

3차원 레이저 스캐닝을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측 Tunnel Convergence and Crown Settlement Using 3D Laser Scanning

이재원* · 윤부열**
Lee, Jae One · Yun, Bu Yeol

要 旨

터널 구조물 시공시에 수많은 위험요소를 가지고 있다. 이러한 요소들을 미연에 방지하고 안정성 확보를 위해서는 터널 내부의 변위에 대한 정확하고 신속한 관측이 요구된다. 그러나 현재 천단침하, 내공변위, 지표침하 등은 토탈 스테이션. 각종 계측기를 이용하는 보편적인 측량 방법에 의존하고 있는 실정이다. 최근 측량기술의 향상과 개발에 따른 구조물의 유지관리에 대한 자료를 제공하기 위한 방법으로 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 기존 구조물의 변형량 계측방법의 신뢰성 문제를 해결하고, 구조물의 형태 변화를 3차원화 하여 시각적으로 판단할 수 있는 자료를 제시하고 빠른 대책을 강구할 수 있도록 하여 구조물의 유지관리 및 현장계측에 능률적으로 활용할 수 있도록 하였다.

핵심용어 : 천단침하, 내공변위, 지표침하

Abstract

There are a number of risks in constructing tunnel-structures. Therefore, the precise and rapid observation about inside deformation of the tunnel is required to prevent these risks from occurring and to secure safety. But currently, the real situation is that the crown settlement, cavity deformation and ground surface settlement rely upon the universal mensuration which uses total station or various kinds of measuring instruments. Recently, according to improvement and progress of measuring technology, three-dimensional laser scanning is used as the method to provide data for maintaining structures. It solves the reliability problem of measuring method for the transformational volume of existing structures, provides data that enables to judge visually by three-dimensioning the shape change of structures and makes it possible to deliberate speedy countermeasure. And it can also be efficiently used in the structure maintenance and field measurement.

Keywords : Crown settlement, Cavity deformation, Ground surface settlement

1. 서 론

현대의 토목 구조물은 도시화, 밀집화, 고속화, 정밀화가 요구되고 또한, 서로 상반되는 경제성과 안전성이 절실히 요구되고 있다. 국내에서도 지하철, 지하상가, 고층 건물 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 하기위해 터널과 고가 교량 등의 구조물이 주로 이용하고 있다. 따라서 이들 조건을 만족시키기 위한 정보화 시공 즉, 현장계측

을 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 변형관측을 위한 일반적인 측정방법은 사람이 직접 터널내의 측점에 접근해야하며, 측정에 시간이 많이 소요되고, 기술자의 능력에 따라 측정값이 큰 차이가 있을 수 있는 등 여러 문제점을 안고 있다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 터널의 내공변위, 천단침하 및 지표침하를 동시에 관측하여 3차원으로 자료를 제시하고 공사의 안정성 유무를 파악하기 위함에 목적을 가지고 있다. 본 관측에서는

2007년 5월 11일 접수, 2007년 6월 8일 채택

* 정희원·동아대학교 토목공학부 교수 (leejo@dau.ac.kr)

** 교신저자·동아대학교 토목공학과 박사수료 (yby915@nate.com)

현재 사용중인 각종 계측장비 측정값과 비교·분석하고자 한다.

2. 터널 계측의 목적

시공에 앞서 설계나 시공 계획을 위해 지질조사가 행해 지지만 이 조사로서 복잡한 지반상태를 정확하게 예측하기에는 곤란하다 따라서 공사의 지반상태를 계측에 의해 확인하고 기초설계와 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 안전 관리에도 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 계측치로부터 지보효율을 확인한다.
- 3. 시공중의 현장의 안전성을 확보한다.
- 4. 시공중의 터널계획선 인조구조물에 대한 영향을 측정한다.

2.1 내공변위 측정

내공변위 측정방법은 콘크리트 라이닝에 측정핀을 설치하고 내공변위계를 이용하여 터널단면의 변위 유무, 변위속도 등을 정기적으로 관측하여 단면의 변형상태, 변위속도 등을 측정하여 구조물의 안전성 판단을 위한 자료와 위험성을 미연에 방지하고 향후 유지관리의 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다(아주엔지니어링, 2006).

