

피에조 구동기의 마이크로 밀링에서 적응제어를 이용한 원주가공의 성능향상

정병목*, 고태조#, 석진우**, 김희술*, 박종권***

Improvement of circular cutting using adaptive control in micro milling with piezo-actuator

B. M. Chung*, T. J. Ko[#], J. W. Seok**, H. S. Kim*, J. K. Park***

ABSTRACT

Recently, there are many studies for the micro-machining using Piezo actuator. However, because of its step-by-step motion, it is nearly impossible to increase the machining accuracy for a circular path. To increase the accuracy, it is well known that it is necessary the finer and synchronous movement for x-y axes. Therefore, this paper proposes an adaptive control for finer movement of the actuator, and realizes a synchronous control for the x-y axes. The experimental results show that the machining accuracy is remarkably improved.

Key Words : 마이크로밀링(Micro Milling), 인치웜(Inchworm), 동기이송(Synchronous moving), 적응제어(Adaptive Control)

1. 서론

현재 초소형 Positioner, Micro pump, 초소형 측정기구 등의 MEMS 분야에서는 고정밀 위치 제어가 가능한 주구동원으로서 피에조 구동기를 적용시키기 위한 개발 작업이 한창이다. 피에조 구동기는 압전소자라고도 불리며 기계적 에너지와 전기적 에너지를 서로 양방향으로 변환을 일으킬 수 있는 것으로 구동기 및 센서로서 모두 사용될 수 있다.¹

또한, 압전소자의 신축이 atomic process 이므로 운동이 부드럽고 연속적이어서 stick-slip 이 없으

며, 스테인레스 강으로 된 유사한 구조물에 비하여 20% 이상의 초과 강성을 가진다. 따라서 힘 발생력이 크고 구동 에너지(power)가 수 milli-watts 로 에너지 소비량이 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 높은 변위 해상도와 빠른 응답을 가지고 있지만, 비선형적이고, 큰 히스테리시스(hysteresis)가 존재하며 압전소자의 발생 변위가 최대 0.1% strain 으로 제한되기 때문에 다소 넓은 영역을 트래킹할 필요가 있는 위치제어장치에 응용하는 것은 큰 문제점으로 남아있다.² 이에 대한 대책으로 최근 피에조 구동기(Piezo actuator) 의 운동증폭 기구 또는

접수일: 2005년 7월 22일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

* 영남대학교 기계공학부

교신저자: 영남대학교 기계공학부

E-mail tjko@yu.ac.kr Tel. (053) 810-2576

** 영남대학교 대학원 기계공학과

*** KIMM

인치웜(Inchworm) 메커니즘이 계속 개발되고 있는 실정이다. 이에 본 연구실에서도 두 개의 피에조 구동기를 이용한 스텝방식(Stepwise) 이송 축과 세 개의 피에조 구동기를 사용한 인치웜 운동방식의 이송 축, 그리고 초소형 선반 및 밀링 기계를 개발하여 지금까지 계속 연구 중에 있다.³⁻⁵ 그러나 인치웜 운동방식의 피에조 구동기는 고정전압에 의한 단위 이송 방식으로 이동하므로 대각선 이송에서의 오차가 큰 문제점을 안고 있다. 따라서 이러한 문제를 보완하기 위해 본 논문에서는 이송거리 에 따라 X, Y 방향의 구동 전압을 가변 제어함으로써 보다 정확한 경로제어를 실현하고자 한다. 이렇게 하면 0° 나 90° 근처에서의 이송성능은 크게 향상되지만 45° 근처에서의 오차는 개선되지 않으므로 2 축 동기제어를 통해 X, Y 동시 이송을 구현함으로써 원주가공에서의 가공성능이 크게 개선될 수 있음을 보이고자 한다. 그러나 피에조 구동기의 경우 이송방향에 따라 전압에 대한 이송거리가 다르고 초기의 예압에 대해서도 영향을 받는다. 밀링 기계의 경우에 있어서는 주어진 경로를 따라 경로 오차를 줄이면서 경로를 잘 쫓아가는 것이 필요하다. 따라서 피에조 구동기를 사용하여 경로를 최적으로 쫓아가기 위해서는 일반 피드백 제어기보다는 적응제어를 사용하는 것이 더 유리하므로 적응제어를 이용하여 궤적제어를 하고자 한다.

