

병진운동 강체의 온라인 5자유도 운동오차 측정시스템 설계 및 해석

김진삼*, 정성중**

Synthesis of an On-Line 5 Degrees of Freedom Error Measurement System for Translational Motion Rigid Bodies

J.S.Kim* and S.C.Chung**

ABSTRACT

Although laser interferometer measurement system has advantages of measurement range and accuracy, it has some disadvantages when measurement of multi degrees of freedom of motion are required. Because the traditional error measurement methods for geometric errors (two straightness and three angular errors) of a slide of machine tools measures error components one at a time. It may also create an optical path difference and affect the measurement accuracy. In order to identify and compensate for geometric errors of a moving rigid body in real time processes, an on-line error measurement system for simultaneous detection of the five error components of a moving object is required. Using laser alignment technique and some optoelectronic components, an on-line measurement system with 5 degrees of freedom was developed for the geometric error detection in this study. Performance verification of the system has been performed on an error generating mechanism. Experimental results show the feasibility of this system for identifying geometric errors of a slide of machine tools.

Key Words : Error generating mechanism (오차발생기구), Error measurement (오차 측정), He-Ne laser (헬륨-네온 레이저), Quadrant photo diode(4분할 광전소자), 5 degrees of freedom error (5자유도 오차)

1. 서론

공작기계, 3차원 좌표측정기(CMM), 반도체 조립장비, xy 테이블 등의 병진운동 강체는 z축으로 이동시 Fig.1에 나타낸 것처럼 3개의 각도오차($\theta_x(z)$, $\theta_y(z)$, $\theta_z(z)$)와 3개의 선형오차($\delta_x(z)$, $\delta_y(z)$, $\delta_z(z)$) 등 모두 6

개의 오차 성분을 갖는다.⁽¹⁾ 종래의 오차 성분 측정법은 롤 오차인 $\theta_z(z)$ 를 제외한 5개의 오차에 대해 레이저 측정기를 이용하여 개별적으로 규명하고 있는데, 이 경우 오차측정에 많은 시간이 요구되며, 개별적인 오차측정에서 야기되는 광로차에 의해 정확한 오차규명이 불가능하게 된다. 특히 수치제어식 측정기기, 조립기기, 그리고,

* 한양대학교 대학원 기계설계학과
** 한양대학교 공과대학 기계공학과

공작기계의 실시간 오차측정을 통한 정밀도 향상을 위해서는 병진운동시 대상체에서 발생하는 서로 연관성 있는 오차 성분 전체를 단 한번의 측정으로 동시에 규명해낼 수 있는 측정법의 개발이 요구된다.⁽²⁾

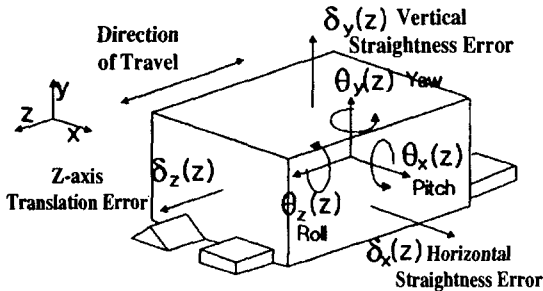


Fig. 1 6 DOF errors of a positioning element

Ni 등은 3차원 좌표측정기와 공작기계의 정도 향상을 위한 오차보정법에 관하여 연구하였다.⁽³⁻⁵⁾ 이들 기계에서는 작동중에 발생하는 열응력, 하중변화, 외란 등에 의해 오차가 발생되며, 이와 같이 시간에 따라서 발생하는 오차를 보정하기 위해서는 실시간(on-line)에서 기하학적 오차(geometric error)를 측정할 필요가 있다.⁽³⁻⁶⁾

