

# 고분해능을 갖는 간섭계형 리니어 스케일 제작 및 성능 평가

## Implementation and performance estimation of interferometer-type linear scale with high-resolution

김수진\*, 은재정\*, 최평석\*, 권오영\*\*

Su Jin Kim\*, Jae Jung Eun\*, Pyung Suk Choi\*, Oh Yeong Kwon\*\*

### 요약

미소 단위로 이동하는 물체의 이동 거리를 측정하기 위한 정밀 측정기기, 반도체 제조 장치, 공작기계 등의 위치 제어는 매우 중요한 요건이며, 이러한 장치들의 이동거리 측정에 대한 정확도는 전체 시스템의 성능을 좌우하게 된다. 따라서 정밀기기에서 이동 거리를 고정밀도로 측정할 수 있는 센싱 디바이스가 요구되며, 여기에는 레이저 간섭계의 분해능에 준하는 분해능을 갖고, 경제성 및 디지털 인터페이스에 대한 장점을 갖는 광학식 엔코더가 사용될 수 있다. 본 논문에서는 이동 거리를 측정하기 위해 회절 원리를 기초로한 고분해능 및 디지털 인터페이스가 용이한 간섭계형 리니어 스케일을 실험적으로 구성하였다. 그리고 이 리니어 스케일에서 발생된 간섭 신호는 제작된 광 검출기와 신호처리 회로를 통해 디지털화하였다.

그 결과 실험적으로 구성된 간섭계형 리니어 스케일은 스케일의 이동에 대하여 어떠한 분주 회로도 추가하지 않고, 단지 쉬운 광학적 구성으로 0.5 $\mu$ m의 분해능을 얻었다.

### Abstract

Position controls are very important in semiconductor manufacturing devices, machine tools, precision measuring instruments, etc. to measure the distance of movement of moving objects in minute units and the accuracy of measurement for the moving distance in these devices affect the performance of the whole devices. Therefore, in those precision instruments, a sensing device that can measure the distance of movement with high-precision resolution is required. Thus an optical encoder that has such advantages as easy digital interface, economical price, and a resolution similar to that of laser interferometers can be used. In this paper, a interferometer-type linear scale with easy digital interface and high-resolution has been set up and measured the distance of movement based on the diffraction principle. Interference signals produced in this optical setup of the linear scale have been digitalized through fabricated photodetectors and designed signal processing circuits.

A resolution of 0.5 $\mu$ m is acquired from the experimental interferometer-type linear scale without for the movement of scales any additional dividing circuits. It is shown that from this experiment a high-resolution distance measurement device can be designed by a simple optical setup.

**Keywords** : Optical encoder, Interferometer, Linear scale

## I. 서론

산업용 머신 툴, 산업 로봇, 고정밀 장치와 같은 미소 단위로 이동하는 물체의 이동 거리나 방향을 측정하는 다양한 계측기나 반도체 제조 장치 등에서 고정밀도로 위치를 제어할 수 있는 능력은 시스템에서 매우 중요하며, 이러한 기기들의 변위 검출에 대한 정확도는 장치의 성능을 좌우하게 된다<sup>1)~4)</sup>. 그러므로 이러한 변위를 고정밀도로 측정할 수 있는 센싱 디바이스는 필수이며, 여기에 높은 정확도를 요구하는 변위량 검출을 위해 광학식 엔코더(optical encoder)가 사용될 수 있다.

일반적으로, 범용 자기식 엔코더(magnetic encoder)는 주위 환경에 대한 영향을 덜 받고 수명이 긴 장점이 있으나 높은 분해능을 얻는데는 한계가 있으며 매우 고가이므로, 점점 고 정밀화되고 있는 센서에 적용하는 데에는 제약이 있다. 이에 비해 광학식 엔코더는 먼지나 외부 환경 등에 영향을 받기 쉽지만, 고분해능을 달성함에 있어 많은 장점을 가지고 있으며, 디지털 시스템과의 인터페이스가 용이하고 또한 경제성이 우수하다. 따라서 계측장치의 디지털화나 산업 기계 등의 위치 검출에 광학식 엔코더가 폭넓게 사용되고 있다. 광학식 엔코더는 기계장치의 직선운동이나 회전운동의 변위나 속도를 검출하기 위해 사용되는

일종의 A/D 변환기로서 직선 또는 원판형 스케일을 가지고 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 스케일에 의해 각도를 측정하는 엔코더를 샤프트(shaft) 또는 로터리 엔코더(rotary encoder)라고 선형 위치 측정을 위한 엔코더를 선형 엔코더(linear encoder)로 분류할 수 있으며, 또한 엔코더 신호에 의해 증가형이라 불리는 인크리멘탈 엔코더(incremental encoder)와 고정형이라 불리는 앵솔루트 엔코더(absolute encoder)로 분류할 수 있다<sup>[11],[5]</sup>.

