

# 듀얼스테이지를 이용한 고정밀도의 하이브리드 밀링머신

정병목<sup>#</sup>, 여인주<sup>\*</sup>, 고태조<sup>\*\*</sup>, 이천<sup>\*</sup>

## High Precision Hybrid Milling Machine Using Dual-Stage

Byeong Mook Chung<sup>#</sup>, In Joo Yeo<sup>\*</sup>, Tae Jo Ko<sup>\*\*</sup> and Cheon Lee<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

High precision machining technology has become one of the important parts in the development of a precision machine. Such a machine requires high speed on a large workspace as well as high precision positioning. For machining systems having a long stroke with ultra precision, a dual-stage system including a global stage (coarse stage) and a micro stage (fine stage) is designed in this paper. Though linear motors have a long stroke and high precision feed drivers, they have some limitations for submicron positioning. Piezo-actuators with high precision also have severe disadvantage for the travel range, and the stroke is limited to a few microns. In the milling experiments, the positional accuracy has been readily achieved within 0.2 micron over the typical 20 mm stroke, and the path error over 2 micron was reduced within 0.2 micron. Therefore, this technique can be applied to develop high precision positioning and machining in the micro manufacturing and machining system.

**Key Words** : Dual-stage (듀얼 스테이지), Micro stage (마이크로 스테이지), Milling machine (밀링머신), Piezo actuators (피에조 구동기), Linear motors (리니어 모터)

### 1. 서론

고 정밀도 위치제어는 정밀기계에 있어서 가장 중요한 부분 가운데 하나이다.<sup>1</sup> 리니어 모터(LM) 시스템은 빠르고 높은 정밀도의 이송이 가능하지만 서브 마이크로미터 영역에서 제어를 할 때 몇몇 제한이 있다. LM 가이드에 의한 힘 리플(force ripple), 마찰(stick-slip friction), 기구적인 조립 오차들이 정밀도에 영향을 미친다.<sup>2</sup> 피에조 구동기(PZT) 기반 이송시스템은 최근 높은 정밀도를 요

하는 많은 분야에서 관심이 증가하는 추세이다. PZT는 정밀도가 무한대이고 힘이 크며 빠른 응답성과 자기장의 영향을 받지 않는다는 많은 장점이 있다.<sup>3</sup> 그러나 가장 심각한 단점은 이동거리가 아주 짧기 때문에 몇 마이크로미터 밖에 되지 않는 이동거리의 제한을 극복하기 위해 수많은 노력을 기울이고 있다. 이동거리를 늘이기 위해서 비교적 많은 양의 피에조 층이 필요하고 많은 피에조 층을 움직이기 위해서는 고전압 증폭기를 포화상태로 만들기 위해 용량이 큰 콘덴서를 사용해야 한

접수일: 2007년 12월 27일; 게재승인일: 2008년 3월 25일

# 교신저자: 영남대학교 기계공학부  
E-mail: bmchung@yu.ac.kr Tel. (053) 810-2569

\* 영남대학교 기계공학부 대학원

\*\* 영남대학교 기계공학부

다. 그렇게 되면 구동기의 대역폭이 줄어들게 되므로 PZT의 장점을 살리면서 이동거리를 늘리기는 쉽지 않은 일이다.<sup>4</sup>

고 정밀기계는 정밀한 위치제어 뿐만 아니라 빠른 속도와 넓은 작업영역을 필요로 하기 때문에 넓은 영역을 움직이는 글로벌 스테이지와 정밀한 위치 제어를 위한 마이크로 스테이지를 조합한 듀얼 스테이지가 최근에 제안 되었다.<sup>5</sup> 듀얼 스테이지 개념은 가공, 로봇, 데이터 저장장치 등의 분야에 적용되고 있으나 이들 대부분이 하드디스크 장치에서 데이터를 읽는 속도를 높이고 많은 양의 데이터를 저장하기 위해 적용하고 있다. 그리고 몇몇 듀얼 스테이지 이송장치는 제어 대역폭을 늘리기 위해 개발되어 큰 작업영역과 정밀한 위치제어를 갖는 마이크로-마크로(micro-macro) 로봇에 응용하고 있다.<sup>6-10</sup>

미세이송공구(Fast tool servo) 가공 시스템은 듀얼 스테이지의 개념과 동일하며 비대칭 표면 가공, 채터(chatter) 제어에 적용된다.<sup>11</sup> 취성 물질을 다이아몬드로 가공하기 위해서 미세이송공구 시스템을 적용하는데 고 정밀도의 표면 가공을 하기 위해서 그 재료의 절삭율이 재료의 탄성범위 내에 유지되도록 해야 한다.<sup>12</sup> 유리, 세라믹, 게르마늄과 같은 취성 재료는 광학과 정밀 공학 시스템에서 중요한 연구 분야이다. 이 시스템은 기존의 볼스크류 이송시스템에 비해서 높은 대역 폭과 높은 정확도

를 갖는 위치 제어 장치이다. 여기에 보조 구동장치를 사용하면 가공 툴의 성능이 전반적으로 향상되어 이 시스템은 스펀들의 오차와 가공할 때 발생하는 진동에 의한 기계적인 오차들을 줄여줄 수가 있다.<sup>13</sup>

최근에 발표된 미세이송공구 시스템의 적용 분야는 선반인데 선반가공에서 절삭 깊이를 제어하기 위해 한 축에만 듀얼 스테이지를 사용하였고 밀링머신에도 듀얼 스테이지를 적용한 연구가 있는데 여기서도 한 축에 대해서만 적용한 바 있다.<sup>14</sup> 그러나 밀링머신에 있어서 한 축에 대해서만 듀얼 스테이지를 적용하는 것은 무의미하므로 본 연구에서는 2 축 듀얼 스테이지를 설계하여 밀링머신에 적용하고 듀얼 스테이지의 제어 실험을 통해 넓은 영역의 밀링 가공에서 정밀한 가공 결과를 얻을 수 있음을 보여 주고자 한다.

## 2. 듀얼 스테이지 메커니즘

LM 은 고정밀 메커니즘의 제작에 어느 정도 좋은 성능을 발휘하지만 미크론 이하의 위치제어에서는 한계를 안고 있다. 반면에 PZT 는 무한대의 정밀도를 가지나 이동거리에 제한을 가지고 있다. 따라서 이러한 단일 이송장치의 한계는 각 이송장치의 장점을 이용하여 듀얼 스테이지로 조합함으로써 극복할 수 있다. 마이크로 스테이지와

