

반사형 장거리 정밀 변위 감지기용 광학계 설계 및 측정

임재인¹ · 김승환¹ · 이승훈¹ · 정해원¹ · 이민희¹ · 김성환² · 김경현^{1†}

¹인하대학교 광자과학연구소
☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

²한진데이터
☎ 407-050 인천광역시 계양구 계산동 1062

(2011년 4월 14일 받음, 2011년 5월 3일 게재 확정)

본 논문에서는 반사형 장거리 정밀 변위 감지기용 광학계를 설계하고 실제 구성을 해 봄으로써 작동 성능을 측정한 결과를 소개하고자 한다. 10 m ~ 250 m 거리에 있는 교량 및 건축물 등의 진동 및 변위를 감지하는 장거리 변위 감지기용 광신호 송신 및 수신용 광학계를 설계하고, 관측 거리에 따라 관측 대상체에 다양한 반사광학계를 설치하여 실제 제작된 변위 감지기의 변위 감지 분해능을 측정하였다. 광신호 송신부는 두 개의 850 nm 파장대 LED와 수렴광학계로 구성되고, 수신부에서는 위치 센서(PSD: Position Sensitive Detector)와 망원형 수렴광학계가 사용되었다. 관측 대상체의 거리에 따라 10 m 거리에서는 0.1 mm 변위 분해능과 250 m 거리에서는 3 mm 이하의 변위 분해능이 가능함을 확인하였다.

Optical System Design and Experimental Demonstration of Long-range Reflective-type Precision Displacement Sensors

Jae In Lim¹, Seung Hwan Kim¹, Seoung Hun Lee¹, Hae Won Jeong¹,
Min Hee Lee¹, Shung Whan Kim², and Kyong Hon Kim^{1†}

¹Department of Physics, Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

²Hanjin Data, 1062 Kyesan-dong, Kyeyang-gu, Incheon 407-050, Korea

(Received April 14, 2011; Accepted May 3, 2011)

This paper reports design and demonstration of optical systems for reflective-type remote optical displacement sensors. Optical systems for light illumination sources and a position sensitive detector (PSD) for the displacement sensor were developed to sense displacement of bridges and instability of skyscrapers in a distance range from 10 m to 250 m to an accuracy better than a few mm. Performance of the optical systems was verified by composing a displacement sensor and by using it in measurement of displacement of a remote target with proper reflective optics depending on distance. The displacement sensor was composed of two LED light sources, each with collimating optics, and a two-dimensional PSD with telescope-type optics. Its displacement resolutions was measured to be 0.1 mm at a distance of 10 m and less than 3 mm at a distance of 250 m.

Keywords: Remote sensing and sensors, Displacement sensor

OCIS codes: (280.0280) Remote sensing and sensors; (120.0120) Instrumentation, measurement, and metrology

I. 서 론

근래와 들어 와 바닷길을 연결하는 대형 교량이나 초고층 건물들이 건설되면서 이들 건축물의 변위 상황을 항상 점검할 수 있는 장거리 변위 감지기의 필요성은 점점 커져가고 있다. 거리 측정 및 차량 속도 측정에 관련된 기술에 관련하

여서는 다양한 방법들이 보고된 바 있고,^[1-4] 또한 상용 제품들이 실제 시중에 유통이 되고 있는 상황이다. 그러나 무거운 하중의 화물차 등이 대형 현수교를 지나가거나 태풍 등에 의한 교량의 상하 좌우 진동에 따른 안전성의 상시 감시와 더불어 항만 물류 이동 감지, 원거리 물체 감시, 제철소 고온 물류 이동을 원격 감시하는 정밀 변위 감지기가 필요하다.

[†]E-mail: kyongh@inha.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

변위 감지기는 공장 자동화 등에도 많이 사용되고 있으며, 대체적으로 자동화 생산 공정에 사용되는 변위 감지기는 주로 짧은 거리에서의 삼각 구도의 반사형 광신호 측정법이나 측정 대상 물체에 광원을 설치하여 광원의 움직임을 감지하는 구도, 광 간섭계를 이용한 정밀 변위 측정법^[5], 모드로킹된 외부 공진형 레이저를 이용하는 방법^[6], 낮은 코히어런스 광을 이용한 단층촬영법^[7] 등이 있다. 이들 방법들은 주로 짧은 거리에서의 정밀 변위 측정에만 주로 사용되고 있으며, 원거리 관측 대상체에 별도의 광원이나 전원을 설치하기가 곤란한 경우에는 사용이 적합하지 않다. 이러한 원거리 변위 관측을 위해서는 관측 대상체에 단지 광학 반사경만을 설치함으로써 별도의 전원이나 광원이 없이도 이 반사경으로부터 반사되는 광신호를 이용하여 변위를 측정하는 원거리 반사형 변위감지기가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 교량 또는 고층 건물 등의 진동에 따른 변위 감시를 위한 반사형 장거리 변위 감지기 구성에 필요한 광학계의 설계와 실제 실험적인 구성을 통한 변위 감지 성능을 측정할 결과를 소개하고자 한다. 특히 관측 대상체와 관측기 사이의 거리가 10 m ~ 250 m인 범위를 수용할 수 있는 정밀 변위 감지기 구성에 필요한 광송수신기용 광학계와 이를 실험적으로 구현한 특성 분석 결과를 다음 절에서 기술하고자 한다.

