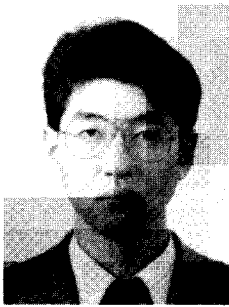


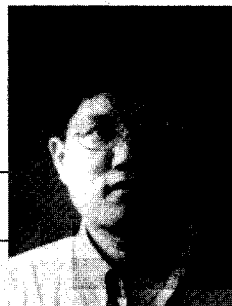
초정밀 제어기술



송 승 훈

(고등기술연구원 생산기술연구실)

- '84 - '88 서울대학교 공과대학 기계설계학과(학사)
- '88 - '90 서울대학교 대학원 기계설계학과(석사)
- '90 - '93 서울대학교 대학원 기계설계학과(박사)
- '93 - 현재 고등기술연구원 책임연구원



김 호 상

(고등기술연구원 생산기술연구실)

- '88 - '92 한국과학기술원 과학기술대학 기계공학과(학사)
- '92 - '94 한국과학기술원 항공우주공학과(석사)
- '94 - 현재 고등기술연구원 주임연구원

1. 서 론

현재 정보화 산업의 근간을 이루는 반도체 산업에서는 전자소자의 집적도를 높이기 위해 이전에는 상상하기조차 어려웠던 머리카락 굵기의 수천 분의 일에 이르는 미세한 가공을 현실로 이루어 내고 있다. 이러한 가공은 공구와 공작물의 위치를 한치의 오차도 없이 정밀하게 제어하는 위치제어기술에 힘입은 바 크며, 이러한 기술의 보유 여부가 향후 반도체 업계의 고부가가치, 고집적도 반도체 소자 개발을 가름할 것으로 예상되고 있다. 이러한 배경에서 초정밀 위치제어 기술은 반도체 및 광산업 등의 기반을 이루는 기초기술로서 첨단제품 분야로 응용이 급속히 확대되고 있으며, 고부가가치 정밀부품 개발의 핵심기술로서 그 중요성을 더해 가고 있다.

초정밀 위치제어기술은 보통 0.1 μ m 이하의 위치결정 정밀도를 갖는 것으로 알려져 있다.^[1] 주요한 몇 가지 응용사례를 살펴보면, 먼저 초정밀 가공 분야에서 피에조 소자와 같은 압전 액츄에이터를 이용하여 초정밀가공기에서 공구 끝단의 초정밀 위치제어를 통해 나노미터급 가공정밀도를 실현할 수 있는 미소이송 공구대(Fast Tool Servo, 이하 FTS)를 들 수 있다. FTS를 통해 광디스크용 기판, 카메라, 프로젝션 TV, 레이저 가공기 등의 렌즈, 레이저 프린터의 다면경 등을 가공할 수 있으며, 다양한 용도의 구면/비구면 렌즈의 가공이 가능하게 되었다. 두 번째로는 초정밀 스테이지 등의 위치결정기구로서 대용량 메모리 소자, X선 스테퍼, 주사전자현미경(Scanning Tunneling Microscope, STM) 등의

개발에 핵심적인 요소기술을 제공하게 된다. 이 밖에 잉크젯 프린터의 헤드 포지셔닝과 레이저 프린터의 $f-\theta$ 변환 렌즈의 가공 또한 초정밀 위치결정기구를 이용한 대표적인 예에 해당된다. 본 고에서는 이러한 초정밀 위치제어기술의 응용사례, 특히 FTS를 중심으로 압전 액추에이터를 이용한 능동보상형 위치결정기구의 제작에 필요한 각종 설계 및 제어, 측정 등의 핵심 요소기술에 대해 소개하였다.

2. 압전 액추에이터의 초정밀 위치제어에의 응용

2.1 압전 액추에이터의 개요

초정밀가공기에서 스트로크가 크고 분해능이 낮은 거친 이송장치를 사용하여 가공을 하는 경우 이송장치에서 발생하는 각종 오차는 시편의 가공정밀도를 저하시키는 주요 원인이 된다. 이를 방지하기 위해 스트로크가 작은 대신 응답성이 빠르고 분해능이 높은 정밀 이송장치를 조합하여 듀얼서보계(dual-servo system)를 구성함으로써 가공정밀도를 향상시키는 방법이 제시되고 있다. 이러한 미소이송 공구대는 이송장치에 비해 가동부의 질량을 아주 작게 제작할 수 있기 때문에 고속의 응답성을 기대할 수 있으며 이송장치의 치수오차를 보상하여 가공정밀도를 향상시킬 수 있게 된다. 이러한 미소이송장치는 주로 공구 끝단의 위치제어를 통해 가공기의 오차를 보상하는 역할을 하게 되며 저렴한 가격으로 나노미터급의 정밀도를 실현하기 위해 PZT와 같은 압전 액추에이터가 구동기로서 널리 사용되고 있다.

