

레이저와 2차원 배열의 광전검출기를 이용한 구조물의 변위측정 시스템의 개발에 관한 연구

A Study on Development of Displacement Measurement System for Structure using a Laser and 2-D Arrayed Photo Sensors

강문필*[†], 이진이*, 김민수*, 김대정*, 최원하*, 강기훈*, 김종수*, 김 훈**

Moon-Phil Kang*[†], Jin-Yi Lee*, Min-Soo Kim*, Dae-Jung Kim*, Won-Ha Choe*,
 Ki-Hun Kang*, Jong-Soo Kim* and Hoon Kim**

초 록 일반적으로 구조물은 외부의 정적 및 동적 하중과 외부환경으로 인하여 피로균열과 부식이 발생하며, 이것은 구조물의 변형을 유발하여 결국 파단으로 이어지기 때문에 균열과 부식의 검출 및 평가와 함께 구조물의 변형에 의한 진동, 변위 기술기와 같은 거동을 감시하는 것도 매우 중요하다. 이에 레이저 센서 시스템을 이용하여 이러한 거동을 측정하여 이상 유무를 모니터링할 수 있는 구조물 안전감시 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 2차원으로 배열한 광전 센서를 이용하여 구조물의 변형에 의해 유발된 광계의 변화를 감시하며, 또한 데이터를 취득하고 신호처리 할 수 있는 운용 프로그램도 갖추고 있다. 본 연구에서는 개발한 안전 진단 시스템의 필드 적용에 앞서 실험실에서의 몇 가지 실험을 통하여 그 효용성을 검증하였다.

주요용어: 안전감시 시스템, 레이저, 2차원 배열의 광전센서, 구조물의 변형

Abstract: A Safety Monitoring System using a laser and 2-D arrayed photo sensors is developed. To monitor of the deformation and small rotation of structure the developed optical system using 2-D photo sensor array was used to detect the variation of optical orbit of laser which was induced by deformation of the structure. Also, an operating program to manage the system and an algorithm for the data acquisition and the database are introduced. In this study, we demonstrated the capabilities of this system by laboratory experiments before applying the system to the field.

Keywords: safety monitoring system, laser, 2-D photo sensor array, deformation

1. 서 론

대형 구조물은 구조재 자체의 결함이나 외부환경에 의한 피로, 부식, 정적 및 동적 부하 등의 복합적인 요인으로 인하여 손상을 입을 수 있는 환경에 항상 노출되어 있다. 이러한 손상은 대형구조물의 수명을 단축시키며 때

로는 극단적인 파단으로 이어져 대형참사를 유발할 수 있으며, 필연적으로 인적, 경제적 손실과 환경오염 등의 사회적 문제를 발생시킬 수 있다. 한편, 손상을 적절한 시기에 발견하여 그 안전성이 검증된다면 비록 설계수명이 다했다고 하더라도 경제성이 허락하는 한 사용할 수 있는 손상허용공학[1,2]은 비파괴 평가기술[3-5]의 중요성

을 말해주고 있다.

일반적으로 비파괴 평가는 전반적인 외관상태를 관찰하는 수준의 수시점검과 접근이 불가능한 부위까지 점검하는 정밀점검을 주기적으로 시행하며, 이들 정기검사시 발견한 손상은 보수의 대상이 되거나, 가동중지 등의 판단자료로 활용되기도 한다. 그러나 일부 정기검사시 발견하지 못한 손상이나, 다음 정기검사에 이르기 이전에 외부환경의 급격한 변화에 의해 손상이 급진전하여 파손이 발생하는 경우가 적지 않다. 또한 대부분의 정기검사는 구조물의 가동을 중지한 상태에서 행하는 경우가 많기 때문에 정기검사를 빈번히 할 수도 없는 실정이다. 따라서 정기적인 검사와 병행하여 구조물을 운용하는 상태에서 진단할 수 있는 방법이 미국, 일본 등에서 활발하게 연구되어지고 있으며 일부 항공기, 원자력 발전소 등을 중심으로 실용화되고 있으나 국내의 여건은 아직 이에 미치지 못하는 실정이다.

한편 구조물의 건전성 평가를 위해서 요구되는 비파괴 평가에는 피로균열과 부식상태에 대한 평가기술과 거동 측정기술이 필요하다. 피로균열과 부식상태에 대한 평가는 기존의 액체침투탐상, 자분탐상, 초음파 검사, 그리고 방사선 검사 등이 주로 이용되고 있으며, 변형률 등의 거동 측정에는 최근 광섬유 센서를 이용한 방법[6,7]이 활발히 연구되고 있다. 일반적으로 구조물은 외부의 정적 및 동적 하중과 외부환경으로 인하여 피로균열과 부식이 발생하며, 이것은 구조물의 변형을 유발하여 결국 파단으로 이어지기 때문에 균열과 부식의 검출 및 평가와 함께 구조물의 변형에 의한 진동, 변위, 기울기와 같은 거동을 감시하는 것도 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 자체 개발한 레이저 센서 시스템을 이용하여 대형 구조물의 진동, 변위, 기울기 등의 거동을 측정하여 이상 유무를 모니터링(Monitoring)할 수 있는 구조물 안전감시 시스템(Safety Monitoring System)을 개발하였다. 이 시스템은 피측정물에서 발생한 진동을 회전운동 방향으로 벡터분할하여 진동으로 인한 구조물의 기울기를 정밀하게 측정할 수 있다. 시스템은 전원부, 발광부, 목표물, 수광부, 정보처리부, 통신부, 경보부로 구성되며, 이상 진동이 발생할 경우 경보를 발생하고, 데이터베이스를 구축한다.

