

변곡점에서 공작기계의 윤곽오차

안일혁*, 김성수*, 민경석*, 최우천#, 홍대회**

Contouring Error of a Machine Tool at Inflection Points

Il Hyuk Ahn*, Sung Soo Kim*, Kyung Seok Min*, Woo Chun Choi# and Daehie Hong**

ABSTRACT

Contouring errors are important especially for high speed and precision machining. In this study, contouring errors along contours having inflection points are studied. When a table of a machine tool moves along a circular path, acceleration acts toward the center of the circle. Thus, at inflection points, acceleration as well as inertia force changes its direction abruptly. The effect of inertia force on the contouring error is investigated in this study. It is found that the contouring error at an inflection point is proportional to the acceleration. This result can be useful in determining contouring errors along general paths.

Key Words : Contouring errors (윤곽오차), Contouring test(윤곽 테스트), Inflection point(변곡점), Machine tool(공작기계), Grid plate(그리드판)

1. 서론

공작기계의 윤곽오차는 바람직한 기준 경로에서 벗어난 정도로 정의된다. 윤곽오차는 가공된 공작물의 오차에 직접 영향을 주므로, 공작기계의 윤곽성능은 적절한 테스트를 하여 가공 전에 아는 것이 중요하다. 고속가공은 많은 장점을 가지고 있어서 점차 많이 요구되고 있다. 그러나 고속은 윤곽오차를 증가시키므로 고속에서 특히 윤곽정밀도가 특히 중요하다.

공작기계의 윤곽오차에 대한 연구가 일부 이루어졌다. 볼바를 이용한 원호 테스트 방법¹이 소개되었고, 윤곽성능을 시험하는 방법으로 많이 채용되었다. Kakino²는 NC 공작기계의 운동오차를 측

정하는 방법과 오차의 원인을 분석하였다. Knapp³은 윤곽성능과 대부분의 채용 테스트가 수행하는 정적 성능사이에는 큰 차이가 있음을 보였다. Kwon 등⁴은 볼바(ballbar) 시스템을 사용하여 공작기계 오차의 측정과 분석을 수행하였다. 윤곽오차에 관해서는 주로 윤곽오차를 줄이기 위한 제어에 관한 연구가 많이 이루어 졌다.⁵⁻⁷

기존의 윤곽오차에 관한 연구에서는 주로 원호 테스트와 모서리 테스트가 주로 다루어졌다. 원 궤적에서 관성력은 크기가 일정하고 방향만 변하며, 모서리 궤적에 대해서는 제어기에서 모서리를 예측하여 가감속이 미리 일어나므로 관성력이 급격히 변하지 않는다. 본 연구에서는 기존의 테스트 궤적에서 볼 수 없는 새로운 궤적에 대해 윤

접수일: 2003년 3월 17일; 게재승인일: 2003년 8월 14일

* 고려대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 고려대학교 기계공학과

E-mail: wchoi@korea.ac.kr, Tel: (02) 3290-3361

** 고려대학교 기계공학과

곽오차를 측정하고 분석한다.

2. 윤곽테스트와 실험장치

공작기계에는 많은 종류의 오차가 존재한다. 기계 자체, 서보 시스템 혹은 외부 요인에 의해 발생한다. 윤곽오차에 영향을 주는 것으로 공작기계에는 다음과 같은 오차가 존재한다.

- 기하학적 오차 (geometric errors)
- 기구학적 오차 (kinematic errors)
- 서보 미스매치 (servo mismatch)
- 서보 랙 (servo lag)
- 요소의 탄성변형에 따른 오차

대부분의 오차는 원호 테스트의 결과를 분석하여 밝힐 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 원호 테스트에서는 일정한 이송속도에 의해 일정한 관성력이 작용하므로, 갑자기 변하는 동적인 요인에 의해 발생하는 오차가 포함되어 있지 않아서 이러한 오차는 원호 테스트에서 구할 수 없다.

