

◆특집◆ 위치결정 기술

초정밀 위치결정 기술

이찬홍\*

Ultraprecision Positioning Technology

Chan Hong Lee\*

**Key Words :** Ultraprecision Positioning(초정밀 위치결정), Feeding System(이송계), Driving System(구동계), Linear Motor(선형모터), Guide Way(안내면), Position Sensor(위치검출센서), Positioning Control(위치제어), Feeding Unit Design(이송계 설계)

1. 서론

인간의 생활이 윤택해지면서 문화적으로 상상이 가능한 형상을 만들어 본다든가, 산업적으로 복잡한 기하학적인 모양을 장시간 생산을 할 때, 우리는 알게 모르게 정밀한 위치결정기술을 숙련된 기능이나 지식의 형태로 자주 구사하게 된다. 그리고 사회가 발전된 곳은 그렇지 않은 곳보다 위치결정에 대한 관심이 강해서 정확한 위치는 물론 추가해서 정확한 시간까지도 요구하게 된다. 예를 들면 잘 조직된 버스운행 체계이다. 이러한 사회적으로 기본이 되는 위치결정체제를 바탕으로 모든 인간의 생활이 튼튼하고 신뢰성있게 바로 서게 된다.

또한 산업사회에서 위치결정기술의 의미는 첨단 신산업분야에 원천기술로서 파급효과가 매우 커서 광산업분야의 회절격자 제조, 반도체분야의 스텝퍼, 미세가공분야의 미세형상가공기, 측정기기분야의 3 차원 측정기, 항공우주분야의 대형 천체 망원경등에 크게 영향을 미친다. 그리고 일반 산

업기계분야에도 기반기술로서 역할이 커서 과거에 인간에 의해서 행해지던 지루하고 반복적인 작업을 무인자동화시키는데 위치결정기술은 필수적이고, 여기에 하나를 더해서 이송시스템의 고속화를 추구함으로써 인간의 생산성을 여러배 뛰어넘게 하였다.

주위에 존재하는 위치결정기술중에 대표적인 것은 항만에 설치되어 있는 대형 크레인으로서,

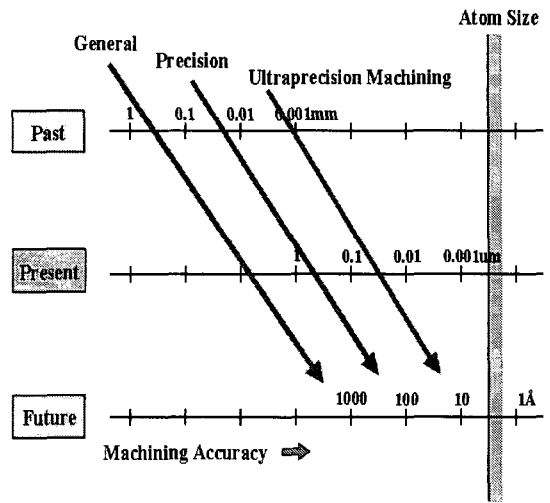


Fig. 1 Machining Accuracy Trend of Past, Present, Future<sup>[3]</sup>

\* 한국기계연구원 자동화연구부

Tel. 042-868-7120, Fax. 042-868-7180

Email : chlee@mailgw.kimm.re.kr

광작기계 설계 특히, 고속 주축시스템 설계와 고속 이송시스템 설계에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

컨테이너를 선박으로부터 하역시키는데 거의 100m 이상을 이동하고 운송트럭에 2cm 이내에 정확히 안착 시킴으로서, 활쏘기로 견줄 때 100m 거리에서 2cm의 과녁을 맞추는 상황과 비교할 수 있다. 좀 더 정밀한 기계로서 공작기계나 측정기에서는 10cm의 이송거리영역에서 0.2 $\mu$ m의 위치정밀도를 유지함으로써 항만용 크레인과의 비교할 때 100m 거리에서 0.2mm의 과녁을 맞추는 상황이라 할 수 있다. 초정밀 가공기에서는 상상을 뛰어넘어서 100m 거리에서 0.02mm의 작은 과녁을 맞추는 위치정밀도라 표현할 수 있다.

