

## 3차원 레이저 측량기를 이용한 터널 변위 관측

이재원 · 김용석 · 송연경

동아대학교 토목공학과

### Semi Variance Measurement on Tunnel using 3D Laser Scanning

Jaonee Lee, Yongsuk Kim and Younkyung Song

Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

**요 약** 터널공사의 필요에 따라 그 시공방법은 많은 발전을 해왔으나 아직도 시시각각으로 일어나는 터널 공사중의 사고는 조속히 극복해야할 과제다, 이러한 위험요소를 빨리 발견하고 대비하기 위해서는 계측의 정확성과 신속성이 요구되고 있거나 아직도 천단침하 및 내공변위 계측에 줄자, 레벨 또는 Total Station 등을 이용하는 일반적인 측량방법에 의존하고 있다. 터널의 변형계측을 위한 일반측량방법은 사람이 직접 그 측점에 접근해야하며, 관측에 시간이 많이 소요되고, 관측하는 기술자의 능력에 따라 큰차이가 있을 수 있는 등 여러 문제점을 안고 있다. 따라서, 본 연구에서는 고밀도 레이저 측량기법인 3D Laser Scanning을 이용하여 터널의 천단침하 및 내공변위를 기존의 Total Station 측량기법보다 더 경제적이고 정밀하며, 신속하게 측정할 수 있는 기법을 제시하므로써 3D Laser Scanning을 이용한 터널계측의 발전과 향후 무인 자동 계측시스템의 개발에 이바지 하고자 하는데 그 목적이 있다.

**주요어** 천단침하, 내공변위, 3차원 레이저 스캐닝

**ABSTRACT** There are many risks in constructing tunnel-structure. To prevent these risks from occurring and secure safety, the precise and rapid survey of inside displacement of the tunnel is required. But nowadays the measurement of the crown settlement, convergency, and surface settlement depends on general kinds of method which use total station or level. In the way to provide data about maintaining structure according to recent improvement and progress of measuring technology, 3D laser scanning is used. It solves the problem of reliability in measuring displacement of existing structure, provides material that enables to estimate shape change of structure visually, and makes it possible to deliberate speedy countermeasure. By this three dimensioning it is possible to make efficient use of structure maintenance and field measurement.

**Key words** Tunnel Convergence, Crown settlement, 3D Laser Scanning

#### 1. 서 론

현대의 토목 구조물은 도시화, 밀집화, 고속화, 정밀화가 요구되고 또한, 서로 상반되는 경제성과 안전성이 절실히 요구되고 있다. 국내에서도 지하철, 지하상가, 고층건물 등의 건설을 위해 도심지 내에서 굴착공사가 빈번하여 이로 인한 주변건물의 피해가 발생되고 심각한 사회 문제로 대두되고 있으며 특히, 교통수단의 획기적인 발달로 교통로인 도로나 철도의 경사는 기능에 치명적인 영향을 주기 때문에 경사도를 완만하게 하기위

해 터널과 고가 교량 등의 구조물이 주로 이용하고 있다. 따라서 이들 조건을 만족시키기 위한 정보화 시공 즉, 현장계측을 이용한 시공의 필요성은 증가되고 있는 가운데 지금까지 시행 되어온 구조물의 변형에 대한 측정방법으로는 추정 정밀도가 낮고 측정값에 대한 검증이 안 되는 등 많은 문제가 내포되어 왔다. 터널의 변형 관측을 위한 일반적인 측량방법은 사람이 직접 터널내의 측점에 접근해야하며, 측정에 시간이 많이 소요되고, 기술자의 능력에 따라 측정값이 큰 차이가 있을 수 있는 등 여러 문제점을 안고 있다.

Corresponding Author : 김용석 (rosekys@dau.ac.kr)

원고접수일 : 2007년 1월 18일 게재승인일 : 2007년 2월 23일

따라서, 본 연구에서는 3D Laser Scanning을 이용하여 터널의 내공변위, 천단침하 및 지표침하를 동시에 관측하여 3차원으로 자료를 제시하고 공사의 안정성 유무를 파악하기 위하여 목적을 가지고 공사의 안전성을 예측하고 적절한 대책을 강구하며, 공학적 이론을 실무에 적용하고 검증하여 공학적 한계를 극복할 수 있게 한다. 본 관측에서는 현재 사용중인 각종 계측장비 측정값과 비교·분석하고자 한다.

## 2. 터널 계측의 목적

시공에 앞서 설계나 시공 계획을 위해 지질조사가 행해지지 않거나 이 조사로서 복잡한 지반상태를 정확하게 예측하기에는 곤란하다 따라서 공사의 지반상태를 계측에 의해 확인하고 최초설계와 비교하여 차이가 있으면 현장에 맞는 설계로 수정하거나 보완하여야 한다. 또, 공사중의 붕락 사고는 물론 완성후의 형상변화로 방지할 수 있도록 하기 위하여 계측을 하는 것이 감시의 목적이 되고 안전관리에도 유효하다(박운용, 2004).

