한국터널지하공간학회논문집 2011년 5월
제13권 제3호, pp. 159-176

3차원 레이저 스캐너를 활용한 터널 시공관리

이강현[1], 허인욱[2], 김도훈[3], 이인모[4*]

The construction management of tunnel using 3D laser scanner

Kang-Hyun Lee, In-Wook Heo, Do-Hoon Kim, In-Mo Lee

ABSTRACT A 3D laser scanner is widely used in various fields such as games, movies, medicines, art, design, etc. Many studies for utilizing the 3D laser scanner in the fields of civil engineering have also been carried out, for example, for systematically managing tunnel and/or bridge construction. However, since a software which is directly applicable to Korean construction system does not exist, the amount of data obtained from existing the 3D laser scanner is too much to handle in a systematic way. Therefore, in this paper, a new data processing technique was established which can rapidly and effectively treat the 3D laser scanning data. Moreover, a software that can systematically manage the tunnel construction was developed. The developed software can assess the construction quality of tunnel excavation such as under-break, over-break, cracks, leakage and efflorescence, etc. A 3D laser scanner and the developed software was applied to an in-situ tunnelling site, and verified usefulness of the 3D laser scanner. The developed software may be useful for tunnel maintenance as well as for systematic management of tunnel construction.

Keywords: 3D laser scanner, tunnel, data processing, construction management

요 약 현재 3차원 레이저 스캐너는 게임, 영화, 의료, 미술, 디자인 분야 등 다양한 분야에서 널리 사용되고 있다. 토목분야에서는 교량 및 터널에 3차원 레이저 스캐너를 이용한 시공관리 방안 및 적용에 관한 연구가 다수 수행되었다. 그러나 3차원 레이저 스캐너로 얻어진 데이터의 용량이 너무 크고 우리나라 현장 실정에 적합한 소프트웨어가 없는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 3차원 레이저 스캐너의 데이터를 신속하게 처리할 수 있도록 데이터베이스를 구축하였으며, 터널의 미굴·여굴 여부 판단, 균열·누수·백태를 확인할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 또한 실제 터널 현장에 3차원 레이저 스캐너를 사용하여 3차원 레이저 스캐너와 소프트웨어를 검증하였다. 이는 터널 시공 중 시공관리 및 시공 후 유지관리에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

주요어: 3차원 레이저 스캐너, 터널, 데이터 처리, 시공관리

접수일(2011.3.31), 수정일(2011.5.11), 게재확정일(2011.5.18)

[1]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정
[2]비회원, (주)바이텍코리아 과장
[3]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료
[4]정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수
*교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

1. 서 론

현재 산업현장에서는 광파기 등의 광학장비를 이용하거나 GPS를 이용한 측량이 주로 사용되고 있다. 광파기는 측량하고자 하는 위치에 레이저를 발사하고 목표물에 반사되어 돌아오는 레이저의 위상차를 이용하여 거리를 측정한 후에 측정된 거리와 레이저가 발사된 각도를 이용하여 목표물의 좌표를 계산한다. 그리고 광학 장비에 의한 위치 측정 방법의 단점을 해결한 GPS 측량은 위성에서 수신기까지의 거리를 측정하여 수신기의 3차원 위치를 결정하고 좌표를 획득한다. 그러나 광파기 측량은 많은 시간이 소요되는데 비하여 적은 데이터를 획득하고, GPS는 수신기의 정밀도에 따라서 오차율이 수 센티미터 등에 이르는 단점이 존재한다.