2. 인치웜 피에조 구동기

2.1 피에조 구동기와 인치웜 운동

마이크로 밀링 기계에서 사용한 피에조 구동기는 인치웜 방식의 이송 기구로써 외형은 Fig. 1 과 같다. V 형 가이드에 슬라이드가 조립되어 가이드와 슬라이드 고정부 마찰면에 래핑 작업이 되어있다. 가이드를 분리하여 설계함으로써 볼 플런저를 사용하여 일정한 예압을 줄 수 있도록 되어있고 가이드의 틈새 간극은 1 μm 이내가 되도록 한다. 인치웜 운동은 Fig. 2 와 같이 고정, 운동, 고정의 피에조 세 개를 사용하여 스텝방식보다는 이동성을 더 좋게 하기 위해 고안되었다. 즉, 피에조를 두 개 사용하는 스텝 방식의 구동부는 볼 플런저에 의한 예압으로 고정이 되면서 구동 피에조가 수축 시 수축 변위만큼 고정부를 끌어당기는 기능을 하지만, 인치웜 방식에서는 구동부의 고정력을

향상시키기 위해 예압을 이용하지 않고 고정용 피에조를 추가하여 설계한 것이다.

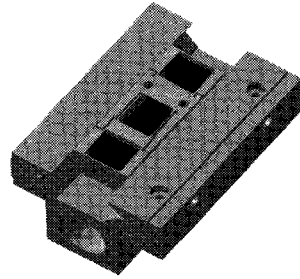


Fig. 1 Modeling of Inchworm apparatus

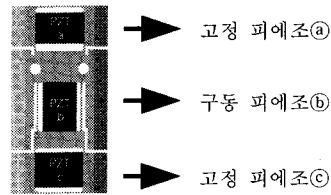


Fig. 2 Inchworm motion of piezo actuator using three piezoelectric

Fig. 3 에서는 그 구동 원리와 제어 신호를 순차적으로 나타내었다. 구동원리는 초기에 (a), (b), (c) 모든 피에조가 수축된 상태에서 고정부 피에조 (c)가 전압을 받으면 변위가 발생하고 이로 인해 슬라이드가 양 가이드 사이에 팽창하면서 클램핑된다. 다음 단계에서 구동부 피에조 (b)에 전압을 가하면 팽창하면서 전진한다. 다음으로 고정부 피에조 (a)에 전압을 가하면 고정부 피에조 (a)가 팽창하여 양 가이드 사이에서 클램핑하며 잡아주는 상태에서 (c)와 (b) 피에조가 차례로 수축하면서 피에조 구동기는 전진하게 된다. 후진할 경우에는 (a)와 (c) 피에조가 반대로 동작하게 되며 그에 따른 순서도 역시 Fig. 3 에서 보여주고 있다.⁶⁻⁸ 또한 Fig. 3 에서는 전진할 때의 (a), (b), (c) 각각의 피에조에 가해지는 전압의 타이밍 선도를 보여주고 있는데 이동을 빠르게 하기 위해서는 타이밍 선도의 주기를 짧게 주는 것이 좋다. 하지만 이 주기가 너무 짧으면 피에조가 팽창과 수축에 충분한 시간이 확보되지 않아 피에조 구동기의 이동이 제대로 일어나지 않을 수도 있다.

