Ball Link Bar를 이용한 CNC 공작 기계의 정밀도 계측과 해석에 관한 연구

Measurement and Analysis of CNC Machine Tool Errors Using Ball Link Bar System

권 혁 동
(Hyuk Dong Kwon)

Abstract : In this paper, a method has been proposed for error measurement/diagnosis of CNC machine tools using the ball link bar on three dimensional space. For the circular motion error measurement, deviation between the desired and actual test path has been measured and analysed using a new type of ball link which incorporates ideal three point contact between reference balls and sockets. Computer program for the error evaluation has been developed and implemented under PC environment. Using the developed program, the circular test data on a CNC machine tool have been analysed, and thus, machine tool errors were effectively evaluated.

Keywords: machine tool, accuracy, circular test path, ball link bar

Ⅰ. 서론

공작 기계에 수치 제어(Numerical Control) 장치가 부착되면서, 정밀도 향상과 생산성 제고에 큰 기여를 하였다. 수치 제어 공작 기계는 여러 축이 동시에 움직이는 특성으로 인하여, 공작 기계의 성능 시험 및 검사에 있어서 가공 시험은 가장 일반적으로 산업계에서 시행되고 있으나[1][2], 가공 시편의 제작과 측정에 노력과 시간이 많이 소요되는 불리한 점으로 인하여, 이를 대신하는 방법으로 간접 측정 방식의 하나인 Ball Link Bar 방법이 개발되었다. Ball Link Bar 방법은 간편한 취급성 및 짧은 소요시간 내에 이송계의 정성적이고 정량적인 오차 해석과 진단이 가능하여 각광을 받고 있다[3-5].

Ball Link Bar 방법에서는 Linear Variable Differential Transformer (LVDT) 형태의 센서를 응용하여, NC 프로그램으로 표현된 시험 경로를 움직이는 동안에 기준구(Reference Ball) 사이의 상대 변위를 측정하여 결과를 해석한다. Ball Link Bar를 이용하여 CNC 공작기계의 정밀도 측정 시험을 수행하면 원호 시험 경로를 운동하는 동안의 각 종 경로 오차가 측정된다.

원호 경로를 운동하는 동안 샘플링된 공작 기계의 오차는 실험을 수행한 이후에 결과를 분석해야 하는 데, 실험을 수행하는 작업자들의 경험과 지식에 따라서 많은 차이가 있고 정확한 해석에는 한계가 있어, 오차의 해석을 위해 연구가 진행되었다[6][7]. 그러나, 이와 같은 연구는 대부분 2차원 평면에서 이루어져 왔고, 삼차원 공간에서 측정 실험을 수행하는 방법은 제시되지 않았다.

본 연구에서는 공작 기계의 오차의 해석을 위하여, 해석 가능한 모든 오차를 종합적으로 검토하고 각 종 오차로 인한 시험 경로가 왜곡되는 전형적인 형태를 찾아내어 수리 모델화 하고, 이에 근거하여 오차를 해석할 수 있는 진단 프로그램을 개발하였다.
또한 Ball Link의 성능을 개선하기 위하여 새로운 형태의 Ball Link를 개발하여 정밀도 측정에 사용하였다.
아울러 삼차원 공간에서 공작 기계의 각종 오차를 측정할 수 있는 실험 방법을 고안하여 제시하였으며, 이 방법에 따른 시험 결과를 자동으로 분리 해주는 진단 프로그램도 개발하였다.
이에 대하여
- 공작 기계의 오차
- 원형 시험 경로를 이용한 오차 분석
- 삼차원 공간에서 공작 기계의 오차 분석
- 새로운 형상의 Ball Link Bar 개발
- 공작 기계에서 오차 측정 실험 및 분석 프로그램의 적용

의 순으로 기술하고자 한다.

접수일자 : 1996. 7. 2., 수정완료 : 1997. 4. 25.
권혁동 : 한국생산기술연구원 생산자동화센터

Ⅱ. 공작 기계의 오차

Ball Link Bar를 이용하여 CNC 공작 기계 이송계의 오차를 측정하고 분리하는 프로그램의 개발을 위하여 공작 기계의 각 종 오차에 대한 검토가 요구되어 이 장에서 서술하기로 한다.

1. 공작 기계의 오차

공작 기계의 오차는 크게 반복성이라는 관점에서 Systematic오차, Random 오차로 나뉘어 진다. Systematic 오차는 직선 운동 오차(Linear Motion Error)와 각 운동 오차(Angular Motion Error)로 오차가 발생되는 운동의 방법에 따라 구분된다.

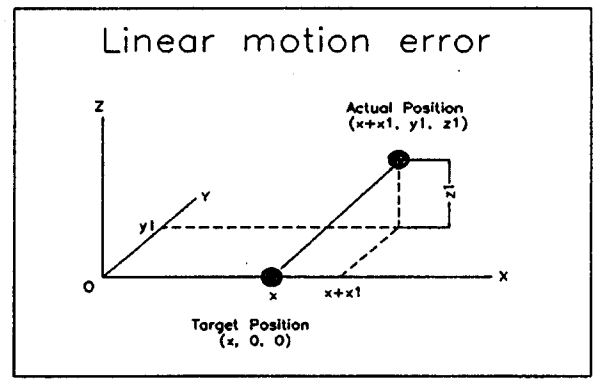


그림 1. 공작 기계의 이송축의 직선 운동 오차.
Fig. 1. Linear motion errors on machine tools.

공작 기계가 그림 1에서와 같이, 원점 O에서 X 축을 따라서 목표점 (X,0,0) 위치까지 각운동을 수반하지 않고 이동

할 때, 이 목표점에서 정확하게 멈추지 못하고, 오차를 수반하여 정지하는 경우가 발생된다. 이 오차의 X 성분을 위치 오차(Positional Error), Y 와 Z 성분을 직선 오차(Straightness Error)라고 한다.

만일 각 운동을 이 움직임 중에 같이 하게 된다면, 각운동 오차(Angular Motion Error)도 발생될 수 있다. 움직임의 방향과 오차 성분에 따라서 Pitch, Roll, Yaw 운동 오차로 나뉘어지며, Fig 2에서 이와 같은 오차를 보여 주고 있다.

