

초정밀위치결정기술



최 대 봉

(공작기계연구실 선임연구원)

- '78. 2 한양대학교 기계공학과 졸업
- '78. 7-'83. 6 한국과학기술원 연구원
- '83. 7-현재 한국기계연구소 선임연구원



신 영 재

(공작기계연구실 연구원)

- '84. 2 부산대학교 기계공학과 졸업(학사)
- '87. 2 한국과학기술원 생산공학과 졸업(석사)
- '87. 3-현재 한국기계연구소 연구원

1. 서론

위치결정기술은 어떤 제품들을 제작, 어떤 물건들의 치수를 측정, 또는 각종기계를 운전시 사용되어지는 기계공업의 기반기술의 하나이다. 예로서 공작기계의 경우를 보면 가공물을 주어진 형상치수로 가공하기 위해서는 공구와 가공물간의 정확한 위치결정을 하여 소정의 궤적을 따라 이송운동중 가공을 행한다. 이렇게하여 소정의 치수와 형상을 가진 물건을 얻을수 있다.

최근의 공작기계, 산업기계, 계측기등의 고기능화와 고정도화에 동반하여 정밀 위치결정기술이 요구되고 있고 특히 반도체제조기기 및 정보기기에 관련된 공작기계와 계측기에 요구되어지는 위치결정정도는 다른 기계 및 계측기에 비교하여 높은 것이 보통이며 서브미크론(submicron)부터 나노미터오더(nanometer order)에 이르고 있다. 그리고 초정밀의 기준에 대하여 서브미크론 및 나노미터의 어디부터 초정밀인가를 논할 필요가 있지만 여기에 관한 명확한 정의는 없는 것으로 생각되나 그림 1에서 보듯이 공작물의 크기 혹은 측정물의 크기에 따른 요구정도에 의하여 정도를 나타내어 현재의 기술수준을 넘어선 단계를 초정밀로 보는 것이 합리적이다. 따라서 그림의 기준선 이상을 초정밀이라 할수있다. 초정밀위치결정을 실현하기 위해서는 상응하는 하드웨어 즉 안내기구, 액츄에이터 구동전달기구, 변위검출기의 사용이 제1의 조건이고 그 다음에 제어방식, 구조설계 및 환경제어 등 중요한 요건들이 있다.

본 소고에서는 먼저 정도를 확보하기 위한 기

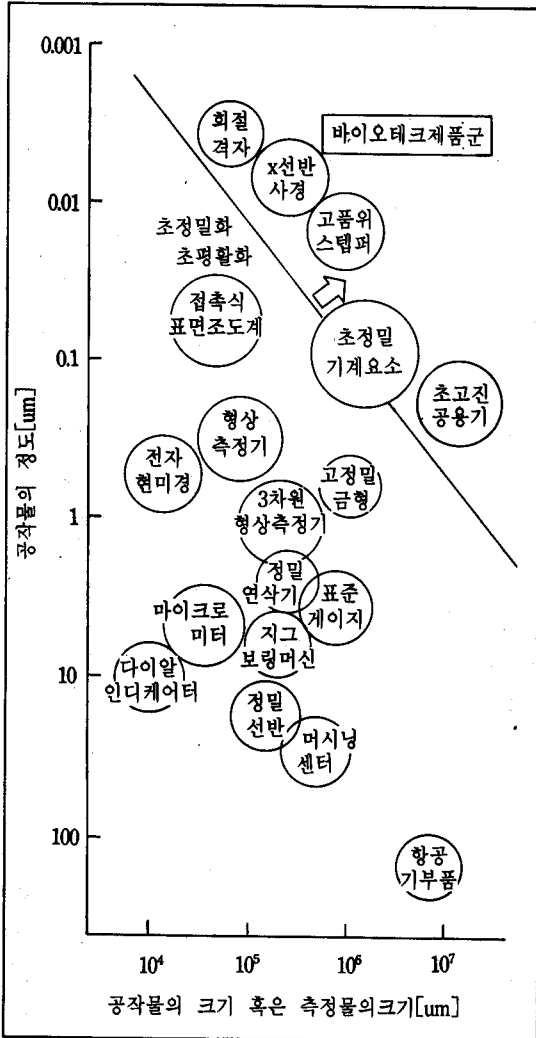


그림 1) 정도의 분포상태

본적인 방법을 제시하고 그리고 초정밀용 각종 기계요소의 현황에 대하여 소개하고자 한다.