2. 시스템 구성 및 이론적 배경

2.1. 시스템 개요

시스템은 Fig. 1의 개략도와 같이 전원부, 발광부, 목

표물, 수광부, 정보처리부, 통신부, 경보부로 구성된다. 전원은 AC 220V의 무정전 전원에 의해 공급되며, 발광부는 파장 632.8nm, 최대출력 30mW의 He-Ne 레이저와 레이저 전원공급장치로 구성된다. 본 논문에서 목표물이란 모니터링 할 대상인 구조물에 반사경을 부착한 상태를 지칭한다. 수광부는 2차원으로 배열한 광전센서를 자체 제작하였다. 한편 정보처리부에서는 진동에 관한 정보를 수집 분석하여 1차 경보를 내게 되며, 통신부에서는 정보처리부에서 수집한 정보 및 1차 경보를 전용선을 이용하여 정보부에 전달하는 역할을 수행한다. 정보부는 전달된 정보를 데이터베이스화하며, 이상 진동을 관리자에게 전달하여 2차 경보로써 대처토록 한다.

본 연구에서는 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 발광부 또는 수광부의 중심에서 목표물까지의 최단거리 방향을 z 라하고, z 에 수직인 두 방향을 각각 x, y 로 한다. 또한 수광부 센서면의 중심을 기준으로 x, y 에 수평인 방향을 각각 X, Y 라고 정의한다. 그리고 x, y, z 축을 중심으로 한 회전(가울기)은 각각 α, β, γ 라고 하며, x, y, z, X, Y 축으로의 변위를 각각 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta X, \Delta Y$ 라고 정의한다. 한편 본 시스템은 x 축과 y 축을 중심으로 한 회전 α, β 의 측정이 가능하며, 비교적 간단한 장치 구성으로 구조물의 진동과 기울기를 정량적으로 평가할 수 있다는 장점을 가진다.

2.2. 목표물

Fig. 2에는 본 시스템에 사용된 목표물을 나타내었다. 목표물은 두 가지 방식으로 구조물에 부착할 수 있다.

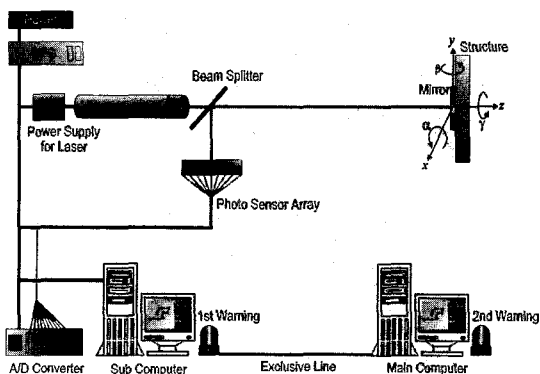


Fig. 1 Schematic diagram of Safety Monitoring System using 2-D photo sensor array

즉, Goniometer와 스프링에 의하여 구조물의 미세한 진동을 증폭할 수 있는 방식인 증폭형((a))과 Goniometer에 거울을 부착한 방식인 직접형((b))이다. Goniometer를 구조물에 직접 부착한 후, 스프링에 고정된 거울을 Goniometer에 고정하는 증폭형은 적은 진동으로 큰 응답치를 얻을 수 있다는 장점은 있으나, 스프링 상수, 바람의 영향, 잔류 진동 등의 영향으로 실제 기울기 및 진동의 정량화에 많은 문제점이 있으므로, 실험실에서의 고주파 진동 측정이나 현장에서 정성적인 평가가 필요할 때에 적합한 방식이다. 한편, Fig. 2(b)와 같은 Goniometer와 거울을 일체화한 직접형은 증폭형에 비하여 정량적인 평가가 가능하며, 목표물과 수광부 사이의 거리가 먼 경우에는 거리자체가 증폭의 효과를 가지게 되므로 회전진동에 대한 응답성은 충분한 다당성을 가지게 된다.



(a) Amplification type



(b) Directly-attached type

Fig. 2 Two different type of object

2.3. 발광부

본 시스템에서 발광부는 파장 632.8nm, 최대출력 30mW의 He-Ne 레이저를 도입하였다. 본 레이저의 spot size는 $\varnothing 1\text{mm}$ 이나, Beam Expander와 Square Window의 도입으로 $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ 의 사각형상의 빔을 사용하였다.

2.4. 수광부

본 시스템의 수광부는 Fig. 3의 사진과 같이 자체 제작한 2차원 광전센서배열을 사용하였다. 광전센서는 10mm 간격으로 X 방향 및 Y 방향으로 10 개씩 총 100 개를 배열하였다. 이와 같은 방식의 2차원 광전센서배열을 이용할 경우에는 레이저 빔의 직경은 최소한 10mm 이상이 되어야 하는데, 이는 빔 직경이 작을 경우에 광전센서에 레이저광이 입사하지 않는 경우가 발생하여 데이터 처리에 오류를 발생할 수 있기 때문이다. 또한 2~3개소의 광전센서에 동시에 광이 입사하더라도, 각각의 입사광량의 차이를 정량적으로 분석하여 입사광의 위치를 정확하게 파악할 수 있어야 한다. 따라서 본 시스템에서의 소프트웨어는 레이저광의 Gaussian 분포를 해석함으로써, 광이 다수의 광전센서에 동시에 입사하더라도, 그 중 최고치를 자동 인식할 수 있도록 하였다.

