

## 구조물 변형관측을 위한 정밀측량시스템의 개발

김병국\*, 최정민\*\*

### Development of Precision Measuring Systems for Structural Deformation Measurements

Byung-Guk Kim, Jung-Min Choi

#### 요 약

본 연구에서는 디지털 테오도라이트를 이용한 3차원 정밀측량시스템의 작동 및 그 내재된 연산 알고리즘의 파악과 구현을 도모하였으며 레이저 변형관측시스템의 사용가능성을 고찰하였다. 테오도라이트 시스템에서는 테오도라이트와 컴퓨터의 교신, 데이터의 취득 및 저장, 해석사진측량에서의 알고리즘을 이용한 대상물의 3차원 좌표의 조정 등의 컴퓨터 프로그램을 구현하였다. 그리고, 레이저 변형관측시스템의 고안을 위해서는 레이저 광원과 탐지기에 대한 고찰, 실험실에서의 시스템 시뮬레이션을 위한 레이저 시스템의 구성 및 설치, 레이저빔의 주사 가능한 빔의 직경과 빔 안정성, 공기의 흐름, 온도의 변화 등 레이저빔의 경로, 주위환경의 변화에 따른 빔 변이(Fluctuation)량 등을 실험하였다. 간격 17m의 광원과 탐지기에서의 실험에 의하면 레이저빔은 공기의 흐름에는 거의 영향을 받지 않으나, 온도 및 빛의 변화에 영향을 받는 것으로 판단되며, 흐리고 온도의 변화가 없는 날짜와 시각을 선택하여 실험을 하면 약 2mm 정도 이상의 변형 관측이 가능한 것으로 나타났다.

**ABSTRACT** : In this research, the operational principle and the internal algorithm of theodolite measuring systems are studied and coded for a new software, and the feasibility of the laser system for the above mentioned usage is studied by simulation set-up of the system in the laboratory environment, and for the theodolite system, modules for the communication between theodolite and computer is implemented, the data collection and storage, the simultaneous photogrammetric "bundle" adjustment for the theodolite position and the target points are coded, compiled and tested. For the simulation set-up of the laser system, extensive studies on laser sources and laser detectors are performed, the system composition for the system simulation in the laboratory environment is studied and implemented, and the beam fluctuation due to the environmental changes in the course of the laser beam, such as changes in current of wind or in temperature is experimented. According to Experiment on the Source of 17 meters interval and the Detector, Laser beam is almost doesn't depend on air flow, but it is effected by variations of temperature and light. Selecting cloudy day and time without change of temperature, it was realized that it is possible to perform deformation measurement more than approximately 2mm precision.

\* 인하대학교 지리정보공학과 부교수(Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha Univ., Yonghyun-dong 253, Nam-gu, Incheon, Korea, 402-751)

\*\* 인하대학교 지리정보공학과 박사과정(Dept. of Geoinformatic Engineering, Inha Univ., Yonghyun-dong 253, Nam-gu, Incheon, Korea, 402-751)

## 1. 서 론

측량장비를 이용한 비접촉식 정밀관측의 필요성과 그 정확도 향상이 측량에서의 새로운 분야로 등장하고 있다. 그 예로서, 자동차, 항공기, 미사일 등 고속주행기계의 성능이 고도화됨에 따라 표면의 형상이 그 기계의 성능에 미치는 영향이 상대적으로 증가하게 되어, 설계형상과는 다른 실제형상의 측량이 필요하게 되었다. 또한 자동화 로봇 등 정교한 동작이 요구되는 정밀 기계구조물의 경우에도 그 치수 및 동작경로의 측량이 더욱 필요하게 되었으며, 운행 중 또는 운행 후의 변형관측도 큰 관심 분야가 되었다. 일반 제조공장에서도 기계부품 자체의 치수뿐만 아니라 그 기계부품의 공장내의 다른 기계들과의 상대위치, 기계변형에 의한 상대위치의 변화 등의 관측이 필요하게 되었다. 또한 대형구조물에 대한 안전성 확보의 요구가 높아짐에 따라, 교량, 댐, 해안구조물, 지하구조물 등의 토목구조물과 고층아파트, 대형빌딩 등의 건축구조물의 건설과 유지관리에 있어서도 형상관측과 변형관측, 즉, 구조물에 대한 변형 모니터링이 필수적 항목으로 등장하고 있다.

기계구조물의 치수관측에는 전통적으로 CMM (Coordinate Measuring Machine)이 사용되어 왔으나, CMM은 장비가 매우 고가이고 유지비용이 많이 소요되며 피측정물의 크기에 제한이 있고, 또 피측정물이 반드시 이동되어서 CMM의 속으로 들어가야 하는 등 많은 어려움이 있다. 대형기계구조물의 제작에도 높은 정확도가 요구되어지고 있으나 대형구조물을 수용할 수 있는 CMM이 거의 존재하지 않으며, 또 공장내부에 설치된 로봇의 인접 기계와의 상대위치를 1/100mm 정도의 정밀도로 측정하는 방법은 개발되지 않았다. 토목 및 건축구조물의 건설 시에는 재래식시상측량의 기법인 테오도라이트와 레벨 등을 사용하여 측량을 시행해오고 있으나, 구조물의 유지관리를 위한 변형관측은 그렇게 널리 행하여지지 않고 있는 실정이다.

이에 본 연구는 지형측량용으로 개발된 테오도라이트를 이용하여 3차원 정밀측량시스템의 알고리즘을 개발하고, 구조물에 고정 장착된 이미지 센서에 레이저를 주사하여 구조물의 변형을 모니터링 방안을 고안하는 것을 그 목표로 하였다. 본 연구는 지형측량용 테오도라이트에 해석사진측량의 이론을 도입하는 새로운 시도이며, 토목구조물 또는 기계구조물을 광학적(Optical)이며 비접촉적인(Non Contact) 방법으로 정밀측량시스템의 개발을 위한 기초이론을 정립하는 실용적인 연구이다. 또한 레이저를 이용한 대형구조물의 변형관측 시스템의 고안도 새로운 시도가 될 것이다.

## 2. 테오도라이트 시스템

테오도라이트를 이용한 3차원 정밀측량시스템의 구현을 위해서 먼저 테오도라이트와 개인용 컴퓨터(PC)의 교신이 필요하며, 교신에 의하여 취득된 신호를 수평각 값과 수직각 값으로 분리 추출하였다. 이렇게 관측된 수평각과 수직각을 이용한 3차원 좌표 결정을 위해서는 각 테오도라이트 수평각의 기준방향(각도 $\phi$ 의 방향)과 기준좌표계를 결정하고 다음으로 전방 교회법(Space-Intersection)의 기법으로 서로 다른 위치의 테오도라이트에 의해 형성된 교점의 평면좌표와 높이 차를 계산하였다. 정밀도를 향상시키기 위한 번들 조정(Bundle Adjustment)의 도입은 개별 자료를 통합하여 일괄처리로 가능하도록 하였다.

### 2.1 테오도라이트와 PC의 교신 구현

라이카(LEICA)사의 T2002 테오도라이트와 토포콘(TOPCON)사의 GTS301 토탈스테이션(Total Station)의 PC와의 교신을 완성하고, T2002 또는 GTS-301로부터의 읽음 값을 자료기반에 저장하여 추후 번들 프로그램의 입력자료로 사용할 수 있도록 하였다. PC에서 테오도라이트의 On/Off, 테오도라이트 및 대상점의 식별, 자료취득 및 화상표현이 가능하다.

