

정밀 위치 결정 기구에서 원통형 구동부의 자세 보정

조남규*, 김도현**, 권기환**

Correction Method for Orientation of Cylindrical Moving Part in Micro-Positioning Device

Nahm Gyoo Cho*, Do Hyun Kim**, Ki Hwan Kwon**

ABSTRACT

In this paper, a new technique and theory are proposed which correct the orientation (inclination of a vertical axis) of a cylinder in vertical-micro positioning device. An algorithm for determining the orientation of the cylinder with a pair of displacement sensor units is derived and two types of the correction methods are described. To assess the performance and efficiency of the developed correction technique, the compensation errors originated from the correction algorithm and the machined characteristics of cylinder surface are evaluated from the geometrical considerations and the statistical techniques. Based upon the evaluation results, the maximum compensation error is estimated for the orientation of cylinder and the optimum correction technique is derived.

Key Words : Precise positioning (정밀위치결정), Correction technique (보정기술), Cylinder(원통)

1. 서론

정밀 자세 보정 및 제어 기술은 정밀 가공 기술, 정밀 위치 결정 기술과 함께 정밀 구동을 목적으로 하는 고정도 제품을 구현하기 위한 기본적인 기술이다. 부품이나 기구물이 정밀한 자세를 갖도록 하기 위해서는, 먼저 대상물의 자세를 정확하게 파악하여야 하며, 그로부터 자세를 효과적으로 수정 및 보정할 수 있도록 적합한 보정기구를 고안해야 한다. 정확한 자세의 파악을 위해서는 대상 부품의 형상이나 가공정도, 부품 상호간의 위치 관계 등을 고려되어야 한다.^{1,2,3)} 또한, 가능한 한 복잡한 자세 검출 기구를 피하고 필요 시에는 언제나 설치가 용이한 방식을 채택하도록

하는 것이 요구된다. 따라서, 다양한 대상물에 대한 최적의 방식을 결정하기 위해서는, 위와 같은 점들을 감안하여 체계적인 추론방식에 의한 연구가 필요하다. 원통형상의 수직 구동부를 갖는 정밀 구동 방식은 정밀 구동이 요구되는 구동 시스템에서 널리 채용되고 있다. 그러나, 고정도의 구동을 위한 자세 파악에는, 대상물인 원통의 가공정도와 각 구성 요소들의 상호 위치 관계⁴⁾, 자세 파악을 위한 자세 검출 센서의 분해능, 안내면과 구동축의 불일치⁵⁾ 등 많은 문제점들이 있으며, 이를 위한 체계적인 방법이나 검토가 아직 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서, 자세 파악 기법에 대한 엄밀한 검토와 함께, 그 결과를 바탕으로 한 효율적인 자세 보정 기구를 위한 설계 조건의

2001년 1월 16일 접수
* 한양대학교 기계공학과
** 한양대 대학원 정밀기계공학과

확립, 그리고 이들의 효과적인 운용을 위해 자세 파악 기법을 연계하는 체계적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구는 원통부품을 피구동체로 채용한 정밀 수직 구동 기구를 대상으로, 피구동체의 자세를 파악하기 위한 효율적인 측정 시스템과 자세 파악 기법을 고안하고, 측정 대상물의 자세 파악 알고리즘과 측정 대상물의 가공 형상 특성이 자세 파악에 미치는 영향을 통계적 기법에 의한 분석에 의해 자세 파악 및 보정의 한계를 명확히 하여, 고정도 수직 구동을 실현하기 위한 자세 보정을 효과적으로 수행할 수 있는 보정 기법의 개발에 목적을 두었다.

2. 수직 원통 부품의 자세검출 원리

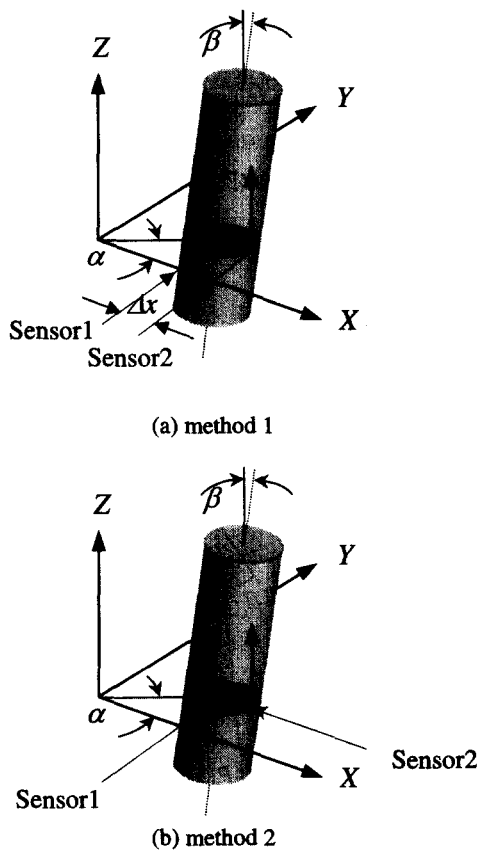


Fig. 1 Micro-positioning device

수직 원통 부품의 자세를 검출하기 위해서는 그 경사도를 직접 계측하거나, 여러 개의 센서를 사용하여 단면의 중심을 파악하고 이에 의해 경사를 산출하는 방법^{6,7,8)} 등 여러 가지가 고려될 수 있다. 본 연구에서는 보다 간편하고 산업 현장에서도 쉽게 적용이 가능한 방법으로 한 쌍의 센서를 사용하여 원통단면의 중심을 추정하는 기법에 대하여 검토하였다.