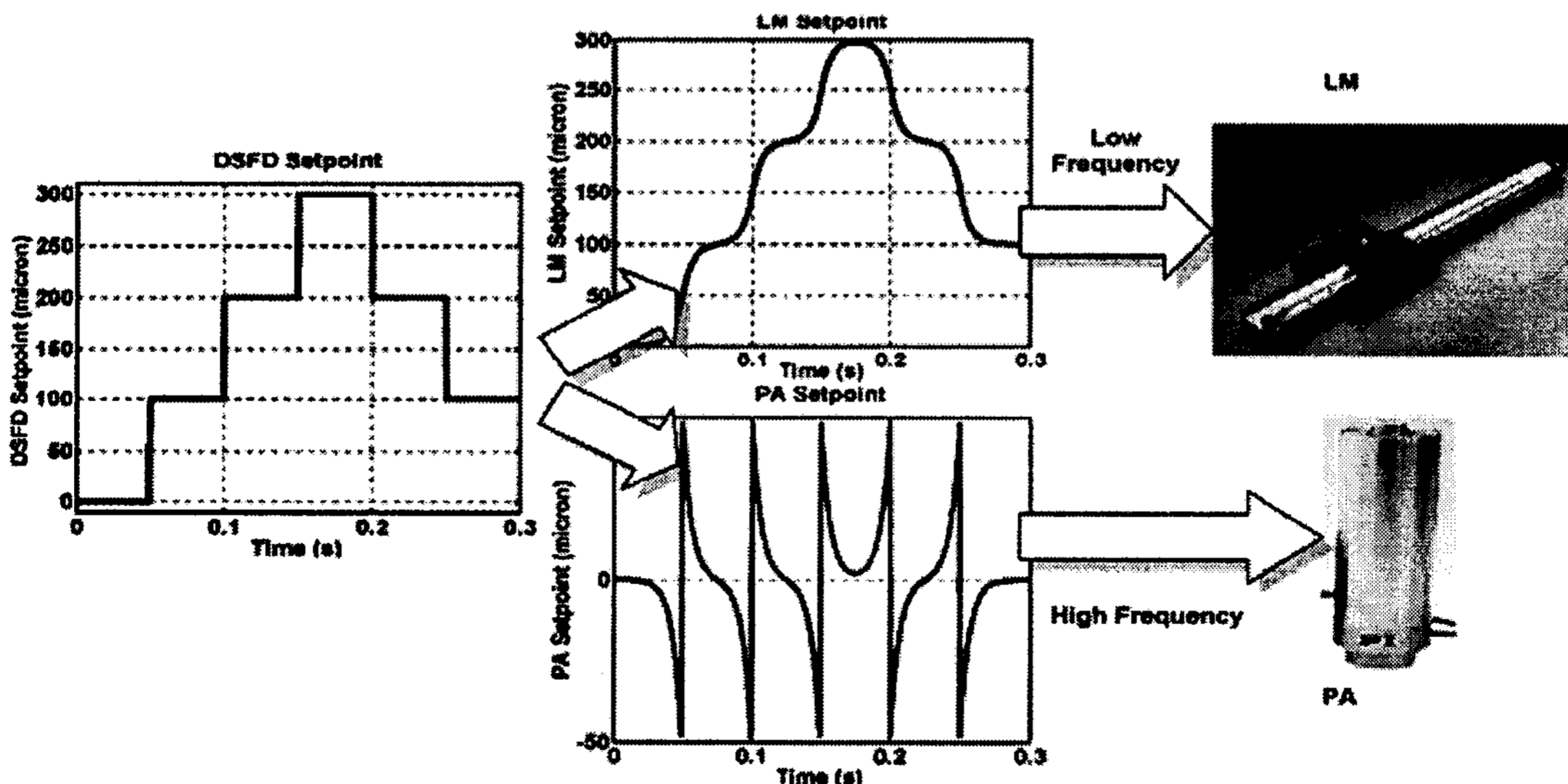


Fig. 1 Design criterion for dual-stage

글로벌 스테이지로 이루어진 듀얼 스테이지의 동적 특성은 서로의 단점을 보완해 주며 작동하여 최대의 효과를 보일 수 있다. LM 이송 장치는 글로벌 스테이지로 사용되고 PZT 는 마이크로 스테이지로 사용된다. 마이크로 스테이지는 이동거리가 짧지만 빠른 주파수의 궤적을 쉽게 따라갈 수 있는 반면에 글로벌 스테이지는 그렇지 않다. 따라서 목표점까지 이동하기 위해서는 두 주파수 성분으로 나뉘질 수 있다. 보통 저 주파수 궤적은 글로벌 스테이지가 따라가고 마이크로 스테이지는 추적오차 (tracking error)를 보정하며 고주파 성분의 궤적으로 반응을 한다. 이에 대한 개념을 Fig. 1 에서 볼 수 있고 느린 이동은 LM 이 담당하고 반면에 빠른 이동은 PZT 가 담당하는 것을 알 수 있다.<sup>14</sup> 이는 시스템의 정밀도뿐만 아니라 전체적인 대역폭이 증가한 예를 보여주고 있다. 결국, 글로벌 스테이지의 오차가 마이크로 스테이지의 목표점으로 피드백 되어 제어된다.

### 3. 정밀 모션을 위한 마이크로 스테이지 설계

초정밀 모션 제어를 하기 위해서 가장 효과적인 방법은 탄성힌지(flexure hinge)를 사용하는 것이다. 탄성힌지는 탄성특성을 이용하기 때문에 마찰 없는 부드러운 연속적인 움직임이 가능하다. Fig. 2 는 판 스프링 타입의 탄성힌지를 나타내는 개념도이다. 일반적으로 탄성힌지를 이용한 마이크로 스테이지를 설계하기 위해서는 균형 잡힌 구조 이면서 약간의 유연성 있는 모션이 가능하도록 다중 힌지 방식을 사용한다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 3 과 같이 각 축 당 1 자유도를 갖도록 4 개의 탄성힌지를 갖는 마이크로 스테이지를 설계하였고 강성은 다음과 같은 식으로 구하였다.<sup>15</sup>

$$\frac{1}{K_s} = \frac{1}{3EI_1}l^3 + \frac{1}{3EI_2}(L-l)^3 - \frac{[I_1(L^2 - l^2) - I_2l^2]^2}{4E[I_1^2I_2(L-l) + I_1I_2^2l]} \quad (1)$$

마이크로 스테이지는 금속재료의 탄성 변형에 의해 움직인다. 모든 미끄럼과 구름현상이 없고 고강성과 높은 허용하중 특징을 지닌다. 글로벌 스테이

지의 가속 성능을 좋게 하기 위해 전체 중량을 최소화하는 것이 필요하므로 알루미늄 7075-T6 을 사용하여 마이크로 스테이지를 제작하였고 보다 완벽한 설계를 위해 유한요소 모델을 만들어서 정적 및 동적 해석을 수행했다. PZT 는 PI사에서 판매하는 제품이며, 최대 힘이 900 N 이고 115 N/m 의 강성을 갖는다. PZT 의 최대 이동거리가 9 μm 이므로 마이크로 스테이지 이동거리를 4 μm 로 설계하였다. Fig. 4 는 ANSYS 로 마이크로 스테이지의 인장 응력에 대한 해석한 결과를 나타내며 이러한 해석을 통해 900 N 의 힘이 피에조의 강성을 극복하고 4 μm 이송되도록 이송계의 구조를 설계하였다.

