

논문 2006-43SC-1-1

투명판의 두께 측정용 비접촉식 광센서 개발

(A Noncontact Optical Sensor Development for Measuring the Thickness of Transparent Plates)

유 영 기*, 오 춘 석*, 이 서 영*

(Young Kee Ryu, Choonsuk Oh, and Seoyoung Lee)

요 약

경면물체의 형상과 두께를 측정하는데 있어 접촉식 센서가 가지고 있는 문제점을 해결하기 위해 홀로그래프 레이저 다이오드와 자동 전력 제어를 이용하여 성능이 좋은 비접촉식 광센서를 개발하였다. 접촉식 센서에서는 센서 프로브가 측정 대상체와 계속해 접촉하므로 프로브의 마모로 인한 측정왜곡이 발생하게 된다. 이를 극복하기 위해 플라스틱렌즈와 CD 플레이어의 광학 픽업장치를 홀로그래프 레이저로 구성하는 저가의 비접촉 센서를 제안한다. 비접촉식 광센서는 대상물체 쪽으로 움직이면서 포커스 에러 신호를 얻어 투명판의 형상과 두께를 측정할 수 있다. 센서 내부 온도를 $\pm 0.1^\circ$ 제한한 상태에서 다수의 실험 측정을 수행하여 $\pm 2\mu\text{m}$ 의 측정 오차를 가지는 우수한 결과를 보이고 있다.

Abstract

The noncontact optical sensor using the hologram laser and automatic power controller is developed to measure a thickness of transparent objects and achieve excellent performance. Due to the contact between the tip of the sensor and the surface of objects, the tip is abraded. In addition the casting glass under high temperature results in extending the size of sensor body. The accuracy of the sensor is degraded due to these reasons. In this paper, to overcome these problems, we proposed a low cost non-contact optical sensor that is composed of a hologram laser unit used for optical pickup of CD player and a plastic lens. Therefore the problems caused by the contact sensor are solved by using the noncontact sensor. The noncontact sensor has to move toward the objects and obtain the focus error signal to measure a position of transparent objects. While the internal temperature of the sensor is controlled under $\pm 0.1^\circ$, many trials shows $\pm 2\mu\text{m}$ measurement error as excellent performance.

Keywords : Hologram laser diode, Automatic power controller, Noncontact optical sensor, Transparent object

I. 서 론

경면 물체를 측정하는 센서^{[1]~[6]}는 측정하는 방법에 따라 접촉식과 비접촉식 두 가지 방법이 있고, 이들 두 가지 방법 중에서 비접촉식 방법에는 레이저를 이용한 삼각측정이나, 간섭계와 같은 비접촉식 광학센서가 있다. 삼각측정은 물체의 표면에 레이저를 반사시켜 되돌

아오는 레이저의 위치를 검출하여 변위를 측정하는 방법으로 온도나 파장에 영향을 받지 않는다. 그러나 유리 와 같은 경면물체의 측정에는 반사각이 정확하게 맞지 않으면 측정이 불가능한 단점이 있다. 간섭계는 0.1nm의 높은 정밀도로 측정이 가능하지만 가격이 너무 고가인 센서이다. 이러한 센서들 중에서 비접촉으로 유리등의 경면 물체에 영향을 주지 않으면서 비교적 가격이 저렴한 센서로서 홀로그래프 레이저 다이오드^{[7][8]}를 사용한다.

홀로그래프 레이저 다이오드를 이용하여 센서로서 사용하기 위해서는 온도의 변화에 따른 광량과 파장의 변화를 보상해 주어야 한다. 이러한 온도에 따른 광량의 변화는 레이저의 구동전류가 일정할 때 온도의 상승에 따

* 정회원, 선문대학교 정보통신공학부
(SunMoon University)

※ 본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

접수일자 : 2005년5월9일 수정완료일 : 2005년11월15일

라 레이저의 문턱전류가 상승하여 광량이 줄어들게 되는 것을 의미한다. 그리고 파장의 변화는 온도의 상승과 함께 레이저의 파장이 길어지는 것을 말한다. 이러한 광량과 파장의 변화를 보상하기 위해 본 논문에서는 온도를 측정하고 이렇게 측정한 온도의 변화에 따른 광량의 변화와 파장의 변화를 전류의 제어를 통하여 자동으로 문턱전류를 제어해주는 자동 전력 제어(Automatic Power Control)^[9]와 홀로그램 레이저 다이오드를 냉각시켜 레이저가 온도를 일정하게 유지할 수 있게 하는 열전기냉각기(Thermo Electric Cooler, TEC)^[10]를 이용하여 비접촉식 센서를 개발하고자 한다.

