

마이크로 및 메조 가공을 위한 소형공작기계 개발

박성령*, 이재하 (경북대 대학원 기계공학과), 양승한 (경북대 기계공학부)

Development of a miniaturized machine tool for machining a micro/meso scale structure

S. R. Park*, J. H. Lee (Mecha. Eng. Dept. KNU), S. H. Yang (Mechanical Eng. Dept., KNU)

ABSTRACT

Miniaturized machine tool can be used to produce 3D features based on CNC and PC-NC technology in the micro/meso scale. Wide applications of CNC technology are developed and there are lots of know-hows in the cutting process and their CNC application. It helps micro/meso scale structure to machine components, which can be used directly for practical applications. In the present research, as the machine tool is miniaturized, the manufacturing machine tools costs less when compared to the equipment used in other micromachining technologies. Moreover, with advancement of micro tool technology, the cutting process can be used to produce micro/meso scale parts. In conclusion, the proposed system can reduce the cost by utilizing the current machining technology, and as a result, complex micro/meso parts can be produced efficiently with high productivity.

Key Words : miniaturized machine tool(소형공작기계), micro tool(마이크로 공구), PC-NC, micro/meso scale structure(마이크로/메조 구조물), PZT actuator(PZT 액츄에이터), miniaturized stage(소형 스테이지)

1. 서론

기계 가공품의 소형화는 마이크로/메조 스케일의 부품 생산을 요구한다. 자동차 산업에서 바이오 산업 분야에까지 모든 분야가 소형화를 필요로 한다. 최근 이러한 제품들은 더욱더 복잡해지고 높은 정밀도를 요구한다. 이미 마이크로 및 메조 크기의 부품들을 생산하기 위한 새로운 가공 기술이 개발되었다. 그 중 MEMS 는 잘 알려진 마이크로 가공 기술 중 하나이다. 고밀도 빔을 이용한 엑시머 레이저 가공 또한 잘 알려졌다. 하지만 기존의 방법으로는 3 차원 형상이나 복잡한 형상은 가공하기가 어렵고 재료가 한정되어 있을 뿐 아니라 가격이 아주 비싸다. 또한 마이크로 및 메조 스케일 범위인 10~ 10,000 μm 내에서는 가공하기에는 더 큰 노력이 요구된다.⁽¹⁾⁽²⁾

이러한 한계를 극복하기 위해서 많은 연구가 진행되어 왔는데 특히, 마이크로 공구의 발달이 절삭 공정을 이용한 마이크로 머시닝의 발달을 가져왔다. 기계적인 힘에 의한 칩의 제거 공정은 가격이 싸고 대량 생산이 가능할 뿐 아니라 금속재료도 가공할

수 있다. CNC 기술과 절삭 공정의 노하우는 여러 형상에 대한 NC 데이터를 마이크로/메조 크기의 형상을 만드는데 바로 적용할 수 있게 해준다. 하지만 기존의 CNC 는 가격이 비싸고 마이크로/메조 크기의 공작물을 가공하는데, 공작물에 비해 수 백 배 크기의 공작 기계를 사용한다는 것은 너무나 비현실적이고 비효율적이다. 여기서 “작은 부품을 가공하기 위해서 작은 공작 기계를 사용하라”는 아이디어를 떠올렸다. 소형공작기계는 어느 기술에 비해 충분한 정밀도를 가지고 가격 경쟁면에서도 우수하며 에너지 효율면에서도 우수하다.⁽³⁾

소형공작기계는 스테이지, 스피들, 컨트롤러로 구성된다. 외곽 치수는 300x150x150mm 이고 수평머시닝센터 형식이다. 높은 정밀도를 유지하기 위해 PZT 액츄에이터로 구성된 소형공작기계는 250nm 의 분해능으로 IBM-PC 가 컨트롤한다. 피드백 센서로 리니어 엔코더를 사용하고 Anti-windup 기능이 있는 PI 컨트롤러가 제어한다. 경작 및 응작 현상을 막기 위해 최대 40,000 rpm 을 가지는 에어 스피들을 사용하고 보간기 해석기 등은 PC-NC 기반으로 한 CNC 기술을 적용한다. 본 연구에서는 마이크로/

메조 가공을 위한 소형공작기계를 구성하고 현재 사용되고 있는 가공기술을 그대로 사용하여 생산원가를 낮춘다. 또한 복잡한 마이크로/메조 크기의 부품을 높은 생산성으로 가공한다.

