

구면 반사체를 이용한 3 자유도 변위 측정 기법

권기환[†] · 문홍기* · 조남규**

(2002년 6월 18일 접수, 2002년 10월 14일 심사완료)

A Measuring Method for 3-DOF Displacement by Using Spherical Reflector

Ki-Hwan Kwon, Hong-Kie Moon and Nahm-Gyoo Cho

Key Words : Displacement Measurement(변위 측정), 3-DOF(Degree Of Freedom) Motions(3 자유도 운동), Position Sensitive Detector(PSD, 위치감별소자), Spherical Reflector(구반사체)

Abstract

A precision displacement measuring system is proposed, which can detect the 3-DOF translational motions of precision positioning devices. The optical system, which is composed of two diode-laser sources and two quadratic PSDs, is adapted to detect the position of the spherical reflector usually mounted on the platform of positioning devices. Each of the laser beams from diode-laser sources is reflected at the highly reflective surface of the sphere; hence, the 3-dimensional position of the sphere causes the directional change of the reflected beams, which is detected by the PSDs. In this paper, we define the relationships between the output values of the two PSDs and the 3-DOF translational motions of the sphere. Based on a deduced measurement model, we perform measurement simulation and evaluate the performance of the proposed measurement system: linearity, sensitivity, measuring range, and measurement error. The results show that the proposed measuring method is very useful for the measurement of the precision displacement of 3-DOF micro motions.

1. 서론

최근 초정밀 메카트로닉스 기술의 발전과 더불어 변위측정기술의 발전은 서브 마이크로미터 또는, 나노미터 급의 변위분해능을 갖는 초정밀 위치 및 자세 결정을 가능하게 하였다. 이러한 변위 측정기술은 MEMS 및 나노기술의 발달로 인하여 큰 측정범위에서 nm 수준의 측정 분해능이 요구되고 있다. 또한, 빠른 측정속도 및 현장 적용의 용이함으로 인하여 접촉식보다 비접촉식 측정방식이 선호되고 있으며, 구동 시스템 발달부의 위치/자세 검출을 동시에 하기 위해 1 자유도 변위 측정에서

다 자유도 변위 측정 기술에 대한 연구로 이행되고 있다. 현재 비접촉 방식으로 다자유도의 미세 변위를 고분해능으로 측정하기 위하여 레이저 간섭계를 이용한 방법,⁽¹⁻⁴⁾ 정전 용량형 변위 센서를 이용한 방법,⁽⁵⁻⁷⁾ 다수의 PSD(Position Sensitive Detector)와 다이오드 레이저로 구성된 변위 측정계를 이용한 방법⁽⁸⁻¹⁰⁾ 등이 연구되고 있다. 정밀 변위측정을 위해 널리 사용되는 레이저 간섭계는 측정 분해능이 수십 nm 이고, 측정 범위도 매우 크나, 다자유도의 변위 측정을 동시에 수행하기 위해서는 매우 복잡한 광학계를 구성해야 하며, 측정 장치 구축 비용이 매우 고가인 단점을 갖는다. 정전 용량형 변위센서는 측정 분해능이 sub-nm 로 매우 좋으나, 측정 범위가 수십 μm 정도로 작으며 센서가격이 비교적 고가인 단점을 갖는다. 한편, Cuttino,⁽⁸⁾ Schinstock⁽⁹⁾ 등은 다이오드 레이저 모듈과 PSD 를 이용하여 정밀 구동시스템의 6 자유도 위치/자세 측정용 변위 측정계를 제안하였으며, 박원식, 조형석⁽¹⁰⁾ 등은 삼면반사체와 PSD 를 이용한

[†] 책임저자, 회원, 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
E-mail: pmslab@dreamwiz.com
TEL: (031)418-0748 FAX: (031)406-5550

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계정보경영공학부

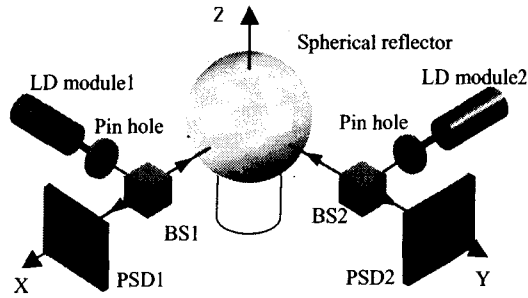


Fig. 1 Schematic drawing of 3-DOF displacement measurement system

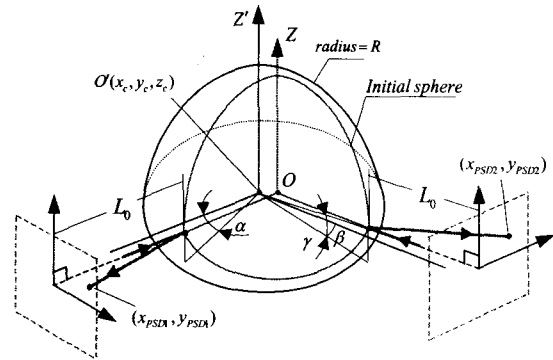


Fig. 2 Definition of coordinate system and geometrical parameters for modeling of measurement system

