

# 회절 격자 표식을 이용한 6 자유도 측정 시스템의 광학적 오차 해석 및 보상

김종안\*, 배의원\*, 김수현\*\*, 곽윤근\*\*

## Optical Error Analysis and Compensation of Six Degrees of Freedom Measurement System Using a Diffraction Grating Target

Jong-Ahn Kim\*, Eui Won Bae\*, Soo Hyun Kim\*\*, and Yoon Keun Kwak\*\*

### ABSTRACT

Six degrees of freedom measurement systems are required in many fields: precision machine control, precision assembly, vibration analysis, and so on. This paper presents a new six degrees of freedom measurement system utilizing typical features of a diffraction grating. It is composed of a laser source, three position sensitive detectors, a diffraction grating target, and several optical components. Six degrees of freedom displacement is calculated kinematically from the coordinates of diffracted rays on the detectors. Optical measurement error was caused by the fact that a laser source had a Gaussian intensity distribution. This error was analyzed and compensated using simple equations. The performance of the compensation equation was verified in the experiment. The experimental results showed that the compensation equation could reduce the optical measurement error remarkably and the error in six degrees of freedom measurement less than  $\pm 10 \mu\text{m}$  for translation and  $\pm 0.012^\circ$  for rotation.

**Key Words** : Six degrees of freedom(6 자유도), Diffraction grating target(회절 격자 표식), Optical error(광학적 오차), Error compensation(오차 보상), Kinematic analysis(기구학적 해석)

### 1. 서론

6 자유도 운동을 발생시키는 머니플레이터는 복잡한 작업을 용이하게 수행할 수 있어 작업의 효율을 증가시킬 수 있다. 이러한 머니플레이터의 운동을 정밀하게 제어하기 위해서는 6 자유도 측정 시스템이 반드시 필요하다. 또한 정밀 구동기의 성능 해석과 강체의 진동 해석을 위해 6 자유도 측정 시스템을 이용하면 완전한 6 자유도에 대한 정보를 얻을 수 있어 보다 정확한 해석이 가능

하다. 그러나 일반적으로 생각할 수 있는 1 자유도 센서의 조합으로 6 자유도 측정 시스템을 구성하면 각 측정 방향 간의 누화(crosstalk), 측정 시스템의 크기 증가 등과 같은 부가적인 문제점이 발생된다.

현재까지 광학적인 6 자유도 측정 방법에 관한 여러 가지 연구 결과가 발표되었는데 측정면에 반사체를 부착하여 측정물의 6 자유도 변위를 측정하였다<sup>(1-3)</sup>. 이러한 측정 방법에서는 반사체의 기하학적 정밀도가 측정 시스템의 성능에 직접적으로

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

영향을 주게 된다. 측정물 위에 다수의 광학 소자를 이용한 광학계를 구성하여 6 자유도 변위를 측정하는 연구가 진행되었다<sup>(4)</sup>. 제한된 측정 범위 내에서 비교적 높은 성능을 얻을 수 있었지만 광학 정렬이 어렵고 광학계를 설치하기 위한 공간이 필요하기 때문에 작은 크기의 측정물에는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 한 개의 회절 격자 표식과 한 개의 광원을 이용하는 새로운 6 자유도 측정 시스템을 개발하고자 한다. 제안된 측정 시스템은 기존의 측정 시스템에 비해 구조가 간단하고 미소한 측정물에도 적용이 가능한 장점을 가지고 있다. 6 자유도 변위를 구하기 위한 기구학적 해석 과정의 가정이 실제의 광과 일치하지 않기 때문에 발생하는 측정 오차를 해석하고 보상한다. 그리고 실험을 통하여 측정 시스템의 성능을 평가한다.

## 2. 6 자유도 측정 시스템

### 2.1 측정 원리

회절 격자에 입사된 단파장 광은 다수의 불연속적인 방향으로 회절되어 진행된다. 회절광의 진행 방향은 입사광의 파장, 회절 격자의 피치, 입사각에 의해 결정된다. 이러한 기하학적 관계를 나타내는 수식을 “회절 격자식”이라 말한다. 일반적인 회절 격자식은 입사광과 회절 격자의 수직을 포함한 평면인 입사면이 회절 격자의 피치 방향에 수직인 경우에 대하여 유도된 기하학적 관계를 나타낸 것이다.

