

# 지상 레이저 스캐닝 자료를 이용한 터널단면관리시스템 개발

노태호<sup>1</sup> · 김진수<sup>1\*</sup> · 이영도<sup>2</sup>

## Development of Cross Section Management System in Tunnel using Terrestrial Laser Scanning Data

Tae-Ho ROH<sup>1</sup> · Jin-Soo KIM<sup>1\*</sup> · Young-Do LEE<sup>2</sup>

### 요 약

높은 정확도와 고밀도의 자료를 제공하는 레이저 스캐닝 기술은 공간정보 분야를 포함한 여러 분야에서 폭 넓게 활용되고 있으며 특히, 레이저 스캐닝 기술의 개발은 건설공학분야에 있어서 방대한 정보 추출을 가능케 하여 그 활용성이 매우 높은 실정이다.

본 연구에서는 지상 레이저 스캐닝 기법에 의해 취득된 자료를 이용하여 보다 정확한 터널 내공 단면을 결정하고, 이를 실무에서 활용할 수 있는 터널단면관리시스템을 개발한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

지상 레이저 스캐너를 이용하여 고정밀도의 3차원 자료를 신속·정확하게 취득할 수 있었으며, 자료 처리 단계를 거쳐 0.1m, 0.5m, 1.0m 간격의 임의 단면을 신속히 결정할 수 있었다. 따라서 레이저 스캐닝 기법을 활용함으로써 각 단면의 여굴량과 미굴량 뿐만 아니라, 전체 터널 연장에서 발생한 여굴량과 미굴량을 신속하고 정확히 산정할 수 있었다.

또한, 터널 굴착단계에서 보다 정확한 여굴량과 미굴량을 산정하고, 이를 모니터링 할 수 있는 터널단면관리시스템을 개발하였다. 개발된 GUI 프로그램은 실무에서 더욱 효율적이고 경제적인 터널 굴착관리 및 모니터링을 가능하게 하며 향후, 임의 단면의 자료 추출로 터널 유지 관리에 대한 중요한 기반 자료의 제공 및 활용에 기여할 것으로 판단된다.

주요어 : 지상 레이저 스캐닝, 점군자료, 지리정보체계, 터널단면관리시스템

### ABSTRACT

Laser scanning technology with high positional accuracy and high density will be widely applied to vast range of fields including geomatics. Especially, the development of laser scanning technology enabling long range information extraction is increasing its full use in civil engineering.

2008년 1월 16일 접수 Received on January 16, 2008 / 2008년 2월 25일 심사완료 Accepted on February 25, 2008

1 부경대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Pukyong National University

2 동의과학대학 건설정보과 Civil Engineering, Dong-Eui Institute of Technology

\* 연락처 E-mail : pksurveying@pknu.ac.kr

This study taps into the strengths of a terrestrial laser scanning technique to develop a tunnel cross section management system that can be practically employed for determining the cross section of tunnels more promptly and accurately. Three dimensional data with high density were obtained in a prompt and accurate manner using a terrestrial laser scanner. Data processing was then conducted to promptly determine arbitrary cross sections at 0.1meter, 0.5meter and 1.0meter intervals. A laser scanning technique was also used to quickly and accurately calculate the overbreak and underbreak of both each cross section and the entire tunnel section.

As the developed system utilizes vast amounts of data, it was possible to promptly determine the shape of arbitrary cross section and to calculate the overbreak and underbreak more accurately with higher area precision. It is expected, therefore, that the system will not only enable more efficient and cost effective tunnel drilling management and monitoring but also will provide a basis for future construction and management of tunnel cross section.

**KEYWORDS :** *Terrestrial Laser Scanning, Point Cloud, GIS, Cross Section Management System*

## 서 론

우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 형성되어 있고 도시 밀집지역이 대부분인 지형 조건 등으로 인해 터널 및 지하 공간 개발에 많은 자본이 투자되고 있으나, 착공 전 작업에서부터 기존의 재래식 측량을 이용하여 위치 정보를 획득함으로써 측량작업의 효율성이 떨어져 있는 실정이다. 최근에는 수치사진측량, 무프리즈 토탈스테이션 등을 이용한 터널 내공단면 결정에 대한 연구가 많이 시도되고 있다. 그러나 수치사진측량의 경우 터널 내의 열악한 측량환경과 작업조건으로 인한 제한된 광원확보 문제로 피사체의 식별이 난해한 경

우가 많고, 불규칙한 터널 내공단면의 특성 때문에 특징점을 추출하기가 매우 어렵다. 그리고 비접촉식 측정방식을 사용하는 무프리즈 토탈스테이션의 경우 기존의 측정방식에 비해 효율적으로 단면의 3차원 위치정보를 획득할 수 있으나, 정확한 단면 결정 및 여굴량 등을 산정하는데 많은 시간이 소요된다. 하지만, 이러한 불리한 조건하에서도 고밀도의 자료 취득이 가능하고 높은 위치정확도를 취득할 수 있는 3차원 레이저 스캐너를 이용하게 되면, 터널 내공단면에 대한 방대한 양의 자료 취득과 보다 정확한 여굴량과 미굴량을 산정할 수 있다. 이러한 측량 기법간의 비교를 한다면 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

TABLE 1. Classified comparison of survey system

Species	TS		DP	Laser
	Prism	Non P.		
Economy	bad	good	bad	excellent
Convenience	bad	good	excellent	bad
Quickness	bad	good	bad	excellent
Accuracy	good	good	excellent	good
Safety	bad	excellent	bad	excellent