II. 반사형 장거리 변위 감지기의 구도 및 광학계 설계

본 연구에서 고려된 반사형 장거리 변위 감지기의 구도는 FIG. 1과 같다. 사람의 시력 안전을 위해 레이저를 사용하지 않고 적외선 LED 광원과 광학계로 관측 대상체에 설치된 코너 큐브와 같은 후방 반사형 광학계의 진동 범위를 비출 수 있도록 설계하고, 변위 감지기 내에 설치된 2차원 광 위치 감지 센서 (position sensitive detector; PSD) 를 이용하여 반사 광학계로부터 반사된 빛 신호의 진동을 감지하도록 구성하였다. 본 연구에서는 관측 거리를 최소 10 m에서 최대 250 m 까지로 고려하여 10 m 거리에서는 관측 대상체의 관측 범위를 16 cm × 16 cm로 하여 변위 분해능은 0.16 mm 이하로 설계하고, 최대 250 m 거리에서는 관측 범위를 4 m × 4 m 이상, 변위 분해능은 4 mm 이내로 설계하였다. 이와 같은 변위 감지기 구성을 위해서 FIG. 1과 같은 광신호 송신부와 광신호 수신부용 광학계 구성을 고려하였으며, 변위 관측 범위가 거리에 따라 달라지기 때문에 반사판의 크기와 이에 사용되는 반사 광학계도 충분한 반사 출력을 가질 수 있도록 설계하였다.

2.1. 광송신부용 광학계 설계

본 논문에서는 변위 측정용 송신부 광원으로 사람의 눈을 보호하고 낮 동안의 가시광에 의한 신호 간섭을 최소화하고 기존에 상용화되어 있는 광 위치 감지 센서 (PSD) 들이 주로 실리콘으로 제작되어 있기 때문에 광신호 수신이 가능한 파

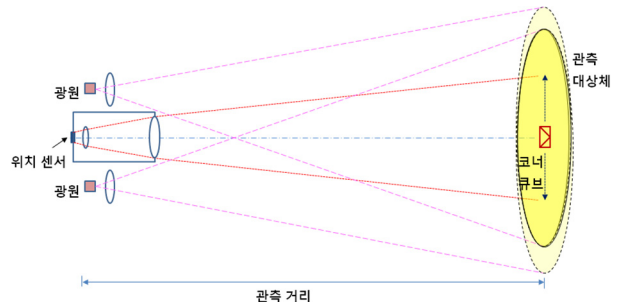


FIG. 1. Schematic diagram of an optical setup for a reflective-type long-distance displacement sensor using light source, position sensitive detector, and optical components.

장 대역인 850 nm 파장대 LED를 광원으로 사용하였다. 일반적인 상용 LED의 경우에는 레이저 광원과 달리 광원의 방사각이 9° 이상이 되어 장거리를 진행하게 되면 빛이 너무 퍼져서 실제 관측 대상체에 도달하는 광세기 너무 약해져 관측이 어려울 수 있다. 그러므로 측정하고자 하는 관측 범위에만 빛을 모아 주는 광학계는 필수적이다. FIG. 2는 상용 LED로 부터 방사되는 빛을 멀리 떨어져 있는 관측 대상체만 비추게 하는 광학계를 보여주고 있다. 일반적인 상용 LED는 렌즈형 폴리머 몰드로 패키징되어 나오므로 이 때 방출되는 빛의 방사각을 ϕ 이라고 하면 FIG. 2(a), 거리 D 만큼 떨어져 있는 관측 대상체의 전체 변위 범위 W를 비추기 위해서는 전면에 추가적인 수렴 광학계가 필요하다. 이 방사각 ϕ 를 가진 LED 빔을 평행광으로 만들기 위해서는 FIG. 2(b)와 같은 초점 거리가 f인 수렴 광학 렌즈가 필요하다. 이 수렴 광학 렌즈의 초점에서 나오는 빛은 렌즈를 지나서 평행광이 되므로, LED의 방사빔이 이 렌즈의 초점에서 나오는 빛과 같은 경로가 되도록 배치하면 평행광을 만들 수 있다. 그러나 평행광이 되면 멀리 떨어져 있는 관측 대상체에 비추어줄 수 있는 빔의 범위가 아주 작으므로, 실제 필요로 하는 관측 범위를 비추어 주기 위해서는 FIG. 2(c)와 같이 LED의 위치가 상기 FIG. 2(b)의 평행광인 경우보다 수렴 광학 렌즈 쪽으로 당겨 놓아야 한다.

FIG. 2(c)와 같은 구도로 관측 대상체 만을 적절하게 비추어 줄 수 있는 수렴 광학 렌즈의 초점 거리와 렌즈와 LED 간의 간격을 계산해 보기로 한다. 앞서 FIG. 2(b)와 같이 평행광을 만든 경우의 렌즈를 그대로 이용하고 LED와 수렴 광학 렌즈 간의 간격 보다 Δx 만큼 줄이게 되면, 렌즈를 지나서 빛은 평행광이 아닌 최종 방사각이 θ 인 빔을 얻을 수 있다. 이 경우에는 FIG. 2(c)의 도식도를 참고로 하여 다음과 같은 간단한 광학적 수식 관계를 유도해 낼 수 있다. 수렴 광학 렌즈의 반경 R은 LED의 방사각 ϕ 와 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = S_0 \tan \phi = (f - \Delta x) \tan \theta \tag{1}$$

여기에서 S_0 는 렌즈와 LED 칩 간의 거리를 나타내며, $S_0 = f$

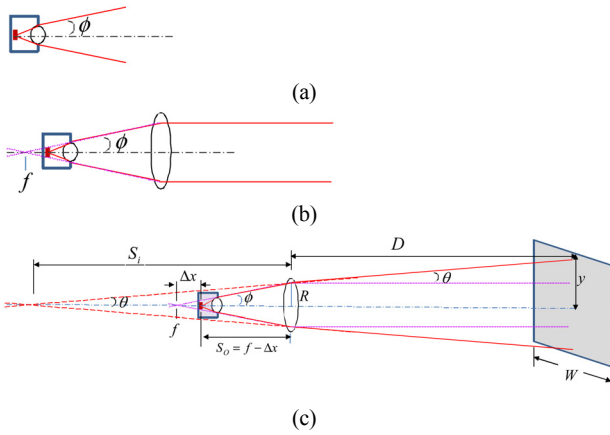


FIG. 2. Beam divergence analyses of optical beam coming from a LED light source and a convergence lens system in the reflective-type long-distance displacement sensor: (a) beam divergence angle of a commercial LED, (b) beam path after a converging optics for formation of a parallel collimated beam, and (c) beam path after an optimized optical configuration for the LED beam converged to illuminate the target only at a remote distance D .