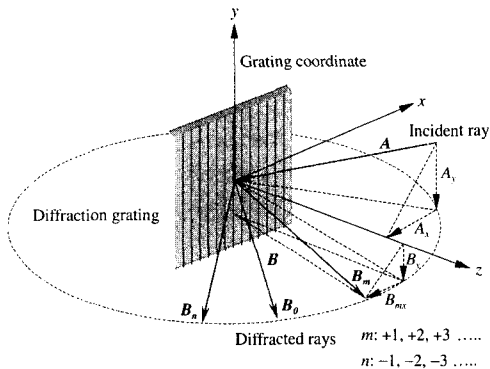


Fig. 1 Three-dimensional diffraction of a monochromatic incident ray on a grating

그러나 Fig. 1에서와 같이 입사면이 회절 격자의 피치 방향에 수직하지 않고 임의의 방향으로 기울어진 경우에는 회절광의 진행 방향을 구하기 위해서는 3 차원적인 해석이 필요하다. Figure 1에서  $A$ 와  $B$ 는 각각 입사광과 회절광의 단위 방향 벡터를 나타내고  $B$ 의 아래 첨자는 회절광의 차수이다. 회절 격자에 고정된 좌표계에서 표현된 각 단위 방향 벡터의 요소들을 이용하여 3 차원 회절 격자식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다<sup>(5)</sup>.

$$B_{mx} = A_x + m \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

$$B_y = A_y$$

$A_x$ 와  $A_y$ 는 입사광 단위 방향 벡터의  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 요소를 나타내고  $B_{mx}$ 와  $B_y$ 는  $m$  차수 회절광 단위 방향 벡터의  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 요소이다.  $\lambda$ 는 입사광의 파장,  $d$ 는 회절 격자의 피치를 나타낸다. 위 식에서 보면 회절 격자의 자세 변화는 회절 격자에 고정된 좌표계에서 표현된 입사광 단위 방향 벡터를 변화시키고 이로 인해 회절광의 진행 방향도 바뀌게 된다.

그러나 회절 격자면( $x$ - $y$  평면)과 평행한 평면 운동에 대해서는 회절광의 진행 방향이 변화하지 않는다. 본 연구에서는 발산하는 입사광과 반사가 되지 않는 표면에 부착된 원형의 회절 격자 표식을 이용하여 이러한 평면 운동을 측정한다. 회절 격자 표식이 입사광 내에서 평면 운동을 하게 되면 회절광이 발생하는 위치가 바뀌게 되어 평면 운동의 측정에 필요한 정보를 얻을 수 있다.

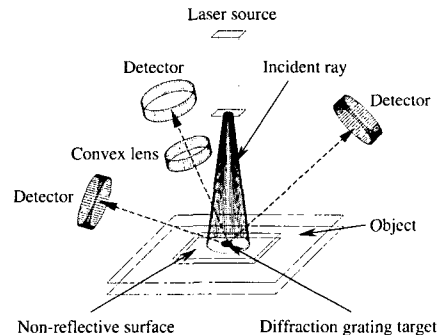


Fig. 2 A configuration of the six-DOF measurement system

6 자유도 측정 시스템은 Fig. 2 와 같이 레이저 광원, 회절 격자 표식, 2 차원 위치 감지 소자, 그리고 몇 개의 광학 소자들로 구성된다. 발생하는 다수의 회절광 중에서 측정 시스템의 안정성을 높이고 측정 시스템이 대칭적인 구조를 가질 수 있도록 +1, 0, -1 차수 회절광을 측정에 이용한다. 볼록 렌즈는 0 차수 회절광의 진행 방향을 조절하여 측정 시스템의 성능을 향상 시킨다.

### 2.2 기구학적 해석

측정물의 6 자유도 변위는 3 개의 2 차원 위치 감지 소자의 출력값으로부터 기구학적으로 계산된다. 기구학적 계산 과정은 측정물의 자세값으로부터 감지기의 출력값을 계산하는 정방향 문제의 해를 구하는 과정과 감지기의 출력값으로부터 실제 측정물의 6 자유도 변위를 계산하는 역방향 문제의 해를 구하는 과정으로 구성되어 있다.

기구학적 해석을 위해 측정 시스템을 구성하는 각 요소에 좌표계를 정의하고 기하 광학을 이용하여 정방향 문제의 해를 구할 수 있다. 각 좌표계 간의 좌표 변환과 식 (1)의 회절 격자식을 이용하면 회절광의 진행을 표현하는 직선의 식과 감지면을 나타내는 평면의 식을 유도할 수 있다. 이를 연립하여 ±1 차수 회절광의 감지기 출력값을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.  $x_{mgo}, y_{mgo}, z_{mgo}$  는 감지기 좌표계에서 나타낸 회절 격자 좌표계 원점의 좌표값,  $l_{mgx}, l_{mgy}, l_{mgz}$  는 감지기 좌표계에서 나타낸 각 차수 회절광 단위 방향 벡터의 요소값들이다.