광파기의 적은 데이터양과 오랜 측정시간, GPS의 정밀도 문제를 보완하기 위한 장비로써 최근 3차원 레이저 스캐너가 주목받고 있다. 3차원 레이저 스캐너는 현재 다양한 분야에서 널리 사용되고 있는데, 토목분야에서는 3차원 레이저 스캐너를 활용한 연구 및 적용방안이 주를 이루고 있으며, 현장에 사용한 사례는 극히 일부이다. 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 구조물 및 교량의 외관, 시공오차 분석 등에 대한 연구가 수행되었으며 실제 현장에 사용한 사례도 존재한다(Gordon et al., 2001; 한수희 등, 2008). 또한 터널에서는 암반사면의 절리 및 안정성 평가(이승호 등, 2004; 곽영주 등, 2005; 임은상 등, 2006) 터널에 스캐너를 적용하기 위한 방안 및 개발에 관한 연구 등이 이루어졌다(사공명 등, 2006; 사공명 등, 2007; Yoon et al., 2009; 이강현 등, 2010). 그 중에서도 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 터널의 여굴 및 미굴량 산출, 내공변위에 대한 계측에 대한 연구 및 적용이 다수 이루어졌다(Lindenbergh et al., 2005; 이종출 등, 2006; 김인섭과 임수봉, 2007; 노태호 등, 2008; 이태형 등 2008).

그러나 기존의 연구에서 사용된 대부분의 도달 시간(TOF, Time of Flight) 측정 방식의 스캐너는 터널의 형상을 완벽하게 구현할 만큼의 데이터를 취득하는데 많은 시간이 소요되어 터널 시공 공정에 지장을 초래하므로 실제 현장에 적용하기 어렵다. 또한 3차원 레이저 스캐너로 얻어진 데이터의 용량이 너무 크고 우리 실정에 맞는 소프트웨어가 없어서 측정된 데이터를 3차원 형상으로 보기만 하는 수준에 머무를 뿐이라 실제 현장에서 필요로 하는 가공된 데이터가 부족하여 현장에서 실제로 사용하기에는 어려움이 존재한다.

따라서 본 연구에서는 위상차 측정(phase shift) 방식의 3차원 레이저 스캐너를 사용하여 짧은 시간에 대용량의 데이터를 취득하고, 스캐닝 데이터를 가공하여 거리와 각도로 추출되는 데이터를 x, y, z의 좌표를 가지는 3차원 데이터로 변환한 후에 터널의 특성을 고려하여 초고용량의 스캐닝

데이터를 적절한 방법으로 배열하여 원하는 위치의 데이터 정보를 신속하게 추출할 수 있도록 데이터베이스를 구축하였다. 데이터베이스를 바탕으로 실제 터널 현장에서 미굴·여굴 여부를 판단하고 터널 표면에서의 균열과 누수, 침하 등을 관리할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 개발된 소프트웨어를 이용하여 여굴량과 미굴량, 내공변위 등을 계산함으로써 시공물량 및 시공오차, 터널 상태 및 안정성을 평가할 수 있으며, 시공 중 시공관리 및 시공 후 유지관리에도 기여할 것으로 예상된다.

2. 기존연구의 고찰 및 연구방향

토목분야에서 교량, 사면, 터널 등에 3차원 레이저 스캐너를 활용한 연구가 다수 수행되었다. 그러나 스캐닝 속도, 스캐닝 오차, 데이터베이스, 소프트웨어 등의 문제로 실제 현장에서 사용하는데는 어려움이 존재하며, 전문가만 사용할 수 있는 단점이 존재한다. 표 1에 3차원 레이저 스캐너를 터널에 적용한 연구사례를 정리하였다. 표 1에서 보는 것처럼 터널에 3차원 레이저 스캐너를 사용한 경우 대부분이 도달시간 측정방식을 사용하였는데, 이는 측정시간이 약 20분 정도 소요된다. 또한 소프트웨어의 경우 Rapid Form 2006, 3D Extractor는 단순한 데이터 처리만 가능하며, 3차원 레이저 스캐너 제조업체에서 제공하는 소프트웨어인 RealWorks Survey도 스캐닝 데이터를 3차원 좌표로 변환하고, 구조물의 단순한 형태를 제공하는 수준이다. 따라서 설계단면과 비교를 통한 터널 시공관리 및 유지관리에 활용하기 위해서는 별도의 작업 등이 필요하며, 터널 전체구간의 대용량의 스캐닝 데이터를 처리 하는데 수 시간이 소요된다. 따라서 RealWorks Survey 소프트웨어로부터 얻어진 데이터를 활용하수 있도록 노태호 등(2008)은 터널단면 관리시스템을 개발하여 프로그램 상에서 터널 설계단면과의 비교를 통한 여굴량 및 미굴량을 파악할 수 있도록 하였다.