압전재료란 전기장(電氣場)을 가하면 기계적인 변형을 일으키고 반대로 힘을 가하면 전위차를 발생하는 물질로서 이러한 압전현상을 구동기로서 응용한 것이 압전 액추에이터이다. 현재 이러한 압전 액추에이터 중에서 산업계의 정밀

이송이나 위치제어용으로 가장 많이 사용되는 것은 단위전장당 변형량이 크고 안정적인 PZT($\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$)이다. PZT는 보통 단일 압전 소자로는 충분한 스트로크를 얻을 수 없으므로 주로 여러 개의 압전소자를 적층한 형태로 사용된다(그림 1 참조). 보통 인가전압 100~1000V에 대해 수 μm 에서 수십 μm 까지의 변위를 얻을 수 있고 발생추력은 1mm 당 10~40N 정도이다.

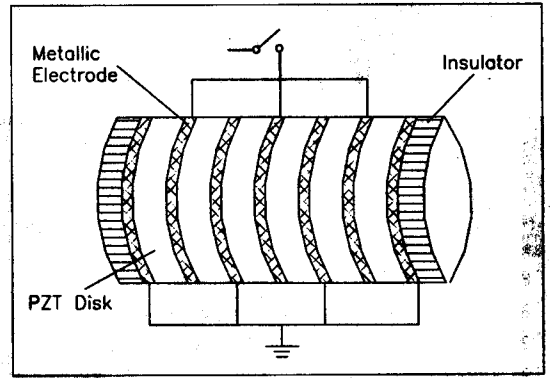


그림 1. 압전 액추에이터

압전 액추에이터의 구동을 위해서는 보통 전기적인 고전압 앰프가 필요한데, 이 앰프는 용량성 부하인 압전 액추에이터의 고속 구동시 발생하는 순간전류를 공급할 수 있어야 하며 제어기 설계시 주파수 대역폭을 만족할 수 있어야 한다.

PZT를 미세한 이동을 발생시키기 위한 구동기로서 사용할 때에는 다음과 같이 몇 가지 주의할 점이 있다. PZT의 특성상 취성이 강하고 전단력이나 인장력에 매우 취약하므로 이점에 유의하여 구동기에 전단력이나 인장력이 걸리지 않도록 압축방향으로 예하중을 가하거나 구동기의 설치위치, 방향, 그리고 flexure spring의 구조를 결정해야 한다. 또한 초정밀 위치결정기구의 경우 응답성이 중요한 설계인자의 하나이므로 가동체의 질량을 최소화하고 강성은 극대화하여 속응성을 갖도록 설계해야 한다.

두 번째로 PZT를 구동기로서 사용할 때 고려해야 하는 특징으로 비선형 특성을 들 수 있다. PZT에 전압을 가하면 입력전압에 비례하여 출

력변위가 나타나는데 이때 PZT는 자체의 재질적 특성에 의해 히스테리시스 현상과 천이(creep) 현상과 같은 비선형 특성이 나타난다. 히스테리시스 현상은 입력전압이 상승할 때와 하강할 때의 출력변위의 값이 일치하지 않는 현상을 말하며, 천이 현상은 온도변화에 의해 발생하는 비선형 특성을 말한다. 초정밀 위치결정기구로서 이러한 비선형 특성은 정밀도를 저하시키는 대표적인 요인으로 작용하므로 이 문제의 해결을 위해 압전 액츄에이터의 변위를 피드백하여 폐루프 제어를 하는 방법이 많이 사용되고 있다.^[2]

