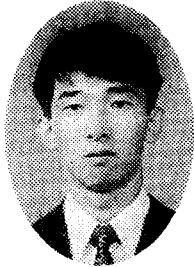


전왜 액츄에이터의 특성 및 기술동향



이수호
영월공업전문대학
전기과 전임강사.



류주현
세명대학교 전기공학과 부교수

표 1. 각종 액츄에이터의 특성

Table 1. Characteristics of various kinds actuator.

Driving Source	Name	Displacement Range	Displacement Accuracy	Force	Response Time
Air Press	Airpress Motor	rotation	-	5kgm	10sec
	Airpress Cylinder	100mm	100 μ m	6kg/mm ²	10sec
Oil Press	Oilpress Motor	rotation	-	10kgm	1sec
	Oilpress Cylinder	1000mm	100 μ m	10kg/mm ²	1sec
Electricity	AC Servo Motor	rotation	-	3kgm	100msec
	DC Servo Motor	rotation	-	20kgm	10msec
	Step Motor	1000mm	10 μ m	30kgm	1msec
	Ceramic Actuator	0.1mm	0.01 μ m	3kg/mm ²	0.1msec

2. 전왜(electrostrictive)현상과 전왜 세라믹진동자및 재료

다. 종래에 사용되고 있는 변위소자로서는 전자모터의 회전을 직선적인 동작으로 변환시키는 형과 전자코일로 용수철을 조합한 전자구동방식(electromagnetic drive)이 있지만 소비전력이 많고, 발열 및 전자기적 잡음이 발생하여 마이크로 범위의 정밀도를 얻기 어려우며, 발생력과 응답속도도 낮은 단점을 가지고 있다. 그러나 세라믹 액츄에이터는 전왜 구동형이기 때문에 자체의 발생이 없어 주변기기 및 장치의 자기적 영향

이 없으며, 재료의 특성으로 인하여 서브 마이크로 범위의 정밀도를 쉽게 얻을 수 있으며, 소형경량화가 가능하다. 또한 구동에 요구되는 소비전력이 전자식의 1/10 이하이고 응답속도가 10 μ s로 빠르며, 발생력도 400kgf/cm²로 큰 장점외에도 센서 기능을 겸비하고 있기 때문에 최근에 세라믹 액츄에이터가 각광을 받고 있다⁴⁻⁵⁾. 표 1에 종래의 액츄에이터와 세라믹 액츄에이터의 특성을 나타내었다.

본고에서는 전왜액츄에이(electrostrictive actuator)와 압전 액츄에이터(piezoelectric actuator)에

1. 서론

최근 산업에서 생산되는 제품들이 소형화, 경량화가 되면서 미세 범위의 위치를 조정하는 새로운 변위소자의 필요성이 증가하고 있다¹⁻³⁾. 특히 레이저 및 카메라 등에 사용되는 광학기기의 가공정도와 반도체 chip 가공에 있어서는 0.1 μ m의 정확도가 요구되고 있

대한 정확한 개념을 파악하기 위해 壓電歪와 전왜(electrostrictive)현상론의 차이점을 기술하여 명하고자 한다.

2.1 전계유기왜형현상

전계유기왜형은 전계(또는 분극)에 의해 유기되는 원자 또는 이온의 평형위치로부터의 이동(shift)최도이지만 필수적으로 이동의 크기를 표현하지 않는다.

그림 1은 壓電歪와 전왜(electrostrictive)의 기원을 모식적으로 표시하고 있다. 대칭성을 갖지 않는 압전체(a)에 있어서는 어

떤 이온에 대하여 좌우의 이온은 등가가 아니고, 이온대 포텐셜의 조화항은 다르게 된다. 그것에 의해 인가전계에 비례한 왜형이 생기게 된다. 중심대칭(b)을 갖는 경우에는 어떤 이온의 대하여 좌우의 이온대 포텐셜의 조화항은 같고, 이온이동의 크기가 압전체와 같은 정도 일지라도 전계를 인가하면 거의 왜형이 생기지 않는다. 그러나 비조화항때문에 좌우이온의 이동의 차가 생긴다. 그것에 의해 인가전계의 방향으로 전계의 자승에 비례한 왜형이 생긴다. 전왜정수 Q(혹은 M)은 분극P(혹은 전계

E)와 왜형 χ 와 $\chi = QP^2$ (혹은 ME^2)에 의해 정의 된다⁶⁾.