Fig.1은 수직원통 부품을 피구동체로 하는 수직 정밀 구동 장치의 자세보정 방법을 개략적으로 나타낸 그림이며, Fig.1(a)는 한 쌍의 센서를 나란하게 배열한 경우이며, Fig.1(b)는 서로 수직하게 배열된 센서 쌍을 이용하는 경우를 보인다. Fig. 1의 측정 좌표계에서 x 축 방향으로 Δx 의 간격을 두고 설치되는 한 쌍의 거리센서가 놓이는 평면을 $x-y$ 평면으로 정의하면, 원통부품의 자세는 $x-y$ 평면에 수직방향으로 정의되는 z 축에 대하여 임의의 방향으로 기울어진 상태로 표현될 수 있다. 따라서, 원통중심축의 자세는 $x-y$ 평면상에 드리워지는 원통중심축의 정사영과 x 축이 이루는 각을 α , z 축과 원통중심 축이 이루는 각을 β 로 하여 측정 좌표계에 표현된다. 센서열에 의해 얻어지는 원통부품표면의 정보는 α 방향으로 β 만큼 경사진 원통부품과 $x-y$ 평면에 의해 생성되는 타원상의 2점의 좌표이며, z 축 방향으로 원통을 구동하면서 데이터를 수집하는 방식을 채택하면 각각의 센서로부터 두개의 데이터 열이 구해진다. 이렇게 얻어진 데이터 열을 이용하여 원통의 자세를 파악하는 방법으로는 $x-y$ 평면과 원통에 의해 생성되는 타원단면의 표현식을 이용하는 방법이 적용될 수 있겠으나, z 축과 원통중심 축이 이루는 각도가 미소각도이므로, 생성된 원이 진원에 가까운 형상이 되고 측정 오차 및 원통부품의 가공오차 등에 의한 영향이 자세 파악 오차의 원인으로 작용하여 실제의 적용에는 이에 대한 엄밀한 고찰과 해결책이 필요하다. 따라서, 이러한 점들과 원통부품의 초기설정오차가 비교적 작은 점을 고려하여, 원통부품과 $x-y$ 평면에 의해 생성되는 단면을 원으로 가정하고 센서로부터 획득되어지는 데이터를 이용하여 원통의 자세를 파악하는 방식을 채택하여 검토하기로 한다.

2.1 방법 1(센서를 나란히 배열하는 경우)

수직 원통 단면의 자세는 원통부품의 중심축

의 자세로 파악이 가능하며, 따라서, 수직 구동하여 획득된 데이터 열로부터 각 구동위치에서의 원통의 단면중심을 추정하고, 이들로부터 원통중심축의 자세를 추정하는 방법에 의해 구동부의 자세를 파악할 수 있다.

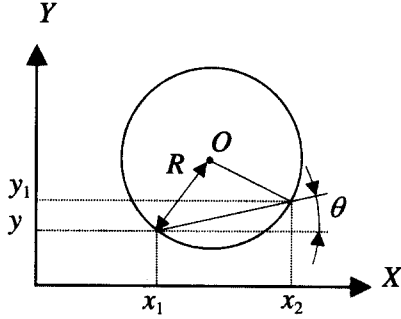


Fig. 2 Determination of the center of cross section

Fig.2는 임의의 구동 위치에서 원통부품과 x-y 평면에 의해 생성되는 단면을 원으로 가정하였을 때, x 축상에 x_{1i} 과 x_{2i} 에 위치한 센서 1 과 센서 2 로부터 구해진 측정값과 원통단면의 중심위치와의 관계를 보인다. 센서 1 과 센서 2 의 출력을 각각 y_{1i} 및 y_{2i} 라고 하면 이 때의 중심 좌표 O_i 는 식(1) 과 같다.

$$\left(\frac{x_2 + x_1}{2} - l \sin \theta, \frac{y_1 + y_2}{2} + l \cos \theta \right) \quad (1)$$

여기서, $l = \sqrt{\frac{R^2 - (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}{4}}$

$$\frac{x - x_o}{a} = \frac{y - y_o}{b} = \frac{z - z_o}{c} \quad (2)$$

식(1)의 결과로부터 추정되는 원통 중심축의 자세는 식(2)와 같이 표현되나, 각 측정위치에서 추정된 단면의 중심위치는 원통부품의 가공정도, 구동 정도, 그리고, 측정 환경 등의 오차요인에 의해 흩어짐을 갖는다. 따라서, 이들의 영향을 최소로 하기 위하여 최소 제곱법에 의한 추정을 도입하였다. 식(2)을 식(3)과 두개의 식으로 분리하고,

$$\begin{aligned} x &= Az + B \\ y &= Cz + D \end{aligned} \quad (3)$$

평가함수 S 는 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$S = \sum_{i=1}^N \{ (x_i - Az_i - B)^2 + (y_i - Cz_i - D)^2 \} \quad (4)$$