$$\begin{aligned}
 x_{md} &= x_{mgo} - \frac{l_{mgx}}{l_{mgz}} z_{mgo} \\
 y_{md} &= y_{mgo} - \frac{l_{mgy}}{l_{mgz}} z_{mgo} \quad (m = +1, -1)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

0 차수 회절광의 경우에는 볼록 렌즈의 영향으로 인한 회절광의 굴절을 추가적으로 고려하여 식 (3)과 같이 ±1 차수 회절광의 경우와 유사한 형태로 감지기의 출력값을 구할 수 있다.  $x_{lo}, y_{lo}, z_{lo}$  는 감지기 좌표계에서 나타낸 렌즈면에서의 회절광 좌표값,  $l_{lx}, l_{ly}, l_{lz}$  는 감지기 좌표계에서 나타낸 렌즈를 통과한 후의 0 차수 회절광 단위 방향 벡터의 요소값들이다.

$$\begin{aligned}
 x_{0d} &= x_{lo} - \frac{l_{lx}}{l_{lz}} z_{lo} \\
 y_{0d} &= y_{lo} - \frac{l_{ly}}{l_{lz}} z_{lo}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

역방향 문제의 해를 구하는 과정에서는 수치적 반복 계산 방법(Newton's method)을 이용하였다. 이러한 기구학적 해석 과정과 관련된 수식은 참고 문헌(6)에서 자세히 서술하였다.

### 3. 광학적 측정 오차

#### 3.1 2 차원 위치 감지 소자

회절광의 감지 위치 변화를 측정하기 위한 2 차원 위치 감지 소자로는 연속적인 위치 정보를 얻을 수 있는 PSD(position sensitive detector)와 개별 소자 감지기인 CCD(charge coupled device)가 있다. PSD는 CCD에 비해 추가적인 신호처리를 적용하지 않고도 높은 측정 성능을 얻을 수 있고 빠른 반응 속도를 가지고 있어 여러 가지 측정 시스템의 위치 감지 소자로 사용되고 있다.

측정을 위한 입사광과 강도가 일정한 배경광이 PSD(tetra-lateral type)에 입력될 때 위치 측정값은 식 (4)와 같이 구해진다(7).

$$\begin{aligned}
 x_m &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x I_i(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_i(x, y) dx dy + I_b} \\
 y_m &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} y I_i(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I_i(x, y) dx dy + I_b}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$x_m, y_m$  은 각각 x 축, y 축 방향의 위치 측정값,  $I_i(x, y)$  는 위치 측정을 위한 입사광의 강도 분포,  $I_b$  는 PSD에 입사되는 배경광의 세기를 나타낸다. 식 (4)에서와 같이 PSD는 입력되는 배경광이 없을 때에는 입사광 강도 분포의 무게 중심을 위치 측정값으로 출력한다. 따라서 입사광의 강도가 균일하거나 입사광 단면의 기하학적 중심에 대해 강도 분포가 대칭적으로 존재하지 않으면 입사광의

기하학적 중심과 입사광 강도 분포의 무게 중심은 일치하지 않게 된다. PSD에 입력되는 배경광이 존재하는 경우에는 입사광과 배경광의 강도비에 따라 PSD의 위치 출력값이 영향을 받게 된다.

### 3.2 광학적 측정 오차의 발생

기구학적 해석 과정에서는 광의 진행을 직선이라 가정하는 기하 광학을 이용하였기 때문에 회절광 단면의 기하학적 중심과 강도 분포를 고려한 무게 중심이 일치하지 않으면 기구학적 해석의 결과와 PSD를 이용한 실제의 감지 위치 측정값 사이에는 차이가 존재하게 되고 Fig. 3과 같이 광학적 측정 오차가 발생된다.

