

초소형 공작기계와 미세가공기술



고 태 조†
영남대학교 기계공학부



박 종 권
KIMM



강 재 훈
KIMM



송 준 엽
KIMM



이 득 우
부산대학교

1. 서론

최근 Meso($10^{-2} \sim 10^{-5}m$)급의 크기를 지닌 미소 부품의 가공에 대한 마이크로 머시닝을 위하여 빔 이용 기술이나 전기, 화학적인 기계 가공 기법 등이 많이 개발 되고 있다. 그러나, 이러한 다양한 공정방법의 개발에도 불구하고, 여전히 제품생산의 신뢰성과 생산속도 및 실현성의 필요성 때문에 절삭가공에 의한 Micro/Meso 가공의 필요성이 끊임없이 제기되고 있으며, 이를 실현시키기 위한 노력이 계속되고 있다.

이에 본 연구실에서는 초소형 선반에 이어 초소형 밀링 머신을 개발하였다. 본 논문에서는 이 초소형 공작기계를 바탕으로 미세 가공에 대한 가능성을 검증하고, 초소형 공작기계 개발을 통해 생산 가공 시스템을 축소, 소형화함으로써 작업 현장의 공간 활용성을 향상시킴과 동시에 미소 부품가공에 대한 장비, 시설 투자 비용 등을 포함한 소비 에너지와 생산 제조 원가의 절감화를 이루고자 한다.

Fig. 1 은 본 연구에서 다루고 있는 초소형 밀링머신의 전체 개념도를 보이고 있다.

2. 이송 구동계의 설계

2.1 Stepwise 방식의 압전 구동기

초소형 밀링 머신의 X, Y 축의 이송계에는 Stepwise 구동 방식의 압전 구동계를 적용하였다. Stepwise Motion

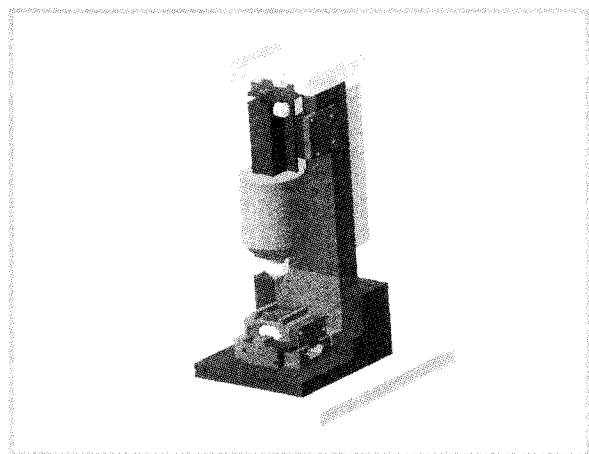


Fig. 1 Micro milling machine

의 전, 후 방향에 대한 구동원리를 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 3에서 제어신호를 도식화하였다. 가이드 내의 슬라이드 구조를 살펴보면, 크게 고정부와 구동부로 나뉘어지며, 서로 탄성 힌지로서 연결되어있다. Fig 2에서 보듯이 탄성 힌지를 좌우 대칭으로 설계함으로써 Piezo의 변위가 슬라이드의 이송에 적합한 구조와 조건을 가지게 하였다. 전, 후 방향의 이송은 두 개의 Piezo에 순차적으로 변위를 발생시킴으로써 이루어지며, 이를 위해 일정한 타임 스케줄에 따른 두 개의 입력신호를 사용했다. 단위 사이클당 단위 이송의 구동은 4개의 과정으로 구성된다. 초기 상태에서 고정부 Piezo가 전압을 받아 변위가 발생하고 이로 인해 슬라이드가 양 가이드 사이에 클램핑된다.

다음 단계에서 구동부 Piezo가 팽창한다. 그리고, 고정부 Piezo가 수축한 후, 구동부 Piezo가 수축함으로써 결과적으로 초기 상태에서 일정 변위만큼의 이송이 진행되는 것이다.⁽¹⁾