광학식 엔코더는 회절격자(diffraction grating)와 회절광 신호를 검출하는 리딩 헤드(reading head)의 상대적인 이동으로부터 발생하는 전기적인 신호를 발생시켜 이동과 관련된 정보를 얻을 수 있으며, 이러한 전기적 신호의 발생은 무아래(Moiré) 효과, 회절 및 간섭과 같은 방법으로 얻어질 수 있다.

본 논문의 제II장에서는 광의 회절 및 간섭계형 리니어 스케일의 측정원리에 대하여 논의하였으면, 제III장에서는 광학적으로 구성된 리니어 스케일과 제작된 리니어 스케일 컨트롤러의 특성 및 성능을 평가하였다. 그리고 제IV장에서는 결론을 맺는다.

## II. 회절 원리를 이용한 간섭계형 리니어 스케일

### 1. 회절격자에 의한 광의 회절

회절격자(diffraction grating)는 홈(groove)이나 구멍(aperture) 등이 주기적으로 배열되어 출력되는 파의 위상이나 진폭에 주기적인 변화를 일으키게 하는 광학 장치이다. 이같은 회절격자는 투과형(transmitting type)과 반사형(reflecting type)으로 분류할 수 있고, 투과형 격자는 일반적으로 홀로그래픽 기법(holographic method)을 이용하여 제작되며, 반사형 회절격자는 광학적으로 편평한 유리 위에 코팅된 알루미늄 박막에 금을 그어 만든다. 그림 1은 투과형 회절격자에 의한 광의 회절을 나타내고 있으며, 여기서  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 의 파장을 갖는 입사광은 회절격자에 의해 특정한 각도인  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 로 회절되고 이때, 회절각은 입사각에 의존한다. 특히 브래그 조건(Bragg condition)을 만족하는 광학 배열이 이루어질 경우, 높은 출력과 고분해능의 신호를 얻을 수 있다. 이 때 브래그 조건을 만족하는 브래그 각(Bragg angle)은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다<sup>[8],[9]</sup>.

$$\sin \theta_B = \pm \frac{\lambda}{2A} \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 회절격자의 주기,  $\lambda$ 는 광의 파장이다. 위 식에서 알 수 있듯이 회절 각도는 회절격자의 주기와 입사파의 파장에 의존적이다.

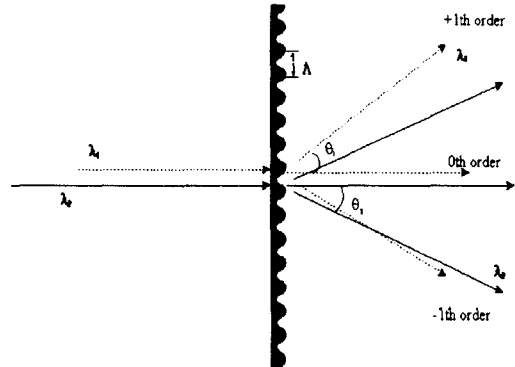


그림 1. 회절격자에 의한 빛의 회절.

Fig.1. A diffraction of light by transmitting diffraction grating.

그림 2는 광학 엔코더 중 투과형 회절격자를 이용한 간섭계형 리니어 스케일의 광학적인 구성 나타낸 것이다. 입사광은 회절격자에 의해 두 회절 광으로 회절되며, 이 회절 광은 거울에 의해 반사된 후 빔 스플리터(beam splitter : BS)에 의해 서로 중첩되어 서로 간섭이 일어나게 된다.