평가함수 S 를 최소로 하는 계수 A, B, C, D 는 식 (5)와 (6)과 같이 결정되고, 이를 통해 식(2)로 정의되었던 공간 직선의 방향 벡터를 알 수 있으므로 원통의 자세가 추정된다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum z_i^2 & \sum z_i \\ \sum z_i & \sum 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum x_i z_i \\ \sum x_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum z_i^2 & \sum z_i \\ \sum z_i & \sum 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i z_i \\ \sum y_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 방법 2(센서를 수직하게 배열하는 경우)

센서를 수직으로 설치하였을 경우에는 x_1 혹은 x_2 중 하나가 센서의 좌표 값이 되며 그 좌표 값에 따른 y 값이 출력 값이 되고, 나머지 하나의 y 값이 치구의 가공치수에 따른 또 다른 센서의 위치좌표 값이 되며 그에 따른 x 값이 출력 값으로써 결정된다.

일단 센서의 위치좌표 값과 그에 따른 출력 값이 결정되면 단면의 중심을 찾아서 그 중심좌표 값들을 이용하여 원통부품의 자세를 파악하는 알고리즘은 2.1 에서 상술한 바와 같다.

3. 측정계와 자세보정기구의 상대 자세 평가

본 연구에서 채택한 측정계는 필요시 언제나 보정을 수행할 수 있을 것이 요구된다. 그러나, 보정시 측정계와 자세 보정 기구의 상대 자세가 파악되지 못하면 정밀한 보정의 수행이 불가능하다.

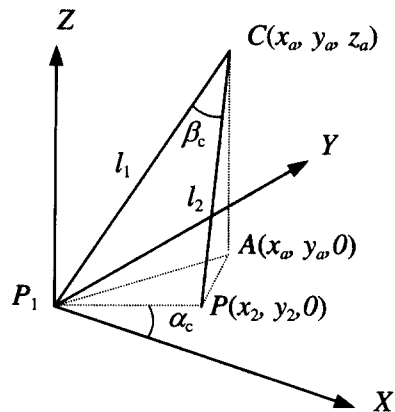


Fig. 3 Coordinates of the adjusting system

Fig.3 에서 길이 l_1 으로 표시된 직선은 보정전 원통의 중심축의 자세를 나타내며 l_2 는 보정후 원통의 중심축의 자세를 나타낸다. 점 C는 보정 기구가 위치한 점의 좌표를 나타내며, P_1, P_2 는 각각 직선 l_1, l_2 가 평면과 만나는 점을 나타낸다. 여기서, α_c 는 선분 $\overline{P_1P_2}$ 가 x 축과 이루는 각도로 정의하며, β_c 는 두 직선 사이의 각도로 정의하는데 이것이 보정량을 나타내게 된다. 상대적인 자세를 파악하는 것이므로 편의상 P_1 을 중심으로 하고 기준 좌표계로 부터 평행이동만을 한 좌표계를 설정하여 그 관계를 파악하기로 한다. 점 C의 x - y 평면에 대한 정사영인 $A(x_a, y_a, 0)$ 로 나타내어지는 점 A에서 x_a, y_a 는 다음과 같으며,

$$\begin{aligned} x_a &= l_1 \sin \beta_1 \cos \alpha_1 \\ y_a &= l_1 \sin \beta_1 \sin \alpha_1 \end{aligned} \quad (7)$$

점 P에서 x_2, y_2 는 식(8)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_2 &= l_1 \sin \beta_1 \cos \alpha_1 - l_2 \sin \beta_2 \cos \alpha_2 \\ y_2 &= l_1 \sin \beta_1 \sin \alpha_1 - l_2 \sin \beta_2 \sin \alpha_2 \end{aligned} \quad (8)$$

그런데, Fig.3의 관계로부터

$$\overline{AC} = l_1 \cos \beta_1 = l_2 \cos \beta_2 \quad (9)$$

이므로, 이를 식(8)에 대입하고 정리하면 α_c 는 식(10)과 같이 정리된다.

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta_1 \sin \alpha_1 - \tan \beta_2 \sin \alpha_2}{\tan \beta_1 \cos \alpha_1 - \tan \beta_2 \cos \alpha_2} \right) \quad (10)$$

한편, l_1, l_2 의 방향 벡터는 각각 식(11)과 같이 나타낼 수 있으므로,

$$\begin{aligned} l_1 &: (\sin \beta_1 \cos \alpha_1, \sin \beta_1 \sin \alpha_1, \cos \beta_1) \\ l_2 &: (\sin \beta_2 \cos \alpha_2, \sin \beta_2 \sin \alpha_2, \cos \beta_2) \end{aligned} \quad (11)$$

두 방향 벡터의 사이각으로 표현되는 β_c 는 식(12)과 같이 구해진다.

$$\beta_c = \cos^{-1} [\sin \beta_1 \sin \beta_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \cos \beta_1 \cos \beta_2] \quad (12)$$

따라서, 식(10)과 식(12)의 관계를 이용하면 획득된 데이터열을 이용하여 측정계와 자세보정기구의 상대 위치 관계의 파악이 가능하게 된다. 따라서, 기준측정 좌표계에 대한 상대위치가 파악된 자세보정기구를 이용하여 원통부품을 기준면에 대해

수직에 가깝도록 자세를 보정하고, 보정후에 기준면의 연직 방향에 대해 원통의 길이방향 중심축이 기울어진 정도를 자세보정결과의 평가 지표 즉, 원통 부품의 자세 보정 오차로 채택한다.

