

## 적층 패턴 기반의 서피스 인코딩 방법

정광석\*, 박성준<sup>+</sup>

(논문접수일 2011. 12. 26, 수정일 2012. 02. 02, 심사완료일 2012. 02. 03)

### Surface Encoding Method Based on the Superposed Pattern

Kwang Suk Jung\*, Sung Jun Park<sup>+</sup>

#### Abstract

Instead of the surface pattern arranged repeatedly in two axial direction on a plane, we propose double patterns superposing two one-axial linear patterns as a reference target for surface encoding. A upper layer of the superposed pattern is the transparent glass with grooves cut in it at a fixed pitch. The position is sensed by detecting a shift of beam due to difference of a refractive index. And a lower layer is the aluminum with color-coated grooves. The amount of beam reflected on the layer varies according to its targeting position and is detected for encoding. For the above reference pattern, we can detect two-axial positions using only the single beam. Furthermore, the pattern size can be expanded with a size of the detector kept constant, meaning that the measured range can be expanded easily. In this paper, we review the existing optical encoding methods for grid pattern, and discuss the hardware implementation of the suggested surface encoding method.

**Key Words** : Geometric optic(기하 광학), Grid pattern(격자 패턴), Reflectivity(반사율), Refractive index(굴절률), Surface encoding(서피스 인코딩)

## 1. 서론

반도체, 평판 디스플레이(Flat panel display)공정에서 평면 스테이지 등의 2축 구동 시스템이 갖는 의미는 대단히 중요하며 세대 증가에 따른 스테이지의 대면적화는 위치 측정, 구동 메커니즘의 성능과 밀접히 연관되어있다. 일반적으로 스테이지를 구성하는 각 축은 중첩되어 연동되며 따라서 각 축 구동기의 위치 참조 격자(reference pattern)로 이용되는 엔코더 또는 리니어 스케일(linear scale) 등의 오차는 가동 헤드에 중첩되어 나타난다<sup>(1)</sup>. 따라서 고정밀로 헤드의 위치를 제어하기 위해서

는 이중으로 헤드의 위치를 고정단(fixed fram)에서 측정해야하며 이로 인한 복잡한 서보 구조(servo architecture)와 강건 제어기 설계의 난제를 파생시킨다. 이러한 메트랄로지(metrology) 오차를 보상하기 위해 이중 루프(dual loop)간의 사영 구간을 모델링하여 접근하는 방법<sup>(2)</sup>과 이동 개체를 고정단에서 동작 영역 전 구간에 걸쳐 직접 측정하는 방법<sup>(3,4)</sup>이 있지만 이를 위한 대표적인 측정 수단인 레이저 간섭계의 경우광원에 대한 안정화와 온도 드리프트 문제로 향온, 향습 등 환경에 대한 제약이 상당히 크다<sup>(5,6)</sup>.

본 논문은 그리드 패턴 등의 참조 격자를 이용하여 2차원 변

\* 한국교통대학교 기계공학과  
+ 교신저자, 한국교통대 기계공학과 (park@cjnu.ac.kr)  
주소: 380-702 충북 충주시 대학로 50

위 정보를 직접 측정할 수 있는 서피스 인코딩 방법에 관한 것으로 이러한 측정 방법은 전술한 다축 구동 시스템의 계측 부하를 완화시켜 서보계를 간결하게 할 수 있고 측정 영역의 확대에 효과적으로 대처할 수 있다.

## 2. 격자 기반 광학식 측정법

위치 측정의 참조 격자로 이용할 수 있는 그리드 패턴 또는 격자는 Fig. 1에서와 같이 그 단면 형상에 따라 0차, 1차, 2차 등으로 구분할 수 있다. 이와 같이 주기적으로 패턴화 되어있는 격자 위에서 격자의 산과 골을 구분해내어 인코딩할 수 있는 광학식 방법으로 가장 대표적인 것이 리니어 스케일 위에서 레티클(reticle)을 통해 레이저 빔을 조사시켜 반사된 빔의 회절, 간섭 등을 이용해 패턴의 유무 정보를 추출해내는 방법을 들 수 있다. 0차 오더 패턴과 달리 1차 오더의 경우 사면을 통해 빔이 난반사되므로 이용된 사례가 없고 2차 오더의 경우에는 후술하는 바와 같이 2차원 격자 형태로 구성하고 경사면의 기울기를 측정하여 변위 정보로 변환해내는 방법이 제안되었다. 본 장에서는 0차 오더 격자를 대상으로 1차원 변위 정보를 검출할 수 있는 방법을 리뷰하고 근자에 발표된 서피스 인코딩 방법의 장단점 분석을 통해 새로운 방식의 이차원 격자 필요성을 제시한다.