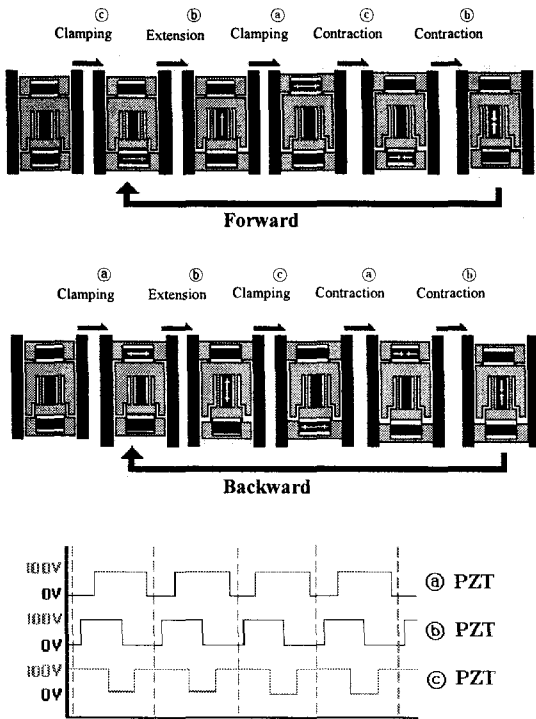


Fig. 3 Signal of three piezoelectric elements for inchworm motion

2.2 대각이송을 위한 스텝이송방식

기존 Inchworm motion 피에조 구동기에서 사용한 대각이송 방식은 스텝이송방식이다. 이 스텝방식의 대각이송의 경우 X, Y 두 축이 이루는 2차원 평면에서 목표지점의 좌표값을 입력 받아 초기 위치를 기준으로 목표지점까지의 가상 이송선의 기울기 값을 계산하고, 각 축을 1 cycle 씩 단위 이송시키면서 현재 위치의 가상 이송선의 기울기 값을 Linear 엔코더로 피드백 받아 필요한 축을 이송시키면서 목표 지점에 도달하도록 하는 방식이다. Fig. 4 는 대각선 방향으로 이송한 결과를 나타낸 것인데 목표점에 대해 X 방향으로 이동하는 것과 Y 방향으로 이동하는 것 중 어느 쪽이 목표점에 더 가까운지를 계산하여 이동하는 방식이다.

이 결과에서 보는 바와 같이 스텝이송의 경우 대각 경로와 많은 오차가 발생함을 알 수가 있다. 이러한 오차를 줄이고 가공성을 향상시키고자 전압제어를 이용한 동기이송을 구현하고자 한다.

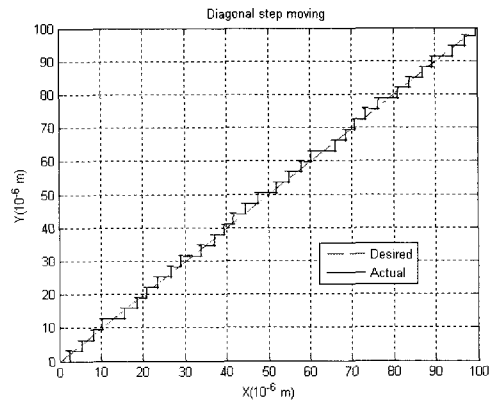


Fig. 4 Diagonal moving at x-y stage by step moving method

3. 가변전압을 이용한 적응제어 알고리즘

3.1 가변전압 이송

앞서 제시한 대각이송에서의 스텝방식은 이송 경로에서 단위 이송량보다 50%이상의 오차를 가질 때에만 오차를 줄이는 방향으로 이동하여 오차를 줄이게 된다. 따라서 임의의 경로를 따라 이송하는 경우, 경로 오차는 단위 이송량의 50%까지 오차를 수반할 가능성이 있기 때문에 더 이상의 가공정밀도를 유지하기는 어렵다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 대각선 방향의 이송에서 X, Y 두 축이 동시에 이송될 필요가 있을 뿐만 아니라 경우에 따라서는 단위 스텝의 길이가 더 짧게 관리될 필요도 있다.

현재 사용 중인 피에조 구동기용 제어기는 PC 기반의 제어기로써 프로그램과 D/A 변환기를 이용하여 피에조 구동기의 입력펄스를 생성한다. 따라서 지금까지 대각선 방향의 이송에 대해서는 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 각각의 축이 순차적으로 이송되어 오차를 어느 정도 줄일 수가 있다. 그러나 Fig. 4 에서 나타나는 오차도 여전히 크기 때문에 이를 더 줄이기 위한 방법을 강구할 필요가 있고 다음과 같은 두 가지 방법을 제시할 수 있다. 하나는 스텝의 크기를 줄이는 것이고 다른 하나는 X, Y 두 축을 동시에 이송되도록 하는 것이다. 먼저, 단위 스텝의 크기를 줄이는 것은 경로 오차를 줄일 수 있는 방법이지만 가공속도를 떨어뜨리는 문제를 발생하므로 한계가 있다. 따라서 X, Y 두 축에 대한 동기제어를 통해 해결하는 것

이 바람직하다. 하지만 피에조 구동기의 경우에는 스텝이송방식으로 이동하기 때문에 동기이송을 구현하는 것이 간단한 일은 아니다. 먼저 동기이송을 위해서 X, Y 축 방향으로의 이송뿐만 아니라 1 사분면(45°), 2 사분면(135°), 3 사분면(-135°), 4 사분면(-45°) 각각의 방향으로 경사방향의 동기이송 함수가 필요하다. 다음으로는 각도가 45° 보다 큰지 작은지를 따져서 X 방향이나 Y 방향으로 이송량을 줄이는 것이 필요하다. 따라서 Inchworm에 인가하는 전압을 일률적으로 100V 인가할 것이 아니라 전압을 조정함으로써 단위 스텝보다 적은 미소량의 이송이 가능해야 한다.