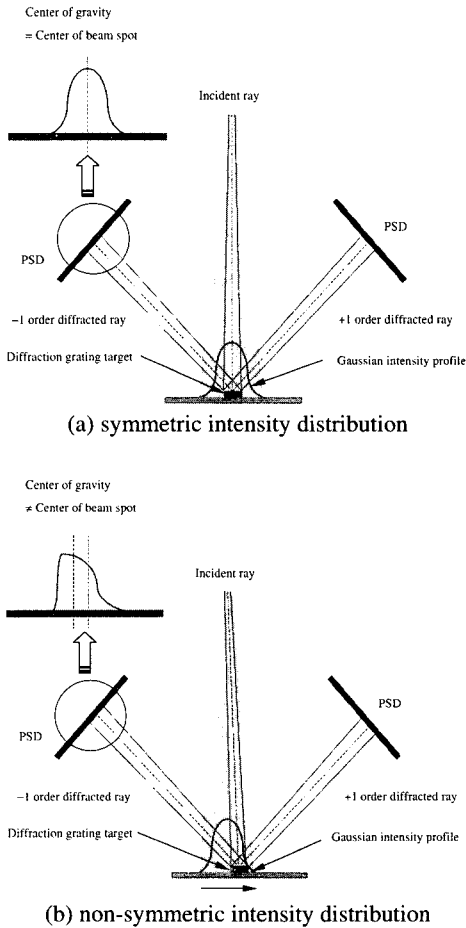
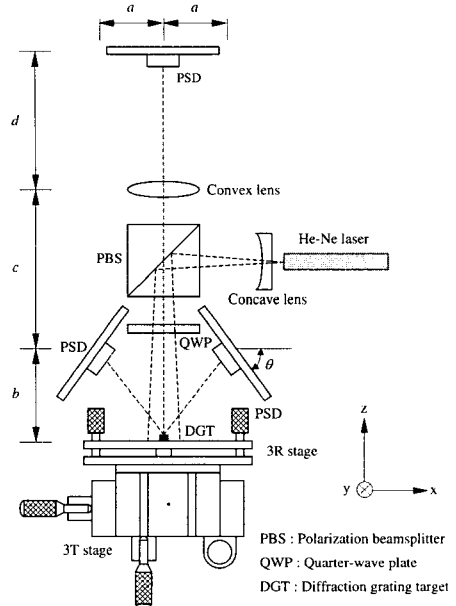


Fig. 3 Difference between center of gravity and geometric center of beam spot on PSD

회절 격자에 입사되는 레이저 광은 일반적으로 가우시안(Gaussian) 형태의 강도 분포를 가진다. 입사광의 중심과 원형 회절 격자 표식의 중심이 일치하는 Fig. 3 (a)의 경우에는 회절 격자 표식의 중심에 대해 입사광 강도가 대칭적으로 분포되기 때문에 PSD에 입사되는 회절광에서도 단면의 기하학적 중심과 강도 분포의 무게 중심이 일치하게 된다. 그러나 Fig. 3 (b)와 같이 평면 변위가 발생되어 입사광의 중심과 원형 회절 격자의 중심이 일치하지 않게 되면 원형 회절 격자면의 입사광 강도가 비 대칭적으로 분포되기 때문에 PSD에 입사되는 회절광 단면의 기하학적 중심과 강도 분포의 무게 중심의 좌표값이 달라지게 되고 측정 오차가 유발된다.

## 4. 실험

### 4.1 실험 장치 구성



$a$ (mm)	$b$ (mm)	$c$ (mm)	$d$ (mm)	$\theta$ (deg.)
37.7	32.3	67.7	181.3	50.1

Fig. 4 Schematic of the experimental setup

광학적 측정 오차와 6 자유도 변위 측정 실험을 위한 실험 장치와 각 설계 변수값은 Fig. 4 와 같다. 원형의 회절 격자 표식(피치: 1200 grooves/mm, 지름: 1 mm)을 6 자유도 스테이지 시스템(resolution: 0.07 $\mu$ m and 2 arcsec)에 고정시켜 6 자유도 변위를 발생시킬 수 있도록 하였다. He-Ne 레이저를 단파장 광원으로 사용하였고 3 개의 PSD(sensitive area: 4.1 mm  $\times$  4.1 mm)를 2 차원 위치 감지 소자로 이용하였다. 오목 렌즈 (초점거리: 32 mm)와 편광 빔 스플리터 (beam splitter)를 이용하여 지름이 10 mm 정도인 입력광이 회절 격자면에 수직으로 입사되도록 하였다. 4 분의 1 파장판(quarter-wave plate)은 0 차수 회절광의 편광 방향을 조절하여 회절 격자에서 발생하는 0 차수 회절광이 다시 레이저 쪽으로 입사되지 않고 볼록 렌즈 (초점거리: 65 mm) 방향으로 진행할 수 있도록 하였다.

#### 4.2 측정 오차 실험

평면 변위 측정시의 측정 오차 발생을 확인하기 위해 PULNIX 社의 TM745 CCD 카메라와 SPIRICON 社의 LBA100A 광속 분석기를 이용하여 회절광의 강도 분포를 측정하였다. 실험 장치의 구성은 Fig. 4 와 동일하고 PSD 의 위치에 CCD 카메라를 설치하여 강도 분포를 측정하였다.

각 방향 변위에 따른 회절광의 강도 분포 변화를 살펴보면 변위가 발생되어도 입사광 강도 분포의 중심이 회절 격자 표식의 중심과 계속 일치되는 방향의 변위에 대해서는 회절광 강도 분포의 형태가 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 평면 변위인 x 축과 y 축 방향의 변위에 대해서는 입사광 강도 분포의 중심과 회절 격자 중심의 불일치로 인해 회절광의 분포가 비대칭적으로 변화되었다.

