

압전 ACTUATOR와 그 응용

이능현* · 이덕출**

(*경원대 공대 전자공학과 교수,

**인하대 공대 전기공학과 교수)

1. 서 언

Actuator란 무엇인가의稼動 에너지를 기계적인 변위 또는 응력으로 변환하는 일종의 transducer를 의미하기 때문에 기존의 공기압 또는 유압식 실린더나 서보모-타, 스텝모-타 등도 물론 actuator라 할 수 있다.

그럼에도 불구하고 최근 actuator에 대한 관심이 새로워지는 것은 광학, 천문학 및 정밀가공 등의 진보와 더불어 sub-micron의 order로 光路의 길이나 위치를 조정하는 變位소자 또는 positioner가 절실히 요구되고 있기 때문이다. 현재 電子소자 등에 있어서는 sub-micron order의 가공이 놀랍지 않지만 메카트로닉스의 시대를 맞이하여 기계공학의 분야에 있어서도 좀 더 높은 정밀도가 요구되고 있다. 더우기 레이저 光을 계측분야에 이용하기 시작한 이후 nm의 변위가 용이하게 검출되고 있기 때문에 보다 정밀한 광학기기 및 공작기계 등에 대한 수요가 증대되고 있는 형편이다.

공작기계는 의례히 유동적인 가동부분과 회전부분(톱니바퀴, 모-타)을 갖기 때문에 이로 인한 오차는 불가피하며 또 진동 발생원을 내장하고 있기 때문에 진동 noise에 수반되는 변위변동을 제거하거나 가공 중의 응력, 온도의 변화에 따른 변형, 열팽창 등도 무시할 수 없다. 예를들어 silicon wafer상에 $2.5\mu\text{m}$ 의 선폭으로 pattern을 찍는 장치(縮小投影露光機)

에 있어서의 2차원 평면상인 X-Y축을 따라 $0.1\mu\text{m}$ 의 정밀도로 테이블을 움직일 수 있는 기구가 요구되기 때문에 이러한 기구를 구성하는 모든 부품의 정밀도는 이보다 더 엄격하지 않으면 안된다. 현재로서는 기계부품에 대한 이러한 초정밀 가공 기술은 매우 극복하기 어려운 과제라 할 수 있다.

그러나 이런 경우 인간의 극한적 초정밀 가공기술에 의존하지 않고도 압전 재료를 이용함으로써 微小變位 제어를 가능하게 하는 여러 연구가 진행되고 있다.

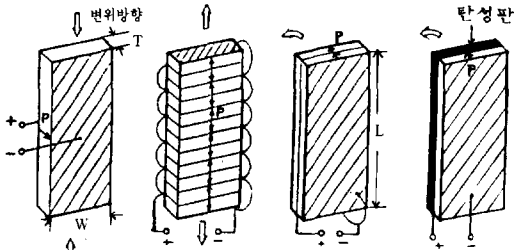
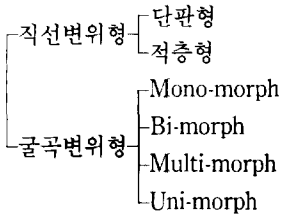
최근의 압전세라믹스 재료의 응용분야는 크게 filter 등의 통신용 device, 초음파 transducer 등의 전기음향 device 및 기계적인 변위나 응력을 발생시키는 actuator 등으로 분류될 수 있는 바, 여기에서는 최근의 압전 actuator에 대한 제조 방법, 연구 및 응용동향 등에 대해 소개하고자 한다.

2. 압전 Actuator의 종류와 특징

압전 actuator는 주로 압전체의 전왜효과를 이용해서 전기에너지를 기계에너지로 변환하여 부하의 운동을 전기적으로 제어하는 device이다. 압전 actuator는 표1에 나타낸 것 처럼 압전소자의 면내에 생기는 변위를 이용하는 직선변위형과 면외에 생기는 변위를 이용하는 굴곡변위형으로 대별된다.