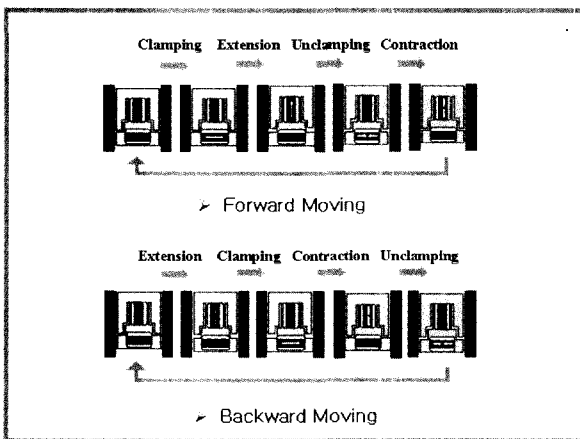


Fig. 2 Stepwise motion of piezo actuator using two piezoelectrics

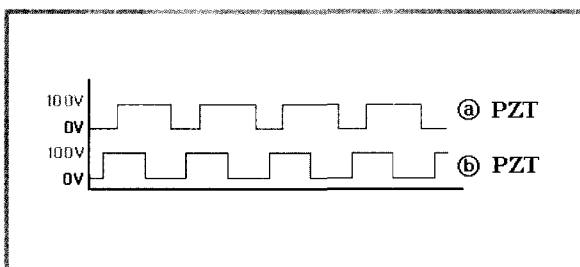


Fig. 3 Signals of two piezoelectric elements for stepwise motion

2.2 Inchworm 방식의 압전 구동기

Inchworm Motion은 두 개의 Piezo만 사용하는 Stepwise 방식에서 보다 강성을 높이기 위해 고안되었다. 즉, Stepwise 방식의 구동부는 볼 플런저(ball plunger)에 의한 예압으로 고정되어있고 구동 Piezo가 수축시 수축 변위만큼 고정부를 끌어 당기는 기능을 하지만, Inchworm 방식에서는 구동부의 고정력을 더 높이기 위해 Piezo에 의한 상위 고정부를 탄성 힌지로서 고정부 역할을 하는 피에조를 하나 더 구성하여 이를 Z축의 이송계로 사용하였고, 아래 Fig. 4와 Fig. 5에서 구동 원리와 제어 신호를 순차적으로 나타내었다.⁽²⁾⁽³⁾