개발된 컴퓨터 프로그램 모듈을 TAM (Theodolite information Acquisition Module)이라고 명명하였다. 현재는 라이카의 T2002 디지털 데오들라이트와 톱콘의 GTS-301 토탈스테이션과의 교신만 가능한 상태이며, 추후 수용 대상 장비를 확대하여 나갈 예정이다.

본 모듈은 파스칼(Pascal)로 작성이 되었으며, Turbo Pascal 7.0 버전을 컴파일러로 하였다. PC와 장비간의 RS-232C 씨리얼 교신은 입출력 속도를 향상시키기 위하여 어셈블리로 작성하여 파일(comm.tpu)로 만든 다음, 본 모듈에 연결하였다. 전체 모듈은 6개의 소스파일로 구성되어 있으며, 각각의 역할은 <표 1>과 같다.

<표 1> TAM의 소스 파일명과 그 기능

파 일 이 름	기 능
TAMPAS	전체 프로그램의 본체.
MENU.PAS	초기 화면.
EDIT.PAS	기존에 만들어진 파일의 수정·삭제
MEASURE.PAS	새로운 파일이나 기존의 파일에 연결하여 데이터 측정
T2002.PAS	T2002를 위한 모듈
TOPCON.PAS	GTS-301을 위한 모듈

## 2.2 데오들라이트의 위치 및 방향요소 결정방법 개발

위의 교신 소프트웨어를 이용하여, 데오들라이트로 어떤 대상점을 시준하면 데오들라이트의 표시창에 나타나는 수치값이 PC의 모니터 상에 동시에 나타나는데, 이 수평각과 수직각을 기본으로 측량 대상물의 위치를 결정하게 된다. 그 기본전제로서 데오들라이트 자신의 3차원 위치와 향의 방향을 먼저 결정하여야 한다. (사진측량에서 사진기의 외부표정 4요소 - X, Y, Z,  $\phi$ 에 해당한다.) 두 가지 방법이 있을 수 있는데, (1) 좌표계가 미리 주어지고

대상점 가운데 좌표가 알려진 2점 이상의 관측이 가능하다면, 사진측량에서의 후방교회법(Space Resection)의 이론과 동일하게 외부표정 4요소를 결정할 수 있다. (2) 좌표계가 임의의 것이라면 위치가 서로 다른 두 데오들라이트를 연결하는 선을 좌표계의 한 축으로 하는 좌표계를 선정하여 첫 번째 데오들라이트의 위치를 (0, 0, 0)으로 하고 ( $\phi$ 는 미지수), 두 번째 데오들라이트의 위치는 Y=0, 나머지 X, Z,  $\phi$ 는 미지수로 하여, 길이가 정하여진 캘리브레이션 바(Calibration Bar)를 2회 이상 관측 하므로서 후방교회법으로 데오들라이트의 위치와 방향 요소를 확정하게 된다. 이 초기치 결정의 두 가지 방법에 따른 소프트웨어를 작성하였다.

## 2.3 위치 결정을 위한 알고리즘 및 프로그램 개발

임의의 위치에 설치한 2대 이상의 데오들라이트에 의한 수평각 및 수직각의 관측으로 대상물의 공간좌표를 구하는 방법은 ① 수평각 조정 + 수직각 조정의 결합 방법과 ② 해석사진측량학의 원리를 이용한 3차원 조정의 방법으로 나누어 볼 수 있다.

### 2.3.1 수평각조정 + 수직각조정 방법

관측 자료중 수평각만을 사용하여 수평각조정을 먼저 한다. 데오들라이트 위치의 평면좌표, 대상점의 평면좌표를 미지수로 하고, 대상점 중 평면좌표가 알려진 기준점을 최소 2점 이상을 포함하여야 한다. 이 경우, 데오들라이트의 위치 및 방향요소는 따로 결정할 필요는 없다. 수평각 조정의 결과를 이용하여 수직각을 높이 차로 환산하고, 이를 수직각 조정에 적용하므로써 높이를 구한다.

### 2.3.2 해석사진측량학의 원리를 이용한 3차원 조정 방법

사진측량학에서 2대 이상의 사진기로, 혹은 1대의 사진기로 2곳 이상의 위치에서 대상물을 촬영하여 공간좌표를 얻는 것과 같은 원리가 적용되어질 수 있다. 즉, 사진측량에서의 사진기 외부표정요소

인  $\omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z$ 를 테오들라이트에 적용하여, 테오들라이트를  $\omega=90^\circ, \kappa=0^\circ$ , 그 이외의 요소 ( $\varphi, X, Y, Z$ )는 미지인 외부표정요소를 가지는 사진기로 생각할 수 있다. 즉, 전형적인 지상사진의 초기요소로서 간주할 수 있다. 또한 해석사진측량에서 기지와 미지의 점들의 사진좌표를 관측하여, 광속조정법을 이용하여 사진기의 외부표정요소와 대상물의 공간좌표를 동시에 계산하는 것과 마찬가지로, 테오들라이트의 시준선을 테오들라이트 중심에서부터 일정거리에 있는 임의의 연직면에 투사한 가상의 사진을 조성하여 해석사진측량의 이론을 적용할 수 있다.

그러나, 해석사진측량에서는 모든 대상점의 사진좌표를 구한 후 사진기의 외부표정요소 및 대상물 미지점의 위치를 계산해 내는, 즉, 촬영과 계산이 분리되어 있으나, 테오들라이트 시스템에서는 자료의 실시간 표현이 가장 중요하므로, 각 개별점의 관측 및 좌표값 표현에는 전방교회법을 사용하고, 대상물 개별점의 관측이 완료된 후 선택사항으로서 광속조정법을 이용하여 좌표값을 점점, 보정할 수 있게 하였다. 물론 개별점 관측을 위해 필수적으로 알아야 하는 테오들라이트의 외부표정요소는 준비단계에서 광속조정법을 이용하여 결정하여야 한다.

테오들라이트의 초기치가 결정된 후, 대상물의 점을 2개 이상의 테오들라이트로 관측하는 순간 그 점의 좌표를 모니터 상에 나타나게 하고, 아울러 그 값의 정밀도도 표시되게 한다. 단순 전방교회법이지만 시준선이 서로 엇갈려 갈 경우도 식별이 가능하여야 하며, 자료의 저장이 효율적이게 하여 다음 과정인 광속조정에 의한 정밀도의 향상에 지장이 없도록 하여야 한다.

#### 2.4 번들 프로그램의 개발

위에서 기술한대로, 사진기의 6개의 외부표정요소 중  $\omega=90^\circ, \kappa=0^\circ$ 로 고정한 나머지 4개의 미지요소를 구하는 방법으로, 3점 이상의 기지점 관측에 의한 광속조정법과, 길이가 정확하게 알려진 1개

이상의 기준봉과 3점 이상의 미지점 관측에 의한 광속조정법의 두 가지 경우를 검토하였다. 3점 이상의 기지점 관측은 사진측량의 경우와 동일한데, 보통의 기계구조물에 (또는 배경의 구조물에) 3점 이상의 기지점을 가지는 것이 용이한 일이 아니므로, 기지점없이 미지요소를 구할 수 있도록 두 번째의 방법을 채택하였다.

사용된 광속조정법의 수학적 모델은 사진측량에서의 사진좌표를 이용하는 대신, 테오들라이트의 수평각 및 수직각 관측방정식을 사용한 것과 사진기의 6개 외부표정요소 중 4개만을 미지요소로 한 것을 그 특징으로 들 수 있다.