II. 실험방법

1. 홀로그램 레이저 다이오드

홀로그램 레이저 다이오드는 전통적인 광 픽업(Optical Pick-up)의 원리를 그대로 이용하면서 소자의 소형화, 경량화를 이루고 온도에 따른 측정 성능의 변화를 최소화하므로 성능 향상을 하였다. 그림 1과 같은 홀로그램 소자(Holographic Optical Element, HOE)는 한 장의 유리 윗면과 아랫면에 홀로그램과 트랙킹 빔 생성용 회절격자가 형성되어져 있다. 홀로그램 소자(HOE)는 종래의 편광 빔 스플리터(Beam Splitter)와 1/4 파장판이 가지고 있는 기능을 그대로 가지고 있어 전형적인 광 픽업 장치에 비해서 광학 부품의 수가 간소화되었다. 또한, 레이저 다이오드(Laser Diode, LD)와 포토다이오드(Photo Diode, PD)가 하나의 패키지로 구성되어 있어 소자 상호간의 위치와 정밀도가 매우 높다.

그림 2는 홀로그램 레이저 다이오드의 홀로그램 광학계 원리를 설명하고 있다. 레이저 다이오드로부터 나온 레이저 광은, 홀로그램 소자의 아래 표면에 형성된 트랙킹 빔 생성용 회절격자(G2)에 의하여, 트랙킹 오차 신호를 위한 2개의 부 빔과 정보신호를 읽기 위한 주 빔 이렇게 3개의 빔(Beam)으로 나뉘어 진다. 이 3개의 빔은 윗면의 광로 굴절용 홀로그램(G1)을 0차 회절광으로 투과하고, 조준렌즈를 거쳐, 대물렌즈에 의하여 경면 물체의 위에 집광 된다. 경면 물체 표면으로부터 반사된 레이저 광은 다시 대물렌즈와 조준렌즈를 투과하여 홀로그램 소자에 이르고, 홀로그램 소자 윗면의 회절격자 G1에 의한 1차 회절광으로 5분할 포토다이오드 위에 모아진다. 이 때, G1은 격자주기가 다른 2개의 회절격자 영역으로 이루어져 있기 때문에, 회절방정식에 따라서 두 개의 광로를 만든다. G1을 투과하는 광중에서 격자

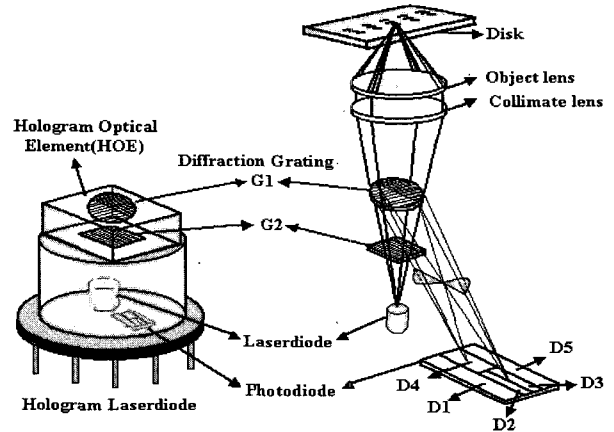


그림 1. 홀로그램을 이용한 광레이저 다이오드의 구성도
Fig. 1. The structure of a Hologram Optical system.