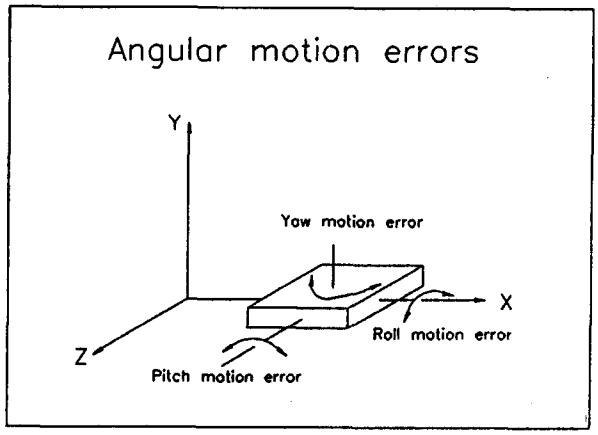


그림 2. 공작 기계의 각운동 오차.
Fig. 2. Angular motion errors on machine tools.

따라서, 공작 기계의 한 축 방향의 운동에서, 3개의 직선 운동 오차, 3개의 각운동 오차가 발생될 수 있다. 3차원 공간에서는 18개의 직선 및 각 운동 오차가 발생된다.
추가적으로 공작 기계의 축(X, Y, Z) 사이의 직각도를 고려할 경우, 그림 3에서와 같은 직교 오차(Squareness Error)가 XY, YZ, ZX축 간에 발생될 수 있다.

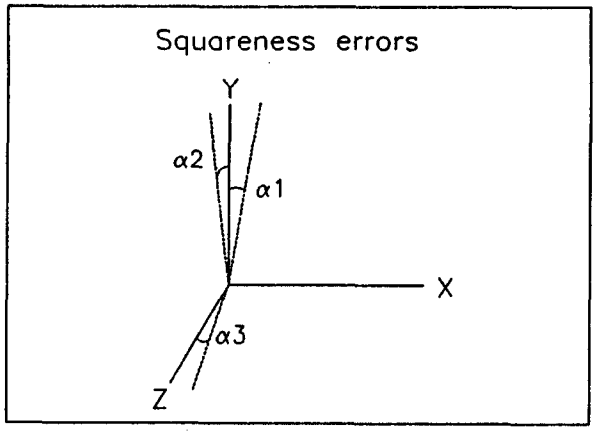


그림 3. 직교 오차.
Fig. 3. Squareness errors between machine axes.

공작 기계의 운동을 3차원 공간에서 고려할 때, 18개의 직선, 각 운동 오차, 3개의 직교 오차를 포함하여, 총 21개의 Systematic 오차를 가진다.

이와는 별도로 반복되지 않는 오차로서 Stick-slip에 의한 오차, 백래쉬(Backlash) 오차 등을 Random 오차로 볼 수 있다.

2. 원형 시험 경로로 측정 가능한 오차

원형 시험 경로를 이용하는 Ball Link Bar 응용 방법으로서는 일반적인 위치 오차 이외에도 서보 영향에 의한 오차도 계측할 수 있으며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

- Ball Link Bar 의 자체 설치 오차(Set-up Error)
- Closing 오차 (Closing Error)
- 백래쉬 오차 (Backlash Error)
- 위치 오차(Positional Error)
- 피치 운동 오차(Pitch Motion Error)
- 과도 오차(Transient Error)
- 높은 서보 게인에 의한 진동 (Vibration due to too high servo gain)
- 직교 오차(Squareness Error)
- 서보 불일치 오차(Servo Mis-match Error)
- 동적 백래쉬 오차(Dynamic Backlash Error)

이와 같은 오차들이 Ball Link Bar 측정값에 복합적으로 나타나는 데, 이의 효과적인 분석이 공작 기계의 정밀도 평가에 매우 중요하다.

III. 원형 시험 경로를 이용한 오차 분석

공작 기계의 정밀도 측정과 분석에서 널리 활용되는 Ball Link Bar 방법에서는 원형 시험경로가 이용된다. 원형 경로를 따라서 수행된 공작 기계 이송축의 정밀도 측정 시험 데이터는 각 종 오차가 합쳐진 형태로 나타나는 데, 각 종 오차 성분으로 분리를 위하여는 공작 기계의 오차와 그 오차로 인한 원형 시험 궤도의 왜곡에 대한 검토가 필요하다.

각 종 오차로 인하여 나타날 수 있는 전형적인 공작 기계 오차 형태에 대한 연구[6][7] 결과에다 그 오차의 발생 원인과 과정에 대하여 검토한 후 이를 공작 기계의 오차 진단 프로그램의 알고리즘에 반영하여 프로그램을 작성하였다.

1. 설치 오차

측정 장치의 설치 도중에 발생될 수 있으며, 그림 4와 같이 NC 프로그램으로 주어진 시험 경로의 중심과 실제 설치한 중심이 일치하지 않아서 나타난다. 이와 같은 편심(Eccentricity)은 실험 결과 얻은 데이터의 최소 자승법에 의한 최적 원호(Best Fitting Circle, Arc)의 중심을 찾는 알고리즘으로 찾을 수 있다.

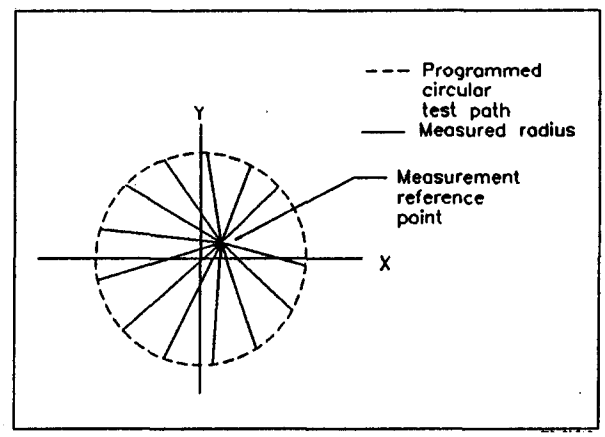


그림 4. 측정 중심과 NC프로그램 중심.
Fig. 4. Measurement center and programmed center ponits.

2. Closing 오차

측정 시험 결과에서 원형 시험 경로의 시작과 끝 점에서 그림 5와 같이 불일치 현상이 나타나는 데, 이에 대한 원인은 원형 시험 경로의 출발 시의 가속 특성, 시작과 종료 점에서 동일하지 않은 Machine guide way의 윤활 조건, 완전하지 않은 백래쉬 보상 등으로 볼 수 있다.
이와 같은 Closing 오차는 360도 원형 구간에서 선형적으로 증가하면서 측정 데이터에 포함된다고 가정하고, 측정 데이

터에서 추출 시키는 알고리즘을 이용 하였다.