$-\Delta x$ 가 된다. FIG. 2(c)의 도식도에서 수렴 광학 렌즈를 지난 LED 빔의 방사각 θ 는

$$\tan \theta = \frac{R}{S_i} = \frac{(f - \Delta x) \tan \phi}{|S_i|} \quad (2)$$

로 나타내어 진다. 여기에서 S_i 는 방사각 θ 로 발산되는 빔의 원점이며, S_0 가 렌즈에 대한 물체 거리이면 이 S_i 는 그 물체가 렌즈에 의해 맺혀지는 상의 위치가 된다. 얇은 렌즈 공식으로부터

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_i} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

의 관계식이 성립하므로,

$$S_i = \frac{f S_0}{f - S_0} = \frac{f(f - \Delta x)}{f - (f - \Delta x)} = -\frac{f(f - \Delta x)}{\Delta x} \quad (4)$$

가 됨을 알 수 있다. 이 식을 상기 식 (2)에 대입하여 Δx 에 대해 풀면

$$\Delta x = \frac{f \tan \theta}{\tan \phi} \quad (5)$$

가 얻어진다. 이 값은 평행광을 만들 때 보다 LED와 수렴 광학 렌즈 간에 줄여야 할 간격을 나타낸다. 관측 대상체에서의 측정 범위 반경 y 는 수렴 광학 렌즈와 관측 대상체까지

의 거리 D 에 연관되어, 다음 식

$$y = R + D \tan \theta \quad (6)$$

로 나타내어진다. 식 (1)과 (5)를 이용하면, 식 (6)은 다음과 같이 된다.

$$y = (f - \Delta x) \tan \phi + D \tan \theta = f(\tan \phi - \tan \theta) + D \tan \theta \quad (7)$$

이 식 (7)로부터 렌즈의 초점거리 f 는 관측 대상체까지의 거리 D 와 관측 영역 반경 y 에 대한 관계식을 구하고, 식 (6)을 이용하여 정리하면 다음과 같은 결과식을 얻을 수 있다:

$$f = \frac{y - D \tan \theta}{\tan \phi - \tan \theta} = \frac{R}{\tan \phi - \tan \theta} \quad (8)$$

최대 250 m 거리에서의 관측 대상체에 대한 관측 범위를 4 m × 4 m 정도로 할 경우 이 범위를 커버할 수 있는 원형 관측 영역의 반지름은 $2\sqrt{2}$ m 정도가 되어야 하므로, 방사각 θ 는 대략 0.6482° 가 되어야 한다. 통상적으로 사용하는 렌즈의 직경을 약 25 mm로 하고 방사각이 9° 인 LED를 사용하는 경우에는 최종 수렴 방사각은 0.6455° 가 되어야 하고, 사용될 수렴 광학 렌즈의 초점거리는 식 (8)에 의해 대략 85 mm로 계산된다. 그리고 식 (5)에 의해서는 LED 광원과 수렴 광학 렌즈 간의 간격으로 렌즈의 초점 거리에서 줄어들어야 하는 공극 Δx 가 대략 6 mm 정도가 되어야 한다.

2.2. 광신호 검출 위치 센서용 광학계 설계

앞서 언급된 바와 같이 본 연구에서는 관측 거리가 최대 250 m이고 관측 범위는 4 m × 4 m 이상, 변위 분해능은 4 mm 이내로 하며, 최소 관측거리인 10 m 거리에서는 관측 범위와 변위 분해능은 각각 16 cm × 16 cm와 0.16 mm 이하의 변위 감지기를 구현하기 위해서는 충분한 관측 범위를 유지하면서도 정밀한 변위 분해능을 얻을 수 있는 광학계가 갖추어진 위치 센서 (PSD)가 필요하다. 이러한 관측 범위와 변위 분해능을 얻기 위해서는 단일 광학계로는 구성이 힘들고, FIG. 3과 같은 이중 광학계에 의한 망원 렌즈 기능이 필요함이 이론적인 분석을 통해 확인이 되었다.

FIG. 3과 같은 두 개의 렌즈를 사용하는 광학계에 따른 이론 분석을 정리해 보면 다음과 같다. 대물렌즈 f_1 에 의한 관측 대상 물체와 상의 위치 관계식은

$$\frac{1}{O} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f_1} \quad (9)$$

와 같으며, 상의 위치는 다음과 같이 정리된다.

