

마이크로밀링에서 피에조 구동기의 전압제어를 이용한 원주가공의 성능향상

석진우*, 정병묵+, 고태조+, 김희술+, 박종권**

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

J. W. Seok*, B. M. Chung+, T. J. Ko+, 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 a voltage 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), 전압제어(Voltage Control)

1. 서론

현재 초소형 Positioner, Micro pump, 초소형 측정기구 등의 MEMS분야에서는 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 process이므로 운동이 부드럽고 연속적이기 때문에 stick-slip이 없으며 stainless steel로 된 유사한 구조물에 비해 20% 이상의 초과 강성을 가진다. 따라서 힘 발생력이 크고 구동 에너지(power)가 수 milli-watts로 에너지 소비량이 적은 것으로 알려져 있다. 그러나 높은 변위 해상도와 빠른 주파수 응답을 가지고 있지만 비선형적이고, 큰 히스테리시스(hysteresis)가 존재하며 압전소자의 발생 변위가 최대 0.1% strain 으로 제한되기 때문에 다소 넓은 영역을 트래

* 석진우, 영남대학교 기계공학과 대학원(ryright@lycos.co.kr)
주소: 712-749 경북 경산시 대동 영남대학교 기계관 320호

+ 영남대 기계공학부

** KIMM

킹 할 필요가 있는 위치제어장치에 응용하는 것은 큰 문제점으로 남아있다.[2] 이에 대한 대책으로 최근 Piezo actuator의 모션증폭 기구 또는 Inchworm mechanism이 계속 개발되고 있는 실정이다. 이에 본 연구실에서도 Stepwise 및 Inchworm 운동방식의 피에조 구동기와 초소형 선반 및 밀링머신을 개발하여 지금까지 계속 연구 중에 있다.[3][4][5] 그러나 Inchworm 운동방식의 피에조 구동기는 고정전압에 의한 단위 이송 방식으로 이동하므로 대각선 이송에서의 오차가 큰 문제점을 안고 있다. 따라서 이러한 문제를 보완하기 위해 본 논문에서는 먼저, 고정전압 방식을 탈피하여 이송거리에 따라 X, Y 방향의 이송 전압을 가변 제어함으로써 보다 정확한 경로제어를 실현하고자 한다. 이렇게 하면 0°나 90° 근처에서의 이송성능은 크게 향상되지만 45° 근처에서의 오차는 개선되는 것이 없으므로 2축 동기제어를 통해 X, Y 동시 이송을 구현함으로써 궁극적으로 원주 가공에서의 가공성능이 크게 개선될 수 있음을 보이고자 한다.

2. Inchworm motion 피에조 구동기

2.1 Actuator design

실험에서 사용한 피에조 구동기는 Inchworm 방식의 이송 기구로써 외형은 Fig. 1과 같다. V형 가이드에 슬라이드가 조립되어 있으며 가이드와 슬라이드 고정부 마찰면에 래핑 작업이 되어있고 가이드를 분리하여 설계함으로써 볼플랜저를 사용하여 일정한 예압을 줄 수 있도록 되어있다. 가이드의 틈새 간극은 1 μ m 이내가 되도록 한다.

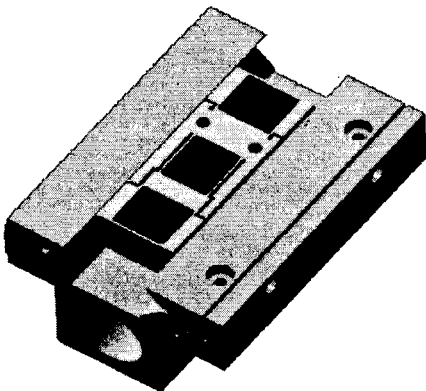


Fig. 1. Modeling of Inchworm apparatus

2.2 Inchworm motion

Inchworm Motion은 두 개의 피에조만 사용하는 Stepwise 방식에서 강성을 더 높이기 위해 고안되었다. 즉, Stepwise 방식의 구동부는 볼 플랜저에 의한 예압으로 고정 이 되면서 구동 피에조가 수축 시 수축 변위만큼 고정부를 끌어당기는 기능을 하지만, Inchworm 방식에서는 구동부의 고정력을 더 높이기 위해 피에조에 의한 상위 고정부가 탄생한지로서 하나 더 구성되어있다. Fig. 2와 Fig. 3에 그 구동 원리와 제어 신호를 순차적으로 나타내었다.