2. 소형공작기계 구성

마이크로 머시닝에서는 고정밀도를 가지는 스테이지를 요구한다. PZT 액츄에이터는 수 나노의 분해능을 가진다. 분해능은 좋지만 수십 마이크로 미터 정도의 행정밖에 가지지 못한다. 이러한 결점을 보완하기 위해 인치웸 방식을 채택하여 스테이지를 구성했다. Fig. 1은 그 구조를 보여준다.⁽⁴⁾

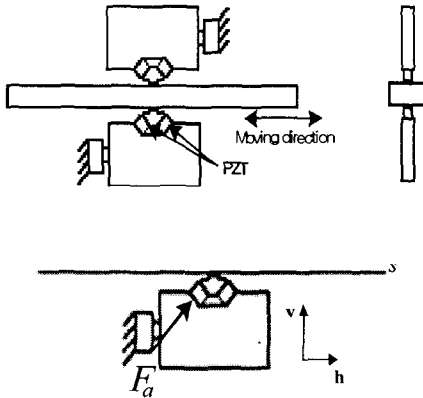


Fig. 1 Structure of linear motor

PZT 액츄에이터는 공진을 이용해서 구동된다. PZT가 늘어나면 기구적으로 수직항력이 커지게 되고 마찰력이 증가하게 된다. 이 힘으로 스테이지는 움직이게 된다. Table 1은 PZT 액츄에이터의 성능을 보여준다.

Table 1 Specifications for each axis

Total travel	13 mm
No-load speed	50 mm/s
Step resolution	0.1 micron
Stall force	250 gf
Holding force	450 kgf
Overall dimensions	48x48x14 mm
Weight	90 g

PZT 액츄에이터의 분해능은 100 nm이다. 하지만 기하학적으로 스테이지와 스프인들이 수직이 아니고 절삭력 등을 고려해서 소형공작기계의 분해능을 250 nm로 했다. 총 이송 거리는 13 mm이고 외력이 없을 때 최대 50 mm/s의 속도를 낼 수 있다. Holding force는 self-locking의 기능을 한다. 한 스테이지에 대한 크기는 48x48x14 mm이다.

고정밀도를 보장하기 위해 X, Z 축은 50 nm, Y 축은 10 nm의 분해능을 가지는 광학식 리니어 엔코드를 피드백 센서로 사용했다. 이 시스템의 전체 크기는 300x150x150 mm이고 수직형 머시닝 센터이다. 경작과 응착을 막기 위해 최대 속도 40,000 rpm을 가지는 에어 스프인들을 사용했고 지름 200 μm의 평엔드밀을 이용했다. Fig. 3은 가공 후의 엔드밀 모습이다. 그리고 스테이지 제어는 IBM-PC와 DSP (Digital Signal Processor)가 한다. 가공물의 측정은 CMM (Coordinate Measuring Machine)으로 했다.