2. 위치결정의 기본

2.1 위치결정의 종류

위치결정이라 말할지라도 거기에는 여러가지 부분이 있을수 있다. 즉 정지위치에 정확하게 위치시키는 위치결정(정지정도)과 연속한 순간적인 위치로 정확히 제어하여 위치결정을 하는 연속

위치결정(운동정도)이 있고 또한 목표로 하는 상대에 제어대상이 추종하는 상태를 나타내는 것 등이 있다.

초정밀위치결정에 국한하면 기계의 운동은 직선운동 및 회전운동이 있으며 이들 운동이 요구되는 위치결정 정도를 가지기 위해서는 정지 및 운동정도가 높아야 할 필요가 있으나 사용예에 따라서는 한쪽만으로도 충분하다. 그림 2는 직선운동 및 회전운동에서 고려해야할 운동오차를 나타내고 있다.

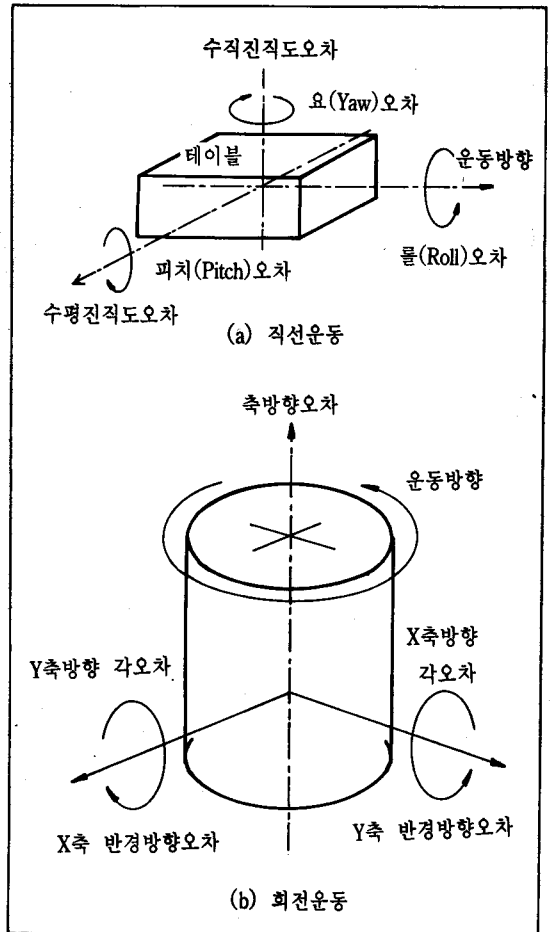


그림 2) 운동오차

2.2 위치결정정도 확보를 위한 기본

개회로제어, 반폐회로제어 및 폐회로제어의 불
機械의 材料 2권 3호 (1990. 7)

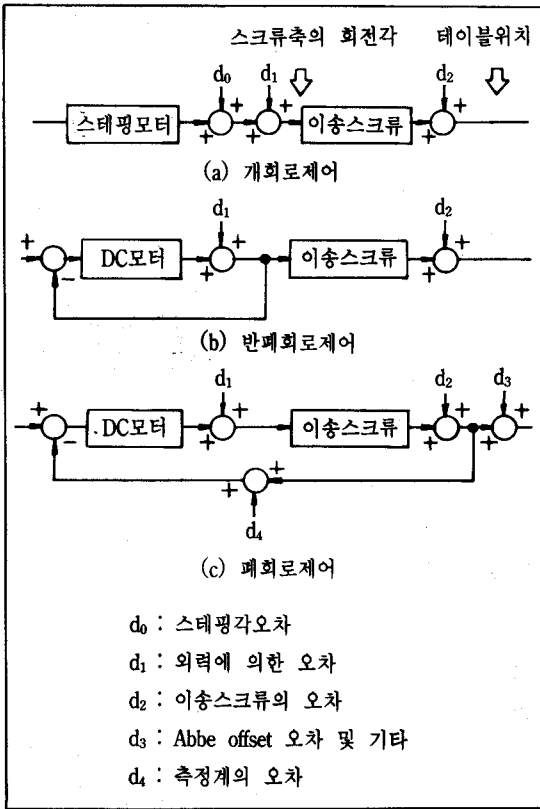


그림 3) 제어방식과 오차요인

록다이어그램(block diagram)이 그림 3에 나타나 있다.