4. 원통 부품의 자세 보정 오차

4.1 센서를 나란히 배열하는 방법

4.1.1 자세 파악 알고리즘에 의한 평가 오차

센서 열에 놓인 평면과 원통부품에 의해 생기는 단면이 실제로는 타원단면이나, 미소 각도의 보정을 대상으로하는 본 연구의 경우는 타원단면을 원으로 가정하기 때문에 원통 부품의 자세 추정 정보에는 추정오차가 포함된다. 따라서, 원단면 가정에 의한 추정오차를 명확히 하고, 그 적용 가능성의 검토가 필요하다.

Fig. 4는 원통 부품의 자세 정보 α, β 를 원단면으로 가정한 추정법에 의한 자세 추정시 발생하는 오차의 시뮬레이션 결과를 보인다.

시뮬레이션 데이터는 실제의 원통조건에 따라 센서의 위치를 반경 16.75mm인 원통 중심에 대해 x 방향으로 각각 $\Delta x/2$ ($\Delta x=1cm$)만큼 거리를 두어 설정하였을 때, z 방향의 측정 길이 $l_z = 17.75mm$ 에 대한 좌표를 계산하여 구할 수 있으며, 임의의 원통의 자세에 대한 오차 추정은 $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ, 0^\circ \leq \beta \leq 3^\circ$ 의 조건에 대하여 수행되었다. $\Delta\alpha$ 와 $\Delta\beta$ 에 따른 보정오차는 α 값이 -1° 일 때 최대의 오차량을 보이며, 실제의 경우 임의의 α 방향으로 원통부품이 기울어질 수 있으므로 최대오차의 발생을 상정하여 $\alpha = -1^\circ$ 의 결과를 오차한계 추정에 채용하기로 한다.

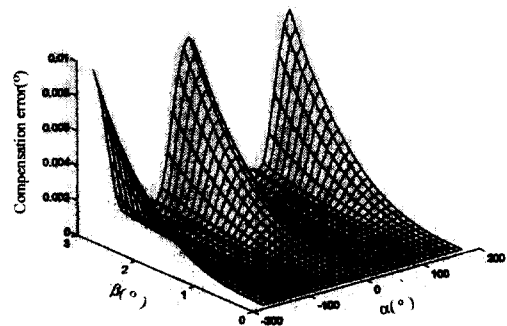


Fig. 4 Compensation error by method 1 (R=17.75mm, $\Delta x=R$)

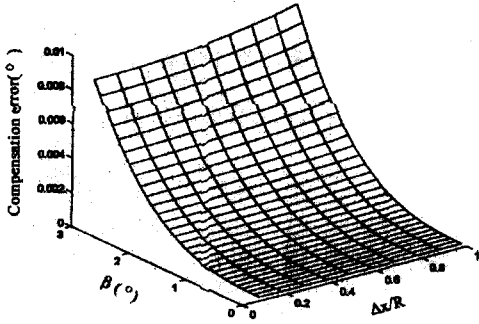


Fig. 5 Compensation error according to $\Delta x/R$ by method 1

한편, 원통의 자세 추정시 수집된 데이터는 z 방향의 구동거리 l_z 및 원통부품에 대한 센서간의 거리 Δx 에 의해 영향을 받는다. 센서로부터 얻어지는 데이터는 반경 R에 대해 Δx 와 l_z 의 크기에 대하여 상사성을 가지므로 오차추정을 위해 $\Delta x/R$ 와 l_z/R 에 대하여 시뮬레이션에 의한 보정오차를 검토하였다.

Fig.5는 경사각 β 와 $\Delta x/R \leq 1$ 의 변화에 따른 경사 보정 후 오차 추정 결과를 보이고 있다. 상기의 결과로부터 추정된 $\alpha=1^\circ$ 인 경우에 대하여 각각 $l_z/R=0.5, 1.0, 1.5$ 인 경우 $\Delta x/R$ 에 따른 보정 오차를 검토한 결과, 공통적으로 $\Delta x/R=1$ 일 때 최대 추정오차를 나타내었다. 따라서, 보정 신뢰도를 고려하여 추정 오차 평가에는 $\Delta x/R=1$ 의 경우를 채용하였다. 이상의 결과로부터 $\Delta x/R=1$ 로 했을 때의 실제 경사각 β 와 l_z/R 에 대한 자세 추정오차는 Fig.6과 같이 된다.

