 머무른다. 그러면, 그림 (3)의 전

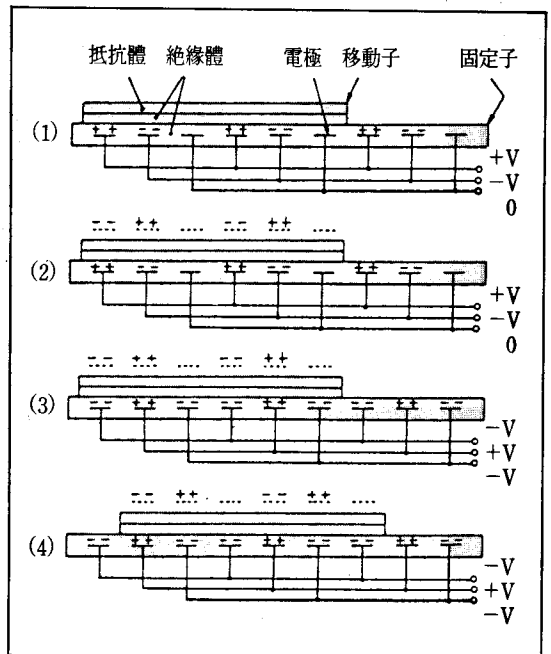


그림 10. 정전 Actuator의 기본구조와 동작원리

극과 이동자의 전하간에 상호 작용으로 이동자에 수직 방향의 반발력과 오른쪽으로 구동력이 발생하여, 그림 (4)와 같이 이동자는 전극 1pitch 정도 이동한다. 이러한 조작을 반복하여 이동자를 움직인다. 이와 같은 방식의 정전 Actuator는 다음과 같은 특징이 있다.

- (1) 이동자에 전극이 없으므로, 고정자와 이동자 간의 위치 조정이 불필요하여 전극 pitch가 미세한 경우에도 제작 조립이 용이함
- (2) 구동시에는 부상력이 발생하므로 마찰이

적고, bearing 등이 불필요하다. 또한, 정지 시에는 역으로 흡인력이 작용하므로, 마찰보다 큰 유지력이 얻어짐

- (3) 구조가 간단하므로, 얇고 부드러운 필름 base로 제작 가능 하므로, 용이하게 대 면 적화가 가능함.

그림 11은, 실제로 제작된 정전 Actuator의 개략도이다. 또한, 그림 12는 구동전압과 발생력의 관계를 나타낸다. 표 2는 압전 Actuator와의 상대 비교를 나타낸다. 압전 Actuator는, 동작 원리에 의한 형상 및 특성의 한계를 지니고 있어 특히, Inchworm 형은 소형화가 가장 어려운 구조로, 형상 자체가 Micro 라기 보다는 Micro한 동작을 실현 가능하다. 그러나, 압전 Actuator는 회전형 또는 직선형의 Actuator를 간단히 만들수 있어, 정전 Actuator 보다 이동 속도는 작으나, 발생력이 큰 소형 Actuator로서 기대된다.

