

고밀도 레이저 측량을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측 Tunnel Convergence and Crown settlement using 3D Laser Scanning

이재원¹⁾ · 장상규²⁾ · 임영빈³⁾ · 문두열⁴⁾ · 윤부열⁵⁾

Lee, Ja One · Jang, Sang Kyu · Lim Young Bin · Moon Doo Youl · Yun, Bu Yeol

- 1) 동아대학교 공과대학 토목공학부 교수(E-mail : leejo@dau.ac.kr)
- 2) 상주대학교 이공대학 토목공학부 교수(E-mail : skiang@sang.ac.kr)
- 3) 한밭대학교 공과대학 토목공학부 교수(E-mail : ybnim@daum.net)
- 4) 동의대학교 도시환경연구소 교수(E-mail : gp0327@kornet.net)
- 5) 동아대학교 공과대학 토목공학부 박사과정(E-mail : yby915@nate.com)

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

1. 서론

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 위해 터널과 고가 교량 등의 구조물이 주로 이용하고 있다. 따라서 이들 조건을 만족시키기 위한 정보화 시공 즉, 현장계측을 이용한 시공의 필요성은 증가되고 있는 가운데 지금까지 시행되어온 구조물의 변형에 대한 측정방법으로는 추정 정밀도가 낮고 측정값에 대한 검증이 안되는 등 많은 문제가 내포되어왔다. 터널의 변형관측을 위한 일반적인 측정방법은 사람이 직접터널내의 측점에 접근해야하며, 측정에 시간이 많이 소요되고, 기술자의 능력에 따라 측정값이 큰 차이가 있을 수 있는 등 여러 문제점을 안고 있다.

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

2. 3D Laser Scanning 기본원리

3D Laser Scanning은 2차원인 사진을 Scanning 하듯이 3차원의 사물을 컴퓨터 상에 X,Y,Z 값을 가진 점 데이터군(Point Clouds)으로 받아 들여 형상화 하는 방식으로서 반사 타겟 없이 지형, 지물 및 건축 및 토목 구조물의 3차원 좌표를 1초당 4400포인트를 취득할 수 있는 기술로서 토목 및 측량분야에 다양한 응용이 가능하다. 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 재 구성, 변위 등의 3차원 측정, 등에 적용되며 활용되고 있다. Scanning자료 수집은 비접촉식으로 Laser 등을 이용하여 대상물의 간접측정을 하는데, 접촉식 측량 장비에 비하여 우연 오차나 데이터 손실을 최소화 할 수 있으며 작업이 간단하여 빠르게 데이터 취득이 용이하여 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 평가되고있다.

3D Laser Scanning 측정은 Laser를 발사하여 대상물에 반사되는 레이저가 스캐너에 도달할 때까지의 시간을 관측하고 그 값에 빛의 속도를 곱하여 거리를 계산하는 방식으로 Triangulation Method와 Time-of-Flight Method 로 나누어지는데 그림 1.) Triangulation 방법은 Laser를 대상물에 발사한 후 광전소자(CCD)에 맺히는 반사빔의 위치를 Base를 이용하여 삼각법(Triangulation)으로 역산하여 위치를 결정하는 방식이며이런 형의 스캐너 방식은 근거리의 경우는 1mm보다 적게 3D 포인트 표준 편차로 도달합니다. 그림 2. Time-of-Flight 방법으로는 Laser를 대상물에 발사한후 레이저가 반사되어 돌아오는 시간차(Time-of-Flight)를 계산하여 위치를 결정하는 방식으로 정도는 2~3 cm 사이에 있다. 두가지의 방식들의 정확도는 스캐너 기준선 길이와 물체 거리 모두에 달려있는데, 고정된 기준선을 가지고, 거리 치수의 표준 편차는 거리제곱에 비례하여 증가한다.