2.2 FTS의 제작 및 위치제어 시험

FTS는 초정밀가공기의 공구대에 위치하여 다이아몬드 공구 끝단의 위치를 폐루프 제어하여 스피들의 회전축 방향으로 미세한 양만큼 이동하여 가공정밀도를 향상시키는 것으로 FTS의 위치제어 특성이 가공정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 압전 액츄에이터는 재질적인 측면에서 비선형 히스테리시스 특성을 가지므로 기준입력과 실제 변위와의 차이를 작게 하는 폐루프 제어 방식을 통해 정밀한 위치제어 성능을 확보할 수 있다. 폐루프 제어는 공구 끝단의 위치를 고분해능의 정전용량형 센서를 이용하여 측정하고 이를 추종하고자 하는 기준입력과 비교하여 제어 알고리즘에 의해 처리하고 이를 이용하여 고전압 앰프의 지령으로 전해 줌으로써 수행된다. 이러한 폐루프 제어의 추종성능은 하드웨어 및 제어 알고리즘의 선택에 따라 좌우된다. 하드웨어 측면에서는 센서(분해능), 고전압 앰프(주파수 특성), 연산장치(연산속도), 노이즈 등이 가장 큰 영향을 미치게 된다. 제어 알고리즘 측면에서는 아날로그/디지털 제어, PID 제어, 피드포워드 제어, 히스테리시스 모델 등이 플랜트의 비선형성을 극복하는데 효과적이며, 스트로크 대비 1% 이내의 추종성능을 나타낼 수 있는

것으로 알려져 있다.

표 1은 고등기술연구원에서 개발한 FTS의 개발사양을 나타낸다. 이송범위 8.0 μ m의 PZT를 구동기로서 사용하고 가공정도를 ϕ 100의 평면 기준으로 평면도 0.1 μ m로 선정하였다.

표 1. 미세이동공구대 FTS의 개발사양

항 목	단 위	개 발사양
FTS 성 능	이송범위	μ m 8.0
	대역폭	Hz 100
	추종오차	μ m 0.15
	분해능	nm 10
	정강성	N/ μ m 250
	운동오차 보상	- In-Process
가 공 정 도	평면도	μ m 0.1(ϕ 100 평면 기준)
	표면거칠기	nmRa 10

그림 2는 고등기술연구원에서 제작된 FTS의 개략도를 나타낸다. 크게 6개의 부분으로 나뉘어 지는데, Main body, Base, Tool holder, 갭센서, Gage support, PZT로 구성된다. 이를 자세히 살펴보면 PZT에는 최고 1000V까지의 고전압을 인가하여 그 전압의 크기에 따라 PZT가 팽창/압축을 하며, PZT의 팽창/압축은 Main body에 있는 Hinge spring과 함께 FTS의 공구 끝단의 위치를 변화시킨다. 그리고 이러한 공구 끝단의 위

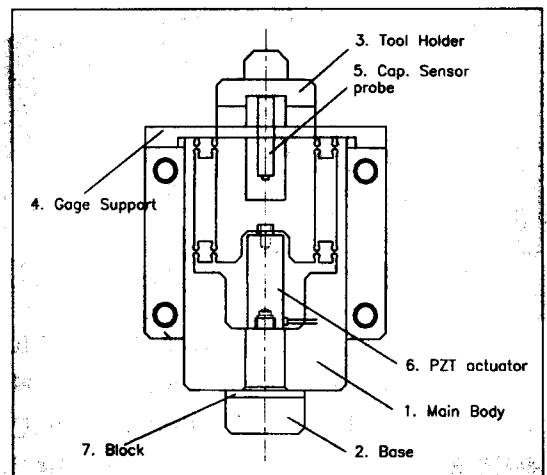


그림 2. Fast tool servo

치변화는 고분해능의 캡센서에 의해 검출되어 기준입력을 추종하도록 페루프 제어를 수행하게 된다.

그림 3에는 FTS의 위치제어 실험장치의 개략도를 나타내었다. 사용된 PZT는 Physik Instrumente社의 적층형 피에조 세라믹 액츄에이터로서 인가전압에 따라 최고 10 μ m까지 팽창할 수 있는 특성을 갖고 있다. 공구 끝단의 위치를 감지하기 위해 고분해능의 캡센서로 ADE社의 정전용량형 센서와 그 모듈을 사용하였다. 한편, 가공시 필요한 강성을 얻기 위해 Main body내에 노치(notch)형의 힌지를 설치하여 PZT의 팽창/압축을 공구 끝단에 전달하였다. 정전용량형 센서로부터의 변위량은 PC에 설치된 A/D 컨버터를 통해 디지털값으로 변환되어 제어 알고리즘을 통해 PZT를 이동시킬 변위량으로 계산된다. 이 신호는 고전압 앰프를 통해 증폭되어 PZT를 구동하게 된다.