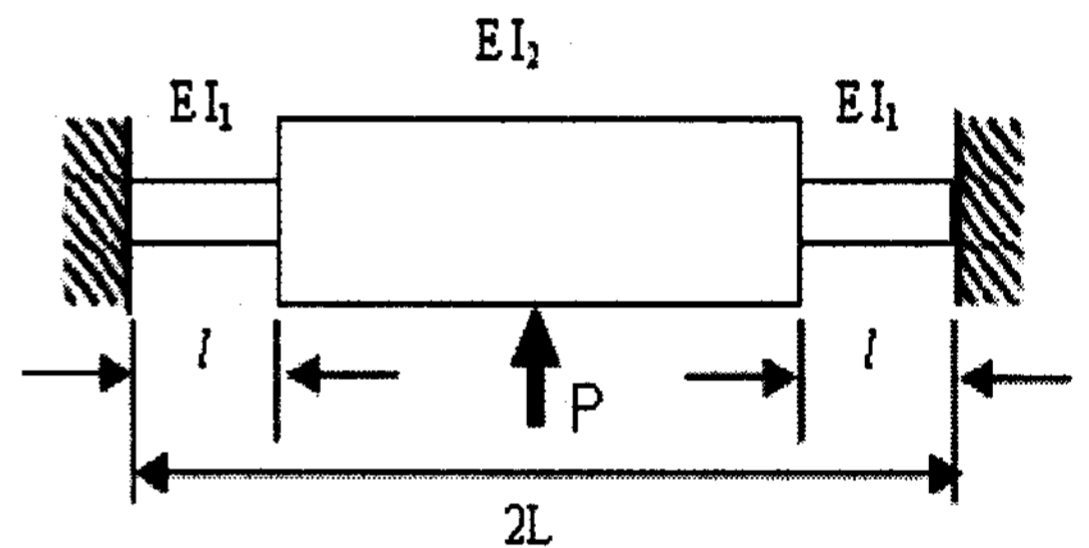


Fig. 2 Simple design of flexure hinge frame

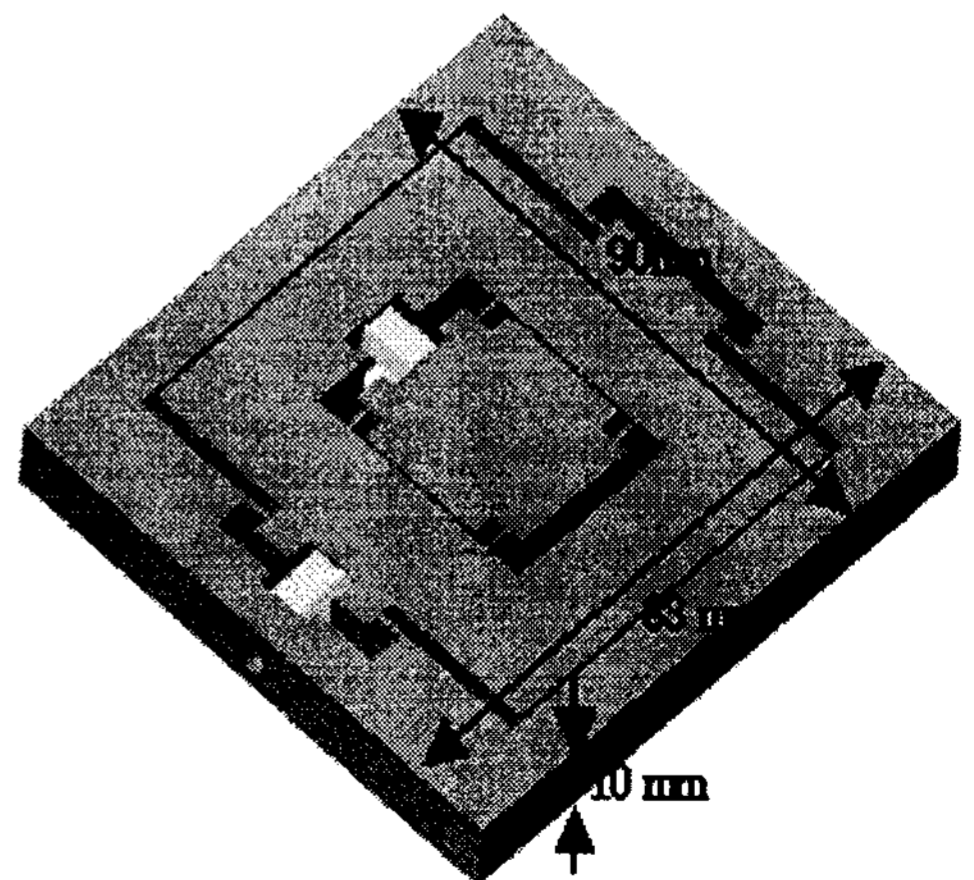


Fig. 3 3D- model of 2 axis micro stage

### 4. 밀링머신 실험

Fig. 5 는 실험에서 사용한 밀링머신의 사진이다. 높은 정밀도의 장거리 이송을 위해 마이크로

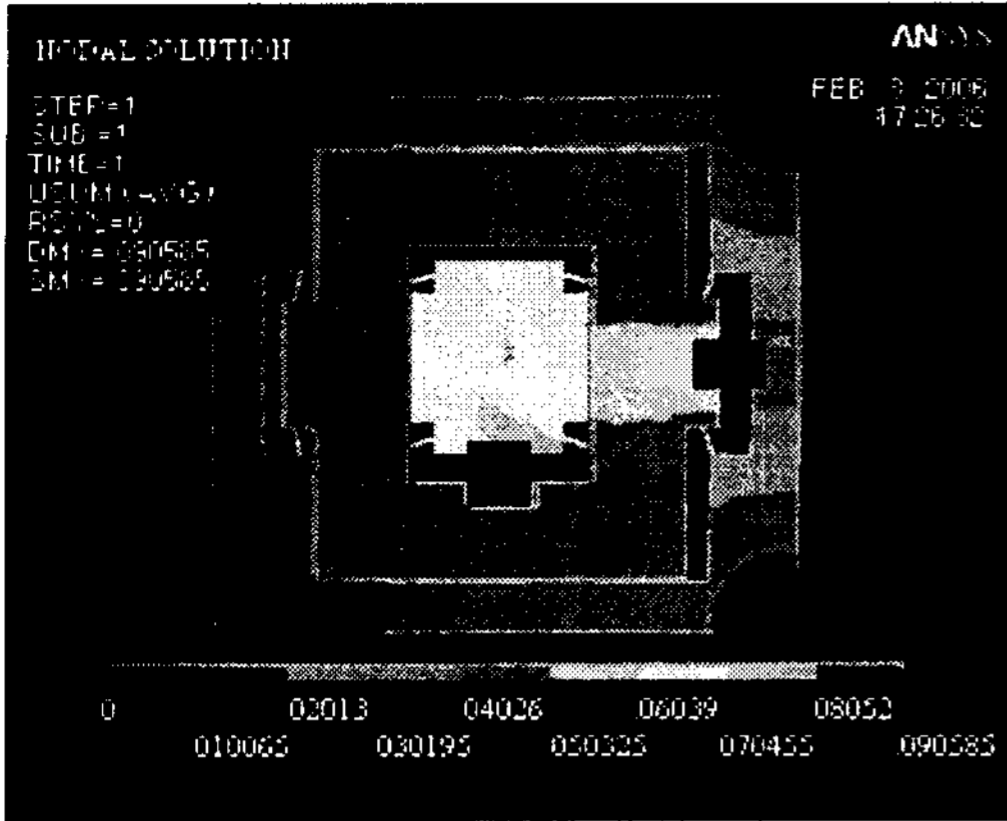


Fig. 4 Strain & stress analysis by ANSYS

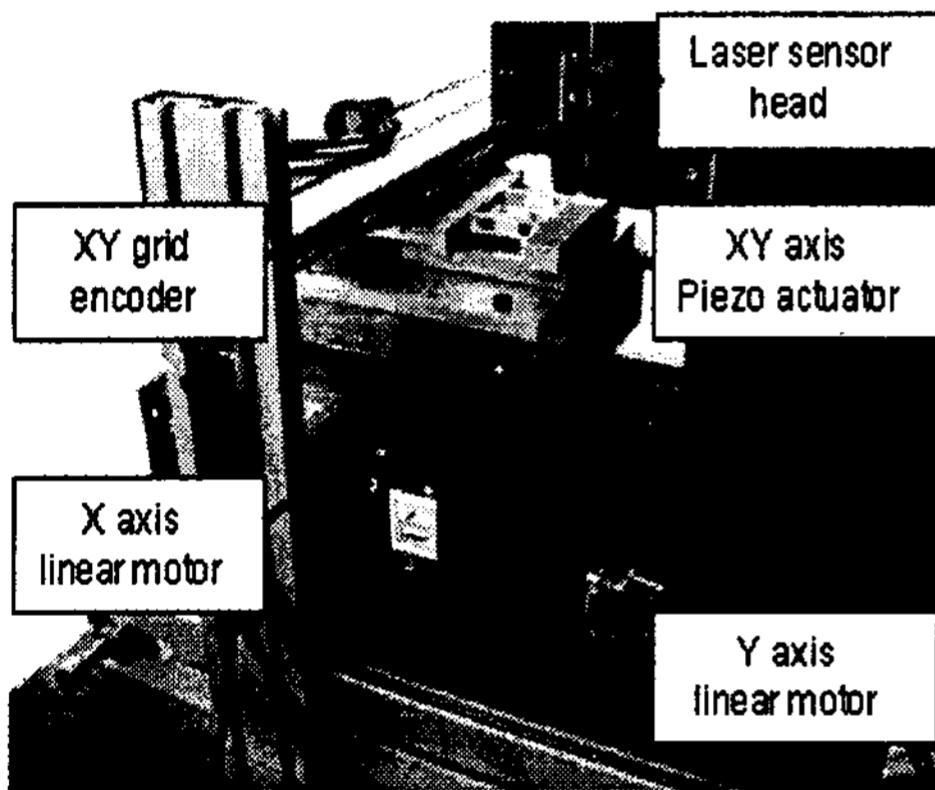


Fig. 5 Dual stage assembly

스테이지를 글로벌 스테이지 위에 장착하였다. 글로벌 스테이지는 리니어 모터를 이용한 스테이지이다. 글로벌 스테이지 자체의 정밀도는  $\pm 1 \mu\text{m}$  이지만  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  으로 정밀도를 더 높이기 위해서 마이크로 스테이지를 글로벌 스테이지 위에 장착하였다. XY 2 축으로 구성되어 있는 마이크로 스테이지의 최대 이송거리는 각각  $\pm 2 \mu\text{m}$  이다. PZT의 분해능은 무한대이므로 초정밀 제어를 위해서는 엔코더의 역할이 아주 중요하다. 따라서 위치 센서로 XY grid sensor를 사용하였고 측정 범위는  $60 \times 60 \text{ mm}$  으로 두 축이 동시에 측정이 되고 정밀도는 약  $5 \text{ nm}$  이다. 