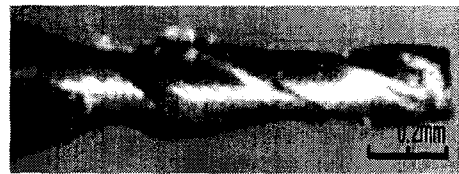


Fig. 2 Micro tool after cutting process

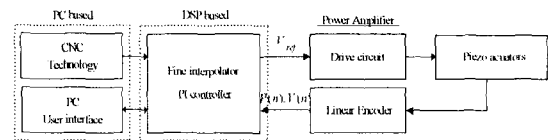


Fig. 3 Block diagram of overall control system

PZT 액츄에이터로 구성된 소형 스테이지는 PC를 기반으로 제어된다. Drive circuit은 PZT 액츄에이터를 구동하는 Power Amplifier 기능을 한다. 제어는 Anti-windup 기능이 있는 PI 제어기를 이용한다. 제어기는 DSP가 담당한다. 지글러-니콜스 조정법은 비례제어만으로는 임계진동을 하지 않는 시스템에는 적용할 수 없는 제약이 있다. 출력을 강제로 진동시키고 이때 출력의 한계주기 및 진폭을 이용하여 제어기의 이득을 조정하는 방법이 계전기 조정법이다. 본 시스템에서는 계전기 조정법을 이용하여 게인값을 튜닝 하였다.⁽⁵⁾⁽⁶⁾ Table 2는 각 축에 대한 게인값이다.

Table 2 Gain value for each axis

	X axis	Y axis	Z axis
K_p	2	3	1
K_i	88	215	100
K_a	2.5	1.6	5

마이크로 머시닝에서는 공구의 강성 때문에 속도 제한이 필요하다. 그러나 적분 제어기 때문에 그 값이 제한되지 않고 제어기의 제한 폭을 넘어 쌓이게(Windup) 된다. 이 경우 제어기 입력의 부호가 반전될 경우에도 쌓여있는 적분기의 내부 적분값으로 인하여 제어기 출력이 입력에 대해 제대로 반응하지 않게 된다. 이러한 현상을 막기 위해 적분기 내부의 값을 제어기 출력의 제한 값에 적절히 제한 (Anti-windup) 할 필요가 있다. 그림 5 는 Anti-windup 기능이 있는 PI 제어기에 관한 블록 다이어그램이다.⁽⁷⁾

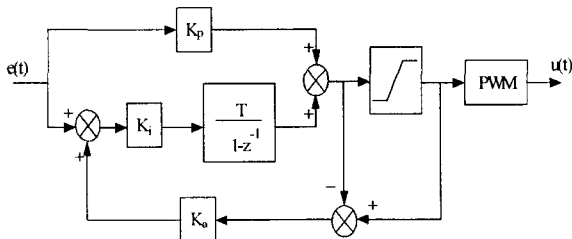


Fig. 4 PI Controller with Anti-windup

CNC 공작 기계는 널리 사용되고 있지만 비싸고 빠르게 변하므로 산업계에서는 CNC 가 모든 해결책은 될 수 없다. 이러한 결점을 보완하기 위해 PC-NC 개념이 만들어졌다. MCU 의 기능을 PC 가 맡아 행한다. PC 를 사용함으로써 기술의 발달에 대해 소프트웨어 모듈이 더해짐으로 공작 기계에 쉽게 적용할 수 있다.⁽⁸⁾ Fig. 8 은 PC-NC 개념의 구조를 보여준다. PC 와 DSP 가 공구 경로 생성과 제어를 담당한다.

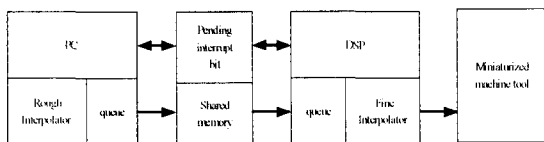


Fig. 5 Schematic of PC-NC

CAD/CAM 소프트웨어로 G 코드를 생성한다. 생성된 G 코드는 해석기로 해석되고 보간기를 거쳐 지령 데이터로 변환된다. 제어 루프 시간이 보간기 루프 시간보다 짧기 때문에 보간기에 의해 만들어진 데이터를 한번 더 제어 루프 시간마다 지령값으로 보간하는데 이를 파인 보간이라 한다.⁽⁹⁾

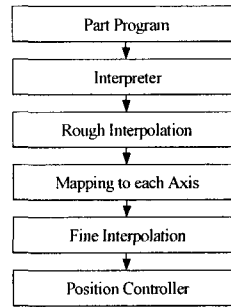


Fig. 6 NCK (Numerical Control Kernel) Flowchart



Fig. 7 Tool path using rough interpolator

Fig. 6 은 가공전 프로세서를 보여준다. 파트 프로그램에서 각 축으로 지령값을 보내는 부분은 PC 가 담당한다. 이 지령값을 DSP 는 제어기 샘플링 타임당 지령값으로 바꾸는 파인 보간을 하고 제어를 담당한다. Fig. 7 은 전통적인 방법으로 만든 공구 경로를 보여준다.