레이저 스캐닝 기술은 국내의 경우 1990년대 중반 이후 제조업, 문화재 등의 분야에서부터 리버스 엔지니어링 개념의 발전을 도모하게 되었다. 그러나 레이저 스캐닝에 관련한 대부분의 연구는 비교적 근거리에 있는 대상물의 형상 해석에 국한되어 이루어졌다(최재원, 2001; 박흥기, 2002; 한승희, 2006). 그러나 2000년대 초반 고정밀도의 중·장거리용 3차원 레이저 스캐너의 보급으로 인해 그 활용 범위가 더욱 다양해지고 토목, 도로, 문화재 등의 분야에서도 이러한 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다(이근상 등, 2003; 손호웅과 이성민, 2003; 이승호, 2005; 윤덕근 등, 2006; 장용구 등, 2006; 김세근 등, 2006; 김진수, 2007). 한편, 본 연구와 관련된 국외의 연구 동향을 살펴보면, 지질학적으로 비교적 활동이 왕성한 샌프란시스코 남쪽 해안의 절벽을 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 모니터링하고 안전성을 예측하였으며, 추후 폭풍에 대비한 대책을 마련하기 위한 데이터로 사용할 수 있음을 입증하였다(Collins와 Sitar, 2005). 또한, 3차원 레이저 스캐닝 기법을 이용하여 절취사면을 모델링함으로써 지상 레이저 스캐너의 활용 가능성 및 문제점을 제시하였으며(Alba 등, 2005), 도심 내의 깊은 굴착 면을 지지하기 위한 단계의 모니터링을 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 실시한 연구 결과도 있다(Hashash 등, 2005). 그리고 지상 레이저 스캐닝 기술을 이용하여 터널 내의 단면의 변형을 해석하는 연구를 수행한 바 있으며(Gosliga 등, 2006), 터널 구조의 기하학적 오차 분석에 있어서 지상 레이저 스캐닝 기술의 활용성을 제시한 바 있다(Lam, 2006). 따라서, 본 연구에서는 지상 레이저 스캐닝 기법에 의해 취득된 방대한 양의 점 자료를 이용하여 보다 정확한 터널 내공단면을 결정하고, 이를 실무에서 활용할 수 있는 터널단면관리시스템 개발에 있으며, 연구 흐름도는 그림 1과 같다.

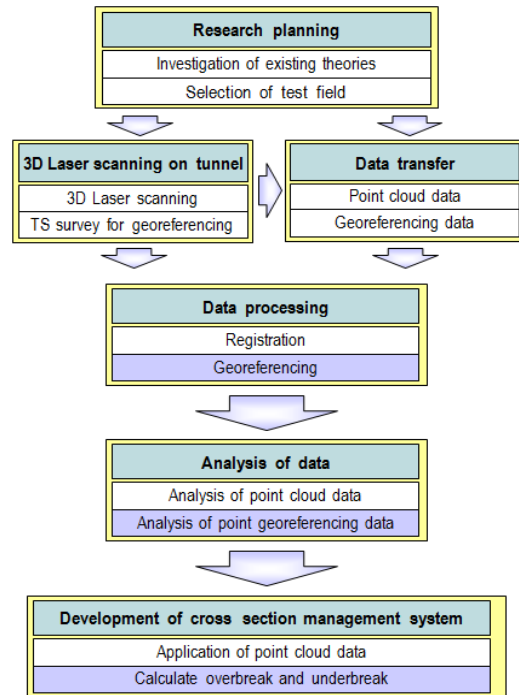


FIGURE 1. Flow chart of study process

## 지상 레이저 스캐닝

레이저(light amplification by stimulated emission of radiation)는 유도방출복사에 의한 빛의 증폭을 의미한다. 일반적으로 입사광이 에너지 준위와 상호작용하는 방법으로 그림 2와 같이 크게 형광, 흡수 및 유도방출이 있다. 형광은 상위 에너지 준위의 원자가 하위 에너지 준위로 자발적으로 감쇄해서 에너지 차를 방출하는 것이고, 흡수는 입사광이 낮은 에너지 준위에 있는 원자나 분자와 상호작용하여 더 높은 에너지 준위로 올라가는 현상이다. 그러나 레이저는 1개의 입사광이 1개의 원자와 상호작용하여 2개의 입사광을 방출하는 유도방출의 원리에 의해 나타난다. 이렇게 생성된 2개의 입사광은 같은 진동수를 갖고, 같은 방향으로 진행하며, 그들이 관련된 전기장과 같은 위상을 갖는다. 이로 인해 단색성이 뛰어나며, 위상이 고르고 간섭현상이 일어나기 쉬우

며, 퍼지지 않고 직진하며 집광성이 좋고, 에너지 밀도가 크다는 특징이 있다.

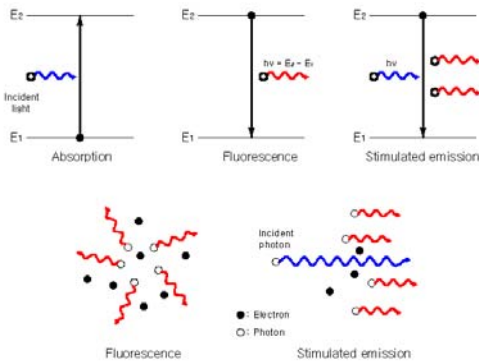


FIGURE 2. Method of interaction between incident light and energy level in the process of absorption, fluorescence and stimulated emission

이러한 특징들로 인해 레이저는 단위면적에서 받는 에너지 강도가 높고, 특히 사람의 눈이나 피부에 영향을 줄 수 있다. 이론적으로 레이저 송신기로부터 짧은 거리에서 눈을 보호하기 위해서는 눈에 초점이 맺히지 않는 레이저 파장을 사용해야만 하고(Kovalev 등, 2004), 미국규격협회(American National Standards Institute)에서는 눈을 보호하기 위한 레이저의 파장을 400nm에서 1,400nm로 규정하고 있다(ANSI Z136.1, 1993).

### 1. 지상 레이저 스캐닝을 이용한 위치결정

레이저 스캐닝 기법은 레이저가 물체에 반사되어 수신되는 시간차 또는 위상차를 관측하여 물체까지의 거리를 계산하고, 각종 물리량을 분석하는 최신 기술 중의 하나이다. 레이저 스캐닝을 통한 3차원 위치정보의 획득 원리는 회전 거울에 의한 레이저의 편향, 대상물 표면에서 일어나는 레이저의 반사, 그리고 반사된 레이저의 수신으로 설명될 수 있다. 또한 효율적인 3차원 위치정보의 획득을 위해서 레

이저 주사거리, 측정정확도, 대상물의 규모, 스캐닝 속도 등을 고려하여 적합한 측정방식의 레이저 스캐너를 사용해야 한다.

3차원 레이저 스캐너는 측정원리에 따라 TOF(Time-Of-Flight) 방식, 위상변위(Phase shift) 방식, 삼각측량(Triangulation) 방식으로 구분된다. 이러한 측정원리는 거리 및 범위, 측정정확도, 스캐닝 속도에 있어서 표 2과 같은 특징을 지닌다.

TABLE 2. Characteristics of 3D laser scanner depending on measurement technologies

Measurement technology	Range (m)	Accuracy (mm)	Speed
TOF	< 100	< 10	Slow
	<1000	< 20	
Phase shift	< 100	< 10	Fast
Triangulation	< 5	< 1	Fast

일반적으로 측량분야에서는 TOF 방식과 위상변위 방식을 활용하고 있으며, 삼각측량 방식은 인스펙션 또는 리버스 엔지니어링 분야에서 주로 활용되고 있다.