이 엔코더는 피삭물 고정대와 일체형으로 되어있으며 마이크로 스테이지 위에 장착되어있다. Fig. 6 은 듀얼 스테이지와 글로벌 위치 센서의 구성도를 나타내며, 마이크로 스테이지와 글로벌 스테이지는 기계적으로 결합되어 각 스테이지의 단점을 보완하도록 설계되었다. 그림의 XY 그리드 센서(grid sensor) 2D 레이저 센서 헤드와 2D 눈금판(grating plate)로 구성되어 있는데 레이저 헤드는 밀링 본체의 베이스에 부착되어 있고, 그리드 센서는 마이크로 스테이지 위에 장착되어 듀얼 스테이지의 글로벌 이송량을 측정할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 7 은 듀얼 서보 루프 컨트롤 알고리즘에 관한 상세한 블록다이어그램을 나타낸다. 글로벌 스테이지는 자체 피드백 컨트롤을 하지만 글로벌 위치 센서에서 볼 때 최소  $1 \mu\text{m}$  이상의 에러를

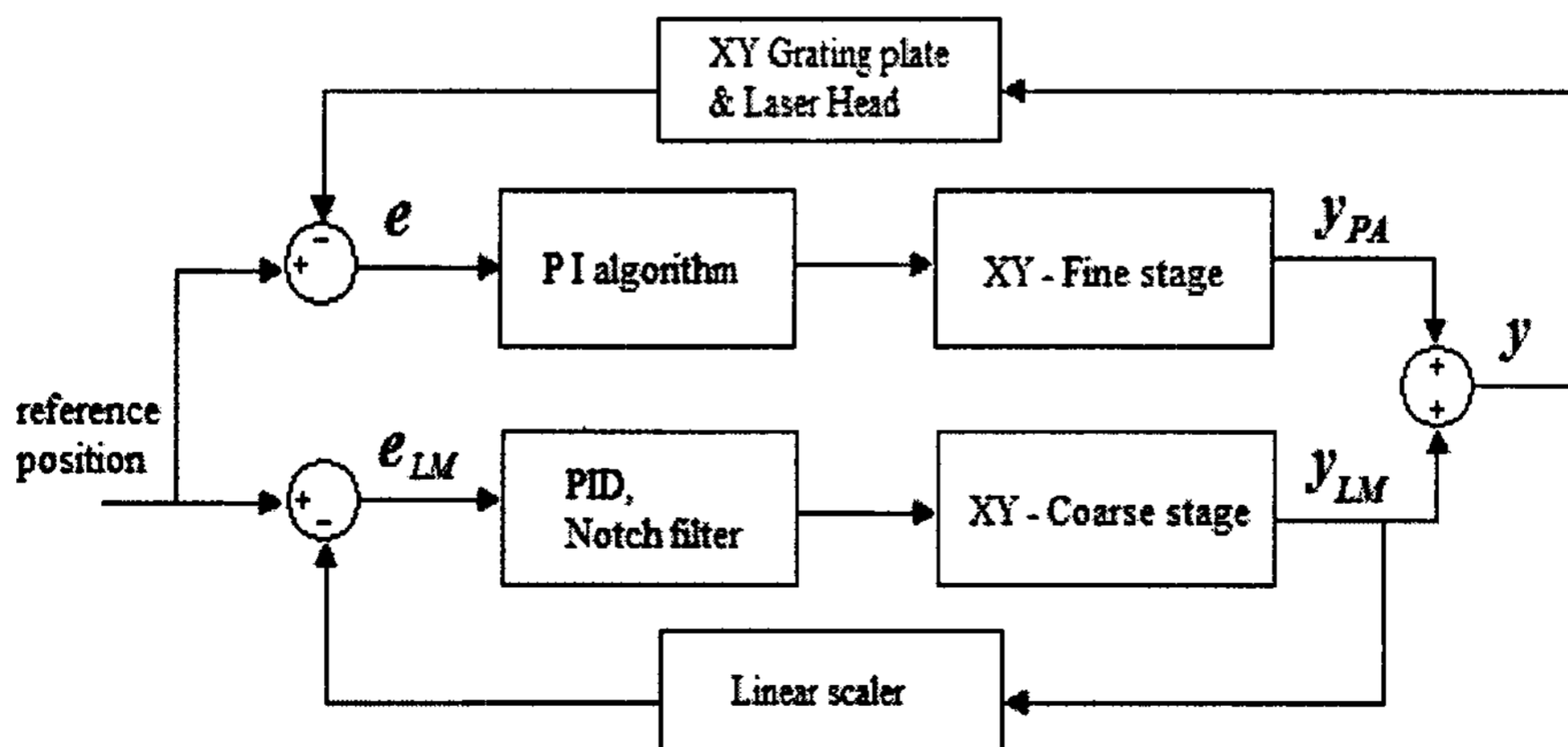


Fig. 6 Block diagram of dual-stage controller

가지고 있다. 이 에러는 XY 그리드 센서를 이용해 측정하게 되고 이를 마이크로 스테이지가 보정해주게 된다. XY 그리드 센서는 5 nm의 분해능을 가지고 절대 위치를 측정할 수 있기 때문에 전 영역을 0.1  $\mu\text{m}$  오차 범위 내로 제어 하는 것이 가능하다. Fig. 8에서는 듀얼 스테이지의 제어 알고리즘에 관한 흐름도(flow chart)를 보여준다. 제어 알고