2.2 천단침하 측정

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

3. 3차원 레이저 스캐닝

암반조사 및 각종 문화재 측량 등에서 현장 접근성, 측

정시간 및 조사 인력등의 한계성을 극복하기 위해서 현재 가장 정밀한 3차원 측량 자료를 도출하는데 사용되고 있는 3차원 레이저 스캐닝 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, 측정간의 간격은 0.5mm~3mm 정확도까지 측정할 수 있기 때문에 구조물에 대한 3차원 정보를 정밀하게 취득할 수 있는 방법이다.

3.1 3차원 레이저 스캐닝 기술동향

3차원 레이저 스캐닝은 2차원 사진을 Scanning 하듯이 3차원의 사물을 컴퓨터 상에 X,Y,Z 값을 가진 점 데이터군(point-cloud)으로 받아 들여 형상화 하는 방식으로서 반사 타깃 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. 스캐닝자료 취득은 비접촉식으로 레이저 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 3차원 레이저 스캐닝 데이터 취득 방법

지상 Laser scanner는 상대적으로 짧은 시간 안에 대상 물체 표면에 수많은 측정점(point-cloud)으로 3차원 공간 좌표를 기록한다. 이를 완성하기 위해서는 물체 표면위에 레이저 빔을 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 정밀

도는 매우 중요하다(Blais et al., 2000).

3차원 레이저 스캐닝 측정은 레이저를 발사하여 대상물에 반사되는 레이저가 스캐너에 도달할 때까지의 시간을 관측하고 그 값에 빛의 속도를 곱하여 거리를 계산하는 방식으로 Triangulation Method와 Time-of-Flight Method로 나누어진다(Boehler et al., 2002).

Fig. 1은 Triangulation 방법으로 레이저를 대상물에 발사한 후 광전소자(CCD)에 맺히는 반사점의 위치는 기선 거리를 이용하여 Triangulation으로 역산하여 위치를 결정하는 방식이며 이런 형태의 스캐너 방식은 근거리의 경우는 1mm보다 적게 3D 포인트 표준 편차로 도달한다. Fig. 2는 Time-of-Flight 방법으로는 레이저를 대상물에 발사한 후 레이저가 반사되어 돌아오는 시간차를 계산하여 위치를 결정하는 방식으로 정확도는 0.3~5cm 사이이다. 두 가지의 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 Time-

of-Flight 방식을 사용하고 있다.

3.3 3차원 레이저 스캐닝 거리 측량

3차원 레이저 스캐닝은 매우 작은 순간 시야각 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 Fig. 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 레이저 광선 CW(Continuous Wave)를 이용하여 발사된 위상과 반사된 위상의 차를 관측하여 거리를 계산한다. Fig. 4에는 펄스 레이저와 CW 레이저의 원리를 나타내었다.

현재 사용되고 있는 대부분의 3차원 레이저 스캐닝 장비에서는 펄스 레이저를 사용한다. 펄스를 사용하는 경우, 거리를 관측하는 가장 일반적인 방법으로 펄스 레이저의 왕복시간을 관측하여 광속을 곱한 값으로서, 펄스가 반사되고 수신되는 사이의 시간을 이용하는 것이다. 펄스 레이저의 왕복시간은 식 (1)과 같다.

