

〈논 문〉

회전체의 효과적인 3차원 위치오차 측정방법

이응석* · 위현곤* · 정주노**

(1996년 8월 20일 접수)

A Useful Technique for Measuring the 3-dimensional Positioning of a Rotating Object

E. S. Lee, H. G. Wi and J. N. Jung

Key Words : Spindle Accuracy(회전오차), Volumetric Positioning Error(3차원 오차), Capacitance Sensor(정전용량센서)

Abstract

A method for measuring the accuracy of rotating objects was studied. Rotating axis errors are significant; such as the spindle error of a manufacturing machine which results in the surface roughness of machined work pieces. Three capacitance type displacement sensors were used to measure the rotating master ball position. The sensors were mounted to the three orthogonal points on the spindle axis. The measurement data were analyzed and shown for rotating spindle accuracy, not only for average roundness error but also for spindle volumetric positional error during the revolutions. This method is simple and economical for industrial field use with regular inspection of rotating machines using portable equipment. Measuring and analyzing time using this method takes only a couple of hours. This method can also measure microscopic amplitude and 3-dmensional direction of vibrating objects.

1. 서 론

회전체의 회전오차는 기계의 수명을 단축시키고 또한 공진 등의 발생과 함께 심각한 사고를 유발하는 원인이 되기도 한다. 특히 공작기계의 스피들 회전축오차는 가공된 작업물의 표면거칠기 및 표면상태에 큰 영향을 주게 된다. 회전축의 오차는 회전축에 평행한 방향과 수직인 방향성분으로 작용하므로 결국 표면가공시 공구와 작업물간의 거리가 미소하게 변화하게 되어, 이는 가공후 표면상태를 나쁘게 만드는 요인이 된다. 따라서 공작물의 표면정밀도를 향상시키기 위하여 스피들 회전의 진동

특성 연구와 공구 끝의 회전축오차를 측정하는 연구가 일찍부터 행하여 왔다. Kakino 등⁽¹⁾에 의해 제안된 스피들 회전오차 측정을 위한 필수적인 장치 및 방법은 다음과 같다.

첫째, 편심된 캠 또는 로터리 엔코더를 사용하여 각도회전 기준점을 정하고, 각 회전에 대한 평균원의 설정.

둘째, 각도방향 오차를 측정하기 위한 수직방향(axial direction)으로의 2개의 센서와 반경방향(radial sensitive direction)으로의 흔들림 측정을 위한 1개의 센서 장착.

회전체의 흔들림오차 측정을 위해 정밀구(master ball) 또는 실린더(master bar)의 장착시 발생하는 편심오차(set-up error)를 제거하는 연구도 필요하다. 그러나 이상의 대부분 연구는 단순히

*회원, 포항산업과학연구원 자동화부문 기계설비팀

**포항공과대학교 대학원 기계공학과

전체적인 평균 회전에 대한 진원도 오차 측정에 국한되어 왔으며, 공작기계를 사용하는 현장에서도 간단한 실린더와 기계식 다이얼 게이지를 사용하여 스핀들의 최대 회전 흔들림 정도만을 측정하고 있다.^(2,3)

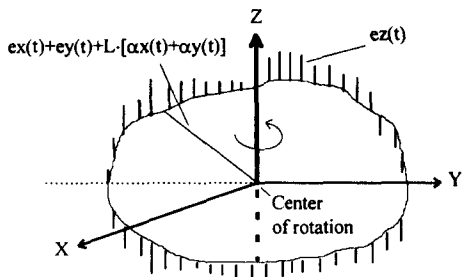
일반적으로 1회전중 회전축의 전체 오차는 Fig. 1과 같이 측정되고, X, Y, Z방향으로 3개의 축평형 이동(axial and radial translation error) 성분과, 3개의 각도오차(angular error)인 pitch, yaw 및 회전방향으로의 roll오차를 포함한다. 본 연구에서는 회전축의 3차원적인 위치운동을 분석하기 위한 목적으로 임의 기준 회전축에 대한 회전체의 X, Y, Z방향 운동성분을 측정하였다. 이 측정데이터는 스핀들과 같은 공구, 즉 회전체 끝단에서의 운동경로를 회전방향의 특정각도에서 회전속도에 따라 추적할 수 있게 한다. 이 방법은 회전체의 진동특성분석을 위한 진폭 및 방향 측정의 목적 이외에도 여러 가지 진동점의 미소변위를 3방향으로 측정하기 위한 방법으로도 활용될 것이다. 본 측정방법은 3개의 정전용량형(capacitance type) 센서와 1개의

master ball을 사용하는 간단한 장치로 구성되며, 현장에서 노트북 PC를 사용한 휴대용으로 제작하여 측정 및 분석을 수시간 안에 수행할 수 있게 하였다.