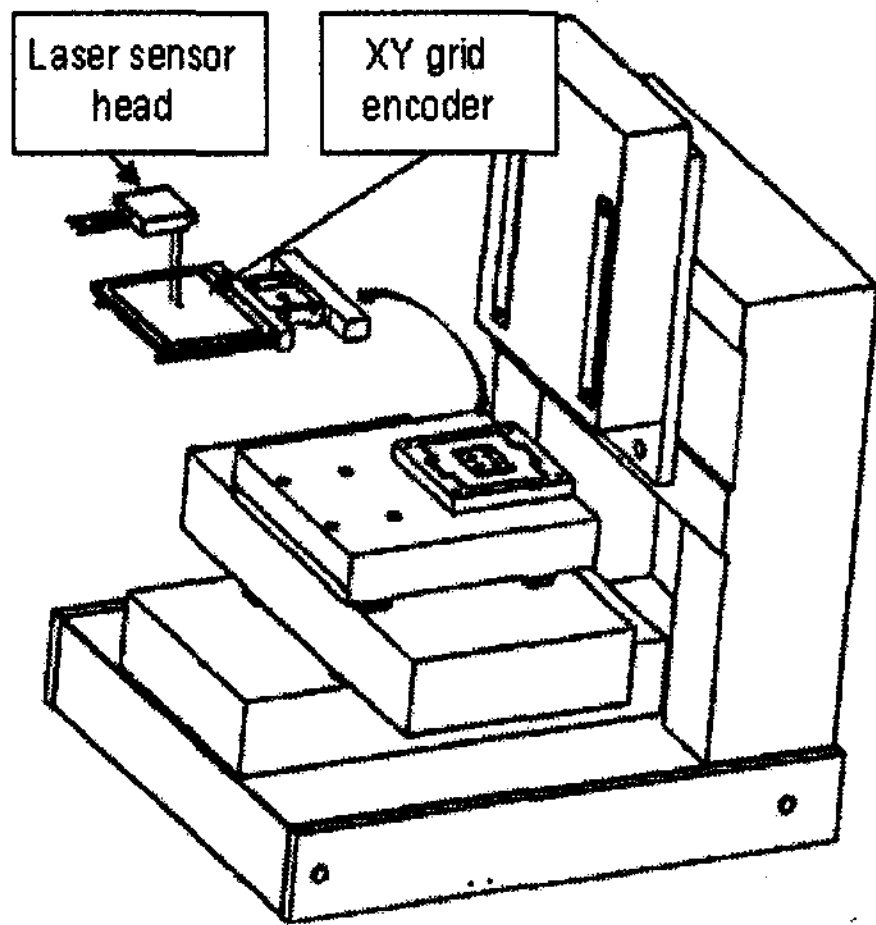


Fig. 7 Grid sensor & head of Dual stage

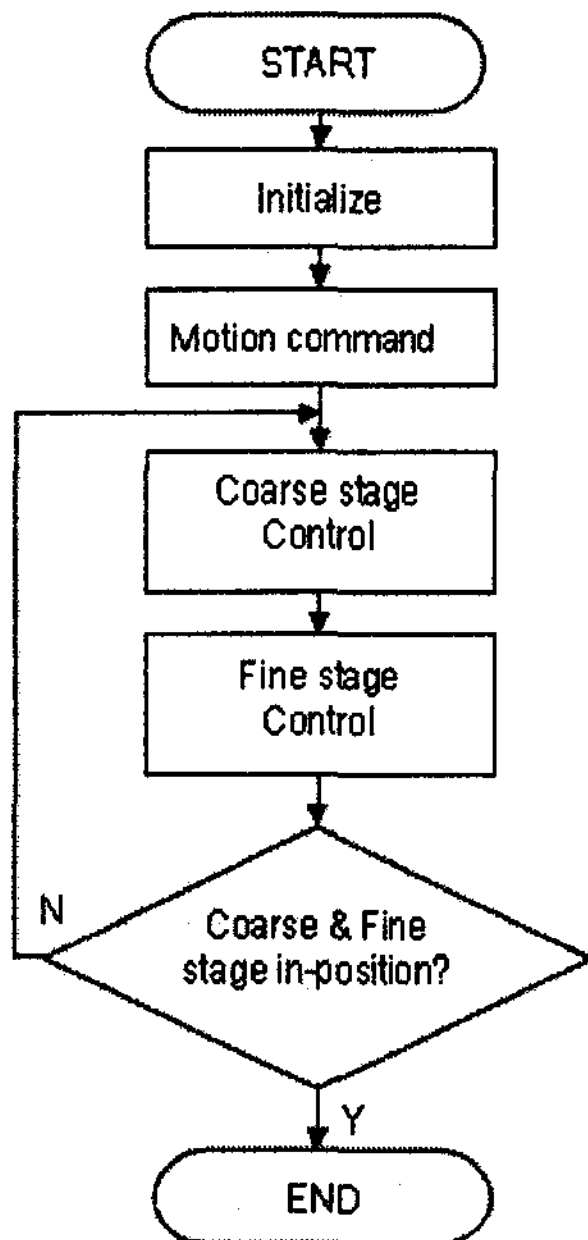


Fig. 8 Flow chart of dual-stage control algorithm

리즘은 마이크로 스테이지와 글로벌 스테이지에 대한 제어로 구성되어있다. 가공 중에 LM 제어기는 주어진 궤적을 따라가지만 절대위치에서  $\pm 2 \mu\text{m}$  정도의 오차 범위 안에 들어오면 이를 PZT 제어기로 보상하여  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  이내의 오차로 줄인다.

Fig. 9와 10은 Y축 이동에서 LM만의 제어와 듀얼 스테이지에 대한 제어 결과를 보여 준다. LM만의 제어에서는 최대 1.2  $\mu\text{m}$  정도의 추적 오차와 위치 리플이 발생했지만 듀얼 스테이지에서는 오차가 0.1  $\mu\text{m}$  정도로 감소되었고 리플도 사라졌음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 11과 12는 2축 동시 제어에 의한 원호가공의 경우를 보여 준다. 원호가공에서도 LM만의 제어에서는 반경방향의 오차가 최대 1.2  $\mu\text{m}$  정도 발생했지만 듀얼 스테이지에서는 오차가 0.3  $\mu\text{m}$  정도로 현저히 감소되었음을 알 수 있었다. Fig.13은 듀얼 스테이지로 구성한 실제 밀링 장비 전체모습과 가공실험의 확대 형상이다. Fig. 14와 15는 알루미늄 A17075과 A16061에 대한 가공 결과를 보여주며 이때의 가공조건은