본 연구에서는 병진운동 강체요소를 운동요소로 갖는 공작기계나 좌표측정기 등에서 리니어스케일이나 엔코더를 위치측정 요소로 사용하는 경우 나머지 기하학적 오차인 수평 및 수직 진직도, 요, 피치, 롤 오차를 실시간에서 동시에 측정할 수 있는 온라인 5자유도 오차측정 시스템에 관하여 연구하였다. 국내에서도 광전소자, 분광기, 레이저 발생기 등을 이용하여 5자유도 오차측정기를 개발한 바 있으나,⁽²⁾ 본 연구에서는 아베오프셋(Abbe offset)의 최소화와 오차측정기의 민감도 증대, 그리고 개발된 정밀 위치측정기⁽⁷⁾와의 조합을 통한 6자유도 오차측정기 개발을 위한 설계방안과 오차발생기구(error generating mechanism) 제작을 통한 성능평가법을 제안하였다. 레이저 발생기, 분광기(beam splitter : BS), 거울(mirror), Retroreflector(RR), 4분할 광전소자(quadrant photo diode : QPD)를 사용하고, 광정렬법을 이용한 광전자계측(optoelectronic measurement) 시스템을 설계 제작하였으며, 오차 발생기구에 개발된 5자유도 오차측정기를 장착하여 성능평가 실험을 수행하였다. 개발된 시스템의 측정분해능은 수평 및 수직 진직도 0.5 μm, 피치 오차 0.125 sec, 요 오차 0.125 sec, 롤 오차 0.2 sec

이하였으며, 오차발생기구의 오차를 감안한 최대 측정오차는 수평진직도 20 μm, 수직진직도 10 μm, 피치 오차 30 sec, 요 오차 25 sec, 롤 오차 34 sec임을 확인하였다.

2. 시스템 설계

5자유도 오차측정 시스템은 크게 광학 부분과 신호처리를 담당하는 전기 부분으로 나누어진다. Fig.2는 실제 실험장치의 전경을 보여주고 있으며, 각 부분의 구성 및 동작은 다음과 같다.

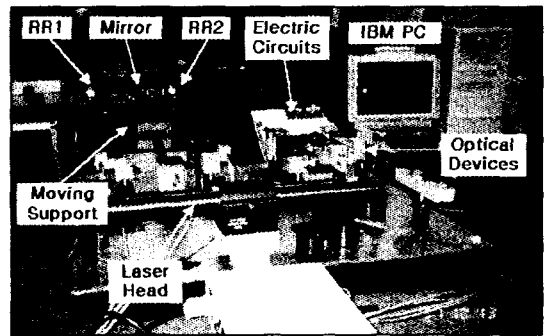


Fig. 2 Overall view of 5 DOF error measuring system

2.1 광학계

광학 부분은 Fig.3에 보는 바와 같이 레이저 발생기, 굴광기(beam bender ; BB), 분광기, 렌즈(lense ; L1, L2), Retroreflector, 거울, 4분할 광전소자, 이송대(moving support)등으로 구성된다.^(8,9) 렌즈 L1 과 L2를 통과한 빛은 지름이 확대되어, 굴광기와 분광기를 거쳐 각각 RR1, RR2, Mirror에 반사된 후 3개의 4분할 광전소자에 입사된다. 강체의 병진운동시 위치에 따라서 야기되는 기하학적 오차를 측정하기 위해 측정 시스템은 구동부와 정지부로 구분하여 설계하였다. 정지부는 레이저 헤드, 굴광기, 분광기, 렌즈, 4분할 광전소자 등으로, 구동부는 RR과 Mirror로 구성하였고, RR은 수평 및 수직 진직도와 롤 오차 측정에 사용되고, Mirror는 피치 오차, 요 오차 측정에 사용된다. 아베오차의 영향을 줄이기 위해서 광학계의 구성을 Mirror를 중심으로 RR이 대칭구조를 이루도록 하였고, 병진운동측은 Mirror와 아베오프셋이 적게 되도록 설계 제작하였다.⁽¹⁰⁾ Fig.4에 나타낸 RR과 Mirror의 특성 때문에 설계된 오차측정기는 이송대에서 실제 발생된 오차(Δ, θ)의 2배에 해당하는 오차값($2\Delta, 2\theta$)이 센서출력으로 나온다.