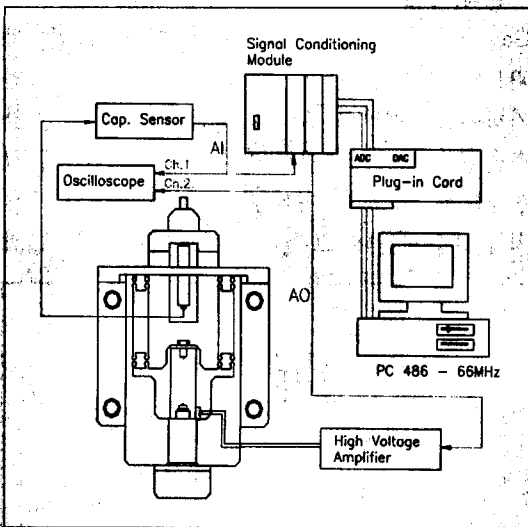


그림 3. FTS의 위치제어 실험장치

표 1에서 볼 수 있듯이 요구되는 FTS의 주요 성능은 공구 끝단의 위치정밀도 0.1 μ m이며 이때의 주파수는 최대 100Hz이다. 이러한 사양을 만족하도록 제어기를 설계하기 위해서는 공구대의 정확한 모델링이 필요하다. 그러나 PZT의 비선

형 특성(히스테리시스 등) 때문에 선형 모델의 선정시 주파수 및 입력크기 등에 따라 올바른 모델을 선정하기 어려운 점이 있으므로 FTS의 가진실험을 통하여 구한 주파수 특성 곡선에서 플랜트의 대략적 전달함수를 예측하고 이를 제어기 설계에 이용하는 방법을 사용하였다.

제어기로는 PI제어기, 예측기와 노치필터를 사용하여 각종 제어 파라미터를 구하였다(그림 4 참조). 제어 알고리즘의 샘플링 시간은 50 μ sec(20kHz)이며, 이 시간간격 안에 A/D 변환과 알고리즘을 계산하였다. 예측기는 압전 액츄에이터의 히스테리시스 특성을 피드포워드로 보상하기 위해 적용되었으며 실험 데이터로부터 예측 시간을 선정하여 사용하였다. 노치필터는 플랜트의 공진주파수에서의 공진특성을 제거하기 위해 공진주파수에 해당하는 2차 시스템을 필터에 포함시켜 플랜트의 앞단에 배치하였다. 기준입력은 공작물의 축방향 흔들림을 스핀들 뒷면에 설치된 외부 정전용량형 센서로부터 검출하여 계산하였다.

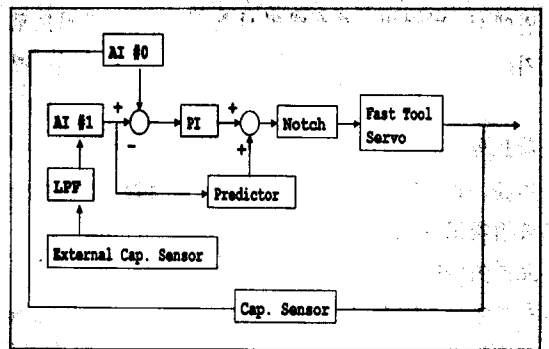


그림 4. FTS의 위치제어 블록선도

그림 5는 FTS의 페루프 제어를 위해 PID 제어와 피드포워드항의 예측기, 그리고 플랜트의 공진특성 제거를 위한 노치필터를 적용하였을 때 100Hz, 7.5 μ m의 정현파 기준입력에 대한 응답특성을 나타낸다. 개루프 제어를 수행했을 때와 달리 예측기에 의해 히스테리시스 특성이 상당 부분 제거된 것을 볼 수 있으며, 기준입력과

의 오차가 약 $0.15\mu\text{m}$ 로 나타나고 있음을 알 수 있다.