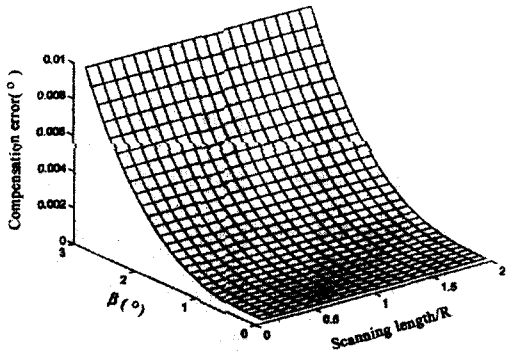


Fig. 6 Compensation error according to l_z/R by method 1

Fig.6의 결과로부터, l_z/R 이 증가함에 따라 보정오차는 미소하게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 방법 1에 의해 오차발생의 원인이 자세 파악 알고리즘의 가정으로부터 기인하는 경우 그 보정오차의 한계를 제시할 수 있다.

4.1.2 피구동체의 가공정도의 영향

원통의 가공물을 센싱면(sensing surface)의 면적이 협소한 한 쌍의 변위센서를 이용하여 측정할 경우, 센싱면의 면적이 수 μm^2 에서 수 mm^2 정도로 작기 때문에, 횡 분해능은 우수하나, 측정시 원통 면상에 중첩되어 있는 표면 거칠기와 웨이비니스 성분이 측정 데이터에 포함되어 원통의 자세 추정시에 오차로써 작용하게 된다. 비교적 센싱면의 면적이 큰 변위센서를 이용하여 측정할 경우에는 표면 조도의 영향을 평균화 효과(일종의 저역 통과 필터링)에 의해 감소시키나, 측정면 영역을 벗어나는 장주기의 웨이비니스 성분은 측정 데이터에 수반되어 측정오차로 작용하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 이러한 원통면의 가공정도가 원통자세 추정에 미치는 영향을 통계적 기법으로 평가하고 보정의 한계를 명확히 하고자 하였다.

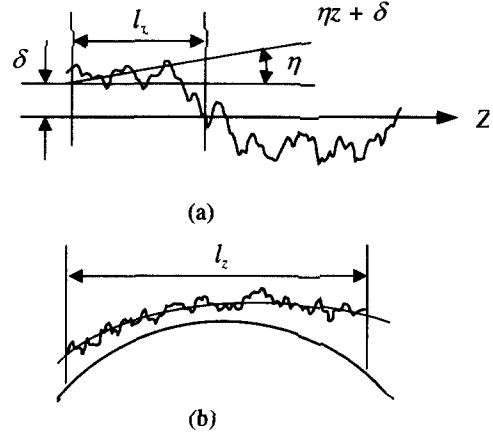


Fig. 7 Effects of roughness and waviness

Fig.7(a)에서와 같이 피구동체의 표면으로부터 측정 데이터의 길이 l_1 가 충분히 확보될 경우, 평가된 자세정보 η 및 δ 는 구동체의 정보를 충분히 반영하게 되지만 l_1 가 짧을수록 추정오차는 증대하게 된다. Fig.7(b)에서 보는 바와 같이 원통단면

의 경우, 이러한 성질이 중첩되어 작용하기 때문에 임의의 l_z 에 대해 표면의 가공정도가 η 및 δ 에 미치는 영향을 검토하여 원통에서 얻어지는 길이 l_z 의 데이터로부터 원통자세의 추정에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

표면 거칠기가 자세추정오차에 미치는 영향은 식(13)과 같이 된다.

$$\sigma_s = \frac{33\sigma(\frac{l_z}{\epsilon_0} + 5)^{-1.9}}{\epsilon_0} \quad (13)$$

$$\sigma_z = 19\sigma(\frac{l_z}{\epsilon_0} + 20)^{-0.87}$$

여기서, σ_s 및 σ_z 는 각각 표면의 자세경사 η 및 절대 위치오차 δ 의 표준편차를 의미하며, σ 는 프로파일의 표준편차, ϵ_0 는 프로파일의 최소독립 간격이다. ϵ_0 는 중심선 표면 거칠기 R_a 와 식(14)의 관계를 갖는다.⁹⁾

$$\epsilon_0 = 3R_a + 4 \quad (14)$$

일반적인 완성 가공면의 표면 거칠기가 $0.1\mu\text{m} \leq R_a \leq 2\mu\text{m}$ 인 점과 표면거칠기가 중대될수록 추정 오차가 중대됨을 고려하여, $R_a=2.0\mu\text{m}$ 일 때의 최소독립간격 $\epsilon_0=10\mu\text{m}$ 를 채용하였다. 한편, 일반적인 기계 가공면의 장주기 형상 성분은 주기가 λ , 진폭이 a 인 사인파로 가정할 수 있으며, 이러한 장주기 성분에 의해 발생하는 η 및 δ 의 최대추정오차 η_{wmax} 및 δ_{wmax} 는 식(15)와 같이 표현된다.

$$\eta_{wmax} = \frac{78a(\frac{l_z}{\lambda} + 1.5)^{-3.9}}{\lambda} \quad (15)$$

$$\delta_{wmax} = \frac{a}{l_z}$$

자세 추정 오차에는 표면 거칠기 성분과 웨이비니스의 장주기 형상 성분에 의한 영향이 중첩되어 작용되므로 이들의 영향을 분석하기 위하여 표면 거칠기 성분의 최대진폭 W_s , 웨이비니스 등의 형상오차성분의 최대진폭 W_w 로 두면, 전체 가공오차 성분의 최대진폭 W 에 대해 식(16)과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{W_w}{W} = \kappa, \quad \frac{W_s}{W} = 1 - \kappa, \quad \kappa \leq 1 \quad (16)$$