2.2 전왜진동자^{7,8)}

전왜 세라믹스(electrostrictive ceramics)를 사용한 전왜 진동자는 압전 진동자와는 달리 고전계의 분극처리를 하지 않고, DC bias 전계하에서 사용된진동자이다. 이 진동자는 바이어스 전계에 따라 공진주파수가 변화되므로 제반 전계유기 압전상의 변동을 초래하게 된다. 그림 2는 전왜 진동자를 위한 전송 측정회로이며

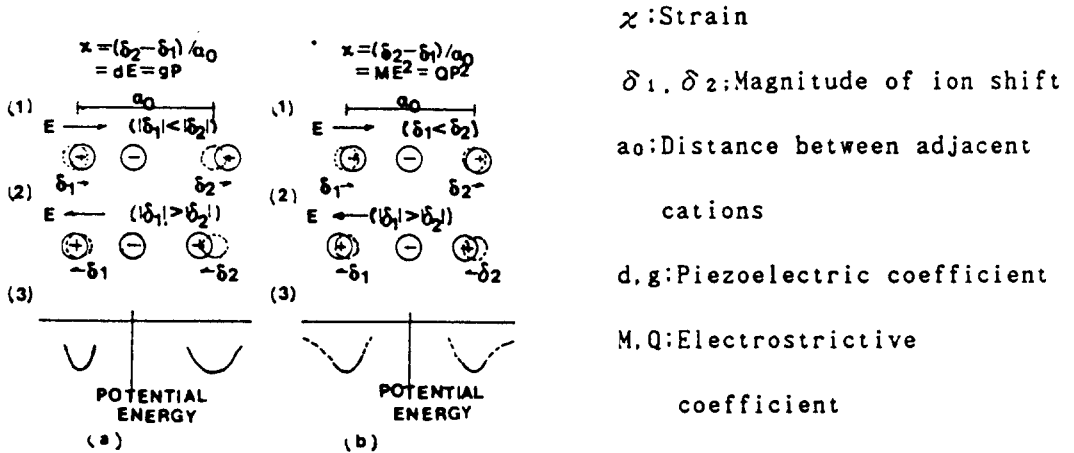


그림 1. 전계하에서의 이온이동

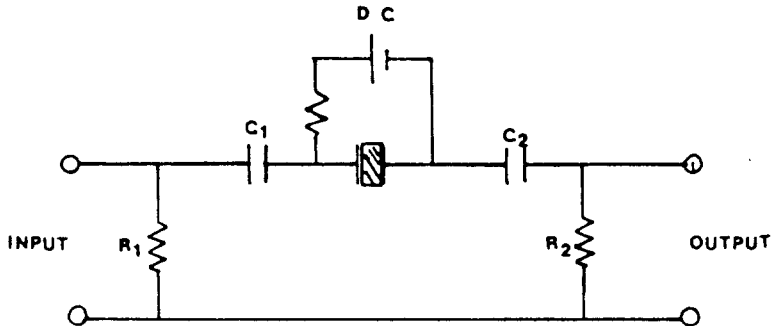


그림 2. 전왜 진동자를 위한 전송 측정회로

DC bias 전계에 따라 전왜 진동자에 유기 분극은 발생하게 하여, Network Analyzer 로 공진, 반공진 주파수를 측정하여 제반 전계 유기 압전 상수를 구할 수 있다. 따라서 압전 진동자가 고정된 공진 주파수를 갖고 있는 데 반하여 전왜진동자는 바이어스전계에 따라 공진주파수가 변하기 때문에 고전압센서 등의 특수목적의 진동자 및 필터로 활용이 가능하다.

2.3 세라믹 액츄에이터 재료

전계에 의해 유기되는 세라믹 변위에는 압전에 의한 변위와 전왜에 의한 변위가 있으며, 또한 큰 왜를 얻기 위해 중간적인 성질을 지닌 강유전 세라믹을 사용하는 경우도 있다. 압전재료와 전왜재료의 구분은 단지 전계에 따른 변위의 이력(hysteresis)현상에 의해 단순히 구분되고 있다. 즉, 항전계가 크고($E_c > 10\text{kV/cm}$) 선형구동영역이 넓은 물질을 압전재료, 항전계가 매우 작고, 2차곡선이 1차곡선과 근사되는 물질을 전왜재료라 분류하고 있다⁹⁻¹⁰. 물성론적으로 압전재료의 큐리(curie)온도가 실온보다 현저히 높으며, 전왜재료는 실온부근 또는 낮은 것이 많다. 따라서 압전재료는 온도안정성 및 응답특성이 우수하며, 전왜재료는 이력이 작아 선형성이 탁월한 각각의 장점을 지니고 있다. 전왜재료와 압전재료의 특징을 비교하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 전왜재료는 압전재료와 거의 같은 변위를 가지며, 이력을 가지지 않는다.
- (2) 압전재료는 분극처리를 필요로 하고, 그것에 의해 시효가 문제가 된다. 그러나 전왜재료는 분극처리가 필요하지 않다.