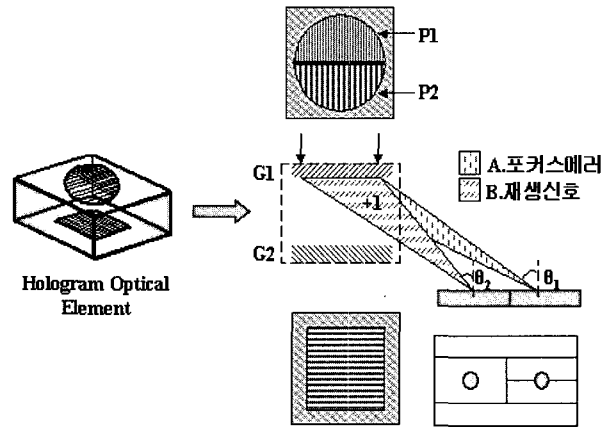


그림 2. 홀로그램 레이저 다이오드의 원리
Fig. 2. The principle of a Hologram Optical system.

주기가 작은 회절격자 P1을 투과하는 광은 θ_1 만큼 광로가 휘게 되어 5분할 포토다이오드의 D1, D2의 분할선 위에 집광되고, 격자주기가 큰 회절격자 P2를 투과하는 광은 θ_2 만큼 광로가 휘게 되어 D4위에 집광된다. 회절격자 G1은 주기가 다른 두 개의 격자로 이루어져 있는데, 두 격자의 경계선은 반사되어 돌아오는 주 빔의 초점 위치에 놓여있어 나이프 에지(Knife edge)의 역할을 한다.

2. 센서의 구성

본 논문에서 개발한 센서의 구성으로는 그림 3과 같이 레이저의 광량을 일정하게 제어하기 위해 사용하는 홀로그램 레이저 다이오드의 APC(Automatic Power Control)회로, 포토다이오드의 미약한 신호를 증폭하는 신호 증폭기가 내장되어 있고 아날로그 디지털 변환 보드(A/D Converter Board), 측정물체의 반사도에 따라서 레이저의 파워를 조절하는 LPC (Laser Power Control) 회로, 센서내의 온도를 일정하게 유지하는 열전기냉각기(TEC) 제어회로가 있다.

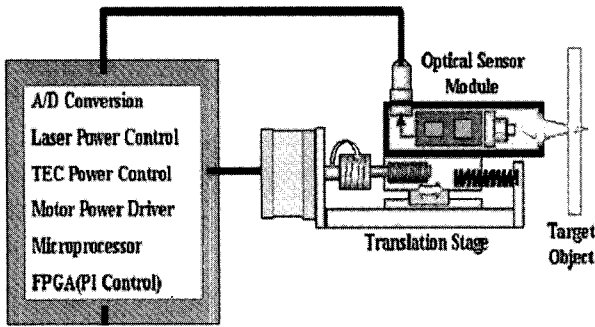


그림 3. 비접촉 광센서의 구성도
Fig. 3. Configuration of Optical sensor.

3. 신호증폭과 A/D컨버터부

그림 4의 초점 오차 신호(Focus Error signal)는 홀로그래프 레이저 내부의 분할 포토다이오드에서 발생하는 전류 값이 전압으로 변환되어 출력되는 것이다. 그러나 이 때, 출력되는 전압의 최대치 값은 수백 mV이하의 미세한 신호이다. 미세한 전압은 신호 증폭기(Signal Amplifier)를 통하여 100에서 200배 증폭을 한다. 증폭된 초점 오차 신호는 저역 통과 여파기(Low Pass Filter)를 통과하므로 고주파 성분이 제거되고, 12Bit 아날로그 디지털 변환기(A/D Converter)를 사용하여 디지털 데이터로 변환하여 저장한다.

그림 5는 홀로그래프 레이저 다이오드 내부의 5분할 포

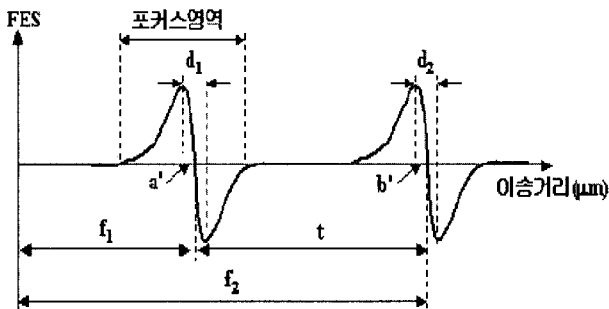


그림 4. 초점 오차 신호
Fig. 4. Focus Error Signal.