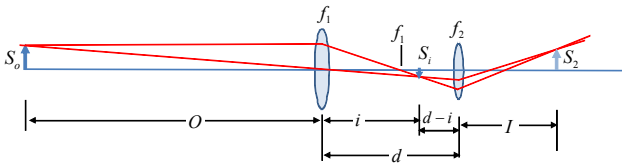


FIG. 3. Optics configuration for image forming on a position sensitive detector (PSD) of the reflective-type long-distance displacement sensor. S_0 : size of target object, f_1 and f_2 : focal lengths of the object- and image-side lenses, respectively, O : distance of the target object from the object-side lens, S_i and i : size and distance of the image formed by the f_1 lens, d : separation between the two lenses, S_2 and I : size and distance of the image of the target object formed by the f_2 lens on its image plane.

$$i = \frac{f_1 O}{O - f_1} \tag{10}$$

이 경우 대물렌즈 f_1 에 의한 관측 대상 물체에 대한 상의 배율은 $m_1 = -i/O$ 가 되므로, 상의 크기는

$$S_i = m_1 S_0 = -\frac{i}{O} S_0 \tag{11}$$

로 구해진다. 두 렌즈 간의 간격이 d 일 때, 상기 그림으로부터 접안렌즈에 의한 물체와 상의 관계식은

$$\frac{1}{d-i} + \frac{1}{I} = \frac{1}{f_2} \tag{12}$$

로 나타내어지며, 최종 상의 위치는 다음과 같이 구해진다.

$$I = \frac{f_2(d-i)}{d-i-f_2} \tag{13}$$

이 경우 접안렌즈에 의한 상의 배율은 $m_2 = -I/(d-i) = f_2/(d-i-f_2)$ 가 되므로, 접안렌즈에 의한 상의 크기는

$$S_2 = m_2 S_i = -\frac{I}{(d-i)} S_i = \frac{I}{(d-i)} \frac{i}{O} S_0 \tag{14}$$

가 된다. 그러므로 떨어진 관측 대상체의 크기 S_0 와 거리 d 에 대해 관측되는 상의 크기 S_2 를 일정하게 유지하기 위해서는 두 렌즈 간의 간격은

$$d = f_2 + \frac{1}{(O - f_1)} \left[\frac{f_1 f_2}{S_2} S_0 + f_1 O \right] \tag{15}$$

가 되어야 함을 알 수 있다.

실제 광학계 구성에 있어서 사용할 수 있는 렌즈의 크기와 경통 길이 등이 고려되어 설계되어야 한다. 주로 시중에서 쉽게 구할 수 있고 적절한 크기로 구성하기 위해서는 대물렌즈의 직경으로 1인치 또는 2인치 크기가 고려될 수 있다. 본 변위감지기 기술의 개발에 있어서 장거리 변위감지에 따른 충분한 수신 신호를 확보하기 위해 구경이 큰 2인치(≒ 50 mm) 직경의 대물렌즈를 선택하였다. 2인치 직경의 상용 대물렌즈의 경우 가장 짧은 초점 거리는 대략 75 mm 이므로, 이 대물렌즈와 적절한 조합으로 위치센서에서의 상의 크기가 대략 9 mm 이하가 되면서 최소 변위에 따른 충분한 분해능을 가질 수 있는 접안렌즈의 선택이 필요하다. 본 연구에서 고려된 위치센서는 Hammamatsu사의 S5991-01 제품이 있으며, 이 위치센서의 칩 크기는 9 × 9 mm이고, 위치 분해능은 1.5 μm 이다. 두 렌즈의 조합으로 전체적인 망원경의 경통 길이도 실제 사용하기에 적절한 크기가 필요하여 여러 경우에 대한 계산을 통해 접안렌즈의 초점거리가 9 mm인 경우가 대체적으로 무난한 경우로 계산되었다.

초점 거리가 75 mm인 대물렌즈와 초점거리가 9 mm인 접안렌즈를 이용하여 거리 10 m 에서는 16 cm × 16 cm 정도의 관측 범위와 거리 250 m에서 4 m × 4 m 정도의 관측 범위를 위치 감지 센서에 충분한 크기로 잘 형성하기 위해서는 렌즈간의 간격과 더불어 접안렌즈와 위치 감지 센서 간의 간격을 잘 조정해 주어야 한다. 위치 감지 센서에 약 5 mm × 5 mm 또는 7 mm × 7 mm 크기의 상을 맺히기 위해 상기 2 렌즈를 사용할 경우에 렌즈 간의 간격을 상기 식 (10)과 (16)을 이용하여 계산한 결과는 아래 FIG. 4와 같고, 계산된 결과 값은 각각의 경우에 대해 대략 86.1 mm에서 86.8 mm 또는 85.6 mm에서 86.1 mm 정도가 된다. 이 경우에 초점거리 9 mm인 접안렌즈로부터 상의 맺히는 지점까지에 대해서 계산된 결과는 FIG. 5에 보여진다. 즉 10 m 거리에 있는 관측 대상체를 0.16 mm 변위 분해능으로 측정하고 5 mm 또는 7 mm 크기의 상으로 관측하기 위해서는 위치센서로부터 접안렌즈까지의 거리가 각각 약 46.2 mm 또는 61.1 mm 정도가 되어야 한다. 250 m 거리에 있는 관측 대상체를 4 mm 변위 분해능으로 측정하고 5 mm 또는 7 mm 크기의 상으로 관측하기 위해서는 위치센서로부터 접안렌즈까지의 거리가 각각 약 46.5 mm 또는 61.5 mm가 되어야 함을 볼 수 있다. 관측 대상체의 떨어진 거리가 10 m에서 250 m 거리 사이에 있을 때의 변위 분해능은 0.16 mm에서 4 mm까지 대체적으로 거리에 비례하는 값을 가진다. 렌즈 간의 간격과 접안렌즈와 위치센서 간의 간격이 앞에서 계산된 값들로 잘 맞추어진 경우에 상기 관측 대상체가 변위 분해능에 해당하는 만큼 변위를 일으켰다면, 위치 감지 센서에서의 상의 이동은 FIG. 6에 보여지는 바와 같이 5 mm 또는 7 mm 크기의 상으로 맺혀졌을 때 각각 5 μm와 7 μm가 됨이 계산으로 확인되었다. 이는 앞서 언급된 위치 감지 센서 제품의 위치 분해능 1.5 μm 보다 충분히 커서 변위 인식이 가능함을 알 수 있고, 위치센서에 맺히는 상의 크기를 충분히 크게 해 줄수록 변위 크기