본 연구에서는 Fig. 1에 보이는 것과 같이 8개의 원호로 이루어진 경로에 대해 윤곽성능을 테스트한다. 이러한 테스트를 ACIP 테스트(tests for a path of arcs of circles with inflection points)로 명명한다. 이 테스트에서의 경로는 동일한 반경의 아크 8개로 이루어져 있다. 두개의 아크가 만나는 점은 변곡점(inflection point)으로서 ACIP 경로 내에 총 8개가 존재한다.

원호를 따라 운동이 이루어지면, 일정한 크기의 가속도가 원호의 중심을 향한 방향으로 발생하고 이에 비례한 관성력이 동일한 방향으로 작용한다. 그러나 원의 중심이 갑자기 바뀌는 변곡점에서는 관성력의 방향이 바뀐다. 이러한 변곡점에서 관성력의 변화에 의한 윤곽오차를 본 연구에서 다룬다.

본 연구에 사용된 공작기계는 수직 머시닝센터로 비교적 오래된 기계이며 큰 오차를 가지고 있다(Fig. 2 참조). 이 공작기계에 사용된 제어기도 오래된 것으로 오차보정 등의 기능이 없다. 이 공작기계는 비교적 큰 오차를 갖고 있어서, 오차가 뚜렷이 나타난다.

원호 테스트에는 볼바(ballbar)가 주로 많이 사용되나, 볼바는 일정한 반경의 원에만 적용이 가

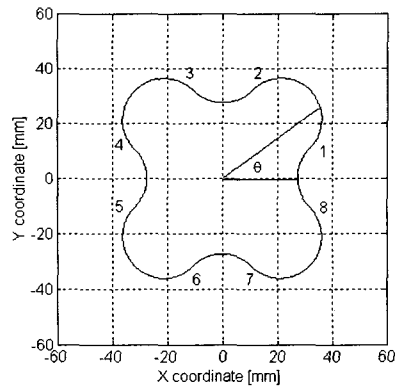


Fig. 1 Path and inflection points for ACIP test

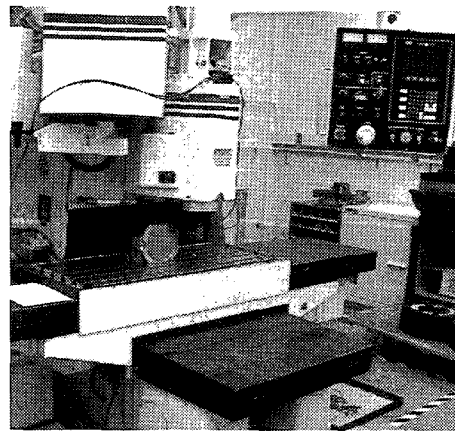


Fig. 2 Machine tools used in the tests

능하여 본 연구에서와 같이 원이 아닌 궤적의 테스트에는 부적합하다.

본 연구에서는 그리드판(grid plate)을 사용하여 ACIP 테스트의 궤적을 따라서 발생하는 윤곽오차를 측정하였다. 그리드판은 2D 스케일로서, 비접촉식으로 좌표를 정밀하게 측정하는 센서이어서 여러 반경의 원궤적이나 임의의 궤적에 사용될 수 있다. 이 그리드판은 작은 반경의 원호 테스트나 코너와 같이 시스템의 동적 특성의 영향이 크게 나타나는 테스트에 사용될 수 있다.

3. 실험결과와 분석

ACIP 테스트에서 원호의 반경은 5-35mm로 변화시키고, 이송속도는 100mm/min-4000mm/min로 변화시켰다.

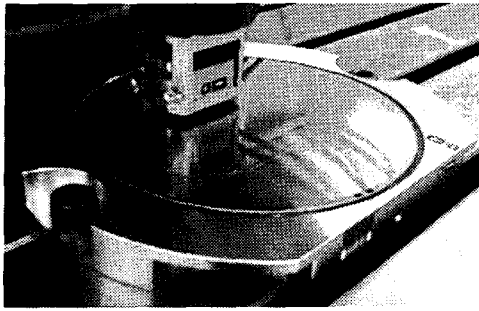
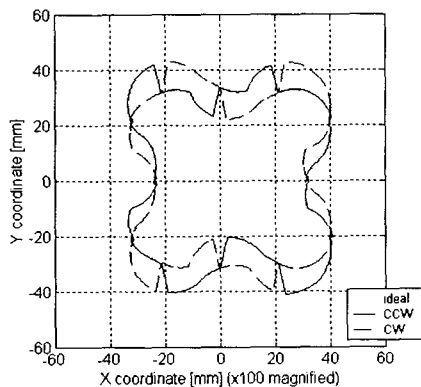