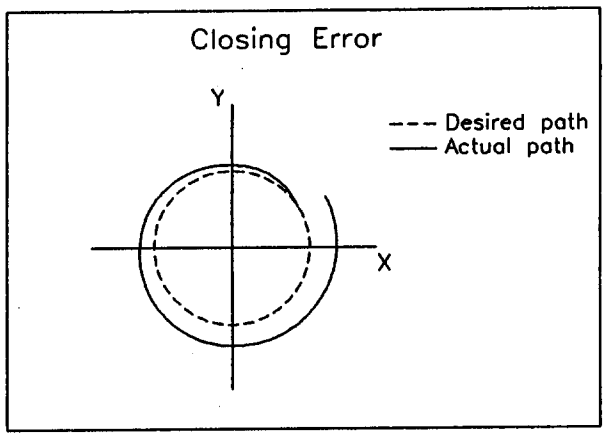


그림 5. Closing 오차 형태.
Fig. 5. Closing error pattern.

3. 백래쉬 오차

Lost Motion 오차, Hysteresis 오차, Reverse 오차, 백래쉬 오차 등의 다른 용어로 불려 지기도 하는 데, 시험 경로상에서 특정 축의 운동 방향이 변화할 때 나타난다. 이와 같은 오차는 공작 기계의 저속 및 고속의 모든 이송 속도의 운전에서 정밀도 측정 시험 결과에서 나타나는 데, 저속의 이송 속도의 시험 결과에서 용이하게 판독 가능하다.

Ball Link Bar 방법에서는 원형 측정 경로를 이용하게 되는 데, 그림 6과 같은 형태의 오차 형태가 나타나게 되나, 그 오차 크기가 상대적으로 매우 작아서 (150 mm 링크로 측정 시, 수 십um 정도), 오차를 확대했을 경우에는 측정 시 이동하는 방향에 따라서, 그림 7과 같은 모습으로 측정 된다.

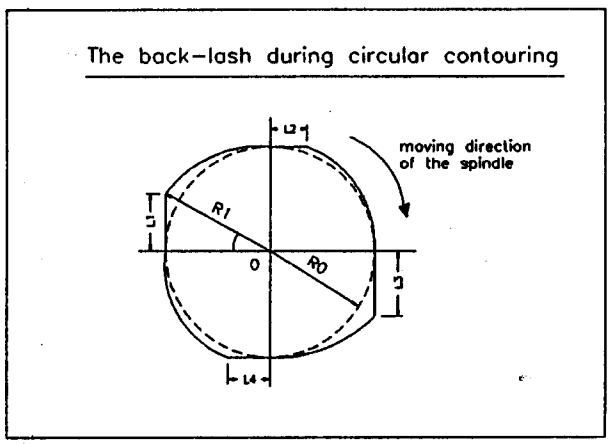


그림 6. 실제의 백래쉬 오차 플롯.
Fig. 6. Actual moving path.

그림 7에서 각 사분면에서 백래쉬 오차가 직선적으로 증가하는 형태로 나타나므로, 이를 프로그램 알고리즘에 구성하여, 오차 해석을 실시하였다.

4. 위치 오차

각 축 방향으로 위치 오차가 존재할 경우에는 주어진 원형 측정 경로가 그림 8과 같은 타원 형태로 왜곡되어, 측정 결과로 나타난다. Least squares ellipse 방법을 사용하여, 이와 같은 타원을 찾는 알고리즘을 이용한 프로그램을 개발하여, 위치 오차를 찾아 내었다.

5. Stick-slip 오차

Stick-slip 현상은 공작 기계가 매우 저속으로 이송될 때 발생될 수 있는 데, 공작 기계의 크기와 구조, 그리고 윤활 방식에 따라서 다르나, 머신 베드가 미끄럼 윤활 방식이고, 그 무게가 무거울 때 발생되기 쉽다. 머신 테이블이 운동을 시작하자면, 움직이는 반대 방향으로 존재하는 정지 마찰력을 극복해야, 움직임이 가능하다. 일단 이와 같은 정지 마찰력을 극복하고, 움직임을 시작하였다 하여도, 추가적인 힘이 더해져야, 그 운동 상태를 지속할 수 있다. 만일 이와 같은 추가적인 힘이 충분하지 않다면, 다시 정지 마찰력을 극복해야 된다. 이러한 현상이 반복적으로 발생되었을 때 Stick-slip현상이 나타난다. 이 Stick-slip 오차는 원형 측정 경로에서는 그림 9와 같은 형태로 나타나는 데, Least squares radius에서 deviation이 매우 작은 형태로 나타난다. 이러한 오차 형태를 찾아 내는 진단 프로그램을 작성하여, Stick-slip 오차를 찾아 내었다.

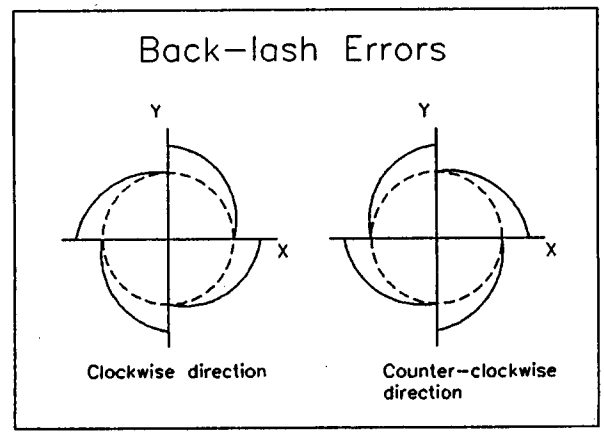


그림 7. 확대했을 경우의 백래쉬 오차 형태.
Fig. 7. Plotting of backlash errors with some magnifications.

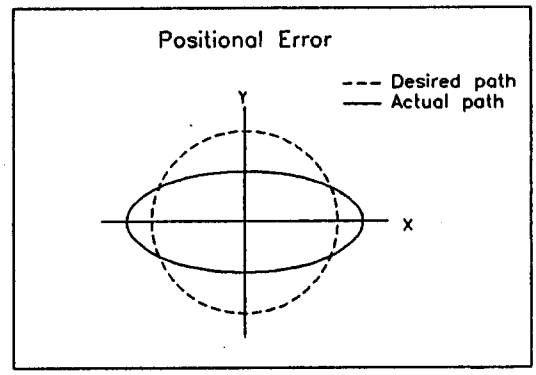


그림 8. 위치 오차가 존재할 경우의 측정 결과.
Fig. 8. The pattern of positional error in the X-direction.