기준봉 관측에 의한 초기치(First Approximation) 결정은 다음과 같다. 길이가 일정한 (온도보정으로 그 길이를 정확하게 알 수 있는) 기준봉을 2대의 테오들라이트로 관측하므로써, 테오들라이트 좌표계를 정의하고, 테오들라이트 외부표정요소의 초기치를 계산하여 광속조정법으로 연결되게 한다.

기준봉 시준에 앞서, 테오들라이트의 수평각 읽음 값이 영(zero)인 방향을 고정하기 위하여, 1번 테오들라이트와 (좌표계의 원점으로 삼고 싶은 곳에 위치한 테오들라이트를 1번으로 하고, 반시계 방향으로 일련번호를 붙이는 것이 통상적인 방법이다) 2번 테오들라이트를 마주 보게 하여 서로의 십자선을 시준하고, 양 테오들라이트를 Zero-Setting 한다. 나머지 테오들라이트는 앞 번호 테오들라이트의 십자선을 시준하고 Zero-Setting 한다. 즉, 3번 테오들라이트는 2번 테오들라이트의 십자선을, 4번 테오들라이트는 3번 테오들라이트의 십자선을 시준하는 방법이며, 그 방향을 수평각의 영의 방향으로 한다.

테오들라이트 좌표계는 1번 테오들라이트의 중심을 원점으로 하고, 영(zero)인 방향을 X의 (+) 방향, 수평면상에서 X축에 반시계 방향으로 수직인 방향을 Y의 (+) 방향, 그리고 중력의 반대방향을 Z의 (+) 방향으로 하는 오른손 좌표계를 채택하였다.

물론 좌표계의 전환은 언제든지 가능하다.

이와 같이 데오들라이트를 쌍방 시준하게 하고 기준봉을 사용한 새로운 교정(Calibration) 방법을 수행하게 하여 데오들라이트의 외부표정요소 초기치를 거의 참값에 가깝게 계산함으로써, 개략의 초기치 입력에 의한 광속조정법에 비하여 조정계산에서 수렴(Convergence)의 기회를 증가시키고자 하였다.

### 3. 레이저 시스템

#### 3.1 레이저 광원 및 탐지기 고찰

레이저 광원으로는 일반적인 He-Ne 레이저(파장 632.8nm)와 안정화된 He-Ne 레이저를 비교 검토하

였다. 레이저는 직진성이 강하지만 공기입자와 간섭되어 산란이 되는데, 위의 두 레이저의 특성을 비교하면 <표 2>와 같다.

레이저 탐지기로는 Photo Cell(Quad Cell)이라고 불리는 Position Sensing Device(PSD)와 CCD를 이용하는 영상 처리 장치를 비교 검토하였다. 두 탐지기의 특성은 <표 3>과 같다. 레이저 광원의 선택에 있어 안정화된 He-Ne이 공기 중의 산란에 영향을 덜 받지만, 빔의 직경이 크고 고가이므로 일반적인 He-Ne의 사용효율을 높이는 방안을 강구하였다.

구조물의 변형관측에서는 이 탐지기 부분이 구조물에 장착되고 상대적으로 고정된 레이저 광선에 대한 탐지기의 움직임을 파악하게 되는 것이다. 따

<표 2> 레이저의 특성 비교

구 분	특 성		제 작 사
	장 점	단 점	
일반적인 He-Ne 레이저	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가격이 저렴하다.</li> <li>· 사용이 간편하다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공기 중의 입자들과 산란을 일으켜서 빔의 발산(Divergence)이 크다.</li> <li>· 발산량은 1m 진행에 1mm이상.</li> </ul>	Melles Griot사, Newport사 등
안정화된 He-Ne 레이저	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 공기 중에서 산란이 적다. (발산이 적다)</li> <li>· 사용이 간편하다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가격이 비싸다.</li> <li>· 레이저빔의 직경이 크다.</li> </ul>	Hewlett-Packard사 등

<표 3> 레이저 탐지기의 특성 비교

구 분	특 성		제 작 사
	장 점	단 점	
Position Sensing Device (Quad Cell)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 조작이 간편하다.</li> <li>· 가격은 위치 센서의 크기에 따라 저렴할 수이다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 해상력이 떨어진다.</li> </ul>	UDT사, Melles Griot사 등
Image Processing Device (CCD 등)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 해상력이 좋아서 빔의 위치분석시 정확도가 높다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 조작이 복잡하다.</li> <li>· 가격이 비싸다.</li> <li>Image Processing Boards, CCD 카메라, Position Translation 등의 시스템을 갖추어야 한다.</li> <li>· 센서 Cell의 크기가 작아서 변형감지 범위가 좁다.</li> </ul>	Data-Translation사 등

라서 탐지기는 저렴하여야 하며 탐지기 부분에서 모든 관측과 기록이 이루어져야 하므로 Image Processing Device 보다는 조작성 간편한 Quad Cell 등의 Position Sensing Device가 사용성이 높다고 판단되었다.

레이저 광원의 조성은 <그림 1>에서 보는 바와 같다. 일반 레이저를 사용하고  $f_1$ ,  $f_2$ 의 초점거리를 가지는 렌즈를 채용하여 PSD가 있는 곳에서 최소한의 직경을 가지는 빔을 조성하고자 하였다. 레이저 광원과 PSD사이의 거리는 고정되어 있으므로 도달되는 빔의 직경  $D_3$ 를 최소로 하기 위한  $l_1$ 의

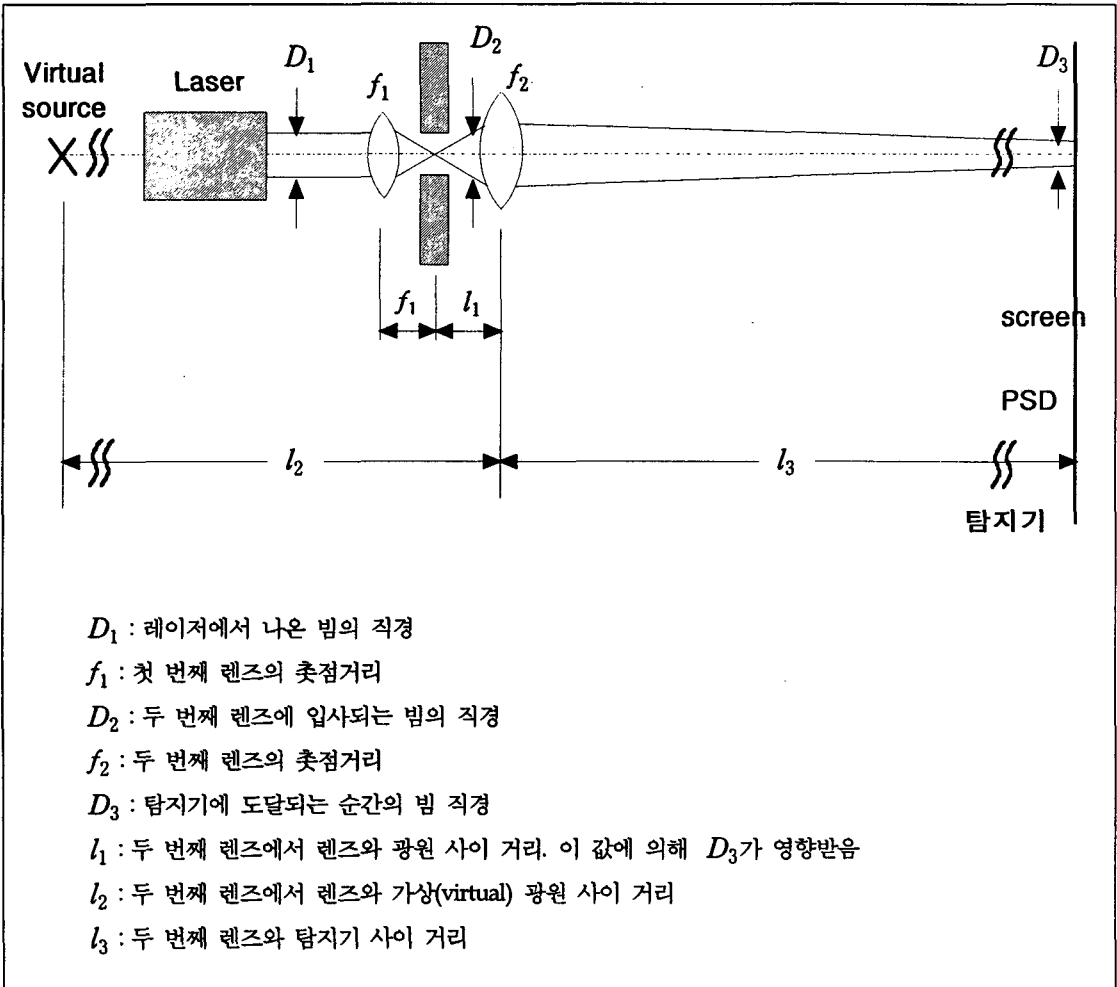
결정이 필요하다. <그림 1>에 따르는 렌즈공식은 다음과 같다.