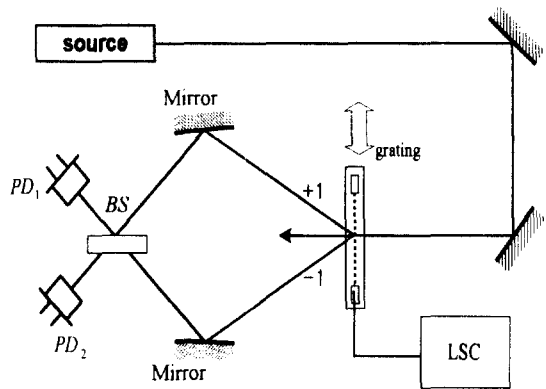


그림 2. 간섭계형 리니어 스케일의 광학적 구성.(LSC:선형 스테이지 컨트롤러)

Fig.2. Optical setup of interferometer-type linear scale.(LSC:Linear Stage Controller)

### 2. 간섭계형 리니어 스케일의 거리 측정 원리

그림 2는 광원으로부터 방출된 단색광이 회절격자에 의해 여러 차수의 광으로 회절되어 질 때, 회절광 중  $\pm 1$  차 회절 광만을 취한 것을 보여주고 있다. 그리고 위의 식 (1)은 수직 입사에 대한 회절격자 방정식(grating equation)으로 아래와 같이 수정할 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$\sin \theta_n = \frac{n\lambda}{P}, \quad -90^\circ \leq \theta_n \leq 90^\circ \quad (2)$$

여기서  $n$ 은 양의 정수 또는 음의 정수를 갖는 회절 차수( $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ )이고,  $\lambda$ 는 광의 파장, 그리고  $P$ 는 회절격자의 피치(pitch), 즉 주기이며,  $\theta$ 는 회절광의 각도이다.

광파(optical wave)의 위상 변화  $\phi (= \vec{k} \cdot \vec{r})$ 는 광의 전파 상수  $\vec{k}$  ( $k = 2\pi/\lambda$ )와 방향 벡터  $\vec{r}$ 로써 나타낼 수 있다. 그러므로 그림 2에서 화살표 방향으로 회절격자가  $X$ 만큼 이동한다고 가정하면, 이때 +1차 회절광의 위상 천이는  $+2\pi X/P$ 가 되며, -1차 회절광의 위상 천이는  $-2\pi X/P$ 가 된다. 이러한 +1차 회절광과 -1차 회절광은 BS에 의해 합쳐지고 상대적인 위상에 의존하여 보강 간섭(constructive interference)하거나 상쇄 간섭(destructive interference)이 일어나게 된다. 따라서 피치가  $P$ 인 회절격자에 의해 회절된 광에 대한 광 검출기(photodetector)에서의 간섭 강도(intensity)의 변화에 대응하는 위상 변화는 회절격자의 이동 거리  $X$ 와 관련된 다음 식으로 주어질 수 있다<sup>[10],[11]</sup>.

$$\phi = \frac{4\pi n}{P} \times X \quad (3)$$

식(3)에서 +1차 회절 광과 -1차 회절 광을 중첩시켜 간섭을 일으키고, 발생된 간섭 신호는 회절격자가 한 피치 이동하는 동안  $4\pi$ 의 위상 변화를 유발하게 된다. 결과적으로 보강 간섭하거나 상쇄 간섭에 의해 발생하는 두 주기의 밝고 어두운 신호의 변화를 검출하면 회절격자 즉 스케일의 이동 거리  $X$ 를 알 수 있게 된다.

### 3. 광 신호처리

그림 2에서 보는 바와 같이 스케일이 이동할 때, 스케일에 의해 나뉘어진 두 회절광이 BS에 의해 중첩되어 간섭된 신호를 광 검출기 PD<sub>1</sub>과 PD<sub>2</sub>로 검출할 수 있고, 이때 출력되는 두 직교위상(quadrature) 신호의 강도  $I_A$ 와  $I_B$ 는 스케일에 의해 회절된 두 광파에 대한 전기장의 제곱 형태로 주어진다<sup>[12]</sup>.

$$\begin{aligned} I &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= A^2 + B^2 + AB\cos(\phi_a - \phi_b) \end{aligned} \quad (4)$$

이 때,  $E_1 = \exp(i\phi_a)$ 이고,  $E_2 = \exp(i\phi_b)$ 이다. 따라서 광 검출기에서 출력되는 신호는 그림 3과 같고 식(5a, 5b)의 형태를 갖는다.

$$I_A = I_0[1 + a \cos(\phi)] \quad (5a)$$

$$I_B = I_0[1 - a \cos(\phi)] \quad (5b)$$

여기서  $I_0$ 는 평균 강도이고,  $a$ 는 진폭이며, 두 빔의 위상차  $\phi = 4\pi n X/P$ 이다. 이것은 BS에 의해 발생하는 내부 및 외부 반사에 의해 결국 두 광 검출기의 강도는  $180^\circ$  위상차를 갖게 된다.