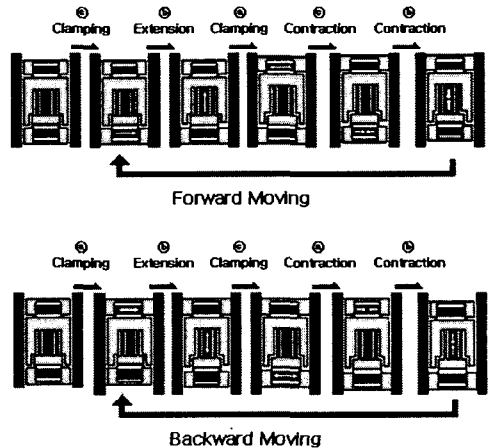
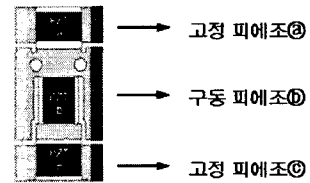


Fig. 2. Inchworm motion of piezo actuator using three piezo electrics

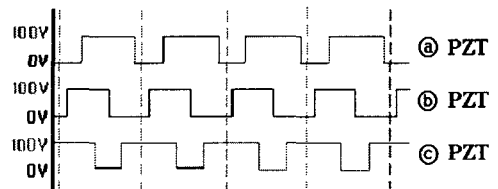


Fig. 3 Signals of three piezoelectric elements for inchworm motion

2.4 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 가상이송선의 기울기 값을 계산하고, 각 축을 1 cycle씩 단위이송시키면서 현재 위치의 가상이송선의 기울기를 Linear 엔코더로 피드백 받아 필요한 축을 이송시키면서 목표 지점에 도달하도록 하는 방식이다. Fig.4는 대각선 방향으로 이송한 결과를 나타낸 것이다.

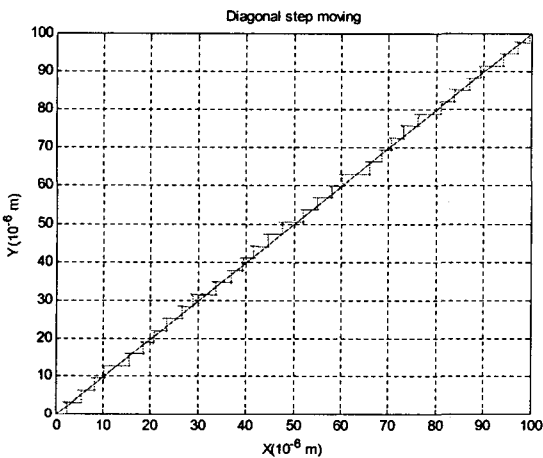


Fig. 4 Diagonal moving at X-Y stage by Step moving method

위의 결과에서 보듯이 스텝이송의 경우 대각 경로와 많은 오차가 발생함을 알 수가 있다. 이러한 오차를 줄이고 가공성을 향상시키고자 전압제어를 이용한 동기이송을 구현하고자 한다.