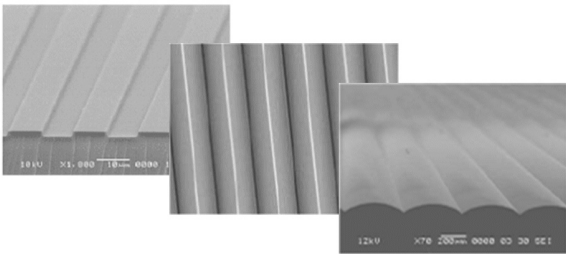


Fig. 1 Various grid patterns classified according to cross section

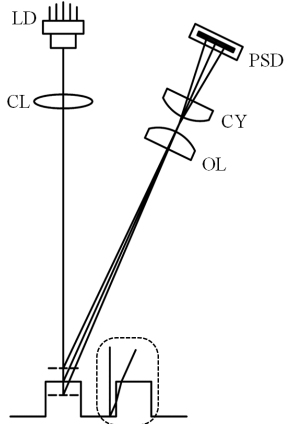


Fig. 2 Optical layout of triangulation applied to the general laser displacement sensor

0차 오더 기반의 참조 격자는 사각 단면의 산과 골을 구분하는 방법으로 귀결된다. 매크로 수준에서 바둑판 모양의 강자성 재질 격자를 구동기의 자기저항 변화를 위한 참조 격자로서 뿐만 아니라 동시에 이동량 계측을 위한 참조 격자로 동시에 이용해 왔던 Saywer 모터의 경우 산과 골을 구분하는 방법으로 정전용량<sup>(7)</sup>, 자기저항<sup>(8)</sup> 등의 방법 외에 Fig. 2와 같은 삼각 측량법<sup>(9)</sup>을 적용하였다. 레이저 다이오드(LD)를 통해 발진된 빔은 콜리메이터(CL)를 통해 평행광이 되고 측정면에 반사되어 대물렌즈(OL)로 집광되고 측정면의 위치에 따라 굴절되도록 원통형 렌즈(CY)를 통해 PSD(position sensitive detector)로 수광되어 측정면의 위치를 검출한다. 측정면의 높낮이는 PSD에 맺히는 상의 위치를 변화시키며 따라서 산과 골의 위치가 구분된다. 그림 안의 점선 영역에서와 같이 이웃하는 치(tooth)의 영향을 배제하기 위해서는 격자의 길이 방향으로 빔이 조사되어야 한다.

상기 삼각 측량법과 같이 반사면의 높이를 직접 측정하지 않으면 면에 수직으로 입사하는 빔의 경우 산과 골에서 수광빔에 차이가 없으므로 광학 요소를 가변시켜 간접적으로 위치를 검출해야한다. Fig. 3은 산과 골에 관계없이 빔이 반사면에서 초점이 맞춰지도록 대물렌즈의 위치를 가변시켜 가변된 대물렌즈의 위치 정보로 산과 골을 구분해내는 레이저 포커싱 방법이다<sup>(10)</sup>. 레이저 빔은 콜리메이터, 대물렌즈를 통해 측정면에 입사되는데 이 때 초점이 맞지 않으면 반사된 빔은 빔 분할기(BS)를 통해 포토다이오드(PD)로 수렴할 때 핀홀을 통과하지 못한다. 따라서 초점이 맞춰지도록 대물렌즈를 서보 구동기로 가변시켜 초점이 맞으면 포토다이오드에서의 수광량이 최대가 되므로 이러한 광정보를 되먹임(feedback)하여 구동기를 조절하고 가변된 대물렌즈의 위치로 산과 골 또는 반사면의 높낮이를 간접적으로 측정할 수 있다.