2.3 각 이송계의 이송 정밀도

본 절에서는 2.1과 2.2의 Stepwise 방식과 Inchworm

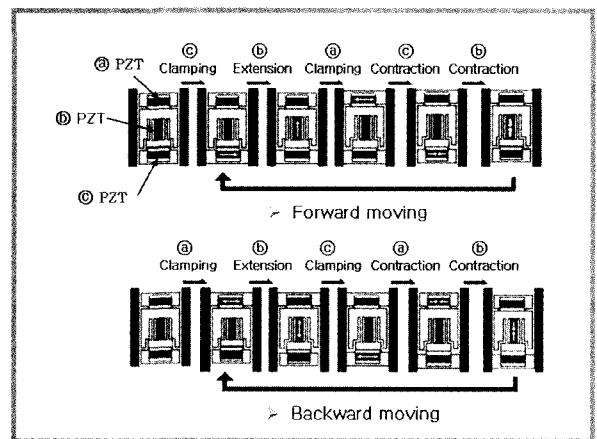


Fig. 4 Inchworm motion of piezo actuator using three piezoelectrics

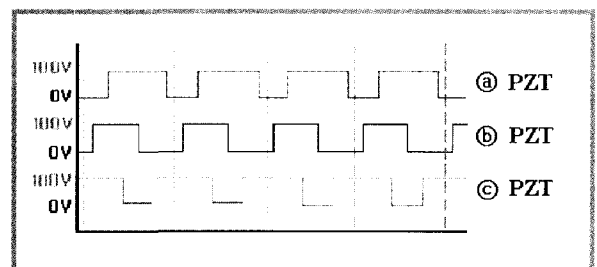


Fig. 5 Signals of three piezoelectric elements for inchworm motion

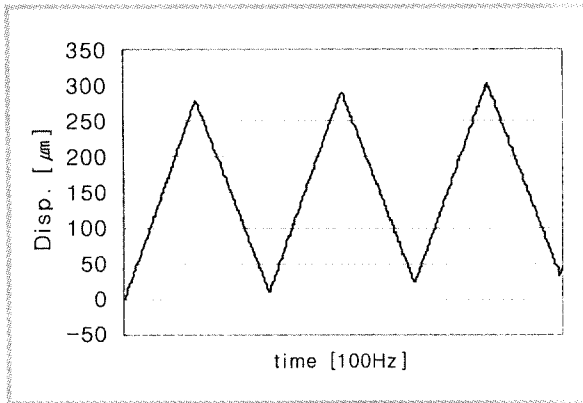


Fig. 6 Result of Stepwise moving device

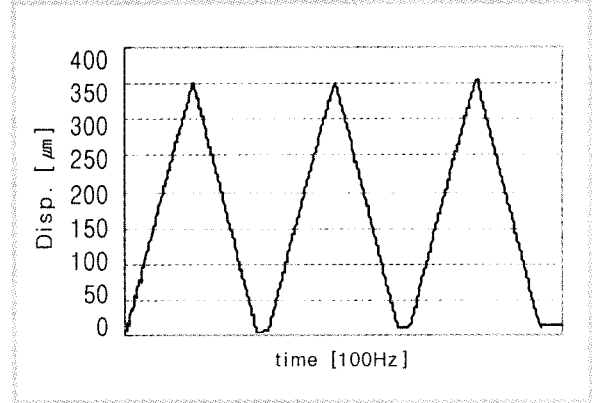


Fig. 7 Result of Inchworm moving device

방식의 두 이송계의 이송 정밀도를 실험하여 그 결과를 나타내었다. 실험은 0.1 μm 의 resolution을 가진 Linear Encoder를 이용하여 측정하였으며, 실험조건은 동일한 입력 주파수 100Hz로 0V와 100V전압을 입력하여 정/역방향으로 3회 반복 이송시켰다. 아래의 Fig. 6 과 Fig. 7의 그래프들은 각각 Stepwise motion 과 Inchworm motion의 이송 결과를 나타내고 있다.

Stepwise 방식의 이송에서는 Piezo actuator에 의한 발생 변위에 대해 변위 손실이 발생하며, 이송 속도는 약 270 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 로 이송 방향에 따라 약 15 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 의 속도 차이가 나타났다. 그러나, Inchworm 방식의 압전 구동계의 이송에서는 이송 속도가 350 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이고, 이송 방향에 따른 속도 차이가 4 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이하로 거의 스텝 모션에 근접하게 나타났다. Inchworm 방식의 이송에서도 Stepwise 방식과 마찬가지로 고정부와 구동부의 Piezo 질량 차이에 의한 충격 현

상으로 인해 약 2 μm 의 변위 손실이 발생하고 있다. 이는 Piezo 입력 신호에 대한 적절한 제어기법을 적용하여 보정할 문제이므로 여기서는 제어에 대한 부분은 생략하였다.

3. 직선 보간기의 설계

3.1 이송 기구의 설계

Stepwise방식과 Inchworm 방식의 이송 기구의 외형을 3D 모델링 프로그램인 CATIA V5R9로 나타낸 것이 Fig. 8 이다. V형 가이드에 슬라이드를 조립하여 구동성을 확인하였으나 가이드와 슬라이드 고정부의 간격 조절에 상당한 어려움이 존재하였다. 이를 개선하기 위해 가이드와 슬라이드 고정부 마찰면의 래핑 작업과 가이드를 분리형으로 설계함으로써 일정한 예압을 줄 수 있는 볼 플렌저를 사용하여 슬라이드 고정부와 가이드의 틈새 간극이 1 μm 이내가 되도록 하였다.

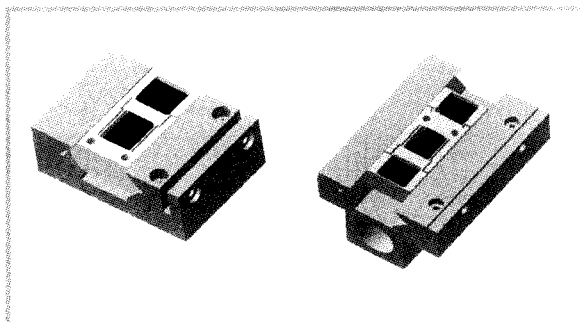


Fig. 8 Modeling of Stepwise and Inchworm apparatus

3.2 직선 및 대각선 주행 제어

본 연구에서는 초소형 밀링 머신의 X, Y 축 테이블의 이송에서 두 축을 연계한 대각선 주행에 대해 Visual C++ 6을 이용하여 제어하였고 보간기는 기준 펄스 방식으로 설계하였다. 즉, X, Y 두 축이 이루는 2차원 평면에서 목표지점까지의 좌표값을 입력 받아 초기 위치를 기준으로 최종