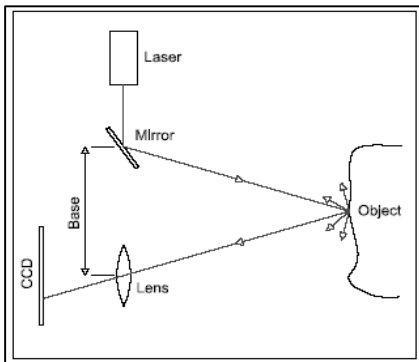


Fig. 1. Triangulation

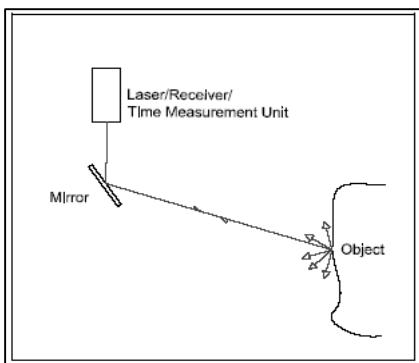


Fig. 2. Time-of-Flight

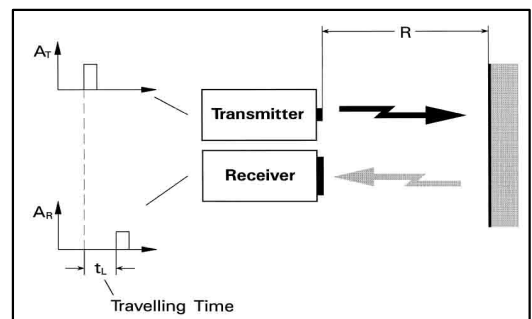


Fig. 3. Time-of-flight ranging

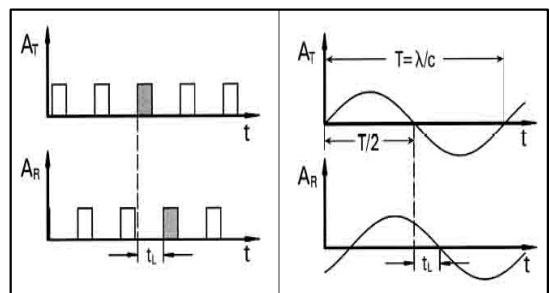


Fig. 4. Measuring principle of pulse and CW-lasers

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

여기서, R : 거리관측부와 지표면 위치 간의 거리,
c : 빛의 속도

식 (1)에서 거리오차 ΔR 은 시간오차 Δt_L 에 정비례하며, 다음과 같이 유도된다.

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

여기서, ΔR : 거리의 해상도
 Δt_L : 시간 관측의 해상도

따라서, 거리관측부와 지표면 위치 간의 최대 거리는 다음과 같다.

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

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

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

여기서, t_{rise} 는 펄스 생성시간, S는 광다이오드(photodiode) 전류의 신호강도, N은 광다이오드와 증폭기의 열잡음 강도이며, 일반적으로 사용되는 3차원 레이저 스캐닝 시스템에서 거리관측의 정확도는 mm 단위를 가진다(송연경, 2004).

4. 실험 및 자료취득

본 관측은 3차원 레이저 스캐닝을 이용한 내공변위와 천단침하 측정분석을 위해서 3D Scanning으로 터널 단면별로 상호지점에 대한 변위값을 관측하고, 토탈스테이션과 일반 계측장비로 계측 실시하여 비교·분석 하였다.

4.1 관측장비 제원

본 연구에서 사용된 측정 장비는 I사의 4400 버전에 3차원 레이저 스캐닝을 이용 하였고 토탈스테이션으로는 T사의 723 버전을 사용하여 관측 하였으며 내공변위계로는 EM-20A 제품으로 실시하였다. 3차원 레이저 스캐닝 제원은 Fig. 5와 Table 1의 나타낸 것과 같다. 본 장비의 최대 측정거리는 400m이며 측정 오차는 5cm(at 400m) 정확도의 제원을 가지고 있으며 초당 5,000 포인트의 측정점을 취득할 수 있으며 디지털 카메라는 80도 연직각으로 360도 수평각 회전으로 스캐닝 시 실시간 연동과 스캐

닝 데이터 저장이 실시간으로 저장된다.

4.2 정확도 분석

본 연구에서는 내공 변위 및 천단침하 현상을 관측하기 전 필요한 정확도를 분석하기위해서 Fig. 7과 같이 기선 거리에 따른 정확도 분석을 실시하였으며, 관측방법은 기준이 되는 측점에 타깃을 설치하고 난 후 3차원 레이저



Fig. 5. 4400i

Table 1. specification of 3D laser scanning

모델명	I 사
최대측정거리	400m
레이저 빔 폭	2mrad
거리정확도	50mm at 400m
각 정확도	0.002°
측정속도	4400포인트/ sec
스캐닝각도	80° 연직각/360° 수평각
레이저규격	Class 3R(IEC 60825-1)
망원부 배율	16×
메모리	18Gb
카메라 Type	high resolution panoramic camera
Focal range	5m to infinity
laser point	670nm red diode laser pointer
디지털촬영각도	80° 연직각 / 360° 수평각

