한국정밀공학회지 제 17 권 제 12 호 (2000 년 12 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 12, December 2000.

◆특집◆ 위치결정 기술

볼스크류를 이용한 정밀 위치결정기술

박천홍*, 이후상*

Precision Positioning Technologies with Ballscrew

Chun Hong Park*, Hu Sang Lee*

Key Words : Ballscrew(볼스크류), Feeding mechanism(이송기구), Precision positioning(정밀위치결정), Positioning accuracy(위치결정정밀도), Motion accuracy(운동정밀도), Error compensation(오차보정)

1. 서론

지정한 제품을 원하는 위치에까지 운반하는 단순한 물류의 이송기술에서부터, 이송되는 제품의 형상을 측정하거나 또는 특정한 형상을 가공하기위해 이송과 가공을 반복하는 이송기술에까지 위치결정기술은 산업기술에 폭 넓게 사용되어지고 있다.

미크론단위 이하의 오차를 기본 목표로 하는 정밀이송기술은 비교적 최근까지 공작기계, 측정기, 가전분야 등을 중심으로 발전되어 왔으나, 반도체, 광통신을 중심으로 한 정보산업용 제조장비 시장의 급격한 확대와 더불어 최근에는 이들 분야에의 적용을 위한 다양한 형태의 기술로 변화되어 발전되고 있다.

이송장치는 기본적으로 이송대상물체의 자중 및 외부하중을 지지하며 상대운동을 하는 안내기구, 안내기구에 동력을 전달하는 이송기구, 그리고 이송기구와 연결되어 동력을 발생하고 안내기구의 위치를 점검하는 제어기구의 3 가지 요소로 구성되어 있으며, 이들 요소의 적정한 배합에 의해 정밀이송기술을 달성할 수 있다.

이들 요소 가운데 이송기구는 위치결정정밀도에 가장 영향을 크게 미치는 요소이며, 따라서 최근의 정밀도 향상요구에 대해서도 가장 민감하게 반응하며 변화하고 있는 기술분야라고 할 수 있다.

이에 따라 볼스크류, 랙과 피니언 등으로 대표되던 이송기구는 고정밀화를 겨냥한 마찰구동기구[1],[2], 압전소자 응용기구[3],[4], 정압스크류[5],[6] 등으로 다양해지고 있으며 최근에는 모터와 이송기구의 기능을 병행할 수 있는 리니어모터[7],[8]도 정밀도가 한층 향상되면서 실용화기술로 각광을 받고 있다.

이 가운데 볼스크류는 제 2 차 세계대전중 이미 실용화되었을 만큼 오랫동안 이용되어온, 대표적인 이송기구라고 할 수 있다. 볼스크류는 기본적으로 그 제작(가공)정밀도에 의해 위치결정정밀도가 결정되는 단점을 지니고 있다. 그러나 높은 기계적 효율 및 토크전달특성의 우수성 그리고 낮은 코스트와 장기간에 걸쳐 얻어진 신뢰성 등의 장점과 더불어, 지속적인 생산기술의 발전으로 나노미터대의 요구정밀도를 만족시켜오고 있으며, 현재도 정밀위치결정기구의 약 50%를 차지하고 있을 정도로 여전히 많이 응용되고 있다.

본 원고에서는 고정밀 위치결정장치의 구성을 위해 파악해야 할 볼스크류의 일반적인 특성과, 그 특성을 고려하여 고정도화를 달성하기 위한 고성능화 연구개발 동향에 대해 살펴보고자 한다.

* 한국기계연구원 공작기계그룹
Tel. 042-868-7117, Fax. 042-868-7180
Email pch657@mailgw.kimm.re.kr
초정밀가공기, 고정밀연삭기 등의 공작기계 및 반도체장비용 요소기술분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

2. 볼스크류의 특성

앞서 언급했듯이 위치결정장치는 안내기구, 이송기구, 제어기구의 세 가지 요소로 구성된다. 이들 요소가 이상적으로 제작되었을 경우, 안내기구는 직선운동정밀도에, 이송기구 및 제어기구는 위치결정정밀도에 각각 독립적으로 영향을 미치게 된다. 그러나 실제의 경우 가공오차, 조립오차 등에 의해 이러한 이상적인 운동상태를 얻는 것은 불가능하며 안내요소의 가공정밀도 및 마찰특성, 제어요소의 운동특성 등이 결합되어 영향을 미치게 된다. 본 장에서는 먼저 볼스크류의 특성에 대해 간략히 살펴보기로 한다.

2.1 제작/조립에 의한 정밀도

2.1.1 위치결정정밀도

그림 1 은 볼스크류의 가공상태에 따라 발생하게 되는 리드오차를 정의한 것이며, 표 1 은 이에 따른 볼스크류의 등급별 오차기준을 정밀급 부분만 발췌하여 나타낸 것이다[9].