(a)에서는 스텝핑각오차 d_0 , 외력에 의한 오차 d_1 과 열팽창 및 형상오차가 포함된 이송스크류의 오차 d_2 가 테이블에 이송정도에 영향을 주며, 이송스크류의 회전각을 로터리엔코더로 피드백(feedback)하는 반폐회로(b)에서는 d_1 은 제어계에서 보상할 수 있지만 d_2 는 보상하지 못한다. 테이블의 위치를 피드백하는 폐회로(c)는 d_2 도 보상할 수 있어 초정밀위치결정에서는 위치결정정도 확보를 위하여 거의 폐회로를 사용하고 있다. 그러나 이 경우에도 위치검출기의 위치와 테이블의 위치간에는 테이블의 변형과 아페셋(Abbe offset)오차가 원인이 되어 보상이 불가능한 오차 d_3 가 제어계의 외부에서 생긴다. 또는 검출계에서 발생하는 오차도 제어계에서 보상이 불가능하다. 이

러한 이유로 정도확보를 위한 기본을 열거하면 다음과 같다.

- ① 오차가 생기기 어려운 기구, 구조, 재료 및 기기를 사용한다. 열변형해석 및 구조해석을 행한다.
- ② 여러가지 오차요인을 제어계 내부에서 처리되도록 할 것 즉 제어대상과 검출기의 위치를 일치시키도록 한다.
- ③ 제어계 내부에서 처리되지 않는 외란의 영향을 최소화하기 위하여 환경을 제어한다. 진동원·열원과격리 및 차단, 실내온도와 기계온도의 능동적 제어를 행한다.
- ④ 고정도·고신뢰성의 위치검출기를 여러가지의 외란(온도 변화, 진동, 변형, 노이즈 등)으로부터의 영향을 받지않도록 한다.
- ⑤ 잔류하는 오차에서 오차발생 원인과의 상관관계가 존재하거나 재현성이 있는 오차는 제어계에서 보상한다.

2.3 듀얼서보(dual servo)

위치제어의 다이내믹 레인지(dynamic range) 즉 분해능에 대한 행정의 비율이 상당히 큰 경우 대행정과 고분해능은 양립하기 어렵다. 이러한 경우 대행정·저분해능의 구동계와 소행정·고분해능의 구동계를 조합하여 전체 행정에서 고분해능을 유지하도록 하는 것도 있다. 이러한 서보 기구를 듀얼서보라 한다.

3. 안내기구

조정밀위치결정용의 안내기구에 요구되는 조건은 이동방향으로 높은 분해능을 얻도록 마찰력이 적고 스틱슬립(stick-slip)에 의한 마찰력의 변동이 없이 이동이 원활해야하는 것과 이동방향 이외의 자유도를 구속하는 정강성·동강성에 의해 안내정도가 높아야 하는 것이다. 안내오차는 재현성이 있는 것과 랜덤(random)한 것으로 분리할 수 있고 전자의 경우는 어떠한 방법으로도 보상이 가능하다. 행정에 따라 대변위용 안내기구와 미

소변위용 안내기구로 나눌수 있고 필요에 따라 양자가 조합되어 사용되기도 한다.

3.1 대변위용 안내기구

가동부와 고정부 사이의 틈새에 가압유체의 유막을 형성하는 정압베어링, 특히 부하변동 및 공급압변동에 대하여 안전된 구속형 정압베어링(그림 4)는 상기의 조건을 가장 잘 만족시키므로 3차원측정기와 초정밀공작기계를 중심으로 가장 많이 사용되고 있다. 공기와 유정압식에는 제작기상반되는 손실이 있어 용도가 구분된다. 유정압은 강성, 감쇠특성이 우수하지만 발열과 윤활유를 사용해야 하는 난점이 있다. 한편 공기정압은 발열 및 청정도의 점에서 유리하지만 강성이 작아 고강성의 베어링을 만들려면 고정도로의 가공을

해야하며 베어링을 크게 하여야 한다. 그러나 최근에 다공질재료를 이용한 고정도·고강성의 다공질 공기정압베어링이 제작사용되고 있다.

