

고속 HMC 이송계의 운동특성 평가 및 운동오차 예측

최헌종*, 허남환+, 강은구+, 이석우+, 홍원표+

Performance Assessment and Contouring Error Prediction of High Speed HMC

Hon-Zong Choi*, Nam-Hwan Heo+, Eun-Goo Kang+, Seok-Woo Lee+, Won-Pyo Hong+

Abstract

Recently, the evolution in production techniques (e.g. high-speed milling) and the complex shapes involved in modern production design has been increasingly popular. The key to the achievement is a drastic improvement of the dynamic behavior of the machine tool axes used in production machinery. The more complex these tool paths the higher the speed and acceleration requirements. But it is very difficult to reach the target for high speed machine tool because of the limitations of servo system and motion control system. However the direct drive design of machine tool axes, which is based on linear motors and which recently appeared on the market, is a viable candidate to meet the ever increasing demands, because of these advantages such as no backlash, less friction, more mechanical simplicity and very higher acceleration and velocity comparing to the traditional system. This paper focused on the performance tests of the high speed horizontal machine tool based on linear motor. Especially, dynamic characteristics were investigated through circular test and circular form machining test is carried out considering many important parameter. Therefore these several experiments is used to be evaluated the model for prediction of circular motion error and circular machined error.

Key Words : Linear motor(리니어모터), Feeding system(이송계), Machine tools(공작기계), Positioning error(위치오차), Contouring error(운동오차)

1. 서론

최근의 생산시스템은 수요자의 요구에 맞추어 다품종 소량화 경향이 뚜렷해지고 부품 또는 제품의 다기능화 및 소형화가 급속하게 진전되고 있으며, 여기에 보조를 맞추어 제품의 고정밀화가 그 어느 때보다 강하게 요구되고 있다.

이에 따라 공작기계를 이용한 정밀 가공기술의 필요성이 증가하게 되었고 공작기계가 공작물의 가공정도에 미치는 영향에 대한 평가가 많은 관심을 모으고 있다. 이는 가공된 공작물의 정밀도는 그것을 가공한 공작기계의 정밀도에 의해 좌우되기 때문이다. 일반적으로 가공 공작물의 정밀도란 가공된 공작물과 치수 및 기하학적 기준간의 일치 정도를 말한다.

* 주저자, 한국생산기술연구원 생산공정기술본부 나노가공팀 (choihz@kitech.re.kr)

주소: 인천광역시 연수구 동춘동 994-32 송도테크노파크 단지내

+ 한국생산기술연구원 생산공정기술본부 나노가공팀

공작물의 정밀도는 공작물 성능의 가장 중요한 측정 기준이므로 정확한 공작물 생산이 중요하다. 그렇기 때문에 고정밀도의 부품을 가공하기 위해서는 공작기계의 정밀도를 미리 평가하여 그 결과를 설계에 반영시킬 필요가 있다고 생각되며, 또한 공작기계의 정밀도를 측정하여 요구하는 정밀도가 충분히 나올 수 있다는 판단아래 제품을 가공하여야 한다. 공작기계의 정밀도는 공작물에 그대로 반영되기 때문에 국제표준화기구(ISO)나 일본공업규격(JIS)에서는 공작기계의 정밀도 시험에 관한 내용을 점차 보강하여 공작기계의 성능을 평가하고 있다. 그 가운데 정적 정밀도시험의 하나로 직선운동의 기하학적인 정밀도, 예를 들면 진직도, 직각도, 평행도 및 평면도 등을 측정하도록 되어 있다. 그러나 공작기계의 이송운동이 고속화되고 제품의 고정도화가 점차 강하게 요구됨에 따라 단순히 각 운동축의 기하학적인 정밀도를 측정하여 공작기계를 평가하는 것만으로는 불충분하다고 생각된다. 특히 NC 공작기계는 기존의 수동식 공작기계가 가지고 있는 기계 부품과 같은 하드웨어적인 요소 이외에, 이를 제어하기 위한 수치제어 장치가 결합되어 있는 형태이므로 하나의 시스템으로 정밀도를 평가해야만 한다. 실제 NC 공작기계를 이용한 가공시 공작물의 오차에 영향을 미치는 공작기계의 오차요소로는 기계적인 장치 및 수치제어 장치가 복합된 윤곽에 의한 위치 운동 오차이다.