표 1. 기존 연구문헌 내용 요약·정리

저자	스캔 방식	소프트웨어	시공관리 개념
이종출 등 (2006)	위상차 측정	Rapid Form 2006	설계단면과 비교를 통한 터널 여굴량 산정
김인섭과 임수봉(2007)	도달 시간 측정	3D Extractor	설계단면과 비교를 통한 터널 여굴량과 미굴량 산정
이종출 등 (2007)	도달 시간 측정	RealWorks Survey	설계단면과 비교를 통한 터널 여굴량과 미굴량 산정
노태호 등 (2008)	도달 시간 측정	RealWorks Survey, 터널단면관리 시스템	설계단면과 비교를 통한 터널 여굴량과 미굴량 산정 및 총 굴착량 산정, 터널의 전체적인 단면 파악

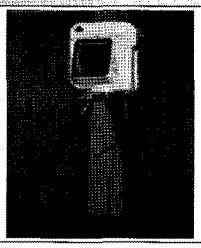
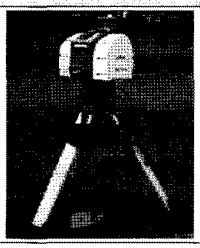
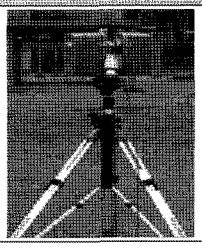
기존 연구를 통해 살펴봤을 때 3차원 레이저 스캐너를 실제 현장에 적용하기 위해서는 터널 시공 공정에 지장을 주지 않도록 측정 시간이 짧아야 할 것이고, 현장의 상황을 빠른 시간 내에 파악할 수 있도록 고용량의 스캐닝 데이터를 빠르게 처리할 수 있어야 한다. 또한 전문지식 없이도 현장 인력이 사용할 수 있도록 스캐닝 데이터를 자동으로 처리하고, 간편하게 사용할 수 있는 소프트웨어의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 터널 시공 공정에 지장을 주지 않도록 측정시간이 5분 미만인 위상차 측정 방식의 스캐너를 이용하고, 스캐닝 데이터를 자동으로 신속하게 처리할 수 있도록 터널 특성에 적합한 알고리즘을 개발하여 수 초 내에 데이터 처리가 가능한 데이터베이스를 구축하였다. 이를 이용하여 미굴·여굴뿐만 아니라 내공변위, 터널 표면 상태를 종합적으로 시공관리 할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

3. 3차원 레이저 스캐너

3차원 레이저 스캐너는 레이저 광선을 쏘아 물체에 반사되어 오는 시간 또는 위상 차이를 측정하여 물체와의 거리를 계산하고 반사율을 통해 색깔을 인식하여 흑백의 3차원 형상을 구현하는 장비이

표 2. 3차원 레이저 스캐너의 성능 비교표

제조사/ 스캐너 모델명		Trimble GS101	Leica HDS3000	Z+F Imager 5003	FARO LS 880 HE
모델 사진					
스캔 방법		도달 시간(time of flight) 측정		위상 차(phase shift) 측정	
스캔 시야 [°]		360×60	360×270	360×310	360×320
스캔 거리 [m]		2~100	1~100	1~53.5	< 78
스캔 속도 [Pts/"]		5000	4000	500000	120000
각 해상도 [°]	수직	0.0017	0.0034	0.018	0.009
	수평	0.0017	0.0034	0.01	0.00076
스캔 정밀도 [mm]		6	4	6	±3/10m
스캐너 조작장치		노트북	노트북	노트북	노트북/내부 PC
카메라 장착여부		비디오 카메라 장착	디지털 카메라 장착	선택사항	선택사항

다. 초당 수십만 점에 이르는 측정 속도를 가진 3차원 레이저 스캐너는 짧은 시간에 거의 실제 형상과 같은 데이터를 획득할 수 있기 때문에, 산업현장 뿐만 아니라 게임, 영화, 의료, 미술, 디자인분야 등 3차원 형상을 필요로 하는 모든 분야에서 이용가능하며 실제로 사용되고 있다(이강현, 2010).