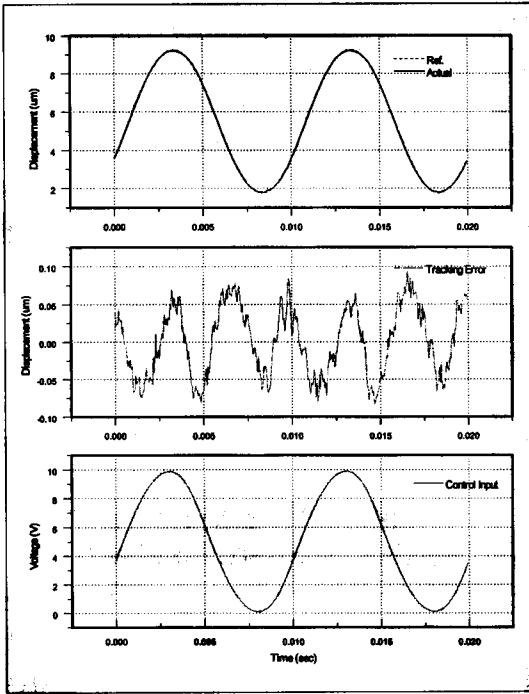


그림 5. FTS의 정현파 응답

2.3 가공시험 결과

FTS의 가공성능을 평가하기 위해 대우중공업 공기자동화사업본부에서 국내 최초로 개발한 초정밀가공기(NanoTurn 60)에 FTS를 장착하여 실험하였다(그림 6, 7 참조). 가공시험장치는 그림 6에 도시한 바와 같이 다이아몬드 공구를 FTS의 끝단에 장착시키고 스피들 옆에 센서홀더로 지지된 정전용량형 센서로부터 스피들의 축방향 오차를 검출하여 FTS의 페루프 제어를 실시하였다. 그림 7은 실제로 FTS를 초정밀가공기에 장착하여 가공시험을 수행하는 모습이다.

가공시험으로는 Al 시편($\phi 100$)이었으며 초정밀가공기를 이용하여 가공한 최종 가공시험이 그림 8에 나타나 있다. FTS를 이용한 실시간 오차보상 후 가공시험의 평면도를 측정된 결과

가공면의 평면도 $0.096\mu\text{m}$, 표면거칠기 10nmRa 를 얻을 수 있었다. 참고로 그림 9의 측정결과는 비접촉식 측정기 GPI-4'를 사용하여 얻은 결과이다.

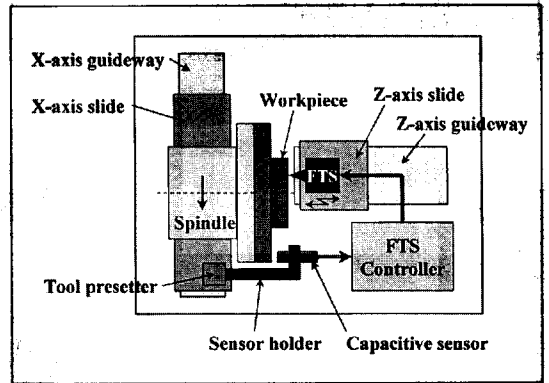


그림 6. FTS 가공시험장치의 구성

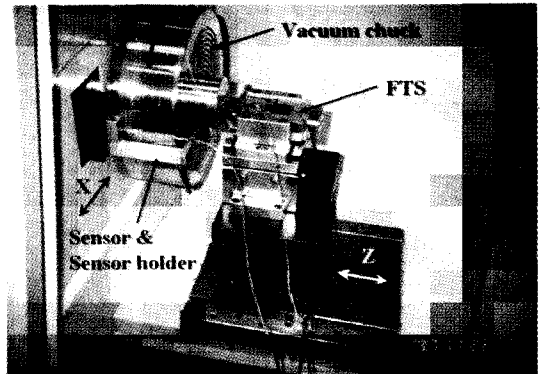


그림 7. FTS 가공시험 장면

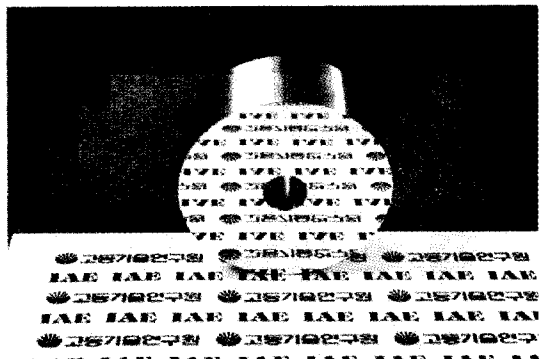


그림 8. 가공시험(평면도 $10\mu\text{m}$, 표면거칠기 10nmRa)