$$D_1 : f_1 = D_2 : l_1 \Rightarrow \frac{D_2}{l_1} = \frac{D_1}{f_1} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \Rightarrow$$

$$\frac{D_2}{f_2} = \frac{D_2}{l_1} - \frac{D_2}{l_2} = \frac{D_1}{f_1} - \frac{D_3}{l_3} \dots\dots\dots (2)$$

$$l_2 : D_2 = l_3 : D_3 \Rightarrow \frac{D_2}{l_2} = \frac{D_3}{l_3} \dots\dots\dots (3)$$



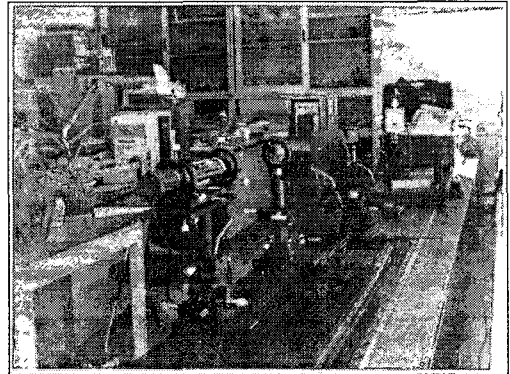
<그림 1> 레이저 광원 메카니즘

### 3.2 레이저 변형관측시스템의 실험실 구성

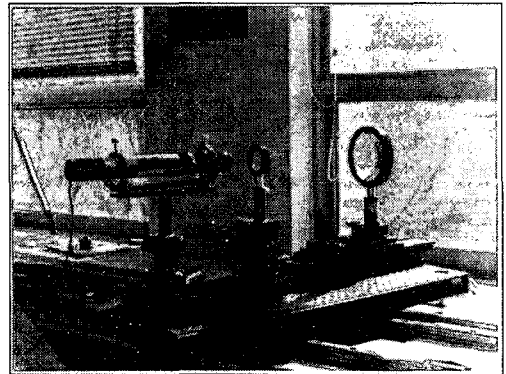
상용 레이저 변형관측시스템의 경우 변형의 관측가능범위가 200mm이며, 관측 가능거리는 1m~400m인 것으로 나타나 있는데, 빔 발신과 공기의 흐름에 의한 빔의 흔들림 등에 관한 자료는 발표되어 있지 않다. Sampling Rate는 60samples/sec로서 1파장에 6점 정도의 sample을 한다고 가정하면 10Hz 정도의 진동을 감지할 수 있다. 그러나 이 제품이 3,000만원대의 고가이고, 고진동의 변형 관측에 적절치 않은 점을 고려하여 본 연구에서의 레이저 변형관측시스템은 레이저 광원과 탐지기에 의해 포착할 수 있는 최대주파수와 공기의 흐름 등 환경의 변화에 의한 위치의 변화에 관하여 실험을 하였다.

레이저 변형관측시스템은 <표 4>와 같이 실험실 시스템을 구성하고 실험하였다.

<그림 2>는 실험실의 시스템 설치 장면을 보여 주고 있으며, <그림 3>은 렌즈가 장치된 레이저 광원을 보여준다. <그림 4>는 사용된 Photo Cell의 분해된 모습을 촬영한 것이며, <그림 5>는 공기 중에 흔들림 관측을 위한 거울장치를 보여준다. <그림 6>은 이 System에 사용된 Oscilloscope를 촬영한 것이다.



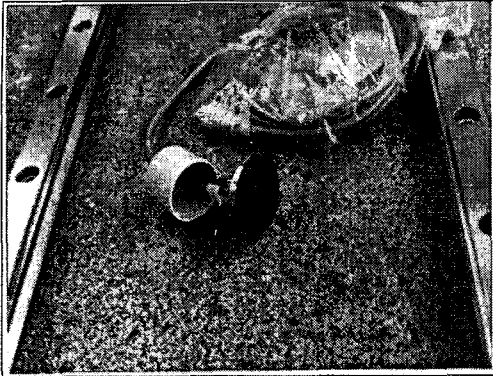
<그림 2> 실험실 시스템 설치 모습



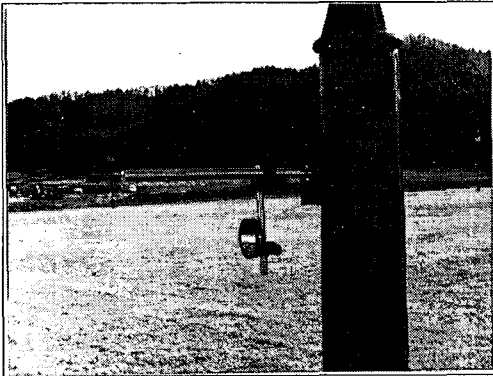
<그림 3> 레이저 광원과 렌즈의 조합

<표 4> 레이저 변형측정시스템의 구성요소 및 특성

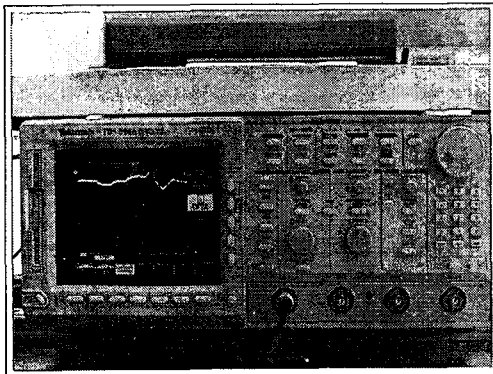
구 성 요 소	Specification
레이저 광원	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Melles Griot 사의 Red Helium Neon Cylindrical Laser Head</li> <li>· Power Output : 632.8nm 5mW</li> <li>· 빔 직경 : 0.8mm</li> <li>· 빔 Divergence : 1mrad</li> <li>· Polarization Ratio : 500 : 1</li> </ul>
Attenuator (Filter)	· Melles Griot 사의 50mm 정방향 필터 : Substrate Material BK7
Position Sensitive Detector (PSD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Hamanatsu 사의 탐지기 : Pin Cushion Type</li> <li>· Effective Sensitive Area :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 12mm*12mm와 22mm*22mm의 두 종류 탐지기를 사용</li> <li>- Position 탐지기 Error는 Typical = 80 micron, Maximum = 150 micron</li> </ul> </li> </ul>
PBMC module	· HP E3630A Triple Output power Supply
Oscilloscope	· Textronix TDS744A, 500mHz
Plotter	· HP7550 plus