정압베어링은 일반적으로 유체막이 가지는 평균효과에 의하여 안내면의 정도를 상회하는 안내정도가 얻어지지만 특히 고정도의 부품가공을 전제로 하고 있다.

미끄럼안내와 구름안내에서는 정압베어링에 비교하여 안내정도 및 분해능을 얻기 어렵지만, 요구정도, 가격 및 설치공간에 따라 사용되기도 한다. 미끄럼안내는 강성이 크므로 경우에 따라서는 정압베어링 보다 유리하다. 안내정도와는 달리 위치결정의 분해능은 안내기구와 구동계와 위치검출기, 서보계의와의 관계에서 결정되므로 반드시 안내기구에서 원활한 움직임을 필요로 하지 않는 경우도 있다.

안내기구는 운동의 기준이 되는 면을 내부에 가지고 있어서 이것의 정도가 여러가지 방법에 의하여 운동정도에 영향을 미친다. 따라서 이런 면의 제작에 주의해야 하며 또한, 베어링의 강성 부족과 열변형이 원인이 되어 운동정도가 저하되므로 별도로 기준면을 설치하여 안내정도를 확보하는 경우도 있다.

그림 5에서는 안내기구 외에 운동의 기준면이

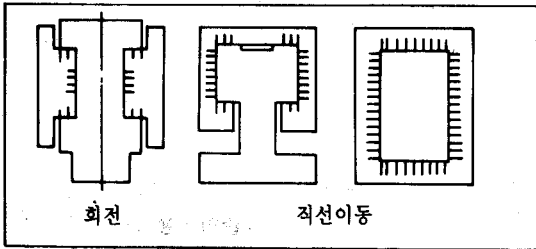


그림 4) 구속형 정압베어링

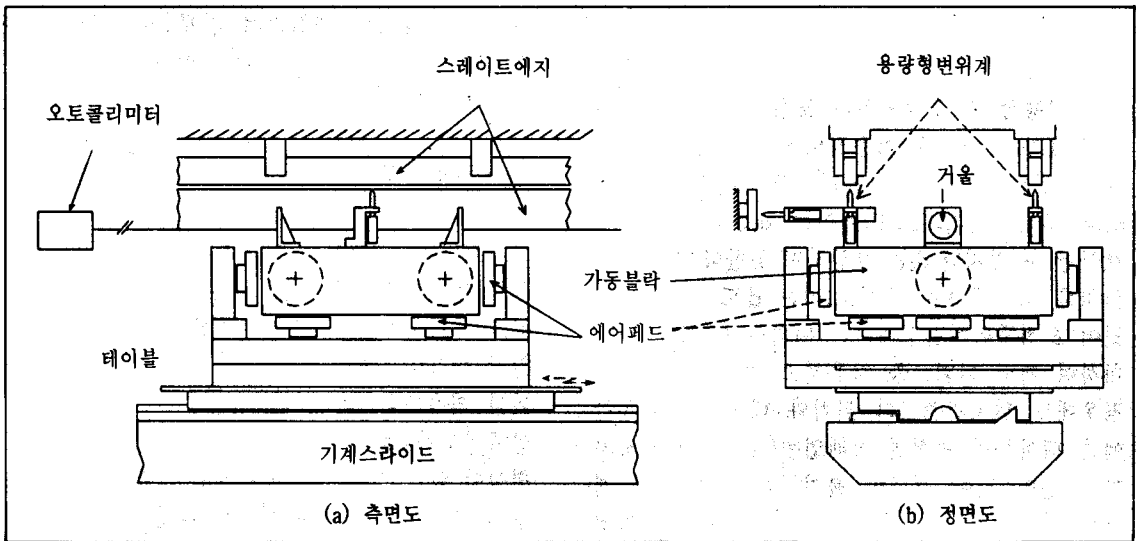


그림 5) 기준면을 별도로 설치한 직선안내기구

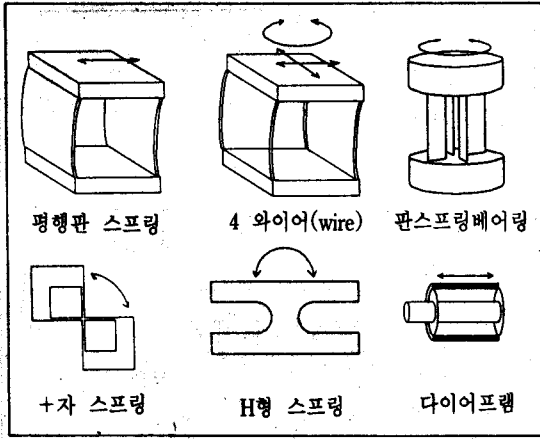


그림 6) 탄성지지안내기구

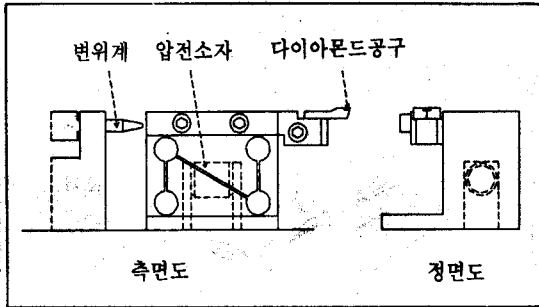


그림 7) 압전소자식 미소공구대

되는 스트레이트에지를 설치하여 이것들과 이송 테이블과의 상대위치를 측정하여 운동오차를 검출하고, 가동블락을 지지하는 7개의 에어패드(air pad)의 공급압력을 조절하여 가동블락의 5자유도 운동오차를 보상하고 있다. 진공중이나 작동유체의 사용이 곤란한 경우 혹은 상대속도가 대단히 커서 마찰발열이 문제가 되는 경우에는 자기부상에 의한 틈새를 유지하는 자기베어링이 사용되고 있다.

3.2 미동안내요소