2.5. 정보처리부, 통신부 및 경보부

각각의 광전센서에서 감지된 정보는 100CH의 AD변환기에 의해 Fig. 1에서 Sub Computer로 표시된 정보처리부로 전송된다. 정보처리부에서는 구조물의 진동과 기울

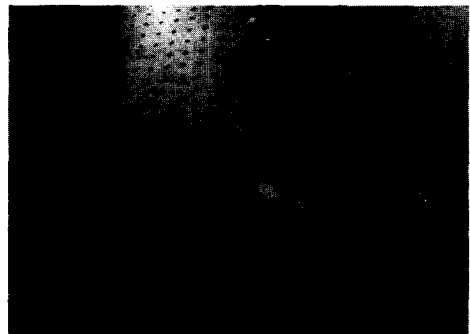


Fig. 3 Optical system of displacement measurement system using 2-D photo sensor array

기에 대한 정보를 처리하여 통신부(Transmission)를 통하여 경보부(Main Computer)에 전달한다.

Fig. 4에는 본 시스템에서 레이저 빔의 입사부터 경보부로 정보가 전달되기까지의 전체 흐름도를 나타내었다. 목표물에 의해 반사된 레이저광은 2차원 광전센서배열로 입사되어 전기적 신호로 전환되어 A/D 변환기를 통하여 디지털 데이터의 형태로 정보처리부로(Sub Computer)로 전송된다. 정보처리부는 Trigger 방식에 의하여 수광부를 제어하며, 취득한 정보를 임시로 저장(Storage)하게 된다. 저장된 파일을 다시 불러들여(Open File) 최고 광량이 입사된 광전센서의 위치를 계산하게 된다. 동시에 기본 설정치(Warning Level)을 지정하여 수광부에서의 변위광과 비교(Compare)하여 1차 경보를 낼 수 있도록 하였다. Fig. 5는 2차원 광전센서배열로부터 취득한 정보를 처리할 수 있는 프로그램을 나타낸 것으로, 1분 간격으로(a) 취득한 정보를 날짜 및 시간별로 저장(b)하도록 작성하였다. 프로그램은 저장된 파일을 불러들여 각 광전센서에 입사된 광량의 크기를 전압값으로 3차원(c)으로 보여줄 수도 있으며, 또한 2차원으로 레이저광의 입사점의 변화 경로(d)를 나타냄과 동시에 경로간의 거리(e)를 함께 보여준다. 한편 Fig. 5에 나타난 데이터는 Fig. 2(a)에 나타난 증폭형 목표물로부터 반사된 레이저광의 정보를 신호처리 한 것이다. 실험은 목표물에 충격을 가한 후에 스프링에 의해 발생된 진동으로 인한 광의 궤적변화를 측정하였으며, 그 결과는 매우 복잡한 경로임을 알 수 있다. 이것은 본 레이저 구조물 안전감시 시스템이 이러한

복잡하고 고주파수의 진동을 동반한 광의 경로 변화도 정확하게 인식하고, 수치적으로 계산할 수도 있음을 증명한다. 한편 앞서 설명한 바와 같이 증폭형을 사용할 경우는 목표물의 실제 기울기 및 진동폭은 많은 차이가 있기 때문에 정상적인 평가가 필요할 때에 적합하다.

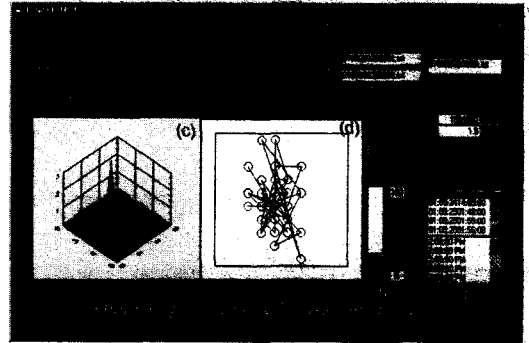


Fig. 5 Visualization of data in sub computer

2.6. 구조물 변위 측정의 이론적 배경

발광부로부터 출사된 레이저광은 구조물에 부착된 거울에 반사되어 수광부로 입사된다. 이때 구조물의 진동 또는 기울기에 동반한 거울의 진동 및 기울기에 의하여 수광부에 입사하는 광의 궤적이 변한다. 한 예로 x 축을 중심으로 한 회전 α 에 의해 발생된 광의 궤적 변화는 Fig. 6에 표시하는 바와 같다.