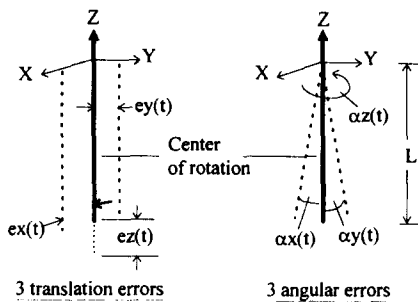
2. 측정장치 구성

2.1 전체 장치

Fig. 2는 공작기계에 설치된 스핀들 회전오차 전체 측정장치도이다. 스핀들의 공구위치에 1개의 정밀한 master ball이 볼스텝과 함께 설치되었으며, master ball의 재질은 텅스텐 카바이드이며, 0.05 μm 이하의 진원도를 가진다. Master ball stem에는 스핀들 회전속도 측정 및 1회전에서의 기준시간을 정하기 위한 근접센서(RPM counter)가 부착되어 있다. Fig. 3은 3축 방향의 센서 장착과 RPM counter를 스핀들에 고정시키는 장치이며, 서로 수직으로 설치되어 별도의 mounting plate에 고정되어 있다. Fig. 3에서 wobble plate는 스핀들에 고정될 master ball 스템에서 발생되는 초기 편심오



(a) Total volumetric positioning error for rotational of motion



(b) Definition of 6 error components in a rotating axis

Fig. 1 Total volumetric positioning error for rotational motion and error components

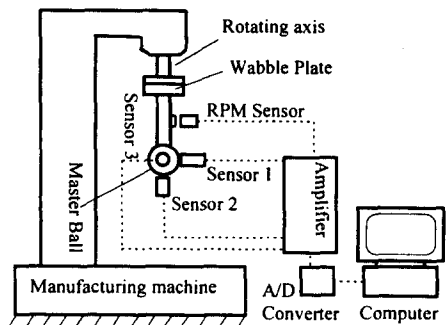


Fig. 2 Overview of the experimental set-up installed in a manufacturing machine

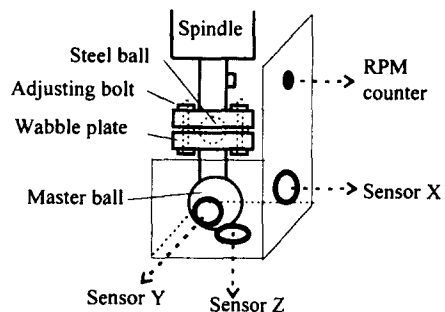


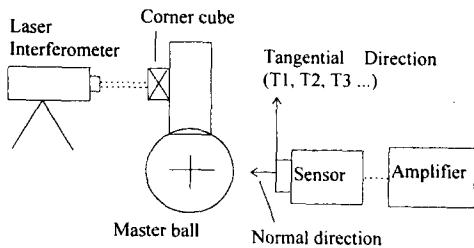
Fig. 3 Installation of a master ball with a wobble plate to the spindle and three sensor mountings with a RPM counter

차를 최소화시키기 위한 것이며, 부착된 세계의 스프링 볼트를 미세하게 조정하면서 센서의 지시치를 검사하여 master ball의 공전 반경을 줄인다. Master ball의 장착시 발생하는 편심오차는 작은 것이라도 결국 완전히 제거할 수는 없으므로 측정 데이터에서 이를 제거하는 기술이 필요하다. 본 연구에서 사용된 정전용량 변위센서의 분해능은 0.1 μm 이고, 측정범위는 1mm이며, 측정속도는 3.5 kHz까지 가능하다. 측정중 센서데이터와 회전 카운터 신호는 나중의 계산을 위해 amplifier와 A/D converter를 통해 PC에 저장된다. 데이터의 처리 과정에서 정전용량형 센서의 경우, 외란에 의한 영향이 크므로 측정데이터의 신뢰도를 보장하기 위한 적절한 hardware 또는 software filter가 필요하게 된다.