볼스크류 구동시 내외부의 마찰에 의해 발생하는 열변형은 위치결정정밀도를 저하시키게 되며 이 경우 볼스크류는 팽창하게 되므로 안내요소는 목표위치를 초과하여 오차를 갖게 된다. 이러한 현상을 감안하여 볼스크류에 미리 예상되는 열팽창량만큼의 부(-)의 방향 오차인 누적기준리드(specified travel)를 인위적으로 주어 가공하게 되며 그 양은 사용자의 주문에 의한다. 또한 이에 따라 실제 가공된 볼스크류의 위치결정궤적의 평균치와 누적기준리드와의 차이를 누적대표리드오차(E)라고 하며 해당 볼스크류를 오차 보정 없이 사용할 경우 얻을 수 있는 위치결정정밀도를 나타내는 값이다. 등급이 정밀급일수록 또한 유효 나사부 길이가 짧을수록 그 양은 작아진다. 한편 위치결정궤적의 평균치를 기준으로 궤적은 길이방향위치에 따라 편차를 갖게 되며 이를 변동(e)이라고 한다. 따라서 NC 보정과 같은 오차보정을 고려할 경우에도 일반적으로 변동값보다 작은 위치결정정밀도를 기대하기는 어렵게 된다. 정밀 위치결정기구를 설계하는 경우 이상의 제작특성 및 표 1 의 등급, 길이별 오차값을 고려하여 목표정밀도에 적절한 볼스크류를 선정할 필요가 있다.

2.1.2 운동정밀도

볼스크류의 조립은 안내요소의 레일과 평행상태가 되는 것을 목표로 하고 있으나 일반적으로는 수미크론대 이상의 조립오차를 갖게 된다. 또한 볼스크류의 가공에 있어서도 수미크론대의 동심도

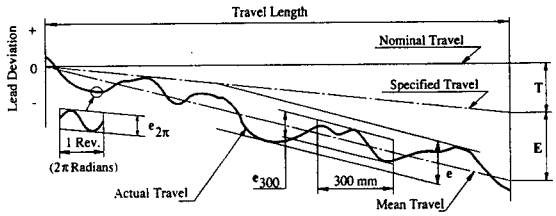

Fig. 1 Definition of lead accuracy

Table 1 Classified accuracy grade of ballscrew

Travel length		C0		C1		C2	
Over	Incl.	±E	±e	±E	±e	±E	±e
-	100	3	3	3.5	5	5	7
100	200	3.5	3	4.5	5	7	7
200	315	4	3.5	6	5	8	7
315	400	5	3.5	7	5	9	7
400	500	6	4	8	5	10	7
500	630	6	4	9	6	11	8
630	800	7	5	10	7	13	9
800	1000	8	6	11	8	15	10

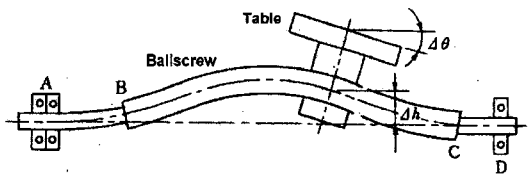

Fig. 2 Attitude error caused by the runout of ballscrew

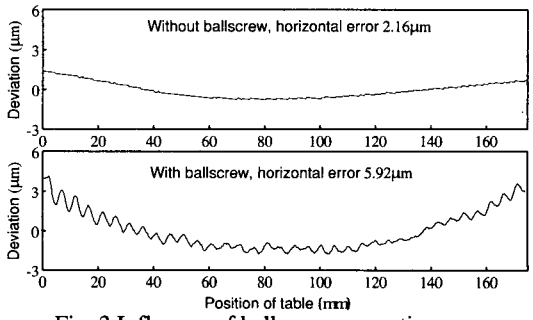

Fig. 3 Influence of ballscrew on motion error

오차가 존재하게 된다. 이러한 오차들은 볼스크류의 회전시 런아웃오차로 나타나게 되며 이 런아웃 오차는 그림 2 에서와 같이 안내기구의 자세오차에 영향을 미치게 된다. 직선, 각운동에 대한 전체적인 오차를 증가시킬 뿐 아니라 안내용 테이블을 볼스크류 회전수와 같은 주기, 즉 리드간격과 같은 주기로 가진하여 동일한 주기를 갖는 오차파형을 유발한다. 그림 3 은 레일만에 의한 테이블의 고유운동오차와 그 테이블을 볼스크류로 구동했을 경우의 운동오차를 비교한 예이다.[10] 볼스크류의 리드(5mm)와 주기가 일치하는 리드동기오차성분이 실리고 있으며 전체적인 운동정밀도도 테이블만의 운동정밀도에 비해 악화되어 있다. 이러한 오차성분들은 정량적인 크기는 테이블의 강성과 볼스크류의 굽힘강성의 비에 의해 결정된다. 따라서 테이블의 강성을 고강성화하기 어렵고 서브미크론 대의 오차가 문제시될 수 있는 정밀위치결정장치의 경우에는 볼스크류의 가공 및 조립오차에 의한 영향을 충분히 고려해야 할 필요가 있다.