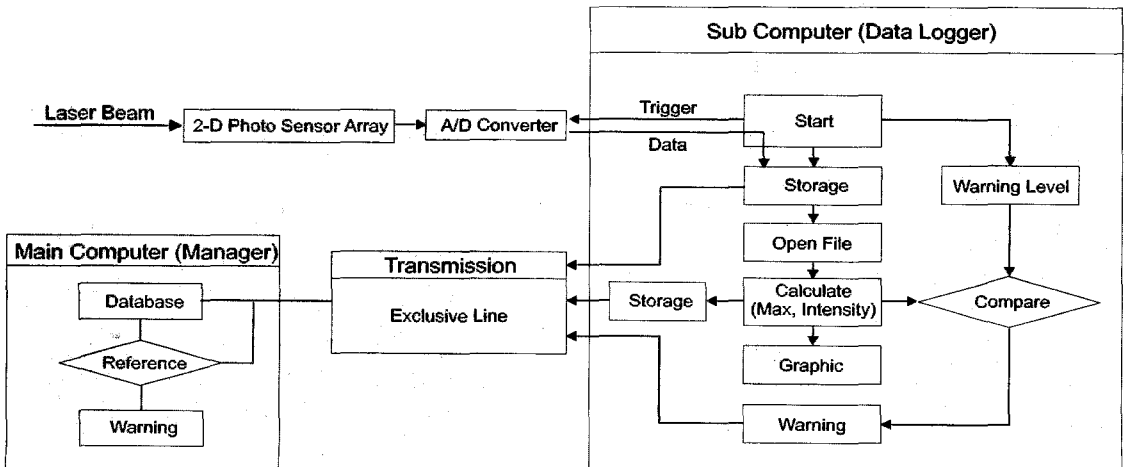


Fig. 4 Flowchart for Safety Monitoring System

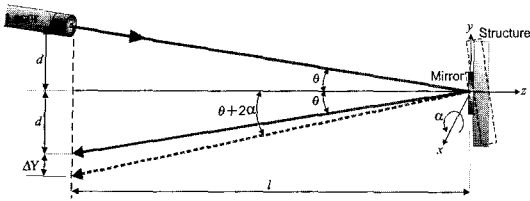


Fig. 6 Variation of optical orbit due to rotation α in x-axis

발광부 및 수광부는 X-Y 평면상에 존재하고, 상호간의 중심 거리는 $2d$ 이며, 그 중심으로부터 목표물까지의 거리는 l 로 정의한다. 여기에서 입사각 및 반사각 θ 는,

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{d}{l} \right] \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 표현할 수 있으며, 구조물(또는 목표물)의 기울기 α 에 대하여

$$\frac{d + \Delta Y}{l} = \tan(\theta + 2\alpha) \dots\dots\dots (2)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 식 (1)을 식 (2)에 대입하면,

$$\frac{l \tan \theta + \Delta Y}{l} = \tan(\theta + 2\alpha) \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{또는, } \Delta Y = l [\tan(\theta + 2\alpha) - \tan \theta] \dots\dots\dots (4)$$

와 같이 된다. 여기서 광속분할기(beam splitter)를 이용하여 Fig. 1의 개략도에 나타낸 것처럼 발광부와 수광부를 일직선상에 위치시키면 $\theta = 0$ 으로 설정할 수 있으며, 이 경우 식(4)의 우변은 $l \tan(2\alpha)$ 가 된다. 같은 방법으로 y 축을 중심으로 한 회전 β 도 구할 수 있으며, 수광부에서 측정된 ΔX , ΔY 로부터 각 축에서의 회전을 구하는 식은 다음과 같이 간략화시킬 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{l} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\Delta X}{l} \right) \dots\dots\dots (6)$$

한편, 식(5)와 식(6)으로부터 x 축과 y 축을 중심으로 한

회전이 동시에 발생해도 수광부에서 측정된 변위를 각 축으로 분할하여 그 변위를 구할 수 있다.

3. 실험 및 고찰

본 연구에서는 레이저와 광전센서를 이용한 구조물 안전진단 시스템을 실제 구조물에 적용하기에 앞서 그 유효성을 검증할 수 있는 몇 가지 실험을 하였다. 앞서 언급한 바와 같이 본 시스템으로 측정가능한 목표물의 x 축을 중심으로 한 회전 α , y 축을 중심으로 한 회전 β 를 임의로 조정하여, 목표물의 거울에서 반사되는 레이저 광케이블의 변화를 유도하였다. 그리고 수광부를 통하여 이러한 광케이블의 변화를 인식한 정보처리부에서 레이저광의 수광부 입사 위치를 추적하여 가시화하며, 또한 역으로 광케이블의 변화 데이터로부터 목표물의 변위를 계산할 수 있는지를 검증하였다.

본 실험에서 X-Y 평면상에 존재하는 발광부와 수광부의 상호간의 거리 $2d = 0.5 \text{ m}$, 그리고 그 중심으로부터 목표물까지의 거리 $l = 2 \text{ m}$ 로 설정하였다. 한편 α 및 β 는 $d = 0$ 의 상태로 측정하였으며 거울과 구조물 사이에 부착되어 있는 분해능 0.2° 의 Goniometer를 이용하여 $-0.6^\circ \sim 0.6^\circ$ 의 범위에서 0.2° 간격으로 조정하였다. 이러한 범위는 $l = 2 \text{ m}$ 에서 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 의 수광면적을 가진 2차원 광전센서배열이 감지할 수 있는 최대 회전각이다. 한편 실험에는 외부 진동에 의한 영향을 고려하여 발광부와 목표물, 그리고 수광부는 광학테이블 위에 설치하였다.