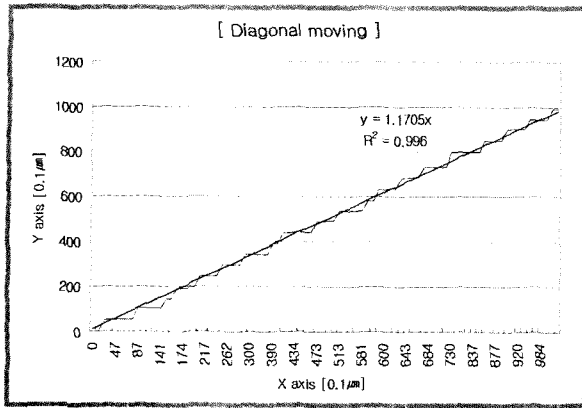


Fig. 9 Diagonal moving at x, y stage

위치의 좌표값으로 목표지점까지의 가상 이송선의 기울기 값을 계산하고, 각 축을 1 cycle씩 단위 이송시키면서 현재 위치의 가상 이송선의 기울기를 Linear encoder 로 피드백 받아 필요한 축을 이송시키면서 목표 지점에 도달하도록 프로그래밍하였다. Fig. 9는 (X 100 μ m, Y 100 μ m) 좌표로의 대각선 주행의 결과를 나타낸 것이다. 대각선 이송 결과, 2 μ m 이하의 이송 정밀도를 가지고 있다. 이는 X, Y 축의 단

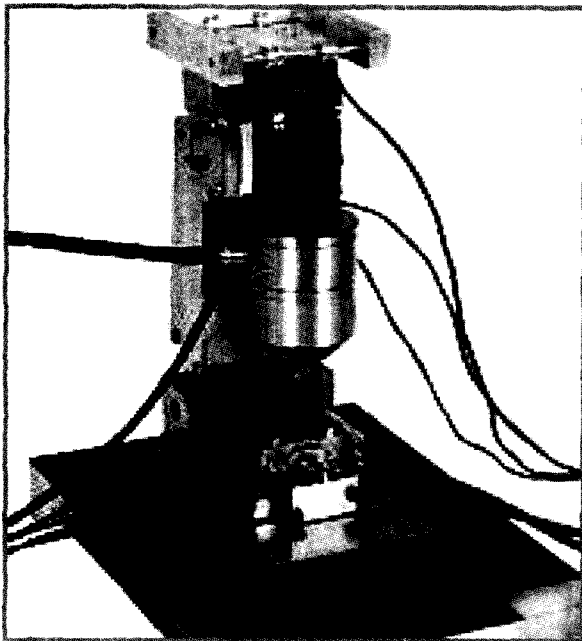


Fig. 10 Photograph of micro milling machine

위 이송이 4 μ m 인 점을 감안할 때, 보정이 필요한 것을 알 수 있으며, 이를 위해 입력 전압의 조절 및 입력 주파수의 변화를 이송 보정 기능으로 추가하여 해결할 예정이다.

4. 시제품 제작 및 성능 평가

본 연구에서 개발, 제작된 초소형 밀링 머신의 완성된 모습을 Fig. 10에 나타내었다. 현재 본 초소형 밀링 머신은 PC 를 통해 3축 이송제어가 이루어진다. 주축은 Air Turbine Spindle [Max. 150,000rpm] 이 장착되어 있으며 이송계로는 진술하였듯이 두 개의 적층형 Piezo Actuator를 이용한 마찰 구동식 Stepwise 방식을 X,Y축에 사용하였고, Z축은 세 개의 Piezo Actuator를 사용하는 Inchworm 방식을 적용하여 설계하였다. 또한, 각 축의 Feedback 제어를 위해 Linear Encoder를 설치하여 테이블의 현재 위치값을 0.1 μ m 단위까지 피드백받음으로써 고정밀의 이송이 가능하도록 하였다. 전체 공작기계의 사이즈는 90(W) \times 110(D) \times 217(H)mm이고, 무게는 1.5kg이며, X, Y, Z축에 따른 최대이송거리는 각각13 \times 8 \times 8mm이다. 피삭재로 사용되는 판재(plate)의 사이즈는 15 \times 15 \times 5mm이며, 마이크로 드릴링과 밀링 작업이 가능하다.