2.2 마찰 및 발열

일반적으로 볼스크류의 마찰계수는 약 0.002~0.004 라고 알려져 있다. 그러나 실제로는 볼스크류의 회전속도, 윤활방식 및 너트의 예압 등에 따라 마찰 및 발열특성은 크게 변화하게 된다.

그림 4 는 너트 예압량에 따른 회전속도와 온도상승의 관계를 측정한 결과[11]로, 회전속도의 증가에 따라 온도상승은 증가하며 예압량이 클수록 온도상승량도 커짐을 알 수 있다.

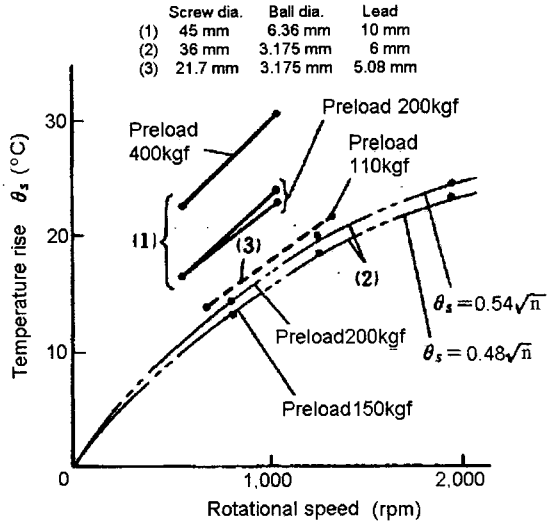

Fig. 4 Relationship between rotational speed and temperature rise

그림 5 는 윤활방식에 따른 회전속도와 동마찰토크의 관계를 실험한 결과[11]로, 그리스의 경우 회전속도의 증가에 따라 점성저항의 증가로 동마찰토크가 증가한다. 그러나 윤활유의 경우에는 저속시에 동마찰토크가 크다가 고속시에는 거의 일정한 동마찰토크를 갖게 된다.

그림 4 와 그림 5 로부터 회전수의 증가에 따라 온도는 상승하나 동마찰토크가 그에 비례하여 증가하지 않는 것은 볼스크류에서의 온도상승은 볼의 마찰보다는 나사부의 홈과 볼간의 상대적인 미끄러짐에 크게 영향을 받기 때문이다.

2.3 탄성변형

볼스크류를 이용하여 서브미크론대의 정밀위치결정기술을 실용화하는 경우, 예상치못한 장애

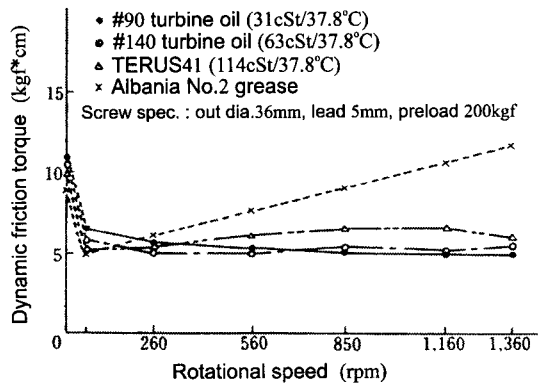

Fig. 5 Influence of lubrication on dynamic torque

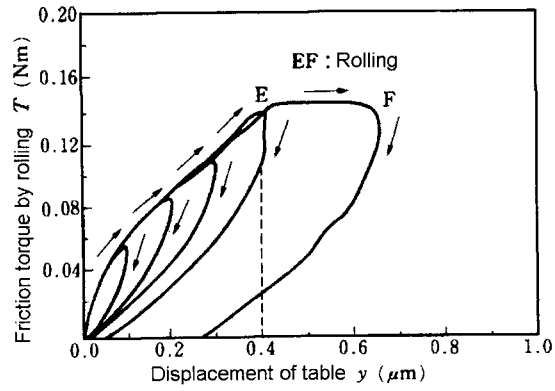

Fig. 6 Non-linear characteristics of rolling element

물로 등장하는 것이 너트내 볼의 탄성변형특성이다. 그림 6 은 구름베어링 안내기구와 볼스크류를 이용하여 미소영역의 위치결정을 수행할 때의 변위대 마찰특성을 실험한 결과[12]로, 약 0.4μm 까지는 너트내 볼의 탄성변형에 의해 변위가 진행되며 그 보다 변위가 큰 영역이 되면(구간 E-F) 구름운동이 시작되는 것을 볼 수 있다. 이러한 비선형 특성의 요인으로는 구름베어링, 볼스크류 너트, 볼스크류 지지베어링 등에서의 볼의 탄성변형을 고려할 수 있으나, 실제로는 볼스크류 너트내의 볼의 탄성변형이 90% 이상의 영향을 준다고 알려져 있다. 볼의 탄성변형에 의한 효과는 오히려 미소이송 분해능을 향상시킬 수 있는 요인으로 작용한다. 그러나 이러한 탄성영역과 일반적인 구름영역 간에는 큰 특성차이가 존재하므로, 일반 영역에서 적용하던 제어기법을 탄성영역내에 그대로 적용하면 시스템의 발산에 따른 공진현상 등이 발생하는 문제점이 있다.