직선변위형에는 單板형과 積層형이 있으며 굴곡변

표 1. 압전 Actuator의 종류



(a) 단판형 (b) 적층형 (c) Bi-morph (d) Uni-morph

그림 1. 대표적인 압전 Actuator의 기본구조

위형에는 mono-morph, uni-morph, bi-morph, multi-morph가 포함된다. 이들 actuator 중에서 대표적인 것을 그림1에 나타내었다. 단판형(a)는 두께방향으로 분극된 압전세라믹판으로서 분극 P의 방향으로 전계를 인가해서 길이방향으로 생기는 변위를 이용한다. 적층형(b)는 세라믹판을 적층시켜 하나로 만든 것으로서 인접한 세라믹판의 분극방향은 서로 180°다르다. 각 세라믹판은 전기적으로는 병렬로 접속되어 있고 적층축방향으로 생기는 변위가 이용된다.

다. bi-morph(c)는 2장의 세라믹판을 마주 붙인 것으로 각 세라믹판에 서로 역방향의 伸縮변위가 생기도록 전계를 인가해서 굴곡변형이 나타나게 한다. 또한 uni-morph(d)는 압전세라믹판에 탄성판을 덧붙임으로써 세라믹판과 탄성판의 신축변위의 차에 의해 굴곡변위를 발생시키기 위한 것이다.

표2는 앞의 세 종류의 actuator 특성을 이론적으로 비교한 것으로 각 actuator의 치수를 $L=20\text{mm}$, $W=5\text{mm}$, $T=0.5\text{mm}$, 인가전압을 100V, 압전세라믹소재료를 NEPEC-1으로 한 경우의 값이다. [1] 이 표는 각 actuator의 특징을 대략 파악하는데에는 유효하지만 각 부분의 크기나 사용재료가 달라지면 각 수치가 크게 변할 수 있음을 유의해야 한다.

단판형은 구조가 매우 단순하지만 발생변위가 너무 작아서 실용성에 문제가 있다. 이에 비해 적층형은 변위량이 한자리 정도 크다. 이 변위량은 적층되는 각 세라믹판의 두께를 얇게함으로써 더욱 크게도 될 수 있다. 또 압전종효과를 이용하고 있기 때문에 에너지의 변환율이 크고 발생력이나 응답성도 우수하다.

굴곡변위형의 특징은 bi-morph로 대표되지만 변위량이 큰 반면 발생력, 에너지변환율, 응답속도에 큰 문제가 있다.

압전 actuator의 최대의 특징은 미소변위를 높은 정밀도로 제어하는 데 있지만 이러한 관점에서 현재 사용되고 있는 actuator와 비교한 것이 표3이다. [2]

표 2. Actuator특성의 비교

종류	변위 (μm)	발생력 (N)	변환율 (%)	공진 (KHz)
단판형	0.36	0.42	8.4	85
적층형	1.6	16	38	102
Bi-morph	43	0.08	4.9	0.7

표 3. 現用Actuator와 압전 Actuator의 微笑變位 제어성 비교

종류	진폭	정밀도	발생력	응답속도
공기압실린더	100mm	100 μm	10 ⁻² Kg/mm ²	10s
유 압실린더	1000mm	10 μm	10Kg/mm ²	1s
Voice Coil모타	1mm	0.1 μm	30Kg	1ms
압전 Actuator	0.1mm	0.1nm	3Kg/mm ²	0.1ms

공기압 및 유압실린더의 진폭은 크지만 정밀도나 응답속도가 만족스럽다고는 말할 수 없다. 현재의 actuator중에서는 voice-coil 모-타가 가장 미소변위 제어성이 우수하지만 압전 actuator가 진폭이 작은 것을 제외하면 전반적으로 voice-coil 모-타를 능가하는 미소변위 제어용 actuator라고 말할 수 있다.