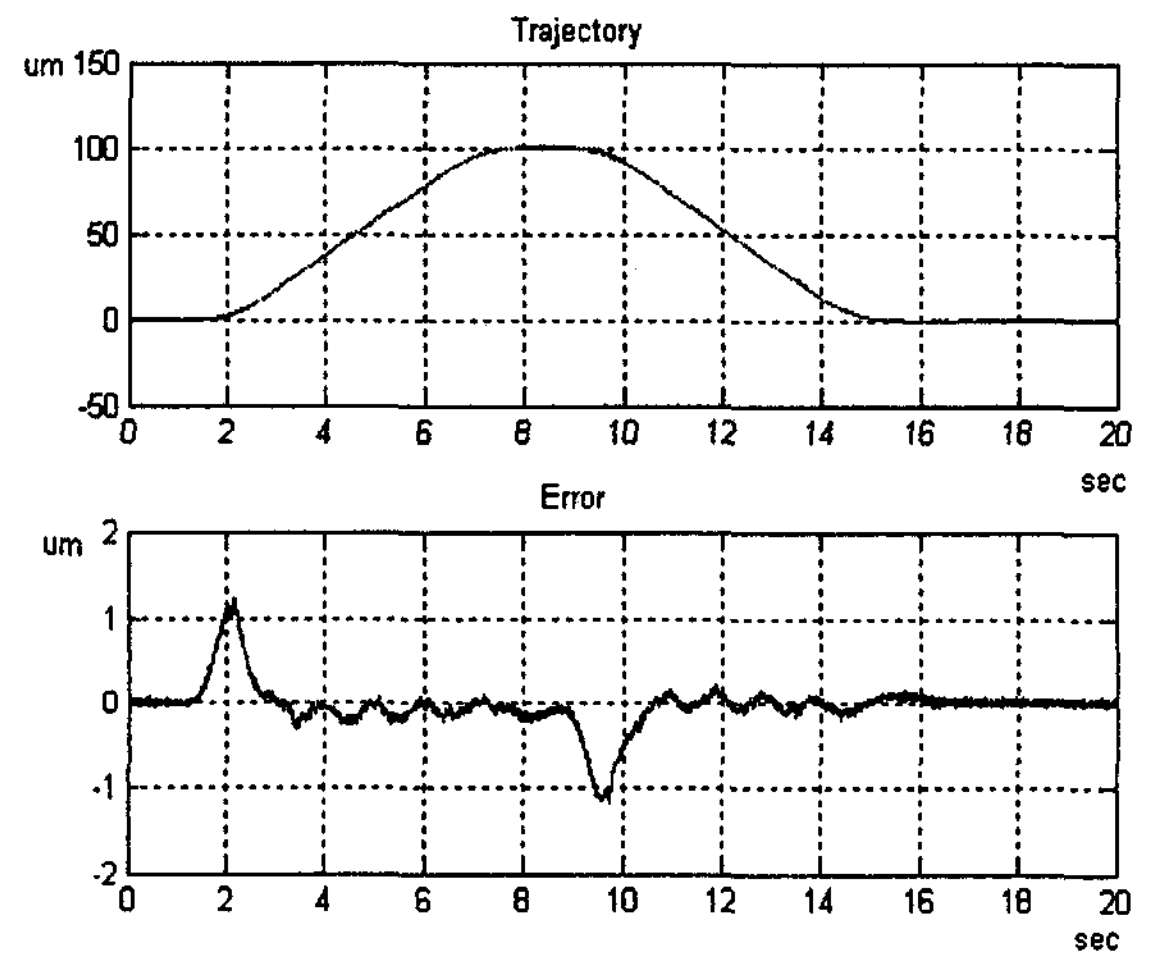


Fig. 9 Tracking error of Y axis by single-stage

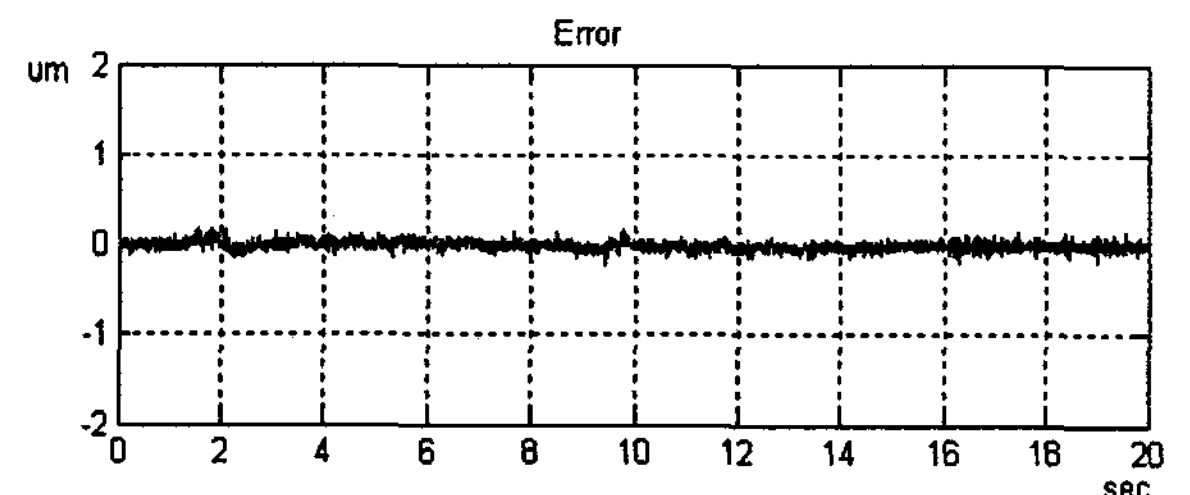


Fig. 10 Tracking error of Y axis by dual-stage

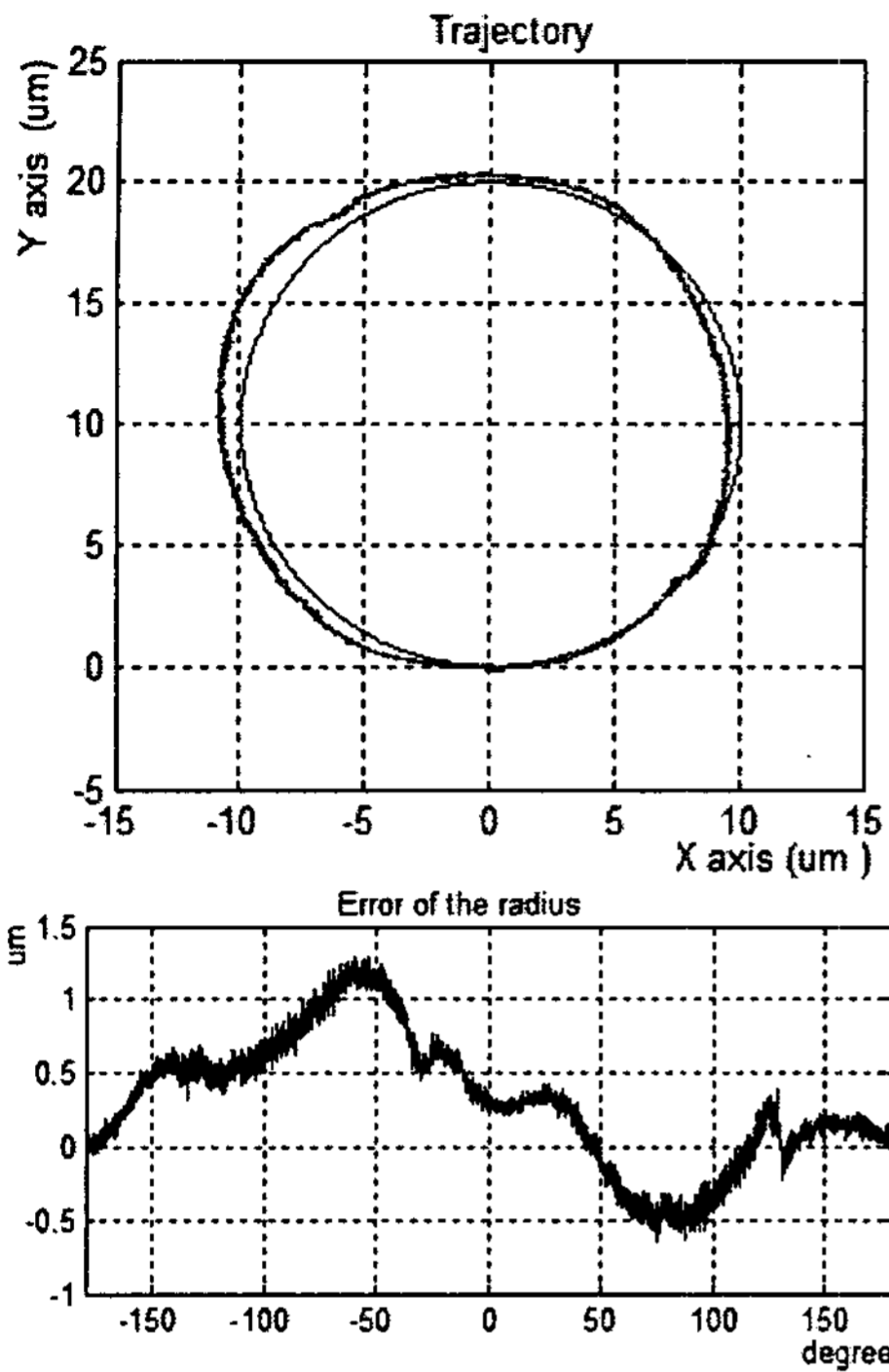


Fig. 11 Circular profile & error by single-stage

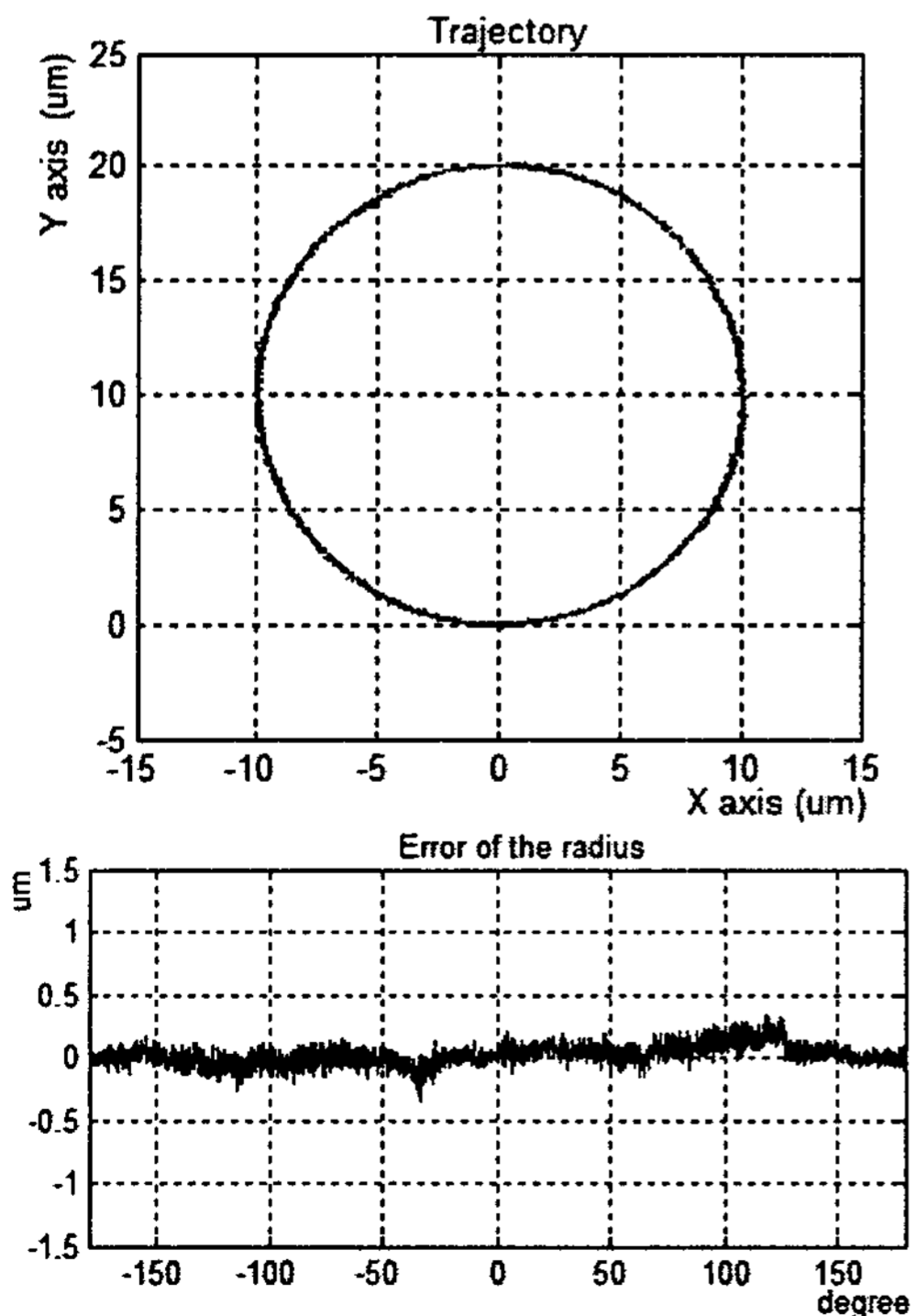


Fig. 12 Circular profile & error by dual-stage