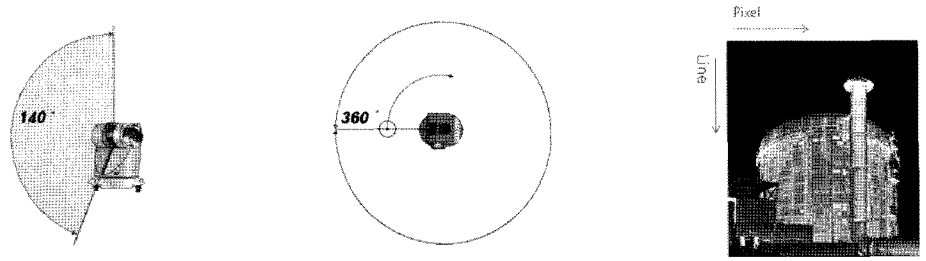
3차원 레이저 스캐너는 레이저 방식 이외에도 카메라 방식이 있으나, 본 연구에서는 레이저 방식의 고정밀 대용량 스캐너를 사용하였다. 레이저 방식의 3차원 스캐너 중 현재 일부 국내에 들어와 있거나 외국에서 사용되는 3차원 스캐너의 성능을 표 2에 정리하였다. 본 연구에서는 고용량의 3차원 데이터를 터널 특성에 맞게 변환하고 이를 실제 현장에 적용하기 위한 연구이므로, 공기지연이 발생하지 않도록 초당 측정 속도가 빨라서 스캔 시야 전 구간을 스캐닝 하는데 걸리는 시간이 약 3.5분 정도인 Z+F Imager 5003 레이저 스캐너를 이용하였다.

4. 3차원 레이저 스캐너 데이터 분석

3차원 레이저 스캐너의 스캐닝 데이터는 포인트 클라우드 형태의 무수히 많은 포인트로 수집된다. 따라서 대용량 데이터를 쉽게 저장하고 추출할 수 있는 최적화된 데이터베이스를 구축해야 하고, 그 데이터베이스를 처리하기 쉽도록 소프트웨어를 구성, 개발해야 효율적인 작업이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 3차원 레이저 스캐너로부터 얻어진 스캐닝 데이터에 대한 분석을 먼저 수행하였다.

4.1 3차원 레이저 스캐너 측정방식 분석

3차원 레이저 스캐너는 수직회전운동과 수평회전운동을 동시에 수행하며, 빠른 속도로 수직회전운동을 하는 동안 180도 이상의 수평회전이 이루어지면서 스캐닝 작업이 완료된다. 연직 방향이 픽셀(pixel)방향이고, 수평방향을 라인(line)방향이라 하면 고속의 연직 회전 운동과 동시에 천천히