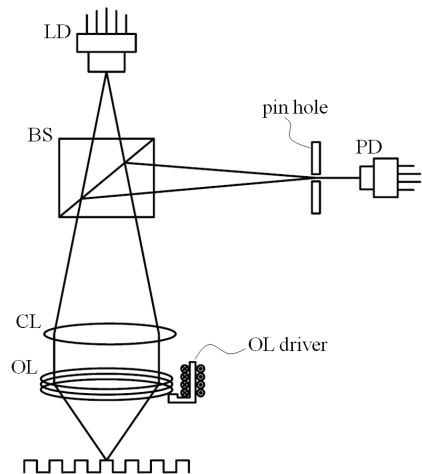


Fig. 3 Measurement of depth through change of object lens for laser beam to be focused on the target surface

이러한 방법 외에 면에 빔을 입사시켜 격자의 높낮이를 구분할 수 있는 방법으로서 광디스크 픽업(pick-up) 시스템의 포커싱 오차 보상에 이용되는 Fig. 4와 같은 비점수차법(astigmatism)을 들 수 있다. 레이저 다이오드를 통한 평행광은 편광 분할기(PBS)와 1/4 파장판(QP)을 거쳐 면에 입사된 후 다시 파장판을 통해 위상 전이된 후 분할기에서 우측으로 전환되어 원통형 렌즈를 통해 4분할 포토다이오드에 수렴한다. 이 때 대물렌즈와 원통형 렌즈간의 상대 위치에 따라 빔은 비점수차를 발생시키며 초점이 맞지 않으면 수광 빔의 모양에 왜곡이 생긴다. 이를 설명한 것이 Fig. 5인데 초점 평면보다 멀거나 또는 가까운 곳에 반사면이 있을 때 4분할 포토다이오드에 수광되는 빔의 형상이 Fig. 5(a)와 (c)처럼 (b)와 달라지므로 각각의 포토다이오드의 전압 비교를 통해 반사면의 위치를 판단할 수 있다<sup>(11)</sup>. 광픽업에서와 같이 포커싱의 유무 혹은 산과 골의 판별 외에 발생하는 전압과 반사면의 위치를 보정하여 변위 센서로 이용하려는 시도도 있다.

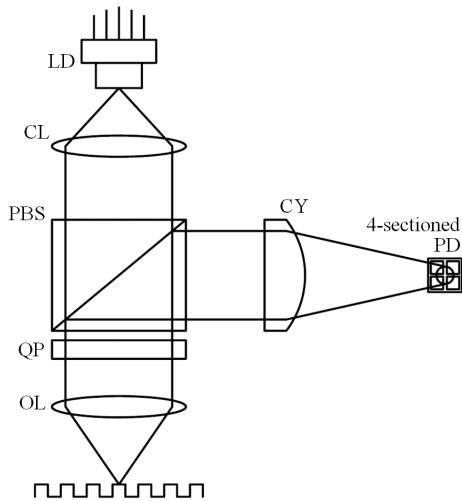


Fig. 4 Optical layout of the pick-up system using astigmatism

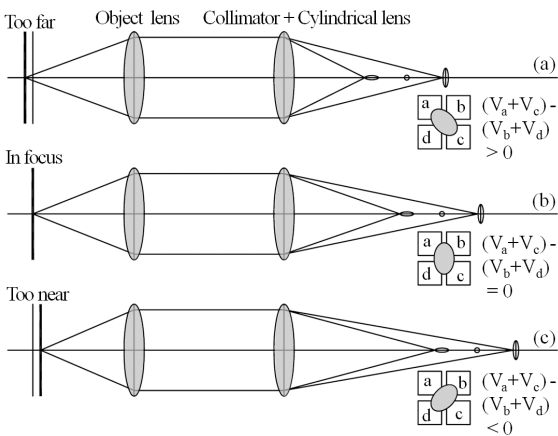


Fig. 5 Principle of astigmatism (a) too far (b) in focus (c) too near

상기 0차 오더의 선형 격자를 이용하여 2축의 평면 위치를 측정하기 위한 방법으로 Fig. 6과 같은 격자를 고려할 수 있다<sup>(12,13)</sup>. 좌측과 우측이 각각 y축, x축과 나란하기 때문에 좌측에서의 빔과 광학계를 포함하는 감지기(detector)는 x축 위치를 그리고 우측의 감지기는 y축 위치 변화를 측정할 수 있다. 다차원 평면 엔코더로 명명된 장치들은 대부분 이러한 형태를 취한다. 각각의 감지기는 패턴 주기를 기준으로 90° 전이된 부빔을