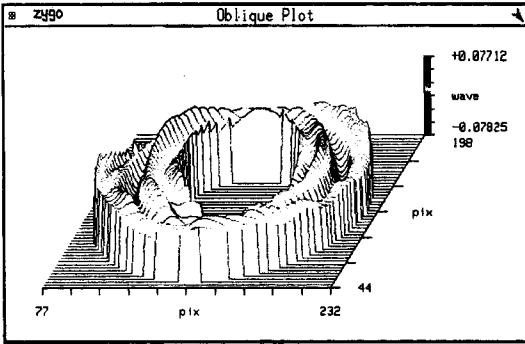


그림 9. FTS를 이용한 가공시험 결과

2.4 FTS의 개발사례

FTS는 초정밀가공기의 성능향상 및 비구면 가공을 위해 이미 외국에서도 많은 연구가 이루어져 왔다(표 2 참조). 미국 로렌스 리버모어 국립 연구소(Lawrence Livermore National Laboratory, 이하 LLNL)에서는 대형 수직축 정밀선반 LODTM(Large Optics Diamond Turning Machine)의 공구위치 결정을 위해 2개의 다이어프램에 의해 가동부를 지지하고 PZT를 액츄에이터로 사용한 FTS를 개발한 바 있다^[3](그림 10 참조). 본체는 열팽창을 방지하기 위해 슈퍼

인바를 재질로서 사용했고 공진주파수는 1kHz로 스트로크 1.27 μm /1000V의 사양을 갖고 있다. 변위량은 차동식 정전용량형 센서를 사용하여 측정하였고 분해능 2.54nm, 대역폭 100Hz를 실현한 것으로 보고되었다.

이후 영국의 Cranfield 공과대학에서 X선 망원경의 미러를 가공하기 위한 대형 수직축 초정밀선반을 개발하였는데 이 기계의 오차보상을 위해 FTS를 제작하였다. 이 FTS 역시 2개의 평행 다이어프램에 의해 가동부가 적층된 압전소자에 의해 움직이고 변위센서로서 LVDT를 이용하여 변위량을 검출하였다. 이 FTS는 스트로크가 6 μm 에 분해능 10nm, 대역폭 50Hz의 사양을 갖는다. 한편 미국 노스캐롤라이나 대학에서도 다이어몬드 선삭기를 위한 FTS를 개발하였는데^[4] 이 FTS의 용도는 운동오차 보상 뿐만 아니라 비구면 형상의 가공도 포함한다. 구동기로 적층된 PZT를 사용했고 스트로크 20 μm 의 대역폭이 2kHz에 이르는 것으로 보고되었다. 또한 일본 神戸製鋼所에서도 미소절삭장치를 개발한 바 있는데 8개의 노치로 구성된 평행 스프링을 제작하여 힌지구조의 지지방식을 채택하고 있는 것이 특징이다.^[5]

표 2. FTS의 개발사례

항 목	LLNL(美)	CUPE(英)	NCSU(美)	神戸製鋼所(日)
용 도	공구위치 결정	운동오차 보상	운동오차 보상, 비회전대칭 형상가공	미소절입 가공
이송범위	2.54 μm	6.0 μm	20 μm	3.7 μm
대역폭	100Hz	50Hz	2,000Hz	2,000Hz
추종오차	0.025 μm	-	0.06 ^[1] μm	-
분해능	2.54nm	10nm	-	45nm
정강성	175N/ μm	300N/ μm	-	80N/ μm
운동오차 보상	×	On-line	×	×
변위센서	정전용량형 센서	LVDT	정전용량형 센서	정전용량형 센서
구동	PZT	PZT	PZT	PZT
지지방식	다이어프램	다이어프램	다이어프램	탄성힌지
제어방식	개루프 제어	폐루프 제어	폐루프 제어	폐루프 제어

주1) 진폭 2.5 μm , 40Hz 사인파 기준

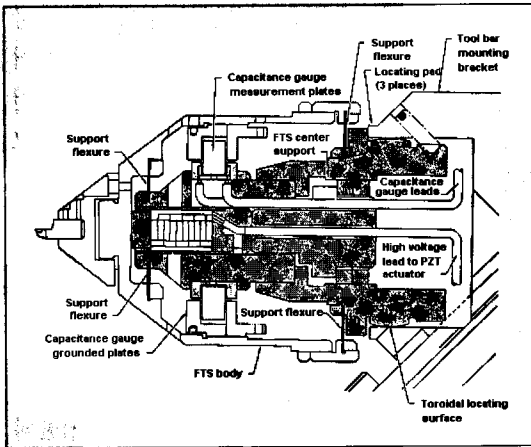


그림 10. FTS 개발사례(LLNL)