본 연구에서는 종방향으로 범위가 넓은 터널을 스캐닝 대상으로 선정하였으므로, 다른 방식에 비해 관측거리가 긴 TOF 방식의 지상

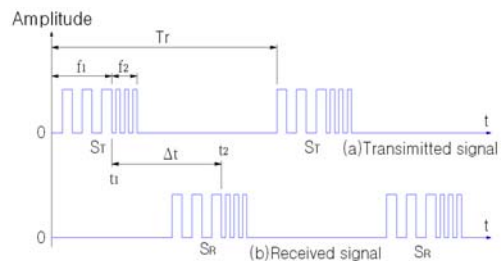


FIGURE 3. Principle of distance survey using transmitted and received signals in the TOF method

레이저 스캐너를 이용하였다.

TOF 방식은 그림 3에서와 같이 송신된 레이저가 대상물의 표면에서 반사되어 되돌아오는 시간 차이를 이용하여 거리를 계산하는 방식으로 송신부, 수신부, 처리부로 구성되어진다.

송·수신되는 경과시간  $\Delta t$ 는  $\Delta t = t_2 - t_1$ 이다. 여기서,  $t_1$ 은 송신된 주파수가  $f_1$ 에서  $f_2$ 로 변할 때의 시간이며,  $t_2$ 는 수신된 주파수가  $f_1$ 에서  $f_2$ 로 변할 때의 시간이다. 따라서 경과된 시간에 빛의 속도( $c$ )를 곱하면 왕복거리가 산출되며, 측정대상물까지의 거리는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \frac{c \times (t_2 - t_1)}{2} \quad (1)$$

## 2. 연속된 스캔 자료의 정합

하나의 대상물을 대상으로 취득된 다중 스캔 자료는 3차원 공간상의 상대적인 위치정합에 관련한 레지스트레이션(registration) 과정과 3차원 모델좌표를 대상물의 절대좌표로 변환하는 지오레퍼런싱(georeferencing) 과정을 거치게 된다.

레지스트레이션은 그림 4에 나타낸 것과 같이 서로 다른 스캔 방향에서 측정된 다중 스캔 자료를 형상적으로 서로 공통되는 부분의 거리 차이를 이론적으로 0에 가깝게 하는 상대 위치를 계산하는 과정이다.

이는 연속된 두 개의 스캔 자료가 동일 좌표계를 형성할 수 있도록 좌표변환을 실시하는 과정이며, 3차원 공간상의 회전 요소에 의해 결정되어진다.

$X, Y, Z$  좌표를 축  $x', y', z'$  좌표축으로 회전할 때 회전각  $\omega, \phi, \kappa$ 는 각 방향에 대한 회전을 의미한다. 연속적으로 세 축에 대해 회전시킬 경우,  $X$ 축에 대해  $\omega$ 만큼 회전한 후  $Y$ 축에 대해  $\phi$ 만큼 회전하고 마지막으로  $Z$ 축에 대해  $\kappa$ 만큼 순차적으로 회전하면 회전에 의한 좌표계의 변환식은 식 (2)와 같다.

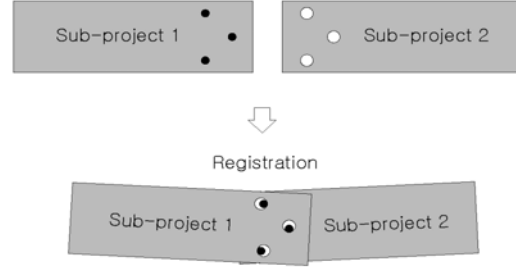


FIGURE 4. Principle of registering point clouds data measured from different locations

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = R_{\omega\phi\kappa} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\omega} R_{\phi} R_{\kappa} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $x', y', z'$  : 변환 후 좌표

$X, Y, Z$  : 변환 전 좌표

$R_{\omega}, R_{\phi}, R_{\kappa}$  : 각 축의 회전요소

이렇게 레지스트레이션 과정을 거쳐 동일 좌표계를 형성한 다중 스캔 자료들은 그림 5에 나타낸 것과 같이 지오레퍼런싱 과정을 통해 지상 기준점과 결합되어 대상물의 절대좌표로 변환된다.

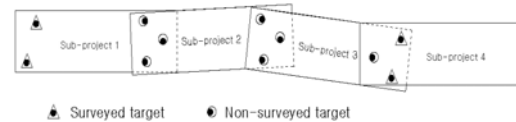


FIGURE 5. Principle of georeferencing point clouds data passed through a registration process

또한 레지스트레이션 과정을 거친 다중 스캔 자료를 지오레퍼런싱 하기 위한 변환식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = R_{\omega} R_{\phi} R_{\kappa} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $X_G, Y_G, Z_G$  : 절대 좌표  
 $R_\omega, R_\phi, R_\kappa$  : 각 축의 회전요소  
 $x', y', z'$  : 레지스트레이션에 의해  
 변환된 좌표  
 $X_0, Y_0, Z_0$  : 각 축에 관련한 평행  
 이동량

## 관측 실험 및 결과 분석

### 1. 실험 개요

본 연구의 대상지역은 서울~춘천간 민자고속도로 구간 중 경기도 남양주시에 소재한 ○○터널 구간을 선정하였으며, 연구대상지역에 대한 위성 영상은 그림 6과 같다.

본 대상 터널은 NATM 터널로 총연장 1,355m (상행=665m, 하행=690m)이며, 제원은 총폭원 11.573m, 터널반경 6.59m의 2차선 도로이다.



FIGURE 6. Location of test-field in a satellite image



FIGURE 7. View of the object tunnel

또한 그림 7과 같이 분착식 다단발과 이후 굴착면에 슛크리트 타설 공정을 마친 터널로써, 취득된 스캔 자료에 의한 단면과 설계 시 계획된 굴착선을 비교함으로써 각 단면별 여굴량을 산정할 수 있다.

### 2. 관측 실험

본 연구의 대상 터널은 상행선과 하행선이 분리된 터널로써, 각 방향별로 터널 시·종점에 각각 2개의 기준점을 설치하였으며, 총 8개의 지상 기준점 측량을 실시하였다. 지상 기준점 측량을 위해 SOKKIA사에서 제조한 모델명 SET230RK3를 사용하였으며, 본 장비는 프리즘/무프리즘 방식의 관측이 가능한 토탈스테이션으로 장비의 제원은 표 3과 같다.