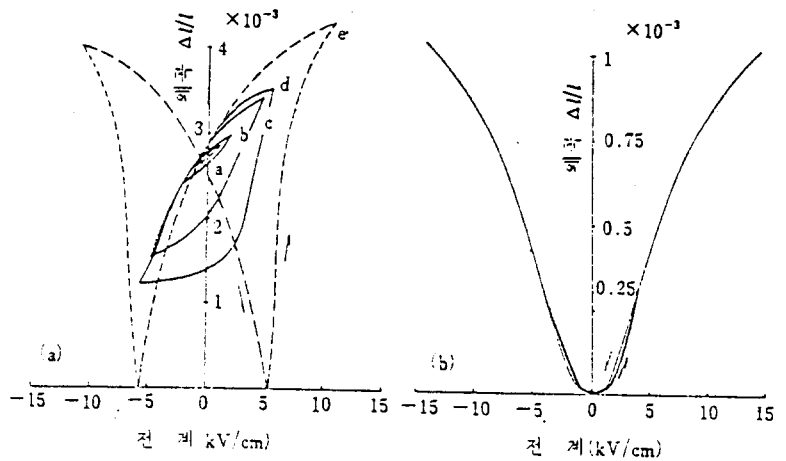


그림 3. 전계에 대한 세라믹의 변위 (a) 압전 세라믹 (b) 전왜 세라믹

- (3) 전왜재료는 전계에 대하여 비선형인 변위를 얻기 위하여 적당한 직류 바이어스 전계를 필요로 하는 경우도 있다.
- (4) 전왜재료는 고온에서의 유지와 대하중의 인가등 가혹한 사용조건에서의 열화에 강하다.
- (5) 온도특성은 압전재료가 전왜재료보다 우수하다.
- (6) 응답특성은 압전재료의 유전율이 작기 때문에 전왜재료보다 우수하다.

한편 대표적인 전왜재료 PMN ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$)계 세라믹스를 들 수 있으며, 이는 B-site 이온 ($\text{Mg}^{2+}, \text{Nb}^{5+}$) 조성의 불균일성에 의해 큐리온도가 부분적으로 다르게 되어 확산상전이(diffuse phase transition)현상을 일으킨다. 이때 약한 전계에 의해서도 강한 분극이 일어나며, 전계를 제거하면 그림 3과 같이 전류분극을 갖지 않는 우수한 조건을 발생시키고 있다.

3. 세라믹 액츄에이터의 디자인

전왜액츄에이터(electrostrictive actuator)를 정확히 알기 위해서는

압전액츄에이터(piezoelectric-actuator)와 비교가 필요하므로 압전액츄에이터의 간단한 설명과 더불어 전왜액츄에이터를 자세히 해설하고자 한다. 세라믹 액츄에이터의 변위량은 주로 소자의 기본적인 물성에 직접적으로 영향을 받고 있지만, 디자인에 의해 변위량을 상당히 개선시킬 수 있다.

3.1 전왜 유니몰프 액츄에이터 (electrostrictive unimorph actuator)^{7,11}

세라믹스의 전왜효과를 이용한 전왜 유니몰프는 분극할 필요가 없어 공정이 간단해진다. 그림 4는 이에 대한 구조로 탄성판에 전왜소자를 접합시킨 구조로 전계를 인가하면 세라믹 소자는 분극과 직각방향으로 수축을 발생하여 탄성판의 탄성을 이용하여 전체적으로 굴곡동작을 하게 된다.

그림 4 형태의 액츄에이터에 대한 deflection η 는 $\eta = (\frac{1}{2})aL^2$ 으로 된다.