Fig. 5는 현재의 위치에서 오차를 줄이면서 경로를 따라가기 위한 벡터 연산에 관한 개념을 보여주고 있다. 이송 후에 Linear 엔코더로부터 현재의 위치정보를 얻으면 원래의 목표 방향(\vec{m})과 오차(\vec{e})를 고려해서 오차를 줄이면서 목표방향으로 진행되는 새로운 방향(\vec{m}')을 계산한다. 이때, 새로운 방향은 X 방향 성분과 Y 방향 성분으로 나누어 지는데 각각의 성분이 최대 단위 이송량을 넘지 않도록 조정이 필요하다.

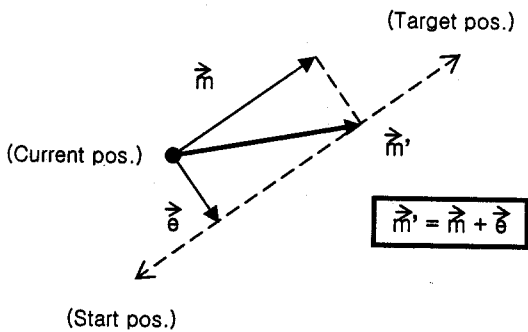


Fig. 5 Vector Calculation

3.2 MRAC(모델 기준형 적응제어)

피에조 구동기의 이송 정밀도는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 대각선 방향에서만뿐만 아니라 X 축이나 Y 축 방향에 대해서도 일정하게 유지되지 않는다는 것을 알 수 있다. 특히, 가변전압 이송의 경우 전압에 따른 이동거리의 변화가 더욱 심하므로 전압에 따른 이동거리 모델을 수정해 가면서 제어하는 것이 필요하다. 따라서 플랜트 특성이 지속적으로 변하는 경우에는 Fig. 6과 같이 MRAC 적응 제어 기법을 도입하여 시스템의 성능을 향상시킬

수 있다.⁹ 먼저 XY 동기 이송을 위해서 전압변화에 따른 이송거리에 대한 플랜트의 모델 또는 데이터베이스를 간단히 구한다. 적응제어에서는 제어기가 환경변화에 따라 지속적으로 바뀔 것이므로 처음에는 선형 관계라고 가정해도 된다. 다음으로 Fig. 6에서처럼 이동경로 상의 목표점이 제시되면 제어기에서는 Fig. 5와 같이 X, Y 축에 대한 이동량과 방향을 계산한다. 이렇게 계산된 XY 이동량에 대해 제어기가 알고 있는 모델을 이용해 인가전압을 계산하여 각각의 축에 해당 전압을 인가한다. 이렇게 구동된 피에조 구동기는 밀링기계의 XY 축을 이송시키고 각 축에 연결되어 있는 위치센서(encoder)는 이동경로 상의 목표점과의 차이를 계산하여 제어기가 가지고 있는 플랜트 모델 정보를 수정한다. 그리고 이동경로상에서 이러한 실제오차를 고려하여 다음 목표점을 제시하면 이번에는 수정된 모델을 활용함으로써 더 나은 제어 결과를 기대할 수 있다. 일반적으로 동적시스템의 제어에서는 플랜트가 잘 따라갈 수 있도록 기준모델을 제시해야 하지만 피에조 구동기처럼 인치웜 운동에서는 기준모델을 보통 1로 둔다. 그렇게 되면 목표점 $r(t)$ 는 $y_m(t)$ 와 같고 오차 $e(t)$ 는 목표 위치와 실제 위치와의 차이($r(t) - y_p(t)$)로 구할 수 있다. 피에조 구동기가 임의의 방향으로 자유롭게 이동하기 위해서는 전압제어에 의해 XY 방향으로 미세 이동이 필수적이다.

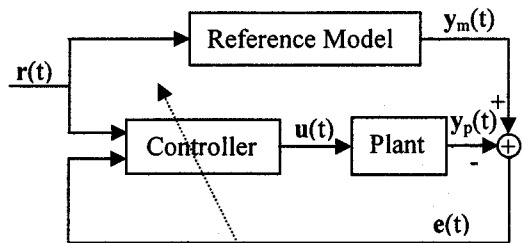


Fig. 6 Block diagram of MRAC

4. 실험

4.1 대각선 동기이송

인치웜 운동은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 대각선 방향의 이송에서 그 특성이 매우 나쁜 것을 알 수 있다. 이러한 특성을 개선하기 위해서는 XY 두 축이 동시에 이송되는 것이 필요한데 이를

위해서는 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 구동 피에조와 고정 피에조의 전체 구동 사이클을 동기화시켜야 할 뿐만 아니라 XY 두 구동 피에조의 이동 타임도 적절히 튜닝을 해야만 한다.