본 논문의 테마인 초정밀 위치결정의 정밀도는 판단기준이 시간에 따라 상대적으로 변하기 때문에 정의할 성질의 것은 아니고 다만 현재 많은 분야의 전문가들이 인식하고 있는 정도에 대한 것을 표현하도록 한다. Fig. 1에는 초정밀 가공에 대한 과거, 현재, 미래의 정밀도 추이를 앙케이트 형식으로 일본에서 조사하여 정리한 것으로 이 그림으로 미루어 보아 초정밀 위치결정정도는 0.05 $\mu$ m 이하이어야 함을 미루어 짐작할 수 있다. 그러나 이송거리의 크기에 대한 것을 고려하고 응답한 것은 아니기 때문에 논쟁의 여지는 아직 남아 있다. 그러나 머지않은 장래에 원자의 크기에 접근하는 Å 급 가공기술이 일반화되리라고 예측되기 때문에 이에 따른 초정밀 위치결정기술이 선행 개발되어야 한다.

## 2. 초정밀 위치결정계의 구성요소

위치결정계는 소정의 물체를 계획된 궤적과 속도를 따라서 지정한 위치까지 운동시키는 시스템을 말한다. 이 위치결정계의 구성은 Fig. 2에 총괄적으로 나타내었다. 위치결정의 위치는 평면상일수도 있고 공간상의 한 점일 수도 있다. 이동운동의 방향은 직선과 회전 또는 복합방향이 산업적으로 이용된다. 그림에서 구동기구, 동력전달기구, 안내기구는 통칭하여 이송장치로 불리어 지고 다양한 선택사양이 존재한다. 이송장치는 운동중에 위치가 검출이 되어야 초정밀 위치제어가 가능하다. 위치검출은 접촉, 비접촉식 측정시스템이 사용되고 초정밀 위치결정시스템에서는 주로 레이저응용 비접촉 시스템을 사용한다. 이렇게 해서 획득된 정보는 위치제어계에 전달되어 구동계를 제어하는 데 이용된다.

Positioning Point	Point in Plane	Point in Volume	
Positioning Way	Straight	Straight+Rotational	Rotational
Actuator	Straight		Rotational
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Linear Motor</li> <li>Hydraulic Cylinder</li> <li>Piezo Actuator</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Servo Motor</li> <li>Hydraulic Motor</li> <li>Piezo Actuator</li> </ul>
Power Transfer	Rack & Pinion	Cam	Gear
	Lead/Ballscrew		Hyd./Magnetic Screw
Guide Way	Straight		Rotational
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ball Guide</li> <li>Slide Guide</li> <li>Hyd./Magnetic Guide</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Ball Guide</li> <li>Slide Guide</li> <li>Hyd./Magnetic Guide</li> </ul>
Position Sensor	Straight		Rotational
	<ul style="list-style-type: none"> <li>LVDT</li> <li>Laser Scale</li> <li>Moire Pattern</li> <li>Laser Interferometer</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Rotary Encoder</li> <li>Limit Switch</li> <li>Moire Pattern</li> <li>Laser Interferometer</li> </ul>
Position Control	Open Loop	Semi Closed Loop	Closed Loop

Fig. 2 Components of Positioning System

## 2.1 구동기구

구동기구는 각종 에너지로부터 동력을 만들어 내서 직선운동이나 회전운동 등의 기계적 에너지로 변환시키는 장치를 이른다. 이들 장치들은 입력되는 에너지에 따라 분류가 되는데, 전자기력에 의한 전자 Actuator(회전모터, Linear Motor)와 자계에 의한 고체 Actuator(압전소자, 초차계소자) 그리고 유체압에 의한 유체 Actuator가 있다.