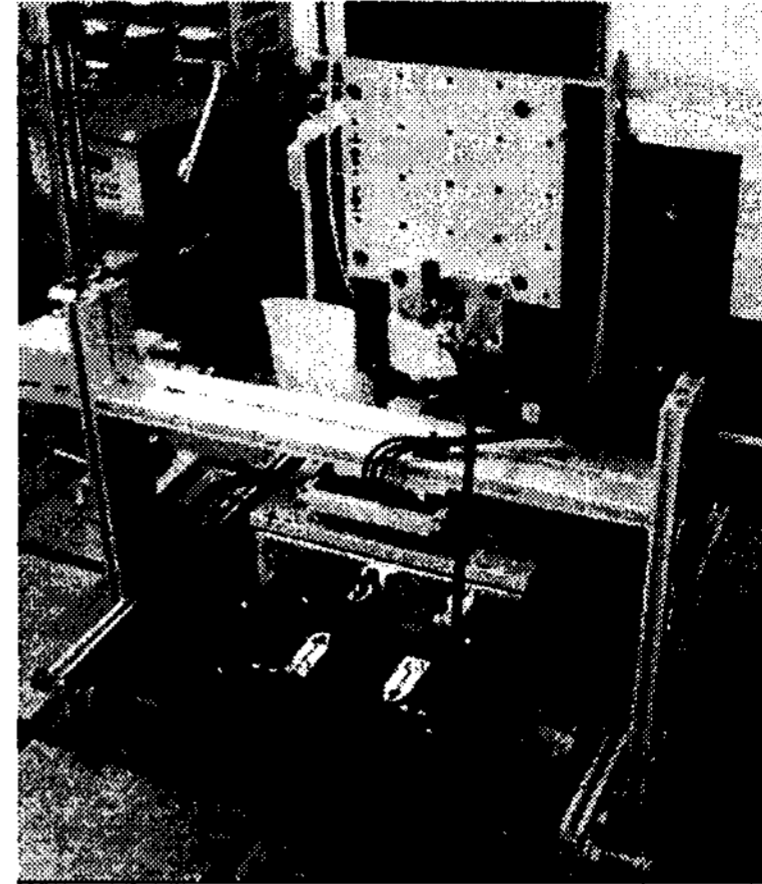


Fig. 13 Real machining experiment

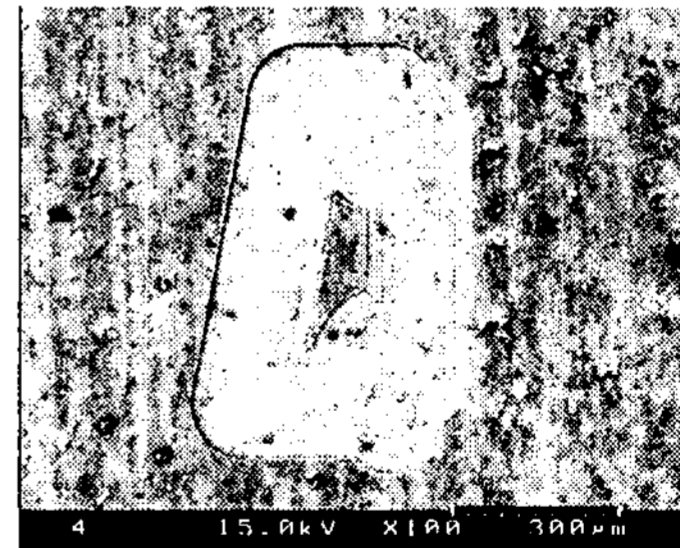


Fig. 14 Machining result for A17075

Table 1 Machining condition for A17075

RPM	60,000 rpm
Feedrate	20 mm/min
DOC	10 $\mu\text{m}$
Tool Dia.	0.2 mm(초경)
Material	A17075
Lubricant	Vascomill(식물성 oil)