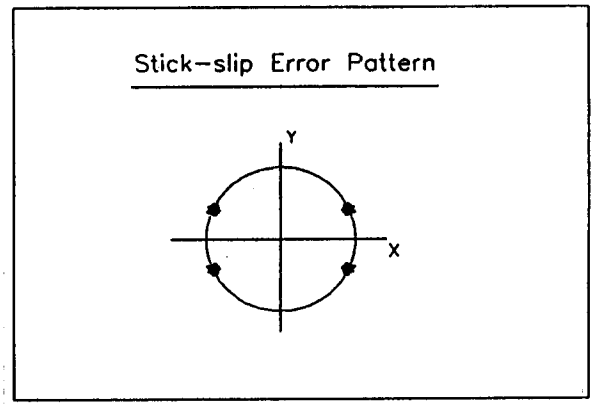


그림 9. Stick-slip 오차.
Fig. 9. Stick-slip errors.

6. 고속 운전에서 과도 운동 오차

원형 시험 경로의 시작 위치에서 전기적인 피크 형태로 관측되는 오차의 형태를, 고속 이송 조건의 공작 기계 운전에서 찾아 볼 수 있다. 정지 상태에서 고속 이송 속도에 빨리 도달하자면 불가피하게 짧은 시간 이내에, 급격히 가속되어야 된다. 급격한 가속은 과도 오차를 크게 하고, 이런 오차의 모습이 그림 10의 초기의 피크 형태로 나타난다. 이와 같은 오차는 CNC 컨트롤러의 Parameter의 조정으로 줄일 수 있다.

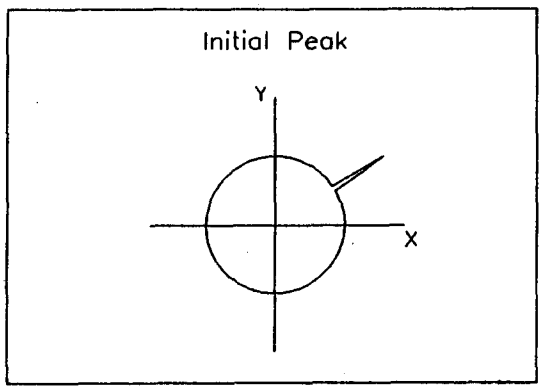


그림 10.초기 피크 현상.
Fig. 10. Initial peak.

7. 과도한 서보 게인에 의한 진동

CNC 공작 기계의 컨트롤러의 서보 게인을 과다하게 높이 조정되어 있을 경우에, 그림 11과 같은 진동 현상이 관측된다. 샘플링된 데이터의Least squares circle에서의 편차 폭이 Stick-slip오차의 경우에 비해서 매우 큰 것이 특징이다.

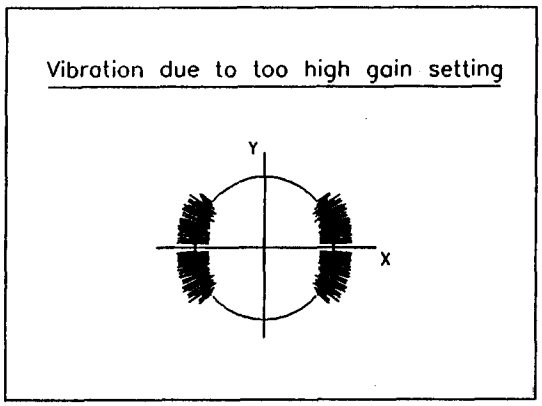


그림 11. 과다한 서보 게인에 의한 진동.
Fig. 11. Vibration due to too high servo gain setting values.

8. 서보 불일치 오차

공작 기계의 각 축은 그 구동 방법이나 구조, 움직여야 될 질량이 경우에 따라서 다르다. 이와 같은 이유로 인해 균일하게 가속되지 않아서, 원형 시험 경로의 경우에는 그림 12에서 나타낸 바와 같이 타원의 형태로 나타나는 경우가 있다. 고속의 이송 운전에서 자주 나타나게 되는 데, 직교 오차를 인지하는 방법을 응용하여 찾아 낼 수가 있다. 고속 이송 속도에서 뚜렷이 나타나므로, 직교 오차와 큰 혼동 없이 인지할 수 있다. 이와 같은 오차는 CNC 컨트롤러의 설치값 중에서 각 Position loop gain 값을 조정하여 줄일 수 있다.

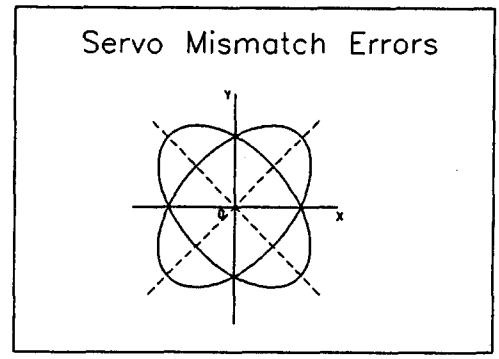


그림 12. 서보 불일치 오차.
Fig. 12. Servo mismatch errors.

9. 동적 백래쉬 오차

백래쉬 오차와 더불어 나타나는 데, 공작 기계의 운동이 각 축 방향으로 바뀌기 직전에 Peak와 같이 그림 13에서처럼 나타난다. 이 피크를 찾아내는 프로그램을 구성하여 찾아내었다. 최근에 개발된 일부의 CNC 컨트롤러에는 이와 같은 동적 백래쉬 오차를 보상할 수 있는 기능을 제공하고 있다.

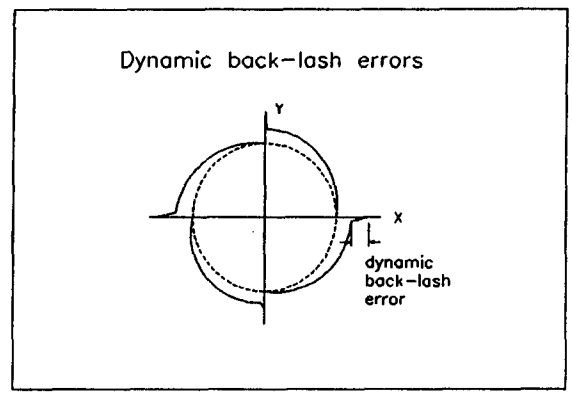


그림 13. 동적 백래쉬 오차.
Fig. 13. Dynamic backlash errors.