3. 전압제어를 이용한 동기 이송 Mechanism

3.1 이송 알고리즘

앞서 제시한 대각이송에서의 스텝방식은 이송경로에서 단위 이송량의 50%이상의 오차를 가질 때에만 오차를 줄이는 방향으로 이동하여 오차를 줄이게 된다. 따라서 임의의 경로를 따라 이송하는 경우, 경로 오차는 단위 이송량의 50%까지의 오차를 수반할 가능성이 있기 때문에 더 이상의 가공정밀도를 유지하기는 어렵다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 대각선 방향의 이송에서 X, Y 두 축이 동시에 이송될 필요

가 있을 뿐만 아니라 경우에 따라서는 단위 스텝의 길이가 더 짧을 필요도 있다.

현재 사용 중인 피에조 구동기용 제어기는 PC기반의 제어기로써 프로그램과 D/A변환기를 이용하여 피에조 구동기의 입력펄스를 생성한다. 따라서 지금까지는 X, Y 두 방향으로 동시 이송이 곤란하여 Fig. 4와 같이 대각선 방향의 이송에 대해 각각의 축이 순차적으로 이송됨에 따라 큰 오차를 발생함을 우린 앞서 보았다. 보통의 경우에 이러한 문제는 X, Y 두 축에 대한 동기제어를 통해 해결할 수 있지만 피에조 구동기의 경우에는 스텝이송방식으로 이동하기 때문에 간단한 일이 아니다. 먼저 동기이송을 위해서 X, Y 축 방향으로의 이송뿐만 아니라 1사분면(45°), 2사분면(135°), 3사분면(-135°), 4사분면(-45°) 각각의 방향으로 경사방향 동기이송 함수가 필요하다. 다음으로는 각도가 45°보다 큰지 작은지를 따져서 X 방향이나 Y 방향의 이송량을 줄이는 것이 필요하다. 이것은 Inchworm에 인가하는 전압을 조정함으로써 어느 정도 가능하다.

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 진행하는 새로운 방향(\vec{m}')을 계산한다. 이때, 새로운 방향(\vec{m}')은 X 방향 성분과 Y방향 성분으로 나누어지는데 각각의 성분이 최대 단위 이송량을 넘지 않도록 조정이 필요하다.

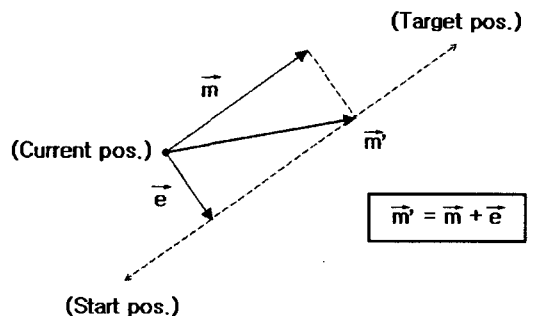


Fig. 5 Vector Calculation

Fig. 6은 X, Y 두 축의 동기 이송 알고리즘에 대한 Flow chart를 보여주고 있다. 동기이송에서는 이송방향과 단위 이송거리를 계산하여 남은 거리가 단위 이송거리보다 작을 때 까지 Fig. 5의 거리벡터 연산을 이용하여 경로 오차를 최소화하면서 이동한다. Inchworm motion의 피에조 구동기가

입의 방향으로 자유롭게 이동하기 위해서는 X, Y 방향으로 미세 이동이 필수적이다.