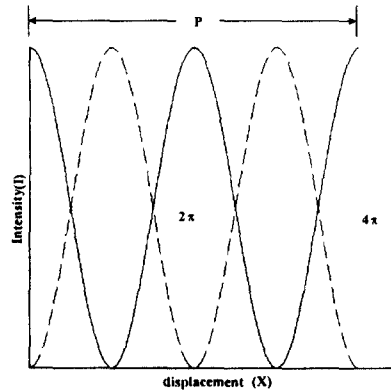


그림 3. 광 검출기 출력 신호.(P: 격자 피치, X: 격자 변위)

Fig.3. Photodetector output signal.(P:grating pitch, X:grating displacement)

그 후,  $180^\circ$  위상차를 갖는 신호는 각각 신호처리 회로에 입력되어 전기적인 작업이 수행되어진다. 이 때, 두 광 검출기에 입사하는 광의 강도는 그림 4와 같이 회절격자의 회절 효율에 의해 영향을 받게 된다. 그림 4에 나타난 회절 효율은 다중 슬릿의 경우 프라운호프 회절에 기본적인 회절격자의 회절 효율을 나타낸 것이며,  $\pm 1$ 차 회절광이 약 8%의 회절 효율을 가짐을 보여준다. 두 광 검출기에 입사하는 광의 강도는 거울에 의한 반사 및 BS에 의한 반사 및 투과로 인해 실제로는 더 작은 회절 효율을 나타낸다. 이와 같이 낮은 회절 효율은 스케일의 이동 거리를 측정함에 있어 출력되는 광신호의 세기를 감소시키는 결과를 낳고, 외부 광에 의한 오차를 유발할 수 있다.

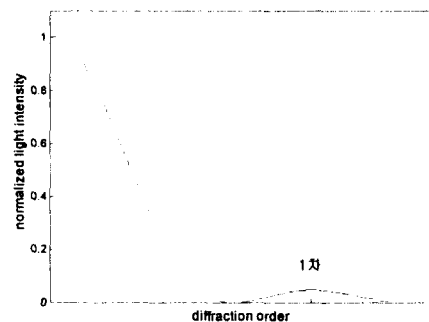


그림 4. 회절격자의 회절 효율.

Fig.4. Diffraction efficiency of a diffraction grating.

광 검출기 출력 신호는 광 주파수 잡음 및 광 검출기의 광전 변환 잡음 등을 제거하기 위해 저주파 통과 필터(low-pass filter)를 거쳐 전압 버퍼(voltage follower)에 입력되며, 1차적으로 잡음이 제거된 신호는 증폭기에 의해 다음 식과 같은 형태를 갖는다.

$$e_1 = A \cos\left(\frac{4\pi X}{P}\right) \quad (6a)$$

$$e_2 = -B \cos\left(\frac{4\pi X}{P}\right) \quad (6b)$$

이렇게 증폭된 신호는 비교기(comparator)에 입력되어 디지털 레벨로 변환되고 차동 증폭기에 각각 입력되어 실제로 카운팅하기 위해 필요한 레벨로 변환된다. 결국 디지털 레벨로 변환된 두 위상신호는 실제 이동량을 나타내기 위해 마이크로프로세서에 입력되고 실제 이동량을 디스플레이 할 수 있게된다.

### III. 실험 및 결과 고찰

#### 1. 실험 구성

실험을 위한 이동체의 이동 거리 측정은 마이크로미터를 장착한 스테이지를 리니어 스테이지 컨트롤러(Linear Stage Controller : LSC)로 조절하면서 실제 이동 거리를 측정하여 간섭계형 리니어 스케일에 의해 측정된 이동 거리와 비교하였다. 그림 5는 전체적인 간섭계형 리니어 스케일의 실험장치 구성을 나타낸 것이다.