고분해능의 대변위안내기구를 그대로 미동용으로 사용이 가능하지만 가동범위가 협소한 경우 그림 6에 나타난 탄성변형을 이용한 지지안내가 많이 사용된다.

그림 7은 탄성지지안내와 압전액츄에이터를 사용하여 초정밀선삭가공용 미소공구대로 25nm이하의 분해능으로 절삭깊이의 제어가 가능하다.

4. 액츄에이터와 운동전달기구

초정밀위치결정에서는 외란과 백래쉬(backlash)등의 비선형요소가 존재하여 분해능 및 강성의 저하가 생기기 때문에 액츄에이터와 피구동부간의 감속기구나 전달기구를 뒤흔을 수 있는 한 사용하지 않고 직접연결을 한다. 따라서 직접연결시 저속에서 원활한 이동과 충분한 구동력이 요구된다.

4.1 대변위용 액츄에이터

4.1.1 회전액츄에이터

회전액츄에이터의 대부분은 전기모터이다. 회전운동을 직선운동으로 변환하는 경우에는 모터에서는 매우 높은 분해능이 요구된다. 예로서 이송스크류의 리드가 10mm일때 직선분해능이 10nm가 되려면 모터에서는 10°회전(약 1.3 초)이 필요하게 된다. 이러한 영역에서 전기회전이 가능한 모터의 예로 DC 토크가 있다. 이런 모터는 보통의 DC 서보모터 보다 로터의 직경이 크게, 극수도 많이 하여 저속화 및 고토오크를 실현한다. 모터자신의 축을 가지지 않는 빌터인(built-in) 형으로 직접구동에 적합하다. 가격은 고가이지만 매뉴플레이터의 관절과 군사용으로 많이 사용된다.

일반적인 스테핑모터는 여자전류를 ON/OFF하기 때문에 스테핑각이 결정되어 높은 분해능을 얻기 어렵다. 여기서 여자전류를 연속적으로 변화시킴으로서 1스테핑간의 연속적인 위치결정을 가능하게 한 마이크로 스테핑모터도 있다. 소형으로 1회전당 5만 스테핑을 실현하는 것과 거기에 로터의 직경을 크게하여 150개의 돌극을 설치하고 동수의 싱크로레졸버를 조합하여 1회전당 614,400의 분할이 되는 것이 시판되고 있다. 이 모터로는 개회로제어에서도 높은 분해능을 얻을수 있다.

4.1.2 직선액추에이터

직선운동을 얻는 액추에이터로는 유·공압실린더, 리니어모터, 리니어스테핑모터 등이 있다.