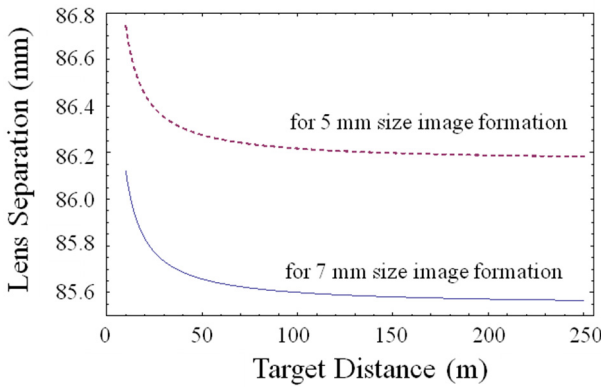


FIG. 4. Calculated lens separation between two lenses, each of focal lengths of 75 mm and 9 mm, respectively, to form about 5 mm and 7 mm size images for target sizes of 16 cm at a 10 m distance, which increases proportionally to 4 m at 250 m distance.

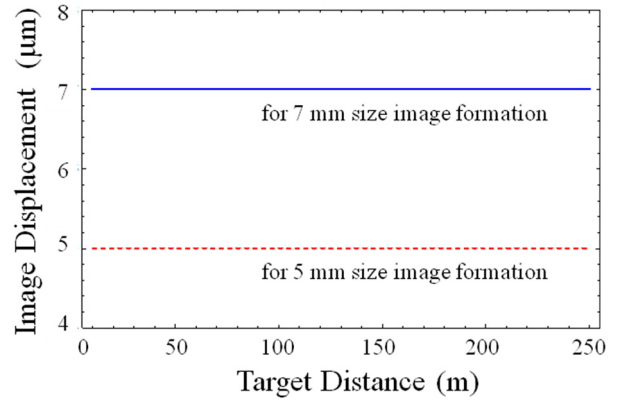


FIG. 6. Calculated image displacement for the target movement to the intended displacement resolution limit which varies from 0.16 mm at the 10 m distance to 4 mm at the 250 m distance linearly depending on the target distance for cases that the target is imaged to two different sizes of 5 mm and 7 mm on the position sensitive detector.

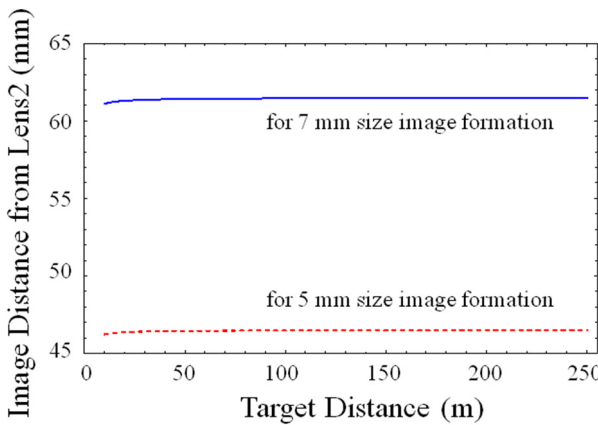


FIG. 5. Calculated image plane distance from the second eyepiece lens for the two lens system, each of focal lengths of 75 mm and 9 mm, respectively, to form about 5 mm and 7 mm size images for target sizes of 16 cm at a 10 m distance, which increases proportionally to 4 m at 250 m distance.

가 커서 인식률을 높일 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 렌즈 간의 경통 길이뿐만 아니라 렌즈와 위치센서 간의 거리도 적절히 조절하여 위치센서에 맺히는 상을 충분히 크게 해 줌으로써 10 m부터 250 m 거리까지 떨어져 있는 관측 대상체의 미세 변위를 더욱 용이하게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

III. 반사형 장거리 변위 감지기 구성 및 특성 측정

3.1. 반사형 장거리 변위 감지기 구성

앞 절에서 계산된 광학계를 이용하여 실제 Light Tools 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 결과는 다음 FIG. 7에 보여진다. 2.1절에서 LED용 수렴 렌즈의 경우에는 초점거리가 85 mm인 렌즈가 적절한 것으로 계산되었으나, 시중에서는 초점거리가 100 mm인 렌즈를 쉽게 구할 수 있어서 이를 이용하고, 위치 감지 센서부의 광학계는 초점거리가 75 mm 및

9 mm인 2개의 렌즈를 사용하였다. 반사경으로는 일반적인 코너 큐브형 후방 반사경 (corner cube-type retro-reflector)를 사용하였으며, 위치 감지 센서가 놓이는 위치에서 반사빔이 잘 수렴되는 것을 확인하였다.

실제 이러한 설계에 따라 배치된 LED 광원용 광학계와 위치센서(PSD)용 광학계 구성도는 FIG. 8과 같다. 광송신부에서는 한국 고텐시에서 생산한 피크 파장이 대략 870 nm이고 반폭이 45 nm이며, 구동 전류가 80 mA에서 대략 10 mW의 출력빔을 $\pm 9^\circ$ 의 방사각으로 방출하는 GaAlAs 계열의 적외선 LED (모델 CL-205)가 사용되었다. 이 빔을 장거리에 있는 관측 대상체를 비추어주기 위해 초점거리가 100 mm인 1인치 직경의 수렴렌즈가 FIG. 8(a)와 같이 총 길이가 10 cm 정도이면서 부분적으로 길이 조절이 가능한 경통으로 LED 앞에 부착되었으며, 이 LED 광원 모듈은 2개가 만들어져 광수신부 양측에 각각 설치되었다.