TABLE 3. Specification of SET230RK3

Model	SET30RK3
Laser class	Class 3R laser product
Laser output	Reflectorless mode : class 3R Prism/Sheet mode : class 1
Measuring range	1.3 to 500m (with reflective sheet target) 1.3 to 5,000m (with AP prism)
Accuracy	$\pm(3+2\text{ppm}\times D)\text{mm}$ (with reflective sheet target) $\pm(2+2\text{ppm}\times D)\text{mm}$ (with AP prism)

또한, 연구에서 사용된 3차원 레이저 스캐너는 Trimble사에서 제조한 GS 200 모델로 TOF 측정방식을 사용하고 있으며, 반사강도 18%의 대상물에 대해 약 200m 거리까지 측정이 가능하다. 또한 532nm 파장대의 가시광 영역의 레이저를 광원으로 사용하기 때문에 칼라 정보의 획득도 가능하다. GS200 모델의 제원은 표 4와 같다.

본 연구를 위한 대상 터널은 상행선과 하행선이 분리된 터널이다. 따라서 그림 8과 같이 각 방향별로 스캐닝을 실시하였으며, 각각의 스캔

TABLE 4. Specification of GS 200

Model	GS 200	
General	instrument type	long range laser mapping system
	metrology method	time of flight
Specification	laser	pulsed 532nm, green class 3R (IEC 60825-1) class 2 (21CER 1041.1D)
	field of view	360°×60° continuous single scan
	range	standard 200m
	scanning speed	up to 5,000 points/second
	standard deviation	1.4mm@≤ 50m 2.5mm@≤100m 3.6mm@≤150m 6.5mm@≤200m
Performance	single point accuracy	position 12mm@100m distance 7mm@100m
	scan resolution	spot size : 3mm

자료의 간격이 약 40m정도 되도록 이동하여 총 35개(상행선 17개, 하행선 18개)의 스캔 자료를 취득하였다.

또한, 다중 스캔 자료를 절대좌표로 변환시키기 위한 지상 기준점을 시·종점부에 설치하였다. 연속된 다중 스캔 자료의 정합을 위해서 그림 9와 같이 중복된 위치에 3개의 구형 타겟을 설치하고, 각각의 서브 프로젝트 작업 과정에서 타겟을 정밀하게 스캐닝하였다.

각 시·종점에 설치된 2개의 지상 기준점에는 반사강도가 높은 구형 타겟을 설치하고 정밀 스캐닝을 실시함으로써, 절대좌표로의 변환이 이루어지며, 대상터널 내에서 레이저 스캐너가 수평방향으로 360° 회전하면서 획득된 스냅 사진을 자동 모자이크한 사진은 그림 10과 같다.

하나의 서브 프로젝트 과정에서 취득된 자료는 표 5와 같이 3차원 위치정보, RGB 정보,

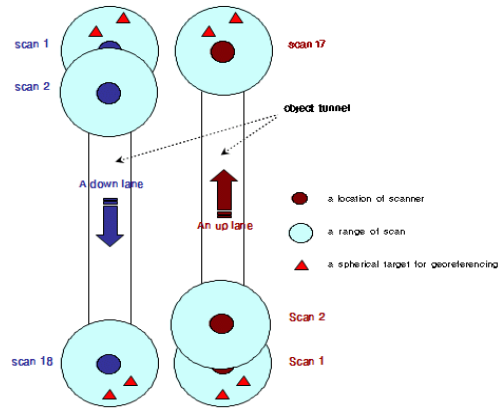


FIGURE 8. Constituent diagram of laser scanning for registration and georeferencing in the object tunnel

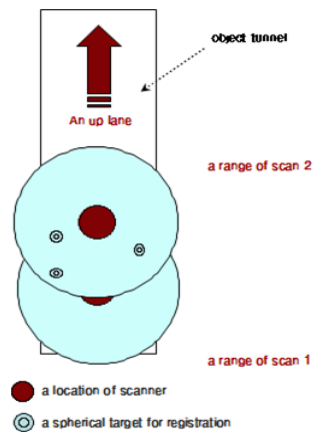


FIGURE 9. Plan view of spherical target arrangement for the registration of continuous scanning data



FIGURE 10. Panoramic view of a sub-sections

반사강도 정보를 포함하고 있으며, 하나의 서브 프로젝트의 원시자료는 그림 11과 같이 나타났다.

TABLE 5. Raw point clouds data including various informations

No	X	Y	Z	R	G	B	Intensity
1	6.036	3.203	-1.715	158	181	144	25
2	9.522	4.235	-0.915	213	116	253	64
3	11.265	3.563	0.236	161	153	151	30

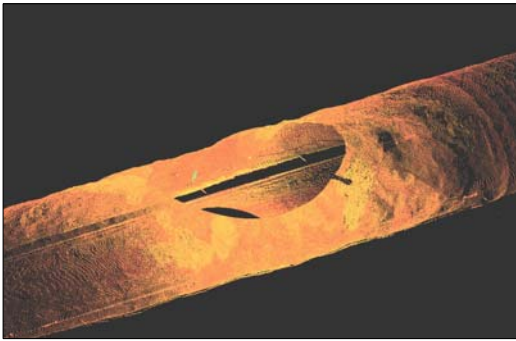


FIGURE 11. Illustration of raw point clouds data obtained from a sub-sections

### 3. 관측 결과

전송된 자료의 처리는 Trimble사에서 개발한 RealWorks Survey를 이용하였다. 처리 단계에서는 레지스트레이션 및 지오레퍼런싱을 실시하였으며, 최종적으로 처리된 자료의 정확도를 분석하였다. 또한, 레지스트레이션을 위해 연속된 서브 프로젝트 과정의 중복된 위치에 3개의 구형 타겟을 설치하고, 각각의 서브 프로젝트 작업과정에서 타겟을 정밀하게 스캐닝하였다. 구형 타겟은 그림 12와 같이 설치하였으며, 연속된 전·후 서브 프로젝트에서 정밀 스캐닝한 타겟의 모습은 그림 13 및 그림 14와 같다.