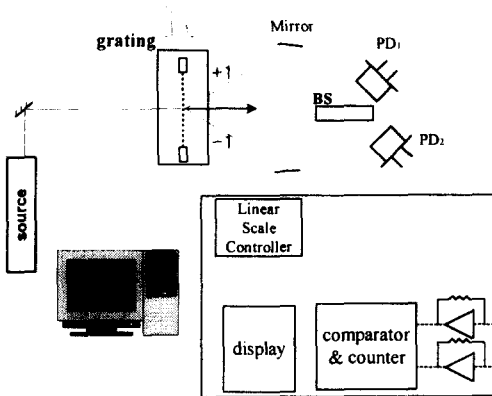


그림 5. 실험 장치 구성.(BS: 빔 분할기, PD<sub>1</sub>, PD<sub>2</sub>: 광 검출기, P: 격자 피치)

Fig.5. Experimental equipment setup.(BS:Beam splitter, PD<sub>1</sub>, PD<sub>2</sub>:Photodetector, P:grating pitch)

간섭계형 리니어 스케일에는 광원의 파장은 633nm, 최대 출력이 4mW인 He-Ne 레이저(Uniphase Model-1100p)가 사용되었다. 이 레이저광은 두개의 거울에 의해 반사되어 회절격자로 구성된 스케일에 수직 입사하도록 구성

되었다. 이때, 실험에 사용된 회절격자는 폴리에스테르 필름(polyester film)으로 홀로그래픽 기법(holographic method)에 의해 제작된 것으로 크기는 300×25.4mm(가로×세로)이고 25.4mm의 간격에 대해 전체 25400개의 홈(groove)을 가지므로, 1mm 당 1000개의 홈을 가진다. 따라서 회절격자의 한 피치 간격은 1μm가 되며, 회절광의 회절각은 식(2)에 의하여 36°가 된다. 이 때의 회절각은 광학부품의 배열에 큰 영향을 주며, 실제로 측정된 회절광의 회절 효율은 약 4%로 이론 값보다는 낮았다. 36°의 각으로 회절된 ±1차의 두 회절 광은 각각의 거울에 의해 적절한 각으로 반사되고, 그 후 BS를 통과시켜 각각 두 회절 광을 중첩시켜 간섭이 일어나도록 하였다. 두 회절광의 간섭에 의해 발생된 밝고 어두운 주기의 신호는 두 개의 광 검출기에 의해 검출되어 전기 신호로 변환되며, 필터링 및 신호 증폭과 같은 신호 처리를 거쳐 마이크로프로세서에 입력된 후 이동거리를 LCD로 디스플레이 하였다.

#### 2. 실험 및 결과 고찰

우선 제작된 광 검출기의 성능과 광학계 실험 구성의 오정렬을 확인하기 위해 광학계 출력 신호를 광 검출기로 측정하였다. 또한 LSC로 스케일의 위치를 변화시켜 가며 두 광 검출기에서 출력되는 각각의 파형을 오실로스코프로 측정하였다. 그림 6은 1μm의 피치 간격의 회절격자를 갖는 스케일을 LSC로 0.02mm/s의 속도로 정밀 이동시켰을 때, 두 광 검출기 PD에서 얻어진 출력을 오실로스코프로 측정한 파형이다. 여기서, 출력은 스케일의 이동에 따른 광 강도(intensity)의 변화로 나타내었다. 그림에서 두개의 광 검출기 PD에 의해 검출되는 파형은 식(5a)와 식(5b) 같이 서로 180° 위상차를 가짐을 확인할 수 있으므로 광학계 구성에 있어서의 정렬 및 광 검출기의 성능이 적합함을 알 수 있다.

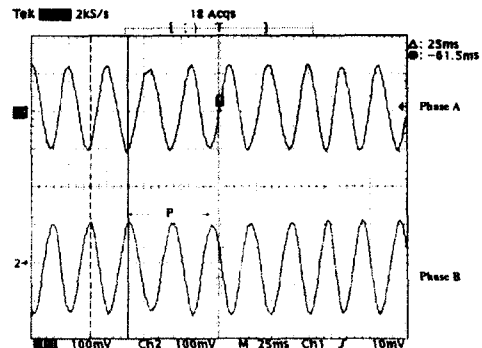


그림 6. 실험적으로 구성된 광학계의 출력 파형.

Fig.6. An output waveform of a experimentally optical setup.

다음으로 신호처리 회로 및 광학적으로 구성된 간섭계형

리니어 스케일의 실험 데이터를 이용하여 리니어 스테이지의 이동 속도에 따른 리니어 스케일의 응답 특성을 측정하였다. 그림 7은 리니어 스테이지의 스케일의 이동 속도를 0.5mm/s로 했을 때, 광 검출기와 디지털 회로의 출력 특성을 나타낸 것이다. 그림 7의 출력들은 각각 디지털화된 출력 파형과 광 검출기에 의한 출력 파형이다. 결과에서 보듯이, 광 검출기와 디지털 회로를 통해 출력된 파형들로부터 광학계의 배열 및 광 검출기의 성능이 적합함을 확인할 수 있다. 하지만, 출력에서 나타나는 파형의 크기나 형태의 어긋남은 주로 스케일에 입사하는 빔의 입사각과 깊은 연관을 가지며, 또한 스케일의 표면 상태와도 관련된다.