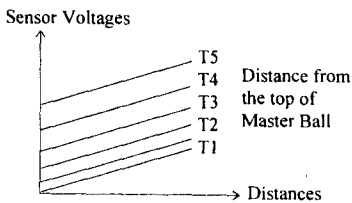
2.1 센서보정 (Calibration)

Fig. 4는 정밀이송 X,Y 테이블과 laser interferometer를 이용, master ball의 변위를 2방향으로 측정하여 센서를 보정하는 방법이다. Master ball의 위치는 3차원 임의 공간에 위치될 수 있기 때문에 3개의 거리센서 각각에 대하여 Fig. 4(b)와 같이 2방향, 즉 ball의 접선방향(tangential)과 수직방향(normal)에서의 교정이 필요하다. 2축 정밀

이송 테이블을 사용하여 master ball을 top에서 가장자리로 이동시키면서(tangential direction) 센서의 출력과 master ball까지의 거리(normal direction)를 측정하였다. Master ball의 실제거리 측정을 위해 사용된 laser interferometer는 0.003 μm 분해능을 가진다. Master ball의 3차원 공간상 위치는 이들 3개의 센서 값과 calibration data를 이용한 보간법(interpolation)으로 간접적인 방법으로 구하게 된다. Master ball 공간상 위치를 구하는 것은 반복계산(iteration)이 포함되므로 고속회전체 경우는 실시간으로 수행할 수가 없으며, 센서 측정데이터의 저장후 해석과정에서 구해지게 된다(off-line method). Master ball의 실제 공간상 위치



(a) Sensor calibration with laser interferometer



(b) Calibration data in two directions

Fig. 4 Sensor calibration with master ball in two directions using a laser interferometer and x, y table

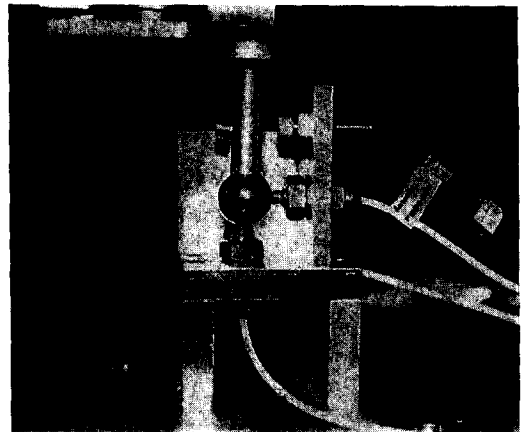


Fig. 5 Three sensor mountings with a master ball set up for calibration

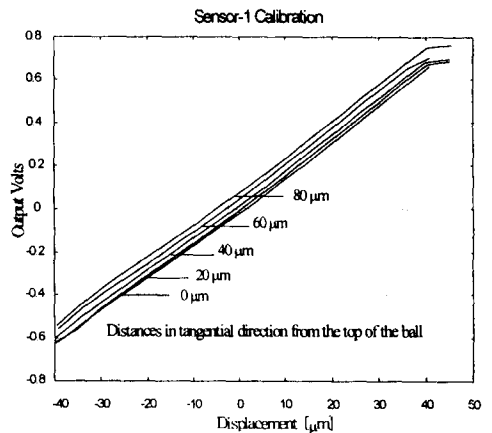


Fig. 6 Sensor calibration data measured in tangential and normal direction from the top of the master ball

계산방법은 다음 절에서 상세히 설명한다. Fig. 5는 실험실에서 센서 고정을 위해 알루미늄으로 제작된 센서마운팅과 master ball을 보여주며, 센서 보정을 위해 ball 스템상단이 2축 테이블에 장착되었다. Fig. 6은 정전용량 센서의 출력전압과 ball의 변위에 대한 calibration data의 예이다. 그림에서는 ball을 접선방향으로 일정한 간격을 이동시키면서 센서의 출력과 ball의 수직방향에 대한 laser interferometer의 거리값을 측정하는 것이며, 접선방향의 사이값은 보간법으로 계산한다.

3. 회전체의 공간위치 계산

3.1 2차원 Master Ball 중심좌표

Fig. 7은 2차원 평면상에서의 master ball 중심좌표를 센서데이터 1과 2를 사용하여 시행오차 방법으로 결정하는 과정을 보여준다. Fig. 7(a)와 같이 센서의 최초 장착위치 P, Q를 측정 후 master ball의 실제 2차원 이동거리 p, q를 구하여 ball 중심좌표 xc, yc를 계산한다. 시행오차 방법을 사용하여 Fig. 8에서 같이 ball의 실제거리 p, q를 구하는 과정은 다음과 같다.