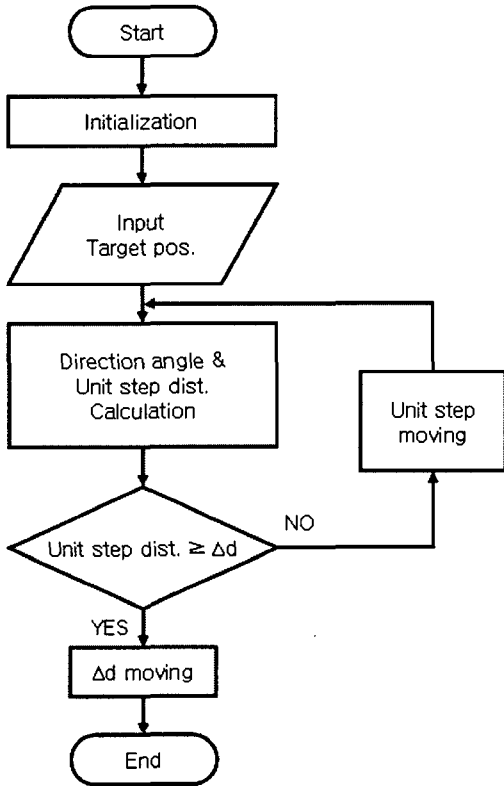


Fig. 6 Flow Chart

4. 실험

4.1 Inchworm motion의 구동특성

먼저 인가 전압에 따른 Inchworm motion 피에조 구동기의 구동특성을 알아 보기위한 실험을 행하였다. 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

실험은 X축에 대하여 입력 전압을 10V에서 100V까지 10V씩 증가시켜 각 전압별로 한 스텝을 수행하였으며 0.05 μm resolution을 갖는 Linear 엔코더를 사용하여 측정하였다. Fig. 8(a)에서 보듯이 20V까지는 이송이 거의 일어나지 않았지만 30V이후부터 인가전압에 거의 비례하여 이송량이 증가함을 알 수 있다. Y축에 대한 결과도 X축과 비슷한 결과를 보였다.

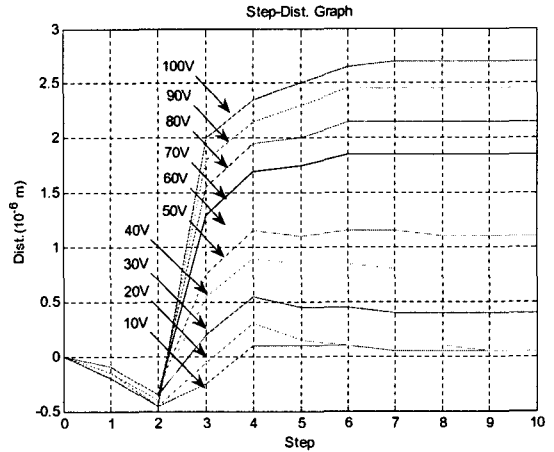
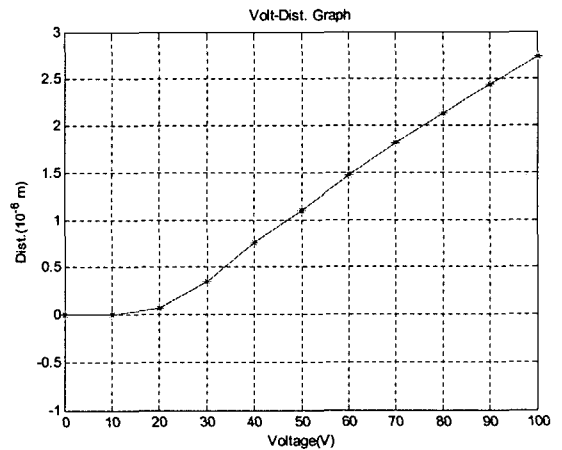
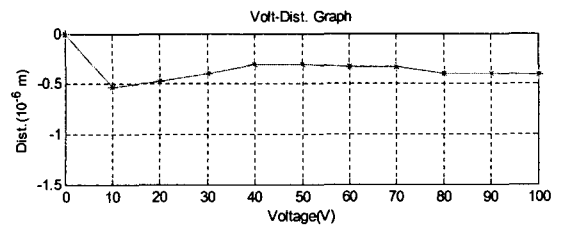


Fig. 7 Unit moving for voltage



(a)



(b)

Fig. 8 Moving distance(a) & backward distance(b) 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. 8(a)는 전압별 최종 이송량을 측정한 것으로 전체적으로는 비선형성을 보이고 있지만 앞에서 언급한 바와 같이 30V 이상에서는 거의 선형성을 보이고 있다. Fig. 8(b)는 전압별 뒤처짐량을 측정한 것인데 이 값도 30V 이상에서는 0.4 μ m 정도로 거의 일정함을 알 수 있다.