6 자유도 변위 센싱 시스템을 제안하였다. 이러한 방식들은 응답속도 및 자세측정을 위한 각도 분해능이 매우 좋으며, 측정 장치의 구조가 간단하고 비교적 저가로 시스템 구축이 용이한 장점을 지니고 있으나, 측정 원리상 직선변위 분해능이 PSD 자체의 측정 분해능에 의존함으로 xyz의 3축 병진운동 변위를 sub- μm 이하의 고 분해능으로 측정하는 것이 불가능하다. 이러한 병진운동에 대한 측정 분해능의 한계를 보완하기 위해 본 연구에서는 구면반사와 PSD를 이용한 새로운 광학식 3자유도 변위 측정 시스템을 제안하고자 한다. 제안된 변위측정장치는 고정도의 구면사체와 2개의 PSD, 2개의 다이오드 레이저 등으로 구성된다. 본 논문에서는 제안된 변위측정시스템의 타당성을 분석할 수 있는 측정 모델이 도출된다. 또한, 측정 시스템의 성능 및 특성을 평가하기 위해 선형성, 감도, 측정 범위 및 측정오차 등이 모의실험을 통해 평가된다. 이러한 평가 결과들로부터 측정 시스템의 성능을 효과적으로 구현하기 위한 설계 조건들을 제시하고 제안된 장치의 효용성을 검증한다.

2. 측정 원리

2.1 측정 시스템 구성

Fig. 1은 본 논문에서 제안하는 3 자유도 변위 측정 방법의 개략도를 보인다. 2개의 다이오드 레이저에서 발진되어 핀홀(pin hole)을 거쳐 빔 분할기를 통과한 레이저 광선들은 각각 X와 Y 축을 따라 구에 입사되며, 반사된 광은 X와 Y 축에 대하여 수직으로 배치된 2차원 소자인 PSD 평면에 입사된다. 초기 PSD의 위치는 구에 반사되어 돌아온 광점(Beam spot)이 PSD 평면의 중심에 오도록 위치시킨다. 즉, 초기 위치에서 PSD의 출력 전압이 0이 되도록 PSD의 위치를 조절한다.

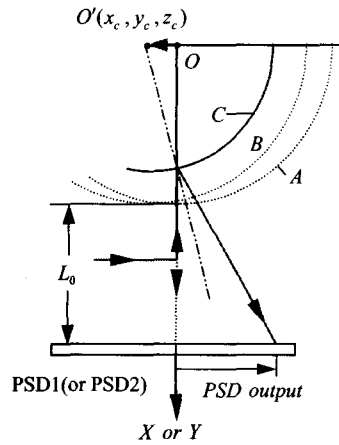


Fig. 3 2-D reflection model on spherical surface

2차원 PSD로부터 출력되는 레이저 광점의 좌표는 구의 위치 변화에 대한 정보를 내포하고 있다. 따라서, 2개의 PSD로부터 산출되는 레이저 광점의 좌표 이동 정보로부터 구의 3 자유도 병진운동을 측정하게 된다.

2.2 측정 모델

구의 3 자유도 이동 변위와 2개의 PSD에 맺힌 레이저 광점의 좌표 간의 관계를 구하기 위해, 제안된 측정 시스템에 대한 모델이 필요하다. Fig. 2는 측정 모델을 수립하기 위한 측정 시스템의 좌표계 및 위치 관계를 보인다. R 는 구의 반경, L_0 는 PSD 평면과 구면과의 거리를 나타낸다. 또한, x_c, y_c, z_c 는 각각 구 중심의 위치좌표 의미하며, $x_{PSD1}, y_{PSD1}, x_{PSD2}, y_{PSD2}$ 는 각각 PSD1과 PSD2에 맺힌 레이저 광점의 좌표를 나타낸다. Fig. 3은 레이저 광선의 구반사 개념을 보이고 있다. 그림에서 A는 구의 초기위치, B는 구의 중심 좌표가 x , 또는 y 축 방향으로 이동했을 때의 구의 위치, C는

구의 중심 좌표가 B 의 위치로부터 z 축 방향으로 이동했을 때의 구의 위치를 나타낸다. 구의 중심이 각각 x, y, z 축으로 미소 이동함에 따라 레이저의 반사점도 함께 이동하게 되어 반사각이 변하게 된다. 이렇게 하여 구의 미소 병진 변위는 반사각의 변화로 바뀌게 되고 PSD 상에 맺힌 광점의 위치 변화는 증폭되어 구의 미소 변위를 고감도로 감지할 수 있게 된다. 이러한 변위 증폭 방법은 기존의 광 지레 법 (optical lever method)과 유사한 측정 원리를 갖는다.