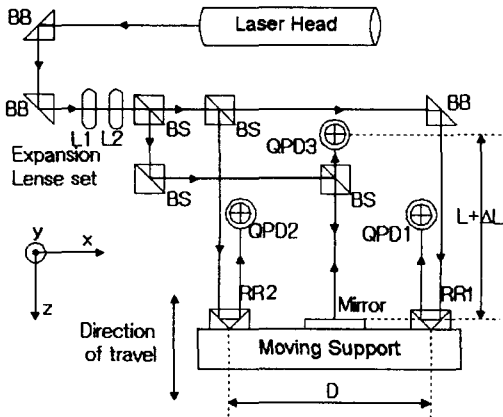


Fig. 3 Schematic diagram of optical system

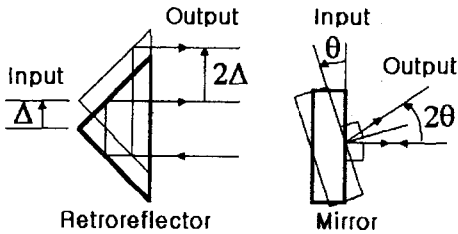


Fig. 4 Characteristics of retroreflector and mirror

2.2 신호처리 장치

Fig.5는 3개의 4분할 광전소자(QPD1-QPD3 ; Centronics QP50-0)에서 얻어진 전압 신호를 처리하기 위한 회로의 개략도이다. 연산회로(arithmetic circuit)는 4분할 광전소자에서 나오는 전압신호를 수광면 상의 현재 광점 (beam spot)의 수평방향, 수직방향의 위치를 나타내는 신호로 바꾸어준다. Fig.6은 광전소자에 결상되는 광점의 위치에 따른 x, y 좌표값을 생성하는 위치값 산출회로를 보인 것이다. 이 회로에서 Pre-Amp는 4분할 광전소자에 결상되는 광량에 따른 전류량을 전압신호로 바

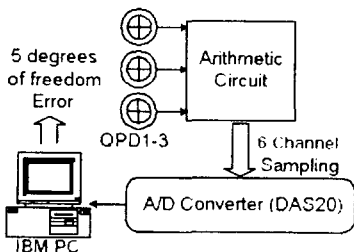


Fig. 5 Schematic diagram of signal conditioning system

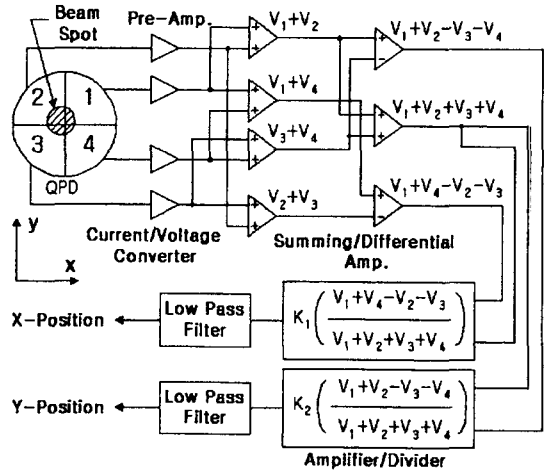


Fig. 6 Block diagram of arithmetic position sensing unit

꾸어 주며, 가산, 감산, 승산 및 제산 회로는 측정시 야기되는 주위광에 따른 잡음 영향의 배제와 적절한 증폭비를 얻는데 사용된다.⁽¹¹⁻¹²⁾ Fig.6의 위치값 산출회로에서 얻어진 6개의 위치신호는 A/D변환기(A/D converter ; Metrabyte DAS20)를 통해 샘플링되어 PC(IBM 486)에 입력되며, 5자유도 오차가 계산되어 PC화면에 출력된다.

3. 5자유도 오차의 해석

3.1 5자유도 오차의 모델링

Fig.3의 4분할 광전소자 QPD1, QPD2, QPD3에 결상되는 광의 수평방향과 수직방향의 위치를 각각 $x_p, y_p, x_s, y_s, x_3, y_3$ 라 하고 Fig. 4의 광학소자 특성을 고려하면, 5자유도 오차는 4분할 광전소자의 선형성이 만족되는 범위 내에서 RR 과 거울의 2배 변위 증폭효과를 고려함으로써 다음과 같이 모델링된다.