Table 2. Standard deviations of distance measurements

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

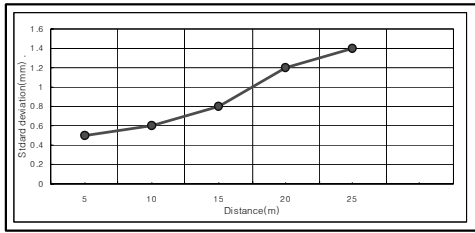


Fig. 7. Standard deviations of distance measurements

스캐닝을 이용하여 Point cloud를 취득하고 Table 2의 나타난 것과 같이 거리 30m 지점 까지는 표준편차 1mm 이내의 값을 가지며, 50m을 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 Fig. 8은 현장 실험 대상지역을 나타내고 있다. 자료 처리시 좌표 기준 설정은 Fig. 9는 Gyroscope와 토탈스테이션을

결합하여 목표점의 방위각을 측정함으로써 터널 중심선의 위치를 보다 정밀하게 관측하는 시스템을 적용시켜 기준점 측량을 실시하여 Fig. 10과 같이 터널 중심과 양쪽에 검측점을 설치토록 하였다. 검측점은 터널 공사 구간중 Fig. 12와 같이 관측이 양호한 총 3개 단면을 선정하여 7일 간격으로 Fig. 12와 같이 D1, D2, H1 거리를 Fig. 11의 3차원 레이저 스캐닝과 토탈스테이션을 이용하여 3회 현장관측을 실시하였고 부가적으로 기존 계측기를 이용하여 현장관측을 실시하였다.

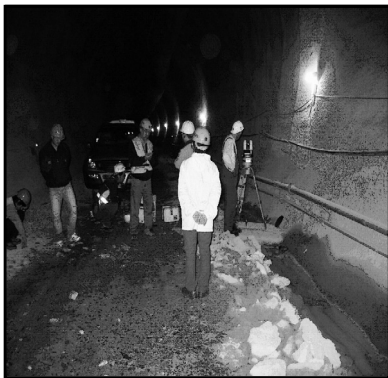


Fig. 8. shop floor



Fig. 10. Test point



Fig. 11. Scanning



Fig. 9. Gyroscope

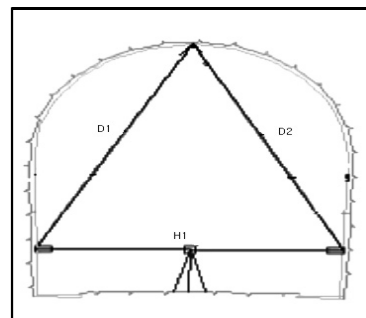


Fig. 12. Ex cross section

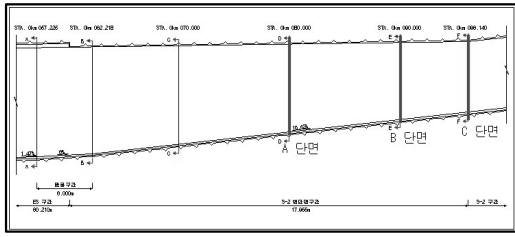


Fig. 13. vertical section

4.3.1 기존의 내공변위 측정방법

내공변위 측정시 보통 고성능의 스틸테이프를 내장한 테이프식 내공변위계가 사용된다. 입기의 정밀도는 기기에 따라 1/100mm~1mm정확도가 있으나, 본 조사에서는 1/100mm의 정밀도를 갖는 Fig. 14와 같은 EM-20A 측정기를 사용하여 Fig. 15와 같이 설치하였으며 내공변위 측정핀은 $\Phi 25\text{mm}$ 를 사용하여 드릴로 천공 후 급결응 고제로 측정 핀을 고정시킨 후 측정하였다.

본 조사에서는 터널 전구간에 걸쳐 총 3개소(0+05.0, 0+100.0, 0+150.0mm)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 = 초기치의 L - 측정치의 L

R : 측정치(Raw Data) - 단위 : mm

R1 : m, cm 단위(Tape measure의 읽음 값)

R2 : mm 단위(디지털 표시부)

T : 측정시 온도($^{\circ}\text{C}$)

L : 보정 측정치(mm)

L0 : 완성시 길이(mm) - 계기의 측정부 길이(465mm)

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

D : 변화량(mm)

4.3.2 기존의 천단침하 측정방법

Tunnel의 천단부근 슛크리트에 콘크리트못을 박거나 Fig. 16과 같이 내공변위측정용 천단 볼트를 박아 Level 이나 내공변위계로 측정한다. 측정의 위치는 막장 통과 후 가능한 한 빠른 시간 내에 측정하며 늦어도 1~2시간 이내이어야 한다. 측정은 수준측량으로 Level 이나 내공변위계를 사용하여 수준점을 기준으로 절대고를 구하며 측정밀도는 $\pm 1\text{mm}$ 정확도라야 하며, 측정시간은 변위가 수렴 할 때까지 하여야 한다.