여기서 a 는 유니몰프 액츄에이터의 곡률이며 다음식으로 근사된다.

$$\alpha = 2Y_c t_c M_{31} \frac{E^2}{Y_m [t_o^2 - (t_o - t_m)^2] + Y_c [(t_o + t_c)^2 - t_o^2]} \quad (1)$$

여기서, Y_m : 금속 속의 영률, Y_c : 세라믹스의 영률, t_c : 세라믹스의 두께, t_o : 중심평면과 결합표면 사이의 거리, t_m : 금속평면과 결합표면 사이의 거리, M_{31} : 전왜 계수 이다.

3.2 전왜 바이몰프 액츄에이터¹²⁾

그림5는 전왜 세라믹스를 사용한 전왜 바이몰프 구조를 나타내고 있고, 전왜세라믹스의 조성으로는 표1과 같다. 전왜세라믹스 plate는 $3 \times 12 \times 0.1 \text{ mm}$ 이다. 전계 bias에 의한 구동방법은 사용하였는데, +바이어스 전계가 한 세라믹 plate 바깥 전극에 인가되고 -바이어스 전계가 다른 세라믹 plate 바깥 전극에 인가 된다. 이러한 인가전계는 같은 크기로 인가한다. 구동 전계는 안쪽전극 즉 금속판에 인가 된다.

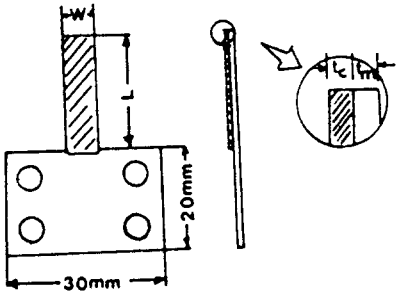
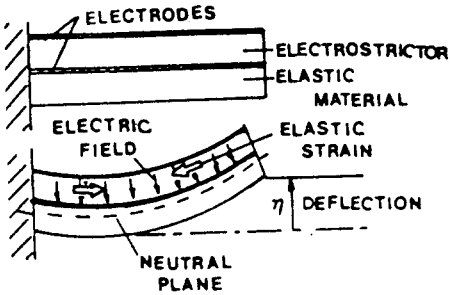


그림 4. 전왜 유니몰프의 구조

표 2. 샘플의 조성

Table 2. composition of samples

Sample No.	Composition	Relative dielectric constant
1	$x=0.02, y=0.30$	15500
2	0.03, 0.30	11400
3	0.06, 0.30	7200
4	0.08, 0.30	6200

그림 6, 7, 8은 액츄에이터에 관련된 성질 즉, 변위, bias 전계의 영향 hysteresis가 네 종류 샘플에 대해 측정되었는데 그 결과를 보이고 있다. 그림 6은 전계와 변위 사이의 관계를 보이고 있다. 최대 변위가 여러가지 구동전계에 대해 측정되었다. 변위는 대개 $2.0 \text{ kV}_p/\text{mm}$ 이내에서는 구동 전계에 비례하나, $2.0 \text{ kV}_p/\text{mm}$ 이상에서는 포화되는 경향을 보이고 있다. 그림 7은 변위와 bias 전계사이에서 관계를 보인다. 구동전계는 $1.0 \text{ kV}_p/\text{mm}$ 에서 고정되었다.