4.2 대각선 동기이송

Inchworm motion 피에조 구동기의 특성에서 보았듯이 30V 이상에서 선형성을 보이므로 피에조 구동기의 초기화 시 일정 거리를 이송시켜 획득한 데이터로 선형구간을 구하여 가변전압제어를 구현하였다.

먼저 대각선 방향의 동기이송에 따른 특성을 알아보기 위해 4가지 방향(4분면)에 대해 이송실험을 수행하였다. 이송각을 45°, 135°, -135°, -45°로 하여 수행한 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

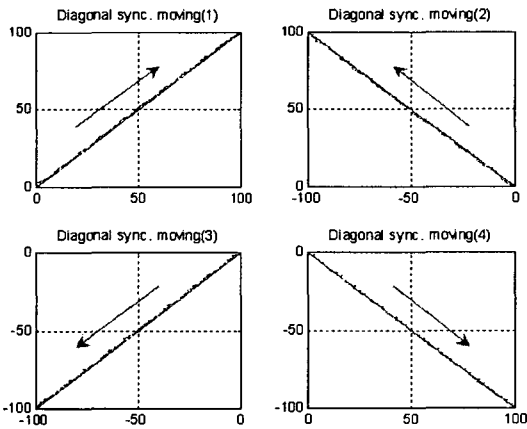


Fig. 9 Diagonal moving for each direction

대각이송에 있어서 전압제어를 통한 동기이송을 실현하므로 스텝이송에 비해 오차가 현저히 줄어들었음을 알 수가 있다.

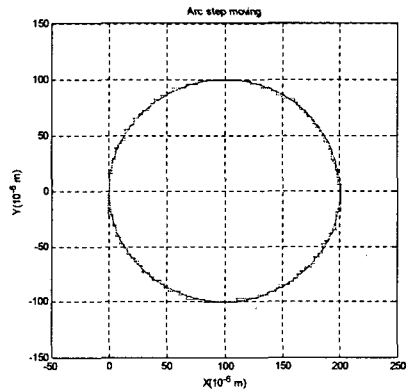
4.3 원호 동기이송

대각이송 알고리즘을 이용하여 원호이송에 적용하여 실험

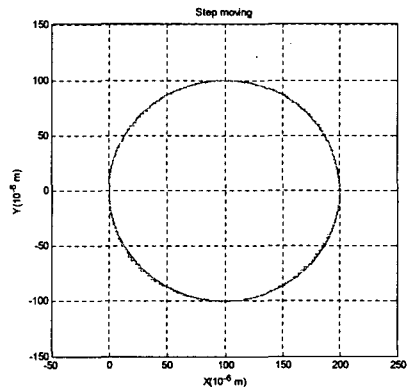
해 보았다. 원호이송의 경우 원호각을 N등분하여 얻어진 원호위의 점들을 연결하는 선분들의 대각이송의 경우와 같다고 볼 수 있다. 등분수(N)는 단위이송량과 원호 반경을 고려하여 얻어진 값으로 설정하였으며 등분수(N)와 단위이송량, 원호반경의 관계식은 다음과 같이 결정하였다.

$$N = \frac{\alpha R}{2u}$$

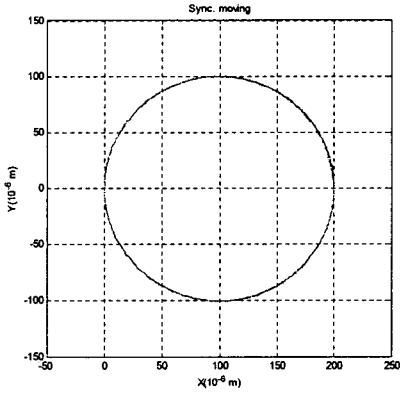
위 식에서 α 는 원호각(angle of arc), R 은 원호반경(radius), u 는 단위이송거리(unit step moving dist.)를 나타내며 단위이송거리의 2배를 단위각에 대한 이송거리로 결정하였다. 아래의 Fig. 10은 기존 스텝방식으로 이송한 결과(a)와 전압제어만을 적용한 스텝이송(b), 그리고 전압제어를 이용한 동기이송(c)으로 360°를 시계방향(CW)으로 주행시켜 얻어낸 결과를 나타낸 것이다.