2.4 축방향 강성

이송기구 축방향 강성의 저하는 전체 이송제어계의 고유진동수를 저하시키고 위치결정시의 응답속도를 저하시키는 등의 문제점을 유발시킨다. 볼스크류 이송계의 강성은 스크류강성, 너트강성 및 지지베어링강성의 직렬 조합으로 나타나므로 그 가운데 가장 강성이 작은 요소의 영향을 크게 받게 된다. 특히 스크류의 강성은 다른 강성값보다 일반적으로 작은 값을 갖게 되므로 이송계의 강성을 좌우하게 된다. 스크류의 강성은 볼스크류의 지지방식에 따라 변하게 되며, 고정-고정의 지지구조를 이용하는 경우 고정-지지구조에 비해 적어도 4 배이상의 강성을 얻을 수 있다. 또한 고정-고정의 지지구조는 정밀도 면에서도 유리하다. 그러나 마찰저항이 증가하기 쉽고, 상대적으로 조립정밀도에 유의해야하는 어려움도 있으므로 이송계의 요구정밀도를 고려한 선정과 설계가 필요하다.

3. 볼스크류 이송계의 고정도화 기술동향

3.1 위치결정오차의 보정

볼스크류 이송계에 있어 대부분의 위치결정오차는, 전 장에서 설명된 특성들이 전체이송장치에서의 마찰력 변동 및 발열과 결합되어 발생된다. 이러한 위치결정오차의 보정방법으로는 볼스크류의 예장력 조정에 의한 보정, 냉각에 의한 열변형의 보정, NC 제어기상에서의 보정, 피드백장치에 의한 보정 및 미세구동기구의 부가에 의한 보정 등을 고려할 수 있으며 각 보정방법의 기술현황을 요약하면 다음과 같다.

3.1.1 예장력을 이용한 보정

볼스크류의 조정에 의한 방법으로는 먼저 예상되는 열변위량에 맞추어 누적기준리드를 설정하고, 누적기준리드 및 누적대표리드오차에 해당하는 예장력을 가함으로써 보정하는 방법이다. 그림 7 은 예장력을 가하지 않은 경우의 위치결정오차량을 기준으로 예장력을 주어 위치결정오차를 측정한 예[11]이다. 볼스크류의 열팽창을 내부응력의 변화로 흡수하여 정밀도가 향상됨을 보이고 있다. 단, 그림에서 알 수 있듯이 사용회수가 반복됨에 따라 양단 지지베어링에서의 마찰, 발열량 증대 등에 의해 주어진 예장력이 감소하게 되므로 이를 고려하여 충분한 예장력을 미리 가할 필요가 있다.

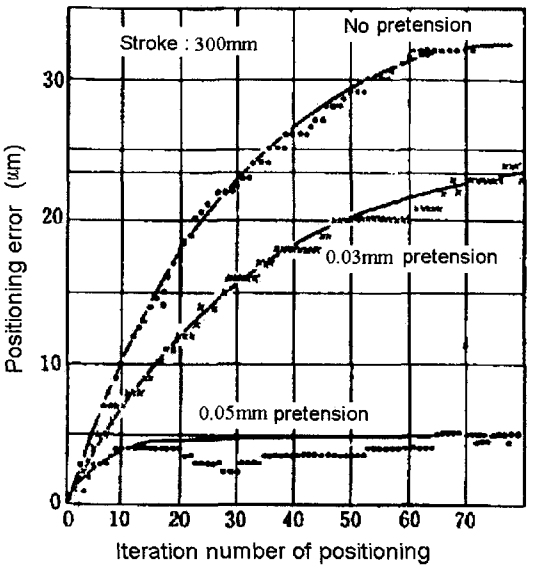

Fig. 7 Improvement of positioning error by pretension

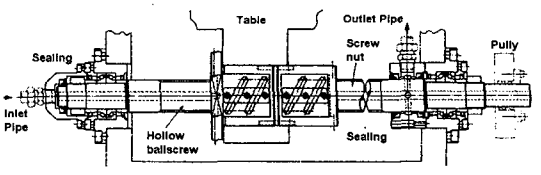

Fig. 8 Structure of a hollow ballscerw

또한 이러한 발열특성과 더불어 및 수명에 대한 고려가 필요하고, 볼스크류의 조립을 위해 충분한 강성을 갖는 프레임구조를 미리 설계할 필요가 있다.