본 연구에서는 목표물과 수광부(2차원 광전센서배열)에서의 회전과 수평운동의 방향을 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 정의하였다. 목표물에서 α 및 β 는 각 축을 중심으로 반시계방향으로의 회전을 (+)방향으로 정의하였다. 그리고 수광부에서는 Fig. 7(a)에서 표시한 (0,0)을 기준으로 X 축 및 Y 축은 각각 오른쪽과 아래쪽을 (+)방향으로 정의하였다. 이러한 방향 설정은 2차원 광전센서배열에서 좌측상단의 센서를 #1으로 시작하여 우측하단의 #100 센서로 차례로 배열되어 있어, 목표물과 수광부에서 처리된 신호의 방향성을 일치시키기 위함이다. 한편 목표물에서 반사된 레이저 광의 수광부 초기 입사점은 Fig. 7(a)에 표시한 (0,0)으로 설정하였으며, 이 센서의 좌표로부터 목표물의 회전과 진동에 따라 발생한 ΔX 와 ΔY 의 방향과 크기를 감지하여 컴퓨터 화면에 가시화하고, 또한 그 정보를 역으로 계산하여 목표물의 상태를 알 수 있도록 프로그램을 제작하였다.

먼저 Table 1에 x축으로의 회전 α 를 측정된 결과를 나타낸다. 여기에서 α_{real} 은 광검사의 변화를 유도하기 위해 목표물에서 Goniometer로 조정된 값이며, α_{cal} 은 광전센서배열을 통해 얻은 ΔY 를 정보처리부에서 분석하여 식(5)를 이용하여 출력한 값이다. 그리고 Table 2는 y축으로의 회전 β 의 측정결과를 나타낸 것으로, 그 구성은 Table 1의 경우와 동일하다.

그리고 Fig. 8은 각각 α 와 β 의 Goniometer에서의 조정값과 정보처리부에서 분석한 값을 그래프로 나타낸다. 그래프 내의 괄호 안의 값은 각 회전각에서 두 값의 오차율을 나타낸 것으로, 두 방향 모두 0° 를 기준으로 대칭을 보여주고 있으나 각도에 따라서 오차율의 편차가 심하게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 x축에서의 회전에 비해 y축의 회전에 대한 정확성이 더욱 떨어지는 것을 관찰할 수가 있다. 이것은 두께를 가진 광속분할기는 목표물의 x-z 방향에 수직이고, x축 또는 z축에 대하여 45° 기울어져 있기 때문에 Beam Expander에 의해 면적을 가진 레이저광이 광속분할기를 두 번 통과하면서 수광부의 X방향으로 광이 퍼졌기 때문이다.

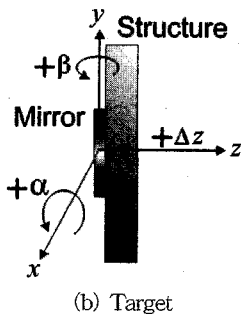
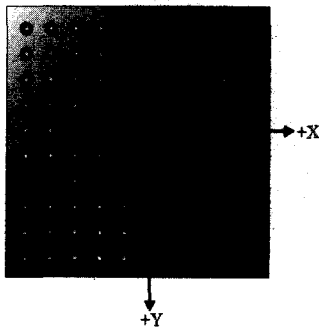


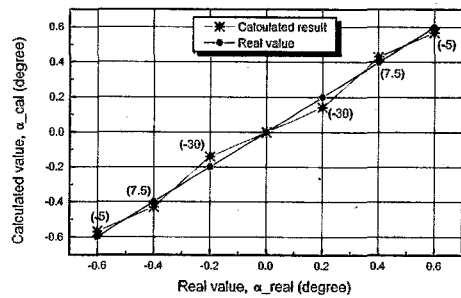
Fig. 7 Direction of coordinate in object and sensing part

Table 1 Experimental results of the rotation to the x-axis, α

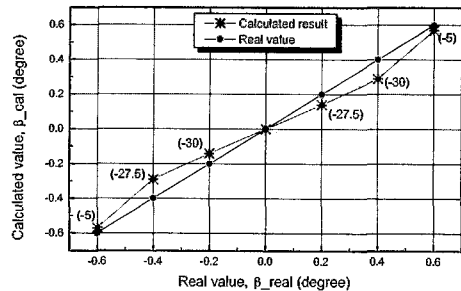
α_{real} (degree)	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6
ΔY (mm)	-40	-30	-10	0	10	30	40
α_{cal} (degree)	-0.57	-0.43	-0.14	0	0.14	0.43	0.57
Error(%)	-5	7.5	-30	0	-30	7.5	-5

Table 2 Experimental results of the rotation to the y-axis, β

β_{real} (degree)	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6
ΔX (mm)	-40	-20	-10	0	10	20	40
β_{cal} (degree)	-0.57	-0.29	-0.14	0	0.14	0.29	0.57
Error(%)	-5	-27.5	-30	0	-30	-27.5	-5



(a) Case of rotation to the x-axis, α



(b) Case of rotation to the y-axis, β

Fig. 8 Relationship between the controlled value and calculated results in single direction