본 논문에서는 일차적으로 레이저 광선을 점광원으로 가정하고, 광선추적(ray tracing) 개념을 기초로 하여 광선 요소의 직선 방정식과 구 반사면의 평면 방정식을 이용하여 측정 모델식을 구하였다. 측정 모델로부터 유도된 측정 시스템의 입출력 계산식은 다음과 같다.

$$x_{PSD1} = (L_o + R + x_c - \sqrt{R^2 - y_c^2 - z_c^2}) \tan 2\alpha \quad (1)$$

$$y_{PSD1} = (L_o + R + x_c - \sqrt{R^2 - y_c^2 - z_c^2}) \tan 2\gamma \quad (2)$$

$$x_{PSD2} = (L_o + R + y_c - \sqrt{R^2 - x_c^2 - z_c^2}) \tan 2\beta \quad (3)$$

$$y_{PSD2} = (L_o + R + y_c - \sqrt{R^2 - x_c^2 - z_c^2}) \tan 2\gamma \quad (4)$$

여기서, α, β, γ 는 다음과 같다.

$$\tan \alpha = \frac{y_c}{\sqrt{R^2 - y_c^2 - z_c^2}} \quad (5)$$

$$\tan \beta = \frac{x_c}{\sqrt{R^2 - x_c^2 - z_c^2}}$$

$$\tan \gamma = \frac{z_c}{\sqrt{R^2 - z_c^2}}$$

식 (1)-(5)의 입출력 관계식을 실제 측정에 적용하기 위해서는 (x_{PSD1}, y_{PSD1}) 과 (x_{PSD2}, y_{PSD2}) 로부터 비선형 연립 방정식을 풀어 구의 중심 이동 좌표 x_c, y_c, z_c 를 산출해야 한다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 수치적인 방법인 뉴턴-랩슨법⁽¹¹⁾을 이용하면 빠르게 안정적으로 해를 구할 수 있다.

일반적으로 레이저 빔(laser beam)은 무수한 광선 요소들로 이루어져 있으며, 광속 강도분포는 단면에서 식 (6)과 같이 중심으로부터 반경방향의 거리 r 에 대한 가우시안 함수의 분포로 표현된다.

$$I(r) = \frac{2P}{\pi r_{beam}^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_{beam}^2}\right) \quad (6)$$

여기서, P 는 레이저의 출력, r_{beam} 는 레이저 빔의 반경이다. 이러한 가우시안 빔은 단위 강도를 갖는 광선들의 밀도으로써 모델링 할 수 있다.

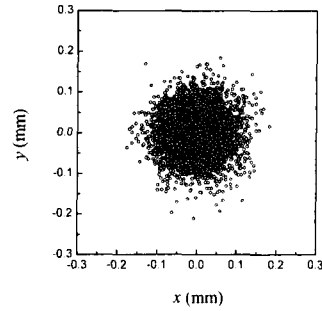


Fig. 4 Gaussian beam profile ($r_{beam} = 0.1\text{mm}$, Population=15000)

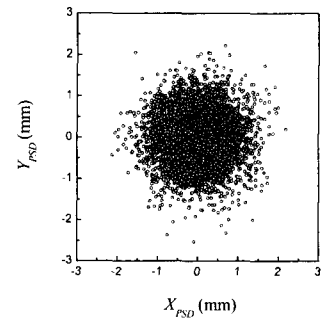


Fig. 5 Distribution of laser beam reflected on PSD plane ($r_{beam} = 0.1\text{mm}$, $L_o = 30\text{mm}$, $R = 5\text{mm}$)

Fig. 4는 가우시안 분포를 갖는 입사광 내부에 산포된 단위 광선들을 보이며 레이저 빔의 직경은 약 0.2mm 정도이다. Fig. 5는 가우시안 분포를 갖는 입사광이 구면에 반사되어 PSD 평면상에 산포된 단위 광선들의 출력 분포를 보이고 있으며, PSD 상에 무수히 산포된 단위 광선들의 좌표들에 대한 평균값은 식 (7)과 같이 표현된다. 본 논문에서는, 2차원 PSD의 출력 특성을 고려하여 식 (7)로부터 산출되는 평균값을 구면에 반사되어 돌아온 레이저 빔에 대한 PSD 상에서의 출력 좌표라고 가정하였다.