3. 직선변위형 Actuator

3.1 적층형의 구조 및 특성

대표적인 적층 actuator의 구조를 그림2.에 나타내었다. 균일층, 불균일층, 보호층의 3층구조를 이루고 있다. 균일층은 주로 신축하는 부분으로 압전 세라믹스와 내부전극층이 교대로 중첩되어 있다. 불

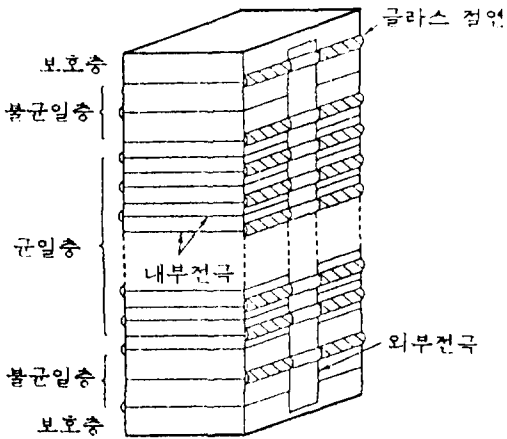


그림 2. 現用 적층Actuator의 구조

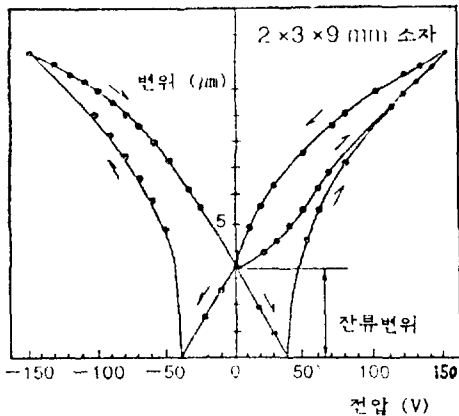


그림 3. 변위-전압 특성

균일층은 균일층과 보호층과의 사이에 발생하는 전단응력을 완화시키기 위한 부분으로 두께는 약간 두꺼우며 역시 압전세라믹층과 내부전극층으로 구성되어 있다. 보호층에는 내부전극이 포함되지 않으며 신축에는 관여하지 않는다. 압전 세라믹스로서는 비교적 압전성이 큰 PZT계 재료가 자주 사용되고 있다. 인가전압에 대한 종방향변위의 예를 그림3에 보였다. 교류전압을 인가하면 발생변위는 나비모양의 히스테리시스를 나타낸다. 한 번 큰 전압을 인가한 후 이 전압을 제거하면 소자는 최초의 크기보다 다소 늘어난 상태로 안정된다. 이 변위량을 잔류변위라고 부르며 이것은 자발전기분극이 한 방향으로 배열함으로써 생기는 현상이다. 통상 Actuator로 사용하는 경우 이 상태로 부터 다시 먼저와 동일 방향으로 전압을 인가해서 늘어나는 변위를 이용한다.

3.2 적층형의 제조방법

현재 가장 널리 보급되고 있는 전면전극구조 적층형 actuator의 제조방법에 대해 간단히 설명한다.

그림4는 표준적인 제조공정을 보이는 것으로 압전 세라믹스의 假燒분말에 소량의 有機binder를 첨가하여 용액중에 분산시켜 슬러리를 만든다. 膜제조장치를 이용하여 厚膜으로 가공한 후 적당한 크기로 절단한 후막의 표면에 백금 등의 금속패이스트로 전극 처리하여 수10 내지 수100매 정도로 적층해서 熱프레스로 가압 일체화 한다. 다음에 400°C 정도의 온도로 가열해서 내부에 포함되어 있는 유기성분을 열분해하는 바인더제거과정을 거친 후 1000°C 이상의 온도로 가열해서 소결한다. 이 소결체는 내부에 금속전극층을 포함하는 세라믹스로 이 것을 원하는 크기