Figure 5 는 x 축과 y 축 변위에 따른 0 차수 회절광 강도 분포의 변화를 측정한 결과이다. +1, -1 차수 회절광의 경우에도 0 차수 회절광의 경우와 유사한 결과를 나타내었다. 결과에서 밝은 부분은 강도가 강한 부분을 나타내고 어두운 부분은 강도가 상대적으로 약한 부분을 나타낸다. x 축과 y 축의 변위에 따라 회절로 인해 발생하는 강도 분포의 형태는 크게 변화하지 않았지만 변위의 방향에 따라 전체적인 명암의 변화가 나타남을 알 수 있다.

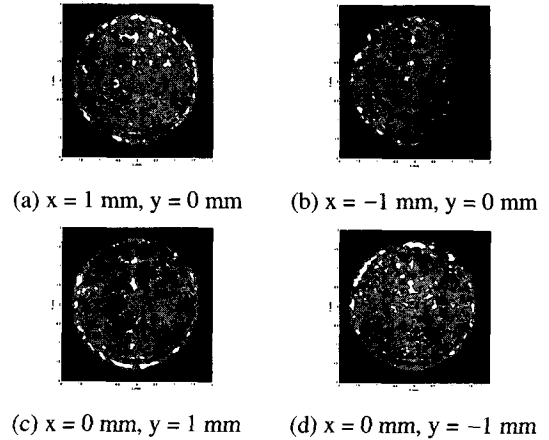
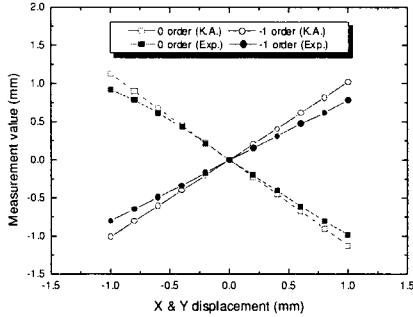
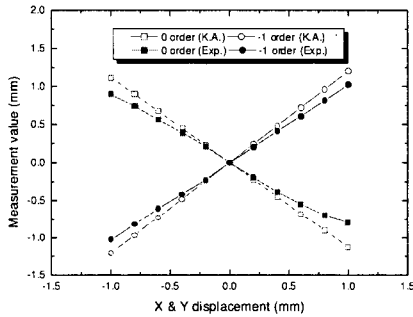


Fig. 5 Variation of intensity distribution of the 0 order diffracted ray (translation in x-axis and y-axis)

평면 변위 측정시에 나타나는 회절광 감지 위치의 기구학적 해석값<sup>6)</sup>과 실험값의 차이를 Fig. 6 에 나타내었다. 결과에서 보면 두 값의 차이가 입력 변위에 따라 거의 선형적으로 증가하고 변위가 큰 부분에서는 지수 함수의 형태로 증가하는 경향도 나타났다. 해석값과 실험값의 차이가 변위에 따라 선형적으로 증가되는 것은 Fig. 5 의 강도 분포 측정의 결과에서 나타난 것처럼 평면 변위에 따른 명암의 변화에서 기인한 것으로 해석할 수 있다. 지수 함수 형태의 증가는 다음과 같이 설명될 수 있다. 변위가 증가될수록 레이저 광의 가우시안 강도 분포의 가장자리 부분이 회절 격자 표식에 입사 되기 때문에 전체적인 입사 광량이 급격하게 감소된다. 따라서 광량이 클 때는 무시될 수 있었던 배경광의 영향이 나타나게 되어 두 값의 차이가 지수 함수의 형태로 증가된다. 이러한 경향은 -1 차수 회절광에서 보다는 0 차수 회절광의 경우가 더 명확하게 나타났는데  $\pm 1$  차수 회절광에 비해 0 차수 회절광의 강도가 상대적으로 약하기 때문에 배경광에 대해서 더 큰 영향을 나타낸 것으로 추론된다. 결과에서 PSD 위치 출력값의 변화가 원점에 대해서 정확히 대칭이 아닌 것은 원점에서 회절 격자의 중심과 입사광의 가우시안 분포의 중심이 정확히 일치하지 않았기 때문이라 생각된다.