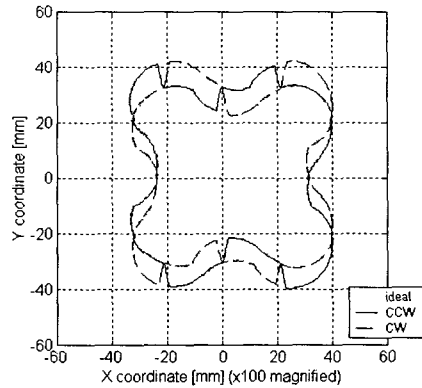
Fig. 3 Heidenhain grid plate

Fig. 4 는 몇 가지의 이송속도에 대해 윤곽오차를 구한 그림이다. 윤곽오차는 경로의 수직인 방향으로 100 배 확대하여 나타냈다. 본 연구에 사용된 공작기계는 백래시 보정을 하지 않을 때, X 방향으로 $9\mu\text{m}$, Y 방향으로 $90\mu\text{m}$ 백래시를 갖고 있다. 운동의 방향이 변하는 곳에서, 특히 Y 방향으로 큰 백래시 오차가 나타나는 것을 볼 수 있다. 변곡점에서 윤곽오차는 저속에서는 그다지 보이지 않으나, 고속이 될수록 크게 나타난다. 다른 반경의 궤적에 대해서도 유사한 오차가 발생하였다. 그리고 고속에서 윤곽오차는 블록한 영역에서는 안쪽으로 나타나고 오목한 영역에서 밖으로 나타났다. 이것은 오차보정을 하지 않은 원호 테스트에서 속도가 커질수록 서보랙 오차에 의해 반경이 줄어드는 것과 같은 현상이다.

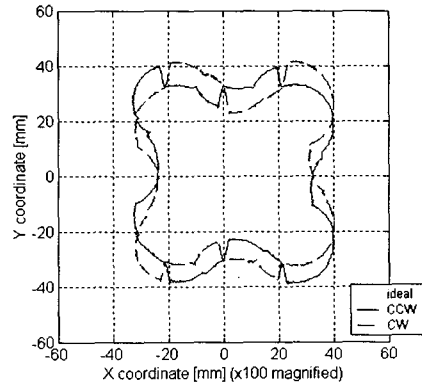
Fig. 5 는 각도에 따른 윤곽오차를 보여준다. 여기서 각도는 Fig. 1 에서의 θ 이다. 변곡점이 있는 각도는 $2.6779, 2.0344, 1.1071, 0.4636, -0.4636, -1.1071, -2.0344$ 과 -2.6779 radian 이다. 이 그림에서