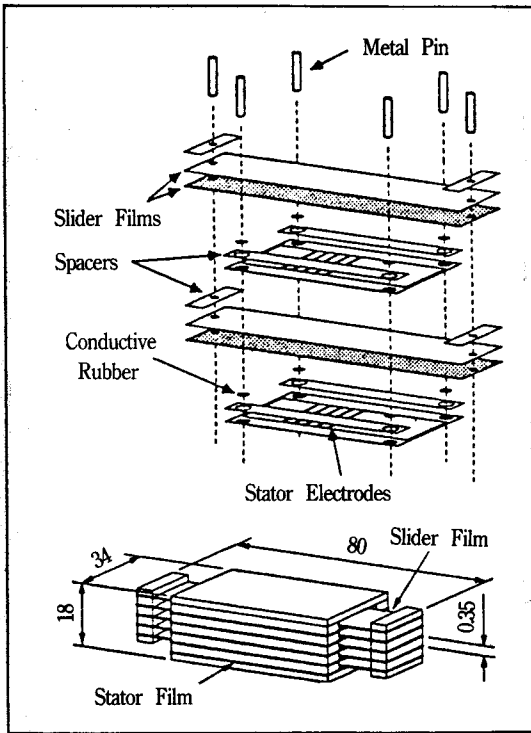


그림 11. 정전 Actuator

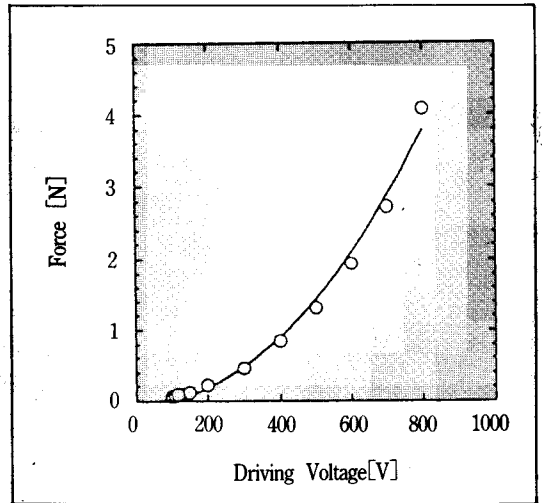


그림 12. 구동전압과 발생력의 관계

표 2. 정전 Actuator와 압전 Actuator의 상대 비교

	정전 Actuator	압전 Actuator			
		적층형	Bimorph	Inchworm	초음파 모터
크기	수 10 $\mu$ m	수 mm	수 10 $\mu$ m	수 mm	수 100 $\mu$ m
응답속도	대	대	대	소	중
이동속도	대	대	대	소	중
이동거리	대	소	소	대	대
발생력	소	대	중	대	중
IC 화	용이	곤란	약간 곤란	곤란	약간 곤란

4. Micro Actuator 기술 개발 과제

새로운 방식의 Micro Actuator의 기술 개발 과제로서는 다음과 같다.

(1) 재료기술

압전 Actuator에서는, 전기-기계 변환 재료로서의 압전 재료가 그 특성을 결정한다. 고로, 실리콘 단결정, glass, 금속 등의 위에 직접 압전 박막을 형성하기 위한 성막 기술로, 레이저를 이용하는 연구도 보고되고 있다.

(2) 진동 해석 기술

압전 진동자의 최적 설계를 위해, 탄성 진동론 및 유한요소법 등의 이론적 진동해석과 해석 결과의 검증 방법으로 수 100nm 이하의 미소 진동계측 기술 등의 확립이 필요하다.

(3) 정밀 가공 기술

탄성진동 및 변위의 축소화에 따른 가공정도의 향상을 위해, 기계가공 뿐만 아니라, 에칭 및 정밀 방전 가공 등의 가공법을 채용하지 않으면 안된다. 이 밖에도, 형상이 작게 되었을 때의 마찰 및 윤활의 이론적 해석, 압전 재료 특유의 재료 물성을 고려한 제어기술 등의 개발이 필요할 것이다.

5. 결 론

최근의 Micro Mechatronics 기술에 있어서 새로운 방식의 Actuator 기술로서, 압전 Actuator 및 정전 Actuator의 기술은 차세대 로봇, 반도체 제조, 의용 생체 분야 및 미소 광학 분야 등에 응용이 기대된다.

참 고 문 헌

[1] Higuchi 외 1인, "필립을 이용한 정전 Actuator," 일본 기계학회 로보틱스 메카트로닉스 강연회, pp. 48-49, 1989.

[2] Higuchi 외 1인, "필립을 이용한 정전 Actuator의 적층화," 제7회 일본 로보트학회 강연회, pp. 589-590, 1989.

[3] Higuchi 외 2인, "정전 Actuator의 특성 평가," 일본 정밀공학회 강연회 논문집, pp. 481-482, 1993.

[4] Higuchi 외 1인, "정전 Actuator의 종이 이송에의 응용" 일본 정밀공학회 강연회 논문집, pp. 703-704, 1990.

[5] Higuchi 외 2인, "압전소자의 급속변형을 이용한 초정밀 위치 결정기구," 일본 정밀공학회지, Vol. 54, No. 11, pp. 2107-2111, 1988.

[6] Higuchi 외 4인, "마찰력 제어에 의한 Impact 구동기구의 고속화, 일본 정밀공학회지, Vol. 58, No. 11, pp. 1327-1332, 1992.

[7] Fujita, "Micro Actuator와 Micro Mechanical part," 일본 전기학회 논문집 D, Vol. 108, No. 3, pp. 214-217, 1988.

[8] Moriyama 외 2인, "압전 Actuator 미동기구를 갖춘 초정밀 XY 이동대," 일본정밀기계, Vol. 50, No. 4, pp. 718-723, 1984.

[9] Hayashi, "압전 Actuator의 최근의 응용," 일본 제4회 전자력 관련 Dynamic 심포지엄 강연회 논문집, pp. 57-62, 1992.

[10] Hayashi 외 2인, "압전 사이크로이드형 모터의 연구," 일본 정밀공학회지, Vol. 57, No. 8, pp. 1461-1467, 1991.