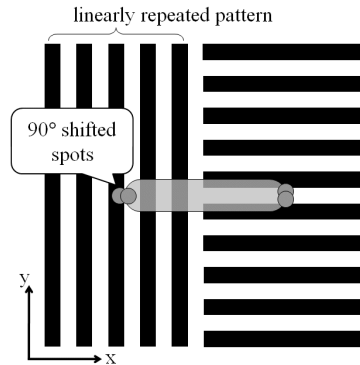


Fig. 6 General surface encoding method with two dimensional, orthogonal pattern

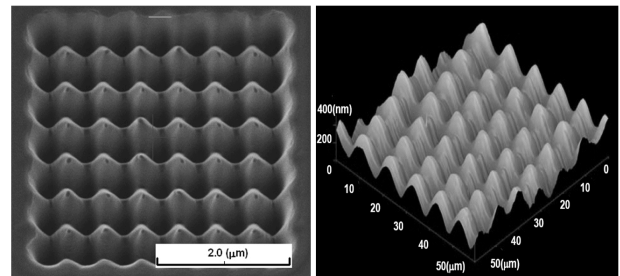


Fig. 7 Two-dimensional pattern with cross section degree of 1st or 2nd order

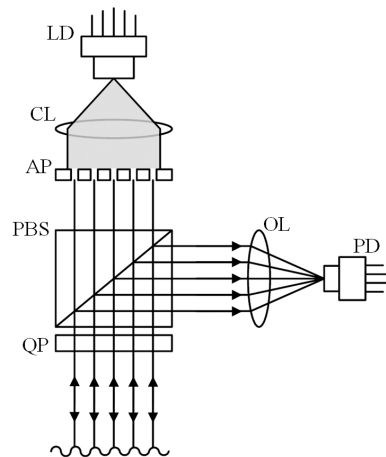


Fig. 8 Optical layout of surface encoding system measuring a slope of each pattern grid

통해 방향성을 판별할 수 있다. 따라서 이러한 방식의 경우 각 감지기의 측정 영역은 패턴 영역의 절반뿐이며 패턴이 확대되면 전 영역을 검출하기 위해 감지기의 크기도 같이 확대되어야 한다.

선형 패턴의 병렬 배치 외에  $x, y$  방향으로 주기성을 갖는 2차원 패턴은 Fig. 7에서와 같이 단면이 1차 혹은 2차를 갖도록 구성할 수 있다. 단면이 2차 오더인 엠보싱 형태를 갖춘 2차원 패턴에 대한 서피스 인코딩 방법이 Fig. 8과 같이 제안되었다<sup>(6)</sup>. 레이저 빔은 조리개(AP)와 편광 분할기, 1/4 파장판을 거쳐 측정면에 입사한 후 반사되어 편광 분할기에서 대물렌즈를 거쳐 포토다이오드로 입사하는데 이 때 반사면의 기울기에 따라 포토다이오드로 최종 수렴하는 빔의 광량이 달라진다. 이러한 유닛을 두 개 구비하여 조합하면  $x, y$ 축 양방향으로 변위 변화량을 검출할 수 있다. 그러나 반사면의 기울기 측정을 통해 변위 정보를 얻기 때문에 패턴의 재현성과 정밀도 확보에 큰 어려움이 있다. 따라서 2차원 인코딩을 위한 패턴은 가장 많은 광계측 방법이 존재하는 0차 오더 단면이 바람직한 것을 알 수 있으므로 본 논문에서는 0차 오더의 1차원 패턴을 적층하여 구성한 이중 패턴으로 2차원 변위 정보를 얻는 방법을 제안한다.

### 3. 적층 패턴과 인코딩을 위한 광계측 방법

단방향 주기성을 갖는 참조 패턴으로 1차원 변위 정보를 얻는 광학적 방법은 전술한 바와 같이 다양하게 제시되어왔다. 이러한 패턴을 오퍼티컬 글라스와 같이 투명한 재질을 이용하여 상층에 배치하고 하층에는 상층 격자와 수직인 방향으로 주기성을 갖는 패턴을 배치하여 2차원 정보를 얻을 수 있다. 이러한 개념의 패턴 예를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 상층은 사각 산과 골이 있는 격자 구조이며  $y$ 축 방향으로 주기성을 갖는 투명한 재질의 패턴이며 하층에는  $x$  방향으로 반사도가 서로 상이한 패턴이 단일 평면에 형성되어있다. 이러한 패턴에서  $s_x, s_x'$ 를 따라 빔이 조사되면 하층 패턴에만 영향을 받고  $s_y, s_y'$ 를 따라 빔이 조사되면 상층 패턴에만 영향을 받는 것을 쉽게 예측할 수 있다. 상층 패턴의 경우 산과 골의 굴절률 변화에 따른 빔의 시프트된 양을 검출하여  $y$ 축 방향 인코딩을 수행하고 하층 패턴의 경우 패턴간의 광 반사량을 검출하여  $x$ 축 방향 인코딩을 수행한다.