실제의 가공면들을 대상으로 검토된 결과를 참조하여 $\kappa=0.2$ 를 채용했다.⁹⁾ 또한, 식(17)의 기계 가공면의 거칠기 파라미터들의 관계로부터 a 가 R_a 의 함수로 결정되며 식(15)로부터 진폭 a 는 $1.875\mu\text{m}$ 가 된다.

$$R_a \cong 0.86\sigma \quad (17)$$

$$W_s \cong 36\sigma$$

위의 결과들에 의해, 센서로부터 측정되어지는 제한된 길이의 데이터를 이용하여 자세를 추정하는 경우, 웨이비니스성분과 표면거칠기성분들의 오차가 정규분포한다고 가정하면 99%의 신뢰도로서 최대추정오차 직선은 다음과 같이 표현된다.

$$e_{total} = (\eta_{wmax} + 3\sigma_s)z + (\delta_{wmax} + 3\sigma_z) \quad (18)$$

Fig.8은 장주기 성분의 파장값 λ 를 20mm로 하였을 때 보정오차를 보인다. Fig.8로부터 자세 파악 알고리즘 및 가공정도 오차를 고려한 경우의 보정오차를 최대로하는 α 값은 180° 부근임을 알 수 있다. 실제 측정 시스템에는 두개의 데이터 열이 얻어지므로 표면거칠기 및 장주기 성분이 두개의 데이터 열에 동시에 더해지는 경우, 어느 한쪽에만 두배로 더해지는 경우, 한쪽에는 더해지고 다른 한쪽에는 빼지는 경우의 세가지지를 고려할 수 있다. 세가지 경우에 대한 분석결과 세번 째 경우가 오차가 최대가 됨을 알 수 있었으며 그 때의 α 값은 180° 이다.

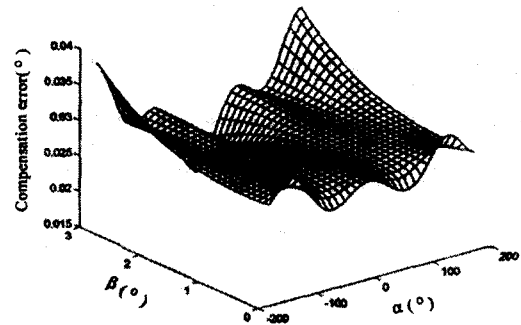


Fig. 8 Compensation error considering the effect of machined surface($\lambda=20\text{mm}$)

스캐닝 길이 $l_z(0 < l_z \leq 100\text{mm})$ 와 장주기 성분의 파장 $\lambda(0 < \lambda \leq 60\text{mm})$ 에 따른 보정오차를 검토하였다.

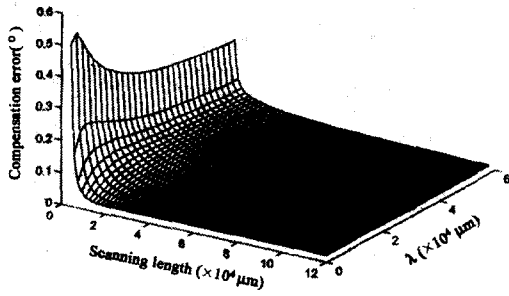


Fig. 9 Maximum compensation error due to machining error (at $\beta = 3^\circ$)

Fig.9는 $\beta = 3^\circ$ 일 때 λ 와 l_s 를 고려했을 경우에 대한 보정오차의 최대치를 보이고 있다. 스캐닝 길이가 매우 짧을 경우에는 보정오차가 크며 일정길이 이상의 스캐닝 길이가 확보되면서 점차로 보정 오차가 감소된다.

장주기 성분의 파장 λ 에 관계없이 보정오차의 최대치를 제안하기 위해 스캐닝 길이에 대한 보정오차의 최대값을 이은 곡선을 β 값에 따라 모두 구하고 이 중 최대값을 나타내는 곡선으로써 보정오차의 한계치를 제시한다.

Fig.10의 결과로부터, 센서를 평행하게 한 측정계에 대하여 타원 단면을 원으로 가정한 알고리즘에 따른 오차와 피측정물인 원통부품의 가공정도에 따른 오차를 모두 고려한 측정계에서 보정오차의 한계를 명확히 할 수 있다.