$$\hat{x}_{PSD} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{PSD}(i) \quad (7)$$

$$\hat{y}_{PSD} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{PSD}(i)$$

3. 측정 시스템의 성능 분석 및 평가

3.1 모의 측정 실험

2장에서 유도된 측정 모델을 바탕으로 제안된 변위 측정 시스템의 모의 측정 실험을 수행하였다. 모의 실험을 위해 가우시안 분포를 지니는 15000개의 단위 광선을 발생시켜 레이저 빔을 생성하였

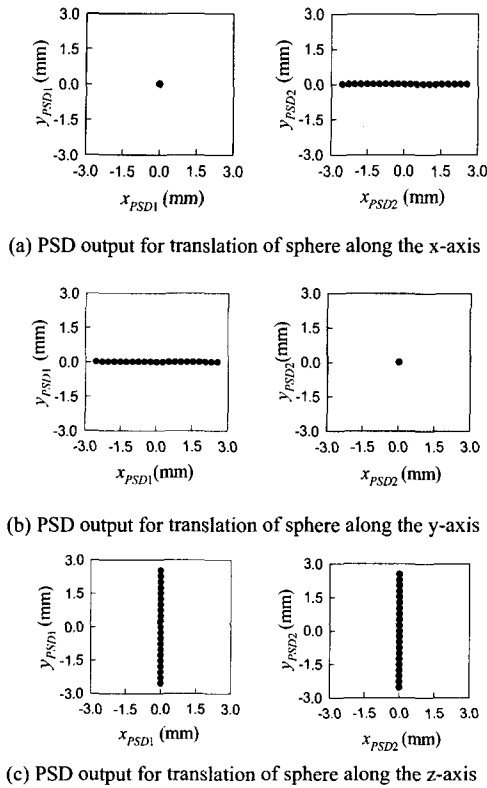


Fig. 6 Measurement of 3-DOF translational movement of spherical reflector($R=5\text{mm}$, $L_0=30\text{mm}$, $r_{beam}=0.1\text{mm}$)

으며, 식 (1)~(5)와 식 (7)의 관계식을 적용하여 PSD 상의 광점의 궤적을 산출하였다.

Fig. 6 은 구 중심의 3 자유도 병진 운동을 1 자유도별로 각각 $\pm 200\mu\text{m}$ 범위로 움직인 경우에 대한 측정 시뮬레이션 결과를 보인다. x 축을 따라 구가 움직인 경우는 PSD2 에서 횡 방향으로 광점의 궤적이 나타나고 있으며, y 축을 따라 구가 움직인 경우에는 PSD1 에서 횡 방향으로 궤적이 나타난다. 또한, z 축으로 움직인 경우에는 PSD1 과 PSD2 에서 종 방향으로 궤적이 나타난다. Fig. 7 은 측정하고자 하는 구의 이동 변위와 수치적인 방법으로 산출된 구의 이동 변위를 비교한 것이다. 여기서, 구의 이동 변위는 측정하고자 하는 구의 이동 변위에 대해 PSD 상의 광점의 궤적을 구한 후, 식 (1)~(5)의 관계식에 대입하여 뉴턴-랩슨법을 이용하여 구한다. Fig.8 은 측정하고자 하는 구의 이동 변위와 수치적인 방법으로 계산된 구의 이동 변위와의 절대오차를 각축에 대한 구의 이동변위에 따라 산출한 결과를 보인다. 측정 오차는 초기 위치에서는 잘 일치하고 있으나, 구의 이동 변위

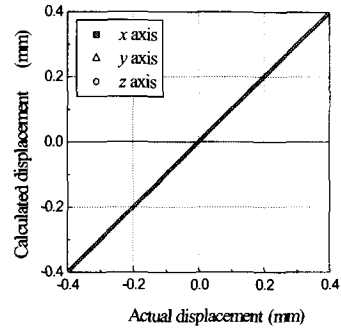


Fig. 7 Comparison between actual displacement and calculated displacement($R=5\text{mm}$, $L_0=30\text{mm}$, $r_{beam}=0.1\text{mm}$)

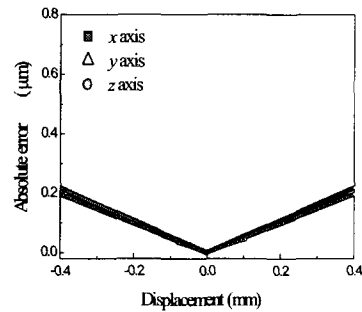


Fig. 8 Absolute error of displacement measurement ($R=5\text{mm}$, $L_0=30\text{mm}$, $r_{beam}=0.1\text{mm}$)

가 증가 할수록 오차가 선형적으로 증가함을 확인할 수 있다. 이러한 측정 오차의 발생 원인은 가우시안 분포를 갖는 입사광이 구면에 반사되어 PSD 평면상에 맺힐 때, 구면 반사의 특성상 구의 이동 변위가 증대될수록 반사광의 산포는 증대되고, 레이저 빔의 분포 모양이 타원형태로 일그러져 분포의 비대칭성이 증대하기 때문이다. 실제의 경우, 레이저 빔은 가우시안 분포와 유사한 거동을 함으로 식 (1)~(5)과 같이 레이저 빔을 하나의 점광원으로 가정하여 유도된 입출력 관계식을 그대로 사용할 경우, 측정오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제에 대한 분석 및 평가는 3.5 절에서 논의된다.