간섭계형 리니어 스케일의 분해능은 기준 스케일의 피치 간격에 의해 제한된다. 실험에서 사용한 스케일의 피치 간격이 1 $\mu$ m이므로 어떠한 분할 회로도 추가되지 않을 경우 0.5 $\mu$ m의 분해능을 광학계에서 얻게 된다. 다시 말해 실제 광학계에서 얻을 수 있는 분해능은 스케일의 한 피치의 이동에 따라 4 $\pi$ 의 위상 변화를 얻을 수 있다. 이것을 확인하기 위해 눈금 간격이 10 $\mu$ m이고 360° 회전하면 500 $\mu$ m를 선형적으로 이동하게 되는 마이크로미터가 장착된 리니어 스테이지로 스케일을 이동시켜 그 값을 측정하였다. 이때, 리니어 스테이지는 스텝 모터의 펄스에 의해 기동되며 한 펄스 당 0.072° 회전하도록 설정되어 있다. 이러한 설정으로 펄스 열을 모터에 가하여 스케일을 2 $\mu$ m 이동시켰을 경우, 0.5 $\mu$ m 당 한 펄스가 출력되며, 이에 대한 실험 결과를 그림 8의 카운터 출력 파형 A와 광 검출기 출력 파형 B로 나타내었다.

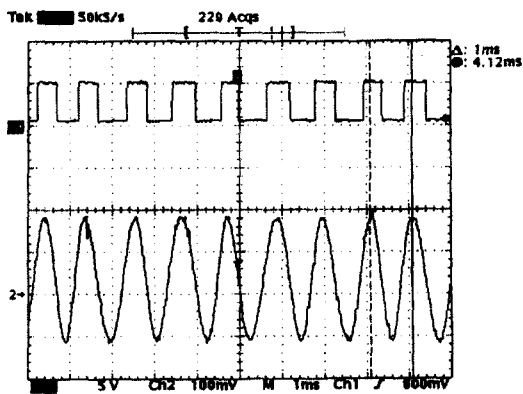


그림 7. 스케일이 0.5mm/s의 속도로 움직일 때, 리니어 스케일의 출력 파형.  
 Fig. 7. An output waveform of linear scale when a scale is moved in 0.5mm/s velocity.

출력 결과에서 볼 수 있듯이, 이론과 일치하는 4 $\pi$ 의 위상 변화가 모두 발생함을 확인할 수 있다. 따라서, 간섭계형 리니어 스케일의 분해능이 0.5 $\mu$ m임을 알 수 있다. 이때 파형 A의 첫 번째 펄스 폭과 파형 B의 펄스 폭이

약간 넓은 것은 리니어 스테이지의 기동과 정지시의 모터 특성에 의해 발생하며, 이것은 리니어 스테이지의 이동 거리가 길어질 때 오차의 원인이 될 수도 있다. 그리고 2번째와 4번째 펄스에 나타나 있는 피크는 외부 진동에 의해 가장 큰 영향을 받으며, 이것은 잠재적으로 오차의 원인이 될 수 있다.

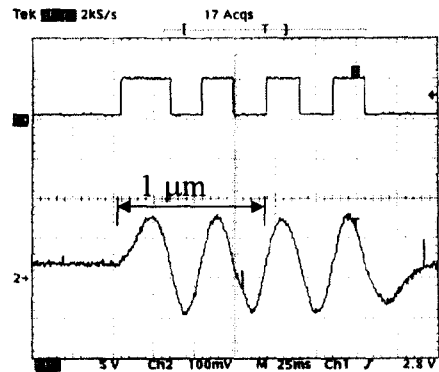
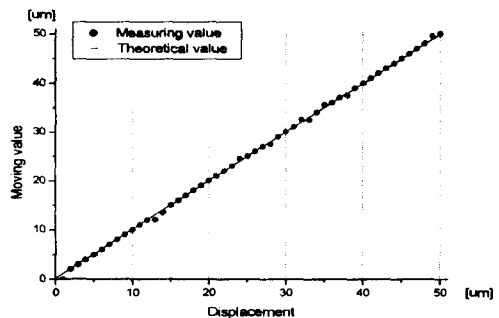


그림 8. 스케일이 2 $\mu$ m로 움직일 때, 광 검출기의 출력 파형 카운터.  
 Fig.8. Counter and photodetector output waveform when the scale was moved in 2 $\mu$ m.