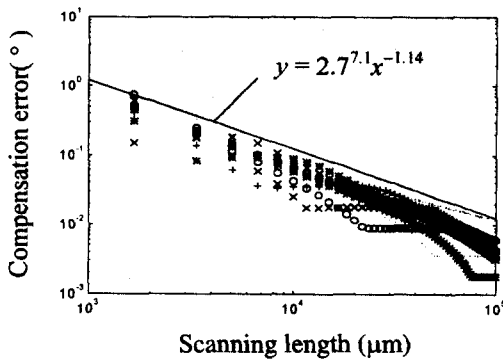


Fig. 10 Maximum compensation error

4.2 센서를 수직으로 배열하는 방법

4.2.1 자세 파악 알고리즘에 의한 평가 오차

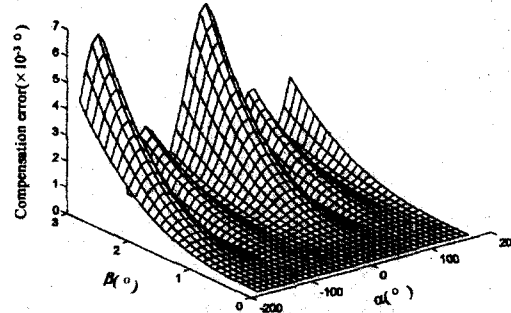


Fig.11 Compensation error by method 2

Fig.11은 α, β 의 변화에 따른 센서를 수직으로 배치한 경우에 대한 보정오차를 보인다. z방향의 측정 길이 $l_z = 17.75\text{mm}$ 에 대한 좌표를 계산하여 구할 수 있으며, 임의의 원통의 자세에 대한 오차 추정은 $-180^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ, 0^\circ \leq \beta \leq 3^\circ$ 의 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 센서를 수평으로 설치했던 경우와 마찬가지로 β 의 한계는 3° 로 하였다. Fig.11에서 α 는 180° 근방에서 최대 오차량을 보이며 센서를 나란히 배열한 경우와 같이 α 는 180° 를 채용하여 추후 결과의 신뢰도를 높이고자 한다.

Fig.12에서 보는 바와 같이, 센서를 수직으로 설치한 경우에 대해서도 스캐닝 길이가 증가함에 따라 보정오차는 미세하게 증가하며 위의 결과로부터 경사 파악 알고리즘의 오차요인에 의한 보정오차를 파악할 수 있다.

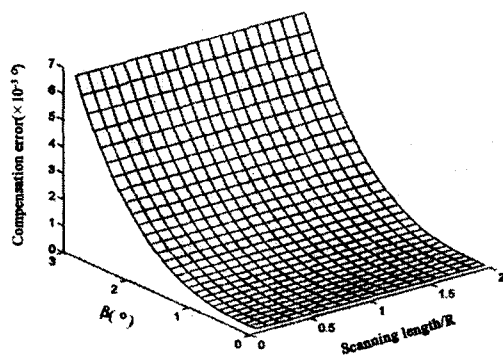


Fig. 12 Compensation error according to l_z/R by method 2

4.2.2 피구동체의 가공정도의 영향

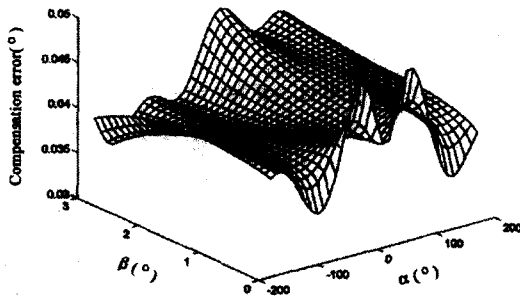


Fig. 13 Compensation error considering the effect of machined surface($\lambda=20\text{mm}$)

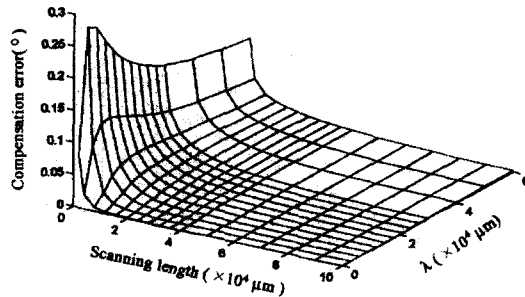


Fig. 14 Maximum compensation error due to machining error (at $\beta=3^\circ$)

Fig.13 은 표면 거칠기와 파장이 $\lambda=20\text{mm}$ 인 장주기 성분을 갖는 피구동체에 대하여 α 와 β 의 변화에 따른 보정오차를 보인다. 센서를 수평으로 배치한 경우와 달리 보정오차가 최대가 되는 α 를 어느 한 값으로 결정할 수 없다.

한편, 실제 측정 시스템에는 두개의 데이터 열이 얻어지므로 표면거칠기 및 장주기 성분이 두개의 데이터 열에 동시에 더해지는 경우, 각각 뺄 경우, 한쪽에는 더해지고 다른 한쪽에는 빼지는 경우의 세가지를 고찰해본 결과, 두번 째 경우가 오차가 최대가 됨을 알 수 있었으며 그 때의 α 값은 고정할 수 없다. 따라서, 장주기 성분의 파장 λ 와 스캐닝 길이에 따른 보정오차를 파악함에 있어서 각각의 경우에 대해 보정오차가 최대가 되는 α 와 β 의 쌍을 찾아서 그 경우에 대한 보정오차를 검토한다.

Fig.14는 센서를 수직으로 배치했을 경우 보정 오차의 최대치를 보인다. 센서를 나란히 배치했을 경우와 마찬가지로 장주기 성분의 파장 λ 에 관계없이 보정오차의 한계치를 제시하기 위해 각 스캐닝 길이에 따라 최대가 되는 점을 모두 이어서 최대 곡선을 찾으면 Fig.15와 같다.