3.2 선형성(Linearity)

대부분의 측정 시스템들은 정적인 입력과 이에 대한 출력이 선형적인 관계를 갖도록 설계된다. 따라서, 본 논문에서 제안된 변위 측정 시스템의 선형성을 평가하였다. 일반적으로 비선형적인 거동을 하는 측정 시스템에 대해 선형성 평가 지수는 출력 범위에 대한 최대 선형성 오차의 백분율로서 표시한다.

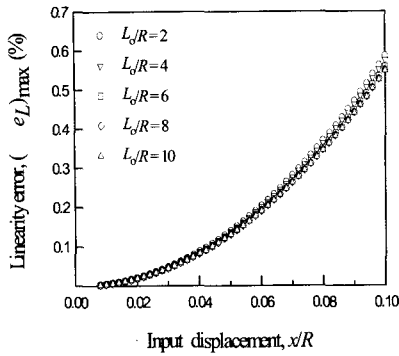


Fig. 9 Linearity of proposed measurement system

$$\% (e_L)_{\max} = \frac{[e_L(x)]_{\max}}{r_0} \times 100 \quad (8)$$

여기서, r_0 는 출력 범위, $e_L(x)$ 는 입력값 x 에 대한 선형성 오차를 나타낸다.

식 (8)으로부터 계산된 선형성 오차 평가 결과 각 축에 대한 입력변수 x_c/R , y_c/R , z_c/R 에 대하여 동일한 값을 보였다. 또한, Fig. 9 에서 보는 바와 같이, L_0/R 의 변화에 대하여 선형성 오차가 거의 동일한 값을 보임을 확인할 수 있다. Fig. 9 에서 선형 오차가 0.1%, 0.2% 의 경우, 반경 R 로 무차원화된 구의 최대 입력 변위의 한계는 각각 0.045, 0.06 정도 됨을 보인다.

3.3 측정 감도(Sensitivity)

모의 측정 실험 결과들에서 알 수 있는 바와 같이, x 축 방향과 y 축 방향으로 구의 중심이 미소이동을 할 경우, 각각 PSD2 평면과 PSD1 평면의 횡축에서 광점의 궤적이 나타나고, z 축 방향으로 구의 중심이 미소 이동을 할 경우 PSD1 과 PSD2 평면의 종축에서 광점의 궤적 나타난다. 따라서, 제안된 3 자유도 변위 측정 시스템의 각 축에 대한 측정 감도는 식 (9)으로써 정의 될 수 있다.

$$K_x = \frac{\partial x_{PSD2}}{\partial x_c}, K_y = \frac{\partial x_{PSD1}}{\partial y_c}, K_z = \frac{\partial y_{PSD1}}{\partial z_c} \text{ or } \frac{\partial y_{PSD2}}{\partial z_c} \quad (9)$$

변위 측정 시스템의 선형성 오차가 0.1% 이내인 입력 범위에 대하여 각 축에 대한 측정감도 K_x, K_y, K_z 는 거의 동일한 값을 보임을 확인할 수 있었다. Fig.10 과 Fig.11 은 구의 반경 R 과 PSD 와 구면과의 거리 L_0 에 따른 x 축 방향에 대한 측정 감도 K_x 의 변화 특성을 보이고 있다. Fig. 10 에서 구의 반경 R 이 작아질수록 측정 감도는 급격하게 증가하며, PSD 와 구면과의 거리 L_0 에 비례하여

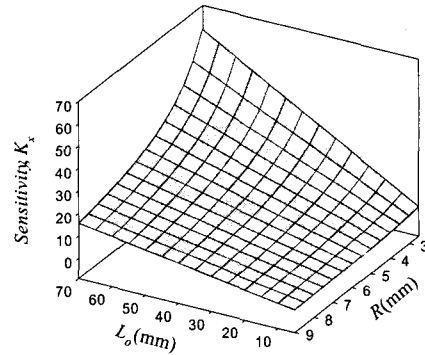


Fig. 10 Sensitivity K_x according to sphere radius R and PSD position L_0

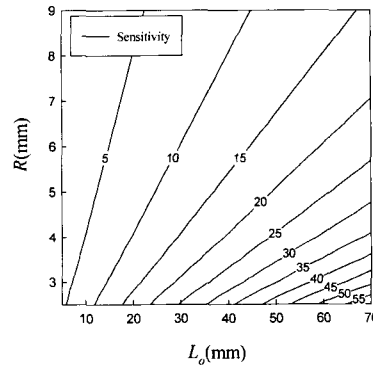


Fig. 11 Contour plot of sensitivity K_x according to sphere radius R and PSD position L_0