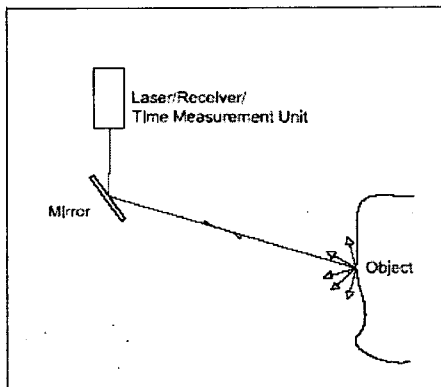


그림 1. Time-of-Flight 방식

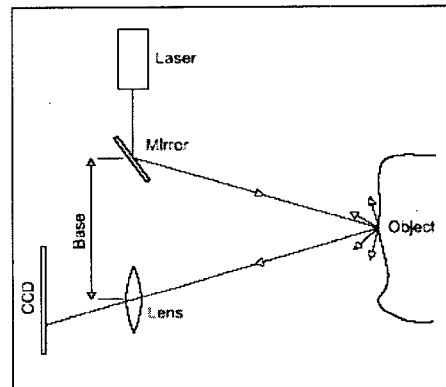


그림 2. Triangulation 방식

3. 정확도분석 및 현장관측

본 관측은 3D Laser Scanning 정확도 분석을 선 실시하고 내공변위와 천단침하 측정분석을 위해서 3D Scanning 으로 터널 단면별로 상호지점에 대한 변위값을 관측하고, Total Station 실시하여 비교 분석 하였다.

3.1 관측장비 제원

본 연구에서는 사용된 측정 장비는 I-Site 4400 버전에 3D Laser Scanning 이용 하였고 Total Station으로는 Topcon사의 GTS-723 버전을 사용하여 관측 하였으며, 3D Laser Scanning 제원은 그림 3과 표 1에 나타난 것과 같다. 본 장비의 최대 측정거리는 400m이며 측정 오차는 1.5cm (at 200m) 정도의 제원을 가지고 있으며 초당 4,400 포인트의 측정점을 취득할 수 있으며 디지털 카메라는 80도 연직각

으로 360도 수평각 회전으로 스캐닝 시 실시간 연동과 스캐닝 데이터 저장이 실시간으로 저장된다

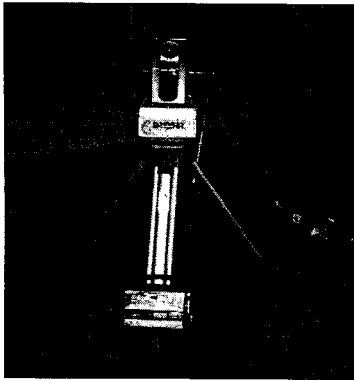


그림 3. I-Site 4400

표 1. 3D Laser Scanning 제원

모델명	I-Site 4400
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

3.2 정확도 분석

Laser Scanning System의 정도는 각 β (그림. 4)의 정도로 결정되며 그림. 4는 광전소자 CCD 레이저의 의해서 이미지에 축점을 나타내며 각 α (거울 회전각)는 코드화 된 범위에서 더 높은 정밀도로 관측할 수 있다. 그러나 만약 β 각이 정확하게 결정되어지지 않는다면, 관측값의 위치는 레이저 반사경으로부터 비롯한 광선 어딘가에 축설 될 것이다. 만약 β 각이 유일한 오차 원인이 되면 관측정도는 오직 레이저 반사경으로부터 장거리의 정도만큼 구성되는 것은 예상할 수 있다. 그리고 이 정도는 거리 따른 제곱으로 준다.

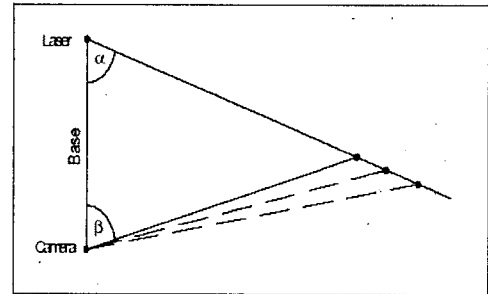


그림 4. 각에 의한 점 위치 오차

본 연구에서는 터널의 천단침하와 내공변위를 관측하기 전 필요한 정도를 분석하기위해서 그림 5와 같이 기선 거리에 따른 정확도 분석을 실시하였으며, 관측방법은 기준이 되는 축점에 수평 타켓을 설치하고 난 후 3D Laser Scanning를 이용하여 관측 실시하여, 3D 포인트의 표준 편차를 도시화 하였다. 그림 5와 표 2에 나타난 것과 같이 거리 15m 지점 까지는 표준편차 1mm 이내의 값을 가지며, 20m를 나타내게 되는 결과는 거리의 따라 정확히 예상되는 증가를 나타내고 있다.