Table 3 Case of combined rotation, α and β , to the x-axis and y-axis

Rotation(degree)		Displacement(mm)	Displacement(mm)		Rotation(degree)		Error(%)	
α_{real}	β_{real}		ΔX	ΔY	α_{cal}	β_{cal}	Error_ α	Error_ β
0.2	0.2	14.1421	10	10	0.14	0.14	-30.0	-30.0
0.2	0.4	22.3607	20	10	0.14	0.29	-30.0	-27.5
0.4	0.4	36.0555	20	30	0.43	0.29	7.5	-27.5
0.4	0.6	42.4264	30	30	0.43	0.43	7.5	-28.3
0.6	0.6	50.0000	30	40	0.57	0.43	-5.0	-28.3
0.2	-0.2	14.1421	-10	10	0.14	-0.14	-30.0	-30.0
0.4	-0.2	22.3607	-10	20	0.29	-0.14	-27.5	-30.0
0.4	-0.4	28.2843	-20	20	0.29	-0.29	-27.5	-27.5
0.4	-0.6	44.7214	-40	20	0.29	-0.57	-27.5	-5.0
-0.2	0.2	14.1421	10	-10	-0.14	0.14	-30.0	-30.0
-0.4	0.2	31.6228	10	-30	-0.43	0.14	7.5	-30.0
-0.4	0.4	36.0555	20	-30	-0.43	0.29	-7.5	-27.5
-0.2	-0.2	14.1421	-10	-10	-0.14	-0.14	-30.0	-30.0
-0.2	-0.4	22.3607	-20	-10	-0.14	-0.29	-30.0	-27.5
-0.4	-0.4	36.0555	-20	-30	-0.43	-0.29	7.5	-27.5
-0.4	-0.6	50.0000	-40	-30	-0.43	-0.57	7.5	-5.0

한편 Table 3은 목표물에 두 방향으로 동시에 회전을 주어 정보처리부에서 이것을 감지하여 각 방향으로 분할하여 분석한 결과이다. 정보처리부는 수광부에서 감지한 ΔX 와 ΔY 를 초기 레이저광의 입사점으로부터 계산하여 수광부에서의 변위량과 목표물의 각 방향으로의 회전을 계산하였으며, 앞서 실험한 단일방향에서와 비슷한 오차를 나타내었다. 그리고 Fig. 9에 회전의 각 방향으로 순서쌍 (α, β)를 표시하여 Goniometer에서의 조정값과 정보처리부에서 계산된 값의 차이를 도식적으로 나타내었다. 여기에서 계산된 α 와 β 의 오차율의 평균은 각각 19.5%와 25.5%로 비교적 높게 나타났지만, 이것은 수광부의 분해능을 조정하여 해결할 수 있다. 즉, 본 시스템에 사용된 2차원 광전센서배열은 센서 중심간 간격이 10mm이기 때문에 $l=2m$ 에서 0.14° 의 분해능을 가짐을 식(5)를 통해서 알 수 있다. 여기에서 센서 중심간 간격을 5mm로 더욱 조밀하게 광전센서를 배열한다면 같은 거리에서 0.07° 의 분해능을 얻을 수 있으며 오차율도 절반 이하로 크게 줄일 수 있다. 그러나 실제 구조물에 적용할 경우 센서간의 간격은 이보다 커도 상관없다. 즉 거리 자체가 증폭의 효과가 있기 때문에 $l=30m$ 라면 10mm의 센서간격으로도 0.01° 의 변위도 측정이 가능하다. 그러나 분해능만 높인다면 2차원 광전센서배열의 면적을 크게 늘려야 하므로 광전센서의 개수 또한 크게 늘어난다. 이럴 경우 비용과 신호처리 시간이 늘어나므로 요구되는 분해능과 측정범위를 고려하여

설계해야 한다. 예를 들어 $l=30m$ 에서 구조물의 회전에 대한 분해능 0.1° 와 $\pm 0.5^\circ$ 의 측정범위가 요구될 경우, Fig. 6에서 $d=0.5m$ 로 설정한다면 광전센서를 0.1m 간격으로 $1m \times 1m$ 의 영역에 배열하면 된다.

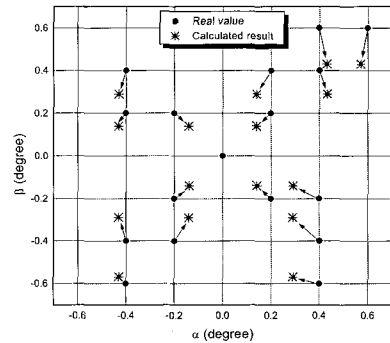
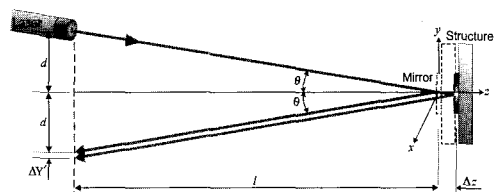
Fig. 9 Relationship between controlled rotation and calculated rotation in combination of α and β 

Fig. 10 Variation of optical orbit due to translation of structure

한편, 구조물이 x축 또는 y축을 중심으로 한 회전이 발생할 때 이외에 z축을 따라 수평진동이 발생할 경우에도 광궤적이 변할 수 있으므로 본 시스템으로 구조물의 z축으로의 변위 Δz 의 측정이 가능한지 검토해 보았다. Fig. 11은 구조물이 z축으로 평행이동하는 경우의 광의 궤적 변화를 나타낸 것이다. 여기서 다른 방향으로의 병진이나 회전운동은 없다고 가정하기 때문에, $\theta=0$ 일 경우는 Δz 는 측정할 수 없다. z축 변위 Δz 와 이에 따른 수광부에서의 측정변위 $\Delta Y'$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\tan \theta = \frac{d + \Delta Y' / 2}{l + \Delta z} = \frac{\Delta Y'}{2\Delta z} \dots\dots\dots (7)$$