구형 타겟의 3차원 표면자료는 최소제곱원리에 의한 피팅(fitting)기법에 의해 구형의 중심이 자동으로 결정되며, 이는 RealWorker Survey 내의 registration tool에서 자동 수행된다. 따라서 이와 같이 정밀 스캔된 구형 타



FIGURE 12. View of arranging spherical target for registration

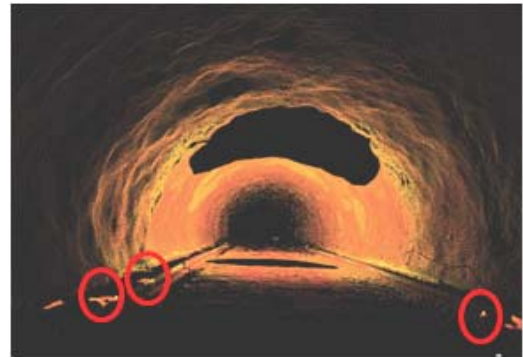


FIGURE 13. Continuous point clouds data (before)

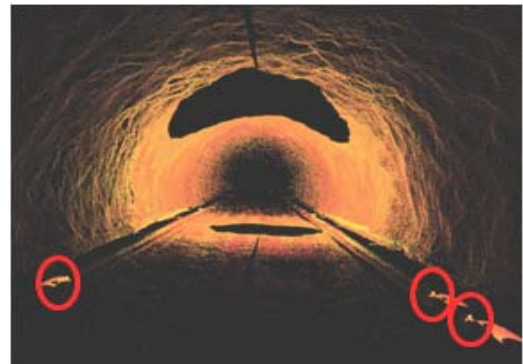


FIGURE 14. Continuous point clouds data (after)

겟의 자료로부터 그림 15와 같이 결정된 3개의 타겟 중심을 이용하여 연속된 서브 프로젝



트간의 상대적인 위치정합이 이루어진다. 취득된 3개의 연속된 스캔 자료를 레지스트레이션한 결과는 그림 16과 같이 나타났다.

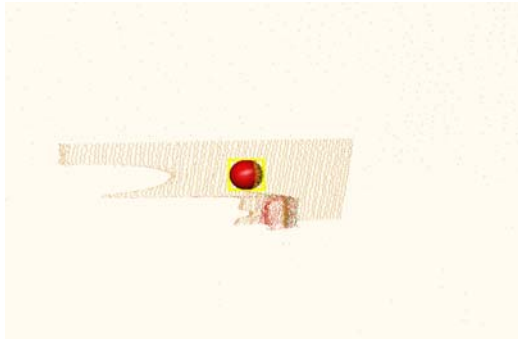


FIGURE 15. View of automatically recognizing spherical target



FIGURE 16. Result of registration



FIGURE 17. Result of georeferencing for a line

이러한 자료 정합 과정을 거쳐 동일 좌표계를 형성한 다중 스캔 자료들은 지오레퍼런싱

과정을 통해 지상 기준점과 결합되어 대상물의 절대좌표로 변환된다. 그림 17은 연장 665m의 상행선 구간에서 취득된 17개의 다중 스캔 자료를 레지스트레이션하고, 최종적으로 지오레퍼런싱한 결과를 나타낸다.

최종 처리단계를 거친 스캔 자료는 profile/cross-section 툴에 의해 1.0m 간격의 터널 단면을 결정하는데 이용된다. 먼저 터널 내의 도로 중심선 자료를 스캔 자료에 중첩시키고, 도로 중심선을 기준으로 1.0m 간격의 단면에 해당되는 점 자료를 자동으로 추출하게 된다. 이렇게 추출된 단면의 점 자료들은 최소제곱원리에 의해 최소제곱선으로 연결되며, 그림 18은 대상 터널을 1m 간격으로 단면을 자동 추출한 모습을 나타낸다.

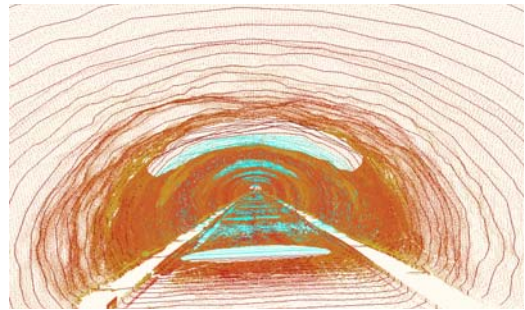


FIGURE 18. View of extracting cross section at intervals of 1m by profile/cross section tool

이렇게 추출된 단면들은 그림 19와 같이 DXF format으로 변환시켜 저장하게 되고, CAD 환경에서의 수정 단계를 거쳐 최종 단면을 결정하게 된다. 그림 20은 최종 수정 단계를 거친 터널의 입의 단면을 나타낸 것이다.

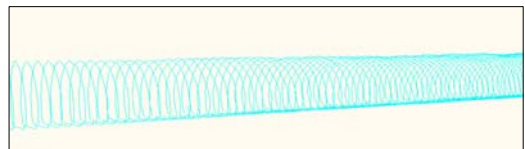


FIGURE 19. View of DXF format at CAD interface

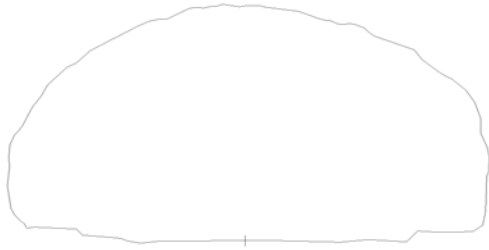


FIGURE 20. Final result of a cross section

4. 결과 분석

전체 구간에 걸쳐 처리된 스캔 자료를 이용하여 내공단면을 결정하는데 앞서 단면 결정을 위한 측정 수에 따른 면적의 정확도를 분석하였다. 본 연구에서 사용된 레이저 스캐닝 기법은 임의 단면에서 최소 500개 이상의 측정 관측이 가능하다. 따라서 일반적으로 터널 단면측량에서 적용되는 측정 수 15개, 25개, 50개에 의해 각각 결정된 단면적과 레이저 스캐닝 기법에 의한 단면적을 비교하였다. 표 6은 STA.17+800~STA.17+810을 대상으로 단면 간격 1.0m에 대한 측정수별 각 단면의 단면적과 평균 단면적을 비교한 것이다.

TABLE 6. Area of a cross section in accordance with the number of points

points \ STA.	Area of a cross section (m <sup>2</sup> )			
	> 500	50	25	15
17+800	88.96	88.76	86.15	85.75
17+801	87.05	86.67	85.68	85.24
17+802	88.25	87.74	86.87	86.05
17+803	88.54	88.15	87.56	87.01
17+804	88.78	87.87	87.12	86.88
17+805	89.87	89.35	88.89	87.89
17+806	89.25	88.74	88.51	87.78
17+807	89.58	88.94	88.48	87.89
17+808	89.28	88.87	87.92	87.18
17+809	88.85	88.25	87.70	87.08
17+810	89.35	88.77	88.05	87.43
Average	88.89	88.37	87.54	86.93

이러한 결과를 대상 터널의 표준단면적 91.58m<sup>2</sup>와 비교하면 그림 21과 같다. 레이저 스캐닝 기법에 의한 경우, 표준단면적과 약 2.9 %의 가장 근소한 차이를 나타내었다. 측정 수 15개를 적용한 경우, 약 5.1%의 차이로 가장 큰 차이를 나타내었다. 이상과 같이 레이저 스캐닝 기법을 이용하여 임의 단면을 결정할 경우, 측정 수 50개, 25개, 15개에 의해 결정된 단면에 비해 각각 0.6%, 1.1%, 2.2%의 면적 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. 이는 1개의 단면에서는 미소한 차이지만, 전체 연장을 고려해 볼 때 기성물량과 매우 큰 차이를 나타낸다.