측정 감도가 증가함을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 11 의 등고선 그래프로부터 고감도의 변위측정을 위한 측정 시스템의 설계 조건 (R, L_0)을 결정할 수 있다. 예를 들어, $R=5\text{mm}, L_0=50\text{mm}$ 로 할 경우, 측정 감도 K 는 약 20 이다. 따라서, 이론적으로 측정 분해능이 $1\mu\text{m}$ 인 PSD 를 사용하면 구의 변위를 약 $0.05\mu\text{m}$ 의 분해능으로 측정이 가능하다.

3.4 측정 범위

Fig. 12 는 PSD 의 크기와 레이저 빔의 광점의 이동에 따른 측정 범위의 결정 방법을 개략적으로 설명하고 있다. 실제로 3 자유도 변위 측정 시스템의 측정 범위는 가우시안 레이저 빔의 반경 r_{beam} 과 PSD 의 측정 면적 ($I^{PSD}_x \times I^{PSD}_y$)에 의해 좌우된다. 구면 반사 특성상 레이저 빔의 반경은 측정 감도에 비례하여 증가된다. 그러므로, 레이저 빔의 반경, 측정 감도, 최대 측정 범위가 결정될 때 최소한의 필요한 PSD 감지부의 크기는 식 (10)~(11)으로부터 산출될 수 있다. 예를 들어, 측정 하고자 하는 구의 최대 이동 변위가 $(x_c)_{\max} = (y_c)_{\max} = (z_c)_{\max} = 100\mu\text{m}$, 측정 감도 $K_x, K_y, K_z = 20$ 그리고, 빔의 반경이 $r_{beam}=0.05\text{mm}$ 일 때, 최소한의

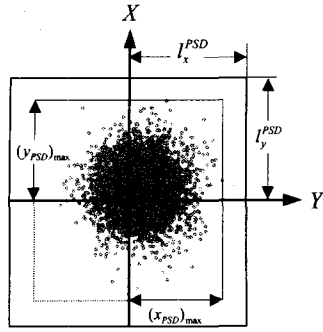


Fig. 12 Definition of measuring range

필요한 PSD 감지부의 크기($l_x^{PSD} \times l_y^{PSD}$)는 적어도 $1.2\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ 보다 커야 한다.

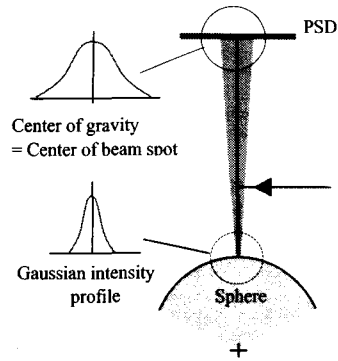
$$\begin{aligned} (x_{PSD1})_{\max} &\approx K_y \times [y_{c|\max} + r_{\text{beam}}] \\ (x_{PSD2})_{\max} &\approx K_x \times [x_{c|\max} + r_{\text{beam}}] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (y_{PSD1})_{\max} = (y_{PSD2})_{\max} &\approx K_z \times [z_{c|\max} + r_{\text{beam}}] \\ l_x^{PSD} &> (x_{PSD1})_{\max} \text{ or } (x_{PSD2})_{\max} \\ l_y^{PSD} &> (y_{PSD1})_{\max} \text{ or } (y_{PSD2})_{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