제안된 적층 패턴의 인코딩을 위한 광계측 방법으로 Fig. 10의 광학계를 고려할 수 있다. 레이저 다이오드를 통해 발진된 빔은 콜리메이터와 대물렌즈를 통해 상층 패턴에 입사하는데 입사된 빔은 상층부에서 굴절되고 하층면에서 반사되어 전반사 거울(MR)을 거쳐 원통형 렌즈에서 재차 집속되고 빔 분할기에서 분할되어 50%의 빔은 광량 측정을 위해 포토다이오드로 나머지 50%의 빔은 2분할 다이오드로 수렴된다. 상층부 산과 골에 따라 빔이 시프트되어 2분할 다이오드의 각 영역으로

상이 땀지며 각 포토다이오드의 전압차를 증폭하여 산과 골의 유무를 판별한다. 동시에 포토다이오드에서는 하층면 반사량의 변화를 측정하여 하층 패턴의 이동량을 판별한다.

상층에 입사되는 빔이 굴절률 변화에 의해 시프트되는 양  $w_i$ 는 Fig. 11을 통해 계산할 수 있다. 공기의 굴절률을  $n_1$ 이라하

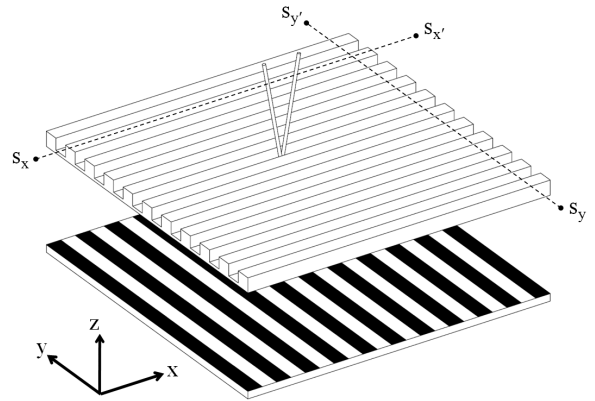


Fig. 9 Superposed reference pattern repeated orthogonally

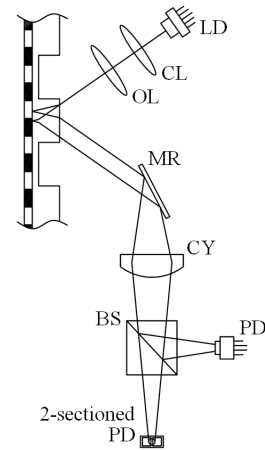


Fig. 10 Optical layout for detecting the suggested superposed pattern

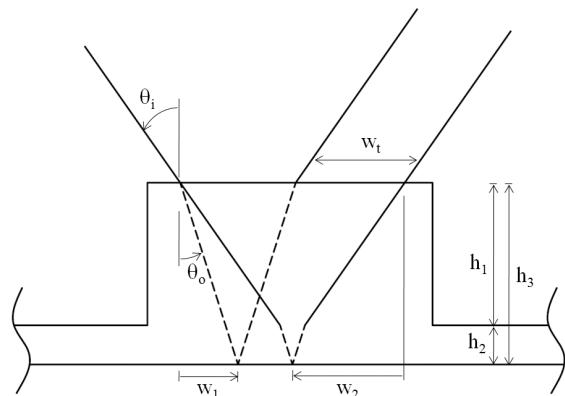


Fig. 11 Shift of beam due to a refractive index of the upper layer

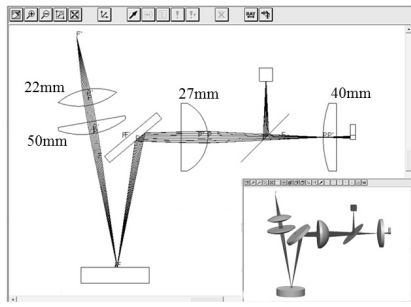


Fig. 12 Geometric optic design using the commercial tool 'light tool'

고 투명 재질의 굴절률을  $n_2$ 라 할 때 입사각과 굴절각의 관계는 다음과 같다.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_o \quad (1)$$