3.1.2 중공 볼스크류를 이용한 냉각

그림 8 은 볼스크류에서의 발열을 직접 냉각하기 위해 제작된 중공형 볼스크류의 구조를 나타낸 것이다.[13] 긴 내경가공과 더불어 씨일구조등이 필요하므로 직접 제작하기에는 어려우나 볼스크류 제작사에서 규격화하여 판매하고 있다. 그림 9 는 중공형 볼스크류를 이용하여 냉각한 경우의 온도상승량을 실험한 결과로, 32mm 직경과 리드 10mm, 예압 1500N 의 조건에서 3l/min 의 냉각유를 사용하여 5°C 이내로 온도상승을 억제할 수 있음을 보이고 있다. 중공형 볼스크류의 단점으로는 가격이 비싼 것과 볼스크류의 축방향 강성이 낮아지는 것을 들 수 있다.

3.1.3 NC 제어기상에서의 보정

NC 등 제어기상에서 보정하는 방법은 일반적으로 많이 사용하는 방법으로, NC 상의 오차보정 기능 및 크로스 보정기능을 이용하여 측정된 오차량을 직접 또는 오차맵을 구성하여 보정하는 방법이다. 이 경우 볼스크류의 변동치에 해당하는 오차까지 보정하기는 어려우며 반복정밀도의 개선도 용이하지 않은 단점이 있다. 또한 계절에 따른 온도변화등 환경변화에 대응하기위해서는 실험치를 동반한 학습제어, 신경망회로 등 적절한 처리기법을 이용할 필요가 있다.

3.1.4 피드백장치를 이용한 보정

피드백장치에 의한 보정은 최근 관련 제품의 정밀도개선과 함께 가장 용이한 보정방법이라고 할 수 있다. 리니어스케일의 경우 0.1μm 분해능의 제품을 쉽게 구할 수 있으며 0.01μm 까지의 분해능을 갖는 레이저스케일도 최근에는 보편화되고 있다. 표 2 는 대표적으로 판매되고 있는 2 개사의 레이저스케일의 제원을 비교한 것이다.[14],[15] 스케일 자체의 열변형오차를 최소화하기 위해 제로듈과 같이 선팽창계수가 극히 작은 글래스계 재료가 사용되고 있으며 0.5μm 의 스케일피치를 전기적으로 분할하여 0.005μm~0.01μm 의 분해능을 달성하고 있다. 또한 스케일오차등에 의해 분해능과 같

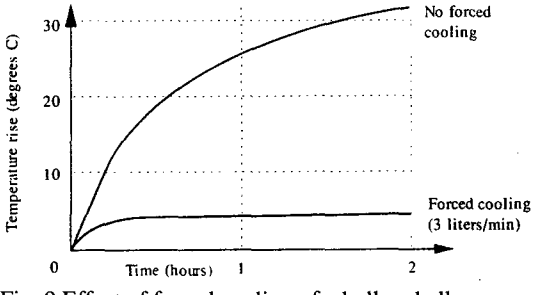

Fig. 9 Effect of forced cooling of a hollow ballscrew

Table 2 Example of specifications of laser scales available

Performances	Maker S	maker H
Max. effective length	410 mm	270 mm
Minimum resolution	10 nm	4 nm
Pitch of scale	0.5 μm	0.512 μm
Number of division	50	128
Accuracy(full length)	±0.44 μm	± 0.5μm
Available speed	120 mm/s	456 mm/s
Materials of scale	Glass	Zerodur

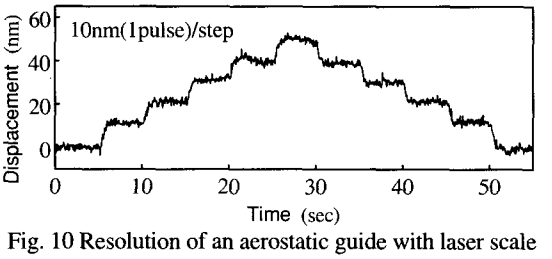

Fig. 10 Resolution of an aerostatic guide with laser scale

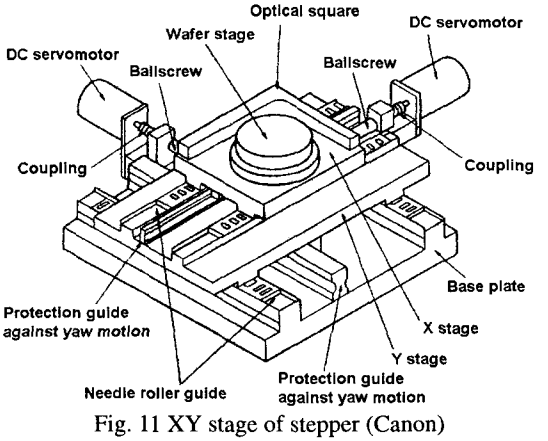

Fig. 11 XY stage of stepper (Canon)