광 수신부에서는 칩 크기가 9×9 mm 인 Hamamatsu 사의 위치센서 (S5991-01)가 사용되었으며, 피크 투과파장대가 880 nm 이고 반치폭이 약 100 nm인 밴드투과필터가 외부 가시광에 의한 영향을 배제하기 위해 사용되었다. 2.2절에서 설계된 바와 같이 대물렌즈로는 초점거리가 75 mm이고 직경이 50 mm인 색수차 보정용 렌즈와 접안렌즈로는 직경과 초점거리가 9 mm인 렌즈가 FIG. 8(b)와 같이 배치되었다. 앞 절의 계산 결과에 의하면 위치센서로부터 두 렌즈의 맨 앞까지의 총 경통 길이는 대략 130 mm에서 150 mm로 렌즈 간의 간격과 접안렌즈와 위치 감지 센서간의 거리가 각각 조절될 수 있도록 구성되었다.

3.2. 구성된 반사형 장거리 변위 감지기의 성능 측정

앞서 언급된 부품들로 최종 구성된 장거리 변위 감지기와 관측 대상체에 설치된 반사경들의 실물 사진은 FIG. 9에 보

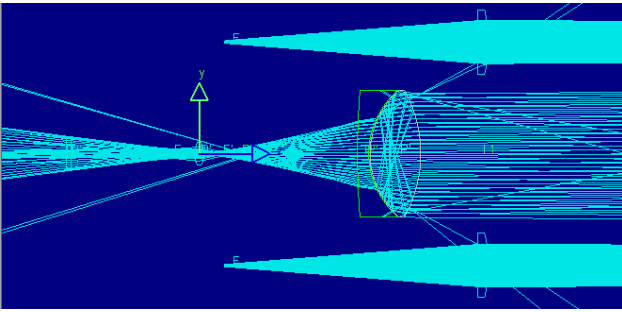


FIG. 7. Simulated result of the beam track emerged from an LED source, reflected by a corner cube retro-reflector, and focused to a PSD through the designed optics systems.

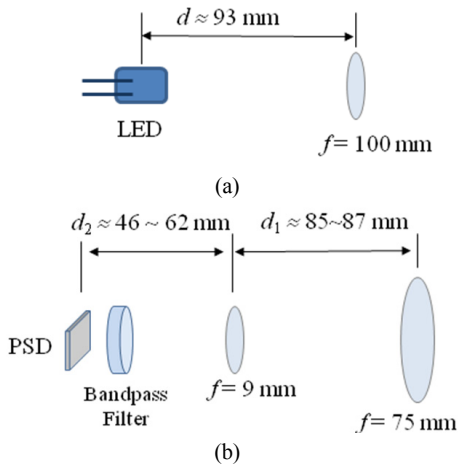


FIG. 8. Optical configurations of (a) an LED and an illuminating lens and (b) PSD with two telescopic lenses and a band pass filter.

여지는 바와 같으며, 이 감지기의 실제 원거리 관측 대상체에 따른 변위 감지 성능을 테스트 해 보았다. 제작된 변위 감지기가 삼발대 위에 부착된 모습이 FIG. 9(a)에 보여지며, 변위 감지기의 LED와 위치 감지 센서가 부착된 회로 보드의 내부 사진은 FIG. 9(b)에 보여진다. 관측 대상체의 거리에 따라 반사되는 광량이 달라지므로, 변위 측정 거리에 따라 반사경의 종류는 다르게 선택이 되었다. 5~15 m 거리에서는 플라스틱의 반사형 야광판 FIG. 9(c)이 사용되었고, 15 ~ 35 m 거리에서는 플라스틱으로 된 후면 반사형 코너 큐브판 (plastic corner cube plate) FIG. 9(d), 35 ~ 70 m 거리에서는 단일 유리 코너 큐브로 된 후면 반사경, 70 ~ 150 m 거리에서는 유리 코너 큐브 4개로 구성된 후면 반사경 세트 FIG. 9(e), 그 이상의 거리에 대해서는 유리 코너 큐브 4개로 구성된 후면 반사경 세트 2개가 사용되었다.

장거리 변위감지기의 구동에는 외부 잡음에 차별화될 수 있도록 높은 출력 광파워를 가진 LED 광 펄스를 낼 수 있는 구동 펄스 전류 회로와 이를 펄스 신호에 동기화되어 반사되어 오는 광신호의 위치를 측정할 수 있는 위치센서 구동 회로 및 신호처리용 하드웨어 및 소프트웨어가 필요하다. 아래

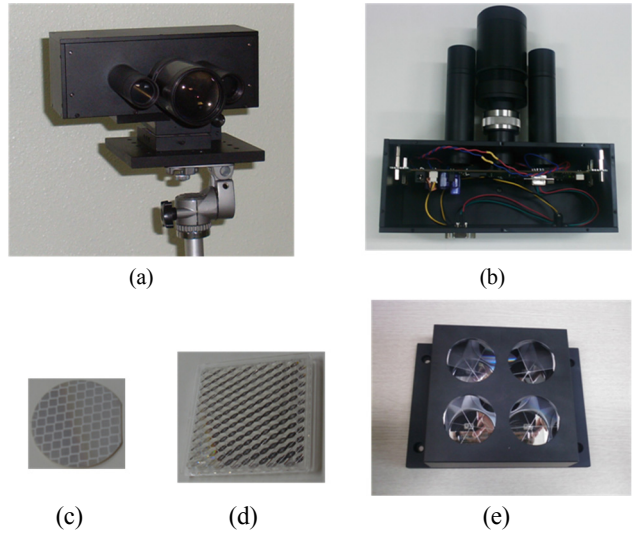
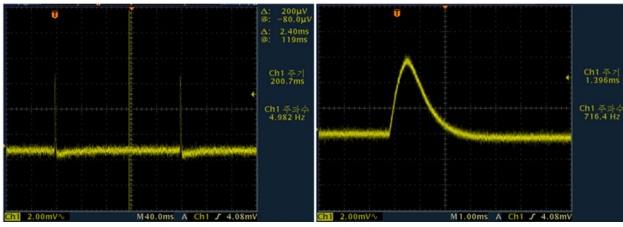