유·공압실린더는 일반적으로 비선형요소의 마찰력이 크므로 초정밀위치결정에는 부적합하지만 피스톤을 유정압베어링의 형태로 하여 스틱슬립의 원인이 되는 고체접촉의 발생을 방지하여 초정밀선반의 공구대 제어에 사용 성공한 사례가 있다. 리니어모터는 비접촉이며 가동부가 경량이므로 공기정압베어링과 조합되어 반도체제조장치에 많이 사용된다. 회전형스테핑모터를 평면상에 전개시킨 것이 리니어스테핑모터로 아직 서브미크론의 분해능에는 도달하지 못하고 있다.

4.1.3 전동기구

회전형액추에이터의 회전운동을 직선운동으로 변환시키는 경우 변환특성이 문제가 된다. 볼스크류의 경우 백래쉬 및 토크변동을 최소화하기 위하여 가공정도가 높은 볼스크류에 적절한 예압을 주어 사용한다.

정압스크류(그림 8)는 너트와 스크류간에 가압 유체막을 형성시키는 것으로 정압베어링과 유사하다. 마찰력이 극히적고 유체막의 평균효과에 의하여 스크류의 가공정도 이상의 이송정도를 얻을수 있어 초정밀위치결정에 적합하다. 정압스크류에는 유압식과 공기압식이 있으며 그들의 장단점은 안내기구에서 설명한 것과 같다.

마찰구동기구도 최근 초정밀위치결정용으로 주목되고 있다. 그림 9는 초정밀선반의 공구위치제어에 사용된 것이며 초정밀공작기계의 테이블의 이송용으로 그리고 반도체제조장치의 스테이지에도 사용되고 있다. (그림 10).

액추에이터와 안내기구를 결합하는 경우 액추에이터 및 전달기구의 운동오차가 안내기구에 전달되지 않도록 주의가 필요하며 필요한 구동력만을 전달시키기 위하여 판스프링이나 와이어(wire), 벨트 등이 사용되기도 한다.