(1) 기준 센서 1의 전압값 V_x 로부터 두방향 calibration 데이터에서 임의로 tangential 방향값

T_0 를 가정하여 센서의 거리 값을 p_0 로 한다.

(2) 센서 1의 장착시 x방향 거리 P를 제한값 $(p_0 - P)$ 에 해당하는 센서 2의 tangential 거리 T값에서의 전압 V_y 에 해당하는 거리 q_0 를 구한다.

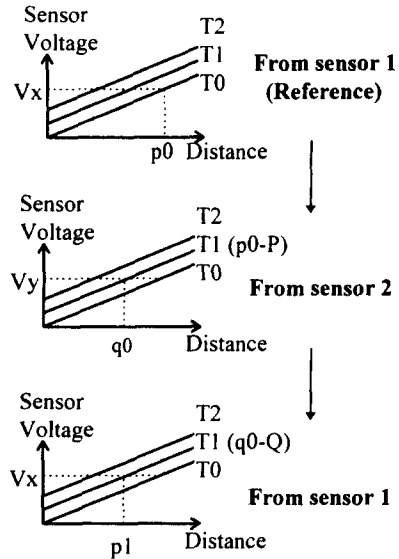
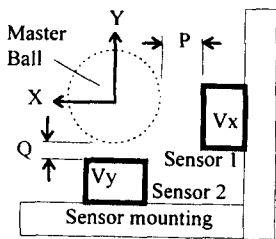
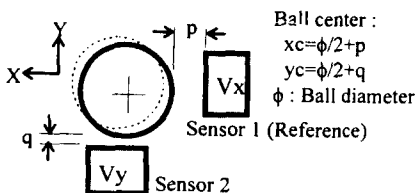


Fig. 8 The first iteration procedure for determining the 2-D coordinates of a master ball using the calibration data of sensors 1 and 2

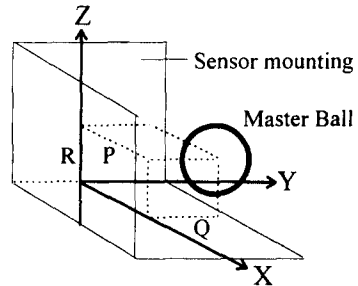


(a) Determination of sensor set-up positions, P and Q

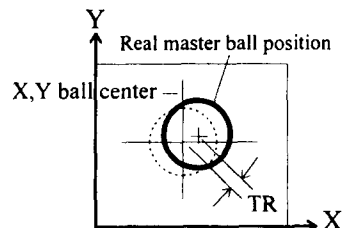


(b) Measurement ball positions (p and q) in real rotating condition

Fig. 7 2-dimensional master ball position for the voltage outputs of sensors 1 and 2 (V_x , V_y)



(a) Ideal set-up of the sensor mountings



(b) Eccentricity (TR) on XY plane due to the manufacturing error

Fig. 9 Sensor mounting position, P, Q and R with the error on the X, Y plane, TR

(3) 센서 2의 장착시 y방향 거리 Q를 제한값 (q0-Q)에 해당하는 센서 1의 tangential 거리 T값에서의 전압 Vx에 해당하는 거리 p1을 구한다.

(4) 같은 방법으로 계속하여 센서 1에 대한 값과 전단계 값 차이의 절대값 $|p_i - p_{i-1}|$ 와 센서 2에 대한 절대값 $|q_i - q_{i-1}|$ 가 동시에 0으로 수렴하면 시행오차를 중단하고, 최종단계의 값 p, q를 master ball의 X, Y 중심거리로 결정한다. 본 연구에서는 스피들의 최소 회전오차 범위를 고려하여 시행오차의 수렴값을 $0.01 \mu\text{m}$ 이내로 하였다.

3.2 공간상 Master Ball의 중심좌표

공간상의 master ball 중심좌표 결정방법도 센서 1에서부터 2, 3의 순서로 수행되고, 최종적으로 수렴되는 X, Y, Z 좌표값 p, q, r은 $|p_i - p_{i-1}|$, $|q_i - q_{i-1}|$ and $|r_i - r_{i-1}| \approx 0$ 에서 결정된다.