〈그림 4〉 실험에 사용된 Photo Cell



〈그림 5〉 공기 중에 흔들림 관측을 위한 거울장치



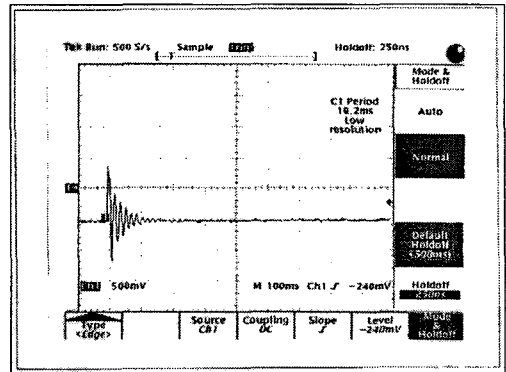
〈그림 6〉 실험에 사용된 오실로스코프

### 3.3 레이저의 Shift 관측

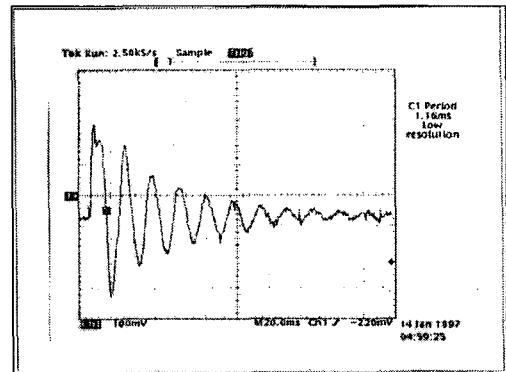
레이저빔의 주사에 의하여 PSD에 연결된 오실로스코프에 나타나는 빔의 흔들림은 <그림 7>에 보인 바와 같다. 세로축은 PSD에 감지된 레이저

중심위치를 보여주며, 가로축은 시간의 경과를 나타내고 있다. 세로축 Scale을 나타내는 량이 500mV 인데 이는 큰 눈금하나의 크기에 대응되는 전압이다. 가로축의 100 $\mu$ s는 가로축 눈금하나의 크기가 100 micro-second임을 나타내며 전체 그림이 1초에 걸쳐서 나타난 PSD의 중심에 대비한 레이저 위치의 흔들림을 보여주고 있다.

<그림 7>에 나타난 파형은 레이저빔을 고정하고 PSD를 고정한 철제 기둥을 고무망치로 타격하여 생성된 파형이다. 이것은 레이저와 PSD의 조합에 의하여 감지할 수 있는 변형량과 진동량을 알아내기 위한 실험이다. 최대 진폭은 약  $\pm 700 \sim 800$ mV 로써 변위로 환산하면 약  $\pm 1.5$ mm에 해당된다. <그림 8>은 <그림 7>의 파형을 세로 5배, 가로 5배 확대한 것이다.



〈그림 7〉 레이저 중심위치의 Shift 관측



〈그림 8〉 파형의 Scale 확대  
(가로, 세로 각 5배)



## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 데오드라이트 시스템

데오드라이트 시스템의 구동을 위한 프로그램인 TAM을 실행하면 <그림 9>와 같은 초기화면이 나타난다. 이 화면에서는 세 가지의 선택메뉴가 나타난다. 여기에서는 기존에 측정된 자료를 새로 수정할 수 있고(Edit), 또한 새로운 데이터를 측정할 수 있다(Measurement). 또한 모든 작업이 종료되면 프로그램을 끝낸다(Quit). 각각의 메뉴는 숫자 또는 대표문자를 누름으로써 실행할 수 있다. 초기화면에서 측정명령(2번, M)을 실행시키면 측정모드라는 표시와 함께 측정할 장비를 묻는 메시지가 나타난다.

측정을 위한 질문에서는 기본 설정값을 선택하기 위해서는 Return 키만 입력하면 된다.

#### ① 측정장비 선택

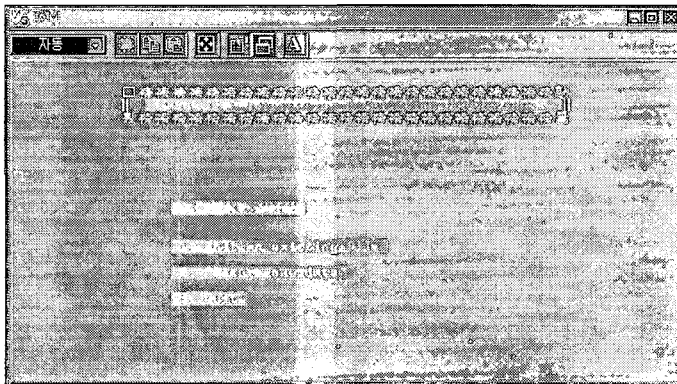
두 종류의 장비의 선택은 대표글자 또는 숫자를 사용하고(Return키 불필요), 측정모드를 끝내고 싶을 때는 <Alt-X>를 누른다.

#### ② ID 입력

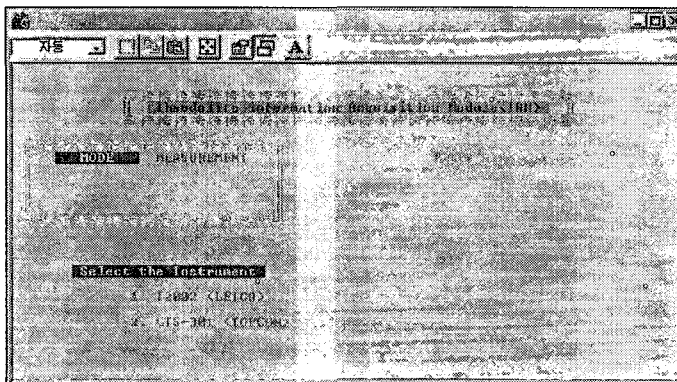
장비를 선택하면 ID를 묻는데, 장비의 ID는 측정하는 장비의 고유번호를 나타낼 뿐만 아니라, 측정결과에서 ID가 표시된 데이터는 한 Session의 시작 데이터임을 나타낸다. 즉 같은 Session은 ID가 한 번만 표시된다.

#### ③ 파일이름 입력

ID 확인이 끝나면 측정결과를 저장할 파일이름을 입력한다. 파일이름 없이 Return 키만 입력하면



<그림 9> TAM 초기화면



<그림 10> 관측장비 설정화면

TAM의 초기화면으로 복귀한다. 측정 데이터를 저장하기 위해서 입력된 이름으로 파일을 개방하는데, 입력된 파일이 존재하면 다시쓰기(Overwrite), 이어서 쓰기(Append), 다시입력(Cancel)의 세 가지의 선택 메뉴가 표시된다. 파일의 기본 확장자는 "\*.TAM"이다.