(a) x-axis outputs of PSDs



(b) y-axis outputs of PSDs

Fig. 6 Difference between PSD outputs of two cases (one is calculated through kinematic analysis, the other is obtained in experiments)

### 4.3 측정 오차 보상

평면 변위를 측정할 때에 나타나는 회절광 감지 위치의 기구학적 해석값과 실제 측정값의 차이는 측정 오차를 발생시킨다. 광학적 해석을 통하여 구한 회절광의 강도 분포 변화를 이용하여 측정 오차를 보상할 수 있으나 해석 모델에서 실제의 현상을 정확히 묘사하기 힘들 뿐만 아니라, 계산 과정에 프레넬 회절(Fresnel diffraction)을 해석하기 위한 복잡한 적분이 필요하기 때문에 온라인상으로 측정 오차를 보상하기 어렵다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 평면 위치 측정 오차의 원인인 회절광 감지 위치의 기구학적 해석값과 실제 위치 측정값의 차를 감소시켜 측정 오차를 보상하고자 한다. 이를 위해 아래와 같은 위치 측정값 보상

모델을 설정하고 모델에 사용된 인자값들을 실험적으로 구하는 방법을 이용하였다.

$$\tilde{x}_{md} = x_{md} + a_{xm} \exp\left(\frac{X^2}{w_x^2}\right) \exp\left(\frac{Y^2}{w_y^2}\right) x_{md} + b_{ym} X \quad (5)$$

$$\tilde{y}_{md} = y_{md} + a_{ym} \exp\left(\frac{X^2}{w_x^2}\right) \exp\left(\frac{Y^2}{w_y^2}\right) y_{md} + b_{xm} Y$$

위의 식에서  $x_{md}$ ,  $y_{md}$ 는  $m$  차수 회절광 감지 위치의 기구학적 해석값이고  $\tilde{x}_{md}$ ,  $\tilde{y}_{md}$ 는 보상된  $m$  차수 회절광의 좌표값을 나타낸다. 보상된 좌표값은 기구학적 해석값에 두개의 보상항을 더하여 계산된다.

첫번째 보상항은 평면 변위에 따른 회절광의 광량 감소로 인해 나타나는 두 값의 차를 보상하기 위한 것이다. 표식에 입사되는 광의 가우시안 형태 강도 분포 중심과 표식 중심과의 각 축 방향 차이  $X$ ,  $Y$ 에 따라 회절광의 광량은 변화하게 된다. 이로 인해 Fig. 6에서 두 값의 차가 지수 함수 형태 증가하는 경향이 나타난다. 따라서 이와 같은 오차는 가우시안 강도 분포를 나타내는 수식과 식 (4)를 고려하여 감소시킬 수 있을 것이다.  $a_{xm}$ ,  $a_{ym}$ 은 PSD에 입력되는 회절광과 배경광의 강도비와 관계된 인자값이고  $w_x$ ,  $w_y$ 는 가우시안 분포의 각 축 방향 반지름을 각각 나타낸다.

두번째 보상항은 평면 변위에 따른 표식에 입사되는 광의 비대칭적인 강도 분포로 인한 두 값의 차를 보상하기 위한 것이다. 이러한 비대칭적인 분포로 인해 Fig. 5와 같은 회절광의 비대칭적 강도 분포가 나타나고 Fig. 6에 나타난 두 값의 차이가 선형 함수 형태로 증가하게 된다. 따라서 이러한 두 값의 차는 선형 함수 형태의 보상항을 첨가하여 감소시킬 수 있을 것이고  $b_{xm}$ ,  $b_{ym}$ 은 선형 함수의 기울기를 결정하는 인자값이다.

제안된 위치 측정값 보상 모델의 타당성과 성능을 검증하기 위해 Table 1과 같이 각기 다른 6개의 실험 조건에 대하여 x축과 y축 방향의 변위를 -1 mm에서 1 mm까지 변화 시키면서 PSD의 위치 출력값을 측정하였다. 이와 같은 실험을 10회 실행하고 그 결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2에서 나타낸 각각의 값은 식 (5)을 이용하여 보상된 회절광 감지 위치의 기구학적 해석값

과 측정값 차의 최대값, 최소값, 그리고 실효값이다. 결과에서 보면 Fig. 6에 나타난 보상전의 두 값의 차가 보상 과정을 통하여 크게 감소하였음을 알 수 있다. 실험의 조건에 따라 보상 성능의 차이가 있었지만 6개의 각기 다른 실험 조건에 대하여 두 값의 차를  $\pm 10 \mu\text{m}$  미만으로 보상할 수 있었다. 회절 격자와 입사광의 반지름 크기가 가장 작은 case 3에서 보상 성능이 가장 우수하게 나타났지만 회절 격자와 입사광의 반지름 등의 설계 변수와 보상 성능과의 관계에 대해서는 좀 더 고찰이 요구된다.