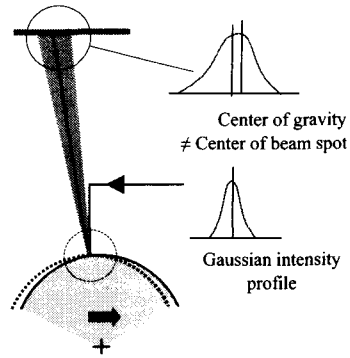
3.5 레이저 광의 가우시안 분포 특성에 의한 측정오차

본 절에서는 변위 측정 시스템의 입출력 관계식을 이용한 구의 이동량 산출시, 빔의 가우시안 광강도 분포 특성이 측정 오차에 미치는 영향을 분석하였다. 초기 위치에서는 PSD 평면 상에 분포되는 가우시안 빔의 중심값이 레이저 빔을 하나의 점광원으로 가정한 경우의 출력 값을 대신할 수 있으나, Fig. 13 과 같이 분포의 단면이 원형을 갖는 가우시안 빔이 구의 이동 변위가 증가함에 따라 타원형태로 일그러져 분포의 비대칭성이 증대하기 때문에 레이저 빔을 점광원으로 가정한 경우의 출력 값을 더 이상 대신할 수 없게 된다. Fig. 14 에서 보는 바와 같이, 구의 이동 변위 y_c/R 가 증가함에 따라, 레이저 빔을 하나의 점광원으로 모델링 한 경우의 PSD 출력과 가우시안 분포로 모델링 한 경우의 PSD 출력간의 차이가 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 식 (1)~(5)에 유도된 입출력 관계식을 사용하여 구의 이동 변위를 측정할 경우 측정 시스템의 설계 조건을 고려하여 이러한 출력 오차를 보정하여야 한다. 가우시안 빔과 구면 반사의 특성에 의한 PSD 에서의 출력 오차는 구의 반경 R , PSD 와 구면과의 거리 L_0 그리고, 가우시안 빔의 반경 r_{beam} 에 의해 영향을 받는다.

Fig. 15~17 은 L_0/R 와 r_{beam}/R 의 변화에 따른 출력 오차의 경향을 등고선 그래프로 나타낸 것이다.



(a) Symmetric intensity distribution



(b) Non-symmetric intensity distribution

Fig. 13 Generation mechanism of optical measurement error

Fig. 15~17 의 등고선 그래프로부터 측정 시스템의 설계 변수 R, L_0, r_{beam} 이 결정 되었을 때, 구의 이동 변위에 따른 출력 오차의 크기를 산출할 수 있으며, 이러한 결과 데이터를 기초로 하여 가우시안 레이저 빔에 의해 발생하는 출력 오차의 예측이 가능하다. 예를 들어, 측정 시스템의 설계 변수를 각각 $R=5\text{mm}, L_0=40\text{mm}, r_{\text{beam}}=0.25\text{mm}$ 로 하였을 경우, 구의 이동 변위에 따른 출력 오차의 크기는 모두 $e_{x_{PSD1}}/y_c = e_{x_{PSD2}}/x_c = e_{y_{PSD1}}/z_c \approx 0.041$ 로 예측될 수 있다.

이러한 출력 오차의 예측값을 식 (1)~(5)에 유도된 입출력 관계식의 출력항에 대입한 후, 구의 이동 변위를 산출하여 보정한 결과를 Fig. 18 에서 보이고 있다. 그래프에서 보이는 바와 같이, 구의 이동 변위량의 증가함에 따른 레이저 빔의 가우시안 분포 특성에 의한 측정 오차의 선형적 증가현상이 보정을 수행한 후 거의 없어지고 있음을 확인할 수 있다.

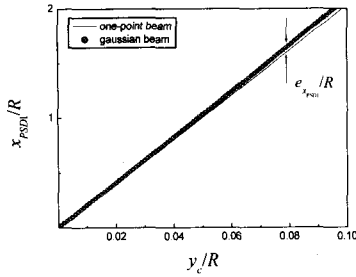


Fig. 14 PSD output error originated from the reflection behavior of the Gaussian beam on the sphere

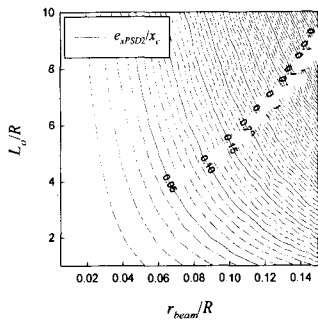


Fig. 15 The ratio of PSD output error $e_{x_{PSD2}}$ to input displacement x_c according to r_{beam}/R and L_o/R

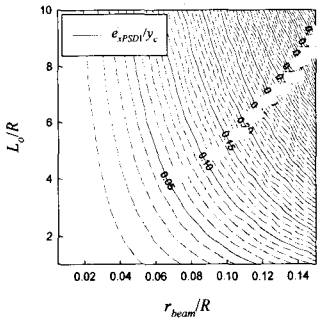


Fig. 16 The ratio of PSD output error $e_{y_{PSD1}}$ to input displacement y_c , according to r_{beam}/R and L_o/R

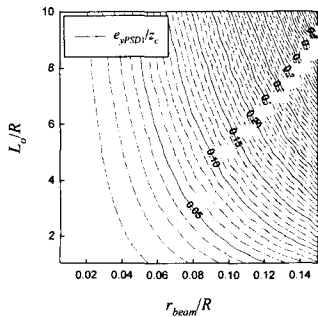
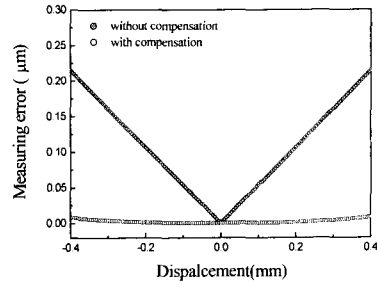
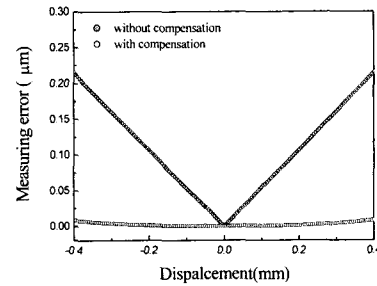