3. 압전 액츄에이터의 그 밖의 위치결정 기구에서의 응용

압전 액츄에이터는 초정밀가공기에의 응용뿐만 아니라 다른 분야에도 다양하게 적용이 가능하다. 대표적인 것이 레이저빔 프린터의 $f-\theta$ 변환 렌즈이다. 이 렌즈는 비축대칭 비구면 형상의 렌즈로 기존의 연삭이나 래핑기로는 제작이 불가능하고 그림 11과 같이 특별한 전용 가공기를 제작하여 가공을 하게 된다. 그림 11에서 볼 수 있듯이 턴테이블의 회전각도에 연동되어 턴테이블의 위치를 압전 액츄에이터를 이용하여 연삭 깊이를 동적으로 제어하여 가공을 수행한다. 이

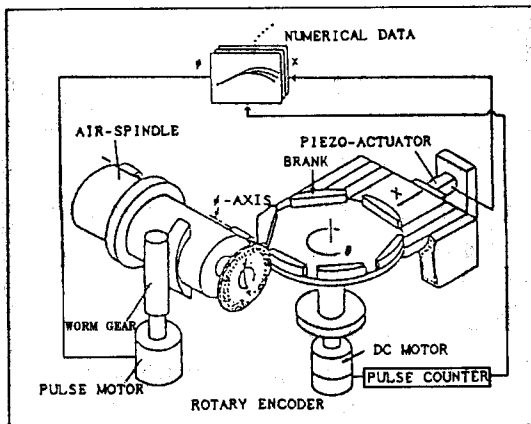


그림 11. 레이저 빔 프린터용 $f-\theta$ 변환 렌즈

가공은 일본의 히다찌社에서 수행된 것으로 SF-10 유리재질의 시편 6개에 대해 가공한 결과 형상정밀도 $0.2\mu\text{m}$, 표면거칠기 $0.05\mu\text{mRmax}$ 를 얻은 것으로 보고된 바 있다.

그림 12에는 압전 액츄에이터를 컴퓨터의 기억장치인 하드디스크 드라이브에 응용한 사례를 보여주고 있다. 하드디스크의 경우 기록밀도의 향상과 액세스 속도의 향상이 이루어지고 있는데 이 사례는 고속, 고밀도의 하드디스크에서 주위온도의 변화에 의해 발생할 수 있는 열 오프트랙 오차를 보상하기 위해 압전 액츄에이터를 이용하여 보상하는 예이다. 하드디스크의 경우 종래에는 구조적인 설계개선을 통해 이러한 열 오프트랙 오차를 감소시켜 왔으나 고밀도의 하드디스크 제작에는 한계를 드러냈으며 이를 해결하기 위해 헤드 암에 평행 스프링을 통해 압전 액츄에이터를 부착시킴으로써 데이터 헤드의 정밀한 위치제어를 실현시키고 있다. 즉, 보이스코일 모터의 거친 위치제어를 압전 액츄에이터의 미세한 구동을 통해 보완을 하여 하드디스크에 파일의 읽기/쓰기 속도를 개선하는 것이 가능하게 된 것이다.^[6]

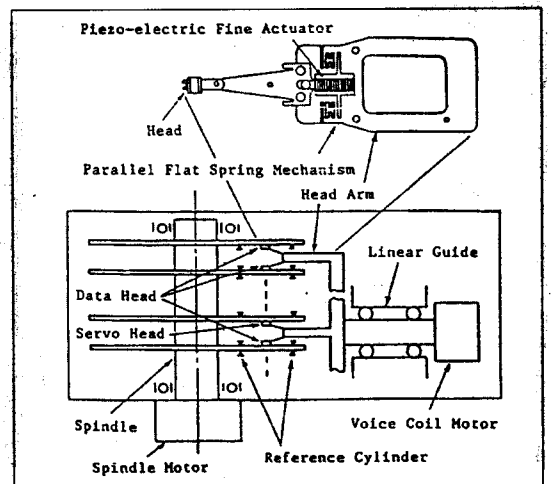


그림 12. 헤드 미동기구를 장착한 자기 디스크 장치

이밖에 압전 액츄에이터를 이용한 응용사례로 표면조도 측정기에 응용한 사례를 들 수 있다.