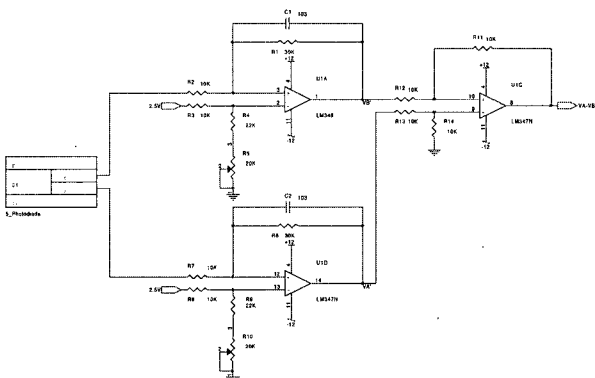


그림 5. 포토다이오드 출력신호의 차동증폭회로
Fig. 5. The Part of Sensor Interface.

토다이오드의 출력을 받아 미세한 신호를 증폭하여 초점 오차 신호를 측정하기 위해 두 신호를 차동 증폭하여 신호를 아날로그 디지털 변환기로 보내는 회로이다.

4. 자동 전력 제어부

레이저 광의 기본적인 특성으로서 지향성, 수렴성, 단색성, 단펄스성과 같은 이점이 있는 반면에 온도에 민감한 단점을 갖는다. 광 출력이 급격하게 올라가는 전류 값을 문턱 전류 I_0 부르고 이 값을 넘는 곳에서부터 레이저의 발진이 시작한다. 문턱 전류 I_0 는 온도와 함께 식 (1)의 관계로 상승한다.

$$I_0 \propto I_0 \exp\left(\frac{T_i}{T_0}\right) \tag{1}$$

T_i 는 접합온도이고, T_0 는 특성온도로 불리어지는 정수로 제품에 따라 대략 $50^\circ K$ 에서 $200^\circ K$ 정도까지의 값을 취한다. T_0 의 값이 작을수록, 문턱 전류의 온도의 존성은 크게 된다. 일정한 출력으로 레이저를 장시간 동작시키면 서서히 동작 전류가 증가되고 계속 증가하다가 결국 발진하지 않게 된다. 결국, 반도체 레이저의 수명은 유한하며 그 수명은 주위온도, 동작전류, 광 출력 등에 의해서 변화한다. 그러므로 온도가 오를수록 문턱 전류가 상승하여 높은 광 출력을 얻기 어렵다. 따라서 넓은 온도 범위에 걸쳐서 정격 출력 동작을 시키기 위해서는 온도가 올라가면 전류를 증가시키고, 온도가 내려가면 전류를 줄이도록 전류를 자동적으로 변화시키는 회로가 필요하다. 이 같은 회로는 그림 6에서 보는 것과 같이 모니터 포토다이오드의 수광 출력전압을 기준의 전압과 비교하여 끊임없이 같아지도록 구동전류를 제어하는 피드백 회로에 의하여 실현된다. 이 같은 반도체 레이저의 구동 제어 회로를 APC(Automatic Power Control)회로라 한다.

그림 7에서 APC(Automatic Power Control)회로는 홀로그래프 레이저 다이오드 내부의 포토다이오드의 출력

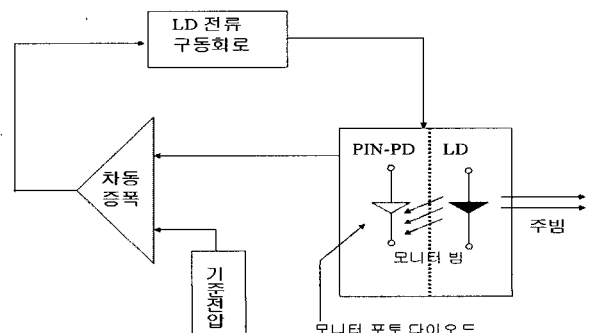


그림 6. 자동 전력 제어 구성도
Fig. 6. The structure of Automatic Power Control.