W.KNAPP는 공작기계의 정적인 상태에서의 임의의 공간상에서 원호 운동시 발생하는 오차를 측정하여 21개의 기하학적인 오차를 분류하였으며, M.A.Donmez와 D.S.Bloquist는 오차 보정을 통하여 운동정도를 향상시켰고, Kimoto와 Moriyama 등은 볼사사의 열 변위량을 측정하여 마이크로프로세서에 보정하여 직선운동 오차를 향상시켰다. 그러나 이러한 오차의 측정 및 해석에서의 공통적인 문제점은 공작기계에서 직접 공작물을 가공하지 않는 상태에서 오차량을 측정하고, 공작기계 컨트롤러의 파라미터를 수정하여 오차를 보정하였기 때문에 실제 공작물 가공시에 발생하는 오차와는 일치하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 최근 공작기계 이송계의 요구사항인 고속, 고정밀화 추세에 따라 고속 HMC를 대상으로 운동 특성을 파악하고, 이를 통해 고속 HMC의 문제를 분석함으로써 고속 HMC의 운동시 성능 향상을 꾀하고자 하였다. 연구의 세부 내용으로 동적인 특성평가를 위한 원호운동 특성 평가를 실시하였다. 그리고, 가공 특성을 확인하기 위한 마스터 시편을 설계하여 마스터 시편 가공 후 발생하는 동적 오차를 측정하였고 무부하시와 가공시 오차를 비교하였다. 이러한 고속 이송계의 동적 운동특성 비교 평가 분석결과를 토대로 오차

보상을 실시하기 위한 프로그램을 개발하였다.

2. 실험장치

리니어 모터를 이용한 HMC의 고속 이송시 운동특성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장치를 이용하였다. 고속 HMC의 주요 사양은 Table 1과 같다

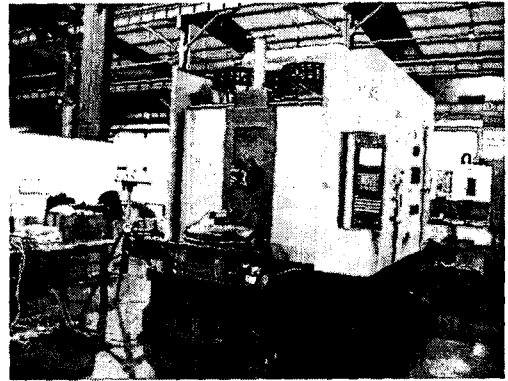


Fig. 1 Experimental Setup of Performance Test

Table 1 Specifications of High Speed Machine Tool

Contents	Values
Travel Length	500×450×450
Spindle Speed(rpm)	50,000/70,000
Tool Shank	HSK-E40/HSK-E32
Rapid Feed rate (m/min)	120(X,Y) , 60(Z)
Cutting Feed rate (m/min)	60(X,Y), 30(Z)
Acceleration	1.2G
Table size	400
Max. Loading Weight	400kg
A.T.C(tools)	16
A.P.C(pallets)	4

최대 속도는 120m/min, 최대 가속도는 1.2G의 고속 이송이 가능한 이송시스템을 갖추고 있다. 공작기계의 구조는 정적, 동적, 열적 안정성을 갖는 문형 구조의 칼럼을 적용한 공작기계이다. 고속운동시의 운동특성을 분석하기 위하여 원호운동테스트를 실시하였으며, 상용 볼바 시스템의 경우 고속 측정이 불가능하여 고속 측정이 가능한 레이저 볼바 시스템을 이용하였다. Table 2에 본 연구에서 사용한 레이저 볼바 측정 장비에 대한 자세한 사양을 나타내었으며, 최대 3.6m/sec의 이송속도에 대한 측정이 가능하며, 분해능은 0.01 μ m정도이다

Table 2 Specifications of Laser Ball Bar

Contents	Values
Company	OPTODYNE, INC.
Resolution	0.01 μm
Maximum velocity	3600 mm/sec
Measurement range(Diameter)	152mm
Temperature range	15.5℃ ~ 32℃
Measurement distance	15m

3. 운동 특성 평가 실험

3.1 원호운동 측정

고속가공의 가공정밀도는 정적인 오차 요인에 의한 것보다 동적인 오차에 지배되는 것으로 알려져 있다. 이러한 동적인 이송계 오차 특성의 분석을 위하여 일반적으로 원호 지령에 대한 이송특성을 평가하는 방법이 사용된다. 본 연구에서는 이송계 오차 특성을 분석해내기 위하여 원호의 반경과 이송속도에 따른 운동궤적을 측정하여 분석함으로써 이송계의 주요 오차원인을 규명하고자 하였다. 또한, 이러한 분석을 통하여 도출한 오차의 요인과 특성의 관계는 향후 원호운동시의 오차를 보상에 적용되기 때문에 보상 가능한 파라미터에 대한 영향을 우선적으로 분석하였다.