Ⅳ. 삼차원 공간에서 공작 기계 오차 측정

1. 직교 오차

공작 기계의 X, Y 축 간에 직교 오차가 존재하는 경우에는 그림 14과 같은 형태로 측정 데이터가 나타나는 데, 데이터로부터 Least squares ellipse를 찾아 내어 그 크기를 계산할 수 있다.

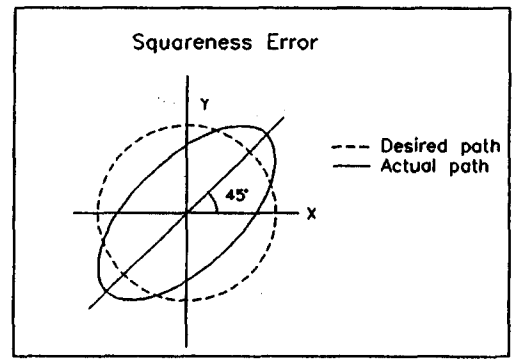


그림 14. 직교 오차.
Fig. 14. Squareness errors.

만일 YZ-축 사이나 XZ-축 사이에 직교 오차가 존재한다면

이의 측정을 위해서 짧은 Bar와 긴 Bar를 이용하여 이를 응용하여 측정할 수 있다. 그림 15에서와 같이 Bar를 설치하고, 같은 크기의 지름을 갖는 원형 경로를 높이 h 만큼의 차이를 두고 시험 경로로 사용하여 실험을 수행하면 직교 오차를 측정할 수 있다. 이 때 짧은 Bar를 이용하여 시험을 수행하고 나서 Ball link bar를 기준구 사이에서 분리한 후, NC 프로그램에 의하여 긴 Bar를 이용하여 설치위치로 이동하므로 초기 치구의 설치에 의한 설치 오차는 똑 같이 포함되므로 이를 시험 결과에서 상쇄시키면 된다.

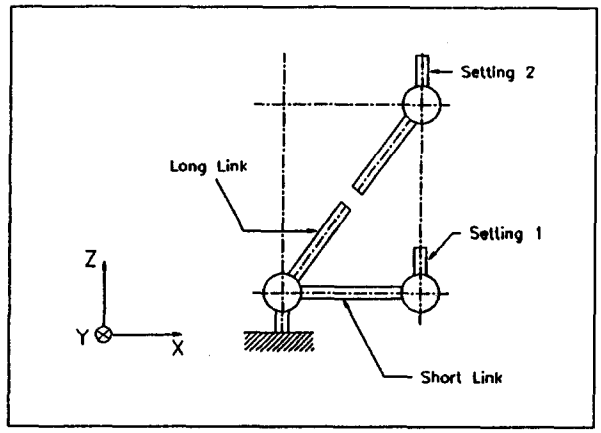


그림 15. 직교 오차 측정을 위한 실험 방법.
Fig. 15. Squareness error measurement method by using long and short links.

그림 16에서와 같이 XZ 축 사이에만 직교 오차가 존재한다면 긴 링크를 이용하여 측정된 데이터는 경로의 왼쪽 끝과 오른쪽 끝에서 dh 만큼의 높이 차를 야기시킨다. 이 높이차는 Least square centre의 위치 이동을 ex 만큼 가져오게 된다. 이 ex 값을 이용하여 직교 오차를 계산할 수 있다.

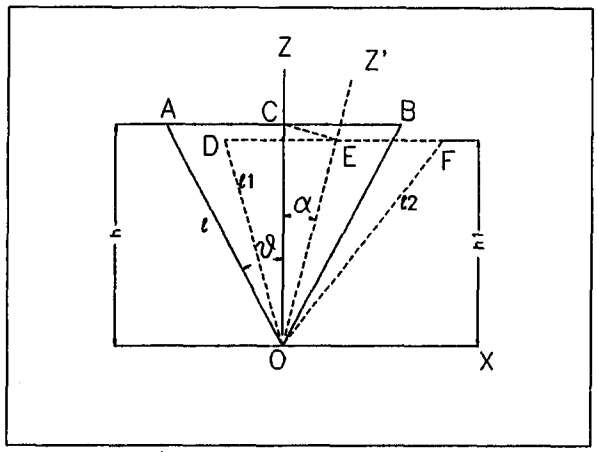


그림 16. 직교 오차에 의한 편심량.
Fig. 16. The squareness errors between the X- and Z-axis.

그림 16에서 다음과 같이 정의하면,

$$\overline{OA}=\overline{OB}=l \tag{4.1}$$

$$\angle AOC=\angle BOC=\theta \tag{4.2}$$

$$\angle AOD=\angle COE=\angle BOF=\alpha \tag{4.3}$$

$$\overline{OD}=l1 \tag{4.4}$$

$$\overline{OF}=l2 \tag{4.5}$$

이다. 그러면 (4.1)부터 (4.5)의 관계에서

$$h=\cos\theta \tag{4.6}$$

$$l1=l\cos(\theta-\alpha)=h1 \tag{4.7}$$

$$l2=l\cos(\theta+\alpha)=h1 \tag{4.8}$$

이며, (4.6)으로부터

$$h1=h\cos\theta=l\cos\theta\cos\alpha \tag{4.9}$$

이다. 그리고 (4.7)과 (4.8)은

$$l1=\frac{h1}{\cos(\theta-\alpha)}=\frac{\cos\theta\cos\alpha}{\cos(\theta-\alpha)}\,l =\frac{l}{1+\tan\theta\tan\alpha} \tag{4.10}$$

$$l1=\frac{h1}{\cos(\theta+\alpha)}=\frac{\cos\theta\cos\alpha}{\cos(\theta+\alpha)}\,l =\frac{l}{1-\tan\theta\tan\alpha} \tag{4.11}$$

로 되며 (4.10)과 (4.11)에서, 각 α가 아주 작다고 가정하면

$$l2-l1=\frac{2\tan\theta\tan\alpha}{1-\tan^2\theta\tan^2\alpha}\,l \approx 2l\tan\theta\tan\alpha\approx 2l\alpha\tan\theta \tag{4.12}$$

($l2$- $l1$)로 표현되는 차이는 긴 링크와 짧은 링크를 사용하여 얻어진 원형 경로 데이터의 편심차이다.
(4.12)의 근거하여, X축과 Z축 사이의 직교 오차는 (직교 오차)= (실험에서 얻어진 편심차) / ($l\tan\theta$)로 표현될 수 있다.