간섭계형 리니어 스케일은 모터의 기동시나 정지시의 스케일의 떨림, 스케일과 입사되는 빔과의 관계 등에 의해 오차가 발생하게 되고 결국 이러한 영향들은 리니어 스케일의 성능을 좌우하게 된다. 따라서 이러한 요인들에 대한 오차를 알아보기 위해 리니어 스테이지의 실제 변위에 대한 이동 거리를 측정하였다. 그림 9의 결과에서 보듯이 실험적으로 구성된 간섭계형 리니어 스케일은 작은 오차를 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 10과 11은 각각 간섭계형 리니어 스케일의 광학부와 광 신호를 처리하는 컨트롤러를 나타내고 있다. 그림 10은 앞서 설명한 것과 같이 광 신호를 디지털화하여 실제 리니어 스테이지의 이동 변위를 디스플레이 하도록 제작되었다.



#### IV. 결론

본 논문에서는 회절격자를 이용한 간섭계형 리니어 스케일을 실험적으로 구성하였으며, 구성된 광학계 및 제작된 신호처리 회로를 통해 실험적인 단계에서 그 적합성을 평가하였다. 두 회절광에 의해 발생된 직교 위상 신호를 검출하는 광 검출기 및 수광부의 아날로그 연산회로 및 디지털 회로를 구성하여 스케일의 이동에 의해 한 피치당 두 주기 즉,  $4\pi$ 의 위상 변화를 발생시킨다는 것을 실험을 통해 확인하였으며, 그 결과 쉬운 광학 구성을 통해  $0.5\mu\text{m}$ 의 분해능으로 이동 거리를 측정할 수 있었다. 그리고 입력된 광 신호는 신호처리 회로를 통해 디지털화하여 스케일의 이동에 비례하는 출력을 발생시킴으로써 실제의 스케일 이동 거리를 펄스 신호의 수로 결정할 수 있게 하였다. 이 때, 발생하는 여러 에러 요인들에 대해 고속 이동체에 대한 신호 검출, 디지털 분할 및 신호처리의 새로운 방식이 적용된다면, 보다 낮은 에러와 높은 분해능을 갖는 간섭계형 리니어 스케일을 구현할 수 있을 것이다.

앞으로 이동 거리 뿐 아니라 이동 방향까지 알 수 있는 간섭계형 리니어 스케일을 구현하기 위해서는  $90^\circ$ 의 위상차를 갖도록 하는 광학구성이 추가되어야 하며, 또한 분해능의 향상을 위해 새로운 신호처리 기법이 고려되어야 한다. 또한 온도나 진동 등의 외부 요인 등에 의한 에러에 대처할 수 있는 장치의 개선이 고려되어야 될 것으로 생각된다.

접수일자 : 2001. 6. 7      수정완료 : 2001. 7. 9

본 연구는 2000년 창원대학교 교내 연구비 지원에 의해 수행되었음.

#### 참고 문헌

1. J. R. Ren Mayer, *Optical Encoder Displacement Sensors, (Measurement Instrumen and Sensors Handbook)* CRC Press LLC, 1999.
2. W. Zhou and L. Cai, "A positioning method for hard disk servowriter using an auto focus laser encoder," *Proceedings of the IEEE/ASME*, Sept. 1999.
3. J. Akedo, Y. Kato, and H. Kobayashi, "high-Precision detection method for the reference position in an optical encoder," *Applied Optics*, vol. 32, no. 3, May 1993.
4. K. Engelhardt and Peter Seitz, "High-resolution optical position encoder with large mounting tolerances," *Applied Optics* vol. 36, no. 13, pp.