Fig. 9는 3개의 센서를 센서 마운팅에 장착하는 경우의 값 P, Q, R을 측정하여야 하며, 이것은 Fig. 9(a)와 같이 센서의 장착이 이상적으로 서로 수직으로 된 경우이다. 실제의 경우는 어느 한쪽면, 가령 XY 평면에서는, 임의로 조정하여 그때의 P, Q거리를 측정할 수 있지만 XY 평면의 2개 센서의 교점에서 정확히 Z 축으로 센서 3을 장착하기는 쉽지않다. 따라서, 본 연구에서는 Fig. 9(b)와 같이 XY 평면에서의 편차값 TR을 측정하여 초기

set-up 오차 TR은 결국 Fig. 10과 같이 센서 3의 calibration 도표에서 점선방향 값의 변화로 되므로 이 값을 보정하는 방법을 사용하였다.

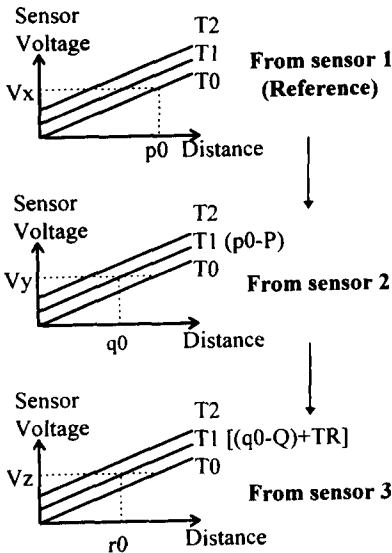
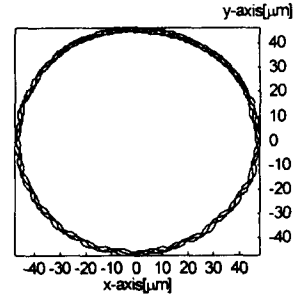
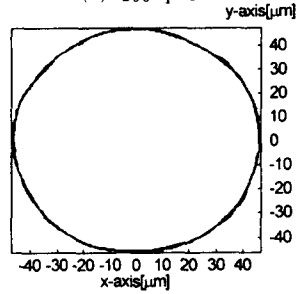


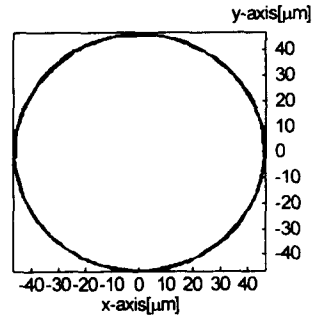
Fig. 10 1st iteration values in 3 dimensional case with correction of r-value with TR in the Z axis



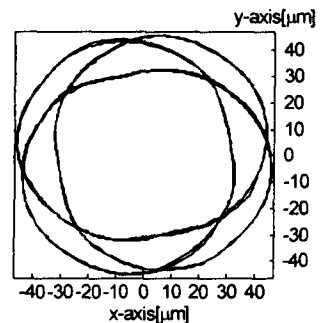
(a) 100 rpm



(b) 200 rpm



(c) 300 rpm



(d) 500 rpm

Fig. 11 2-D (on the normal plane for spindle axis) polar plot of measured spindle position for various RPM