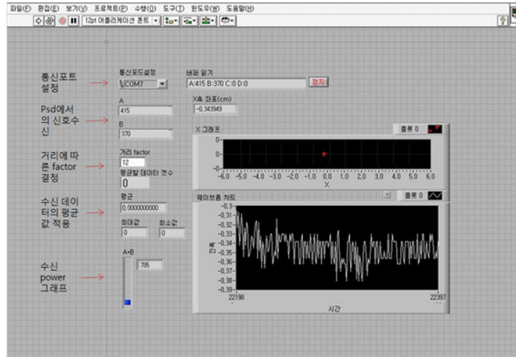
FIG. 9. Photographs of (a) the reflective-type remote displacement sensor mounted on a tripod, (b) an inner view of the displacement sensor board, (c) a plastic reflective plate, (d) a plastic corner cube array plate, and (e) a four glass-type corner cube retro-reflectors mounted in a package.

FIG. 10(a)에서는 사용된 LED의 구동 전류를 펄스로 공급하여 생성된 광펄스를 광검출기와 오실로스코프를 이용하여 측정된 펄스 모양을 보여주고 있다. 측정된 광 펄스의 폭과 주기는 각 약 1.3 ms 및 200 ms 이었다. 이 광 펄스를 멀리 떨어져 있는 관측 대상체의 반사경에서 반사된 광신호를 제작된 광학계와 장거리 변위감지기용 1차원 어레이 위치 감지 센서 (S3932-1D)로 측정된 데이터를 컴퓨터 화면에 보여주는 LabVIEW 프로그램의 동작 화면의 한 예가 FIG. 10(b)에 보여지고 있다. 1차원 PSD로 선형 이동에 따른 반사 신호의 위치를 인식하는 프로그램으로 하단 웨이브폼 차트는 위치의 시간에 따른 변화 상태를 보여주고 있다. 왼쪽 콤보 박스 가운데 최대값과 최소값은 관측 대상체의 반사경에서 반사되어 오는 광신호를 위치 감지 센서가 검출할 때 인식되는 전류값의 크기 정도를 나타내며, A+B의 값이 4,000 정도의 값을 유지할 때 변위를 가장 민감하게 측정할 수 있었다.

제작된 변위 감지기는 삼발대에 올리고, 거리에 따른 반사경을 선택하여 이동형 관측 대상체에 설치하여 관측 거리를 10 m에서 300 m까지 이동하면서 실제 변위 측정을 실험하였다. 관측 대상체가 변위 감지기로부터의 10 m와 250 m로 떨어져 있을 때 측정된 데이터는 각각 FIG. 11과 FIG. 12에 보여진다. 거리가 10 m 떨어져 있을 때에는 플라스틱 반사경 하나를 사용하여 2 cm만큼 한 방향으로 움직이는 동안 변위 감지기에서 측정된 변위는 비교적 일정하게 변화하였으며, 최소 변위 분해능이 0.1 mm 이하가 가능함이 확인되었다. 그리고 거리가 250 m 떨어져 있을 때에는 유리 코너 큐브로 된 후방 반사경 4개 묶음 세트 2개를 반사경으로 사용하였으며, 이 반사경을 4 cm만큼 한 방향으로 움직이는 동안 변위 감지기에서 측정된 변위는 다소 왜곡이 있지만 전



(a)



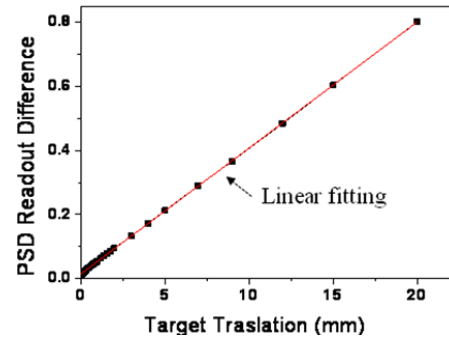
(b)

FIG. 10. (a) Measured oscilloscope traces of the LED pulses, and (b) an example of a monitor screen view showing the reflective-type remote displacement sensor’s response to motion of a remote reflective target. (In this measurement an one-dimensional PSD array was used.)

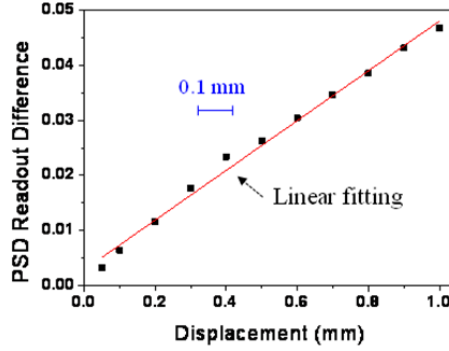
반적으로는 비교적 선형적인 변화를 보였다. 이 경우에도 변위 분해능이 3.0 mm 이하는 충분히 확보가 가능함을 확인하였다. 이 들간의 중간 거리에서도 앞에서 언급한 바와 같이 적절한 반사 출력을 얻을 수 있는 반사경을 선택하여 변위 측정을 하였으며, 우리가 설계한 계획대로 변위 측정이 가능하였다. 단지 250 m 이상인 300 m 거리에 대해서는 시도를 해 보았으나, 보유하고 있는 반사경 숫자의 제한으로 충분한 반사출력을 얻지 못해 300 m 이상의 거리에 떨어진 관측 대상체의 변위 측정은 성공적이지 못하였다. 앞서 측정된 변위 감지기의 변위 측정 그 결과들을 정리해 보면 다음 Table 1 과 같다.