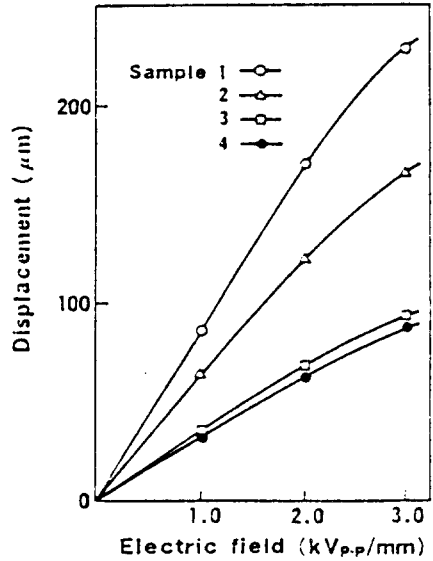


그림 6. 변위와 전계 사이의 관계

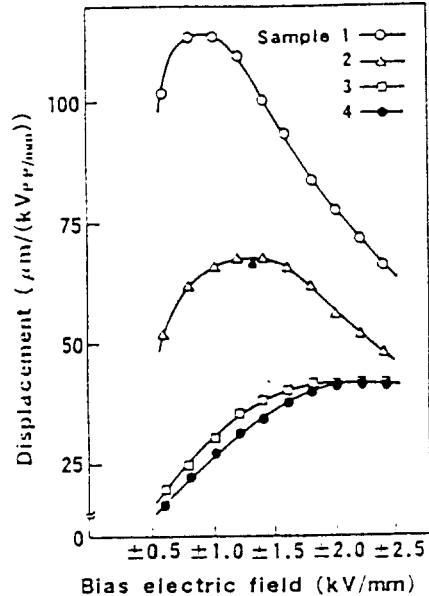


그림 7. 변위와 바이어스전계

최대 변위는 $\pm 0.5 \text{ kV/mm}$ 에서 $\pm 2.5 \text{ kV/mm}$ 까지 bias 전계를 변

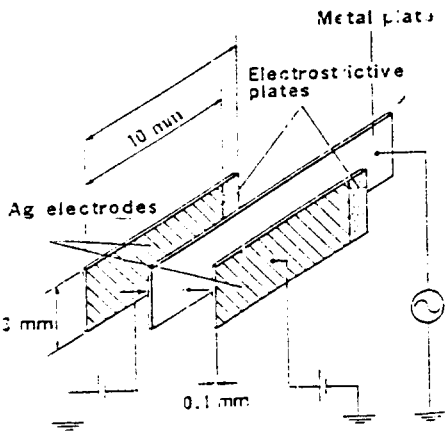


그림 5. 전왜 바이몰프의 구조

하여 측정되었다. bias전계가 변위에 영향을 미치며 최대값은 유전상수 증가에 따라 보다 낮은 bias 전계로 이동하는 경향이 있다. 그림 8은 변위곡선에 대한 히스테리시스특성이다. 변위에 대한 히스테리시스가 거의 나타나지 않는 전형적인 전왜 액추에이터의 특성을 보이고 있다.

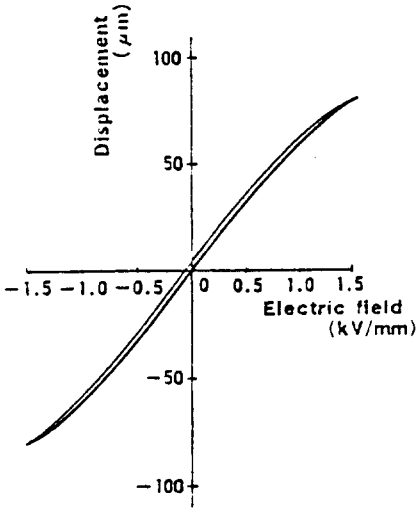


그림 8. 히스테리시스곡선

3.2 압전 바이몰프 액추에이터 (piezoelectric bimorph actuator)

바이몰프 변위소자는 기본적으로는 길이 방향으로 신축하는 압전판을 2매 접합시킨 구조로서 한쪽면이 신장할 때에 다른면이 축소하여 전체적으로 굴곡변위가 일어난다. 세라믹을 접착제로 접합시켜 비교적 간단한 제조공정과 변위 확대율이 크다는 장점이 있지만, 시료판의 굴곡모드를 이용하기 위해서는 응답 주파수가 낮고, 발생력이 작은 단점이 있다. 일반적으로 세라믹판 사이에 그림 9(a)와 같이 탄성판을 넣어 접착시킨 것이 많으며, 최근에는 변위

량을 증대시키기 위해서 카본화이바를 넣어 탄성적 이방성을 높여 변위감도를 증대시키는 연구가 진행되고 있다. 또한 응답 주파수를 높이기 위하여 그림 9(b)에서처럼 끝부분을 뾰족하게 한 구조도 연구되고 있다.

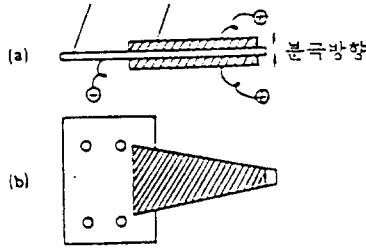


그림 9. 바이몰프 소자의 구조

3.3 압전 멀티몰프 액추에이터 (piezoelectric multimorph actuator)

멀티몰프 변위소자는 4매 이상의 세라믹판으로 구성시킨 굴곡변위형 액추에이터로 그림 4와 같은 구조를 지니고 있다. 층수를 N 으로 하면 발생변위 Δl 과 발생력 F 는 식 (1)과 (2)로 표시된다.