따라서 식(7)으로부터 Δz 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta Y' = \frac{2d\Delta z}{l} \dots\dots\dots (8)$$

또는, $\Delta X' = \frac{2d\Delta z}{l} \dots\dots\dots (9)$

목표물의 z 방향으로의 평행이동 Δz 에 의한 광궤적의 변화는 $d=0.25\text{m}$ 로 설정하고 목표물을 수광부의 반대 방향으로 40mm 평행이동시켜 유도하였다. 여기서, 평행이동거리 40mm는 본 시스템에서의 10mm의 센서간 간격을 가진 2차원 광전센서배열이 $l=20\text{m}$ 에서 감지할 수 있는 최소 이동거리이다. 물론 수광부로부터 측정된 ΔX 로부터 정보처리부는 식(9)를 이용하여 Δz 를 계산해 정확한 값을 나타내었다. 그러나 이것 또한 다양한 변위에서 측정하여 오차를 확인해야 하나, 40mm 이상의 변위는 의미가 없다고 판단되는 바 이론적으로 실제 구조물에의 적용 가능성을 예측해 보고자 한다. 역시 $l=30\text{m}$ 에서 구조물의 수평진동에 대한 분해능 1mm와 측정범위 $\pm 5\text{mm}$ 가 요구될 경우, $d=0.5\text{m}$ 로 한다면 광전센서를 0.03mm 간격으로 배열해야 한다. 현실적으로 $30\mu\text{m}$ 의 분해능을 가진 광전센서의 배열이 요구되므로 본 시스템으로는 측정이 불가능하고 CCD 카메라의 도입에 의하여 현실화 할 수 있다.

한편, x축 또는 y축 중심의 회전과 z 방향으로의 변위가 동시에 발생할 경우는 $d=0$ 및 $d \neq 0$ 에서 두 번을 측정해야 한다. Fig. 11에는 y축을 중심으로 한 회전 β 와 평행이동 Δz 가 동시에 발생하는 경우의 그림으로써, 수광부의 변위는 ΔX 가 발생한다. 먼저 (a)의 $d=0$ 에서 β 와 Δz 에 의해 발생된 ΔX_1 의 관계는 다음 식과 같다.

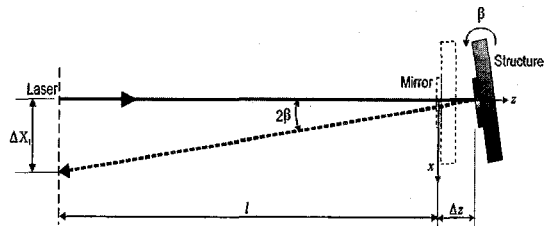
$$\frac{\Delta X_1}{l + \Delta z} = \tan(2\beta) \dots\dots\dots (10)$$

그리고 이와 동시에 (b)의 $d \neq 0$ 에서 β 와 Δz 에 의해 발생된 ΔX_2 의 관계는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

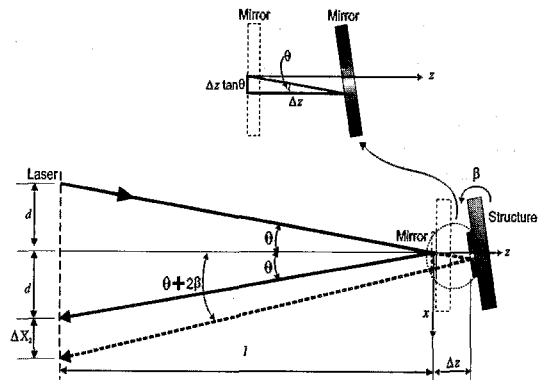
$$\frac{(d + \Delta X_2) - \Delta z \tan \theta}{l + \Delta z} = \tan(\theta + 2\beta) \dots\dots\dots (11)$$

여기에서 좌변의 $\Delta z \tan \theta$ 은 Fig. 11(b)에서 점선의 원으로 표시한 바와 같이 광이 목표물에서 반사되는 지점의 x축 변위를 나타내는 것으로서 d에 비해 매우 작은 값이기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 식(11)은 식(12)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{(d + \Delta X_2)}{l + \Delta z} = \tan(\theta + 2\beta) \dots\dots\dots (12)$$



(a) Measurement at $d=0$



(b) Measurement at $d \neq 0$

Fig. 11 Variation of optical orbit due to rotation and translation of structure

여기서, 식 (10)을 식 (12)로 나누면 식 (13)과 같이 Δz 항을 소거할 수 있다.

$$\frac{\Delta X_1}{d + \Delta X_2} = \frac{\tan 2\beta}{\tan(\theta + 2\beta)} \dots\dots\dots (13)$$

따라서, 수광부에서 측정된 ΔX_1 과 ΔX_2 로부터 식 (13)을 이용하여 β 를 계산할 수 있으며, 이것을 식 (10)에 대입하면 Δz 를 구할 수 있다. 이것은 또한 x 축을 중심으로 한 회전 α 에 대해서도 같은 방법으로 적용할 수 있다.