IV. 결 론

본 논문에서는 반사형 장거리 변위 감지기용 광학계를 설계하고, 이를 실험적으로 구현하여 그 성능을 측정해 보았다. 시력 보호를 위해 850 nm 파장대의 LED 광원 2개를 사용하고, 이들 광원으로 관측 대상체를 집중적으로 비추어줄 수 있는 광학계를 설계하였다. 아울러 2차원 광 위치센서로 멀리 떨어져 있는 관측 대상체의 변위를 정밀 측정 할 수 있도록 2개의 렌즈를 이용한 광학계가 설계되었다. 설계에 따라 반사형 장거리 변위 감지기를 제작하였으며, 이를 이용하여 실제 거리에 따른 변위 측정 성능을 측정하였다. 측정 최소 거리로 관측 대상체가 10 m로 떨어져 있을 때 측정된 변위 분해능은 0.1 mm이었으며, 최대 거리 250 m일 때는 3 mm

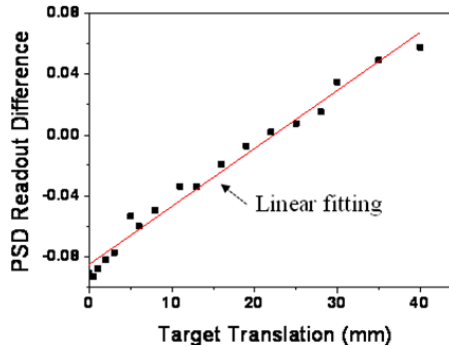


(a)

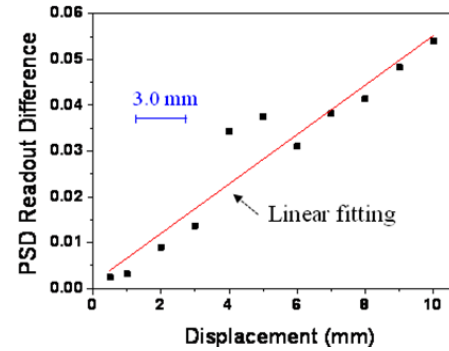


(b)

FIG. 11. The PSD measurement of the target displacement at a distance of 10 m with a single plastic reflective plate. Plot of (b) is a detailed view of the plot of (a) to show the displacement resolution.



(a)



(b)

FIG. 12. The PSD measurement of the target displacement at a distance of 250 m with double sets of four glass-type corner cube retro-reflectors. Plot of (b) is a detailed view of the plot of (a) to show the displacement resolution.

TABLE 1. Measured displacement resolution results of the developed reflective-type remote displacement sensor

거리 (m)	측정된 변위 범위 (cm)	변위 분해능 (mm)	반사경 종류
10	2	< 0.1	플라스틱 반사판
50	5	< 0.5	플라스틱 코너 큐브 어레이판
100	5	< 1.0	유리 코너 큐브 후방 반사경 4개로 구성된 1세트
200	3	< 2.0	유리 코너 큐브 후방 반사경 4개로 구성된 2세트
250	4	< 3.0	유리 코너 큐브 후방 반사경 4개로 구성된 2세트

이하의 변위 분해능이 가능함이 확인되었다. 본 연구에서 개발된 반사형 장거리 변위 감지기 기술은 실제 산업적인 용도로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문의 연구는 부분적으로 인하대학교의 지원에 의하여 수행되었으며, 또한 2009년도 중소기업청의 산학공동기술개발지원사업으로 지원을 받아 수행되었습니다. 아울러 본 실험의 수행에 있어서 여러가지로 도움을 준 윤효근 학생과 권성윤 연구원께 감사를 드린다.

References

1. I. Kaisto, J. Kostamovaara, M. Manninen, and R. Myllyla, "Optical range finder for 1.5-10-m distances," *Appl. Opt.* **22**, 3258-3264 (1983).
2. M.-C. Amann, T. B. M. Lescure, R. Myllyla, and M. Rioux, "Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement," *Opt. Eng.* **40**, 10-19 (2001).
3. I. Coddington, W. C. Swann, L. Nenadovic, and N. R. Newbury, "Rapid and precise absolute distance measurements at long range," *Nat. Photon.* **3**, 351-356 (2009).
4. A. Kilpela, R. Pennala, and J. Kostamovaara, "Precise pulsed time-of-flight laser range finder for industrial distance measurements," *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 2197-2202 (2001).
5. F. Chen and U. Mohideen, "Fiber optic interferometry for precision measurement of the voltage and frequency dependence of the displacement of piezoelectric tubes and frequency dependence of the displacement of piezoelectric tubes," *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 3100-3102 (2001).
6. J. Czarske, J. Mobius, and K. Moldenhauer, "Mode-locking external-cavity laser-diode sensor for displacement measurements of technical surfaces," *Appl. Opt.* **44**, 5180-5189 (2005).
7. M. H. de la Torre Ibarra, P. D. Ruiz, and J. M. Huntley, "Simultaneous measurement of in-plane and out-of-plane displacement fields in scattering media using phase-contrast spectral optical coherence tomography," *Opt. Lett.* **34**, 806-808 (2009).