빔의 시프트 된 양  $w_i$ 는

$$w_i = 2(w_2 - w_1) \quad (2)$$

인데  $w_1, w_2$ 는 위 그림에서의 기하학적 관계를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_1 = h_3 \tan \theta_o \quad (3)$$

$$w_2 = h_1 \tan \theta_i + h_2 \tan \theta_o \quad (4)$$

따라서  $w_i$ 는 식 (2)에 (3), (4)를 대입하여 계산할 수 있다. 인코딩을 위한 광학계 설계의 점검 사항은 최소 패턴 폭 이하로 빔 웨이스트를 줄여야 하는 것과 상단 패턴의 굴절률 차에 기인하는  $w_i$ 가 2분할 다이오드의 각 영역에 초점이 맺히도록 빔 폭을 확대하는 원통형 렌즈와 대물렌즈의 초점 심도 결정에 있다. 이를 위해 Fig. 12에서처럼 기하광학 툴인 light tool 6.3을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 통해 0.5mm, 50  $\mu$ m의 상단 패턴에 적합하도록 각 광학요소의 초점 심도를 결정하였는데 검증의 용이성과 범용 부품 적용을 위해 각 렌즈의 지름은 모두 1인치로 하였다. 그 결과는 Fig. 12에 기입한 것과 같다.

#### 4. 시험 결과 및 고찰

전장에 제시한 적층 패턴에 대한 타당성 시험을 수행하기 위해 Fig. 13과 같은 시험 장치를 구성하였다. 적층 패턴의 상층부는 굴절률 1.51의 투명한 아크릴 소재로 제작되었으며 레이저 가공을 통해 50 $\mu$ m의 패턴 폭을 갖는다. 이 때 패턴 하단면

의 식각에 따른 난반사로 인해 골이 없는 완전히 개방된 형태로 패턴을 제작하였으며 따라서 Fig. 11의  $h_2$ 는 0이다. 또한 하층부의 경우 50 $\mu$ m의 폭과 5 $\mu$ m의 깊이로 알루미늄에 패터닝한 후 경질 아노다이징 후처리를 통해 5~10 $\mu$ m의 막을 입혀 골 영역을 매운 후 전면을 연마처리하여 반사도가 다른 패턴을 얻었다. 제작된 시편의 광학 현미경 사진은 Fig. 14와 같다.

시험 장치를 통한 타당성 시험은 단순하게 시편을 포함한 2 자유도 스테이지를 이동시킬 때 x, y축 방향으로 각각 50 $\mu$ m마

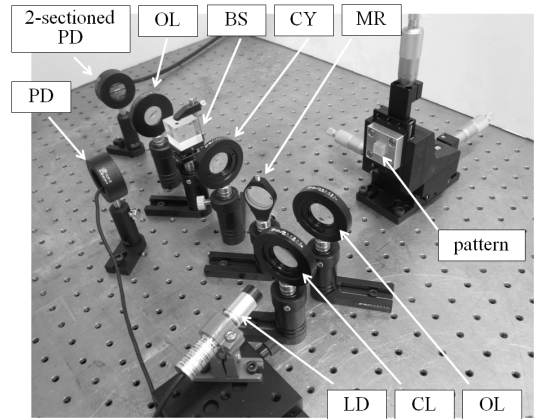


Fig. 13 Photograph of test system for verifying the feasibility of the suggested encoding method