계측은 보통 시공과 병행하여 측정결과는 즉시 시공이나 설계에 반영되어야 한다. 구체적인 계측의 목적은 다음과 같다.

1. 지반의 거동부터 각 시공단계의 현상을 당초 설계와 비교 분석한다.
2. 이론상으로 결정한 지보력을 계측치로 부터 지보효율을 확인한다.
3. 시공중의 현장의 안전성을 확보한다.
4. 시공중의 터널계획선 인조구조물에 대한 영향을 측정한다.

### 2.1 내공변위 측정

사용중인 터널의 내공이 상대적인 변형과 지압 등의 외압에 의해 시간경과에 따라 변화를 할 경우 단면의 변형상태, 변위속도 등을 측정하여 구조물의 안전성 판단을 위한 자료 및 유지관리하며 내공변위 측정은 콘크리트 라이닝에 측정핀을 설치하고 내공변위계를 이용하여 터널단면의 변위 유무, 변위속도 등을 정기적으로 측정하여 터널의 안정성을 측정하여 향후 유지관리의 기초 자료를 제공하는데 그 목적이 있다(아주엔지니어링,

2006).

### 2.2 천단침하 측정

내공변위측정과 함께 주변지반의 확인 및 NATM의 경우 록볼트 및 슛크리트의 지보효과를 파악하기 위한 계측이다. 천단침하 측정은 특히 지형, 지질적으로 고결도가 낮은 지층이나 토피가 얇은 경우 및 단층등의 지질 구조적 요인으로 위해성이 우려되는 지점에서는 중요한 계측이다(동광종합기술공사, 2004).

## 3. 3D Laser Scanning

암반조사 및 각종 문화재 측량 등에서 현장 접근성, 측정시간 및 조사 인력등의 한계성을 극복하기 위해서 현재 가장 정밀한 3차원 측량 자료를 도출하는데 사용되고 있는 3D Laser Scanning System을 활용한 원격 자동 측량방법이 활용되고 있다. Laser를 이용하여 대상체에서 떨어진 위치에서 Laser를 투사하여 대상체 표면상의 수많은 측정점(point-cloud)의 3차원 공간좌표를 연속적으로 얻는 방법으로서, 측정점간의 간격은 0.5mm~3mm 정도까지 측정할 수 있기 때문에 구조물에 대한 3차원 정보를 정밀하게 취득할 수 있는 방법이다.

### 3.1 3D Laser Scanning 기술동향

3D Laser Scanning은 2차원 사진을 Scanning 하듯이 3차원의 사물을 컴퓨터 상에 X,Y,Z 값을 가진 점 데이터군(point-cloud)으로 받아 들여 형상화 하는 방식으로서 반사 타겟 없이 지형, 지물 및 건축 및 토목 구조물의 3차원 좌표를 1초당 12,000~5,000포인트를 취득할 수 있는 기술이다. 또한 주어진 실물모형을 정밀하게 복제, 재현하여 이로부터 대상체의 공간상에 다양한 정보를 분석 및 해석하는 것을 형상 역공학(shape reverse engineering) 또는 역공학(reverse engineering)이라 부르는데, 전통적으로는 항공기 및 자동차 제작과정 등에서 카피밀링(copy milling)등 정밀 기계공학 분야에서 널리 사용되고 있다(lee,1999). 뿐만 아니라 토목 및 측량분야에 다양한 응용이 가능하고 기본적인 응용분야로서 교각, 댐, 건물, 대형 플랜트, 선박 등의 구조물 3차원 측정, 터널, 도로 사면 등의 변위측정, 건축 리모델링, 문화재

보존 및 복원 등의 3차원 측정, 자동차 사고 재구성, 변위 등의 3차원 측정, 등에 적용, 활용되고 있다. Scanning자료 취득은 비접촉식으로 Laser 등을 이용하여 대상물의 간접측정을 하는데, 접촉식 측량 장비에 비하여 우연 오차나 데이터 손실을 최소화 할 수 있다. 그리고 작업이 간단하여 빠르게 데이터 취득이 용이하며 각종 구조물 변형에 따른 도면 복구, 원형 복원, 안전 진단 등을 위한 실측 자료 요구에 능동적으로 대처할 수 있으며 기존의 접촉식 실측 자료 측정에 따른 단점을 보완 할 대안으로 평가되고 있다(www.RIEGL.com).