서보제어루프의 지연에 의한 오차를 해석적으로 구하기 위하여 서보계 전달함수는 $T_s = 1/K_s$ 의 시간지연을 가진 1차 시스템으로 근사될 수 있다. 이때, 원호 이송에 있어서 지령속도에 대한 다른 지령원호 반경의 감소량은 식(1)과 같이 근사될 수 있으며, 정상상태에서의 반경방향 오차 ΔR 은 다음과 같은 수식으로 구할 수 있다.

$$\Delta R = \frac{1}{2R} \left(\frac{F}{K_s} \right)^2 \quad (1)$$

이때, R 은 반경, F 는 이송속도, K_s 는 지연함수의 계인 값을 나타낸다. (1)식으로부터 반경이 커질수록 오차량은 감소하며 이송속도가 증가 할수록 오차가 증가하는 것을 알 수 있다. 동적인 운동특성을 평가하기 위한 일반적인 방법인 원호 운동 평가를 실시하였다. 측정 장비의 셋팅은 Fig. 1과 같이 하였으며, 분석 방법은 ISO230-4의 방법 중 Radial deviation의 값에 의한 오차 분석을 실시하였다. 실험은 속도에 따른 지령 반경(50mm)의 추종값과 테스트샘플의 가공후의 오차에 대한 실험 및 분석을 수행하였다. 실험에서

이송속도는 10m/min으로 고정하고, 반경변화(R25, R37.5, R50, R62.5, R75, R100)에 따른 XY평면상에서의 반경방향 오차분석을 실시하였다. 실험 결과 이송속도가 10m/min인 경우 분석결과 Radial deviation이 $F_{xy,max} = 0.031mm$, $F_{xy,min} = -0.008mm$ 로 측정되었으며 원호반경은 48.53mm로 측정되어 실제 지령값보다 약 1.5mm정도 반경이 축소되었다. 본 실험에서 실제 이송속도는 10m/min으로 고정시키고 각각의 반경변화에 따른 원호평가 실험 결과의 오차값을 Fig. 2에 나타내었다.

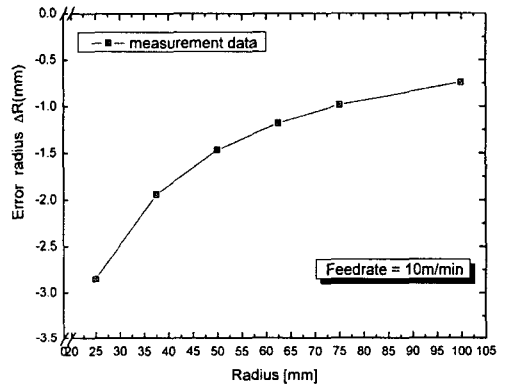


Fig. 2 Radial motion errors as nominal radius changes

실험 분석 결과 식(1)에 의한 변수들의 관계 특성이 명확히 관찰이 되었다. 이송속도를 고정하고 반경변화만 보면 반경이 커질수록 오차가 줄어들었으며 반경이 작아질수록 오차값이 증가하였다.

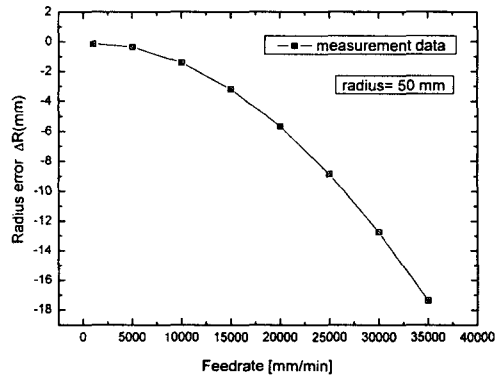


Fig. 3 Radial motion errors as nominal feedrate change

Fig. 3은 반경을 50mm로 고정시키고 이송속도를 1m/min에서 35m/min까지 변화하면서 반경 감소량을 측정 한 결과를 나타내었다. 실험 측정결과 반경감소량은 이송속도에 따라 지수적인 형태의 증가를 보이고 있다. 또한 Fig. 2와 Fig. 3의 측정결과에서 식(1)과의 관계에서 얻어지는 $K_r(1/sec)$ 값은 위치제어 응답 지연 시간으로 대략 14정도로 예측되었으며, 이를 이용한 예측결과와 실제 측정결과가 전체 변화된 파라미터에 매우 유사하게 맞았다. 따라서 무부하시 원호 운동에서 발생하는 서보 응답 지연 시간을 예측할 수 있었다.