$$Horizontal\ Straightness = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{4} \quad (1)$$

$$Vertical\ Straightness = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{4} \quad (2)$$

$$Pitch = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta y_3}{L + \Delta L} \right) \quad (3)$$

$$Yaw = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta x_3}{L + \Delta L} \right) \quad (4)$$

$$Roll = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta y_1 - \Delta y_2}{2D} \right) \quad (5)$$

여기서 변위 $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$ 값은 이송대가 z축 방향으로 이송시 z축 기준직선 ($\Delta x = \Delta y = 0$)에 대한 광전소자의 출력좌표이고, D는 RR1과 RR2 사이의 거리, L은 거울과 QPD3 사이의 초기 설치거리이며 ΔL 은 z축 방향 이송에 따른 이송대의 변위이다.

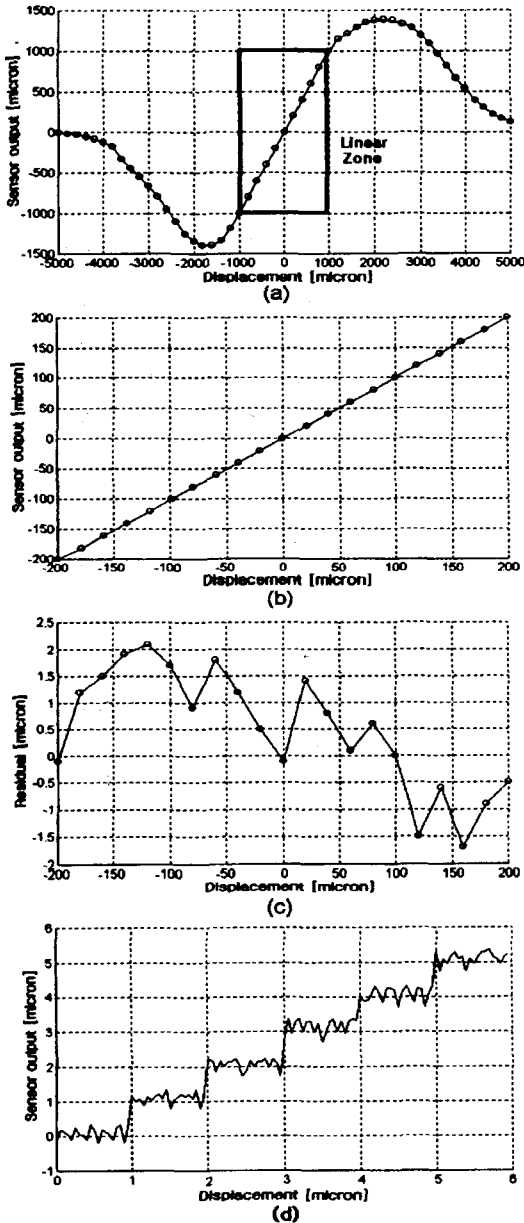


Fig. 7 Experimental results of sensor calibration

3.2 측정 신뢰도와 분해능

Fig. 7은 본 실험장치에 사용된 4분할 광전소자의 선형성과 분해능에 대한 신뢰도를 검증하기 위해 수직형 머시닝센터(화천기공(주) : VMC 430)의 한 축 방향에 수직으로 광전소자를 장착한 후 축에 수직방향으로 광전소자를 이송시키면서 광전소자에 결상된 레이저광의 위치에 따른 변위와의 관계를 실험한 결과를 보인 것이다.⁽⁸⁾ Fig. 7 (a)는 ± 5 mm 구간을 광의 위치가 $200 \mu\text{m}$ 씩 이동할 때의 센서 출력으로, 중심에서 ± 1 mm 내에서 선형성을 보여주고 있다. Fig. 7 (b)는 $\pm 200 \mu\text{m}$ 구간을 광의 위치가 $20 \mu\text{m}$ 씩 이동할 때의 센서 출력이고, Fig. 7 (c)는 실제 이동값과 측정값의 차이를 도시한 것으로 측정오차가 머시닝센터의 반복 위치결정 정도인 $\pm 2 \mu\text{m}$ 이내임을 알 수 있고, 동작기계의 최소 이송단위인 $1 \mu\text{m}$ 이송에 따른 광전소자의 측정결과인 Fig. 7(d)를 이용하면, 최소 $1 \mu\text{m}$ 이내의 분해능 범위에서 위치변화를 읽어낼 수 있음을 확인하였다. 이 결과를 식(1)-(5)에 적용하면, 개발된 5자유도 오차측정 시스템의 경우, 수직 및 수평 진직도 오차는 $0.5 \mu\text{m}$ 이하, Fig. 3에서 $L = 410$ mm 이상이고, $D = 250$ mm 이상인 경우 피치 및 요 오차는 0.125 sec 이하, 그리고, 롤 오차는 0.2 sec 이하의 분해능을 갖게 된다.