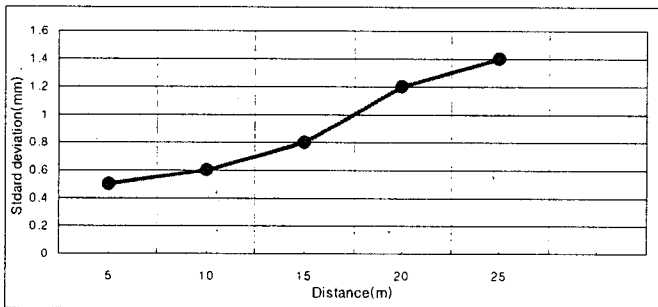


그림 5. 거리측정의 표준 편차 분석

표 2. 거리 측정의 표준 편차

Distance (m)	표준편차(mm)
5	0.5
10	0.7
15	0.9
20	1.2
25	1.6

3.3 현장 관측

본 연구에서는 현재 시공 중인 도로공사 현장의 터널을 연구 대상으로 선정하여 현장관측을 실시하였으며 그림 6은 현장 실험 대상지역을 나타내고 있다. 자료 처리시 좌표 기준 설정은 그림7의

Gyroscope와 Total Station를 결합하여 목표점의 방위각을 측정함으로써 터널 중심선의 위치를 보다 정밀하게 관측하는 시스템을 적용하여 기준점 측량을 실시하여 그림 8과 같이 터널 중심과 양쪽에 검측점을 설치토록 하였다.

검측점은 터널 공사 구간중 그림 9와 같이 관측이 양호한 총 3개 단면을 선정하여 7일 간격으로 그림 10과 같이 D1, D2, H1 거리를 Total Station과 3D Laser Scanning이용하여 3회 현장관측 실시하였다.

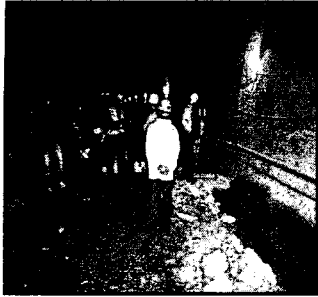


그림 6. 현장 전경

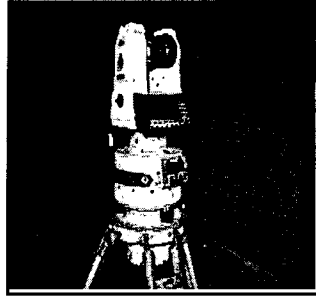


그림 7. Gyroscope

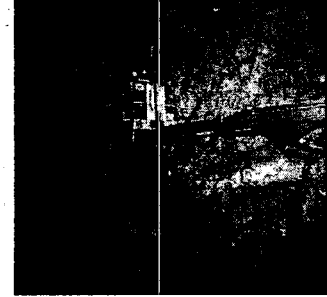


그림 8. 검측점 설치

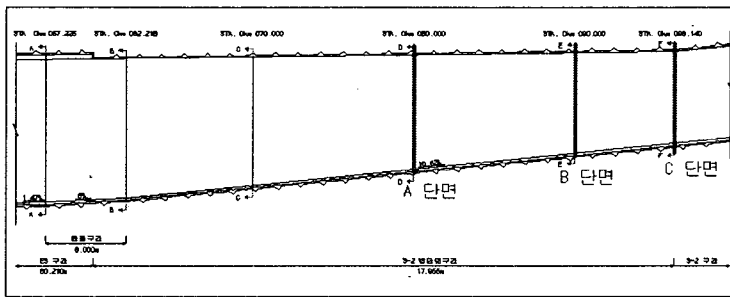


그림 9. 관측 구간 중 단면도

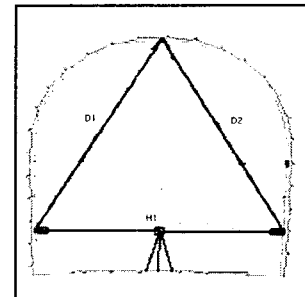


그림 10. 단면도

3.4 자료처리

3D Laser scanning이용한 자료는 그림 11, 그림 12, 그림 13과 같이 각 단면의 3차원 좌표를 취득하였으며 위에 3차원 좌표를 이용하여 그림 14, 그림 15, 그림 16의 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 이용한 관측 결과는 표. 3와 같으며, 1회 관측한 결과를 기준으로 7일 간격으로 발생하고 있는 변위량을 나타내고 있다.