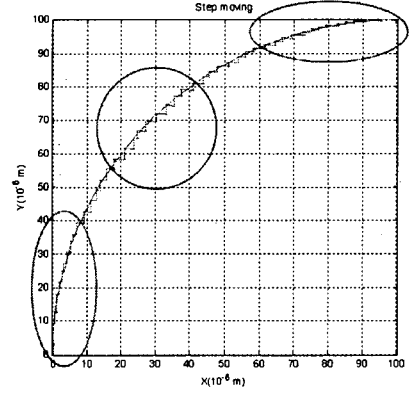
(a) Step moving(Full step)



(b) Step moving using voltage control



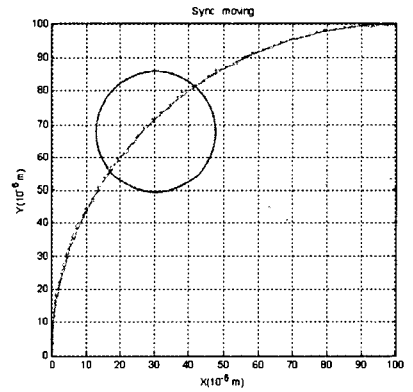
(c) Sync. moving using voltage control
Fig. 10 Arc moving



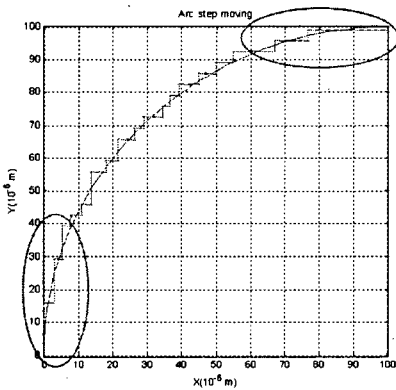
(b) Step moving using voltage control

4.4 실험 결과

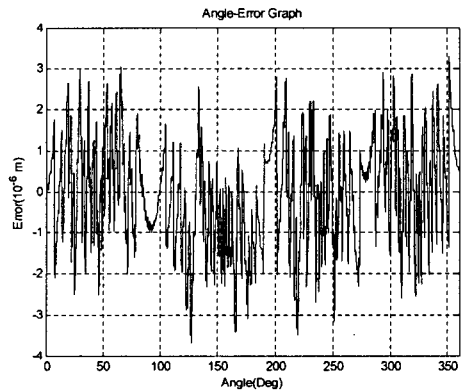
다음의 Fig. 11은 Fig. 10의 $0^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 영역을 확대한 것인데, Fig. 11(a)의 기존스텝방식과 Fig. 11(b)의 전압 제어방식을 비교해 보면 전압제어를 하였을 때가 그렇지 않을 때 보다 0° 와 90° 가까이에서 좀 더 원호에 가깝게 이송하는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 11(c)의 전압제어와 동시이송을 모두 적용하였을 때 여전히 개선되지 않았던 45° 부근에서도 전압제어만 적용했을 때 보다 오차를 더욱 줄이는 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 12는 각 경우에 대해 이송각에 대한 오차그래프를 나타낸 것인데 그 결과가 전압제어와 동시이송을 구현함으로써 더욱 오차가 줄어들었음을 보여 주고 있다.