Table 1 및 2 와 같다. Fig. 14 는 마이크로 가공특성을 파악하기 위해 0.2 mm 의 공구경을 이용하여 10  $\mu\text{m}$  의 절삭 깊이로 500  $\mu\text{m}$  의 형상을 가공한

것이며, Fig. 15 는 마크로 가공특성을 파악하기 위해 0.4 mm 의 공구경을 이용하여 100  $\mu\text{m}$  의 절삭 깊이로 10 mm 크기의 형상을 가공한 것이다.

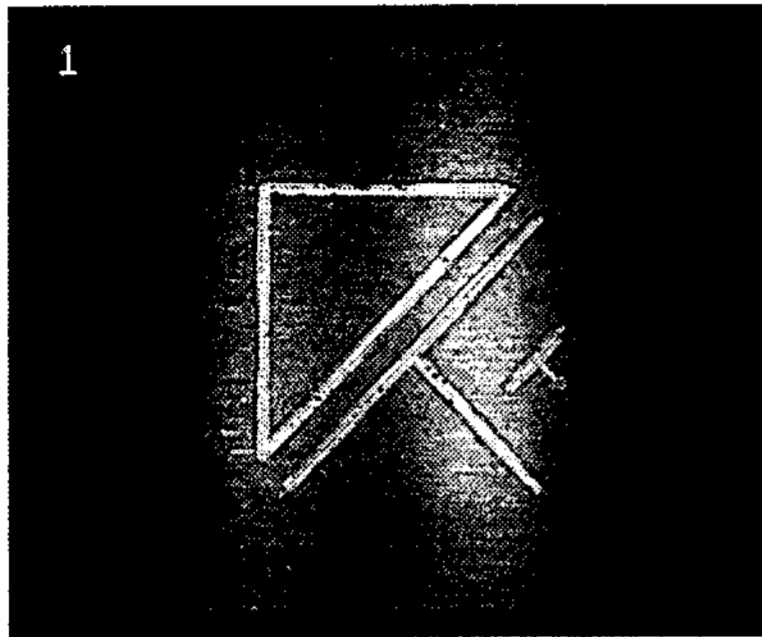


Fig. 15 Machining result for A16061

Table 2 Machining condition for A16061

RPM	40,000 rpm
Feedrate	50 mm/min
DOC	100 $\mu\text{m}$
Tool Dia.	0.4 mm(초경)
Material	A16061
Lubricant	Dry

## 5. 결론

본 논문은 정밀 가공을 위한 듀얼 스테이지의 설계와 제어에 대한 것으로 기존의 LM 을 기반으로 하는 밀링머신에 PZT 로 구동되는 마이크로 스테이지를 추가하여 정밀 가공을 구현하였다. 마이크로 스테이지를 설계하기 위해서는 탄성 기반의 유한 요소 모델을 만들어 ANSYS 로 인장 응력을 해석하였고 이를 기반으로  $\pm 2 \mu\text{m}$  의 이동거리를 갖는 마이크로 스테이지는 설계하였다. 듀얼 스테이지의 컨트롤 알고리즘에서 글로벌 스테이지는 자체 서보 제어기에 의해 제어되지만 마이크로 스테이지는  $\pm 2 \mu\text{m}$  이내의 에러에 대해 전체 에러를 줄이도록 설계하였다. 그 결과 직선가공이나 원호 가공 실험에서 LM 단독 스테이지에서 나타난 큰 추적에러를 듀얼 스테이지는 크게 감소 시켜 밀링머신의 가공 정밀도를 높이는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 듀얼 스테이지 이송 장치 시스템은 장거리 이동뿐만 아니라 높은 위치정밀도를 동시에 얻을 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2005 학년도 영남대학교 학술연구 조성비에 의한 것임.

## 참고문헌

1. Lee, D. S., Park, J. H. and Pahk, H. J., "Ultra Precision Positioning System for Servo Motor-piezo Actuator using the Dual Servo Loop and Digital Filter Implementation," J. of KSPE, Vol. 16, No. 3, pp. 154-163, 1999.
2. Van Den Braembussche, P., Swevers, J., Van Brussel, H. and Vanherck, P., "Accurate Tracking Control of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes," Mechatronics, Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.
3. Ni, J. and Zhu, Z., "Design of a Linear Piezomotor with Ultra-high Stiffness and Nanoprecision," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 5, No. 4, pp. 441-443, 2000.
4. Lindner, D., Zhu, M., Vujic, N. and Leo, D., "Comparison of Linear and Switching Drive Amplifiers for Piezoelectric Actuators," Collection of Technical Papers- 43<sup>rd</sup> AIAA/ASME/ASCE/AHS /ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp. 1148-1152, 2002.
5. Kwon, S., Chung, W. and Youm, Y., "On the Course/fine Dual-stage Manipulator with Robust Perturbation Compensator," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 121-126, 2001.
6. Numasato, H. and Tomizuka, M., "Settling Control and Performance of a Dual-actuator System for Hard Disk Drives," Transactions on Mechatronics Vol. 8, No. 4, pp. 2779-2785, 2003.
7. Semba, T., Hirano, T., Hong, J. and Fan, L., "Dual-stage Servo Controller for HDD using MEMS Micro Actuator," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp.2271-2273, 1999.
8. Guo, G., Wu, D. and Chong, T. C., "Modified Dual-stage Controller for Dealing with Secondary-stage Actuator Saturation," IEEE Transactions on Magnetics Vol. 39, No. 6, pp. 3587-3592, 2003.
9. Nakamura, S., Numasato, H., Sato, K., Kobayashi, M.

- and Naniwa, I., "A Push-pull Multi-layered Piggyback PZT Actuator," *Microsystem Technologies* Vol. 8, No. 2, pp. 149-154, 2002.
10. Li, Y. and Horowitz, R., "Mechatronics of Electrostatic Microactuators for Computer Disk Drive Dual-stage Servo Systems," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* Vol. 6, No. 2, pp. 111-121, 2001.
11. Elfizy, A., Bone, G. and Elbestawi, M., "On the Use of Local Linear Models for the Control of Nonlinear Piezoelectric Actuators," *The 14<sup>th</sup> International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*, pp. 59-64, 2004.
12. Ku, S., Larsen, G. and Cetinkunt, S., "Fast Tool Servo Control for Ultraprecision Machining at Extremely Low Feed Rates," *Mechatronics*, Vol. 8, No. 4, pp. 381-393, 1998.
13. Cuttino, J., Miller Jr., C. and Schinstock, D., "Performance Optimization of a Fast Tool Servo for Single-point Diamond Turning Machines," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 169-179, 1999.
14. Elfizy, A., Bone, G. and Elbestawi, M. "Design and control of a dual-stage feed drive," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 45, No. 2, pp. 153-165, 2005.
15. Zhang, B. and Zhu, Z., "Developing a Linear Piezomotor With Nanometer Resolution and High Stiffness," *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-29, 1997.