4.4 자료처리

3차원 레이저 스캐닝을 이용하여 Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19와 같은 각 단면의 3차원 좌표를 취득하였으며 위의 3차원 좌표를 이용하여 Fig. 20, Fig. 21, Fig. 22의 단면의 데이터를 취득할 수 있었다. 또한, 이와 동시에 현재 터널 현장에서 관측에 사용하고 있는 토탈스테이션을 이용하여 내공변위 및 천단침하 관측을 수행하였다. 3차원 레이저 스캐닝과 토탈스테이션을 이용하여 한측점의 10 회 평균한 관측 결과를 Table 3과 같이 나타내었으며, 1차



Fig. 14. EM-20A

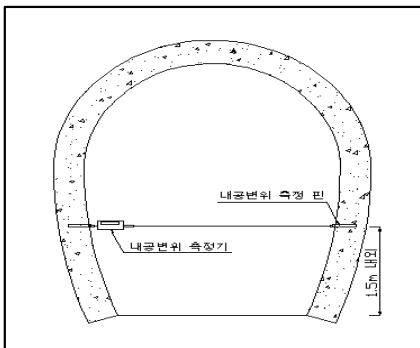


Fig. 15. cavity deformation machine setting



Fig. 16. crown test point setting

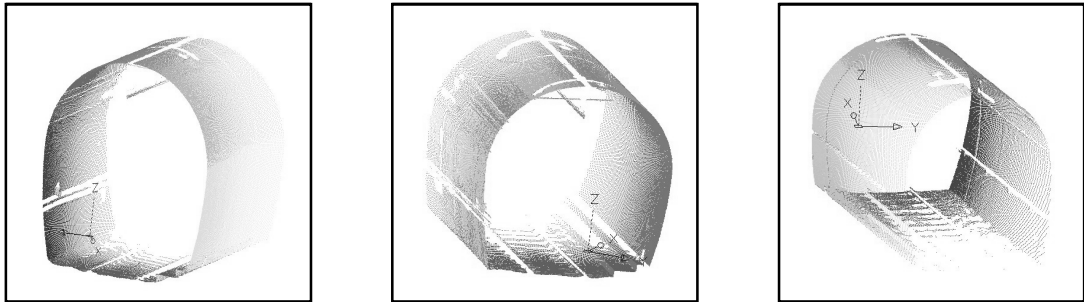


Fig. 17. 3D Laser scanning Raw data (A, B, C. section)

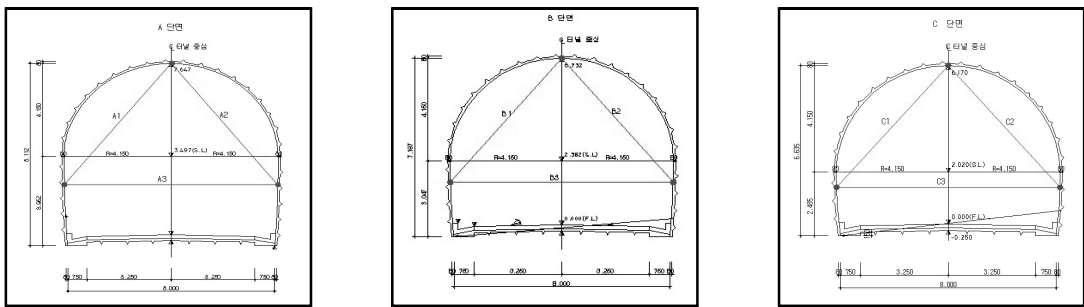


Fig. 18. Data processed section (A, B, C. section)

Table 3. measurement consequence of 3D Lase scanning and Ts (m)

구 분		3차원 레이저 스캐닝			변화량		토탈스테이션			변화량	
		1차	2차	3차	$\Delta(1-2)$	$\Delta(1-3)$	1차	2차	3차	$\Delta(1-2)$	$\Delta(1-3)$
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

Table 4. measurement consequence of EM-20A (m)

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

관측한 결과를 기준으로 7일 간격으로 발생하고 있는 변위량을 나타내고 있다. 내공 변위계의 관측은 본 실험의 1차와 3차 관측에 동시 실시하였으며 관측값은 Table 4에 나타 내었다.