3.3 5자유도 오차의 측정

측정 시스템의 성능을 검증하기 위해 본 연구에서는 Fig. 8과 같은 오차발생기구를 사용하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 오차발생기구상의 리니어 가이드를 10 mm 씩 200 mm 구간을 이송시키면서 수평, 수직 진직도를 측정

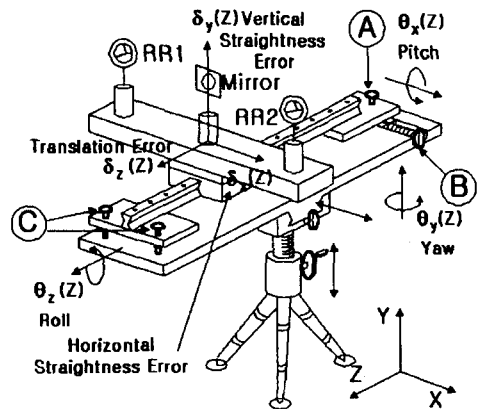


Fig. 8 Error generating mechanism

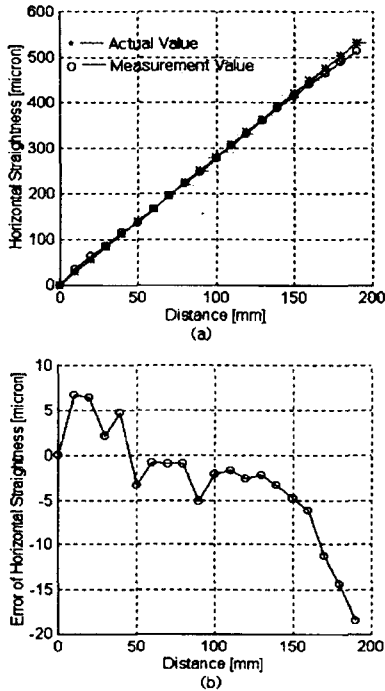


Fig. 9 Results of horizontal straightness measurement

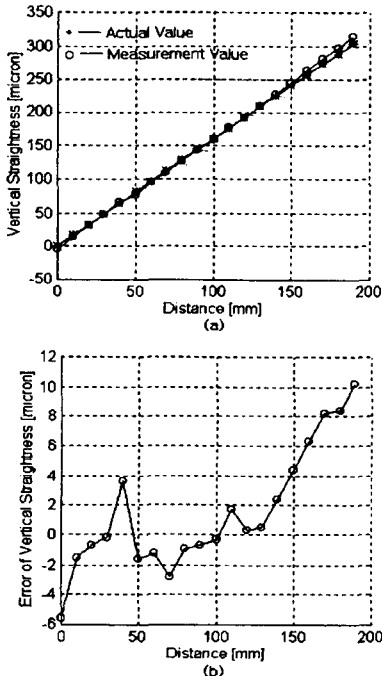


Fig. 10 Results of vertical straightness measurement

한 결과를 보인 것이다. 이 장치의 A, B나사를 이용하여 피치 또는 요 오차를 발생시킨 후 이송대를 10 mm씩 이송시킬 때마다 수평 진직도는 28 μm , 수직 진직도는 16 μm 만큼씩 증가하도록 하여 진직도 실험을 하였다. 수평, 수직 진직도 측정에서 측정 오차가 각각 20 μm , 10 μm 이내에 분포하지만 오차발생기구의 오차를 감안하면, 진직도 측정에서 선형성을 확인할 수 있고, 설계결과의 신뢰도를 확인할 수 있다.