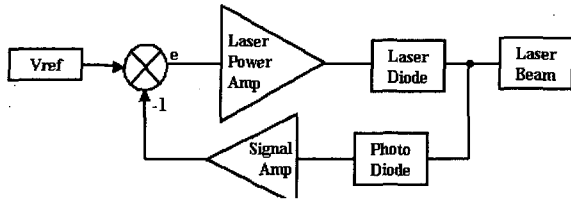


그림 7. 오차 전압을 피드백하여 전력을 자동제어
Fig. 7. The design of Automatic Power Control.

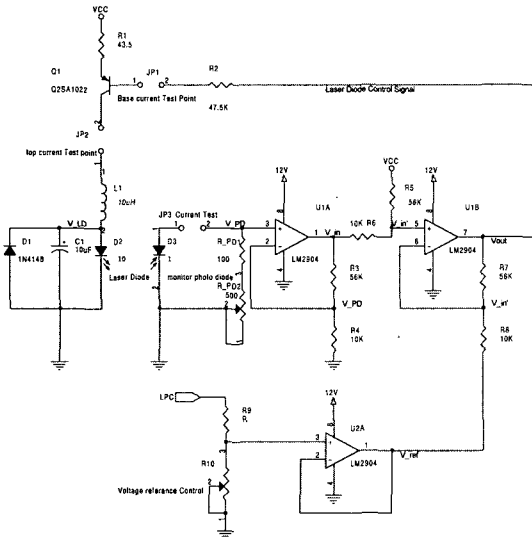


그림 8. 자동 전력 제어 회로도
Fig. 8. The circuit diagram of a Automatic Power Control.

전압과 일정한 기준전압 V_{ref} 의 오차를 피드백 하여 레이저의 구동전력을 제어하는 회로이다.

그림 8의 회로도에서 온도 및 외부 영향에 의해 레이저의 광 출력이 증가하면 트랜지스터 베이스 전압 V_b 가 증가하고 트랜지스터의 이미터 전류 즉, 레이저의 구동 전류가 감소하여 광 출력이 감소한다. 역으로 레이저의 광 출력이 감소할 때 트랜지스터 베이스 전압 V_b 가 감소하고 트랜지스터의 이미터 전류가 증가하여 레이저의 광 출력은 증가한다.

본 논문에서 사용된 홀로그래프 레이저 다이오드의 사양에 따라 그림 8과 같은 APC회로를 설계하였다.

6. 열전냉각기(TEC) 온도 제어기

그림 9처럼 열전기냉각기(TEC)는 전류의 흐름에 따라 열을 한쪽 면에서 반대쪽 면으로 전달하는 장치로, 장치의 움직임이 없어도 열을 전달할 수 있는 장점이 있다. 열전기냉각기는 전류의 흐름으로 온도제어를 할 수 있어 전류의 방향에 따라 발열과 냉각의 방향을 바꿀 수 있다. 열전기냉각기는 두 세라믹 판 사이에는 P-type, N-type 반도체물질(Bismuth)들이 전기적으로 직렬, 열적으로는 병렬로 놓여있는데 이러한 특성을 가

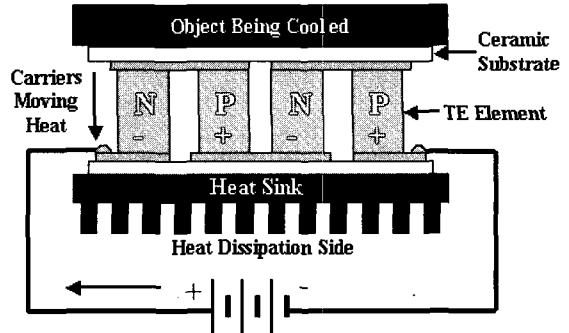


그림 9. 열전냉각기의 온도제어
Fig. 9. The principle of the TEC(Thermo Electric Cooler).

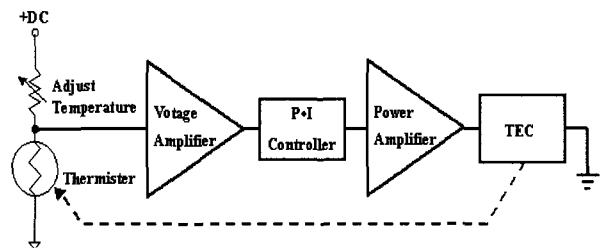


그림 10. 온도 제어용 PI 제어기 구성도
Fig. 10. The design of a temperature controller.