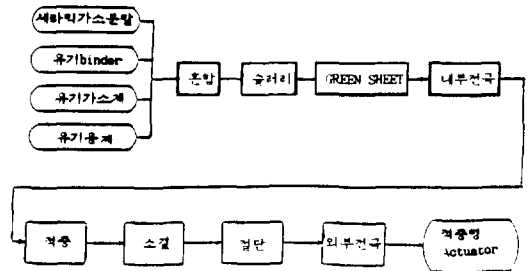


그림 4. Tape Casting법에 의한 적층형 Actuator의 제조공정

와 형상으로 가공한 후 내부전극을 전기적으로 병렬로 접속하면 actuator가 완결된다.

4. 굴곡변위형 Actuator

4.1 Bi-morph

2장의 압전세라믹판을 맞붙여서 구성하는 bi-morph는 대표적인 굴곡변위형 actuator로 전부터 널리 실용되고 있다. 구동방식은 그림5에 보인 것처럼 직렬방식과 병렬방식이 있다.

4.2 Mono-morph

1장의 압전세라믹판으로 구성되는 굴곡변위형 actuator를 mono-morph라 한다. 여러 종류의 mono-morph가 제안되고 있지만 그 중 최근 주목되고 있는 2종류의 mono-morph에 관하여 기술해 본다.

그림6은 傾斜機能세라믹스의 성질을 교묘히 이용하고 있는 mono-morph의 구조를 보이고 있다. 기본적으로는 압전계정수 d 가 크고 유전율 ϵ 이 작은 압전세라믹스 A와 역으로 d 가 작고 ϵ 이 큰 압전세라믹스 B로 구성되어 있다.

이 2종류 재료의 세라믹스 분말층을 중첩시켜 소결하면 경계부에 경사조성층이 형성되어 2종류의 세라

믹스가 무리없이 접합된다[7]. 이렇게 해서 얻어지는 세라믹판의 상하면에 전극처리를 하고 이 사이에 전압을 인가하면 유전율이 작은 층과 큰 층에서는 전계강도가 다르다. 유전율이 작은 층에서는 전계강도가 크고 또한 압전성도 크기 때문에 커다란 압전 왜가 생긴다. 반면에 유전율이 큰 층에서는 전계강도가 작고 압전성이 작기 때문에 발생하는 압전왜는 작다.

통상의 bi-morph나 multi-morph에서는 접착층이나 금속전극층에 응력집중 현상이 나타나 신뢰성이나 안정성에 나쁜 영향을 미치는 경우가 있지만 상술한 mono-morph는 1장의 판으로 구성되기 때문에 이런 문제가 작다고 할 수 있다.

또 다른 것으로 반도체세라믹스를 이용한 mono-morph가 있다. 반도체 압전 세라믹판의 표면에 이 재료보다 큰 일함수를 갖는 금속막을 전극으로 접합하면 접합계면 부근에 schottky장벽이 형성된다. 따라서 이 것에 전압을 인가하면 접합계면 부근에 전계가 집중되기 때문에 앞에서의 경사기능세라믹스와 같은 모양으로 굴곡변형을 일으키는 세라믹스가 된다[8].

5. 압전 Actuator의 응용

압전 actuator의 응용은 미소변위의 정밀제어 분야와 압력 또는 동력원예의 응용 분야로 대별된다. 또 구동방식으로 분류하면 고정식, 自走식, flight식, 진동식 등이 있다.