전자기력을 이용하는 회전형 모터는 기계적 용도에 따라 다시 위치제어용, 속도제어용, 토크제어용으로 제품이 나누어져 있어서 적당한 것을 선택해야 제어상에 진동문제가 없다. 이들 제품은 주로 DC, AC Servo Motor, Stepping Motor 형태로 만들어져 있는데, Stepping Motor는 Open Loop 제어에서 위치제어를 하는데 특징이 있으므로 초정밀 위치제어분야에서는 한계가 있고 이 경우에는 Closed Loop 제어가 추천된다. 서보모터는 Closed Loop 제어가 전제가 되지만 위치제어의 정도는 위치검출장치의 분해능에 크게 좌우된다. 회전형 모터는 오래전부터 사용되어 왔지만 계속해서 구성요소 개선이 있었고 설계기술이 발전되어 타 형태의 모터와 비교하여 품질이 안정되어 있다.

Linear Motor는 직선이동을 다른 변환장치 없이 직접 구동할 수 있다는데 우선 특징이 있다. 그외에 고속은 물론 넓은 범위의 속도와 가속도를 구사할 수 있고 고정도의 위치정도를 낼 수 있는

장점이 있다. 또한 진동과 소음이 작고 수리가 용이한 구조를 하고 있고 비교적 설치가 자유로우면서 Compact 한 장점이 있다. 그러나 추력이 큰 모터의 경우에는 발열이 많아 냉각과 주변 구조물의 열변형억제에 신경을 써야 한다. 요사이 반도체장비나 초정밀 X-Y 테이블의 이송용으로 많이 사용되고 있다.

최근 적층 Piezo 와 같은 압전 세라믹재료는 고체 Actuator 로서 성능이 비약적으로 발전해서 나노미터 수준의 분해능을 요구하는 위치결정기구로서 많이 사용되고 있다. 예를 들면 반도체장비, 초정밀측정기, 반사경의 미소자세제어, 타원절삭(Fig. 3) 등에 사용되고 있다. 이 압전소자는 보통의 전자적 Actuator 에 비해서 1/10 정도의 전압에도 구동이 되고 구동의 범위도 수 10 $\mu\text{m}$  에서 0.01 $\mu\text{m}$  까지의 위치결정이 가능하다. 그리고 발생력도 400N/cm<sup>2</sup> 정도로서 크고 응답속도도 10 $\mu\text{s}$  밖에 되지 않아서 진동이나 고속의 위치제어에도 사용된다. 그러나 큰 구동거리를 얻으려면 비선형성이 나타나서 얇은 압전소재를 적층을 해서 사용하는 것이 좋다.

이상의 Actuator 는 각각 장점과 단점을 가지고 있어서 최근에는 다양한 Actuator 를 혼합하여 상호간의 단점을 보완하여 사용하는 경우가 많다.

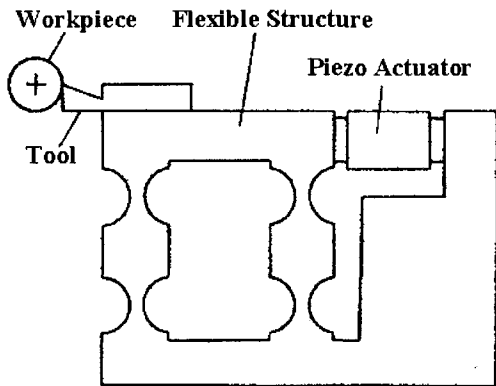


Fig. 3 Driving System with Piezo Actuator

## 2.2 동력전달 기구

구동기구에서 만들어진 동력을 말단의 작업운동으로 변환시키기 위해서 지금까지 많은 기구들을 사용하여 왔다. 역사적으로 볼 때 전달 메커니즘을 단순화하는 시도가 주류를 이루고 있다. 동력전달 기구로서 대표적인 것은 크게 5 가지로 나눌 수 있다. Leadscrew, Ballscrew, 정압나사, Magnetic Screw, 마찰구동기구가 있다.

Leadscrew 는 미소 Lead 가 가능하고 감쇠성이 커서 진동을 방지하고 고강성인 관계로 외부하중에 별로 무리가 없기는 하지만 초정밀 위치제어에는 높은 마찰력때문에 불리하다. 그래서 고정밀 공작기계 등에서 이송기구로서 가장 광범위하게 사용되고 있는 볼스크류를 제작정도의 한계에도 불구하고 Closed Loop 제어에 의한 초정밀 위치제어에 여전히 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 일반 공작기계에서와 같이 볼스크류를 이송테이블에 직접 연결하면 볼스크류 자체의 가공오차 및 조립오차에 의해 볼스크류 리이드와 동기하는 주기적 오차가 테이블의 운동정도에 미크론 수준으로 영향을 미친다. 그래서 오차를 차단할 수 있는 너트 커플링을 사용하게 된다.