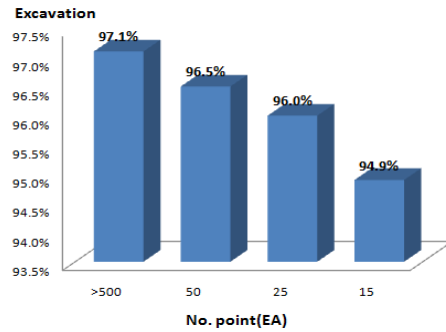


FIGURE 21. Distribution chart of each excavation in accordance with the number of points

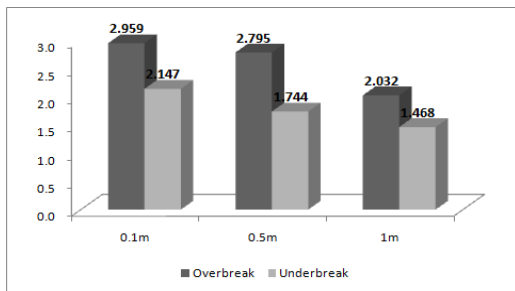
또한 임의 단면 간격에 따른 여굴량과 미굴량을 분석하기 위하여 표 7과 같이 0.1m, 0.5m, 1.0m 간격으로 단면을 결정하고, 간격별 여굴량과 미굴량을 산정하였다. 그 결과, 0.1m 간격의 경우 여굴량 2.959m<sup>3</sup>, 미굴량 2.147m<sup>3</sup>으로 나타났으며, 0.5m 간격의 경우 여굴량 2.795m<sup>3</sup>, 미굴량 1.744m<sup>3</sup>, 1.0m 간격의 경우 여굴량 2.032m<sup>3</sup>, 미굴량 1.468m<sup>3</sup>으로 나타났다.

임의 단면 간격별 여굴량 및 미굴량을 비교한 결과, 그림 22와 같은 분포를 나타내었다. 터널 굴착 시 여굴에 비해 미굴은 공사기간에 많은 영향을 미치며, 라이닝 단면의 확보를 위하여 되도록 발생되지 않게 시공하는 것이 일

TABLE 7. Comparison of excavation for various intervals of cross section

Accumulated distance (m)	An interval of cross section					
	0.1m		0.5m		1.0m	
	Over break (m <sup>2</sup> )	Under break (m <sup>2</sup> )	Over break (m <sup>2</sup> )	Under break (m <sup>2</sup> )	Over break (m <sup>2</sup> )	Under break (m <sup>2</sup> )
0	3.161	0.903	3.161	0.903	3.161	0.903
0.1	2.812	1.091	-	-	-	-
0.2	2.987	1.114	-	-	-	-
0.3	2.258	1.695	-	-	-	-
0.4	3.083	3.189	-	-	-	-
0.5	2.474	2.350	2.474	2.350	-	-
0.6	2.986	2.441	-	-	-	-
0.7	2.881	3.324	-	-	-	-
0.8	3.134	2.680	-	-	-	-
0.9	3.860	2.445	-	-	-	-
1.0	3.069	1.373	3.069	1.373	3.069	1.373
Volume (m <sup>3</sup> )	2.959	2.147	2.795	1.744	2.032	1.468

반적이지만, 본 연구에서는 전반적으로 단면 간격별 미굴량이 다소 크게 결정되었다. 이는 시공 시 터널 하단부의 미굴은 최종 단계에서 트렌치 공정에 의해 제거되기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 또한 단면의 간격이 커질수록 여굴량과 미굴량이 감소하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있었다.



### 터널단면관리시스템 개발

#### 1. 시스템의 특징

터널을 위한 계획 및 안전한 시공과 향후의 유지관리를 위하여 터널단면관리시스템(cross

section management system in tunnel)을 개발하였다. 터널단면관리시스템의 주요 특징으로는 그림 23과 같이 첫째, 터널 시공을 위한 계획 평면도, 종단면도 및 횡단면도 등의 도면 관리에 대한 부분들을 본 시스템에 연계 시키므로 실시간적인 시공 상태 및 모니터링을 할 수 있도록 구성하였으며 둘째, 또한 터널 시공 시 굴착량으로서 터널의 여굴량, 미굴량 등을 산정하여 향후 시공 상태 및 계획에 기반 자료를 제공할 수 있도록 하였다. 셋째, 지형공간에 대한 속성정보와 공간정보의 자료를 이용하여 터널에 대한 효율적인 유지관리에 적용할 수 있도록 구축하였다.

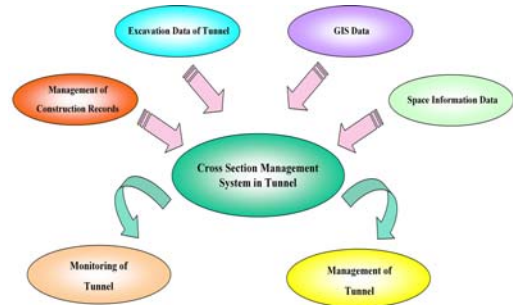


FIGURE 23. Characteristics of cross section management system in tunnel

#### 2. 시스템의 개발 환경 및 구성

본 연구에서 구축한 시스템은 표 8과 같은 환경과 Tool을 이용하여 시스템을 구축 및 개발하였다.

TABLE 8. Composition of S/W employed for cross section management system in tunnel

Species	Local system
O/S	Window XP
Map construction	AutoCAD 2002, ArcView
Development tool	Map Object
Development language	Visual Basic 6.0

시스템에 사용된 자료는 수치지형도, 문서, 설계도, 영상 등과 같은 디지털화된 자료이며, 특히 수치지형도와 같은 자료는 AutoCAD와 데스크탑 GIS tool인 ArcView를 이용하여 시스템에 사용할 수 있도록 전처리하여 구축하였다.

또한 공간정보의 그래픽 표현과 결과부분인 속성정보들은 ArcView의 엔진을 사용할 수 있도록 MapObject를 이용하였으며, 개발언어는 Visual Basic으로서 구현하여 GUI(graphic user interface)를 개발하였다.