오차발생기구상의 나사피치가 1.26 mm 로 동일한 A,B,C 나사를 일정각도만큼 회전시킴으로써 피치, 요, 롤 오차를 일정량만큼씩 증가시킬 수 있도록 하였다. A나사와 C나사간의 거리는 357 mm 로써 A나사를 14.8°씩 회전시키면서 이송대의 피치를 30 sec 만큼씩 증가하도록 하였고, B나사도 같은 방법으로 12.4°씩 회전시키면서 이송대의 요를 25 sec 만큼씩 증가하도록 하였다. Fig.11와 Fig.12는 이 때의 측정결과를 나타낸다. 두 개의 C나사간의 거리는 166.5 mm 로써 한 개의 C나사를 7.9°씩 회전시키면서 이송대의 롤을 34 sec 만큼씩 증가하도록 하였으며, 이 때의 측정결과를 Fig.13에 나타내었다. 측정값의 측정 오차 발생의 원인은 센서가 가지는 오차, 오차발생기구 자체 오차와 광전소자의 설치 오차

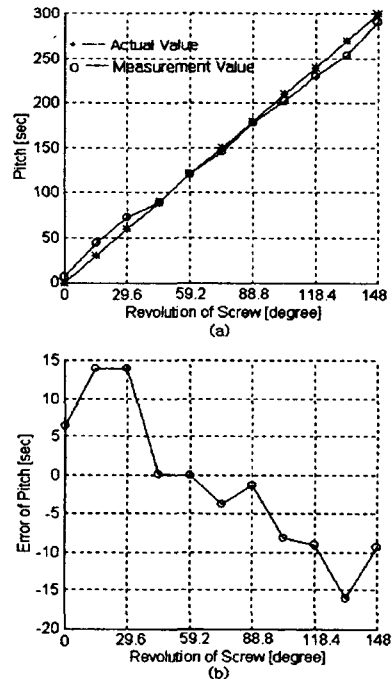


Fig. 11 Results of pitch measurement

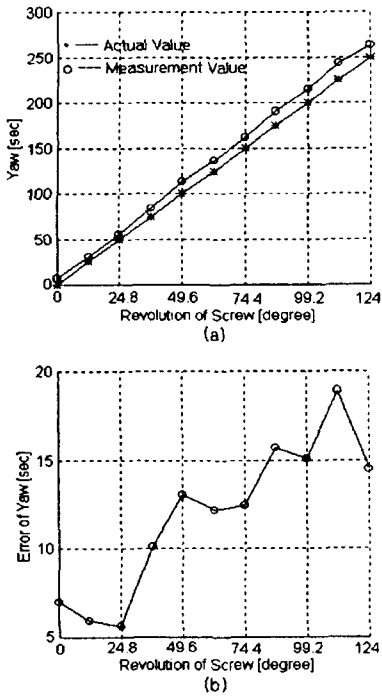


Fig. 12 Results of yaw measurement

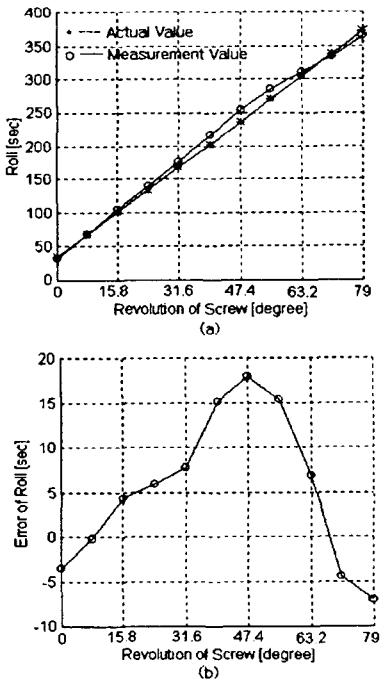


Fig. 13 Results of roll measurement

등에 기인한다. 오차발생기구상의 나사 조절과 기구상에서 발생하는 오차는 각각 15 sec, 20 sec, 18 sec로 비교적 크지만 각도 오차 측정에서 선형성과 신뢰도를 확인할 수 있으며, 5자유도 오차측정기 설계 결과의 타당성을 확인할 수 있다.