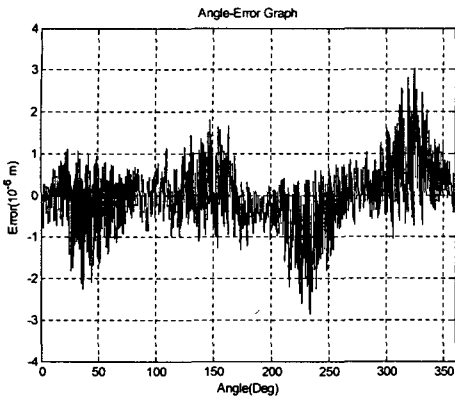
(c) Sync. moving using voltage control
Fig. 11 Arc moving($0^\circ \sim 90^\circ$)



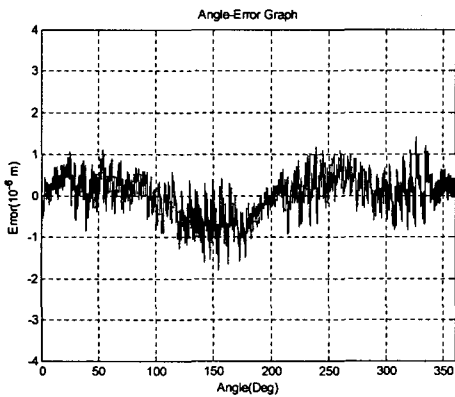
(a) Step moving(Full step)



(a) Step moving(Full step)



(b) Step moving using voltage control



(c) Sync. moving using voltage control

Fig. 12 Angle-Error Graph

5. 결론

Inchworm motion 방식의 피에조 구동기는 그 특성상 이송 시 변위손실이 발생하므로 그것을 고려한 좀 더 정밀한 제어가 필요하다. 그리고 micro/meso단위의 가공에서 고정밀도를 가지기 위해서는 위의 결과가 말해 주듯이 기존의 스텝이송방식에는 한계가 있다. 그러므로 전압제어를 이용한 동시이송제어가 불가피하다. 하지만 위에서 제안한 동시이송 방식도 이송 시 발생하는 뒤틀림을 제어하는 데는 큰 어려움이 있다. 또한 그 뒤틀림으로 인한 정확한 단위이송량이 결정되지 않는 것이 대각 또는 원호이송 시 발생하는 오차의 가장 주된 원인으로 보고 있다. 그러므로 앞으로 피에조 구동기의 개선이 절실히 필요하며 또한 그와 상응하여 고정밀

도를 가진 제어기 개발에 관한 연구도 필요하다고 본다. 그래서 본 저자는 앞으로 고정밀제어기에 관한 연구를 하고자 한다. 그 연구는 Fuzzy Control 이론을 이용한 제어기의 설계로 행하여 질 것이다.

참고 문헌

- (1) C. Y. Park, 1995, Piezoelectric ceramic for electric - electronic, pp. 174-161.
- (2) PI Company, 1998, Nanopositioning, pp. 1.6, 4.24 - 25.
- (3) T. J. Ko, H. S. Kim, Y. H. Bea, S. H. Seo, J. G. Kim, E. H. Kim, 2002, "Micro - feeding Mechanism By Inchworm Type of Piezoelectric ceramic", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference 2002.5, pp.516-519.
- (4) PT. J. Ko, H. S. Kim, Y. H. Bea, 2002, "Micro/Meso Cutting with Micro Turning Lathe", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference 2002.10, pp.1025-1028.
- (5) Y. H. Bea, T. J. Ko, H. S. Kim, B. M. Chung, J. G. Kim, 2003, "A Study on the Micro Machining Using Micro Machine", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, 2003.6, pp.1203-1206
- (6) Z. X. Wang, K. Jouaneh and D. Dornfield, 1989, "Desige and characterization of a linear motion Piezoelectric microactuator", IEEE Conf. Robotics and Automation, pp. 1710-1715.
- (7) 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.
- (8) 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.