고정식은 actuator의 일부를 고정시키고 부하를 actuator의 다른 부분에 접합시킨 상태로 부하의 운동을 제어하는 방식이다. 이 방식에서는 커다란 stroke는 얻어지지 않지만 일반적인 방식으로서 널리 보급되고 있다. 자주식은 구동시에 actuator 자신도 이동하는 방식으로 이동속도는 그렇게 빠르지는 않지만 무한대의 stroke가 얻어지는 특징이 있어 최근 주목을 받고 있다. flight식이란 부하에 飛行운동을 주는 방식으로 actuator의 발생변위를 4자리나 확대시키는 것이 가능하다. 그리고 진동식이란 actuator에 교류전압을 인가해서 기계진동을 발생시켜 이 진동으로 부하의 운동을 제어하는 방식이다. 이상과 같은 분류에 의해 다음에는 적층 actuator를 중심으로 한 대표적인 응용 예를 소개한다.

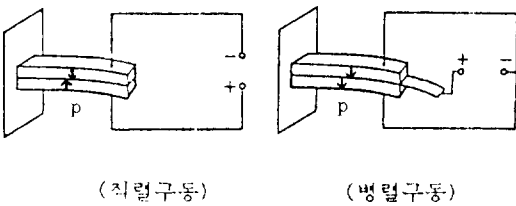


그림 5. Bi-morph의 구동방식

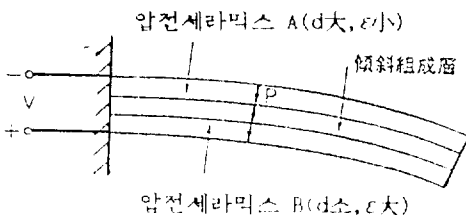


그림 6. 傾斜機能세라믹스를 이용한 Mono-morph

표 4. 압전 Actuator의 응용

응용 분야	구동방식	응용예
미소변위제어	固定식	초정밀 Stage, STM 용 Scanner, 가변 Mirror 레이저 편향기, Micro-manipulator, 절삭오차보정기, 유압제어변, 레이저간섭계
	自走식	초정밀 Stage, STM 용 Scanner, Micro-robot, Micro-manipulator, 초고진공용 Stage
압력, 동력원	고정식	Impact Printer, 편광제어장치, Relay 카메라셔터, 점자판독장치
	flight식	Impact Printer, Latching Relay, Green Sheet Puncher
	진동식	Active Damper, 압전모터, 압전펌프 압전Fan, 초음파메스, 초음파露化器

5.1 미소변위제어에의 응용

5.1.1 走査型 터널현미경(STM)용 Actuator

주사형 터널현미경은 끝을 예리하게한 금속탐침을 시료표면에 약 10Å 정도의 거리까지 접근시켜 이 사이에 전압을 인가해서 tunnel 효과로 흐르는 전류를 귀환제어에 이용해서 시료표면의凹凸상태를 원자크기의 척도로 측정하는 현미경이다. 그림 7은 탐침을 3차원적으로 주사하기 위한 가장 단순한 구조의 고정식 압전actuator를 나타내는 것으로 3개의 단판형 actuator의 교점에 탐침이 붙어 있다. [9] 현재로서는 이것이 가장 높은 정밀도를 갖는 actuator로 거론되고 있다.

5.1.2 自走式 Actuator

적층actuator를 이용한 자주식 압전 actuator의 구동원리를 그림8에 나타내었다. [10] 질량 M의 이동체가 기관상에 있고 이것은 마찰력으로 지지된다. 그리고 이 이동체에는 질량 m의 관성체가 적층 actuator를 사이에 두고 접합되어 있다. 이

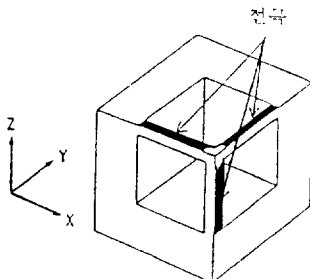


그림 7. STM용 Actuator

actuator의 이동양식에는 몇 가지가 있으나 그 중 하나를 소개한다.

우선 적층actuator를 일정상태로 한 다음 적층 actuator에 step전압을 인가해서 급속히 신장시키면 이동체와 관성체는 서로 역방향으로 이동한다. 다음에 적층actuator를 서서히 수축시켜 원래의 길이로 되돌리면 정지마찰에 의해서 이동체의 위치는 그대로 유지되고 관성체 만이 이동체의 방향으로 당겨짐으로써 결국 좌측 또는 우측으로 이동이 가능하게 된다.