정압스크류의 경우에는 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 볼스크류에 있어 볼에 의한 마찰력의 변동을 줄이고 더불어 볼스크류의 반경방향 공차를 흡수할 수 있는 장점을 지니고 있어 초정밀 위치결정계에 적합한 특성을 지니고 있다. 그러나 너트의 가공 및 보상요소의 삽입이 상대적으로 어렵고 축방향 강성을 높이기 위해서는 스크류부의 직경이 매우 커져야 하는 단점을 지니고 있어 상용화에 어려움이 있다.

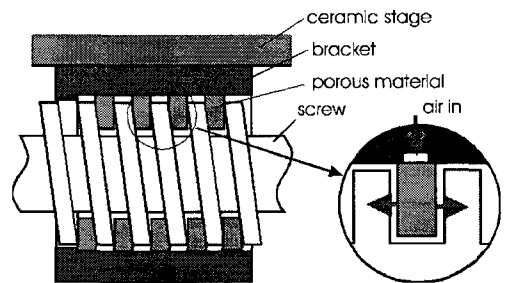


Fig. 4 Aerostatic Screw

마찰구동기구는 볼스크류에서 커플링을 이용한 경우 오차의 감소에도 불구하고 이송방향의 강성을 다소간 희생해야 하는 단점이 있어서 이 문제점을 보완하기 위해서 개발이 되었다. 이 기구는 이송방향의 강성을 유지하면서 1 회전당 이송량 즉 피치의 조절이 용이하여 미소 이송분해능면에서 유리하고, 이송용 Bar 의 정밀가공이 뒷받침이 될 경우 초정밀 이송에 많은 장점을 지니고 있다. Fig. 5 에는 트위스트 롤러방식의 마찰구동기구의 사진으로서 Semi Closed Loop 제어를 이용할 경

우 10nm 의 분해능까지 안정적인 성능을 나타내고 있어서 타 기구에 비교해서 나노미터대의 분해능을 상대적으로 쉽게 도달해서 초정밀 위치결정계에 이용할 수 있다.

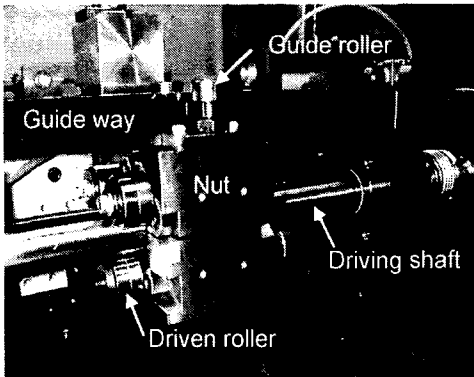


Fig. 5 Friction Drive System

### 2.3 안내기구

안내기구는 이송테이블의 운동정도를 책임지는 구성요소로서 운동방향을 제외한 5 자유도에 대한 자세변화가 없이 정밀하게 잘 구속되어야 한다. 이 운동정도는 크게 안내기구의 마찰특성과 부하능력에 크게 좌우된다. 초정밀 위치결정계에 사용되는 기구로는 동압안내면, 구름안내면, 정압안내면, 자기부상 안내면 등을 들 수 있다. 초정밀 위치결정계에서 요구되는 안내면의 특성으로는 스틱슬립 등의 불연속한 이송작동이 없어야 하고, 직진정도와 Pitching, Rolling, Yawing 등의 각운동정도가 좋아야 하며, 진동이 적고, 구조상 충분한 강

성을 가지면서 반복정도의 재현성이 좋아야 한다.