Fig.15의 결과로부터 센서를 수직으로 배치한 측정계에 대하여 타원 단면을 원으로 가정 한 알고리즘에 따른 오차와 피측정물인 원통부품의 가공정도에 따른 오차를 모두 고려한 측정계에서 스캐닝 길이에 따른 보정 오차의 한계를 제시할 수 있다. 또한, 보정오차를 변화시킬 수 있는 인자를 고려하여 최종적으로 추정된 Fig.10과 Fig.15의 결과를 비교해 볼 때, 센서를 수직방향으로 설치한 경우가 보정오차의 최대값이 센서를 나란히 배치한 경우보다 작음을 확인할 수 있다.

상기의 결과들로부터, 센싱면이 작은 변위센서를 이용하여 원통 중심축의 자세를 평가할 경우, 스캐닝 길이, l_s 를 충분히 확보하여 원통의 가공정도에 의해 수반되는 추정오차를 보정해야 한다. 또한, 센싱면의 면적이 큰 변위센서의 경우일지라도 측정면적의 크기보다 큰 웨이비니스 성분은 그대로 측정오차에 수반되므로 측정 시스템 구축시 센싱 면적의 크기와 센서의 특성을 적절히 선택하는 것이 요구된다.

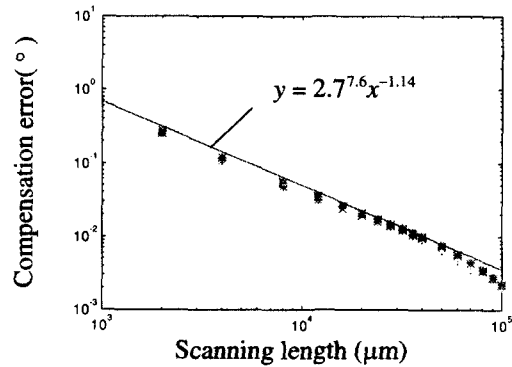


Fig. 15 Maximum compensation error

5. 결론

수직 원통 부품을 피구동체로 하는 정밀 수직 구동 기구를 위한 효율적인 구동부의 자세 보정 기법 개발을 위하여, 나란하게 배열된 한 쌍의 거리

센서를 사용하는 방법 1 과 서로 수직으로 배열하는 방법 2 에 대하여 검토한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 연직 방향으로부터 미소각도(3°이하)로 경사진 원통부품의 단면을 원으로 가정하고 2 개의 거리센서를 이용하는 방법에 의하여 원통부품의 공간 자세를 파악하는 알고리즘을 검토하여, 측정원리에 의한 자세 파악 오차를 명확히 하였다.
- (2) 측정 대상물인 원통 가공물이 갖는 표면거칠기와 웨이비니스 등의 가공 정도가 자세 파악에 미치는 영향을 통계적 기법에 의하여 명확히 하였으며, 그에 의한 보정오차의 한계를 제시하였다.
- (3) (1), (2)의 결과로부터, 종합적인 자세 보정 오차의 한계를 검토하여 목적하는 고정도의 보정 효과를 얻기 위한 측정 조건을 제안하였다.
- (4) 자세보정 결과를 재측정함으로써 보정기구 및 측정계의 상대 자세 파악이 가능함을 보였다.

5. Sung-Chong Chung, "Six degrees of freedom error measuring device for linear motion of slides," Proceedings of 13th Annual Meeting ASPE, pp. 445-448, 1998.
6. 안형준, 장인배, 한동철, "형상오차가 원통형 정전용량 변위센서의 축 회전오차의 측정에 미치는 영향," 한국정밀공학회 97 년도 추계학술대회논문집, pp. 487-490, 1997.
7. 전기용량 원기 Vertical cross capacitor 개발, 한국표준과학연구원, KRISS-97-072-IR, pp. 220-221
8. 전기용량 원기 Vertical cross capacitor 개발, 한국표준과학연구원, KRISS-95-087-IR, pp. 420-432
9. Nahmgyoo CHO, Tadao TSUKADA and Masaaki TAKAHASHI, "Measurement of surface roughness with small waviness by contact stylus instrument correcting specimen orientation," International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 29, No .1, pp. 74-79, 1995.

참고문헌

1. Nahmgyoo CHO, Tadao TSUKADA and Masaaki TAKAHASHI, "Correction of specimen orientation in three-dimensional measurement of surface roughness with small waviness by contact stylus instrument(1st Report)," International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 29, No .2, pp. 156-161, 1995.
2. Nahmgyoo CHO, Tadao TSUKADA and Masaaki TAKAHASHI, "Correction of specimen orientation in three-dimensional measurement of surface roughness with small waviness by contact stylus instrument(2nd Report)," International Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 3, pp. 253-258, 1995.
3. 조남규, "3 차원 미세 표면 형상 측정을 위한 시료면의 자세제어에 관한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 11 권, 제 5 호, pp. 5-11, 1994.
4. 조남규, "원통 축 방향의 표면거칠기 측정을 위한 시료의 자세보정," 한국공작기계학회지, 제 5 권, 제 4 호, pp. 110-112, 1996.