진 물질을 열전소자(Thermo element)라 한다. 이러한 열전소자에 전류를 흐르게 하면 냉각하는 면은 열을 흡수하고, 흡수된 열은 다른 면으로 전달되어 방열판을 통해 공기 중으로 분산된다. 이때 열의 흡수량은 전류량과 열전소자의 수에 비례한다.

그림 10은 광센서의 내부 온도를 일정한 온도로 유지하기 위한 열전기냉각기 제어기이다. 센서 내부에 장착한 서미스터(Thermistor)에 의해서 측정된 온도를 이용하여 피드백 된 현재 온도와 목표 온도와의 오차 값이 PI 제어기와 전력 증폭을 통해 열전기냉각기의 구동 전류의 방향과 크기를 제어하여 광센서 내부 온도는 일정하게 유지된다.

본 논문에서는 파워 OP앰프를 사용하여 열전기냉각기의 구동전류를 제어하는 회로를 이용하여 그림 11의

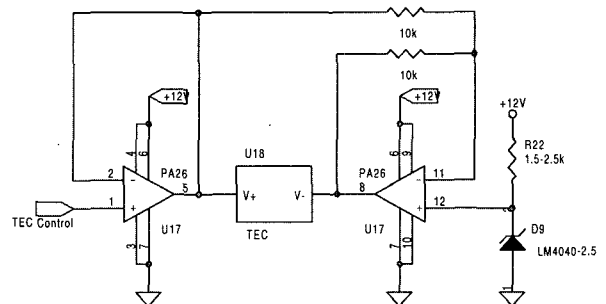


그림 11. 온도제어기의 설계 회로도
Fig. 11. The circuit diagram of the TEC Controller.

열전기냉각기 제어기 회로도를 설계하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 센서의 성능 실험 방법

본 실험에서는 광센서의 성능과 특성을 테스트하기 위한 실험을 한다. 우선 온도 변화에 따른 측정오차실험, 온도제어실험, 그리고 온도제어와 유리두께 측정실험을 통하여 센서가 온도변화에 대하여 향상된 성능을 가지고 있음을 검증한다. 실험 장치는 초점 오차 신호를 얻기 위해서 유리시편을 0.5 μm 단위로 이송하면서 데이터를 획득 할 수 있도록 설치하였다. 그리고 온도 변화에 따른 센서의 성능을 테스트하기 위해서 센서의 주변온도를 변화시켜 초점 오차 신호와 센서내부의 온도를 측정한다.

2. 온도 변화에 따른 측정오차

이전에 연구 개발된 센서는 온도변화에 따른 센서의 측정오차^[6]가 큰 것이 문제였다. 이 실험에서는 유리의 한 점의 초점거리를 반복 측정했을 때 센서 주위 온도 변화에 따른 오차를 측정 한다. 그림12는 센서의 온도를 제어하지 않은 상태에서 온도변화가 섭씨 21에서 28까지 변화될 때에 초점거리가 826mm에서 807mm까지 변화를 보여주는 측정오차는 $\pm 10\mu\text{m}$ 인 데이터 그래프이다.

3. 신뢰성 테스트

그림 12에서 온도 변화에 따른 센서의 측정 정밀도가 좋지 않은 것을 보여주고 있다. 이번 실험에서는 센서의 온도를 제어하면서 센서의 신뢰성을 테스트한다. 신뢰성 테스트는 약 10 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도변화가 발생하는 실험실에서 일정한 초점거리와 두께를 가지는 유리시편의 한 점을 100시간동안 반복 측정하여 센서내부의 온도제어, 초점거리, 두께측정의 오차를 관찰한다.

그림 13은 센서의 주위온도와 센서 내부 온도를 측정 한 데이터이다. 주위 온도는 약 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화를 가지지만 센서내부의 온도는 $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ 로 제어되고 있다.