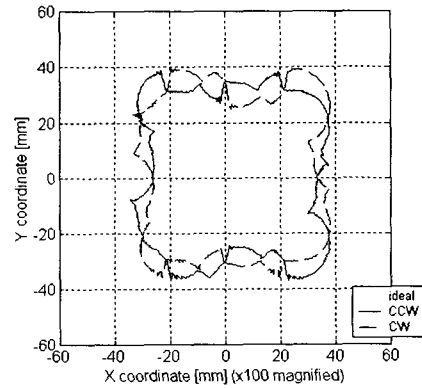
(a) F=100mm/min



(b) F=500mm/min



(c) F=1000mm/min



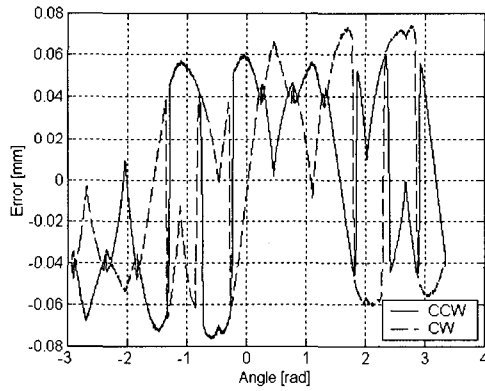
(d) F=2000mm/min

Fig. 4 Error traces for radius of 15mm for various feed rates

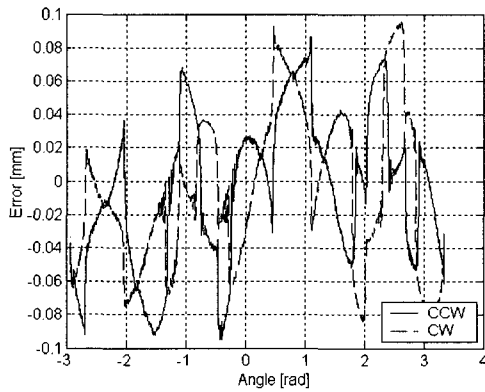
변곡점에서의 윤곽오차는 이송속도가 크면 커지는 것을 알 수 있다.

ACIP 궤적을 따라 발생하는 오차에는 노이즈, 진동 등이 섞여 있어서 변곡점에서의 오차를 구분하기 어렵다. 본 연구에서 변곡점에서의 오차는 Fig. 6 에 나타난 방법으로 구하였다. 변곡점 부근에서 실험데이터에 가장 근사한 선을 구하고, 변곡점 이전과 이후에서 데이터에 가장 근접한 선을 각각 두개 구한다. 그림에서 선분 1 과 2 가 만나는 점과, 선분 2 와 3 이 만나는 점을 구하여 두 점에서의 오차의 차이를 변곡점에서의 오차로 구한다.

Fig. 7 은 이송속도가 4000mm/min 인 경우 변곡점에서의 윤곽오차를 구한 것이다. 이 그림에서 오차의 크기는 변곡점의 위치에 무관하다는 것을



(a) F=100mm/min



(b) F=2000mm/min

Fig. 5 Error plot with respect to angle

알 수 있다. 오차의 부호가 변곡점을 지날 때마다 바뀌는 것은 볼록한 아크에서 오목한 아크로 이동할 때 관성력이 궤적의 바깥쪽으로 발생하고, 다음에는 안쪽으로 발생하기 때문이다. 그리고 변곡점에서의 오차는 운동 방향에 무관하다. 운동 방향에 따라 크기가 다소 차이가 나는 것을 오차를 구할 때 존재하는 불확실성 때문이다.

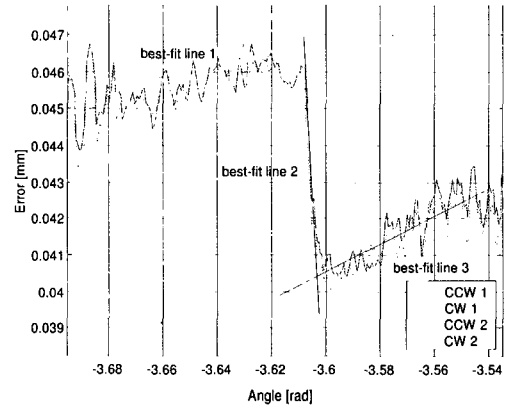


Fig. 6 Determination of error at an inflection point

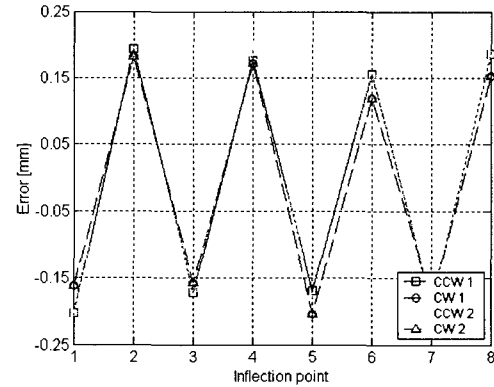


Fig. 7 Error at inflection points for feed rate of 4000mm/min

Fig. 8 은 변곡점에서의 윤곽오차와 이송속도와의 관계를 보여준다. 관계는 2 차 곡선으로 나타났다. 이 그림에서 '+'는 표준편차를 나타낸다. Fig. 8 의 변곡점에서의 윤곽오차를 가속도에 관해 구한 것이 Fig. 9 에 나타나 있다. 저속에서는 변곡점에서의 윤곽오차와 가속도가 거의 비례한다는 것을 알 수 있다.