Table 1 에는 안내면의 5 가지 특성을 비교 정리하였다. 동압안내면은 상당히 오랜 기간 사용되어 온 안내형식으로 구조가 간단, 컴팩트하며, 강성이 높고, 정지시의 안정성 및 열적 신뢰성이 높으며, 가격이 낮다는 장점이 있다. 단점으로는 정, 동마찰계수간의 차가 크고 스틱슬립에 의해 위치결정 정도의 한계가 있으며 저속시의 운동이 상대적으로 원활하지 못한 점등을 들 수 있다. 구름안내면은 감쇠성이 나빠 가공면의 조도를 얻기 어렵다는 단점을 지니고 있으나 일부 초정밀가공기 및 반도체 스테퍼 등에서는 고정도의 로울러를 이용한 구름안내면을 채택한 경우도 있다. 단, 이 경우에 구동계에 볼스크류를 사용하면 양 쪽의 구름접촉에 의해 감쇠성이 악화되므로 구동계에는 미끄럼접촉을 하는 리드스크류가 채용되고 있다. 공기정압안내면은 공기막의 평균화효과에 의해 고정도가 가능하고 스틱슬립 및 자체 진동이 발생하기 어려우며 열적 안정성이 좋고 배기회로의 구성이나 주위오염의 염려가 없다는 등의 장점에 의해 초정밀가공기에 많이 이용되어 왔으나 요구정도가 더욱 엄격해지고 가공기가 대형화됨에 따라 저장성, 저감쇠성 등의 단점때문에 활용빈도가 작아지고 있다. 유정압안내면은 고강성 및 고감쇠성의 특징을 지니고 있으며 주축에 비해 상대속도가 작고 오일 쿨러의 온도조절능력 향상 등에 의해 발열특성도 주축과는 달리 크게 문제시 되지 않고 있어 공기정압안내면을 대신하여 초정밀가공기에 활용이 증가하는 추세에 있다.

추가로 자기부상 안내기구는 비접촉으로 자기

Table 1 Characteristics Comparison of Guide Way Units

	동압안내면	구름안내면	공기정압안내면	유정압안내면
운동정도	틈새, 유막 등의 부상으로 안정성 결여	전동체에 의한 불규칙 오차 존재	평균화효과에 의해 고정도	평균화효과에 의해 고정도
부하용량	정밀한 용도에서 면압 0.5kg/cm <sup>2</sup> 이하	동압보다 높으나 수명에 제한이 있음	공급압력에 의해 제한	부하용량이 큼 (공급압력, 치수조절이 용이)
정강성	일정방향 하중에 대해 높음	일반적으로 높음	매우 낮음	매우 높음
동강성	마찰에 의한 감쇠력이 강함	감쇠력은 작으나 강성으로 보완	감쇠력이 작고 동적하중에 약함	유점성에 의해 감쇠력 크고 우수
마찰력	경계유효상태이므로 매우 큼	마찰계수 0.01 정도	공기이므로 작음	비교적 작음 (유점도에 의존)
위치제어	Submicron 어려움 (저속시 Stickslip)	Submicron 용이	Submicron 용이 구동계 성능 중요	Submicron 용이 구동계 성능 중요

장에 의해 테이블이 부상한 형태로서 윤활이 불필요해 주위를 오염시키지 않아서 청정도가 높은 분위기에서 많이 사용되고, 특히나 진공인 상황에서 사용이 가능하다. 또한 테이블의 부상중에도 동적강성과 감쇠능력을 가변할 수 있는 장점이 있다. 그러나 강한 자력때문에 주위에 철성분의 부품은 조심해야 하고 철성분의 칩은 안내면에 흡착되지 않도록 커버를 해야 한다.