3.2 테스트 시편 가공

본 연구에서는 공작기계의 동적 오차를 측정하고자 ASME B5.54를 참조하여 연구 목적에 맞게 테스트 시편을 설계하였으며, Fig. 4(a)는 중삭가공후 정삭가공 직전의 사진이며 Fig. 4(b)는 최종가공 후 3차원 측정기를 이용한 측정 사진을 나타내고 있다.

리니어 모터 고속 이송계의 주요 오차 원인으로는 주로 이송계의 고속 운동에 의한 동적 원인이며, 정적인 오차에 비해 수~수십배 정도가 크게 관찰되었다. 오차의 원인은 시간지연으로 인한 추종오차가 대부분이다.

또한 부하시의 동적성능에는 고속이송시의 시간지연을 증폭시켜 무부하시의 결과인 14(1/sec) 보다 작을 것이라는 추정을 할 수 있기 때문에 이에 대한 비교 실험을 실시하고자 하였다. 따라서 절삭 테스트시의 주요 관심 오차를 보기 위해 Table 3에서 보이는 것과 같은 조건하에 실험을 실시하였으며, 시편의 재질은 일반적 고속가공에서 많이 가공되는 재질인 알루미늄 7075로 가공실험을 실시하였다.

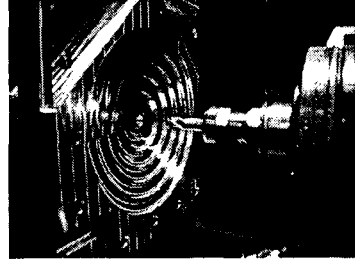
테스트 시편의 가공 조건은 $\phi 10$ flat 4날 엔드밀, 공구회전속도 30,000rpm이며, 이송속도 변화와 직경의 변화에 따른 실험을 실시하였다.

Table 3 Machining conditions of test sample

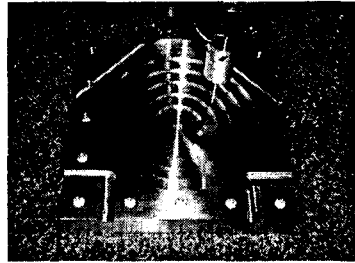
Contents	Value
Tool	$\phi 10$ (mm) flat (4날), 코너부0.2R
circle diameter(mm)	$\phi 50, \phi 75, \phi 100, \phi 125, \phi 150$
Rotation speed(rpm)	30,000 (rpm)
feedrate (m/min)	1m/min, 3m/min, 5m/min, 7m/min, 10m/min
material	Al 7075

실험조건 선정은 중삭가공 후 최종 정삭가공을 실시하여,

가공시의 절삭력에 의해 예상되는 오차를 최소화한 가공 조건에 대한 가능한 고속 이송계만의 동적성능 요소를 추출하기 위한 실험 조건을 선정하여 실시하였다.



(a) Photograph of the machining test



(b) Photograph of CMM test

Fig. 4 Dynamic error test using test sample

Fig. 5는 알루미늄 7075 가공 후 3차원 측정기를 이용하여 가공 설정 값과 측정값의 오차를 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5에서 보면 반경은 감소하고 이송속도가 증가하면 오차값도 커짐을 볼 수 있다. 이는 식(1)의 이송속도와 직경에 따른 반경 감소 효과의 관계와 일치한다.