④ 표준편차의 초기값 설정

파일이름 입력과정이 끝나면 측정에서 사용될 수평·수직의 표준편차(Standard Deviation)의 초기값을 입력한다. T2002의 경우에는 수평, 수직 모두 0.1", GTS-301은 수평, 수직 모두 1"가 기본 설정값이다. 마찬가지로 설정값을 이용하기 위해서는 Return 키만 입력한다.

⑤ 통신포트 설정

측정된 자료를 PC로 보내기 위한 통신포트의 기본값은 '1'번으로 설정되어 있다. 보유하고 있는 시스템에 따라서 '2'번으로 설정해 주어야 할 경우도 있다. 통신포트 개방 후 바로 전원을 켜는 명령이 수행되는데, 주어진 시간(5초) 안에 수행되지 않으면 프로그램은 에러 메시지를 출력하고, 키가 입력되면 초기화면으로 빠져나간다.

⑥ 측정정보 입력

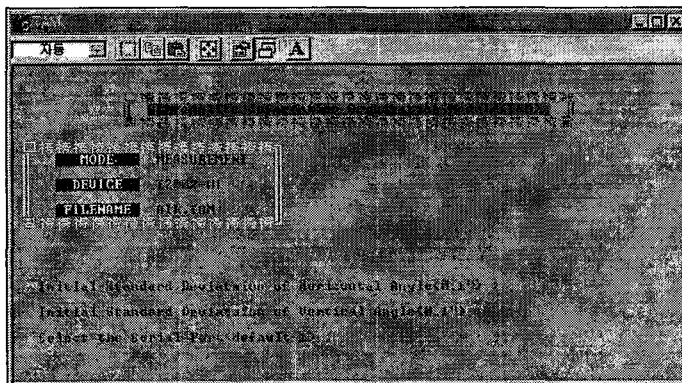
측정할 모든 준비가 완료되면 측정하는 지점의

이름과 대상점의 이름, 그리고 측정의 초기 표준편차를 이용할 것인가를 결정해 주어야 한다. 측정지점의 이름과 대상점 이름의 입력에서 Return 키만 입력하면 바로 전 측정에서의 값이 다시 사용된다. 초기 표준편차 질문에서의 설정값은 'Y'이다. GTS-301의 경우에는 거리측정 여부를 묻는 항목이 추가된다(기본설정값은 'N'). 거리측정을 실시할 경우에는 거리측정의 표준편차를 입력한다.

위의 과정이 모두 끝나면 확인 메시지가 표시된다. 설정값은 'Y'이고, 'X'를 입력하면 초기화면으로 빠져나간다.

⑦ 측정 (반응시간-에러메시지)

모든 측정정보를 확인하고 측정을 시작하면 측정된 결과가 화면상에 표시되고 다음 측정을 위한 정보를 입력받는다. 측정결과는 기본적으로 수평각과 수직각이 표시되고, GTS-301의 경우에 거리측정을 실시한 경우에는 거리가 함께 표시된다. 측정에 소요되는 시간은 측정모드에 따라 다르며, 설정된 시간 이내에 측정이 이루어지지 않으면 에러 메시지를 출력하고 키 입력과 함께 초기화면으로 전환한다. 대략적인 측정 소요시간과 설정된 최대 허용시간은 다음 <표 5>에 나타나 있다. 이 프로그램의 모듈과 그 기능은 <표 6>과 같다.



<그림 11> 관측환경 설정 화면

구조물 변형관측을 위한 정밀측량시스템의 개발

<표 5> 관측장비별 측정 소요시간과 최대 허용시간

구 분	측정 소요시간	설정시간
T2002 ON/OFF/STOP	0.1sec	5sec
T2002 ANGLE	0.9sec	5sec
TOPCON ANGLE	3.0sec	5sec
TOPCON DISTANCE	5.0sec	20sec

본 연구에서는 1대의 테오도라이트로 자료를 얻

어, 저장하고 다시 테오도라이트를 옮겨서 새로운 자료를 얻는 - PC에 1대의 테오도라이트만이 자료 취득이 가능한 - 시스템으로 구현이 되었다. 그 각각의 자료를 취합하여, 이 번들 프로그램의 입력 자료로 편집하고 프로그램을 실행하였다. <표 7>과 <표 8>이 번들 프로그램의 입력과 출력의 예이다.

번들 프로그램에 의한 처리결과를 정리하면, 단위무게의 표준편차(Standard Deviation of Unit Weight)가 거의 1.0에 가까운 것으로 나타나 관측 결과에 대한 정밀도는 매우 양호한 것으로 판단된

<표 6> 번들 프로그램의 모듈과 기능

모 들 명	기 능
Take_Input	테오도라이트에서의 관측값 파일을 읽어들이
Echo_Print	테오도라이트 i, 타겟 j, 수평각, 수직각, 거리를 출력함
Phoco_g	위의 수평, 수직각을 이용하여 가상의 사진면상의 사진좌표를 계산
Reorder	테오도라이트와 타겟의 순서를 정리하여 정규방정식의 계수 매트릭스의 저장 및 메모리에서의 연산을 최적화함
Normal	사진좌표, 테오도라이트 미지수, 타겟 미지수의 관측방정식을 이용하여 각 미지수의 초기치를 계산하고 정규방정식의 계수 매트릭스 및 관측치 매트릭스를 조성함
Choleski	정규 방정식(Normal Eq.)의 해를 구하기 위한 방법으로서 메모리와 연산의 횟수를 최소화하기 위하여 Choleski Decomposition과 Choleski의 Solution을 사용하였다. 테오도라이트의 미지수소의 보정분, 타겟의 미지수소 보정분을 계산한다.
Check_Convergency	초기치와 그 보정분의 연산이므로 보정분이 어느 정도 이하로 작아질 때까지 또는 다른 여러 조건이 만족될 때까지 반복연산을 계속해야 한다. 반복연산은 멈출 조건에 도달하였는지를 검사한다.
Com_Inverse	미지점들의 정밀도 연산을 위해서 최종의 정규방정식의 계수 매트릭스의 역 매트릭스를 구한다.
Residual	미지수소를 확정하고 그에 따른 사진좌표, 또다시 수평각 및 수직각의 잉여치(Residual)를 구한다. 관측치의 최확치로 부터의 편이를 구하여 봄으로써 관측치의 신뢰도 또는 Accept, Reject의 지표로서 사용할 수 있다.
Out-pup	각 반복연산의 말미에 보정분의 출력. 최종 출력에 미지수소의 정밀도, 관측치의 잔차 등을 출력한다.