은 레벨의 위치오차를 기대하기는 어렵지만, 최대 유효길이를 기준으로 약 0.5μm 정도까지의 위치결정정밀도를 얻을 수 있다. 그림 10 은 볼스크류로 구동되는 공기정압 안내기구에 S 사의 레이저스케일을 장착하여 분해능을 실험한 결과[16]로 0.01μm 의 분해능이 명확하게 얻어지고 있다. 또한 왕복시의 응답변위로부터 거의 같은 레벨의 반복정밀도가 얻어질 수 있음을 간접적으로 확인할 수 있다. 보다 높은 정밀도가 요구되는 경우에는 안내기구의 마찰력변동을 최소화하고 레이저간섭계를 이용하는 것에 의해 분해능은 물론 위치정밀도 및 반복정밀도까지도 나노미터대의 값을 기대할 수 있다. 그림 11 은 최근까지 반도체축소노광장치에 사용된 XY 스테이지의 예[17]로, 자체가공한 니들롤러베어링과 볼스크류를 이용하여 0.02μm(3σ)의 반복정밀도를 달성하고 있다.

3.1.5 미세구동기구의 부가에 의한 보정

미세변위제어에 적합한 압전소자의 응용이 확대되면서 볼스크류에 의해 달성하지 못하는 정밀도를 압전소자를 이용하여 보정하기위한 메커니즘이 활발히 연구되고 있다.

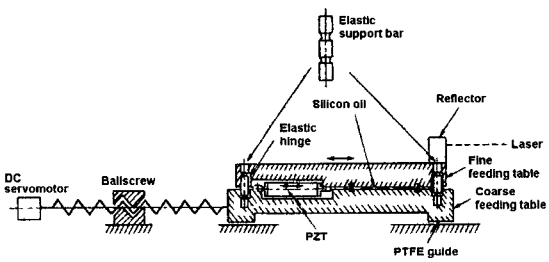

Fig. 12 Compensation of positioning error with fine control stage using PZT and elastic hinge

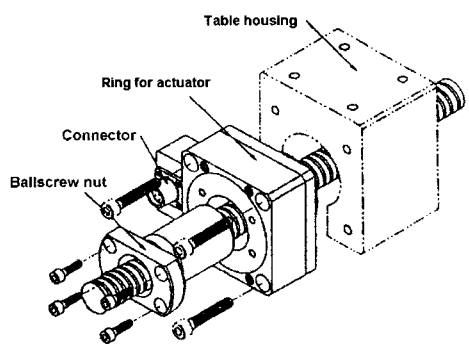

Fig. 13 Nano actuating ring(THK)

그림 12 는 PTFE(테프론)를 점착한 안내기구를 볼스크류로 구동하는 조동테이블의 위에 압전소자와 탄성힌지를 이용한 미동테이블을 설치하여 위치결정정밀도를 향상시킨 예[18]로서, 15mm 의 거리를 1000 회 반복한 결과 6nm 의 위치오차와 17nm 의 반복정밀도를 달성하고 있다.

그림 13 은 보다 실용적인 면을 고려하여, 볼스크류 너트와 테이블사이에 압전소자로 구성된 링을 삽입하고 이 압전소자를 제어함으로서 미소한 위치오차를 보정할 수 있도록 개발된 장치를 나타낸 것이다.[19] THK 사가 '나노구동링'이라는 품명으로 시판하고 있다.

3.2 운동오차의 보정

볼스크류의 리드동기오차성분은 서브미크론대의 운동정밀도가 요구되는 초정밀가공기나 노광장비 등에서는 치명적인 문제로 대두될 수 있다. 특히 유정압이나 공기정압 안내기구 등에서는 안내기구가 부상높이를 갖으므로 볼스크류를 직접 체결하는 경우 그 영향이 현저하게 나타난다. 볼스크류의 정밀도등급을 높여도 이 오차성분을 피하기는 어려우므로 새로운 메커니즘을 부가하는 것에 의해 오차성분을 흡수하고자 하는 시도가 많이

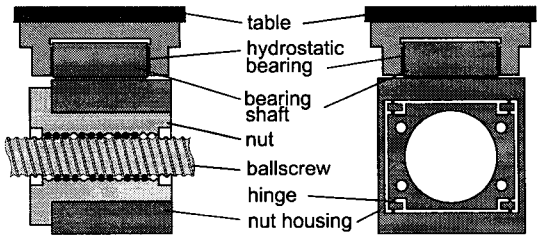

Fig. 14 Hybrid type coupling for eliminating errors synchnized with the lead of ballscrew

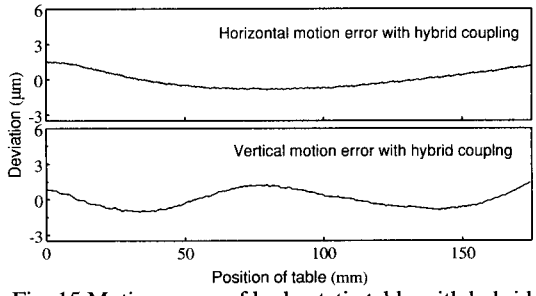

Fig. 15 Motion errors of hydrostatic table with hybrid coupling

진행되고 있다.[20],[21] 그림 14 는 이러한 목적으로 사용된 커플링의 구조[10]를 나타낸 것으로, 이송방향과 그에 대한 회전방향으로는 구동력을 전달할 수 있도록 강한 체결력을 갖고, 나머지 4 자유도에 대해서는 가능한한 낮은 강성을 갖도록 설계되어 있다. 그림 15 는 이 커플링을 적용한 유정압안내기구의 운동정밀도를 측정한 결과로, 커플링의 적용에 의해 리드동기오차가 대부분 제거되는 것을 알 수 있다.