일본의 Kumada 등은 축침식 표면조도 측정기를 압전 액츄에이터를 이용하여 구성된 바 있다. 이 측정기는 시편의 표면을 다이아몬드 축침이 접촉하면서 표면조도를 측정하는 것으로 조동기구 및 미동기구에 의해 축침이 움직이게 된다. 그림 13과 같이 조동(粗動)기구와 미동(微動)기구의 듀얼서보 형태의 운동에 의해 축침이 시편 위를 움직이며, 조동기구는 약 60 μ m, 미동기구는 15 μ m를 운동할 수 있다. 조동기구와 미동기구 모두 압전 액츄에이터에 의해 구동되는데 직접적으로 움직이는 미동기구에 비해 조동기구는 탄성 힌지에 의해 비교적 큰 변위를 발생시키게 되며 각 기구의 변위량은 정전용량형 변위센서에 의해 검출되게 된다. 검출된 변위량은 듀얼서보계에 의해 PZT 드라이브의 입력을 결정하며 조동기구와 미동기구가 각각 구동되게 된다.^[7]

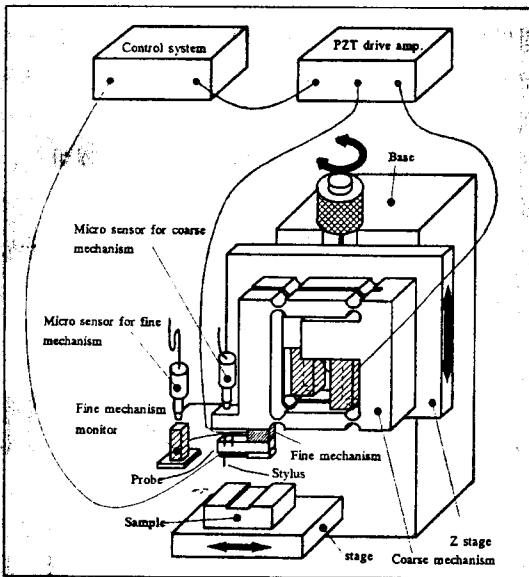


그림 13. 축침식 표면조도 측정기

4. 결 론

압전 액츄에이터는 초정밀 위치제어를 위한 대표적인 구동기로서 초정밀가공기용 FTS, X-Y 스테이지용 위치결정기구, 축침식 표면조도 측정

기 등의 다양한 용도로 사용되고 있다. 현재 국내에서도 이 분야에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 기술 확보의 필요성 역시 첨단 전자, 광산업의 발전과 함께 증대되고 있다. 본 고에서는 이러한 초정밀 위치제어기술 중에서 압전 액츄에이터의 몇 가지 응용사례를 중심으로 설계, 제작, 제어, 측정기술 등에 대해 기술하였다.

참 고 문 헌

- [1] 大塚二郎, "정밀 초정밀 위치 결정 기술의 현상과 문제점," 機械技術, Oct. 1994., pp.10-17
- [2] Jung, S.-B. and Kim, S.-W., 1994, "Improvement of Scanning Accuracy of PZT Piezoelectric Actuators by Feed-Forward Model-Reference Control," Precision Engineering, Vol.16, No.1, pp.49-55.
- [3] Patterson, S. R. and Magrab, E. B., 1985, "Design and Testing of a Fast Tool Servo for Diamond Turning," Precision Engineering, Vol.7, No.3, pp.123-128.
- [4] Dow, T. A., Miller, M. H. and Falter, P. J., 1991, "Application of a Fast Tool Servo for Diamond Turning of Nonrotationally Symmetric Surfaces," Precision Engineering, Vol.13, No.4, pp.243-250.
- [5] Hara, Y., Motonishi, S. and Yoshida, K., 1990, "A New Micro-Cutting Device with High Stiffness and Resolution," Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, pp.375-378.
- [6] 大槻治明, 1993, "ヘッド微動機構を用いた磁気ディスク装置熱オフトラック補正システムの制御," 일본기계학회논문집(C編) 59卷, 557號, pp.138-143.
- [7] 態田毅史, 1997, "粗微動連動制御機構による表面粗さ測定に関する研究," 정밀공학회지, Vol.63, No.10, pp.1439-1443.