4. 측정결과 표시

실험은 가공현장에서 사용되는 대형 수평형

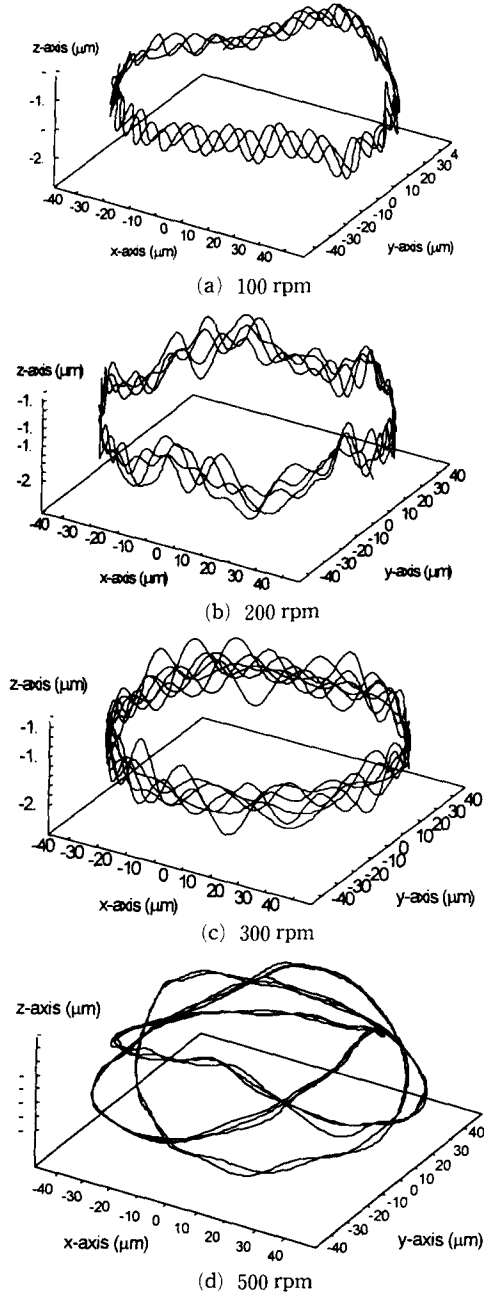


Fig. 12 3-D polar plot of measured spindle position for various RPM

CNC milling machine을 사용하였으며, 200~500 rpm의 주축이 회전되는 정밀공작기계이다. Fig. 11과 12는 본 연구에서 제안된 방법으로 측정된 master ball 중심의 회전운동 궤적을 2차원(스핀들 회전축에 수직인 면)과 3차원 공간상 master ball의 극좌표를 표시한 것이며, 임의의 평균 반경에 대한 회전오차의 편차를 여러 가지 스핀들 회전수에 대하여 나타내었다. 회전속도는 1회전에서는 변하지 않는다고 가정하여 측정되는 스핀들 변위값을 RPM counter를 위한 근접센서의 신호를 기준으로 1회전마다 등 간격으로 표시하였다. 측정데이터는 오차의 경향을 조사하기 위하여 같은 형태의 오차가 되는 여러 회전수에 대한 것을 연속하여 표시하였다. 측정후 데이터는 앞서 2장에서 언급한 바와 같이 master ball의 장착시 편심오차를 포함하고 있으므로 이를 제거하기 위하여 각 회전시 발생하는 1개 주파수에 대한 오차를 finite fourier transformation 방법으로 제거하였다. Fig. 11에서 보면, 스핀들의 좌우방향 흔들림오차는 동작기계의 작업범위인 300 rpm이하에서는 $2\mu\text{m}$ 이하의 오차를 보이며, 오히려 200~300 rpm에서는 오차가 100 rpm보다 적어짐을 보인다. 극한 속도인 500 rpm에서는 일정한 회전 간격으로 $10\mu\text{m}$ 정도의 큰 흔들림을 보인다. Fig. 12에서는 300 rpm이하에서 스핀들에 수직인 방향(Z축)으로 $0.4\mu\text{m}$ 이하의 비교적 적은 오차를 보이지만 극한 속도 500 rpm에서는 $5\mu\text{m}$ 이상의 큰 오차를 보인다.

5. 결론 및 추후 연구

3개의 정전용량 센서와 1개의 master ball을 사용하여 경제적이고, 간단한 장치를 구성하여 동작기계의 스핀들 회전체의 위치오차를 3차원적으로 측정 및 분석할 수 있음을 보였다. 본 방법으로는 회전축의 각도오차(pitch, yaw error)를 구분할 수는 없지만 동작기계와 같이 공구끝의 공간상 위치가 실제 가공에 미치는 영향을 분석하고자 하는 측정 목적 등으로는 대단히 유효한 방법이다. 본 방법은 노트북 PC와 함께 휴대용 장치를 구성하여 수시간 안에 현장에서 쉽게 이동 측정이 가능한 장치로도 구성될 수 있다. 본 방법은 또한 구조물에 master ball을 부착하여 진동체 미소진폭을 측정하는 장치로도 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) Kakino, Y., Yamamoto, Y. and Ishii, N., 1977, "New Measuring Method of Rotating Accuracy of Spindle," *Annals of the CIRP*, Vol. 25/1, pp. 241~244.
- (2) Bryan, J. B. and Vanherck, P., 1975, "Unification of Terminology Concerning the Error Motion of Axes of Rotation," *Annals of the CIRP*, Vol. 24/2, pp. 555~562.
- (3) "Unification Document Me: Axes of Rotation," 1976, *Annals of the CIRP*, Vol. 25/2, pp. 545~564.
- (4) Kim, K. and Kim, S. S., 1989, "Effect of Preload on Running Accuracy of Spindle," *Int. J. Mach. Tools Manufact*, Vol. 29/1, pp. 99~105.
- (5) Nakazawa, H. and MIKI, T. 1986, "Study of a High Speed Boring Bar," *Bulletin of JSME*, Vol. 29/257, pp. 3938~3944.