4. 결 론

(1) 레이저를 이용한 광정렬법과 4분할 광전소자를 사용하여 병진운동 강체의 기하학적 오차인 수평 진직도, 수직 진직도, 요, 피치, 롤 오차를 실시간에서 동시에 측정할 수 있는 5자유도 오차 측정 시스템을 설계 및 제작하였다.

(2) 광정렬법과 광전소자 요소의 기하학적인 관계를 이용하여 아베오차를 최소화할 수 있는 5자유도 오차의 측정법과 측정분해능을 모형화하였다.

(3) RR과 거울의 2배 변위 증폭효과와 5자유도 오차 측정 시스템의 설계결과를 이용함으로써 시스템의 최소 측정 분해능을 다음과 같이 얻을 수 있었다.

- ① 수평 진직도 : $0.5 \mu\text{m}$ 이하
- ② 수직 진직도 : $0.5 \mu\text{m}$ 이하
- ③ 피치 오차 : 0.125 sec 이하 (단, $L = 410 \text{ mm}$ 이상시)
- ④ 요 오차 : 0.125 sec 이하 (단, $L = 410 \text{ mm}$ 이상시)
- ⑤ 롤 오차 : 0.2 sec 이하 (단, $D = 250 \text{ mm}$ 이상시)

(4) 오차발생기구의 구동오차를 포함한 개발된 시스템의 최대 허용 오차는 다음과 같지만, 최대 측정범위내에서 측정 결과의 선형성과 설계 결과의 타당성을 검증하였다.

- ① 수평 진직도 최대 오차 : $20 \mu\text{m} / 500 \mu\text{m}$
- ② 수직 진직도 최대 오차 : $10 \mu\text{m} / 300 \mu\text{m}$
- ③ 피치 최대 오차 : $30 \text{ sec} / 300 \text{ sec}$
- ④ 요 최대 오차 : $25 \text{ sec} / 250 \text{ sec}$
- ⑤ 롤 최대 오차 : $34 \text{ sec} / 350 \text{ sec}$

향후, 개발된 5자유도 오차측정시스템의 절대오차 보정과 머시닝센터나 3차원 좌표측정기 등의 응용이 필요하며, 위치/길이 측정기와 통합된 병진운동 강체의 6자유도 오차측정기의 개발이 기대된다.

참 고 문 헌

1. H.Slocum, Precision Machine Design, Prentice Hall, 1993.
2. 박희재, 주종남, 황상욱, "레이저 수광소자를 이용한 선형 이송축의 기하학적 오차측정 시스템", 한국정밀공학회지, 제11권, 제5호, pp.180-188, 1994.
3. J.Ni and S.M.Wu, "An On-Line Measurement Technique for Machine Volumetric Error Compensation", Journal of Engineering for Industry, ASME, Vol.115, pp.85-92, 1993.
4. P.S.Huang and J.Ni, "On-Line Error Compensation of Coordinate Measurement Machines", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.35, No.5, pp. 725-738, 1995.
5. J. S. Chen, J.X.Yuan, J.Ni and S.M.Wu, "Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errorson a Machining Center", Journal of Engineering for Industry, ASME, Vol.115, pp.472-479, 1993.
6. P.A.Mckeown, "The Role of Precision Engineering in Manufacturing of the Future", Annals of the CIRP, Vol.36, No.2, pp.495-501, 1987.
7. 김진상, 김승철, 정성중, "공간섭법을 이용한 변위/길이 측정 시스템의 설계 및 해석", 한국정밀공학회지, 제14권, 제10호, pp.151-156, 1997.
8. E.Wagner, et al., Sensors (Optical Sensors) ; Optical Phase-Sensitive Detection, Vol.6, Chapter 13, VCH, 1992.
9. F.L. Pedrotti and L.S. Pedrotti, Introduction to Optics, Prentice Hall, 1993.
10. 나카자와 히로무, 알기 쉬운 정밀공학, 한국경제신문사, pp.315-320, 1993.
11. 정성중, 메카트로닉스, 반도출판사, pp.22-54, 1995.
12. J.G. Bollinger and N.A. Duffie, Computer Control of Machines and Processes, Addison-Wesley, pp.300-305, 1989.