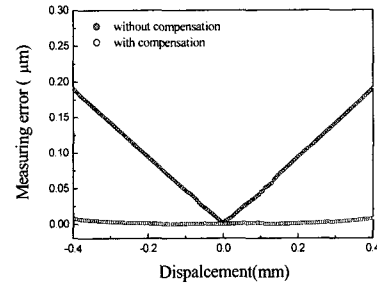
Fig. 17 The ratio of PSD output error $e_{z_{PSD1}}$ to input displacement z_c , according to r_{beam}/R and L_o/R



(a) Measuring error of translation in x-direction



(b) Measuring error of translation in y-direction



(c) Measuring error of translation in z-direction

Fig. 18 Compensation results of measuring error originated from characteristics of gaussian beam ($R=5\text{mm}$, $L_o=40\text{mm}$, $r_{beam}=0.25\text{mm}$)

4. 결론

본 논문에서는 고정도의 구반사경과 2 개의 PSD, 2 개의 다이오드 레이저 등으로 구성된 새로운 광학식 3 자유도 미소 변위 측정 시스템을 제안하였다. 제안된 측정 시스템에 대한 측정 모델 및 입출력 관계식이 도출 되었다. 측정 모델에 기초한 측정 시뮬레이션 실험이 수행되었으며, 측정 시스템의 선형성, 감도, 측정 범위 등이 평가되었다. 또한, 가우시안 레이저 빔과 구면 반사의 특성에 의한 PSD 에서의 출력 오차를 평가하고 시스템의 설계 조건에 따른 출력 오차의 보정량을 산

출하였다. 이러한 측정 시스템의 성능 분석/평가 결과로부터, 측정 시스템의 설계 조건 즉, 구의 반경 R , 구와 PSD와의 거리 L_0 , 레이저 빔의 반경 w_0 등을 적절히 선정함으로써 고 분해능으로 3 자유도의 변위 측정이 가능함을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Jeong-Seok Oh, Chang-Woo Lee, Hyung-Seok Lee and Seong-Woo Kim, 1995, "A Fine Motion Mechanism of Dual Servo Control for Ultraprecision Positioning," *Transactions of the KSME*, Vol. 19, No. 11, pp. 2875~2884.
- (2) Kim, J.S. and Chung, S. C., 1998, "Synthesis of an On-Line 5 Degrees of Freedom Error Measurement System for Translational Motion Rigid Bodies," *Transactions of the KSPE*, Vol. 15, No. 5, pp. 93~99.
- (3) Jenq Shyong Chen, Tzu Wei Kou and Shen Hwa Chiou, 1999, "Geometric Error Calibration of Multi-Axis Machines Using an Auto-Alignment Laser Interferometer," *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 243~252.
- (4) Kuang-Chao Fan, Mu-Jung Chen, 2000, "A 6-Degree-Of-Freedom Measurement System for the Accuracy of X-Y Stages," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 15~23.
- (5) Mike Holmes, Robert Hocken and David Trumper, 2000, "The Long-Range Scanning Stage: a Novel Platform for Scanned-Probe Microscopy," *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 191~209.
- (6) Mike Holmes, David Trumper, 1996, "Magnetic/Fluid-bearing Stage for Atomic-Scale Motion Control (the Angstrom Stage)," *Precision Engineering*, Vol. 18, pp. 38~49.
- (7) Renzo Vaccarone, Andrea Pozzo and Rosanna Puppo, 2000, "A Cryogenic Scanning Stage with Position Control for a Magnetic Microscope," *Physica B: Condensed Matter*, Volumes 284-288, part 2, pp. 2115~2116.
- (8) Cuttino, J. F., Schinstock, D. E. and Prather, M. J., 1999, "Three-Dimensional Metrology Frame for Precision Applications," *Precision Engineering*, Vol. 23, pp. 103~112.
- (9) Schinstock, D. E. and Cuttino, J. F., 2000, "Real Time Kinematic Solutions of a Non-Contacting Three Dimensional Metrology Frame", *Precision Engineering*, Vol. 24, pp. 70~76.
- (10) Park, O. S., Cho, H. S., Byun, Y. K., Park, N. Y. and Jeong, D. G., 1999, "Measurement of 6-DOF Motions Using a 3-Facet Mirror," *Proceedings of the 14th KACC*, pp. C-375~378.
- (11) Namir C. Shamma, 1996, "C/C++ Mathematical Algorithms for Scientists and Engineers," McGraw-Hill.