(a) 픽셀 정보 수집 (b) 라인 정보 생성 (c) 수집된 데이터 표현

그림 1. 3D 레이저 스캐너의 측정방식

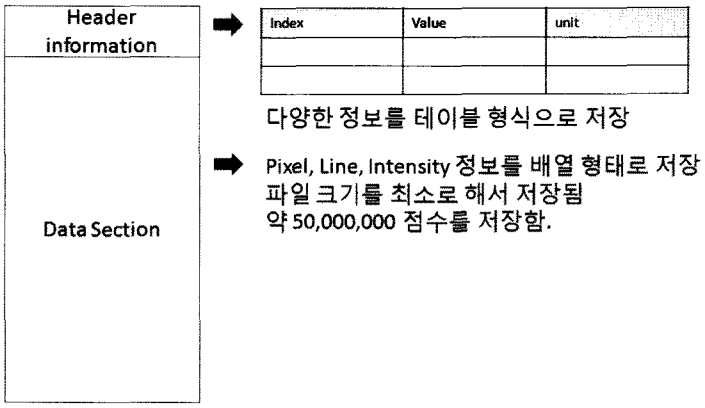


그림 2. 스캐닝 데이터 파일의 기본 구조

수평회전을 하면서 픽셀값과 라인값을 추출한다. 장비의 가려지는 부분으로 인하여 수직운동은 140도 이내에서만 데이터 취득이 가능하고, 수평운동은 360도 영역에서 가능하다(그림 1. (a), (b)). 수집된 데이터를 각각의 좌표에 배치해서 출력한 결과물은 3D 형태로 나타나며 이에 대한 예가 그림 1. (c)에 나타나 있다.

4.2 스캐닝 데이터 파일 분석

스캐닝 데이터는 스캐너의 회전, 이동, 수평-수직 모터의 속도 등의 기본 데이터를 가지는 헤더부분과 스캐너로부터 들어오는 배열 데이터를 바로 저장하는 데이터 섹션 부분으로 이루어져 있다(그림 2). 여기서 데이터 섹션 부분에 각각의 포인트에 대한 수평각, 수직각, 거리, 강도가 저장되고, 각도, 거리를 통하여 x, y, z좌표를 계산하고 강도를 통하여 색상정보를 계산한다. 변환된 데이터로부터 스캐닝된 상태를 2D 형태의 이미지로 볼 수 있고, 3D 형태로 표현할 수도 있다.

4.3 스캐닝 데이터의 포인트 정보 분석

3차원 레이저 스캐너를 이용하여 얻어진 터널의 스캐닝 데이터를 x, y, z의 3차원 좌표로 변환하여 프로그램 상에 도시한 화면이 그림 3에 나타나 있다. 이 화면에서 마우스를 이용해 이동, 확대, 회전을 할 수 있으며 터널의 형태를 직관적으로 파악할 수 있다. 그러나 3차원 좌표로 변환한 포인트들은 기계오차로 인하여 일정범위의 두께로 분포된 점 데이터들이므로 원하는 터널 벽면을 추출하기 위해서는 추가 작업이 필요하다. 그림 4는 터널처럼 굴곡진 벽면을 스캐닝한 데이터로서 3차원 상에 포인트 정보로 출력한 결과의 정면도와 평면도이다. 평면도를 살펴보면 일정한 두께로 점

군을 형성한 것을 살펴 볼 수 있는데, 이는 레이저 스캐너가 1~2 mm 정도의 측정오차를 가지고 있기 때문이다. 또한 실제 콘크리트 구조물의 경우 면이 거칠기 때문에 측정오차가 더욱 커질 수 있다. 따라서 측정된 데이터로 표현된 일정한 두께를 가진 면을 실제로 존재하는 하나의 면으로 만들기 위하여 근사곡면을 이용하였다.

적절한 곡면 모델을 만들기 위해서 스캐너의 데이터 수집 과정을 고려해보면, 대부분이 연직 회전운동이며 그 과정에서 오차가 가장 크게 포함되어 있다. 따라서 연직 운동에서 거리 오차를 줄이

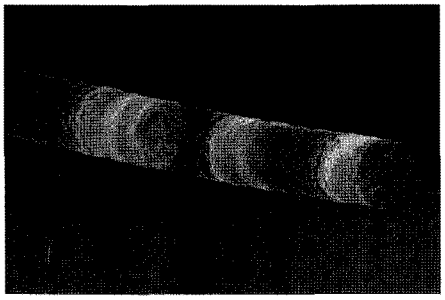
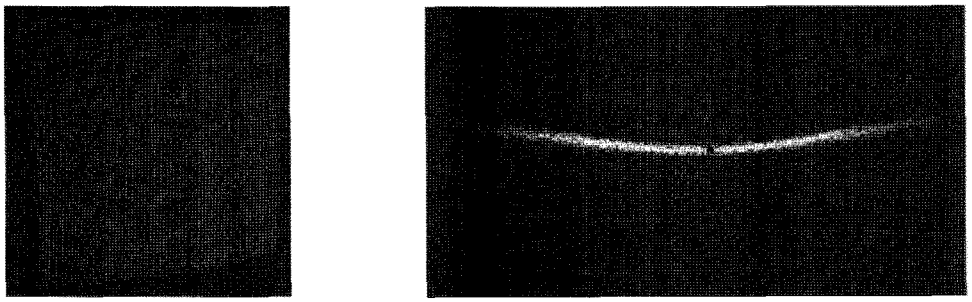