Table 1 Experimental conditions

	Radius of grating target	unit : mm	
		$w_x$	$w_y$
Case 1	0.5	2.76	2.83
Case 2	0.5	2.23	2.30
Case 3	0.5	1.71	1.75
Case 4	1.0	2.76	2.83
Case 5	1.0	2.23	2.30
Case 6	1.0	1.71	1.75

Table 2 Difference between analysis values and measurement values after compensation

	unit : $\mu\text{m}$		
	Max.	Min.	rms
Case 1	5.45	-5.46	0.23
Case 2	7.73	-5.30	1.12
Case 3	3.73	-3.78	0.33
Case 4	9.43	-6.31	0.66
Case 5	4.92	-5.94	0.62
Case 6	5.94	-4.83	0.76

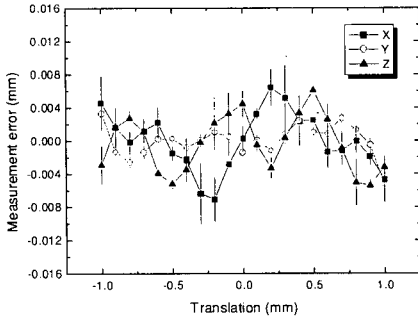
#### 4.4 6자유도 측정 실험

6자유도 측정 시스템의 성능을 평가하기 위해 스테이지 시스템을 이용하여 각 측정 방향의 변위를 일정 간격으로 발생시키고 실제 입력 변위와 측정된 변위의 차인 측정 오차를 구하였다. 직선 변위의 경우에는  $\pm 1 \text{ mm}$  범위에서  $0.1 \text{ mm}$  간격으로 변위를 측정하였다. 회전 변위의 경우에는 직선 변위와 동일하게 21개의 위치에서 변위를 측정하였는데 회전 변위의 방향에 따라 측정 범위는 다르게 설정하였다. 각 측정 방향에 따른 설정된 측정 범위는  $\pm 0.54^\circ$  (x 축에 대한 회전 변위: roll),  $\pm 0.39^\circ$  (y 축에 대한 회전 변위: pitch),  $\pm 1.64^\circ$  (z 축에 대한 회전 변위: yaw) 이다. 측정 방향에 따라 측정 범위를 다르게 설정한 것은 측정 시스템의 각 방향 측정 민감도가 서로 다르기 때문에 PSD 상의 회절광 감지 위치가 감지 영역 밖으로 벗어나지 않고 각 방향의 측정에서 거의 동일한 부분의 PSD 측정면이 이용되도록 하기 위해서다. 이와 같은 방법의 측정 실험을 6회 실행하였다. 실제 입력 변위는 마이크로미터(micrometer)의 눈금 값으로부터 구하였고 외부 변위 센서를 이용하여 보정하였다. 회전 입력 변위의 경우에는 간단한 기하학적 관계식을 이용하여 구하였다.

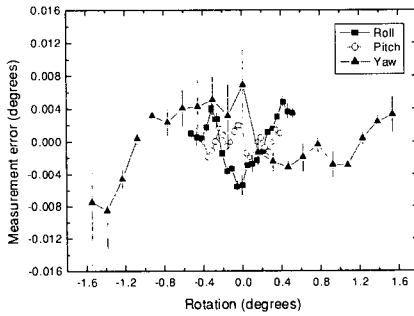
Figure 7은 변위에 따른 각 방향 측정 오차를 나타낸 것이다. 그래프에 나타난 오차값은 6번의 실험에서 측정된 오차의 평균값이고 얇은 선은 표준 편차값을 나타낸다. 측정 시스템의 보정 과정에서 계통적 오차(systematic error)를 제거할 수 있어 측정 오차는 변위에 비례하여 증가하지 않고 영의 값 주위에서 변동한다. 측정 오차의 범위는 선형 변위의 경우  $\pm 10 \mu\text{m}$ , 회전 변위의 경우  $\pm 0.012^\circ$  정도 였다.

Yaw 방향의 측정값이 비교적 큰 오차를 나타내었는데 다른 측정 방향에 비해 넓은 측정 범위에서 실험한 것 외에 앞에서 서술한 바와 같이 측정 시스템의 각 측정 방향의 민감도는 동일하지 않고 특히 yaw 방향의 경우는 roll 방향이나 pitch 방향에 비하여 낮은 측정 민감도를 가지고 있기 때문에 동일한 크기의 회전 변위에 대해 yaw 방향의 경우가 PSD의 위치 출력값이 가장 작게 변한다. 따라서 동일한 크기의 PSD 위치 측정 오차에 대하여 yaw 방향의 변위 측정값이 가장 크게 영향을 받게 되고 큰 측정 오차를 나타내게 된다. 직선 변위의 경우에도 이와 동일한 원인으로 x 축

과 z 축의 측정 오차가 y 축에 비해 크게 나타난다.