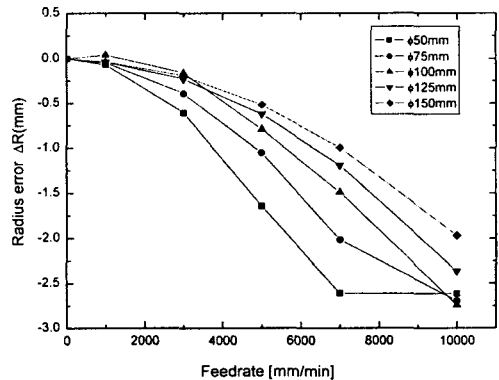


Fig. 5 Relation of radial error and feedrate

Table 4는 식(1)에서 오차값(ΔR)과 반경(R), 이송속도(F)의 값을 가지고 $K_s(1/sec)$ 값을 산출한 것을 표로 나타내었다. Table.4에서와 같이 K_s 값은 직경과 이송속도가 바뀔 때 따라 변화하는 것을 알 수 있다. 이 값은 전절에서 모든 실험에서 14값이 나온 것과 다른 경향을 보인다. 따라서 무부하시 서보 지연과 부하시의 서보 지연은 다르게 나타나며, 부하시의 지연 시간이 길어짐을 알 수 있다.

Table. 4 Evaluated K_s according to R and F

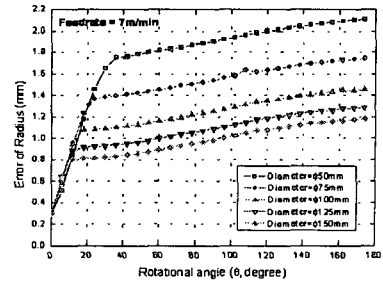
직경	1m/min	3m/min	5m/min	7m/min	10m/min
50	6.32203	6.4155	6.499	7.2205	7.605
75	7.68776	7.9941	8.114	8.2147	8.752
100	8.20113	9.4379	9.363	9.5548	10.07
125	8.51627	10.392	10.59	10.688	10.83
150	8.71181	11.305	11.58	11.705	11.87

3.3 부하시 원호운동 오차 예측 및 보상

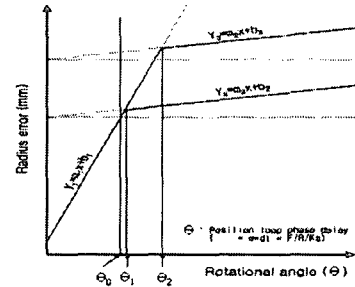
3.3.1 부하시의 원호운동 오차 예측

현재 상용 공작기계의 오차보상 방법으로는 수동적인 보상방법으로 지령직경에 대해 동적오차가 예측될 경우 지령속도에 무관하게 실제 이송속도를 감소시킴으로서 사용자에게 적절한 가공결과를 낼 수 있도록 유도한다.

그러나 이러한 가공방법의 문제점은 고속공작기계의 특성인 고속 성능을 제대로 발휘하지 못하기 때문에 고속공작기계의 원래의 취지를 상실하게 만든다. 따라서 본 실험에서는 일반적인 중삭가공 정도의 오차인 0.05mm 정도의 공차내에서 능동적인 동적오차 보상을 수행하고자 한다. 방법적으로는 현재까지 상용 공작기계의 동적오차 보상 방법인 이송속도의 변환을 유도하지 않고, 실제 지령된 반경을 변화시킴으로서 고속이송계의 특징인 이송속도를 유지할 수 있도록 하고자 한다. 본 실험에서는 우선적으로 실험 결과론적 측면에서 접근을 수행하였으며, 우리가 제안한 회전방향에 따른 반경오차를 도시함으로써 Fig. 6(b)와 같은 오차 패턴을 발견 할 수 있었다.



(a) Measurement result of radial error



(b) Modelling result of radial error

Fig. 6 Radial error modelling of circular path

실제로 Table 3에서 측정된 K_s 값을 토대로 회전 각도를 계산하면 일치한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 식(1)과 측정된 $m1, m2, K_s$ 값을 토대로 부하시의 동적 오차 모델을 완성하였으며, 완성된 오차모델을 토대로 다양한 실험 조건에 적용한 후 이에 대한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. Fig. 7의 결과를 살펴보면 우선 목표로 했던 중삭정도의 공차인 0.05mm 정도보다 매우 정확하게 오차예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