먼저 XY 구동 피에조에 대해 똑같이 100V 를 인가하면서 45° 대각선 방향으로 이동하도록 XY 두 축에 대한 동기이송 실험을 하였다. Fig. 4 에서 보는 바와 같이 X 축의 양의 방향과 음의 방향, 그리고 Y 축의 양의 방향과 음의 방향에 대한 사이클이 서로 다르므로 4 가지 대각선 방향(4 분면)에 대해 이송실험을 각각 수행하였다. 즉, 이송각을 45°, 135°, -135°, -45° 등 4 가지로 분류하여 수행한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다.

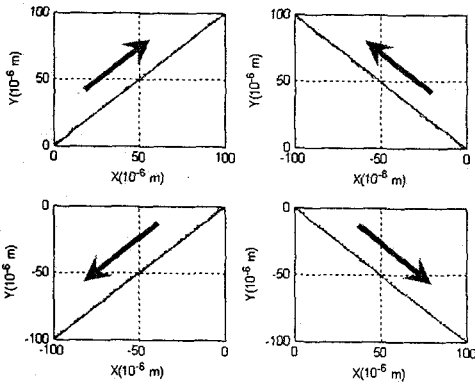


Fig. 7 Diagonal moving for each direction

Fig. 7 에서 보는 바와 같이, XY 동기이송 방식을 이용한 대각선 이송의 실험결과는 Fig. 4 의 스텝 이송 방식에 비해 오차가 현저히 줄어들었음을 알 수가 있다.

4.2 전압에 따른 운동의 구동특성

다음에는 인가 전압에 따른 인치웜(Inchworm) 피에조 구동기의 구동특성을 알아보기 위한 실험을 하였고 그 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 실험은 X 축에 대하여 입력 전압을 10V 에서 100V 까지 10V 씩 증가시켜 각 전압별로 한 스텝을 수행하였으며 0.05 μm resolution 을 갖는 Linear 엔코더를 사용하여 측정하였다. 그림에서 보듯이 20V 까지는 이송이 거의 일어나지 않았지만 30V 이후부터 인가전압에 거의 비례하여 이송량이 증가함을 알 수 있다. Y 축에 대한 결과도 X 축과 비슷한 결과를

보였다.

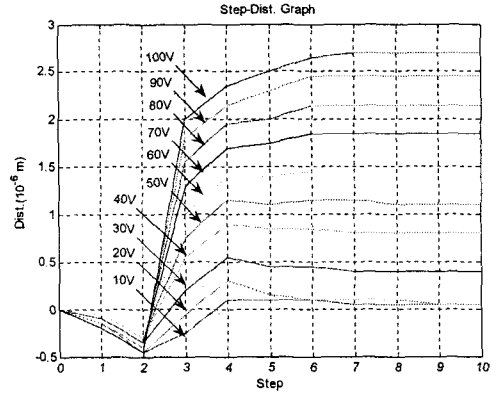


Fig. 8 Unit moving for voltage

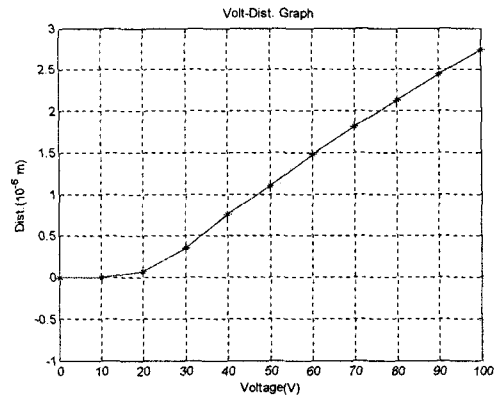
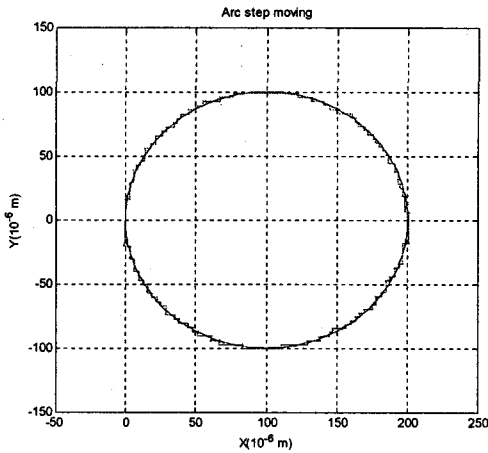