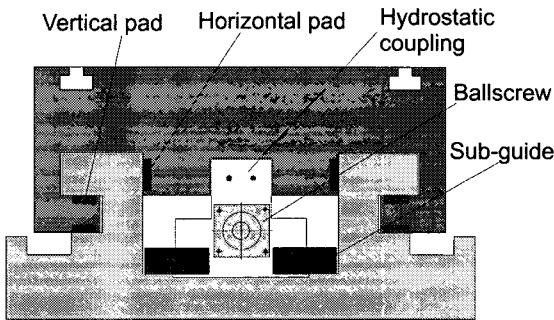


Fig. 6 Guide Way with Hydrostatic Guide Way

### 3. 초정밀 위치결정계의 제어

실제의 위치결정계에서는 이송운동의 상태에 따라 진동, 발열, Stick-Slip, 관성력 등의 각종 외란이 발생한다. 더욱이 외부의 부하가 변동하는 경우 요구하는 위치정밀도를 확보하지 못하는 상황이 벌어진다. 이러한 영향을 최소한으로 억제하고 고정도의 위치정밀도를 유지하기 위해서 여러가지 제어방법이 제시되고 있다. 이 방법들은 안정성의 확보, 과도응답 특성의 개선, 정상특성의 개선, 외란억제, 강인제어성 등을 추구한다.

제어의 방식에는 크게 Open Loop 제어, Semi Closed Loop 제어, Closed Loop 제어로 나눌 수 있는데 Open Loop 제어방식은 구축가격이 저렴하고 제어가 안정한 편이지만 위치결정정도가 낮아서 초정밀 위치결정용으로는 부적합하다. Semi Closed Loop 제어방식은 최종 운동물체의 위치를 직접 검출해서 Feedback 하는 것이 아니고 동력전달기구의 한 부분 위치를 검출하므로 위치결정정도는 이송계의 구조에 따라서는 나쁠 수도 있다. Closed Loop 제어방식은 초정밀 위치결정을 위해서 필수적으로 구축해야 하지만 제어가 쉽게 불안정해지는 특성이 있으므로 파라미터 선정에 주의가

필요하다. 제작가격은 Feedback 에 관련된 주변장치 때문에 비싸지게 된다.

상기의 제어방식중에 Open Loop 제어를 제외한 방식들은 위치제어를 할 때 PID 제어기법을 많이 사용하게 된다. 이때 성능목표는 목표치에대한 추종성, 외란억제성, 검출잡음의 영향도 등을 판단기준으로 삼는다. 그래서 Closed Loop 방식의 제어구성과 PID 제어기법을 사용하면 초정밀 위치결정 제어에서 좋은 효과를 거둘 수 있다.

### 4. 위치결정계의 문제점과 요인

위치결정계에서 요구하는 정밀도를 얻기 위해서는 오차의 요인분석과 이에 따른 대책이 필요하다. 오차의 요인은 물리현상별 오차분석과 요소부품별 요인분석을 통하여 파악할 수 있다. Fig. 7에는 오차에 영향을 주는 물리현상별 오차요인을 정리하여 나타내었다.