그림 14는 센서 내부 온도 제어상태에서 유리 표면까

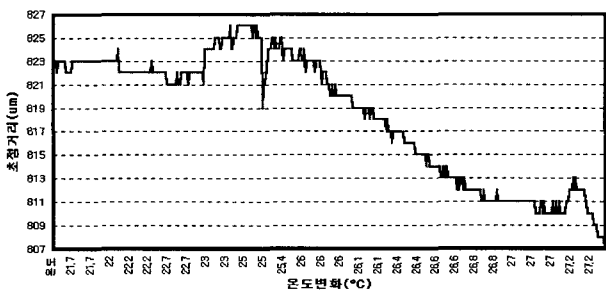


그림 12. 온도 변화에 따른 초점거리 변화량의 측정 결과
Fig. 12. Experimental results of the focal distance variation under the temperature changed.

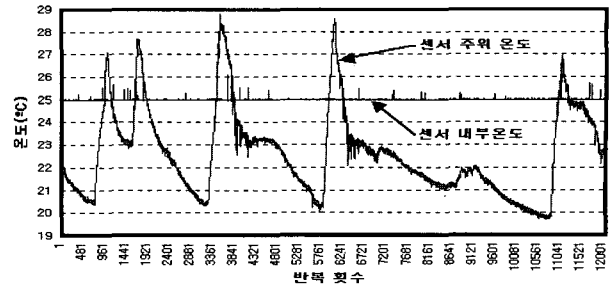


그림 13. 온도제어 하에서 센서의 주위온도와 내부온도의 측정 데이터

Fig. 13. Experimental result of the temperature of the sensor under the temperature control (100 hours).

지의 제1 초점거리를 측정한 것으로 온도제어 하에서 382 $\pm 2\mu\text{m}$ 의 오차를 가지고 있다.

그림 15는 유리 표면까지의 제1 초점거리와 유리 바닥까지의 제2 초점거리의 차이로부터 유리 두께가 467 $\pm 2\mu\text{m}$ 오차 범위에서 측정되었다.

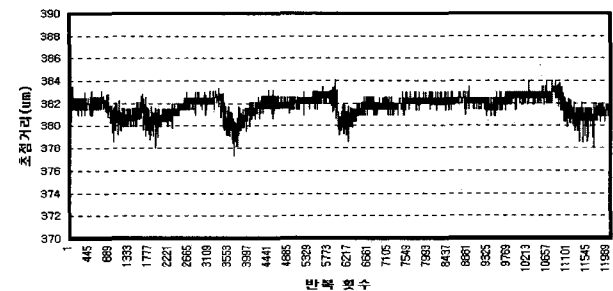


그림 14. 유리표면까지의 제1 초점거리 측정데이터
Fig. 14. Result of the First focus distance (100 hours).

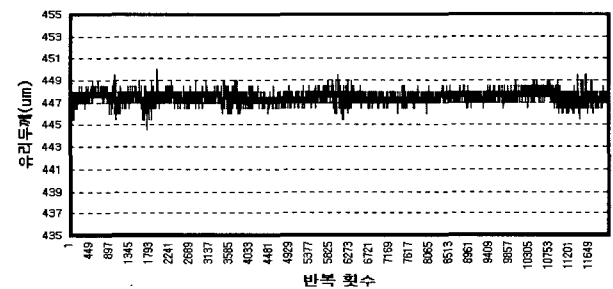


그림 15. 유리 두께 측정 결과
Fig. 15. Result of the thickness of the plate glass (100 hours).

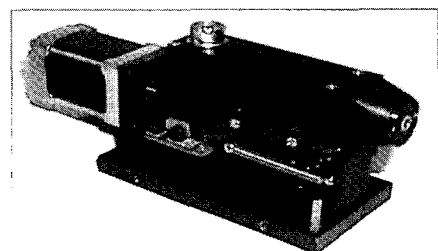


그림 16. 개발된 비접촉 광센서 모듈
Fig. 16. Developed noncontact optical sensor module.