예를 들어, 100 mm 와 250 mm의 두개의 링크를 사용하여 실험을 수행하였을 때, 1 um의 오차가 발생될 경우에는 약 1.9 arc second의 직교 오차가 존재한다.

2. 피치 운동 오차

피치 운동에 의한 편심의 양도 중심의 이동에 영향을 미칠 수 있다. 피치 운동 오차가 존재하면, 높이 h1에서 원형 경로의 왜곡은 짧은 Bar를 이용하여 측정했을 때, 공작 기계의 가이드 웨이 형상에 따라서 왜곡되는 형태가 다르다 (그림 17 참조).

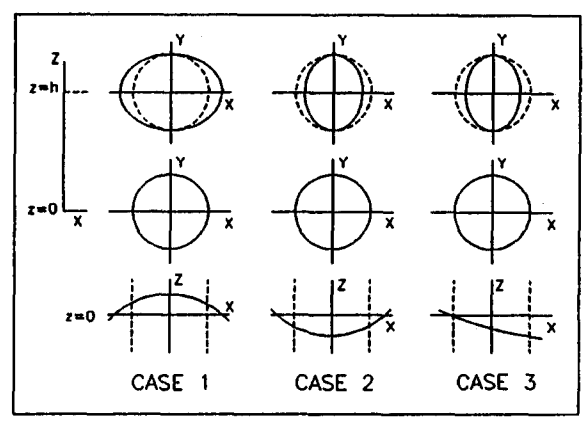


그림 17. 피치 운동 오차에 따른 시험 경로의 왜곡.
Fig. 17. Actual test path due to the pitch motion errors.

가령 그림 17의 CASE 1과 2에서는 편심 이동이 없다.

그러나 CASE 3에서는 편심의 이동량이 존재하나 시험 경로의 왼쪽 끝과 오른쪽 끝에서의 곡선 기울기 차이에 의한 양이 편심 이동에 반영된다.
그러나 실제 편심 이동에 영향을 미치는 양은, 긴 Bar가 비스듬히 설치되어 있는 경우에는, 이에 대한 코사인을 고려하면 매우 작은 양이 된다. 피치 운동 오차에 의한 편심량의 변화는 긴 Bar를 이용한 실험에 반영되지 않는다고 가정하고 직교 오차를 분석한다.

V. 새로운 형상의 Link Bar의 개발

대부분의 상업화된 Ball Link Bar 방법에서는 Linear Variable Differential Transformer (LVDT) 형태의 센서가 카본 파이버(Carbon Fibre) 봉으로 둘러싸여있다. 이로 인하여 링크의 무게가 무거워지고, 링크를 기준구 사이에 설치하기 위하여 영구 자석을 양단 소켓 부위에 집어 넣는 구조로 되어 있다. 링크의 차체 무게를 고려하여 자석의 크기를 설정하는 데, 이 자석의 크기가 Ball Link Bar의 성능에 중요한 영향을 끼친다.
이와 같은 구조에서는 자석과 카본 파이버의 사용으로 인하여 링크의 무게가 증가되고, 쇠부스러기등이 링크의 소켓부위에 부착이 되어 정밀도를 감소시킬 수 있다. 또 링크 제작과정의 복잡성으로 인해 공정이 길고 제작 원가가 상승하게된다. 다른 물질(Carbon Fibre)로 LVDT가 싸여 있어서 주위 온도 변화가 LVDT에 반영되지 않는 문제점을 가지고 있다.

이와 같은 불리한 점을 개선하기 위해서 본 논문에서는 LVDT를 다른 물질로 씌우지 않고 양단에 소켓만 부착하고 LVDT 자체의 스프링 힘을 이용하여 기준구 사이에 설치하도록 설계 제작하였다(그림 18 참조).

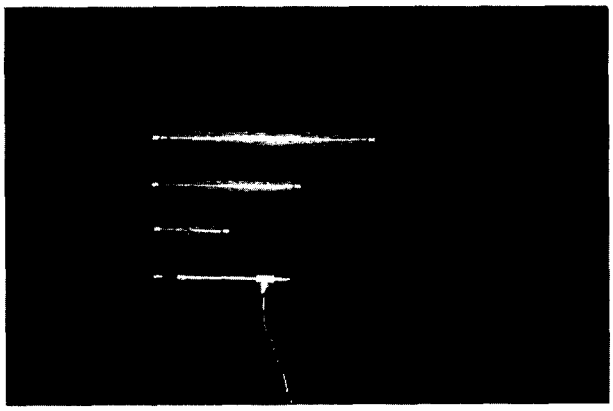


그림 18. 개발된 Link bar의 외관.
Fig. 18. The developed link bar.

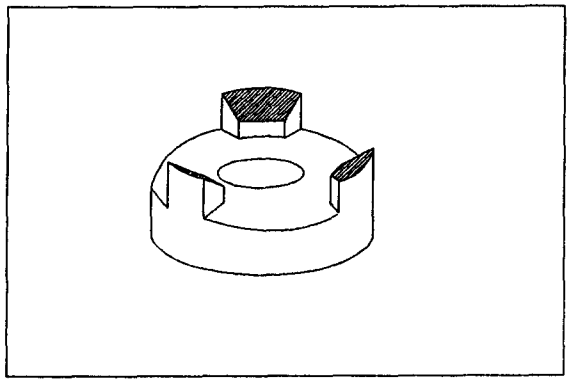


그림 19. 개발된 소켓의 구조.
Fig. 19. Structure of the developed socket.

측정에 필요한 길이의 연장을 위해 연결봉을 제작하여 50, 100, 150 mm의 길이로 제작하여 실험에 사용하였다.

이와 함께 볼과 링크 사이에 접촉되는 부분을 기하학적으로 가장 이상적인 삼점 접촉이 이루어지게 하였으며 그림 19에서 기준구와 소켓 사이에 삼점 접촉이 되게 하는 소켓의 구조를 보여주고 있다.

개발된 Ball link bar에서는 기존의 Ball bar 나 Double ball bar에 비해서 다음과 같은 유리한 점이 있다.