Fig. 9 Moving distance for voltage

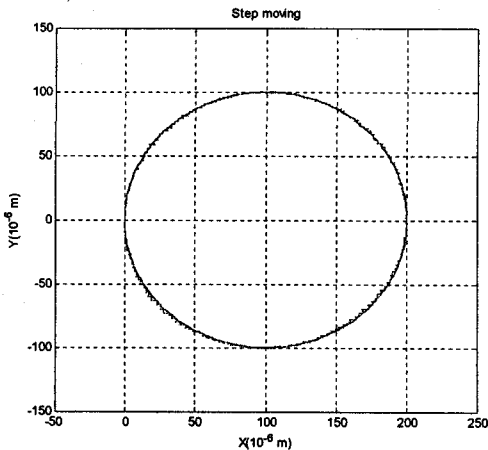
이송의 초기에 약간의 뒤처짐이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이것은 피에조가 팽창하기 위해 전방에 위치한 고정 피에조를 풀게 됨으로써 전방과 후방 간에 경사가 생기게 되어 이동 피에조가 후방으로 약간 미끄러지는 현상이라고 추정할 수 있다. 이러한 결과는 피에조 구동기에 걸리는 예압에 따라 달랐지만 제거할 수는 없었다. Fig. 9 는 전압별 최종 이송량을 측정된 것으로 전체적으로는 비선형성을 보이고 있지만 앞에서 언급한 바와 같이 30V 이상에서는 거의 선형성을 보이고 있다. 전압별 뒤처짐량의 경우는 30V 이상에서 0.4 μm 정도로 거의 일정함을 알 수 있다.

4.3 원호 동기이송

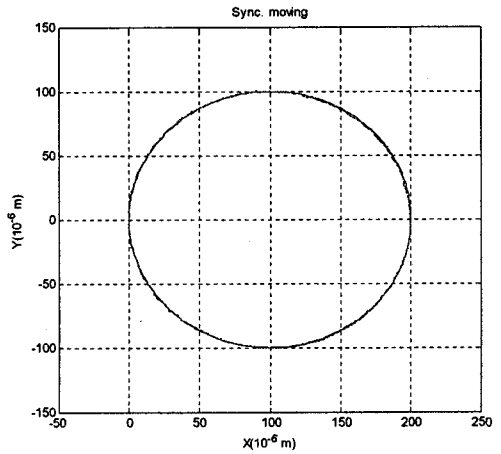
Fig. 8 에서 보는 바와 같이, 인치웸 방식의 구동은 약간의 후진을 포함한 스텝 이동 방식으로 움직인다. 대각이송 알고리즘을 이용하여 원호이송에 적용하여 실험해 보았다. 원호이송의 경우 원호각을 N 등분하여 얻어진 원호위의 점들을 연결하는 선분들의 대각이송의 경우와 같다고 볼 수 있다. 등분수(N)는 단위이송량과 원호 반경을 고려하여 얻어진 값으로 설정하였으며 등분수(N)와 단위이송량, 원호반경의 관계식은 식 (1)과 같이 결정하였다.



(a) Step moving(Full step)