Fig. 8 는 소형공작기계로 가공한 형상을 보여준다. 가공된 부분의 치수는 2.5x0.27x3 mm 이다. 공구 경로를 따라 가공흔적은 있지만 3 차원 형상의 마이크로 머시닝은 성공적이다. 더 작은 마이크로 공구와 더 정밀한 스테이지가 만들어지면 산업현장에서 제안된 방법을 적용하여 마이크로 머시닝이 가능하다.

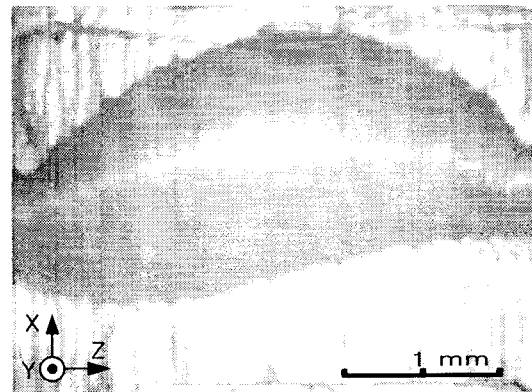


Fig. 8 Machined part by miniaturized machine tool

3. 결론

소형 공작 기계를 이용하여 3 차원 형상을 가지는 마이크로/메조 구조물을 성공적으로 가공했다. 본 연구는 CNC, PC-NC 기술을 이용하여 소형 공작 기계로 마이크로/메조 크기로 가공물을 생산할 수 있다는 것을 보였다. 게다가 공작 기계의 소형화로 에너지 소비를 줄였다. 마이크로/메조 가공을 위한 소형 공작 기계는 전통적인 가공 기술을 이용해서 생산원가를 낮추었고 복잡한 형상을 마이크로/메조 스케일로 가공하여 생산성을 높였다.

참고문헌

1. M. Bao and W. Wang, Future of microelectro - mechanical systems (MEMS), Sensors and Actuators A: Physical, Volume 56, Issues 1-2, August 1996, Pages 135-141
2. M. Tlustý, J. Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
3. K. Sugioka, K. Obata, K. Midorikawa, M. H. Hong, D. J. Wu, L. L. Wong, Y. F. Lu and T. C. Chong, Advanced materials processing based on interaction of laser beam and a medium, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Volume 158, Issues 2-3, 2 June 2003, Pages 171-178
4. Zinan Lu, Takeshi Yoneyama, Micro cutting in the micro lathe turning system, Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 39 (1999) 1171-1183.
5. K. K. Tan, Tong Heng Lee, and Huixing X. Zhou, Micro-Positioning of Linear-Piezoelectric Motors Based on a Learning Nonlinear PID Controller, IEEE/ASME Trans. Mechatron. Vol. 2 (1997), 22-29
6. C. C. Hang, K. J. Astrom and Q. G. Wang, Relay feedback auto-tuning of process controllers — a tutorial review, Journal of Process Control, Volume 12, Issue 1, January 2002, Pages 143-162
7. Zigler, J.G and Nichols, N.B., Optimum settings for automatic controllers, Transactions of the ASME (1984) 759-768
8. C. Bohn and etc., An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies, IEEE Control System Magazine, Vol.16, No. 2, April 1995, pp.33-40.
9. Min-Yang Yang and Won-Pyo Hong, A PC-NC milling machine with new simultaneous 3-axis control algorithm, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 4, March 2001, Pages 555-566
9. Y. Koren, Computer Control of Manufacturing Systems, McGraw-Hill, 1983.