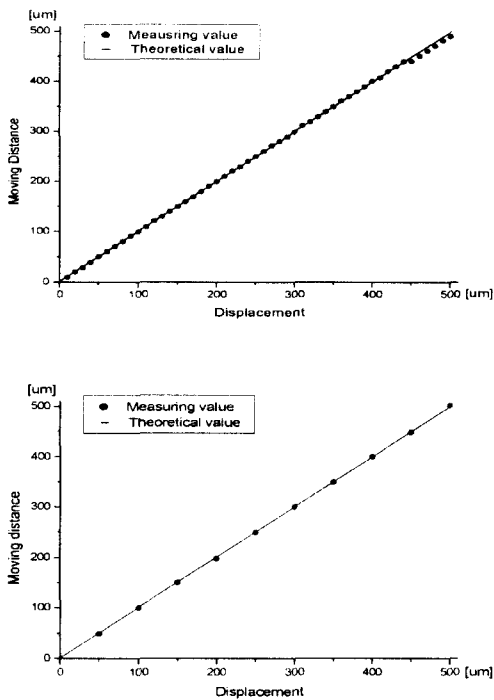


그림 9. 실제 변위에 대한 이동 거리.

Fig.9. A distance of movement for real displacement.

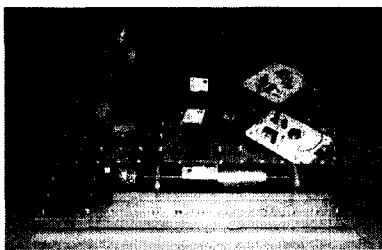


그림 10. 간섭계형 리니어 스케일의 광학부.

Fig.10. An optical part of interferometer-type linear scale.

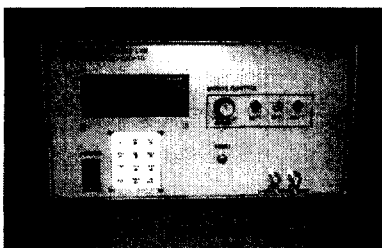
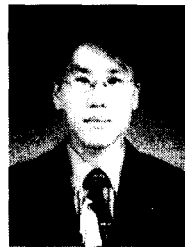


그림 11. 간섭계형 리니어 스케일 컨트롤러.

Fig.11. An interferometer-type linear scale controller.

- 2912-2916, May 1997.
5. 白壽鉉 역, *센서 핸드북(Sensor handbook)*, 서울:世和, pp. 483-490, 1990.
  6. K. Engelhardt and Peter Seitz, "Absolute high-resolution optical position encoder," *Applied Optics* vol. 35, no. 1, pp. 201-208, Jan. 1996.
  7. M. Dobosz, "High-resolution laser linear encoder with numerical error compensation," *Opt. Eng.* vol. 38, no. 6, pp. 968-973, June 1999.
  8. E. Hecht, *Optics*, 3rd Edition, Addison-Wesley, chapter 10, 1998.
  9. J. W. Goodman, *Introduction To Fourier Optics*, 2nd Edition, McGraw-Hill, chapter 7, 1996.
  10. R. Sawada, O. Ohguchi, K. Mise, and M. Tsubamoto, "Fabrication of Advanced Integrated Optical Micro-encoder Chip", *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 337-342, 1994.
  11. R. Sawada, "Integrated Optical Encoder," *Euroensors IX*, pp. 281-284, June 1995.
  12. B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Fundamentals Of Photonics*, chapter 2, John Wiley & SONS, 1991.



**김수진(Su Jin Kim)**  
 準會員  
 1998년 창원대학교 전자공학과  
 2001년 창원대학교 전기전자제어공학과  
 (공학석사)  
 2001년-현재 인노텔리텍 근무  
 관심 분야 : 광섬유 센서, 광 계측,  
 광 신호처리



**최평석(Pyung Suk Choi)**  
 正會員  
 1978년 성균관대학교 전자공학과  
 1980년 연세대학교 전자공학과  
 (공학석사)  
 1985년 연세대학교 전자공학과  
 (공학박사)

1979년 3월-1986년 2월 유한공업전문대학 전자과 조교수  
 1986년 3월-현재 창원대학교 전자공학과 교수  
 관심 분야 : 광신호처리, 광섬유 센서



**은재경(Jae Jung Eun )**  
 正會員  
 1982년 연세대학교 전자공학과  
 1986년 연세대학교 전자공학과  
 (공학석사)  
 1994년 연세대학교 전자공학과  
 (공학박사)

현재 창원대학교 전자공학과 교수  
 관심 분야 : 광섬유 센서, 광계측, ESPI, 광신호처리



**권오영(Oh Yeong Kwon)**  
 正會員  
 1976년 동아대학교 전기공학과  
 1999년 (주)영광기전 부설기업  
 연구소장  
 현재 (주)영광기전 대표이사