그림 16 은 시판되고 있는 오차흡수용 커플링의 구조[22]를 나타낸 것으로, 볼베어링 2 개를 직교시킴으로써 이송방향과 그에 대한 회전방향을 제외한 4 자유도에 대해 낮은 강성을 유지하도록 설계되어 있다.

3.3 응답특성의 향상

그림 17(a) 및 (b)는 볼스크류로 구동되는 유정압안내기구에 있어 각각 일반 구름영역 및 볼의 탄성변형 영역에서 튜닝된 PID 게인을 적용하여 20μm/step(일반구름영역)에 대한 응답특성을 실험한 결과를 나타낸 것이다.[23] 탄성영역에서의 게인을 특성이 다른 구름영역에 그대로 적용하는 것에 의해 응답변위는 발산하는 특성을 보이고 있다. 그림 17(c)는 이러한 특성을 이용하여 적분게인을 위치에 따라 가변화하여 구한 응답특성으로 구름영역에서 튜닝된 그림 17(a)에 비해 고속의 응답특성이 얻어지고 있다.

각각 특성이 다른 이들 두 영역에서의 제어특성을 감안하여 응답특성 및 정밀도특성을 향상시키고자 하는 연구도 최근 '게인스케쥴링'이라는 기술명으로 활발히 연구가 진행되고 있다.[24],[25]

한편 그림 18 은 구름베어링과 볼스크류를 이용하여 위치결정을 하는 경우 관성력의 반력에 의해 발생하는 잔류진동을 저감시키기위해 이송장치의 밑면에 보조테이블을 설치한 실험장치를 나타낸 것이다. [24] 게인 스케쥴링 기술과 본 장치를 이용하여 위치정밀도 1nm 및 반복정밀도 3.2nm 를 달성하고 있다. 이 외에도 마찰력의 변동과 낮은 감쇠능 등의 볼스크류 고유의 단점을 제어알고리즘의 개선 및 적용을 통해 보완함으로써 응답특성을 향상시키고자 하는 시도도 활발히 진행되고 있으며 자세한 내용은 참고문헌[26]으로써 대체하고자 한다.

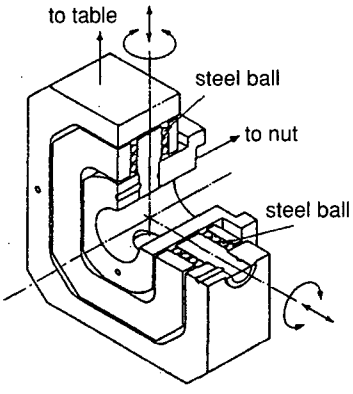

Fig. 16 A commercialized floating coupling

4. 맺음말

이송기구의 사용목적은 궁극적으로 안내기구의 운동정밀도에 영향을 주지 않으면서 보다 정밀하고 강력하게 구동기구의 운동을 전달하는 데에 있다. 볼스크류는 구성요소들의 복잡함과 더불어 각 요소들이 갖고 있는 많은 비선형적 특성들에 의해 설계자의 의도와는 다른 많은 오차요인들을

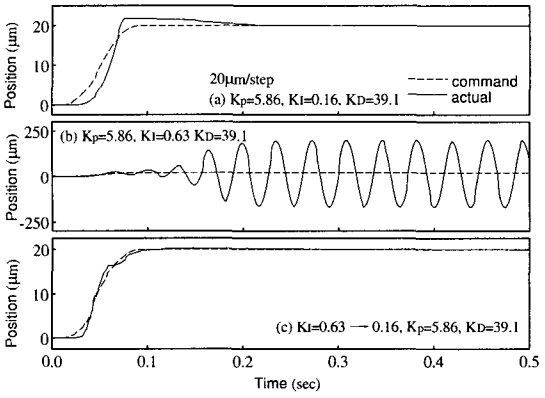

Fig. 17 Effect of integral gain on step response

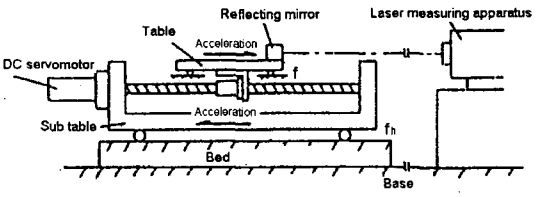

Fig. 18 Anti-residual vibration system for improving response characteristics of feeding system

발생하게 되며, 이러한 점이 위에서 언급한 궁극적인 목적을 이루려는 설계자들이 볼스크류를 선뜻 적용하기 꺼려하는 이유가 아닌가 한다. 최근 리니어모터에 모아지는 관심도 같은 이유일 것이다. 그러나 경영자의 입장에서는, 요구되는 정밀도를 만족할 수 있다면 아직도 볼스크류를 적용하기를 원하는 경우가 대부분이다. 제품가격이 저렴해지고 구매자가 신뢰감을 갖기 때문이다. 이러한 점이 그 간의 많은 새로운 이송기구의 제안에도 불구하고 볼스크류가 50%의 점유율을 유지하는 이유이며, 또한 위에서 언급된 많은 연구개발 시도가 이루어지는 이유일 것이다.