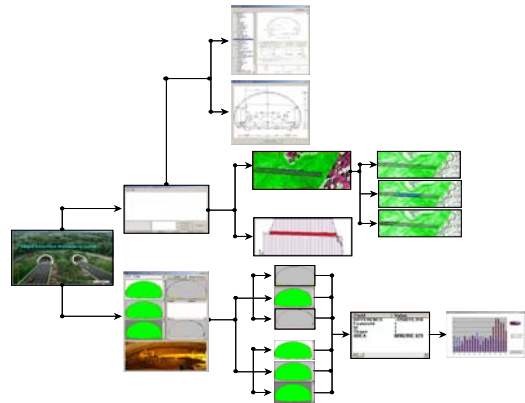


FIGURE 24. Configuration of cross section management system in tunnel

### 3. 터널단면관리시스템

터널단면관리시스템의 구성은 그림 24와 같이 크게 2가지 주요 부분으로 나눌 수 있다. 첫 번째 부분은 터널에 대한 공간정보에 대한 구축 및 이용에 관한 부분이며, 두 번째 부분은 터널의 굴착 단면에 대한 부분으로 구성하였다.

우선, 첫 번째 부분은 터널의 계획평면도와 종단면도를 함께 디스플레이 할 수 있도록 하여 보다 터널의 유지관리에 편리하도록 구축하였으며, 특히 굴착시행 전후와 굴착진행 부분을 실시간으로 나타낼 수 있으므로 현재의 시공 상태 및 시공 관리에 보다 적합하도록 하였다.

두 번째 부분은 터널의 굴착 단면에 대하여 중점적으로 자료 관리를 할 수 있도록 하였다. 특히 굴착단면에 대한 여굴량, 미굴량, 총굴착량 등과 굴착단면에 대한 인근 단면과도 같이 볼 수 있도록 구축하였다.

터널 굴착 단면에 대한 시스템의 구성은 그림 25와 같이 선택한 단면을 포함한 5개의 단면에 대한 공간정보 화면과 해당 굴착 단면에 대한 1개의 속성정보 및 하단부의 단면 굴착에 대한 영상에 대한 화면으로 구성하였다.

구체적인 화면에 대한 설명은 산정하고자 하는 굴착 단면에 대한 화면 번호는 1번이며 화면에는 터널에 대한 표준 횡단면도와 굴착된 모습이 나오며 이에 대한 값과 속성 등은 화면의 Report 구역에 나타나게 된다.

그리고 1번 굴착단면에 대한 전과 후에 대한 굴착단면은 화면 번호 2번과 3번에 각각 나타나도록 하여 연결된 단면들을 알기 쉽게 구축하였다.

또한, 1번 굴착 단면에 대한 미굴 단면과 여굴 단면은 화면 번호 4번과 5번에 각각 나타나도록 하여 해당 굴착 단면에 대한 구체적인 굴착 상태를 확인 할 수 있도록 구축하였다.

그리고 단면 굴착량에 대한 정보는 그림 25의 Report란에 표시되면 표 9와 같이 측정변

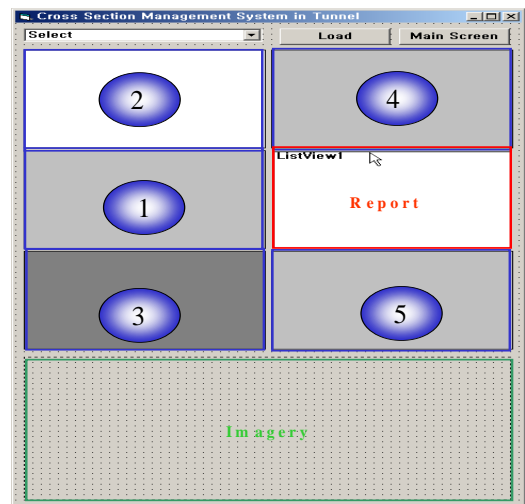


FIGURE 25. Explanation of partial screen view

호, 굴착량, 표준단면량, 여굴량, 미굴량 등의 항목으로 분리하여 사용자가 인식하기에 편리하도록 구성하였다.

TABLE 9. Configuration of excavation cross section for tunnel

Field	Value
Sta.	Number of Station
Standard	Area of standard cross section
Excavation	Area of excavation
Underbreak	Area of underbreak
Overbreak	Area of overbreak
Difference	Difference of underbreak and overbreak
Remark	Note

터널 굴착량에 대한 산정원리는 표준 횡단면과 굴착단면을 비교하면 굴착단면에 대한 굴착량이 산정되며 이 굴착량에서 여굴량 또는 미굴량의 차이를 구하면 미굴량 또는 여굴

량이 계산하게 되며 여굴량과 미굴량의 합은 표준횡단면과 굴착단면의 차이량과 같아야 된다는 계산식을 이용하였다. 산정 흐름도는 그림 26과 같으며 이러한 산정식을 이용하여 터널 굴착단면에 적용한 결과는 그림 27과 같이 나타났다.

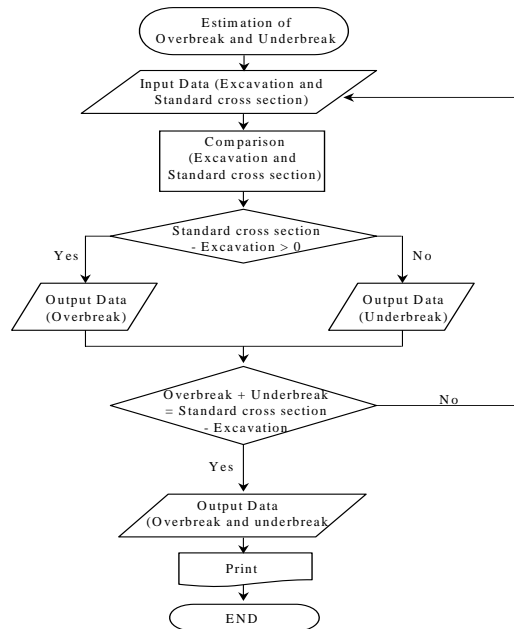


FIGURE 26. Flowchart of estimation for excavation

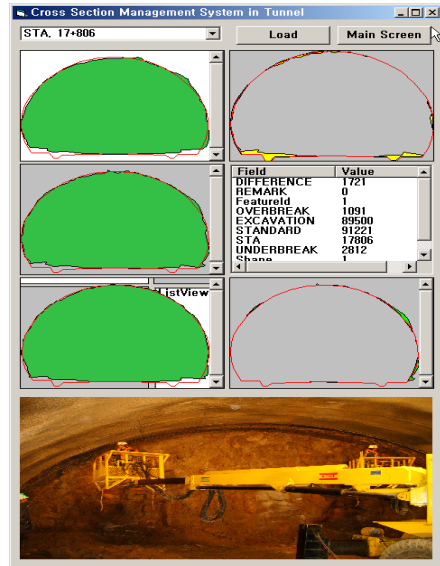


FIGURE 27. Result of excavation cross section(STA.17+805~STA.17+807)

그리고 이러한 굴착량에 대한 결과들을 그림 28과 같이 그래프를 이용해서 나타냄으로써 보다 효율적으로 유지관리를 할 수 있도록 구축하였다.