### 3.2 3D Laser Scanning 데이터 취득 방법

지상 Laser scanner는 상대적으로 짧은 시간 안에 대상물체 표면에 수많은 측정군(point-cloud)으로 3차원 공간 좌표를 기록한다. 이를 완성하기 위해서는 물체 표면위에 laser beam을 투사해야하고 이러한 scanning은 일정량 굴절각의 증분을 위하여 하나 또는 두개의 mirror를 사용하여 수행된다. 또한, 물체의 완전한 3차원 형체 측량을 위해서 회전하기도 한다. 물체에 투사된 Laser point의 위치를 결정하는 것은 거리와 각이므로 각 측정의 높은 정밀도는 매우 중요하다(Blais *et al.*, 2000).

3D Laser Scanning 측정은 Laser를 발사하여 대상물에 반사되는 Laser가 스캐너에 도달할 때까지의 시간을 관측하고 그 값에 빛의 속도를 곱하여 거리를 계산하는 방식으로 Triangulation Method와 Time-of-Flight Method 로 나누어진다(Boehler *et al.*, 2002).

그림 1은 Triangulation 방법으로 Laser를 대상물에 발사한 후 광전소자(CCD)에 맺히는 반사빔의 위치를 Base로 이용하여 삼각법(Triangulation)으로 역산하여

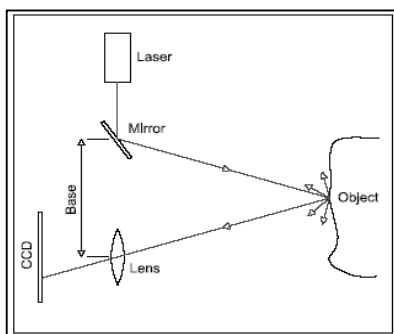


그림 1 Triangulation 방식.

위치를 결정하는 방식이며 이런 형태의 스캐너 방식은 근거리의 경우는 1 mm보다 적게 3D 포인트 표준 편차로 도달한다. 그림 2는 Time-of-Flight 방법으로는 Laser를 대상물에 발사한후 Laser가 반사되어 돌아오는 시간차(Time-of-Flight)를 계산하여 위치를 결정하는 방식으로 정확도는 0.3~5 cm 사이이다. 두가지의 방식들의 정확도는 Scanner 기준선 길이와 물체 거리 모두에 달려있는데, 고정된 기준선으로부터 거리에 대한 표준 편차는 거리제곱에 비례하여 증가한다(Blais *et al.*, 2000; Boehler *et al.*, 2002).

본 실험에서는 고출력 관측범위 등을 고려하여 TOF (Time-of-Flight)방식을 사용하고 있다.

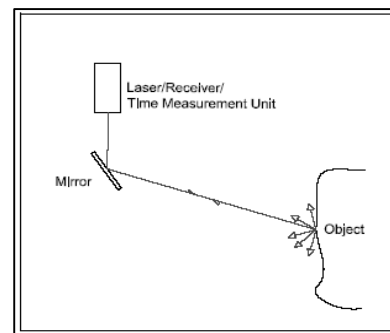


그림 2 Time-of-Flight 방식.

### 3.3 3D Laser Scanning 거리 측량

3D Laser Scanning은 매우 작은 순간시야각 IFOV (Instantaneous Field of View)을 가진 강력한 Laser를 발사하여 지상에서 반사되는 Laser가 Scanner에 도달할 때까지의 시간을 관측하고 그 값에 빛의 속도를 곱하여 거리를 계산하여 정밀한 표고 관측을 한다. 그 원리는 그림 3에 나타내었다.

Laser를 이용한 거리의 관측에는 크게 도달시간을 관측하는 펄스(pulse)를 이용한 방법과 위상차(phase shift)를 이용하는 방법이 있다. 위상차를 이용하는 방법에서는 연속적으로 발사되는 Laser 광선 CW(Continuous Wave)를 이용하여 발사된 위상과 반사된 위상의 차를 관측하여 거리를 계산한다. 그림 4에는 Pulse Laser와 CW Laser의 원리를 나타내었다.

현재 사용되고 있는 대부분의 3D Laser Scanning 장비에서는 Pulse Laser를 사용한다. Pulse를 사용하는 경

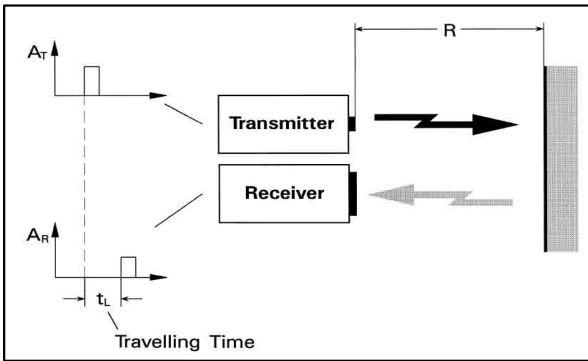


그림 3 Time-of-flight ranging.