4.2 미동용 액추에이터

전압을 인가하면 물리적인 변형이 발생하는

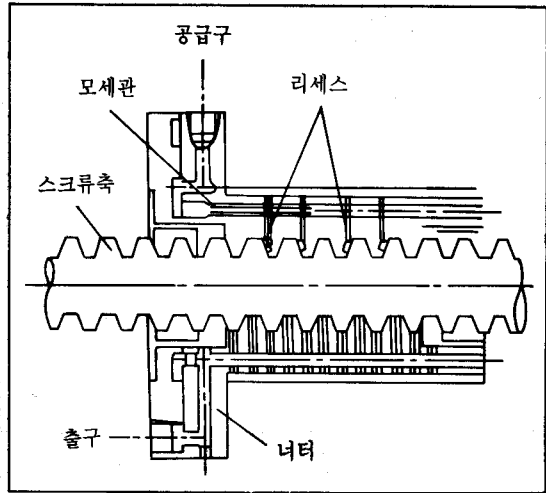


그림 8) 정압스크류

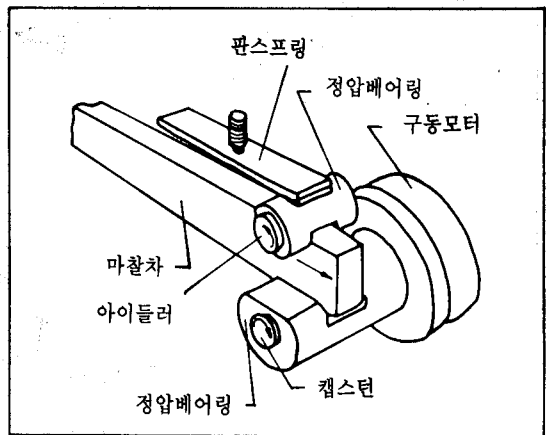


그림 9) 마찰구동기구

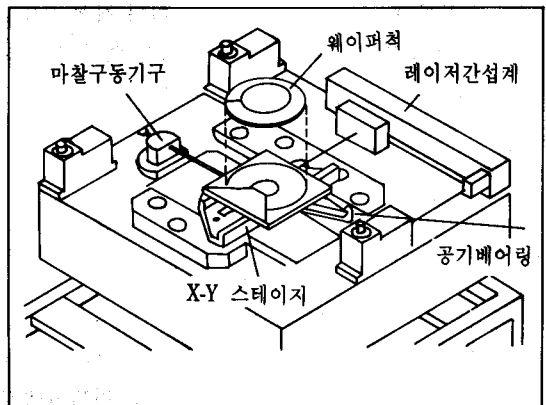


그림 10) 반도체제조용 XY 스테이지

압전소자/전왜소자 액추에이터는 nm 크기의 미소변위가 인가전압에 의하여 용이하게 얻어지므로 미동용 액추에이터로 많이 사용되고 있다. 한개의 소자로 얻을수 있는 최대변위가 작으므로 그림 11과 같이 하여 변위량을 확대한 것도 있다. 바이몰프는 2개의 얇은 소자를 접착시켜 서로 상반되게 변위를 일으켜 소자를 굴절시키는 것으로 구조가 간단하고 경량이며 큰 변위를 얻을수 있지만 강성은 적다.

적층형압전소자는 얇은 소자를 여러개 쌓아놓은 것으로 강성이 크고 큰 추력을 얻을수 있다. 또한 수 kHz 이상의 빠른 응답속도를 가지고 있다. 그림 12은 압전소자를 사용한 반도체제조용 XY0스테이지이다.

4개의 탄성지지 로드(rod)위의 테이블에 3개의 적층압전소자가 부착되어 있고 각 소자가 독립적으로 압축 팽창하여 테이블의 3자유도를 제어한다.

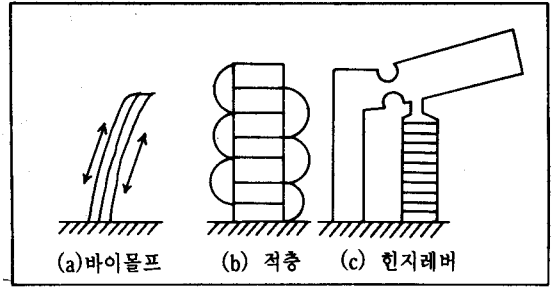


그림 11) 압전소자의 변위확대책

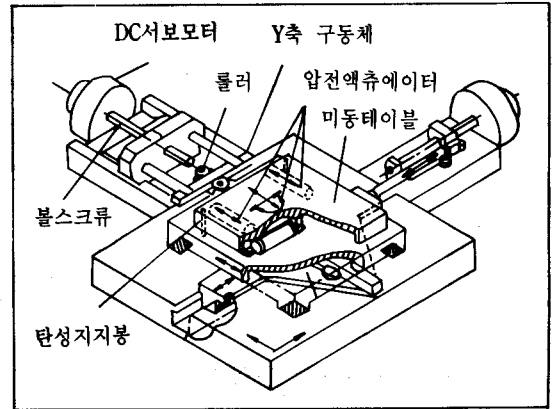


그림 12) 압전액추에이터를 이용한 미동스테이지

5. 위치검출계

초정밀위치결정에서 정도확보를 위해 거의 폐회로를 채택하고 있다. 이와 동시에 위치결정 정도와 분해능은 변위계의 것보다 상회할 수 없기 때문에 변위계는 극히 중요하다. 대변위 변위계로는 안정화된 레이저광의 파장을 기준으로한 레이저간섭계를 사용하며 그 가운데서도 2파장 레이저간섭계가 많이 사용되고 있으며 이 시스템의 분해능은 5 nm, 파장안정도 0.1 ppm(진공중)이나 실제로는 광로 중의 대기의 흔들림, 온습도 및 기압에 따른 대기의 굴절을 변화와 간섭계 자체의 열팽창에 의하여 제약을 받는다. 따라서 사용상에 주의가 필요하다.

그리고 미소변위계로는 차동트랜스, 정전용량형, 와전류형, 반사광량의 변화를 이용한 것, 광의 회절

및 간섭을 이용한 것 등이 있다. 이것들의 측정 범위는 수십 μm 에서 수백 μm 에 이르며 분해능은 수 nm에서 수십 nm이다.

6. 맺음말

이상으로 초정밀위치결정에 있어 기본적인 개념과 구성요소에 대하여 간략하게 서술하였다. 당 실에서는 진행할 초정밀공작기계의 개발의 연구의 과제 중 하나인 초정밀마찰구동기구의 개발을 통하여 초정밀위치결정기술을 정립하고 이 기술을 공작기계의 다른 분야에도 응용할 계획이다.