5.2 압력 및 動力源에의 응용

5.2.1 Impact Printer

가늘은 금속Wire의 끝을 잉크리본을 사이에 두고

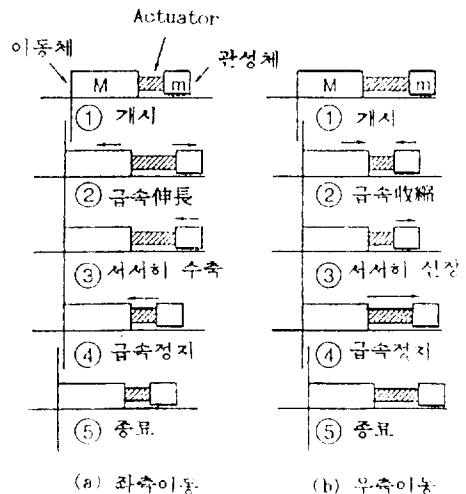


그림 8. 自走式 압전 Actuator의 구동원리

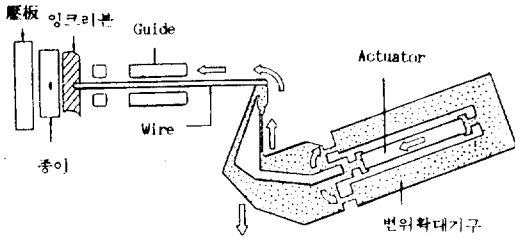


그림 9. Impact Printer의 印字Pin

종이면에 충돌시켜 dot를 만들고 이 dot를 조합시켜 문자를 구성하는 방식의 프린터를 impact식 dot printer라 하며 현재 널리 사용되고 있다. 이 때 금속 wire를 구동하기 위한 actuator로서 종래는 전자석이 사용되어 왔다. 그러나 이보다 성능이 우수한 적층 actuator를 응용한 프린터가 최근 등장했다. 적층actuator로 구동되는 印字pin의 구조를 그림 9에 나타내었다. 印字wire의 stroke는 0.4mm정도를 필요로 하고 있지만 적층 actuator 단독으로 이 정도는 어렵기 때문에 지레의 원리로 동작하는 변위확대기구를 병용하고 있다. 인자 핀을 24개 집적해서 구성된 프린터 헤드는 1초간에 110문자의 漢字를 찍을 수 있는 능력을 갖는다. 이 프린터는 電磁구동방식과 비교해서 소비전력과 발열이 작으며 인자 핀간의 磁器간섭이 없기 때문에 印字품질이 좋다.