$$\Delta l = \frac{3}{2} N \left(\frac{l}{t} \right)^2 d_{31} V \quad (2)$$

$$F = \frac{3}{8} N \left(\frac{\omega t}{l} \right) Y_{11}^E d_{31} V \quad (3)$$

여기서 Y_{11}^E 는 young율을 나타낸다. 또한 N 은 항상 우수이며, 바이몰프의 경우는 N 이 2인 경우에 해당된다. 멀티몰프의 경우에는 두께 t 를 얇게 하면 변위는 증대하지만 힘은 역으로 감소한다. 그러나 $N \geq 4$ 인 멀티몰프 구성에서는 두께를 일정하게 유지시켜 층수를 증가하는 것이 가능하여 변위와 발생력을 동시에 증대시킬 수 있다.

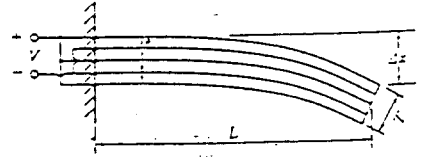


그림 10. 멀티몰프 소자의 구조

3.4 적층 액추에이터 (multilayer actuator)

이론적으로 작은 적층체로 큰 신장률을 얻기 위해서는 디스크를 얇게 제조해야 하지만, 디스크를 얇게하면 소자의 균열과 전기적 합선이 발생하여 제조가 어렵다. 따라서 대부분의 디스크는 0.25 mm이상의 두께를 가진다. 최근에는 얇은 압전체 그린 시트(green sheet)에 은전극을 형성시켜 적층하고 동시 소성을 하여 적층형 소자를 만들고 있다. 여러 소자를 한 면에 제조할 때에는 그린 시트를 적층 후 절단하여 이를 동시 소성한 후 각 소자 외부에 전극을 형성하거나 전극사이에 절연체를 형성하여 교대로 전압을 가한다. 내부 전극형성 방법은 그림 11(a)처럼 교대호 전극을 형성하였을 때 작업은 용이하나 전극이 끝나는 부분에 응력이 가해져 소자의 결합이 생기므로, 최근에는 그림 11(b)처럼 내부 전극 형성 후 전극 끝 부분에 한 층 건너 절연체를 형성시키고 반대쪽은 그 사이 전극을 형성시켜서 양쪽에 외부전극을 형성시키면 내외부 전극이 형성되어진다. 이러한 적층형은 압전체료를 사용한 압전액추에이터나 전왜체료를 사용한 전왜액추에이터 둘다 적용이 가능하다.

4. 세라믹 액추에이터의 응용

세라믹 변위소자는 인가된 직류 전압 방향으로 일정하게 발생되는

Displacement Used	Control Method	Application	Device
Rigid Displacement	Servo Drive	Optical Control	<ul style="list-style-type: none"> · High-Sensitivity Optical Interfero-metric AC Dilatometer · Bistable Optical Device · Deformable Mirror · Variable Optical Diffraction Grating · Microscope Stage
		Mechanical Control	<ul style="list-style-type: none"> · Ultra-Precision Guide Mechanism · Cutting Error Correction Device · Hydraulic/Pneumatic Control Servo Valve · VTR Head
	ON/OFF Drive	Optical Control	<ul style="list-style-type: none"> · Swing Type CCD Image Sensor · Micro-Angle Adjustment Device
		Mechanical Control	<ul style="list-style-type: none"> · Dot Printer Head · Piezoelectric Relay · Ink Jet
Free Flight Displacement	ON/OFF Drive	Mechanical Control	<ul style="list-style-type: none"> · Printer Head
Resonating Displacement	Alternating Drive	Energy Propagation	<ul style="list-style-type: none"> · Ultrasonic Knife · Piezoelectric Fan · Ultrasonic Humidifier · Piezoelectric Pump
		Optical and Mechanical Control	<ul style="list-style-type: none"> · Ultrasonic Motor · Ultrasonic Linear Motor · Minute Crawlers

그림 11. 적층형 소자의 내부전극 구조

변위를 이용하는 것과 교류전계에 대한 기계적 공진에 따른 변위를 이용하는 형태로 분류된다. 여기서 전왜 세라믹에 주로 이용되는 것은 전자이며, 이는 위치 측정 장치를 이용한 피드백 시스템(feedback system)을 서보구동하는 것과 간단하게 on/off 스위칭(switching system)에 의해 작동되는 펄스 유도 장치(pulse drive motors)로 다시 나눌 수 있다¹³⁾. 이들 소자의 응용예를 표 3에 나타내었다.