(b) Step moving using voltage control



(c) Sync. Moving using voltage control

Fig. 10 Circular moving

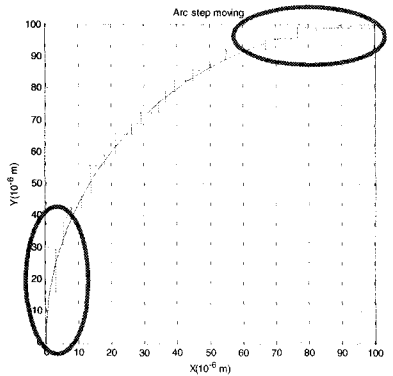
$$N = \frac{2\pi R}{u} \quad (1)$$

위 식에서 R 은 원호반경(radius), u 는 단위이송 거리(unit step moving distance)를 나타내며 단위이송 거리는 피에조 구동기가 100V 인가 전압으로 한번에 이동할 수 있는 거리다. Fig. 10 은 스텝방식으로 이송한 결과(a)와 전압제어를 추가로 고려한 스텝이송(b), 그리고 전압제어를 이용한 동기이송(c)으로 360° 를 시계방향(CW)으로 주행시켜 얻어낸 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 원주 에러를 고려하면서 X, Y 가 한번에 한 스텝씩 이동하는 것이고 (b)는 원주를 따라 X, Y 가 지그재그로 움직이는데 한쪽은 단위스텝으로 이동하고 다른 쪽은 방향에 따른 전압제어를 통해 일부만 이동한 것이다. (c)는 (b)의 방식을 개선하여 XY 축이 동시에 움직이도록 동기 이송한 것이다. 따라서 (b)와 (c)처럼 가변 전압을 사용하는 경우에는 전압에 따른 각 축의 이송량이 예압이나 방향 또는 시간에 따라 변할 수 있기 때문에 적응제어 기법을 이용해 시스템 모델을 추정하면서 제어를 한 것이다.

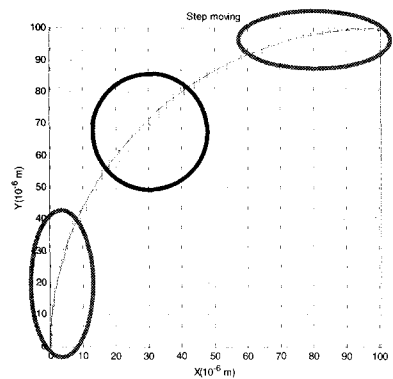
4.4 결과 비교

다음의 Fig. 11 은 Fig. 10 의 0° ~ 90° 사이의 영역을 확대한 것인데, Fig. 11(a)의 기존스텝방식과 Fig. 11(b)의 전압제어방식을 비교해 보면 전압제어

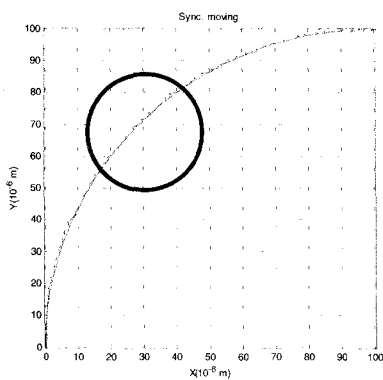
를 하였을 때가 그렇지 않을 때 보다 0° 와 90° 부근에서 좀 더 원호에 가깝게 이송하는 결과를 얻을 수 있었다.



(a) Step moving(Full step)

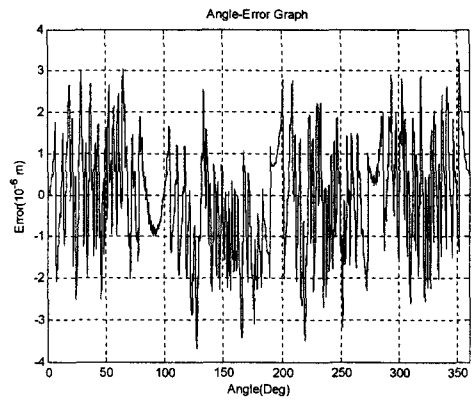


(b) Step moving using voltage control

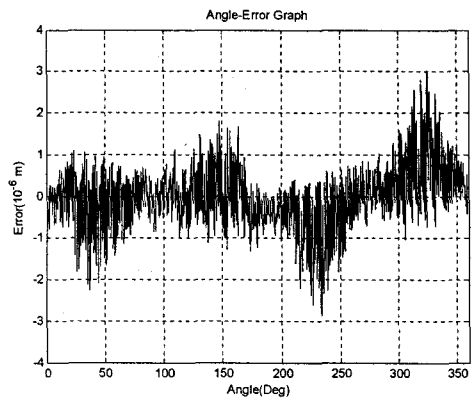


(c) Sync. moving using voltage control

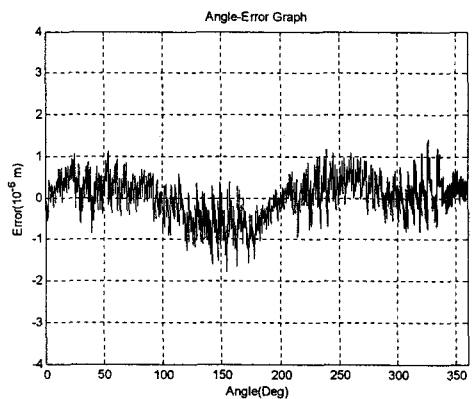
Fig. 11 Arc moving($0^\circ \sim 90^\circ$)