이러한 측정방법은 Fig. 12와 같은 시스템에 의하여 실현할 수 있다. 광속분할기에 의해 분할한 각각의 레이저광은 그림에서 보여주는 바와 같은 네 개의 블레이드를 가진 풍차형 셔터를 통과한다. 이 두 개의 셔터는 하나의 모터에 의해서 같은 속도로 회전하며, 한쪽이 블레이드에 의해서 레이저광의 진행을 차단하면 다른 한쪽의 셔터는 열리게 된다. 따라서 50:50으로 분할된 각각의 레이저광은 순차적으로 목표물에 입사된다. 그리고 모터를 고속으로 회전시키거나 셔터의 블레이드 개수를 증가시킴으로써 각 방향에서의 측정시간의 간격을 줄여 실시간 계측과 같은 효과를 얻을 수 있다. 한편 각 방향에서 반사된 레이저광은 광속분할기를 이용하여 하나의 2차원 광전센서배열로 입사되도록 구성한다.

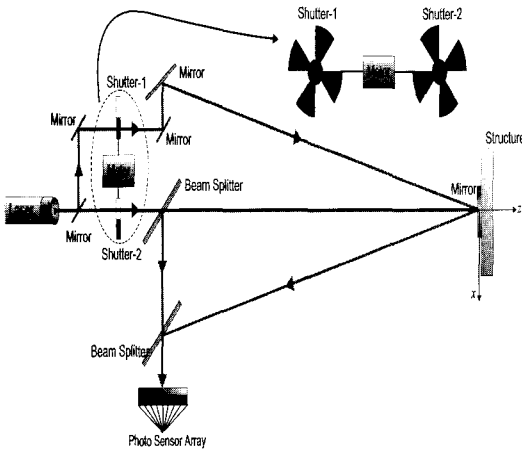


Fig. 12 A design of progressed Safety Monitoring System using shutter

4. 결 론

레이저와 2차원 배열의 광전센서를 이용한 구조물 안전감시 시스템을 개발하였으며, 실제 구조물에 적용하기에 앞서 실험실에서 그 유효성을 추정할 수 있는 몇 가지 실험을 시행하였다. 즉, x 축을 중심으로 한 회전 α , y 축을 중심으로 한 회전 β , 그리고 z 방향으로의 변위 Δz 를 임의로 조정하여, 정보처리부에서 레이저광의 수광부 입사 위치를 추적하여 가시화하며, 또한 역으로 광케이블의 변화 데이터로부터 목표물의 실제 변형에 의한 변위를 계산할 수 있는지를 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 광케이블의 변화 측정에 의해 시스템의 정보처리부에서 계산한 목표물의 회전 또는 기울기 α , β 에 대한 정보는 실제 목표물의 변위와 경향은 일치하였으나 비교적 큰 오차를 보여주었다. 그러나 이 오차는 실제 구조물에 적용시에는 크게 감소될 수 있음을 이론적으로 확인하였다.
- 2) 목표물의 직선운동 변위 Δz 는 본 시스템의 2차원 광전센서배열을 이용하여 측정하기 곤란하나, 수십 마이크로미터 정도의 분해능을 가진 CCD 카메라의 도입에 의하여 계측할 수 있음을 이론적으로 증명하였다.
- 3) 자체 제작한 정보처리부 운용프로그램은 2차원 광전센서배열과 광의 케이블 변화를 계산하여 구조물의 변위 상태를 진단할 수 있는 충분한 응답속도를 나타내었으며, 실제 구조물 적용에의 유효성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 시행한 중소기업 기술혁신개발사업의 기술개발 결과입니다.

참고문헌

[1] R. Singh, and C. Koenke, "Simulation framework for risk assessment of damage tolerant structures," Computers & Structures, Vol. 77, No. 1, pp.101-115, (2000)

[2] Len Reid, "Structural Fatigue Life Extension and Damage Tolerance Using Hole Cold Expansion

- Technology," Proceedings of the JSASS 13th International Sessions in 37th Aircraft Symposium, (1999)
- [3] J. S. Popovics, and J. H. Lee, W. J. Song and J. D. Achenbach, "One-sided Stress Wave Measurement in Concrete," J. of Eng. Mechanics, Vol. 124, No. 12, pp. 1346-1353, (1998)
- [4] 전귀현, "교량의 비파괴시험", 한국비파괴검사학회 학술 제2분과 워크샵, pp. 1-6, (1999)
- [5] Jin-Yi Lee, Dorian Minkov, and Tetsuo Shoji, "Development of QNDE by Means of Magneto-Optical Inspection System," Applied Electro-magnetics(II), Proceeding of The 2nd Asian Joint Seminar on Applied Electromagnetics, pp. 181-186, (1998)
- [6] Branko Glisic, Daniele Inaudi, pascal Kronenberg, Sandra Lloret, and Samuel Vurpillot, "Special sensors for deformation measurements of different construction materials and structures," Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 1999 Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, pp. 505-513, (1999)
- [7] T. Sato, R. Honda, and S. Shibata, "Ground strain measuring system using optical fiber sensors," Proceedings of SPIE Smart Structures and Materials 1999 Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, pp. 470-479, (1999)