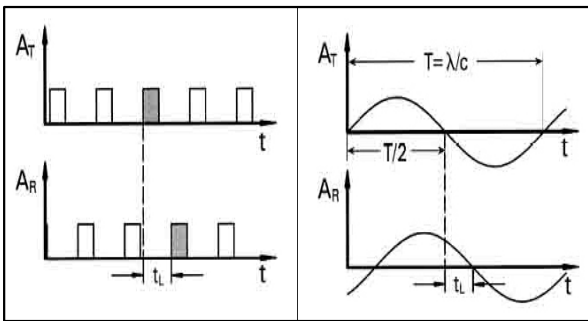


그림 4 Measuring principle of pulse and CW-lasers.

우, 거리를 관측하는 가장 일반적인 방법으로 Pulse Laser의 왕복시간을 관측하여 광속을 곱한 값으로서, Pulse가 반사되고 수신되는 사이의 시간을 이용하는 것이다. Pulse Laser의 왕복시간은 아래의 식 (3-1)과 같다.

$$t_L = 2 \frac{R}{c} \tag{3-1}$$

여기서, R : 거리관측부와 지표면 위치 간의 거리,

c : 빛의 속도

식(3-1)에서 거리오차  $\Delta R$ 은 시간오차  $\Delta t_L$ 에 정비례하며, 다음과 같이 유도된다.

$$\Delta R = \frac{1}{2} c \Delta t_L \tag{3-2}$$

여기서,  $\Delta R$  : 거리의 해상도

$\Delta t_L$  : 시간 관측의 해상도

따라서, 거리관측부와 지표면 위치 간의 최대 거리는 다음과 같다.

$$R_{\max} = \frac{1}{2} c t_{L_{\max}} \tag{3-3}$$

이때, 거리의 정확도는 Pulse의 생성시간(Generation Time), S/N비율, 관측 비율 등에 의해 결정된다.

$$\sigma_R \sim \frac{c}{2} t_{\text{rise}} \frac{1}{\sqrt{S/N}} \tag{3-4}$$

여기서,  $t_{\text{rise}}$ 는 Pulse 생성시간, S는 광다이오드 (photodiode) 전류의 신호강도, N은 광다이오드와 증폭기의 열잡음 강도이며, 일반적으로 사용되는 3D Laser Scanning 시스템에서 거리관측의 정확도는 mm 단위를 가진다(송연경, 2004).

#### 4. 실험 및 분석

본 관측은 3D Laser Scanning을 이용한 내공변위와 천단침하 측정분석을 위해서 3D Scanning 으로 터널 단면별로 상호지점에 대한 변위값을 관측하고, Total Station과 일반 계측장비로 계측 실시하여 비교·분석하였다.

##### 4.1 관측장비 제원

본 연구에서 사용된 측정 장비는 I사의 4400 버전에 3D Laser Scanning을 이용 하였고 Total Station으로는 T사의 723 버전을 사용하여 관측 하였으며 내공변위계로는 EM-20A 제품으로 실시하였다. 3D Laser Scanning 제원은 그림 5와 표 1의 나타낸 것과 같다. 본 장비의 최대 측정거리는 400 m이며 측정 오차는 5 cm (at 400 m) 정도의 제원을 가지고 있으며 초당 5,000 포인트의 측정점을 취득할 수 있으며 디지털 카메라는 80도 연직각으로 360도 수평각 회전으로 스캐닝 시 실시간 연동과 스캐닝 데이터 저장이 실시간으로 저장된다.

##### 4.2 정확도 분석

Laser Scanning System의 정도는 각  $\beta$  그림 6의 정도로 결정되며 광전소자 CCD 레이저에 의해서 이미지에 측정점을 나타내며 각  $\alpha$ (거울 회전각)는 코드화 된 범

위에서 더 높은 정밀도로 관측할 수 있다. 그러나 만약  $\beta$ 각이 정확하게 결정되어지지 않는다면, 관측값의 위치는 Laser 반사경으로부터 비롯한 광선 어딘가에 축설 될 것이다. 만약  $\beta$ 각이 유일한 오차 원인이 되면 관측 정도는 오직 레이저 반사경으로부터 장거리의 정도만큼 구성되는 것을 예상할 수 있다. 그리고 이 표준편차 정도는 거리에 따른 제곱으로 준다(Balzan *et al* 2001). 본 연구에서는 내공 변위 및 천단침하 현상을 관측하기 전 필요한 정확도를 분석하기 위해서 그림 7과 같이 기선 거리에 따른 정확도 분석을 실시하였으며, 관측방법은 기준이 되는 측점에 Cylinder을 설치하고 난 후 3D Laser Scanning를 이용하여 Point cloud를 취득하고 표 2의 나

타난 것과 같이 거리 30 m 지점 까지는 표준편차 1 mm 이내의 값을 가지며, 50 m를 나타내게 되는 결과는 거리의 따라 정확히 예상되는 증가를 나타내고 있다.