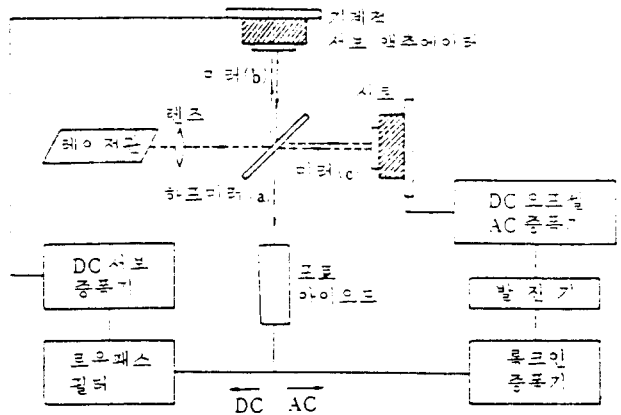


그림 12. 고감도 딜라토미터의 구성

4.1 고감도 광간섭 AC dilatometer

광학적 dilatometer의 고정확도를 저해했던 것은 온도의 변화, 기계적 진동 및 노이즈(noise)에 의해 광로장의 drift에 의한 것이다. 이와 같이 비교적 느린 광로장의 drift를 전왜 액츄에이터를 써서 보상함으로써 원하는 AC적 변위의 검출감도를 매우 향상시킬 수 있다. 그림12에 구성도를 나타내었으며, 압전체, 전왜재료 및 자왜재료에서 생기는 왜(100Hz~1kHz)를 10^{-13} m의 감도로 검출할 수 있다.

4.2 광쌍안정 device

광쌍안정 디바이스라고 하는 것은 입력광강도의 변화에 따라 들뜨는 그 이상의 출력광강도 상태를 나타내는 것으로 광스테빌라이저, 팡트리오드 등 많은 응용이 제안되어 팡정보처리 분야에서 최근 각광을 받고 있다. 그림13에 광쌍안정 디바이스의 구성과 실험계를 나타냈다. 파브리페로 광공진기는 유전체 반사막으로 코팅된 두 장의 수정거울이 PMN계 전왜소자 위에 설치된 것이다. 투과광강도에 비례한 광검출기의 출력은 두 개의 DC 차동앰프를 통해서 전왜액츄에이터에 인가되어진다. 첫 번째 앰프는 900V까지의 DC 바이어스를 인가하기 위한 것이며, 두 번째의 것은 펄스 발생장치이다. 바이어스와 역방향의 -900V의 펄스전계를 가함으로써 광쌍안정 소자를 기저상태에서 고차안정상태까지 스위치시킬 수가 있다.

4.3 절삭오차 보정용 액츄에이터

서브마이크로 정도의 가공이 요구되는 절삭가공을 목적으로 하는 호브반에 있어 전왜 액츄에이터를

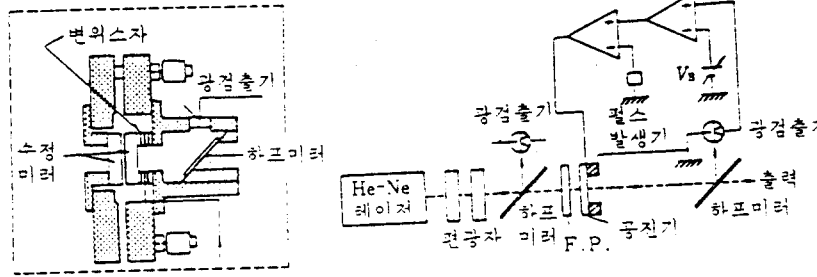


그림 13. 광쌍안정 디바이스의 구성

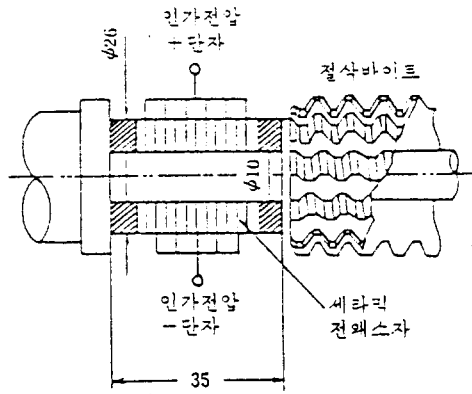


그림 14. 전왜 액츄에이터가 장착된 정밀 절삭기

사용하여 정밀도를 높일 수가 있다. 그림 14에 그 구성을 나타냈는데, PMN계 세라믹 적층체는 두께 0.5mm, 직경 26mm의 0.9 PMN-0.1PT 디스크를 약 30장을 붙인 것이다. 호브반은 항상 커다란 하중하에서 사용되어지기 때문에 700kgf의 하중하에서 300V의 인가로 $6\mu\text{m}$ 정도의 변위를 발생시킨다.