5.2.2 Flight식 Actuator

적층actuator를 이용한 flight식 actuator의 원리를

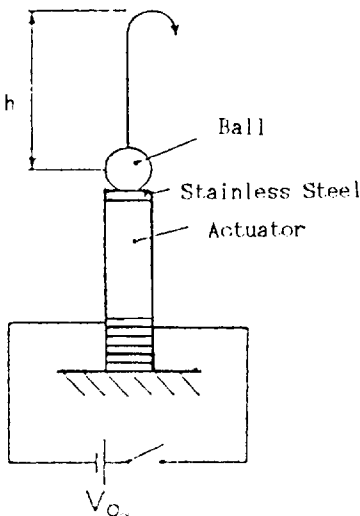


그림 10. Flight식 Actuator의 구동원리

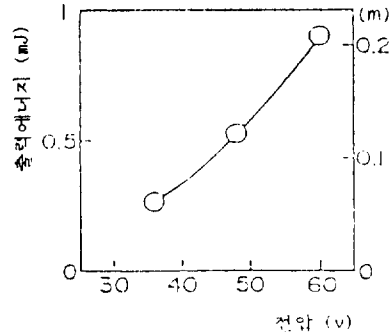


그림 11. 점프높이-전압특성

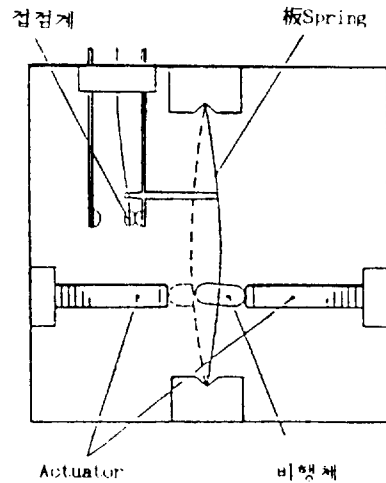


그림 12. Latching Relay의 구조와 동작원리

그림 10에 나타내었다. 적층 actuator에 step전압을 인가하면 actuator가 급속히 신장하기 때문에 이 위에 얹혀있는 steel ball은 연직 상방향으로 튀어 오른다. 이때의 actuator의 변위량은 기껏해야 10 μ m 정도이지만 변위속도는 3m/s 이상이나 되며 steel ball은 튀어오르기 때문에 충분한 운동에너지를 얻게 된다. 높이 15mm, 단면 2 \times 3mm의 적층 actuator상에 0.44g의 steel ball을 올려놓고 구동한 경우의 결과를 그림 11에 보이고 있다. [11] 60V의 인가전압으로 약20cm나 튀어오름으로써 약 20,000배로 확대된 변위가 부하에 주어지게 된다. 그림 12는 이런 원리로 동작되는 latching relay의 구조를 보여주고 있다. 이 relay는 2개의 적층actuator, snap-action spring, 비행체 및 접점계로 구성되어 있다. 비행체는 板spring의 탄력으로 한 쪽 actuator에 붙어있다.

적층 actuator에 펄스전압을 인가하면 비행체는 spring의 탄력을 극복하고 튀어나가 맞은 편 actuator에 spring의 힘으로 붙어있게 된다. 그 결과 접점계의 접점이 절환된다.

5.2.3 진동식 Active Damper

Engine이나 motor등에 의해 발생하는 진동을 억제하는 방법으로서 종래는 防振고무나 공기의 탄력 등이 자주 이용되고 있다. 이런 수동적인 방법은 에너지 또는 제어계를 필요로 하지 않는 이점은 있지만 계로서의 고유진동이 저하하기 때문에 변위가 큰 저주파진동이 두드러지는 결점이 있다. 이에 반해 적층 actuator를 진동시켜 능동적으로 진동을 제어하는 방법은 앞에서의 결점을 극복하는 고도의 제어 방법이라고 할 수 있다.

Active damper의 원리는 진동원과 방진대상물간의 상대적인 변위를 진동원의 진동에 맞춰서 제어함으로써 방진대상물로 진동이 전파하는 것을 억제하는 방식을 취하고 있다.