4.3. 현장실험

본 연구에서는 현재 시공 중인 도로공사 현장의 터널을 연구 대상으로 선정하여 현장관측을 실시하였으며 그림 8은 현장 실험 대상지역을 나타내고 있다. 자료 처리시 좌표 기준 설정은 그림 9는 Gyroscope와 Total Station를 결합하여 목표점의 방위각을 측정함으로써 터널 중심선의 위치를 보다 정밀하게 관측하는 시스템을 적용시켜 기준점 측량을 실시하여 그림 10과 같이 터널 중심과 양쪽에 검측점을 설치토록 하였다. 검측점은

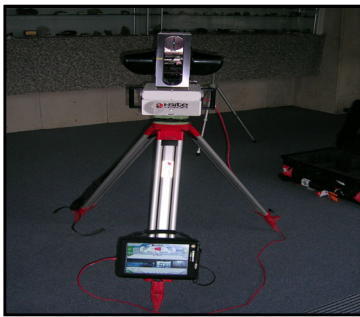


그림 5 I사의 4400 버전.

표 1 3D Laser Scanning 사양.

모델명	I 사
최대측정거리	400m
레이저 빔 폭	2mrad
거리정밀도	50mm at 400 m
각 정밀도	0.002°
측정속도	4400포인트/ sec
스캐닝각도	80° 연직각/360° 수평각
레이저규격	Class 3R(IEC 60825-1)
망원부 배율	16×
메모리	18Gb
디지털촬영각도	80° 연직각 / 360° 수평각

표 2 기선 거리에 따른 RMS.

Distance (m)	RMS (mm)
10	0.5
20	0.7
30	0.9
40	1.2
50	1.6

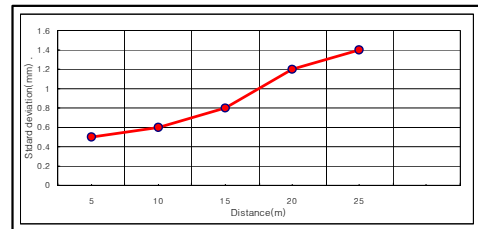


그림 7 기선거리에 따른 RMS분석.

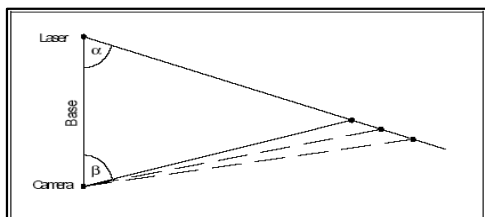


그림 6 회전각에 따른 점위치 정밀도.



그림 8 관측 현장.

터널 공사 구간중 그림 12와 같이 관측이 양호한 총 3개 단면을 선정하여 7일 간격으로 그림 12와 같이 D1, D2, H1 거리를 그림 11의 3D Laser Scanning과 Total Station을 이용하여 3회 현장관측을 실시하였고 부가적으로 기존 계측기를 이용하여 현장관측을 실시하였다.

### 4.3.1 기존의 내공변위 측정방법

내공변위 측정시 보통 고성능의 스틸테이프를 내장한 테이프식 내공변위계가 사용된다. 읽기의 정밀도는

기기에 따라 1/100 mm~1 mm정도가 있으나, 본 조사에서는 1/100 mm의 정밀도를 갖는 그림 14와 같은 EM-20A 측정기를 사용하여 그림 15와 같이 설치하였으며 내공변위 측정핀은  $\phi 25$  mm를 사용하여 드릴로 천



그림 9 Gyroscope.

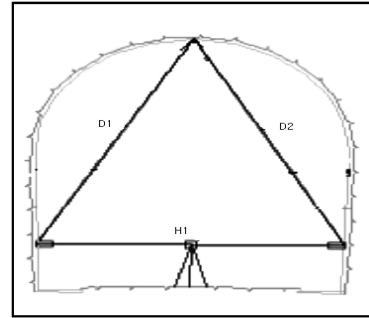


그림 12 기본 단면.

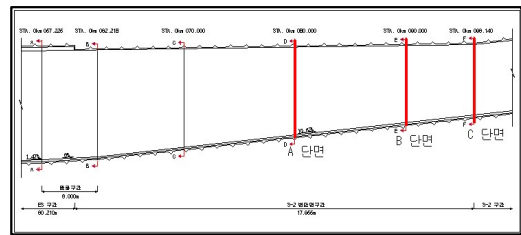


그림 13 종단면도.