5. 세라믹 액츄에이터의 과제

세라믹 액츄에이터의 응용범위가 상당히 넓어지고 있다. 그러나 실용적인 디바이스가 되기 위하여 소자의 내구성, 신뢰성의 향상등에 해결하여야 할 문제점을 가지

고 있다. 가장 큰 문제는 역시 변위 재현성과 온도 특성이 뛰어난 고변위감도의 재료 개발일 것이다. 변위 재현성에는 전계에 대한 이력현상과 시료제조에 따른 이력현상에 의한 변위량의 변화폭등을 개선 해야하며 또한 기계적인 강도를 높이는 점도 중요하다.

또한 액츄에이터는 가능한 콤팩트한 모양으로 시스템에 적용시키기 위하여 소형화와 더불어 응답주파수, 발생용력 등을 고려한 최적의 변위확대 기구의 설계도 중요하다. 종래의 압전 소자는 공진자로서의 사용이 많아 정상진동에 대한 해석이 많이 행하여지고 있으나 액츄에이터와 같이 과도응답현상에 대해서도 많은 연구가 필

요하다. 또 하나의 과제는 시스템화이다. 아무리 뛰어난 변위소자라 할지라도 단품으로는 온도 요동에 따른 열팽창이나 외부로부터의 기계적 진동 노이즈, 응력변동에 대해서 출력변위량이 변동하는 것은 피할 수가 없다. 따라서 소형 변위센서등을 이용하여 정확한 제어 시스템의 구성에 대하여도 연구가 되어져야 한다.

참 고 문 헌

1. K. Uchino, S. Nomura, L. E. Cross, R. E. Newnham & S. J. Jang, "Electrostrictive Effect in Perovskites and its Transducer Applications", J. of Mat. Sci., Vol. 16, P. 569, 1981.
2. S. Nomura, K. Uchino, "Recent Applications of PMN-Based Electrostrictors", Ferroelectrics Vol. 50, p. 197, 1983.
3. S. Nomura, K. Uchino, "New Electromechanical Materials and Their Applications", J. of Appl. Phys. Jpn., Vol. 20, Sup. 4, p. 225, 1981.
4. 内野研二, "電氣ひずみ利用したアクチュエータ", セラミックス, Vol. 19, No. 11, p. 933, 1984.
5. 内野研二, "壓電/電歪アクチュエータ", 森北出版, 東京, pp.1~93, 1986.
6. K.Uchino, "Ceramic actuator: Review", Electronic Ceramics, March, 1987
7. Ju Hyun Yoo, "Effects of Y_2O_3 Addition on the PZN-BT-PT Ceramics for Electrostrictive Actuator" Ph.D thesis, The Graduate School, Yonsei Univ., 1990
8. y.Tsuchiya, K.Uchino, "Approximate formulas for a low-Q electromechanical resonator and their applications to electrostrictive PMN based ceramics" JJAP Vol. 20, No. 10, pp.1841-1847, 1981
9. Y. Yokomizo, T. Takahashi, S. Nomura, "Ferroelectric Properties of $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ ", J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 28, No. 5, pp. 1278~1284, 1970.
10. J. Kuwata, K. Uchino, S. Nomura, "Diffuse Phase Transitions in Lead Zinc Niobate", Ferroelectrics, Vol. 22, pp. 863~867, 1979.
11. K.Abe, K.Uchino, "The electrostrictive unimorph for displacement control", J JAP. vol. 18, No. 2(25), 1986
12. Y.Kondoh, T.Ono, "Bimorph Type Actuators Using Lead Zinc Niobate-Based Ceramics", JJAP. vol. 30, No. 9B, pp. 2260-2263, 1991
13. T. Ota, T.Uchikawa and T. Mizutani, "Printing Flight Hammer Using Multilayer Piezoelectric Actuator", Jpn. J. of Appl. Phys., Vol. 24, No. 3, pp. 193~195. 1985.

< 김진수 위원 >