그림 13은 적층actuator를 사용한 active damper의 실험계를 보여주는 것으로 중량 30Kg의 중실체

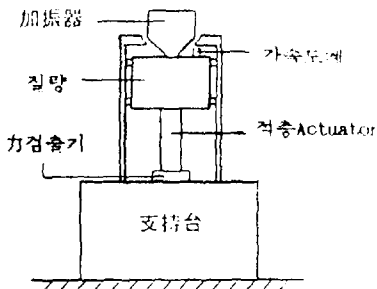


그림 13. Active Damper의 실험계

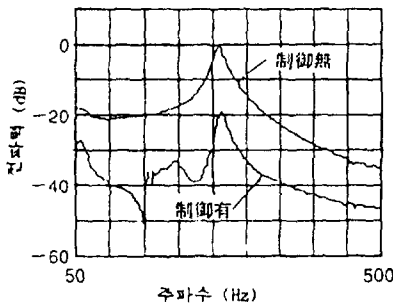


그림 14. 傳播力の Power Spectrum

가 10×10×36mm의 적층actuator와 力검출기를 매개로 해서 지지대에 지지되고 있다. 中實體는 진동이 가해지는 加振器에 의해 상하방향으로 진동이 가해진다. 그림 14는 50~500Hz의 주파수대역에서 sweep加振時에 있어서 傳播力の power spectrum을 제어의 유무에 따라 비교한 것이다. [11] 공진주파수를 포함하는 넓은 주파수범위에 걸쳐서 10~20dB의 전파력제어효과가 있는 것이 분명하다.

6. 결 언

후막적층법으로 제조되는 적층actuator의 출현을 계기로 압전actuator의 응용연구가 활발해져서 각종 메카트로닉스기기의 고성능화, 고기능화가 진전되고 있다. 이러한 배경에 입각하여 본 문에서는 actuator의 종류, 동작 원리, 특징, 제조법 및 최근의 응용동향 등에 대해 폭 넓은 해설을 시도해 보았다. 지면관계로 생략하였지만 선진 여러 나라에서는 초음파모-타actuator에 대한 연구도 상당한 성과를 올리고 있으며 반강유전체세라믹스에서 나타나는 형상기억특성 및 광에너지를 직접 기계적에너지로 변환시키는 광에너지를 이용한 actuator에 대한 연구도 진행되고 있다.

이상으로 압전 actuator에 대한 국제적인 연구 및 응용동향 등에 대해 알아 보았지만, 국내적으로는 이제 비로소 일부의 산업체 및 대학 연구소 등에서 이에 대한 관심을 갖기 시작한 단계라고 할 수 있다.

따라서 국제적인 추세에 뒤지지 않기 위해서는 각 산업체와 연구기관 및 대학 연구소 등에서는 이 분야에 대한 시설투자과 더불어 지속적인 산학연계 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Takahashi : Multilayer Piezoelectric Cermic Actuators and Their Applications, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 24, Suppl. 24-2, pp. 41(1985).
 [2] 内野研二 : 「壓電/電歪アクチコレータ」, 森北出版, 1986年, p. 4
 [3] S.Takahashi, A.Ochi, M.Yonezawa, T.Yano, T. Hamatsuki and I. Fukui : Internal Electrode Piezoelectric Ceramic Actuator. Ferroelectrics. Vol. 50. pp181-190(1989).

-
- [4] S. Takahashi : Recent Development of Multilayer Piezoelectric Ceramic Actuators and Their Applications. *Ferroelectrics*. Vol. 91. pp. 293-302 (1989).
- [5] 大矢寛二 : 「新方式アクチコエータの應用技術」 トリケツプス, 1985年 pp. 1-33
- [6] T.Ogawa A. and K. Wakino : Monolithic Bimorph with Internal Electrode. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 25, Suppl. 25-1. pp. 25-27 (1985).
- [7] 河合高志 : 傾斜機能材料の計測制御機器への 應用, セラヒリミクス, Vol. 24, No. 10, pp. 975-979 (1989)
- [8] K. Uchino, M. Yoshizaki, K. Kasai, H. Yamamura, N. Sakai and H. Asakura : Monomorph Actuators Using Semiconductive Ferroelectrics. *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 26, No. 7. pp. 1046-1049 (1987)
- [9] S. Okayama, H. Bando, H. Dokumoto and K. Kajimura : Piezoelectric Actuator for Scanning Tunneling Microscopy. *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 24, Suppl. 24-3, pp. 152-155 (1985)
- [10] 樋口俊郎 : 日本 '固體アクチコエータ研究会' 심포지움 논문집 일본공업기술진흥협회, 1989년, pp. 15-22
- [11] 高橋貞行 : '壓電アクチコエータ研究会' 심포지움 (6회) 논문집