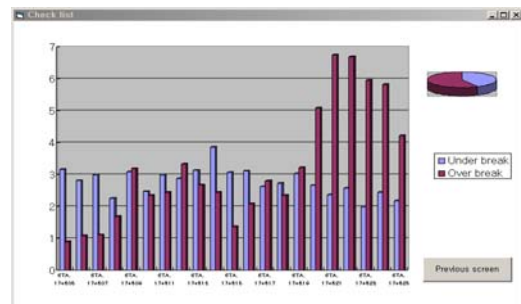


FIGURE 28. Graphic of excavation cross section

이렇게 결정된 1.0m 간격의 여굴량과 미굴량은 전체 양단면 평균법에 의해 상행선과 하행선 구간에서의 전체 여굴량과 미굴량을 산정하는데 이용된다. 표 10과 같이 상행선의 경우 여굴량 1,566.99m<sup>3</sup>, 미굴량 1,703.58m<sup>3</sup>으로 산정되었으며, 하행선의 경우 여굴량 1,481.22m<sup>3</sup>, 미굴량 2,041.71m<sup>3</sup>으로 산정되었다.

TABLE 10. Total underbreak and overbreak in the object tunnel

Space	Overbreak(m <sup>3</sup> )	Underbreak(m <sup>3</sup> )
An up line	1,566.99	1,703.58
A down line	1,481.22	2,041.71

## 결 론

터널을 대상으로 지상 레이저 스캐닝 기법에 의해 취득된 자료를 이용하여 보다 정확한 터널 내공단면을 결정하고, 이를 실무에서 활용할 수 있는 터널단면관리시스템을 개발한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 지상 레이저 스캐너를 이용하여 고정밀도의 3차원 자료를 신속·정확하게 취득할 수 있었으며, 자료 처리 단계를 거쳐 0.1m, 0.5m, 1.0m 간격의 임의 단면을 신속히 결정할 수 있었다. 또한 레이저 스캐닝 기법을 활용함으로써 각 단면의 여굴량과 미굴량 뿐만 아니라, 전체 터널 연장에서 발생한 여굴량과 미굴량을 신속하고 정확히 산정할 수 있었다.

둘째, 내공단면 결정을 위한 측정 수에 따른 면적의 정확도를 분석한 결과, 레이저 스캐닝 기법의 경우 표준단면적과 약 2.9%의 차이를 나타내었고 이는 15개 측점에 의해 결정된 단면적에 비해 약 2.2%의 면적 정확도 향상을 나타내었다. 이는 1개의 단면에서는 미소한 차이이지만, 전체 터널 연장을 고려해 볼 때 기성물량과 매우 큰 차이를 나타낸다. 따라서 레이저 스캐닝 기법의 활용 시 종래의 측량방식에

비해 보다 정확한 여굴량과 미굴량의 산정이 가능함을 보여준다.

셋째, 터널 굴착단계에서 보다 정확한 여굴량과 미굴량을 산정하고, 이를 모니터링할 수 있는 터널단면관리시스템을 개발하였다. 개발된 GUI 프로그램은 실무에서 더욱 효율적이고 경제적인 터널 굴착관리 및 모니터링을 가능하게 하며 향후, 임의 단면의 자료 추출로 터널 유지 관리에 대한 중요한 기반 자료의 제공 및 활용에 기여할 것으로 판단된다. **KAGIS**

## 참고 문헌

- 김세근, 이현용, 주영은. 2006. 모바일 레이저 스캐닝 데이터를 이용한 도로 선형 및 횡단면 추출에 관한 연구. 한국지리정보학회지. 9(3): 207-218.
- 김진수. 2007. 지상 레이저 스캐닝 기법에 의한 도로선형정보 추출 시스템 개발. 한국지리정보학회지. 10(4):97-98.
- 박홍기. 2002. 레이저 빔 스캐닝 기술을 이용한 3차원 형상 측정. 경희대학교 대학원 석사학위논문 5-9쪽.
- 이근상, 고덕구, 조기성. 2003. 항공레이저측량 자료를 이용한 시가지 건축밀도 평가에 관한 연구. 한국지리정보학회지. 6(3):95-96.
- 손호웅, 이성민. 2003. 석구조조물의 효율적인 관리를 위한 지질학적 및 구조동역학적 특성연구. 대한지구물리학회지 6(4):277-294.
- 윤덕근, 정동훈, 성경곤, 이상화. 2006. 센서를 장착한 차량을 이용한 도로 횡단경사 측정에 관한 연구. 한국도로학회논문집 8(2):105-116.
- 이승호. 2005. 3차원 영상처리를 이용한 암반사면 절리 측정 연구. 대한토목학회논문집 25(2C): 79-84.
- 장용구, 광영주, 강인준. 2006. 지상 LiDAR를 활용한 접도사면 위험평가에 따른 GIS 관리. 대한토목학회논문집 26(1D):169-175.

- 최재원. 2001. 레이저 스캐너를 이용한 측정점으로부터 자유곡면생성에 관한 연구. 부산대학교 대학원. 석사학위논문. 33-37쪽.
- 한승희. 2006. 패턴스캐너를 이용한 자동차부품의 3차원 모델링 및 효용성 분석. 한국측량학회지 24(1):1-8.
- Alba, M., L. Longoni, M. Papini, F. Roncoroni and M. Scaioni. 2005. Feasibility and problems of TLS in modeling rock faces for hazard mapping. ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, September, pp. 156-161.
- ANSI Z136.1. 1993. American National Standard for the Safe Use of Lasers. American National Standards Institute Inc., Orlando, FL.
- Collins, B. D. and N. Sitar. 2005. Monitoring of coastal bluff stability using high resolution 3D laser scanning. ASCE Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress, January.
- Gosliga, R. van, Lindenbergh, R. and N. Pfeifer. 2006. Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Systems, Vol.XXXVI, Part 5, Dresden, pp. 167-172.
- Hashash Y. M. A., J. N. Oliveira Filho, Y. Y. Su and L. Y. Liu. 2005. 3D laser scanning for tracking supported excavation construction. Proceedings of the sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, January.
- Lam, S. Y. W. 2006. Application of terrestrial laser scanning methodology in geometric tolerances analysis of tunnel structures. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.21(4), p. 410.
- Kovalev, V. A. and Eichinger. 2004. Elastic Lidar. Wiley, p. 101. 