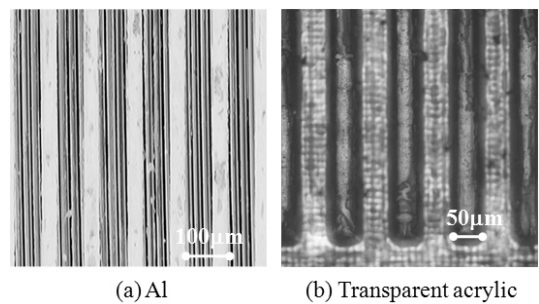


Fig. 14 Photograph of test sample

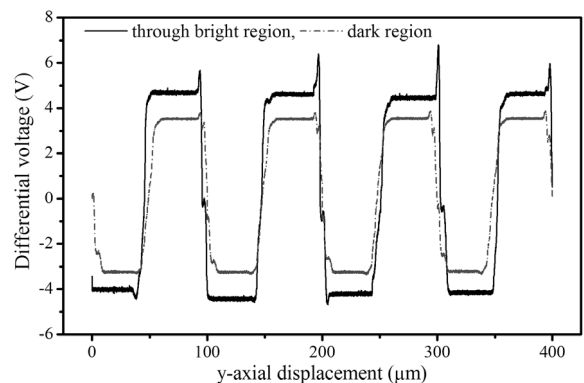
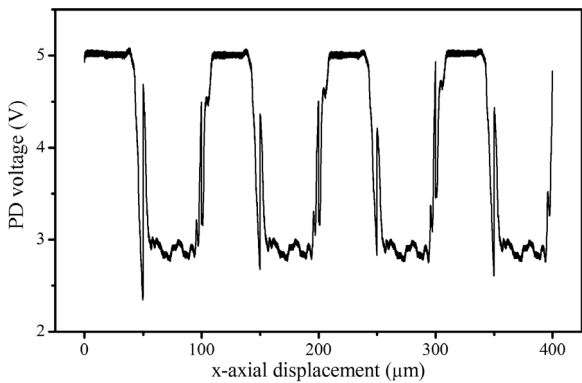


Fig. 15 Voltage difference of 2-sectioned photodiode according to y-axis displacement of laser beam



**Fig. 16 Voltage variation of photodiode according to x-axis displacement of laser beam**

다 2분할 포토다이오드의 분할 영역  $1.5 \times 1.5 \text{mm}$ 에 빔이 전이 되어 수렴하는지 그리고 포토다이오드를 통해 광량 변화가 검출되는지 여부를 판단하는 방식으로 수행되었다. 우선, Fig. 9에서 레이저 빔이  $s_y, s_y'$ 을 따라 y축 방향으로 이동할 때 패턴 산 유무에 따른 굴절률 변화에 기인하는 빔의 디플렉션(deflection)을 검출하는 2분할 다이오드 전압차를 측정하여 Fig. 15에 나타내었다. 이 때 하부층 패턴 위치에 따라 궤환하는 빔의 절대량이 달라지므로 반사도가 상대적으로 큰 패턴 영역을 따라 이동할 때의 전압차를 5V가 되도록 증폭시킨 후 동일한 증폭 조건에서 반사도가 적은 영역에서의 빔 이동시 전압차를 일점 쇄선으로 나타내었다. 이때의 포토다이오드 전압차는  $\pm 3.5\text{V}$ 의 진폭을 나타내며 5V 대비 충분히 디코딩 가능한 수준에 있는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 방법으로 빔을  $s_x, s_x'$ 을 따라 x축 방향으로 이동시킬 때 하부층 패턴의 반사도 차를 포토다이오드로 측정하여 Fig. 16에 나타내었다. 하부층 패턴의 알루미늄 영역은 폴리싱되어있어 상대적으로 표면 반사율이 균일하지만 후처리된 영역에서는 Fig. 14(a)에서와 같이 다소 불규칙한 변화를 확인할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 16에 그대로 투영되어 나타난다. 즉, 알루미늄 영역에서의 포토다이오드 수광 전압은 5V로 증폭시킨 결과인데  $50\mu\text{m}$  구간에서 거의 변화가 없는 결과를 나타내는데 반해 후처리된 영역에서는 3V 수준에서 다소 거친 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 약 2V의 전압 차는 패턴 유무를 디코딩하기에 충분한 전압차임을 알 수 있다. x축으로 변화는 상부층 패턴의 산 유무에는 관련성이 없다.

적층 패턴에 조사되는 단일 빔만으로 x, y축 방향으로의 디코딩이 모두 가능함을 앞서 시험 결과를 통해 확인하였다. 실제 응용시에는 포토다이오드를 통해 검출된 신호를 오픈 컬렉터 등의 신호 처리 방식을 통해 사각 파 형태로 전환하여 패턴 유무를 처리해야 한다. 또한 각 축으로의 방향 검출을 위해서는 Fig. 6에서와 같이 공간적으로 90도 위상 전이된 이중 빔을 조사하는 것이 필요하다. 이러한 적층형 서피스 인코딩에서의 관

건은 패턴을 저가로, 정밀하게 제작할 수 있는가에 달려있다. 상부층의 경우 롤 압착 기술을 적용하면 수십  $\mu\text{m}$  두께의 투명 필름에 산과 골을 형성하는 것이 가능하고 하부층의 경우 오퍼티컬 글래스나 불투명 필름 위에 크롬 등의 메탈 코팅 후 포토 에칭을 통해 반사도가 다른 패턴을 얻는 것이 가능하다. 향후 더욱 연구되어야 할 주제이다.