그림 3. 3차원 자표로 배치된 스캐닝 데이터



(a) 정면도 (b) 평면도

그림 4. 곡면을 스캐닝한 데이터

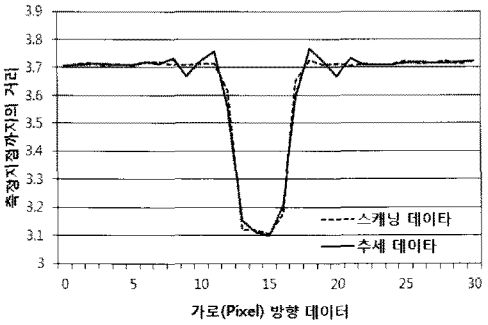


그림 5. 실제 측정값(스캐닝 데이터)와 추세 데이터와의 비교

는 작업을 수행하면 원하는 곡선을 얻을 수 있다. 스캐닝 데이터의 점들을 이용하여 추세선을 구한 결과, 하나의 추세선으로는 오차를 크게 줄일 수 없었다. 따라서 측정 전 구간에서 추세선을 계산하고, 평균 오차가 5 mm를 넘는다면 구간을 반으로 나눠서 다시 추세선을 계산하는 과정을 반복하여 여러 개의 추세곡선을 얻은 결과, 실제 측정값과 근사한 결과가 나타났으며 측정데이터와의 평균오차는 ±0.005 mm로 나타났다(그림 5).

5. 스캐닝 데이터 DB 구축

스캐닝 데이터를 효과적으로 사용하기 위해서는 사용 목적에 따라서 데이터를 가공해야 한다. 또한 원하는 구간의 데이터를 신속하게 검색해서 불러올 수 있어야 하고, 원하는 지점의 정확한 위치 좌표를 얻을 수 있어야 한다. 따라서 본 연구에서는 터널 특성을 고려하여 스캐닝 데이터를 신속하게 처리하고 시간에 따른 터널의 변형 특성을 알 수 있도록 각기 다른 시점에 측정된 여러 개의 스캐닝 데이터를 비교 분석할 수 있는 구조를 가진 데이터베이스를 구축하였다.

5.1 스캐닝 데이터 획득 및 처리

터널 현장에서 스캐닝 데이터를 얻기 위해서는 먼저 터널 내부 특정 지점의 절대좌표를 획득해야 한다. 따라서 막장면 근처에 표적지를 4곳에 설치하고, 광파기로 표적지의 절대좌표(global coordinate, TM)를 획득한다. 그리고 Z+F Imager 5003 레이저 스캐너를 이용하여 스캐닝 데이터를 획득한다. 이 때 얻어지는 데이터파일 형태는 ZFS스캐너 원본 파일로 상대좌표를 가진 포인트 형태로 저장되므로, 스캐닝 데이터에 포함된 표적지의 절대좌표를 이용하여 구성한 변환매트릭스를 통해 상대좌표를 가진 스캐닝 포인트 데이터 파일을 절대좌표로 변환한다(그림 6). 이를 통해 절대좌표로 구성