5. 결과분석

연구에서 이용한 토탈스테이션의 거리 정확도는 제조

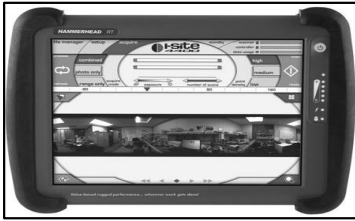


Fig. 19. Scanning Control

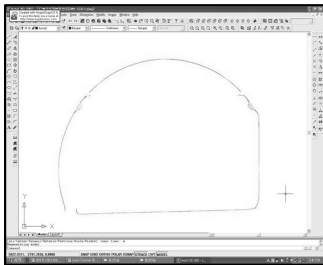


Fig. 20. Data processing

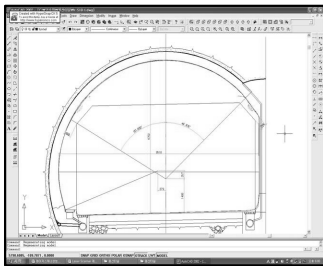


Fig. 21. Data processed

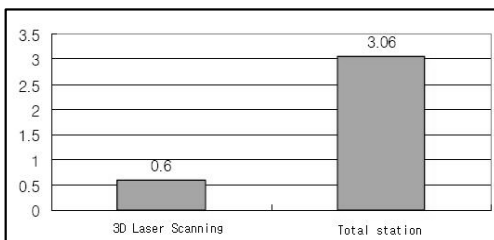


Fig. 22. RMSE analysis

사에서 제공하는 장비 제원서에 공지하는 측정거리가 7000m까지 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 Fig. 19의 Control에서 각 단면의 3차원좌표값을 취득하여 각각의 거리를 현장에서 바로 취득할 수 있었으며 실내에서 Fig. 20, Fig. 21과 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 타깃 설치에 소요되는 시간과 인원을 제외한다면 1인의 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. Fig. 22는 3차원 레이저 스캐닝과 토탈스테이션을 매회 관측 마다 재관측을 10회 실시하여 나타난 RMSE 분석 결과이다.

6. 결 론

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

1. 내공변위 측정시 테이프 처짐과 측정자에 따른 오차를 내포하고 있다는 것을 실험에서 파악되었다.
2. 토탈 스테이션장비와 3차원 레이저 스캐닝의 단면 변화를 분석결과 큰차이를 나타내는 부분은 없었으나 토탈 스테이션을 이용한 실험에서는 관측자 기량에 따른 차이를 본 실험에서 보여주었다.
3. 터널단면별로 상호지점간의 관측을 각각의 장비로 관측값과 RMSE분석 결과를 비교함으로써 3차원 레이저 스캐닝을 이용한 단면변화에 대한 정밀한 변형유무를 사용하는데 안정적인 관측값을 취득할 수 있었다.
4. 기존의 2차원 도면을 탈피한 3차원 도면을 취득할 수 있었으며 터널 측량시의 문제점인 터널 내부의 조명 문제를 해결할 수 있었다.
5. 초기 타깃 설치에 필요한 인원과 장비를 제외한다면 Scanning부터 자료처리까지 단독작업이 가능하여 작업자의 업무 능률 향상을 취할 수 있었다.

이상과 같은 3차원 레이저 스캐닝 측량방법으로 관측함으로써 열악한 작업 환경과 위험요소가 많은 터널 내

부에서의 측량작업시간을 최소화 하며 변형측정 및 유지 관리에 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

1. 아주엔지니어링, 2006, 계측관리 월간 보고서
2. 동광종합기술공사, 2004, 안전진단보고서
3. 박운용, 2004, 토목시공학 II, 형설출판사, pp. 311-367
4. 송연경, 2004, *Direct Georeferencing에 의한 LiDAR 자료와 CCD 영상의 융합과 적용 기법*, 동아대학교 박사학위논문, pp. 33.
5. 윤부열, 박운용, 장상규, 정창식, 2005, 고밀도 레이저 측량을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측, *대한토목학회 학술발표논문집*, pp. 5162-5166.
6. 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.
7. 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.
8. Lee, K., 1999, Principles of CAD/CAM/CAE systems, Addison Wesley Longman, Inc., pp. 445.
9. www.RIEGL.com