〈표 7〉 번들프로그램 입력 데이터의 예

```

=====
I N P U T   D A T A
=====
Camera Focal Length(mm) : 152.454
Number of Photographs   : 16
"      Stations         : 116
"      Control Sta.     : 24
"      Gr. Surv. Sta.   : 0
"      Image Points     : 329
"      Distance Obs.    : 0
"      Angle Obs.       : 0
"      Azimuth Obs.     : 0
"      El. Diff. Obs.   : 0

First Approximations for Camera Parameters
-----
Photo No.  Omega(deg)  Phi      Kap      XC(ft)  YC      ZC
-----
1          95.00      -115.00  0.00     380.00  1842.00 582.00
2          95.00      -90.00   0.00     380.00  1727.00 582.00

***Truncated**

Variances for the Camera Parameters
-----
var_OME(deg*deg)  var_PHI  var_KAP  var_XC(ft*ft)  var_YC  var_ZC
-----
25.00            25.00   25.00    4.0E+0002     4.0E+0002 4.0E+0002

First Approximations for Station Coordinates
-----
Sta.No.  X(ft)   Y       Z       var_XX(ft*ft)  var_YY  var_ZZ
-----
1        600.00 1857.00 608.00 1.0E-0006     1.0E-0006 1.0E-0006
71       601.00 1006.00 623.00

***Truncated***

Variances for the non-Control Station Coordinates
-----
var_XX(ft*ft)  var_YY  var_ZZ  var_XY  var_XZ  var_YZ
-----
1.0E-0002     1.0E-0002 1.0E-0002 0.0E+0000 0.0E+0000 0.0E+0000

Default Variances for Photo Coordinates
-----
var_xx(mm*mm)  var_yy  var_xy
-----
9.0E-0006      9.0E-0006 0.0E+0000

Image Point Observations (Photo Coordinates)
-----
sta. No.  Photo No.  x(mm)  y(mm)
-----
1         1         -86.156 19.520
          2         -91.311 10.092
71        7         95.805 36.778
          8         16.778 29.859

***Truncated***

```

〈표 8〉 번들프로그램 출력 데이터의 예

```

=====
O U T P U T
=====
Reordered Photo Numbers
=====
1 : 16
2 : 13

***Truncated***

=====
Connectivity of the Photos
=====
** 1 ** 2 3 4 5 7 8 9 11 12 13 14 15 16
** 2 ** 1 3 4 7 8 9 11 12 13 14 15 16

***Truncated***

*****
* Iteration 1 *
*****

Degree of Freedom = 664
Standard Dev. of Unit Weight = 1.02071

***Truncated***

***** The program has been stopped due to the small corrections. *****

*****
FINAL VALUES
*****

Adjusted Photo Coordinates and Residuals
-----
Sta.No. Pho.No. x mea(mm) x res(mic) x fit y mea y res y fit
-----
1 1 -86.156 -2.9 -86.159 19.520 -4.6 19.516
2 -91.311 -1.7 -91.313 10.092 3.8 10.096
***Truncated***

Final Camera Parameters and Standard Deviations
-----
Pho.No. Omega(d:m:s) Phi Kappa XC(ft) YC(ft) ZC(ft)
sd(Omega) sd(Phi) sd(Kappa) sd(XC) sd(YC) sd(ZC)
-----
1 94:59:32.55 -114:59:53.90 -0: 0:29.49 379.99 1841.99 581.99
0: 0:40.17 0: 0: 4.07 0: 0:44.60 0.01 0.00 0.02
2 95: 1:54.49 - 89:59:54.09 0: 1:53.16 380.00 1726.99 582.00
2:29:51.04 0: 0: 5.55 2:29:51.03 0.00 0.01 0.00
***Truncated***

Final Object Point Coordinates and Standard Deviations
-----
Sta.No. X(ft) sd X(ft) Y sd Y Z sd Z
-----
1 600.00 0.00 1857.00 0.00 608.00 0.00
71 601.00 0.01 1006.00 0.00 623.01 0.01
***Truncated***
    
```

다. 그리고, 최종 좌표값(x, y, z)에 대한 표준편차도 x값과 z값에 0.01ft이고, y값은 0.00ft로 나타나 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

#### 4.2 레이저 시스템

레이저 변형관측시스템의 구성 및 설치는 <그림 1>에서 보인 바와 같으며, 각 구성요소의 값은 다음과 같다.

$$D_1 = 1mm, f_1 = 16mm, D_3 = 2mm,$$

$$l_3 = 16m, f_2 = 50mm$$

이 값을 사용하여서 구한  $l_1$ 의 값은

$$\frac{D_2}{f_2} = \frac{1}{16} - \frac{2}{16000} = 0.062375 \text{ 에서,}$$

$$\therefore D_2 = 0.062375 f_2 = 3.11875mm$$

$$\therefore l_2 = 3.11875 \times \frac{16000}{2} = 24,950mm$$

$$\therefore l_1 = 49.90mm$$

이며, 그 값에 따라 렌즈의 위치를 결정하였다. PSD에서의 빔 직경은 2mm이다. 이렇게 구성한 레이저 시스템으로 실험을 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 레이저 광원과 탐지기의 전원을 켜 후, 공기의 흐름을 최소화한 실험실내에서는 곧바로 ( $100 \times 10^9$  second) 레이저 위치가 안정됨을 알 수 있다. (<그림 12>)

(2) 레이저 광원 쪽의 실험실 창을 개방하여 온도 및 바람의 영향을 검토하였다. (<그림 13>) 파형이 약 110mV (약 200 $\mu$ m) 정도 Shift 되었음을 알 수 있다.

(3) 레이저 광원뿐만 아니라 17m의 레이저 전 경로에 걸쳐서 실험실 창을 개방한 후의 파형이 <그림 14>에 보인 바와 같다. 파형이 <그림 13>보다 약 360mV (약600 $\mu$ m) shift 되었다.

(4) 시간의 경과에 따른 레이저 위치의 변화를 <그림 15>, <그림 16>, <그림 17>에서 볼 수 있다. 위치의 변이(Fluctuation)량은 800mV(1.2mm) 정도이며 그 범위내에서 위치가 변화됨을 알 수 있었다.

레이저 변형관측시스템의 고안을 위한 레이저 시스템의 실험결과에 의하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

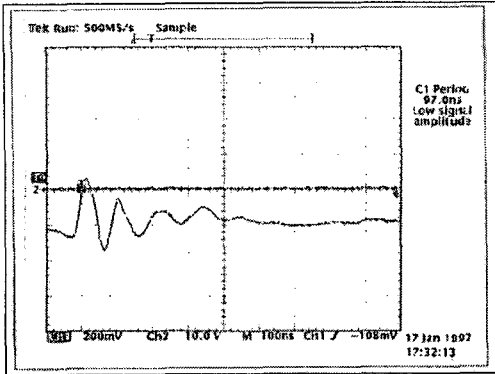
(1) PSD에서의 레이저빔의 직경은 이론상 원하는 만큼 줄일 수 있다. 그러나 빔의 산란에 의한 최소 빔 직경은 PAD 면에서 약 2mm인 것으로 판단된다.

(2) 17m의 간격의 시스템에서의 환경 변화에 따른 빔의 위치오차는  $\pm 1.2mm$  이내임을 알 수 있었다.

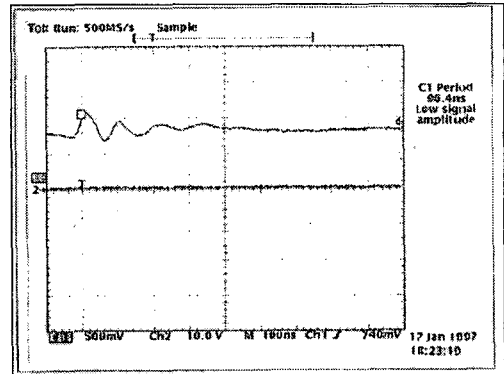
(3) 레이저 위치의 이동현상은 공기의 흐름에 좌우되기 보다 온도의 변화에 의한 것이라고 판단되었는데 (바람이나 공기의 흔들림으로 인한 레이저의 위치변화가 거의 없었기 때문에) 따라서, 기온이 안정되고, 햇빛이 없는 저녁시간에 관측을 한다면 현재의 시스템으로  $\pm 1.2mm$  정도의 관측 정밀도를 가질 수 있다고 생각된다.