- Ball이 Bar에 부착되어 있지 않는 구조를 가지고 있어 무게가 현저히 가볍다.
- Bar를 기준점 사이에 부착시키는 데 필요한 힘을 영구자석의 힘을 이용하지 않고, LVDT의 스프링힘을 이용하므로 쇠부스러기등이 접촉부위에 부착이 되지 않아서 계측 정밀도가 향상이 된다.
- Ball 과 Link 사이에 이상적인 삼점 접촉 방식을 Bar의 양단에 채택하여 계측 정밀도를 향상시켰다.
- 자체 무게가 현저히 가벼워져 Ball link bar자중으로 인한 영향이 적어서, 자중에 의한 영향이 큰 XZ, YZ 평면에서 시험에서 정확한 시험을 실시할 수 있다.
- 구조가 간단하여 제작이 용이하여 제작 단가를 줄일 수 있다.

VI. 공작 기계 오차 측정 시험과 분석 프로그램의 적용

Ball Link Bar 측정 시스템을 이용(그림 20 참조)하여 측정 실험을 수행하였으며, 실험 결과는 데이터 파일에 저장되고, 이 데이터 파일을 가지고서 오차 해석을 시작한다.

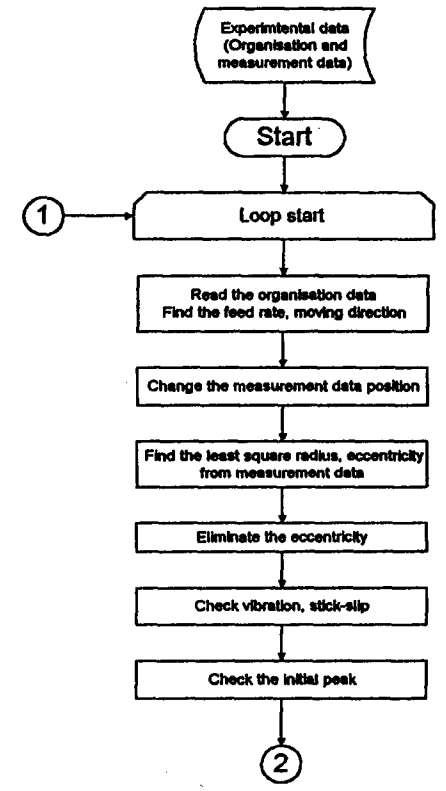
그림 20. 공작 기계의 오차 측정 시험.
Fig. 20. Error measurement on the machine tool.

적절한 해석을 위해서, 실험에 따르는 조건들, 링크 길이, 이송 속도, 기계의 온도, 기계의 열 팽창률, Setting Block의 열 팽창률, 움직이는 방향, 시작 위치각, 샘플링 수, 샘플링 각도가 필요하며, 대부분은 측정 당시에 기입하게 되어, 데이터 파일에 또한 기록이 된다.

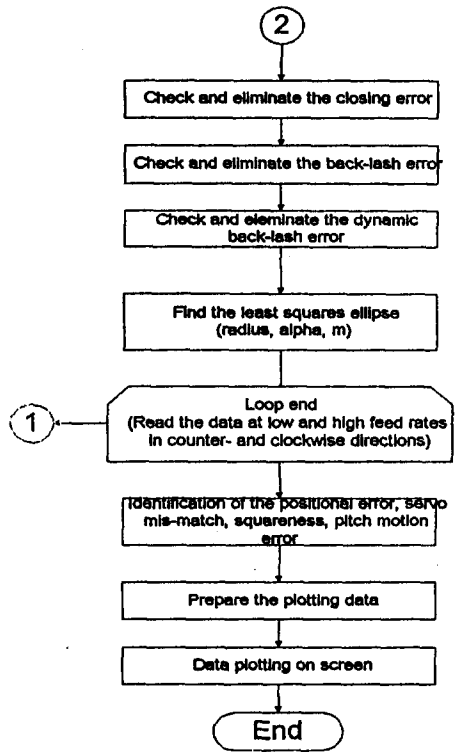
이 두 가지 파일로부터, 데이터를 읽고서, 이 앞에서 서술된 것과 같은 원리의 알고리즘을 사용하여 프로그램을 마이크로 컴퓨터에서 Microsoft C를 사용하여 작성하였다. 그림 21a 와 21b에서 그 플로우차트를 보여주고 있다.
그림 22에서와 같은 3 축 Bed Spindle type CNC 머시닝 센터(TAKISAWA MAC-3, 가공 가능 범위 X=510, Y=400, Z=360 mm, 이송 속도 1-5000 mm/min, 분해능 1 um)에서 측정을 수행하였다.

오차 해석에 필요한 모든 데이터를 빠짐없이 측정 하기 위해서, 다음과 같이 7단계로 구성되는 체계적인 시험 절차를 개발하여, 이에 따라서 시험을 수행하였다. 그림 23에서

그 절차를 보여 주고 있다.



(a)



(b)

그림 21. (a) 프로그램의 풀로우 차트 1, (b) 프로그램의 풀로우 차트 2.

Fig. 21. (a) The flow chart 1 for the developed program, (b) The flow chart 2 for the developed program.

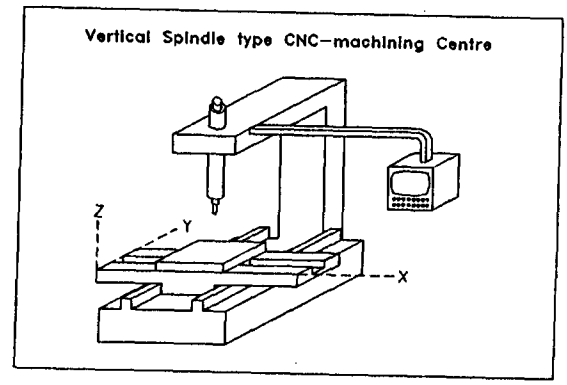


그림 22. TAKISAWA MAC-3 CNC 머시닝 센터.

Fig. 22. Machining center.

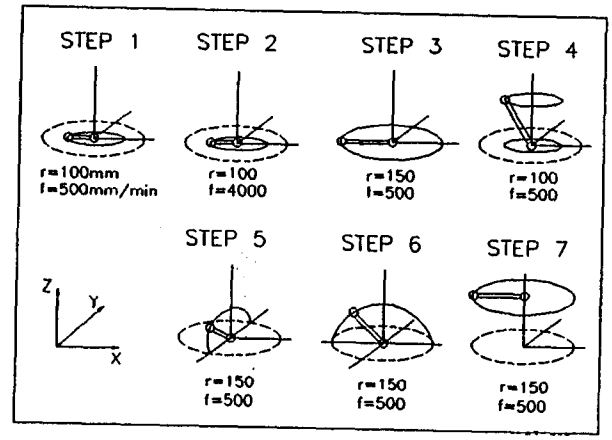


그림 23. 시험 절차.