참고문헌

1. D. H. Youden, "Capstans or Lead Screws?," Proceedings of the ASPE 1992 Annual Meeting, p. 116, 1992.
2. H. Mizumoto, et al., "A Twist-Roller Friction Drive for Nanometer Positioning," Annals of the CIRP, Vol. 45/1, p. 501, 1996.
3. David Henderson, "A New Inchworm Motor For Industrial Nanopositioning Applications," American Society for Precision Engineering, Vol.12, p. 215, 1995.
4. 社本英二, 申興哲, 森脇俊道, "Walking Drive による精密送り機構の開發(第 1 報)," 精密工學會誌, Vol.59, No.11, p.207, 1988.
5. 上芳啓, "超精密送り位置決め裝置の開發," 精密工學會超精密位置決めに關する專門委員會, 95-2, p.1, 1995
6. .石原直, 金井宗統, "空氣靜壓送りによる超 LSI 露光裝置の位置決め技術," 精密工學會誌, Vol. 57, No.10, p.1735, 1991.
7. 牧野內進, 林豊, 神谷三郎, "ステッパの新露光方式と位置決め技術の改新," 精密工學會誌, Vol. 61, No.12, p.1676, 1995.
8. 二見茂, "リニアモ-タについて," 精密工學會超精密位置決めに關する專門委員會, 95-3, p.1, 1995.
9. THK co., ltd., "LM system," Catalog No.100-1.
10. C. H. Park, T. Moriwaki, E. Shamoto, "Coupling Mechanism for High Precision Feed Table with Ballscrew," JSME Cent. Int. Conf. On Manufacturing Milestones toward the 21st Centry, Japan, p.139, 1997.
11. 井澤實, "ボ-ルねじ應用技術," 工業調査會, 1993.
12. 大塚二郎, "超精密位置決め技術の現狀と今後," 精密工學會誌, Vol. 61, No.12, p.1645, 1995.
13. 日本精工, "精機製品(直動編)カタログ", p.A210, 1990
14. Dr. Johannes Heidenhein GmbH., "Exposed Linear Encoders LIP372," Heidenhein Catalog.
15. Sony Magnescale Inc., "Magnescale BS75A," General Catalog No.213.
16. 황주호, 김중천, 이재형, 박천홍, "공기정압 stage 의 초정밀위치결정을 위한 기본특성," 한국정밀공학회 2000 년도추계학술대회논문집, p.175, 2000.
17. 高橋一雄, "高精度送り機構へのボ-ルねじの應用," 應用機械工學, Vol.4, p.104, 1987.
18. 森山茂夫, "壓電素子微動機構を備えた超精密 XY 移動台," 精密工學會誌, Vol. 50, No.4, p.718, 1984.
19. THK co., ltd., "ナノ驅動リングカタログ," 1994.
20. 新野秀憲, 橋詰等, 伊東誼, "精密テ-ブルとその驅動系の連結機構に對する二, 三の新提案," 日本機械學會論文集(C 編), Vol.57, No.742, p.174, 1991.
21. 鈴木弘, 新野康生, 村上愼二, 難波義治, "斜入射 X 線ミラ-用超精密研削加工機の開發," 精密工學會誌, Vol. 60, No.9, p.1309, 1994.
22. 第一測範製作所, "フロ-ティングユニットカタログ".
23. 황주호, 박천홍, 이찬홍, 이후상, "볼스크류로 구동되는 유정압테이블의 미소이송특성 향상," 한국정밀공학회지, 제 15 권 제 1 호, p.94, 1998.
24. 大塚二郎, 飯田昇, 川瀨佳洋, 秋野良平, 深田茂生, "ねじ驅動による超精密位置決め(第 3 報)-ナノメ-タ精度位置決めと整定時間の短縮-," 精密工學會誌, Vol. 59, No.10, p.1655, 1993.
25. Paul I. Ro, Peter I. Hubbel, "Nonlinear micro-dynamic behavior of a ball-screw driven precision slide system," Precision Engineering, Vol.14, No.4, p.229, Oct., 1992.
26. 佐藤海二, 塚原眞一郎, 下河邊明, "インテリヅェント制御法を用いた送りねじ位置決め系の制御性能," 精密工學會誌, Vol. 64, No.11, p. 1627, 1998.