(4) 본 시스템으로 수용이 가능한 진동의 주파수는  $10^7 \text{ cycles} \left( \frac{1}{100 \times 10^{-9}} \right)$  이므로, 거의 모든 구조물의 진동은 감지가 가능하다고 판단된다.

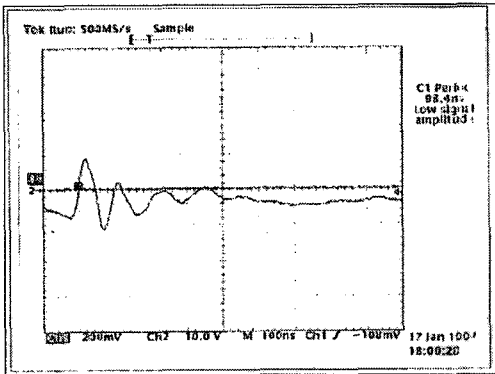
구조물 변형관측을 위한 정밀측량시스템의 개발



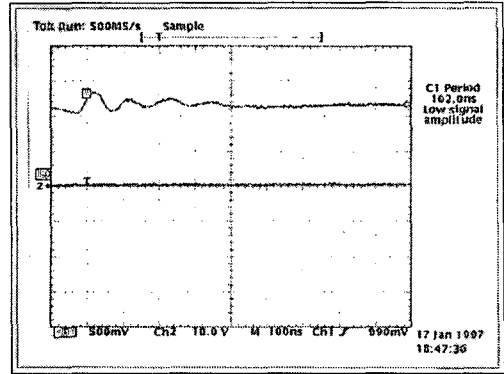
<그림 12> 공기의 흐름을 최소화한 후 측정된 파형



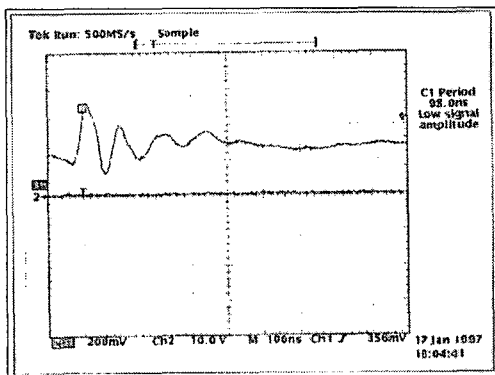
<그림 15> 시간의 경과에 따른 레이저 위치의 변화



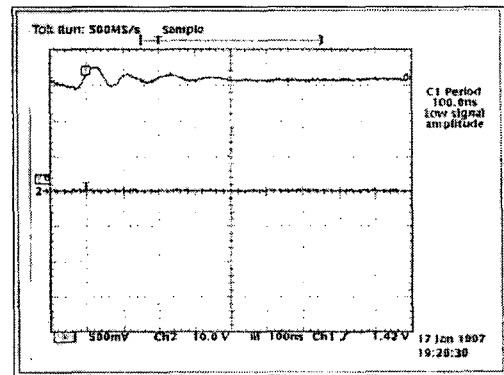
<그림 13> 레이저 광원 쪽의 실험실 창을 개방한 후 측정된 파형



<그림 16> 시간의 경과에 따른 레이저 위치의 변화



<그림 14> 레이저 광원 전 경로의 실험실 창을 개방한 후 측정된 파형



<그림 17> 시간의 경과에 따른 레이저 위치의 변화

## 5. 결 론

### 5.1 데오돌라이트 정밀측량시스템의 개발

데오돌라이트를 이용하여 실시간 3차원 좌표를 표시하는 3차원 정밀측량시스템의 구현을 위하여 라이카社의 T2002 디지털 데오돌라이트와 톱콘社의 GTS-301 토탈스테이션의 컴퓨터와의 교신을 완료하였다. 현재 2대의 데오돌라이트에 의한 동시관측은 구현되지 않았으나, 개별 데오돌라이트의 수평, 수직각 및 거리의 관측은 컴퓨터 화면에서의 표현과 관측자료의 저장이 가능하게 하였다. 저장된 파일은 바이너리 파일로서, 개발한 에디터를 이용하여 자료의 삭제, 수정, 첨가가 가능하며 다음의 번들 프로그램의 입력 데이터의 양식에 맞게 조성되어진다.

2대 이상의 데오돌라이트에 의해 수집된 데이터는 개발된 번들 프로그램에 입력되어 해석사진측량의 이론에 입각한 미지수 (데오돌라이트의 위치 및 영의 방향, 타겟 점의 3차원 좌표)의 최소제곱법에 의한 최확치를 구하게 된다.

번들 프로그램은 데오돌라이트의 수평, 수직각을 가상의 사진좌표로 바꾸는 모듈을 비롯하여 축약정규방정식의 조성과 Choleski 해법 그리고 Snay's Reordering 알고리즘 등의 기법이 사용되었다.

### 5.2 레이저 변형관측시스템

기존의 레이저 변형관측시스템의 관측가능거리, 관측 가능한 진동수 등의 제한을 극복할 레이저 광원과 탐지기에 대한 고찰과 공기 중에서의 레이저의 산란, 공기흐름, 온도변화 등으로 인한 레이저의 위치 변화, 피측정물의 진동의 감지를 위한 시스템의 감지가능 진동수의 파악 등을 위하여 레이저, 변형관측시스템을 실험실내에 설치하였다.

실험의 결과, 일반적 He-Ne 레이저에 렌즈를 조합하면 피측정물의 거리에 관계없이 최소한의 직경을 가지는 빔의 조성이 가능하였으며, 탐지기로는 Quad Cell로 불리는 Position Sensing Device(PSD)

가 유용하다고 판단되었다.

간격 17m의 광원과 탐지기에 있어서의 실험에 의하면 레이저빔은 공기의 흐름에는 거의 영향을 받지 않으나, 온도 및 빛의 변화에 영향을 받는 것으로 판단되어, 흐리며 온도의 변화가 없는 날짜와 시간을 선택하면 약 2mm 정도 이상의 변형의 관측이 가능한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(KOSEF 951-1206-003-2) 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. American Society of Photogrammetry, Manual of Photogrammetry, 4th Edition, Falls church, VA, 1980.
2. Brown, D.C., The Bundle Adjustment-Progress and Prospective, Invited Paper, Archives, 13th International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Commission III, Helsinki, Finland, 1976.
3. Kim, Byung-Guk, Development of a Photogrammetric System for Monitoring Structural Deformations of the Sturgeon Bay Bridge, Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1989.
4. Methley, B.D.F., Computational Models in Surveying and Photogrammetry, Blackie & Son Ltd., 1986
5. Wolf, P.R., Adjustment Computation, 2nd Edition, Landmark Enterprises, Rancho Cordova, CA, 1980
6. Borland International, Turbo Pascal 7.0 User's Guide



구조물 변형관측을 위한 정밀측량시스템의 개발

7. LEICA, WILD T2002 Electronic Precision Theodolite Instruction Manual
8. TOPCON, Electronic Total Station(GTS-301) Instruction Manual
9. Francis T.S.Yu, I.C.Khoo, Principles of Optical Engineering, Wiley, 1990
10. Eugene Hecht, Optics, Mcgraw Hill, 1975
11. 김병국, Industrial Measuring System(IMS)과 그 소프트웨어의 구조, 대한토목학회논문 집, 제12권 제4호, 1992, pp.157-165.
12. 김병국, 측량계산용 기본 소프트웨어의 개발, 한국측지학회지, 제12권 제2호, 1994, pp.199-208