Fig. 23. Test procedure.

STEP 1 : 360 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 150 mm, 이송 속도 : 500 mm/min
Closing 오차, 백래쉬 오차, 위치 오차, 직교 오차, Stick-slip 오차 측정 가능.

STEP 2 : 360 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 150 mm, 이송 속도 : 500 mm/min
STEP 1 의 데이터와 비교하여, 피치 운동 오차 측정 분석 가능

STEP 3 : 360 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 100 mm, 이송 속도 : 500 mm/min

STEP 4 : 360 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 250 mm, 이송 속도 : 500 mm/min
STEP 3, 4 의 데이터에서, YZ, XZ 축 간의 직교 오차를 측정 가능.

STEP 5 : 360 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 100 mm, 이송 속도 : 4000 mm/min이 STEP에서 Servo Mis-match 오차 측정 가능

STEP 6 : 180 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 150 mm, 이송 속도 : 500 mm/min

STEP 7 : 180 도 원형 시험 경로, 시계 및 반시계 방향, 링크 길이 : 150 mm, 이송 속도 : 500 mm/min
STEP 6 과 7에서 Z 방향의 백래쉬 오차 측정 가능.

이와 같은 측정 실험을 수행한 후, 개발된 프로그램으로 오차 해석을 실시하였으며, 분석 결과가 컴퓨터 화면에 풀롯되는 데, 그 Hardcopy를 그림 24에서 보여주고 있다.

분석 결과, 측정 시험에 사용된 공작 기계는 다음과 같은 오차 특성을 가지고 있었다.

- Closing 오차 : 2.6 um

- 백래쉬 오차 : X=7.9 um, Y=8 um, Z=13.0 um
- 위치 오차 : X=-10.6 um, Y=-4.8 um (200 mm의 시험 구간)
- 피치 운동 오차 : X=18.3, Y= 14.7 arc second
- 직교 오차 : -1.2 arc second(XY), -0.7(YZ), 5.2(XZ)
- 서보 게인 불일치 : 17.8 arc second (링크 길이 : 100 mm, 이송 속도 : 4000 mm/min, XY 평면)
- 동적 백래쉬 오차 : X=1.9 um, Y=7.5 um
- 초기 피크 현상 발생 (링크 길이=100 mm, 이송 속도 : 4000 mm/min)
- Stick-slip, 과도한 서보 게인에 의한 진동 없음

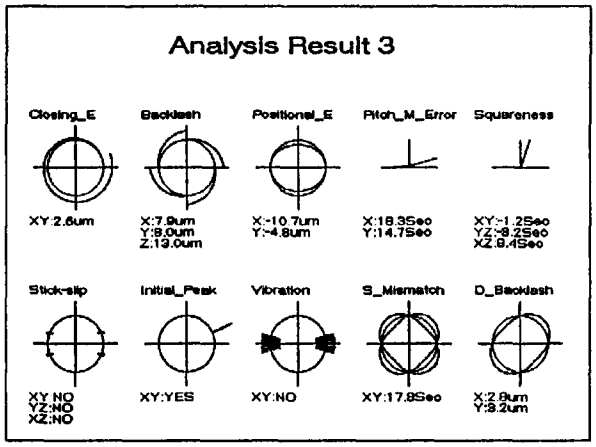


그림 24. 분석 결과의 hardcopy.
Fig. 24. Hardcopy of the analysis results.

Ⅶ. 결론

CNC 공작기계의 오차를 자동으로 분석할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. Ball Link Bar에서 각 종 측정 가능한 오차를 원인별로 분석하고, 전형적으로 나타나는 결과를 수식화 하였다. 이 수식을 바탕으로 공작기계의 오차 해석을 자동으로 수행하는 전산 프로그램으로 작성하였다.

이 해석 프로그램으로 분석 가능한 오차는 실험 장치의 설치 오차, Closing 오차, 백래쉬 오차, 동적 백래쉬 오차, 위치 오차, 피치 운동 오차, 실험 경로의 시작점에서 과도 오차, 너무 높은 서보 게인으로 인한 진동, Stick-slip, 직교 오차, Servo Mismatch 오차이다.

Link Bar의 성능향상을 위해 기하학적으로 이상적인 삼점 접촉의 원리를 이용한 Link Bar를 개발하여 사용하였다.

또한, 모든 분석 가능한 오차를 빠짐없이 측정하기 위하여, 실험 절차를 고안하여 사용하였다.

개발된 오차 분석 방법과 절차를 이용하여, 한 CNC 공작기계에 적용하여, 정밀도 측정과 분석을 수행하였으며, 공작기계의 오차를 체계적으로 분석하였다.

권 혁 동

1961년 8월 15일생. 1983년 서울대 공대 기계설계학과 졸업. 1985년 동 대학원 기계설계학과 졸업(석사). 1996년 영국 맨체스터 대학교(UMIST) 졸업(박사). 1986년 ~ 1989년 공군사관학교 교수부 기계공학과 전임강사. 1989년 ~ 1993년 독일 Stuttgart 대학 공작기계자동화 연구소(ISW) 연구원. 1996년 ~ 현재 한국생산기술연구원 생산자동화센터 선임연구원. 주관심분야는 초정밀 계측, CNC 공작기계, 삼차원측정기, 유연생산시스템.

참고문헌

[1] G. Schlesinger, *Testing machine tools.* 7/e. The Machinery Publishing, London, 1966.

[2] British Standards Institution., *British Standard 4656 : Part 30,* Accuracy of machine tools and methods of test. 1992.

[3] J. B. Bryan, "A simple method for testing measuring machines and machine tools," *Precision Engineering.* vol. 4, no. 2. 1982.

[4] K. Knapp, "Test of the three-dimensional uncertainty of machine tools and measuring machines and its relation to the machine errors," *CIRP* vol. 32, no. 1 1983.

[5] M. Burdekin, W. Jywe, "Optimising the contouring accuracy of CNC machines using the CONTISURE system," *28th international MATADOR Conference,* Manchester, England, 1992.

[6] Y. Kakino, Y. Ihara and A. Shinohara, *Accuracy inspection of NC machine tools by double ball bar method,* Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1993.

[7] H. Kunzmann, F. Waeldele, "On testing co-ordinate measuring machines (CMM) with kinematics reference standards (KRS)," *CIRP* vol. 32 no. 1, 1983.