(a) Step moving(Full step)



(b) Step moving using voltage control



(c) Sync. moving using voltage control

Fig. 12 Circular-Error Graph

그러나 45° 부근에서는 여전히 오차가 개선되지 않았음을 볼 수 있다. Fig. 11(c)는 전압제어와 동시이송을 모두 적용하였을 때의 결과를 나타낸다. 전압제어만으로는 개선되지 않았던 45° 부근에서도 XY 두 축을 동기 이송한 결과, 전압제어만 적용했을 때 보다 오차가 현저히 줄어든 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 12는 각각의 경우에 대해 360° 이송각에 따른 오차그래프를 나타낸 것이다. 스텝 이동방식인 (a)의 경우는 한 스텝의 이송거리인 2.5 μm 의 최대 오차가 전체적으로 많이 나타남을 알 수 있고 0° ± 90° 180° 부근에서는 XY 방향이 바뀌는 관계로 오차가 줄어든 것을 알 수 있다. 전압제어를 고려한 (b)의 경우는 전체적인 오차가 많이 줄어 들었지만 Fig. 11에서 지적한 바와 같이 ± 45° ± 135° 부근에서의 오차는 여전히 줄어들지 않은 것을 알 수 있다. 그러나 전압제어와 동기제어를 동시에 고려한 (c)의 경우는 전체적으로 오차가 줄었고 스텝이동방식과 비교할 때에 오차가 반 이상 줄어든 것을 알 수 있다.

5. 결론

인치웜 운동방식의 피에조 구동기는 그 특성상 이송 시 변위손실이 발생하므로 그것을 고려한 보다 정밀한 제어가 필요하다. 그리고 micro/meso 단위의 가공에서 고정밀도를 가지기 위해서는 기존의 스텝이송방식에는 한계가 있다. 그러므로 전압제어를 이용한 동시이송제어가 필요하다. 하지만 전압제어를 이용한 동시이송은 피에조 구동기의 예압이나 이동방향에 따라 변위특성이 변하므로 시스템의 상태를 고려하는 적응제어 기법이 필요하다. 따라서 적응제어 기법을 이용해 전압제어 동기이송을 했을 때, 피에조 구동기의 원주 가공성능은 기존의 스텝 이동방식에 비해 오차를 2 배 이상 감소시켰음을 알 수 있다. 이렇게 함으로써 오차가 1 μm 정도까지 줄어들었지만 향후, 피에조 구동기가 갖고 있는 뒤편잡 량 0.4 μm 을 줄이지 못한다면 더 이상의 오차를 줄이기는 어려운 일이라고 본다. 따라서 가공오차를 더 줄이기 위해서는 피에조 구동기의 구조적 개선이 절실히 필요하며 또한 그에 상응한 고도의 지능형 제어기의 개발도 필요하다고 본다.

후 기

이 논문은 2003 년도 학술진흥재단의 지원 (KRF-2003-002-D00031)과 영남대학교 해외파견연구비의 일부지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Park, C. Y., "Piezoelectric ceramic for electric and electronics," Bando Press, pp. 74-161, 1997.
2. Nanopositioning, PI Company, pp. 1.6, 4.24 - 25, 1998.
3. Ko, T. J., Kim, H. S., Bae, Y. H., Seo, S. H., Kim, J. G., Kim, E. H., "Micro - feeding mechanism by inchworm type of piezoelectric ceramic," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp.516-519, 2002.
4. Ko, T. J., Kim, H. S., Bae, Y. H., "Micro/Meso cutting with micro turning lathe," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp.1025-1028, 2002.
5. Bae, Y. H., Ko, T. J., Kim, H. S., Chung, B. M., Kim, J. G., "A Study on the micro machining using micro machine," Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp.1203-1206, 2003.
6. Wang, Z. X., Jouaneh, K., Dornfeld, D., "Design and characterization of a linear motion piezoelectric microactuator," IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1710-1715, 1989.
7. Sakuta, S., Okawa, K., Ueda, K., "Experimental studies on ultra-precision positioning an inchworm movement method using fine and coarse positionings," Int. J. Japan Society of Precision Eng. 27, pp. 235-240, 1993.
8. Kim, I. S., Lee, H. S., Song, J. Y., "Application of piezoceramic actuator to the inchworm," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 157-163, 2001.
9. Sastry, S., Bodson, M., "Adaptive Control: Stability, Convergence, and Robustness", Prentice Hall, pp. 99-157, 1989.