그림 10 검측점 설치.

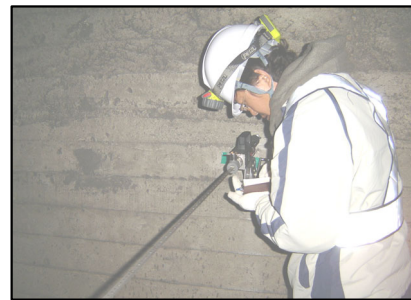


그림 14 EM-20A 설치.

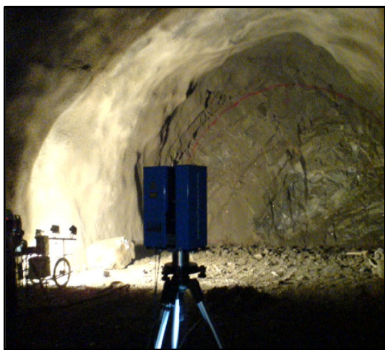


그림 11 현장 Scanning.

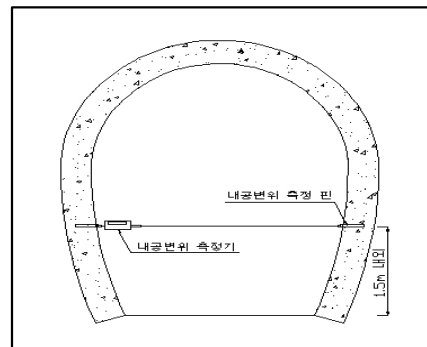


그림 15 내공변위계측기 설치.

공 후 급결응고제로 측정 핀을 고정시킨 후 측정하였다.

본 조사에서는 터널 전구간에 걸쳐 총 3개소(0+05.0, 0+100.0, 0+150.0 mm)에서 측정을 하였으며, 실측치에 대한 보정은 기계길이보정 및 온도보정 등에 의해 다음과 같이 계산하였다.

$$R = R_1 + R_2$$

$$L = [R + L_0][1 + \alpha(T - 20)]$$

$$D = \text{초기치의 } L - \text{측정치의 } L$$

R : 측정치(Raw Data) - 단위 : mm

R1 : m, cm 단위 (Tape measure의 읽음 값)

R2 : mm 단위 (디지털 표시부)

T : 측정시 온도 (°C)

L : 보정 측정치 (mm)

L0 : 완성시 길이(mm) - 계기의 측정부 길이(465mm)

$\alpha$  : 선팽창 계수(°C) -  $11.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

D : 변화량 (mm)

### 4.3.2 기존의 천단침하 측정방법

Tunnel의 천단부근 숏크리트에 콘크리트못을 박거나 그림 16과 같이 내공변위측정용 천단 볼트를 박아 Level 이나 내공변위계로 측정한다. 측정의 위치는 막장 통과 후 가능한 한 빠른 시간내에 측정하며 늦어도 1~2시간 이내이어야 한다. 측정은 수준측량으로 Level 이나 내공 변위계를 사용하여 수준점을 기준으로 절대고를 구하며 측정밀도는  $\pm 1$  mm 정도라야 하며, 측정시간은 변위가 수렴 할 때까지 하여야 한다.

### 4.4 자료처리

3D Laser scanning을 이용하여 그림 17, 그림 18, 그림 19와 같은 각 단면의 3차원 좌표를 취득하였으며 위의 3차원 좌표를 이용하여 그림 20, 그림 21, 그림 22의



그림 16 천단 침하볼트 설치.

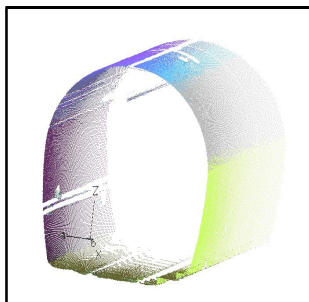


그림 17 단면 A.

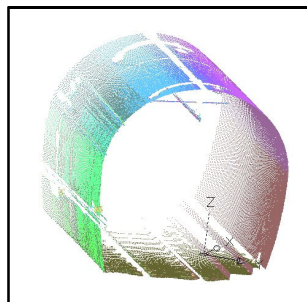


그림 18 단면 B.

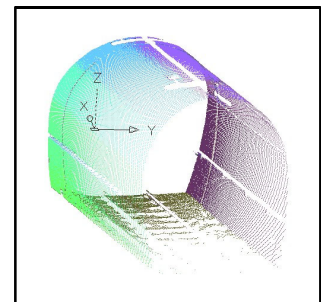


그림 19 단면 C.