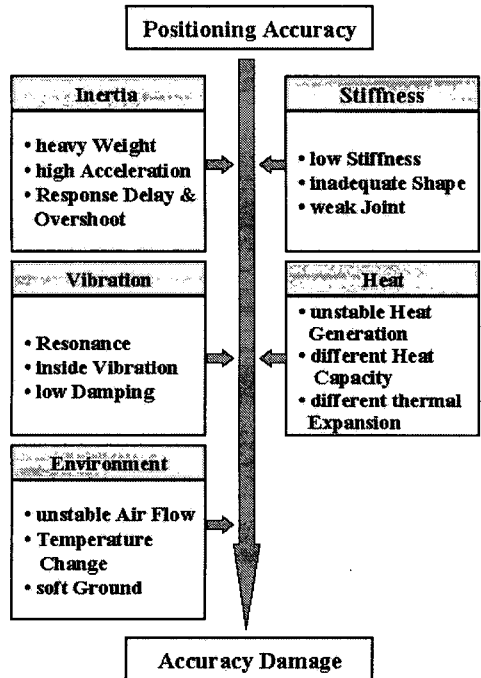


Fig. 7 Damage Factors of Positioning Accuracy

이송계는 속도가 빨라지면서 이송테이블의 무게에 따른 관성을 고려해야 하고 저속인 경우에도 구동모터의 토크와 관련해서 과대한 관성은 진동, 응답 지연, Overshoot 등을 야기시키므로 경량화 구조에 신경을 써야 한다. 이송계 구조물은 질량과 강성을 가지고 있으므로 외부로부터 갑작스런 이송 감가속이 있게되면 구조상의 공진현상이나 판진동이 발생한다. 그리고 구조내부의 감쇠성이 부족하면 진동이 즉시 사라지지 않고 잔여진동이 계속되어 위치정밀도에 손상을 입힌다. 이송계의 강성은 빠른 응답성을 위해서 고강성이어야 한다. 주된 요인으로서는 결합부의 강성저하 현상을 들 수 있다. 이송계의 내적 외적 열환경은 항상 안정된 분위기가 아니므로 구조물의 열용량이 큰 재료를 사용해서 약간의 온도변화에는 문제가 없도록 하고, 또한 열팽창계수가 되도록 작은 재료를 선택해서 장시간에 걸쳐 위치정밀도가 보증될 수 있도록 한다.

### 5. 초정밀 위치결정계의 적용 예

현재 초정밀 위치결정계는 도달 위치정밀도만을 가지고 판단한다면 정밀 공작기계에 사용하는 위치결정계보다 상당한 정도의 기술이 내포된 것으로 보아야 한다. 그러나 산업사회에 적용되는 위치결정계는 대상기계의 조건에 따라 용도별로 위치정밀도용, 이송속도용, 감가속도용, 토크용 등 국부 특성만을 목표치로 정하고 제어되기 때문에 위치결정계 전체기술로는 유독 초정밀 위치결정계의 기술만이 최고라고는 말하기 어렵다. Fig. 8 의 고정밀 공작기계는 이송거리 700mm 에 대해서 2 $\mu$ m 의 위치정밀도 성능을 가지고 있는데, 부하로 작용하는 절삭력의 변동이 매우 심하고, 이송중량과 감가속도의 변동폭도 작업자에 따라 심하게 달라지며, 고속이송으로 인한 외란, 열변형과 관성력 하에서 목표 위치정도를 실현하는데 전체적으로 상당한 기술수준이 요구된다. Fig. 9 에는 전자현미경을 보이고 있는데 여기서는 이송거리 100mm 에 대해서 위치정밀도 0.2 $\mu$ m 의 성능을 나타낸다. 그러나 이 장비에서는 어떠한 외력도, 이송중량의 변화도 거의 없는 조건이다. 전자현미경에서는 빔도 전자기적으로 이송제어할 수 있는데 이송분해능은 최소 3nm 정도이다. Fig. 10 에는 반도체 노광용 Stepper 를 나타내고 있다. 이장비는 이송거리

200mm 에 대해서 20nm 위치정밀도의 성능을 나타낸다. 이 장비의 특징은 반도체를 생산하는 전 공정 장비인 만큼 위치정밀도는 물론 시간단축이 중요하다.