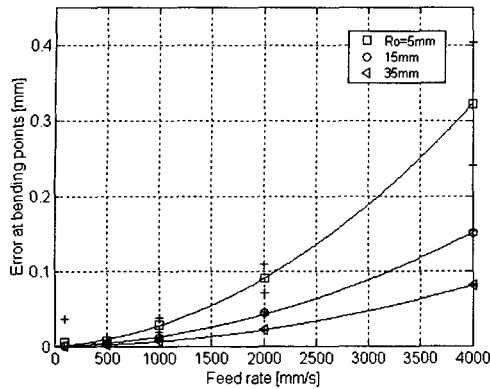


Fig. 8 Error at inflection points for various feed rates

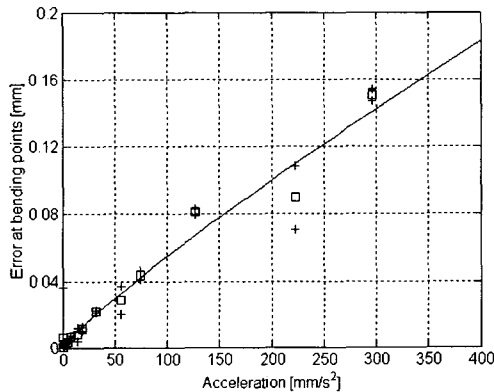


Fig. 9 Error at inflection points with respect to acceleration

실제 공작물을 가공할 때, 경로에 변곡점이 존재하는 경우, 본 연구에서 구한 윤곽오차와 가속도의 관계를 이용하여 변곡점에서의 윤곽오차를 예측할 수 있다.

4. 결론

공작기계의 윤곽성능을 테스트하는 방법으로 8 개의 아크로 구성된 ACIP 테스트를 다양한 이송속도와 몇가지의 반경에 대하여 수행하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 변곡점에서의 오차는 운동 방향에 무관하다.
- 변곡점에서의 윤곽오차는 대략적으로 이송속도의 제곱에 비례하고, 가속도에 비례한다.

본 연구에서 구한 변곡점에서의 오차는 실제 공작물의 윤곽오차를 예측하는데 이용될 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초(과제번호: R01-2002-000-00419-0)와 고려대학교 특별연구비의 지원을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Knapp, W., "Test of the Three-Dimensional Uncertainty of Machine Tools and Measuring Machines and its Relation to the Machine Errors," Annals CIRP, 32(1), pp. 459-464, 1983.
2. Kakino, Y., Ihara, Y. and Nakatsu, Y., "The Measurement of Motion Error of NC Machine Tools and Diagnosis of their Origin by using Telescoping Magnetic Ball Bar Method," Annals CIRP, 36, pp. 377-380, 1987.
3. Knapp, W., "Accuracy of Length Measurement and Positioning: Statistical Measurement and Contouring Mode," Annals CIRP, 37(1), pp. 511-514, 1988.
4. Kwon, H. D. and Burdekin, M., "Measurement and Diagnostics of Machine Tool Errors during Circular Contouring Motions," Proc Instn Mech Engrs, Vol 212, Part B, pp. 343-356, 1998.
5. Lee, Y. and Jee, S., "Adaptive Cross-Coupling Control for High-Speed Nonlinear Contour Machining," Journal of the KSPE, Vol. 17, No. 11, pp. 108-114, 1999.
6. Na, I.-J., Choi, C.-H., Jang, T.-J., Choi, B.-K. and Song, O.-S., "Contour Error Analysis and PID Controller Design for Machining Center," Journal of Control, Automation and System Engineering, 02 Vol. 3, No. 1, pp. 32-39, 1997.
7. Joo, J.-H., Lee, H.-C., Lee, Y.-J. and Jeon, G.-J., "A New Method of Contour Error Modeling for Cross-Coupled Control of CNC Machines," Journal of Control, Automation and System Engineering, Vol. 3, No. 4, pp. 389-397, 1997.