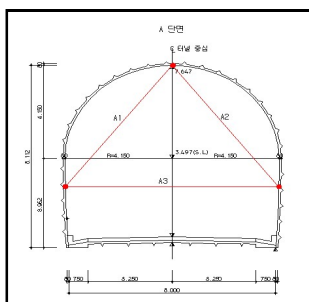


그림 20 단면 A.

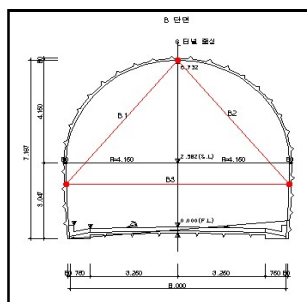


그림 21 단면 B.

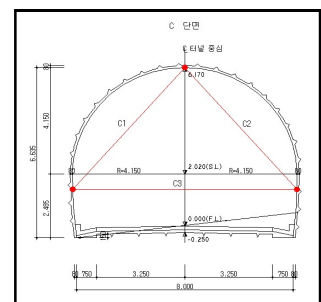


그림 22 단면 C.

표 3 3D Lase scanning와 Ts와의 관측 결과(m).

구분	3D Laser Scanning			변화량		Total Station			변화량		
	1차	2차	3차	△(1-2)	△(1-3)	1차	2차	3차	△(1-2)	△(1-3)	
단면A	A1	6.827	6.828	6.827	-0.001	0.001	6.831	6.833	6.830	-0.002	0.001
	A2	6.782	6.782	6.782	0.000	0.000	6.781	6.782	6.780	-0.001	0.001
	A3	8.275	8.275	8.275	0.000	0.000	8.273	8.275	8.270	-0.002	0.003
단면B	B1	6.502	6.503	6.503	-0.001	0.000	6.504	6.505	6.503	-0.001	0.001
	B2	6.503	6.503	6.502	0.000	0.001	6.504	6.503	6.504	0.001	0.000
	B3	8.278	8.277	8.278	0.001	-0.001	8.277	8.276	8.276	0.001	0.001
단면C	C1	6.294	6.294	6.295	0.000	-0.001	6.295	6.293	6.294	0.002	0.001
	C2	6.298	6.298	6.297	0.000	0.001	6.297	6.296	6.297	0.001	0.000
	C3	8.282	8.283	8.282	-0.001	0.001	8.283	8.282	8.281	0.001	0.002

단면의 데이터를 취득할 수 있었다. 또한, 이와 동시에 현재 터널 현장에서 관측에 사용하고 있는 Total Station을 이용하여 내공변위 및 천단침하 관측을 수행하였다. 3D Laser Scanning과 Total Station을 이용하여 한측점의 10회 평균한 관측 결과를 표. 3과 같이 나타내었으며, 1차 관측한 결과를 기준으로 7일 간격으로 발생하고 있는 변위량을 나타내고 있다. 내공 변위계의 관측은 본 실험의 1차와 3차 관측에 동시 실시하였으며 관측값은 표 4에 나타 내었다.

#### 4.5 결과분석

자료 처리의 정확도는 선행 실험의 결과를 고려하였을 경우, 실험 대상물의 크기를 고려 할 때 약 0.6mm이 내의 오차로 측정할 수 있으며, 이는 현재의 터널 측량 방법과 비교할 때 허용오차 범위 내에 포함된다. 연구에서 이용한 Total Station의 거리 정확도는 제조사에서 제공하는 장비 제원서에 공지하는 측정거리가 7000 m까지 측정 가능한 장비로서 prism을 이용할 경우  $\pm(3\text{mm} + 2\text{ppm} \times \text{측정거리})$ 의 오차를 포함할 수 있다. 그리고 CAD를 이용하여 각각의 거리를 측정하였고, Laser Scanning은 Laser Scanning의 그림 23의 Control에서 각단면의 3D 좌표값을 취득하여 각각의 거리를 현장에서 바로 취득할 수 있었으며 실내에서 그림 24, 그림 25와 같이 I사의 상용프로그램을 이용하여 변형량을 계측할 수 있었다. 뿐만 아니라 단독 측위가 가능하여 능률적인 작업이 가능하였다. 터널 내공변위 및 천단침하 관측이 정해진 빈도로 반복적으로 이루어져야함을 고려할 때 초기 타겟 설치에 소요되는 시간과 인원을 제외한다면 1인의



그림 23 Scanning Control.

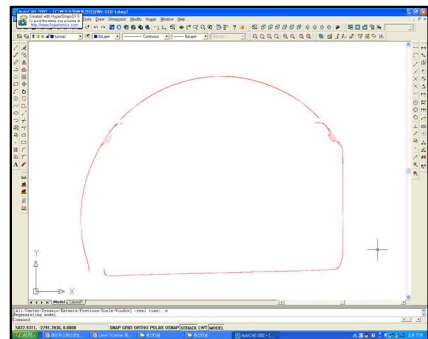


그림 24 Data 처리전.