### 5. 결론

공작 기계의 공구 침단, 로봇의 침단 위치 등은 작업 정밀도를 높이기 위해 고정 프레임을 기준으로 한 보정 작업이 반복 수행되어야하므로 자체적으로 검증할 수 있는 참조 테스트 패턴을 내재하고 있으면 대단히 용이하게 응용할 수 있다. 특히 이러한 패턴 기반 디지털 인코딩 방법은 기존 레이저 추적 방식의 계측 방법보다 훨씬 강건하고 편리하게 이용될 수 있다. 특히 본 연구에 제안된 바와 같이 이러한 패턴을 적층시켜 이차원 변위 정보를 단일 빔만으로도 획득할 수 있으므로 간단한 광학계 구성을 포함한 단일 측정 유닛으로 고정밀의 변위 정보를 획득하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 투명한 상층과 반사율을 다르게 설정한 하층으로 구성된 적층 패턴을 대상으로 단일 레이저 빔만으로 이층 변위 측정이 가능함을 실험적으로 검증하였다. 상층 격자 판별은 굴절률 차에 기인하는 빔의 편이 정보를 이용하였으며 제작된 패턴과 동기하는 위치 신호를 얻을 수 있었다. 패턴 기반 측정법의 정밀도는 기본적으로 패턴 정밀도에 전적으로 의존하므로 적층 패턴을 더욱 정밀하고 재현성있게 구현할 수 있는 방법론의 개발은 향후 연구되어야 할 주제인 것으로 판단된다.

### 후 기

이 논문은 2011년 정부재원(교육과학기술부 학술연구조정사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(2011-0013168).

### 참 고 문 헌

- (1) Kim, Y. S., Song, I. S., Jung, J. P., Han, J. H., and Youn, W. J., 2003, "A Study on Measurement of Linear Cycle Plane Positioning Accuracy of NC Lathe," *Trans. of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 12, No. 2, pp. 53~58.
- (2) Kim, S. W., Lee, H. S., Oh, J. S., and Lee, C. W., 1995, "A Fine Motion Mechanism of Dual Servo Control for Ultraprecision Positioning," *Trans. of Korean Society for Mechanical Engineering*, Vol. 19, No. 11,

- pp. 2875~2884.
- (3) Kim, W. J., and Trumper, D. L., 1998, "High-precision Magnetic Levitation Stage for Photolithography," *Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 66~77.
  - (4) Cho, W., Hyun, K. I., and Kim, J. H., 2008, "A Study on Real-time Measurement Method of Precision Stage Position Errors using Directly Probing Optical Device," *Proc. of KSMTE Spring Conf.*, pp. 465~468.
  - (5) Lee, J. Y., Kim, M. J., Lee, S. S., and Jeon, E. C., 2004, "A Study on Curvature Radius Measurement using Laser Interferometer," *Trans. of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 34~40.
  - (6) Gao, W., Dejima, S., Yanai, H., Katakura, K., Kiyono, S., and Tomita, Y., 2004, "A Surface Motor- driven Planar Motion Stage Integrated with an XYθz Surface Encoder for Precision Positioning," *Precision Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 329~337.
  - (7) Miller, G. L., 1990, *Capacitively Incremental Position Measurement and Motion Control*, US Patent: 4893071.
  - (8) Butler, Z. J., Rizzi, A. A., and Hollis, R. L., 1998, "Integrated Precision 3-DOF Position Sensor for Planar Linear Motors," *Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2652~2658.
  - (9) Brennemann, A. E., and Hollis, R. L., 1995, "Magnetic and Optical Fluorescence Position Sensing for Planar Linear Motor," *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 101~107.
  - (10) KEYENCE Corp., Application note, <[http://ikeyence.co.kr/application/appli\\_204022.asp?no=4022](http://ikeyence.co.kr/application/appli_204022.asp?no=4022)>.
  - (11) Lee, S. H., and Jung, K. S., 2008, "Precision Displacement Measurement using Astigmatism," *J. of Korean Society Precision Engineering*, Vol. 25, No. 7, pp. 87~94.
  - (12) Lee, S. H., Jung, K. S., Park, E. S., and Shim, K. B., 2008, "Surface Encoder based on the Half-shaded Square Patterns (HSSP)," *Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 9, No. 3, pp. 82~84.
  - (13) Kim, M. S., Park, S. J., Lee, S. H., and Jung, K. S., 2011, "Surface Encoding Methodology Capable of Measuring Large Rotation," *Proc. of KSMTE Autumn Conf.*, pp. 146.