(a) Translation in x, y, and z-axis



(b) Rotation about roll, pitch, and yaw-axis

Fig. 7 Measurement error against the variation of displacement

Table 3은 각 방향간 측정값의 누화(crosstalk)를 나타낸 것이다. 누화의 표준 편차값은 Fig. 7에 나타난 측정 오차에 비해 작은 값을 가지므로 측정 시스템의 성능에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 결과에서 보면 x 축 방향의 입력 변위에 대해 z 축 방향과 pitch 축 방향, y 축 방향의 입력 변위에 대해 roll 축 방향과 yaw 축 방향 등과 같은 몇 개의 측정 방향 간에는 다른 경우에 비해 보다 큰 누화가 발생되었는데, 이러한 측정 방향간에 대해서는  $\pm 1$  차수 회절광의 감지 위치 변화가 유사하게 나타나기 때문에 다른 측정 방향간에 비해 측정값의 누화가 크게 나타난다. 이와 같은 측정 방향간의 누화 현상은 측정 시스템의 설계 변수값을 조절하거나 추가적인 광학 소자를 이용하여 감소시킬 수 있을 것이다. 이외에도 보정 행렬 (calibration matrix)을 이용한 측정값과 보정값의 사상(mapping)으로도 누화 현상을 줄일 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 연구들의 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는 새로운 광학식 정밀 6 자유도 측정 시스템을 개발하였다. 개발된 측정 시스템은 1 개의 광원과 1 개의 평면 형태의 표식을 이용하기 때문에 구조가 간단하고 측정의 제한 사항을 최소화할 수 있어 미소한 측정물에도 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

Table 3 Standard deviations of measured crosstalk for the each directional displacement

	Direction of input displacement					
	X	Y	Z	Roll	Pitch	Yaw
X ( $\mu\text{m}$ )	-	0.407	1.760	1.664	0.781	0.540
Y ( $\mu\text{m}$ )	0.182	-	2.676	3.323	0.208	0.870
Z ( $\mu\text{m}$ )	3.639	0.918	-	1.730	3.079	2.225
Roll (arcsec)	1.752	9.773	9.212	-	1.195	3.947
Pitch (arcsec)	8.733	1.690	7.711	2.073	-	5.678
Yaw (arcsec)	1.678	9.615	8.204	7.559	1.639	-



기구학적 해석을 통해 2차원 위치 감지 소자의 출력값으로부터 6 자유도 변위를 구할 수 있는 방법을 도출하였다. 기구학적 해석 시에 이용된 기하 광학의 가정이 실제의 광과 일치하지 않기 때문에 발생하는 광학적 측정 오차를 해석하였다. 그리고 이를 감소시킬 수 있는 간단한 보상식을 제안하고 실험을 통하여 보상 성능을 확인하였다. 제안된 보상식은 광학적 측정 오차를 크게 줄일 수 있어 6 자유도 변위 측정시의 오차를 직선 변위의 경우에는  $\pm 10 \mu\text{m}$ , 회전 변위의 경우에는  $\pm 0.012^\circ$ 의 미만으로 감소시켰다.

실험 장치 구성에 사용된 PSD의 성능을 높이면 보다 정밀한 측정 시스템을 구성할 수 있을 것이다. 또한 측정 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 최적화를 통한 설계 변수값의 결정과 보다 엄밀한 광학적 해석이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 BK21사업에서 일부 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

1. E. H. Bokelberg, H. J. Sommer III, and M. W. Trethewey, "A Six-Degree-of-Freedom Laser Vibrometer," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 178, No. 5, pp. 643~667, 1994.
2. C. S. Vann, "Six Degree of Freedom Sensor," U.S. Patent Office, Patent #5 883 803, 1999.
3. I. J. Busch-Vishniac, A. B. Buckman, W. Wang, D. Qian, and V. Mancevski, "Noncontact Position Measurement Systems Using Optical Sensors," U.S. Patent Office, Patent #5 367 373, 1994.
4. N. K. S. Lee, Y. Cai, and A. Joneja, "High-Resolution Multidimensional Displacement Monitoring System," *Optical Engineering*, Vol. 36, No. 8, pp. 2287~2293, 1997.
5. D. Post, B. Han, and P. Ifju, "High Sensitivity Moiré: Experimental Analysis for Mechanics and Materials," Springer-Verlag, New York, Inc., pp. 65~72, 1994.
6. J. A. Kim, K. Kim, E. W. Bae, S. Kim, and Y. K. Kwak, "Six-Degree-of-Freedom Displacement

Sensing Method Using a Diffraction Grating as a Cooperative Target," 17<sup>th</sup> IEEE IMTC, pp. 582~586, 2000.

7. HAMAMATSU, Technical Document, 1987.