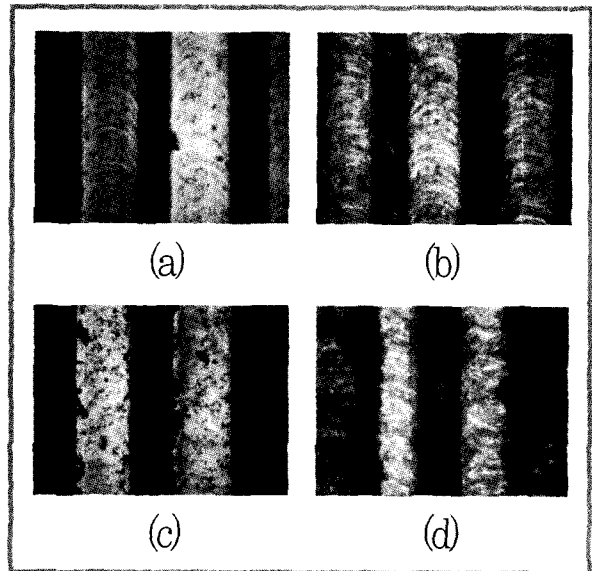


Fig. 11 Micro barrier ribs machined by micro machine

5. 가공 결과 검증

5.1 미세 격벽 가공

Fig. 11은 주축에 0.2mm 엔드밀을 장착하여 알루미늄 소재에 미세격벽 가공을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 이 미세격벽 가공 실험에서는 실제로 상용화 되는 PDP의 규격을 감안하여 (a)와 (b)는 격벽의 폭을 80 μm 로 설정하여 격벽 높이를 각각 30 μm , 50 μm 로 가공하였으며, (c)와 (d)는

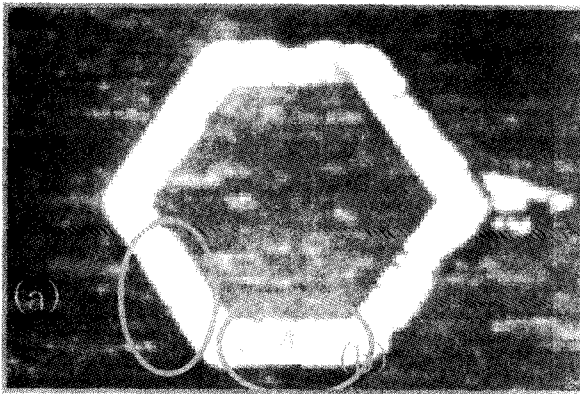


Fig. 12 Hexagonal feature machined by micro machine

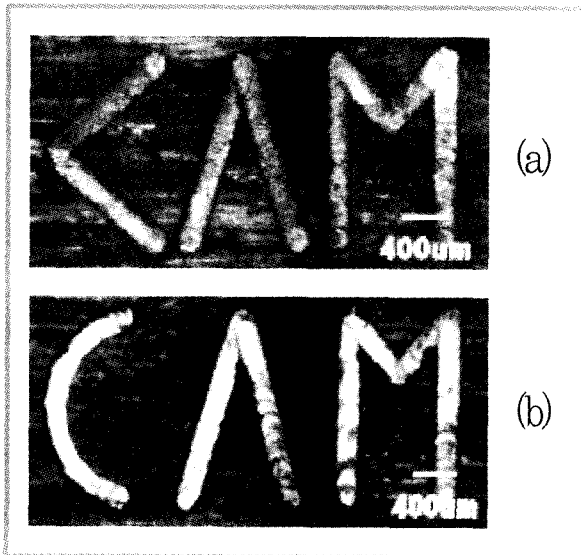


Fig. 13 Alphabetical features machined by micro machine

격벽의 폭이 100 μm 이고, 격벽 높이가 각각 50 μm , 100 μm 가 되도록 가공하였다. 가공조건은 이송 속도를 50 $\mu\text{m}/\text{sec}$, 주축의 회전수를 150,000rpm으로 모두 동일하게 적용하였다. 격벽 가공 후 격벽 바닥면의 표면 거칠기의 측정 결과, Ra 값이 0.05 μm 정도로 비교적 양호한 가공 면의 품질을 얻을 수 있었다.⁽⁴⁾

5.2 특징 형상 NC 코드 가공

아래에는 flat type의 $\varnothing 0.2$ Micro endmill로서 육각형 형상(Fig. 12)과 “CAM”이라는 글자(Fig. 13)와 피라미드 형상(Fig. 14) 등을 가공한 결과를 나타내고 있다. 우선, Fig. 12의 육각형 형상은 80 μm 의 절삭 깊이로 가공되었으며, 대각선 주행부분(a)과 직선 주행부분(b)의 가공면에 대한 표면 거칠기를 HOMMEL WERKE Turbo Roughness V3.44로 측정한 결과, Ra 값이 대각선 주행에서는 0.05 μm , 직선 주행에서는 0.10 μm 로 나타났다. 대각선 주행에서 Ra값이 보다 적게 나타나는 것은 같은 주행 거리일 지라도 한 스텝당 한 축만을 구동시키는 현 알고리즘으로 직선 주행에 비해 구동 시간이 두 배 가까이 길기 때문에 가공면의 품질이 좋게 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 13의 텍스트 또한 80 μm 의 절삭 깊이로 가공하였다. (a)는 주축이 X, Y 평면상에서 단순 직선과 대각선으로 이송케 한 결과이고, (b)는 “C”의 가공 경로를 원호로 이송한 결과이다. Fig. 14의 피라미드 형상의 각 단은 폭 50 μm ,