V. 결 론

상기의 결과를 요약하면 센서의 주위 온도가 10°C 범위 내에 변화가 있었지만 센서 내부 온도는 열전기 냉각기를 사용하여 온도변화를 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 범위 내로 유지할 수 있었고, 이를 통해 센서의 성능이 향상되어 초점거리 측정에 대한 정밀도는 $\pm 2\mu\text{m}$ 이므로 평판 유리의 형상 측정 시 $\pm 2\mu\text{m}$ 의 정밀도가 예상된다. 한편 유리두께 측정 정밀도는 제 1초점거리와 제 2초점거리의 2배 측정으로 인해 $\pm 4\mu\text{m}$ 로 측정 오차가 2배로 된다.

신뢰성 테스트를 위해 100 시간의 연속 측정을 통해 데이터의 일관성을 확보하여 센서의 신뢰성을 입증하였다. 그림 16처럼 투명 평판의 두께 측정용 비접촉 광센서를 개발하였고, 단지 산업현장에서의 적용을 위해서는 온도변화에 따른 기구부의 안정성과 센서 드라이버의 안정성이 유지가 중요한 요인으로 작용한다.

참 고 문 헌

- [1] C. Oh, Y.K. Ryu and B.O. Roh, "Video Tape Recorder Head Inspection using Image Processing Techniques", *Optical Engineering*, Vol. 38, No.1, pp.124-130, 1999.
- [2] B. S. Lee and T .C. Strand, "Profilometry with a coherence scanning microscope", *Appl. Opt.*, Vol. 29, No. 26, pp.3784-3788, Sept.1990.
- [3] N. P .Rea, T. Wilson and R. Juskaitis, "Semiconductor laser confocal and interference microscopy", *Opt. Commun.*, Vol. 125, No.1-3, pp.58-167, Apr.1996.
- [4] B. Bhushan, J. C .Wyant, and C. L. Koliopoulos, "Measurement of surface topography of magnetic tapes by Mirau interferometer", *Appl. Opt.*, Vol. 24, No. 10, pp.1489, May.1985.
- [5] D. P. Hand, T. A. Carolan, J. S. Barton, and J. D. C. Jones, "Profile measurement of optically rough surfaces by fiber-optic interferometry", *Opt. Lett.*, Vol. 18, No. 16, pp.1361-1363, Aug.1993.
- [6] C. Butler and G. Gregorious, "Performance evaluation of a novel noncontact fiber-optic triggering probe for surface topography measurement", *Sen. Actuators A*, Vol. 41, No.1-3, pp.98-101, Apr.1994.
- [7] SHARP, "Laser Diode User's Manual", SHARP, Japan, pp.2-3, 1992.
- [8] SONY, "CD-Pickup CXA2568M User's Manual", <http://www.sony.co.jp/~semicon/Datasheet/en/a6801660.pdf>
- [9] Ferrotec America Corporation, "Technical Reference Manual-Part2", <http://www.ferrotec-america.com/3ref2.htm>,
- [10] Marlow industries, "Thermoelectric Cooling System Design Guide", pp.2-14, 1998.

저 자 소 개



유 영 기 (정회원)
 1987년 한양대학교 기계공학과 학사
 1989년 한국과학기술원 생산공학과 석사
 1996년 한국과학기술원 자동화설계공학과 박사
 1989년~1992년 삼성종합기술원 전자기기연구소 연구원
 1996년~현재 선문대학교 전자정보통신공학부 조교수
 <주관심분야 : 화상처리, 광계측 센서, 정밀측정 시스템>



이 서 영 (정회원)
 1982년 인하대학교 전자공학과 학사
 1988년 충남대학교 전자공학과 석사
 1998년 Iowa State University 전기 및 컴퓨터공학과 박사
 1985년~2002년 한국전자통신연구원(ETRI) 책임연구원/팀장
 2003년~현재 선문대학교 정보통신공학부 조교수
 <주관심분야 : UWB, 이동통신, 다중사용자검출, 적응신호처리>



오 춘 석 (정회원)
 1980년 서강대학교 전자공학과 학사
 1986년 Marquette University 컴퓨터공과 석사
 1992년 University of Arizona 컴퓨터공과 박사
 1980년~1993년 전자통신연구원(ETRI) 선임연구원
 2001년 미국 Optical Sciences Center Visiting Scholar
 1993년~현재 선문대학교 전자정보통신공학부 교수
 <주관심분야 : 화상처리, 자동검사, 머신비전, 광학시스템설계>