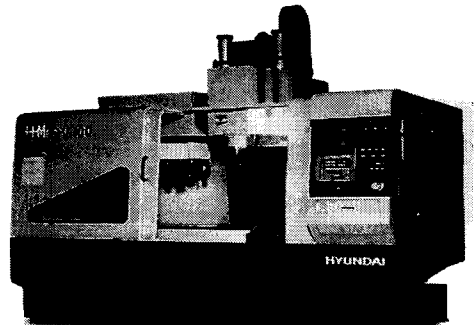


Fig. 8 Positioning Units for Machine Tools

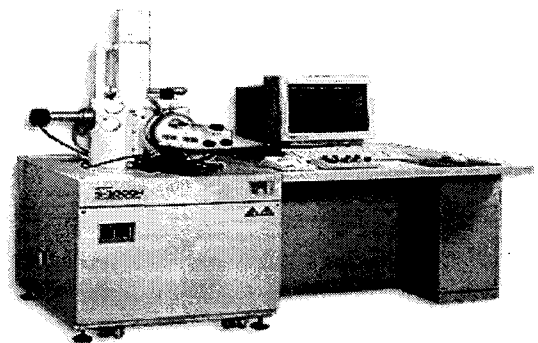


Fig. 9 Positioning Units for SEM

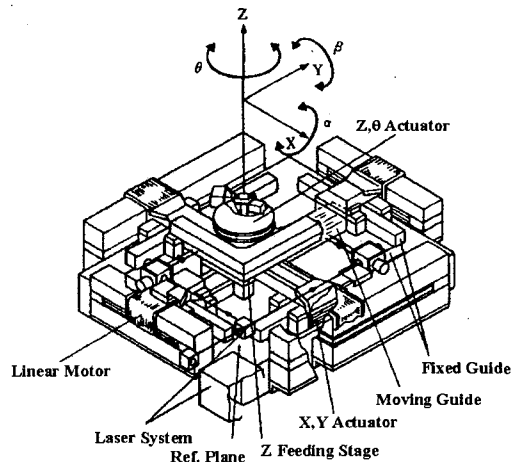


Fig. 10 Positioning Units for Stepper

## 6. 결론

초정밀 위치결정 기술이 신산업사회에 미치는 과급효과를 설명하고 현재 도달하고 있는 위치결정정도를 수준별로 나누어 표시하였다. 그리고 일반적으로 여러분야의 기술자들이 인식하고 있는 초정밀 위치결정정도를 서술하였다. 초정밀 위치결정계의 구성요소를 구동기구, 동력전달기구, 안내기구, 위치검출기구로 나누어 선택 가능한 요소들을 소개하고, 이들간의 성능과 특성을 비교하였다. 또한 초정밀 위치결정계의 제어를 위한 다양한 피드백 제어방식과 제어기법의 장단점을 소개하였다. 그리고 위치결정계의 정밀도에 손상을 주는 물리적 요인과 해당 부품을 설명하였다. 끝으로 초정밀 위치결정계를 사용하고 있는 장비들을 소개하고 사용조건 및 위치정밀도의 성능을 나타내었다. 위치결정기술에서 중요한 것은 가장 간단한 위치결정계의 구조, 높은 위치결정 정밀도, 저렴한 비용이다.

## 참고문헌

- 井澤實 外, “精密位置決め技術-その設計, テクニッカー,” 工業調査會, 1989.
- 大塚二郎, 坂戸啓一郎 “超精密位置決め機構設計,” 工業調査會, 1996.
- (社)精密工學會超精密位置決め専門委員會, “次世代超精密位置決め技術,” フジテクノシステム, 2000.
- N. Taniguchi, “Nanotechnology,” Oxford University Press, 1996.
- Thrusty, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
- Planetary Roller Screws, Technical Product Information Series RGT INA Corp, 1986
- John H.Rumbarger.George Wertwijn; “First Design Information on Hydrostatic Lead Screw,” Machine Design, April. 11, 1968.
- M.Shiraishi, “Geometrical Adaptive Control in NC T. Operation,” Trans. ASME, Vol. 106, 1984.
- David Henderson, “A New Inchworm Motor For Industrial Nanopositioning Applications,” ASPE, Vol. 12 pp. 215-218, 1995.
- A. Kanai, S. Sano, J. Yoshioka and M. Miyashita, “Positioning of a 200 kg carriage on plain bearing guideways to nanometer accuracy with a force-operated linear actuator,” Nanotechnology, No. 2, pp. 43-51, 1991.
- A. Kanai, M.Miyashita, T. Hatai and M. Yoshida, “Friction Characteristics of Linear Plain Bearing Guideway and Motion Controllability of Numerically Controlled Slide,” Proc. of ASPE 1996 Annual Meeting, pp. 614-617, 1996.
- A. H. Slocum, P. A. Scagnetti, N. R. Kane and C. Brunner, “Design of self-compensated water-hydrostatic bearings, Precision Engineering, Vol. 17, No. 3, pp. 173, 1995.
- P. Hölster and J. Jacobs, “Theoretical analysis and experimental verification on the static properties of externally pressurized air-bearing pads with load compensation,” Tribology International, Vol. 20, No. 5, pp. 276, 1987.
- P. Scagnetti, A. H. Slocum and N. R. Kane, “Low Noise Fluid Circuit Design Method for Hydrostatic Bearing System, Proc. of ASPE, Annual Meeting, pp. 57, 1994.
- E. Blondeel and R. Snoeys, “Aerostatic bearings with infinite stiffness,” Annals of CIRP, 25-1, pp. 291, 1976.