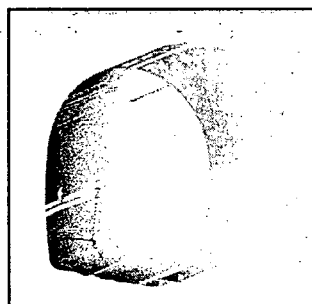


그림 11. 단면 A

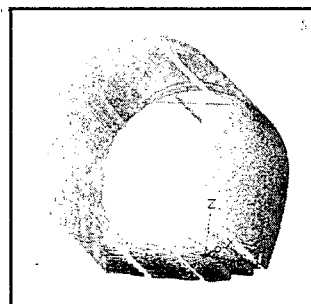


그림 12. 단면 B

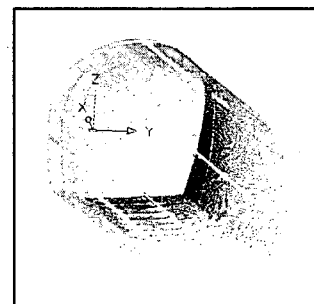


그림 13. 단면 C

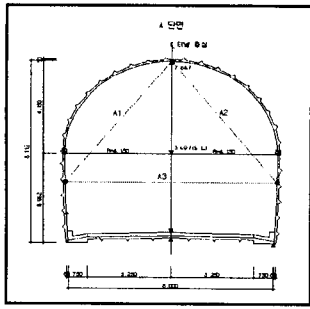


그림 14. 단면도 A

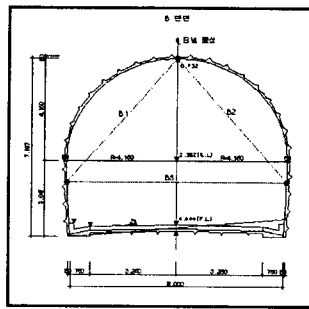


그림 15. 단면도 B

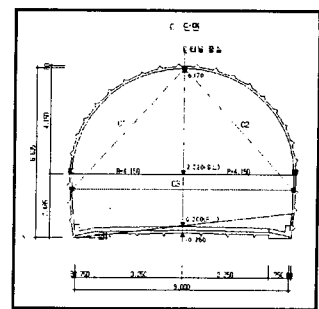


그림 16. 단면도 C

표 3. 단면별에 대한 3D Laser Scanning와 Total Station 관측값 비교

구분		3D Laser Scanning			변화량		Total Station			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

3.5 결과분석

자료 처리의 정확도는 선행 실험의 결과를 고려하였을 경우, 실험 대상물의 크기를 고려 할때 약 0.5mm이내의 오차로 측정할 수 있으며, 이는 현재의 터널 측량방법과 비교할 때 허용오차 범위내에 포함된다. 연구에서 이용한 Total Station의 거리 정확도는 제조사에서 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 컨트롤라에서 각단면의 3D 좌표값을 취득하여 각각의 거리를 현장에서 바로 취득할 수 있었으며 단독 측위가 가능하여 Total Station보다 능률적인 작업이 가능하였다. 터널 내공변위 및 천단침하 관측이 정해진 빈도로 반복적으로 이루어져야함을 고려할 때 초기 타겟 설치에 소요되는 시간과 인원을 제외한다면 1인의 작업자가 매우 신속하게 관측지점을 측량할 수 있음을 알 수 있었으며, 표 3에 변화량을 분석하게 되면 Total Station보다 정밀도가 나은 평가를 할 수 있었다.

4. 결론

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

1. 터널단면별로 상호지점간의 관측값을 비교함으로써 단면변화에 대한 정확한 변형유무를 판단할 수 있었다
2. 터널의 변위측정(천단침하, 내공변위)방법을 3D Laser Scanning를 사용함으로써 기존의 측량방법보다 신뢰성있는 정도의 변형량 측정결과를 얻을 수 있었으며 기존의 2차원 도면을 탈피한 3차원의 도면을 취득할 수 있었고 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.

이상과 같은 3D Laser Scanning 측량방법으로 관측함으로써 열악한 작업 환경과 위험요소가 많은 터널 내부에서의 측량작업시간을 최소화 하며 변형측정및 유지관리에 활용할 수 있는 3차원 자료추출방법을 제시할 수 있었다.

참고문헌

1. 박운용 (2000) 應用測量學 형설출판사 제 5장
2. 김감래, 김명배 (1997) 근거리사진측량에 의한 구조물 변형측정, 한국측지학회지. 제15권
3. 정성혁, 이재기 (2004) 산업사진측량을 이용한 터널의 천단 및 내공 변위 관측. 한국측량학회지, 제22권
4. 천병식, 남순성 (1996) 서울 지하철 터널의 계측관리 기준치에 관한 연구 대한토목학회 제16권
6. WWW 2001: An extensive collection of links to laser scanner producers and reports about applications in cultural heritage is maintained by the authors at <http://scanning.fh-mainz.de>
7. 안원태 (2005) 한양 측량 시스템 3D Laser Scanning System 보고서