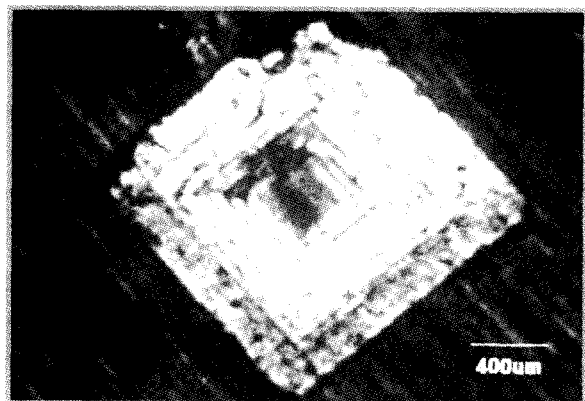


Fig. 14 Pyramid feature machined by micro machine

높이 10 μ m를 가지고 있고, 최외곽 밑단에서부터 차례대로 폭을 감소시키며 각 단의 높이 만큼 Z축을 올리면서 중심부를 절삭해 가공한 결과이다. 전체 피라미드의 높이는 100 μ m이고, 200 μ m의 공구 직경상 가공된 가장 밑단의 폭은 150 μ m이다.

한편, 육각형 형상을 포함하여 텍스트와 피라미드 형상 등의 모든 절삭 가공에는 NC화 프로그래밍을 적용하였다. 현재는 NC화의 초기화 단계로서 각 축의 좌표값 만을 파일로 입력 받아 세 축이 가공 경로를 따라 이송되고 있다. 차후 M코드와 공구 보정 및 오차 보정 등의 기능을 수행하기 위한 기능을 추가하는 연구를 진행 중에 있다.

6. 결론

본 연구에서는 Piezo actuator를 이송제로 사용한 초소형 밀링머신을 개발하여 미세 절삭가공을 수행하였다. 이를 통해 아래의 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, 미세 격벽 및 여러 특징 형상들을 가공한 결과, 절삭 깊이가 깊어질수록 버(burr)의 발생량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 절삭력의 증가로 인한 것으로 판단된다. 또한, 미세 격벽 바닥면의 경우 연마가공에서 나타나는 경면과 비슷한 수준의 표면 거칠기를 얻을 수 있었다. 이에 미세 절삭에 대한 보다 많은 특성 실험이 필요함을 알 수 있었다. 둘째, 미세 절삭이 가능한 NC 머신으로서의 가능성을 타진하였다. 현재, 본 연구에서 개발된 초소형 공작 기계는 Micro/Meso 단위의 2차원 형상 및 단순 3차원 가공에서 2 μ m 이하의 이송 오차를 가지고 있고, NC 코드에 따른 목표 좌표 주행에서는 기초적이거나 성공적인 결과를 보여주었다.

7. 후기

앞으로 보다 많은 실험과 연구를 토대로 미세 가공에 대한 이론을 정립, 검증할 것이며, 본 초소형 공작 기계를 NC 머신으로 완성하기 위한 제어 알고리즘 개발 연구를 수행할 계획이다. 이에 머지않은 미래에 Micro/meso 단위의 3차원 미세 구조물의 가공을 수행할 예정이다.

참고 문헌

1. Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, 1989, "Design and characterization of a linear motion Piezoelectric microactuator", IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1710-1715
2. In Soo Kim, Hong Sik Lee, Jun Yeob Song, 2001, "Application of piezoceramic actuator to the inchworm", Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 8.
3. S. Sakuta, K Okawa, K Ueda, 1993, "Experimental studies on ultra-precision positioning an inchworm movement method using fine and coarse positionings" int. J. Japan Soc. Prec Eng. 27, pp 235-240.
4. Seung Ki Min, Sun Woo Lee, Dong Ju Lee, Eung Sook Lee, Tae Jin Jae, 2002, "A Study on the Machining Characteristics for Micro Barrier Ribs by using Micro Endmilling", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.11 No.3, pp 14-20.