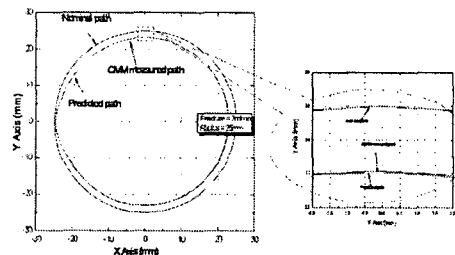


Fig. 7 Contouring error Prediction result

3.3.2 부하시의 원호운동 오차 보상

본 실험에서 완성된 오차모델을 토대로 부하시 동적 운

동 오차를 보상하기 프로그램을 작성하였다. 프로그램은 오차모델을 통해 예측된 오차량 만큼의 반경치를 회전방향에 따른 대수적인 반경 보정을 실시하고자 하였다. 프로그램수행 후의 부하시 운동오차 보상 경로 생성 결과(G-code)가 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 9는 운동오차 보상 경로 생성 프로그램에 의하여 생성된 G-code 결과이며, 다수의 G02와 G03 코드를 이용하여 동적오차 보상을 수행할 경우의 결과 값이다

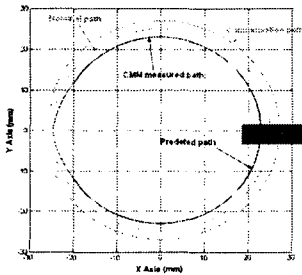


Fig. 8 Compensation result of circular path

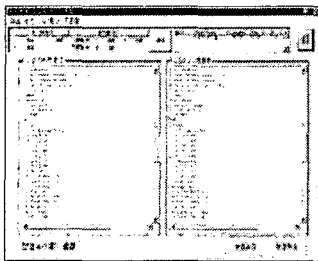


Fig. 9 Compensation program of contouring error

4. 결론

고속 공작기계용 리니어 모터의 고속운동성능을 평가하기 위해 원호운동 특성을 평가하였다. 특히 원호운동특성은 가공실험을 통하여 무부하시와 부하시의 비교 검토를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 원호 이송에 있어서 지령속도와 반경에 따른 원호 반경의 감소량은 기존 문헌들에서 언급된 수식과 경향이 일치함을 확인할 수 있었다.

둘째, 테스트 시편을 이용한 가공 부하시의 특성 분석을 수행하여 무부하시의 운동 특성과 비교한 결과 무부하시의 서보 지연시간보다 부하시의 시간 지연이 길어짐을 확인하

였으며, 지령속도와 지령반경에 따른 원호 반경의 감소 경향은 기존 문헌들에서 언급된 수식과 일치하는 경향을 보임을 확인하였다.

셋째, 고속이송시의 동적운동 실험결과 부하시와 무부하시의 동적특성이 다르게 측정되며, 고속이송시의 필연적인 오차를 감소시키기 위해서는 부하시의 동적오차를 고려한 오차모델이 유효함을 확인할 수 있었다.

후기

본 논문은 산업자원부 중기거점 과제 “고속 지능형 가공 시스템의 개발” 사업의 연구비를 지원받아 수행 되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 홍원표, 강은구, 이석우, 최현중, “고속 HMC 이송계의 운동특성 평가,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp158~161, 2003.
- (2) 최현중, 강은구, 정일용, 이석우, “공작기계용 리니어모터의 운동성능 평가에 관한 연구,” 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp215~220, 2002.
- (3) P. VAN DEN BRAUMBUSSCHE, J. SWEVERS, H. VAN BRUSSEL and P. VANHERCK, "Accurate Tracking Control of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes," Mechatronics, Vol. 6, No. 5, pp. 507~521, 1996.
- (4) Jenq Shyong Chen and Cheng Chang Ling, "Improving the Machine Accuracy Through Machine Tool Metrology and Error Correction," Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 11, pp198~205, 1996.
- (5) W.Knapp, "Circlar test for three-coordinate measuring machines and machine tools", Precision Engineering, Vol. 5. No. 3, pp. 115~124, 1983.7
- (6) M. A. Donmez, and D.S.Blomquist, "A general methodology for machine tool accuracy enhancement by error compensation", Precision Engineering, Vol. 8, No. 4, pp. 187~195, 1986. 10
- (7) Moriyama, H., "A Study. of Compensation of Thermal Displacement of the Ball Screw in NC MACHINE TOOLS", Vol. 54, No. 9, JSPE. pp. 131~136, 1988. 9.

- (8) Y. Kakino, Y. Ihara, A. Shinohara, "Accuracy Inspection of NC machine tools by double Ball Bar Method," Hanser Publishers, 1993.
- (9) C. Wang and B. Griffin, "A noncontact laser technique for circular contouring accuracy measurement," Review of scientific instruments, Vol. 72. No. 2, pp1594~1596, 2001.