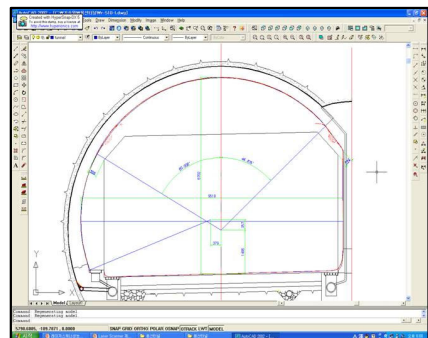


그림 25 Data 처리후.



표 4 내공변위계 측정 결과(m).

구 분	관측보정값		T	변화량	비 고
	1회 측정치	2회 측정치	온 도	$\Delta(1-2)$	
단면 A	8.277	8.273	14℃	0.004	
단면 B	8.280	8.275	14℃	0.005	
단면 C	8.285	8.288	14℃	0.003	

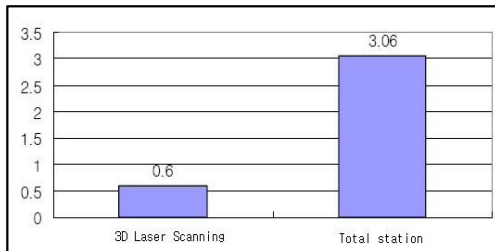


그림 26 RMS 분석.

작업자가 매우 신속하게 관측지점을 측량할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 내공변위계 측정은 스틸자의 특징인 처짐에 대한 보정이 부정확하였고 기존의 천단 침하의 측정방법인 Level을 이용한 방법은 터널의 조명 부족으로 인하여 눈금의 읽음 오차가 많아 자료처리에서 제외 하였다. 그림 26은 3D Laser Scanning과 Total Station의 매차 관측시 RMS 분석 결과이다.

## 5. 결 론

본 연구는 터널의 내공변위 및 천단침하를 측정한 것으로서 기존의 관측방법을 탈피하여 소요시간 및 관측값의 정밀성 향상을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 터널단면별로 상호지점간의 관측을 각각의 장비로 관측값과 RMS분석 결과를 비교함으로써 3D Laser Scanning을 이용한 단면변화에 대한 정밀한 변형유무를 사용하는데 안정적인 관측값을 취할 수 있었다.
2. 기존의 2D도면을 탈피한 3D도면을 취득할 수 있으며 터널 측량시의 문제점인 터널 내부의 조명문제를 해결할 수 있었다.
3. 초기 타겟 설치에 필요한 인원과 장비를 제외한다면 Scanning부터 자료처리까지 단독작업이 가능하여

작업자의 업무 능률 향상을 취할 수 있었다.

4. 기존의 내공변위, 천단 침하 측정방법은 현장 여건에 따라 많은 오차를 포함하고 있다는 것을 알 수 있었다.

이상과 같은 3D Laser Scanning 측량방법으로 관측함으로써 열악한 작업 환경과 위험요소가 많은 터널 내부에서의 측량작업시간을 최소화 하며 변형측정 및 유지관리에 활용할 수 있는 3차원 자료추출 방법을 제시할 수 있었다. 터널의 여굴 관측과 문화재분야 뿐만 아니라 각종 발굴현장과 대형 조선소와 각종 토목, 건축 건설현장 등 여러 분야에 응용되어 작업의 효율성 증진에 많은 발전을 가져줄 최첨단 장비로 판단된다.

## 참고문헌

- 아주엔지니어링, 2006, 계측관리 월간 보고서  
동광종합기술공사, 2004, 안전진단보고서  
박운용. 2004, 토목시공학II, 형설출판사, pp.311-367  
송연경. 2004, Direct Georeferencing에 의한 LiDAR 자료와 CCD 영상의 융합과 적용 기법, 동아대학교, pp.33 박사학위논문  
윤부열, 박운용, 장상규, 정창식.2005, 고밀도 레이저 측량을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측, 대한토목학회 학술발표논문집, pp5162-5166  
Balzani, M., Pellegrinelli, A., Perfetti, N., Uccelli, F., 2001:A terrestrial 3D laser scanner: Accuracy tests.  
Boehler, W., Heinz, G. and Marbs, A., 2002, The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording, Surveying, 28, 289-295.  
Blais, F., Beraldin, J. A. and El-Hakim, S.F., 2000, Range Error Analysis of an Integrated Time-of-Flight, Triangulation, and Photogrammetry 3D Laser Scanning System. Proc. 18th Int. Symp. CIPA 2001, pp.445-453.  
Lee, K., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE systems, Addison Wesley Longman, Inc., pp445.  
www.RIEGL.com