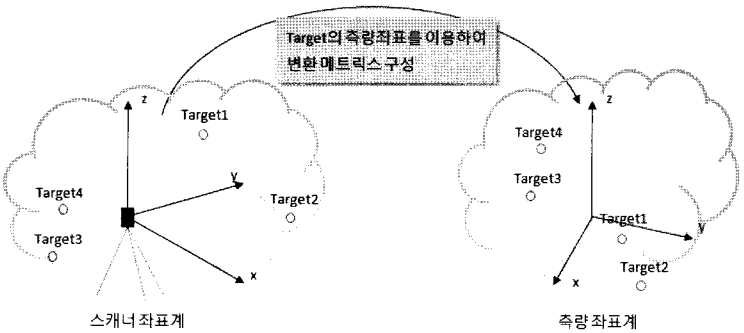


그림 6. 상대좌표로 구성된 스캐닝 데이터의 절대좌표 변환 과정

된 스캐닝 파일과 선형정보, 종구배정보를 조합한 터널 설계단면의 절대좌표를 일치시킴으로써 스캐닝으로 얻어진 단면과 설계단면과의 비교가 가능하다.

여러 시점에서의 스캐닝 데이터를 얻기 때문에 데이터베이스를 구축할 때 필연적으로 중첩구간이 발생하게 되는데, 이때 중첩구간의 데이터 중 어느 것이 좀 더 정확하다고 판단하기 어렵다. 따라서 중첩구간의 모든 포인트를 고려하여 추세선을 구한 후에 곡면을 구성하도록 데이터를 처리하였다.

5.2 데이터베이스 구성 프로세스

데이터베이스를 구축하는데 있어 필요한 데이터를 손쉽게 불러올 수 있도록 하기 위해서는 무엇을 기준으로 데이터 정렬을 하는 것이 효과적인지를 고려해야 한다. 터널의 경우 단면에 비하여 길이 방향(종방향)으로 긴 구조물이기 때문에 기준점으로부터 종방향 거리에 따라서 데이터를 정렬하는 것이 효과적으로 판단된다.

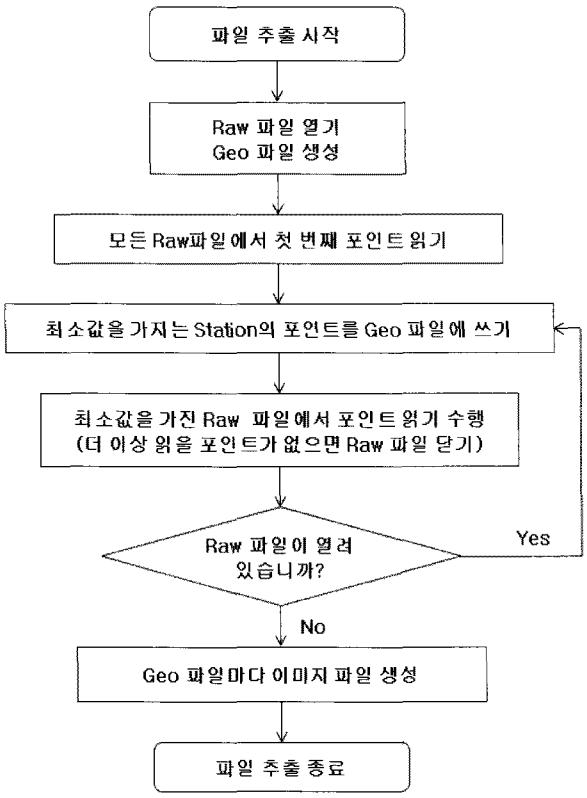


그림 7. 데이터 추출기 프로세스

따라서 스캐닝 포인트 데이터로부터 3차원 좌표로 변환하고 Station이라는 종방향 길이에 따라 정렬을 수행한 후에 그림 7과 같은 처리순서를 가지는 데이터 추출기를 이용하여 좌표를 가지는 Geo파일과 표면의 상태를 확인할 수 있는 이미지 파일로 저장하였다. 이러한 일련의 데이터베이스 처리과정이 그림 8에 나타나있다. 터널의 경우 Station이라는 종방향 길이에 따라서 데이터를 관리하는 것이 용이하기 때문에 그림 8에 나타나 있듯이 종방향 길이에 따라서 스캐닝 데이터를 관리할 수 있도록 데이터베이스를 구축하였다.

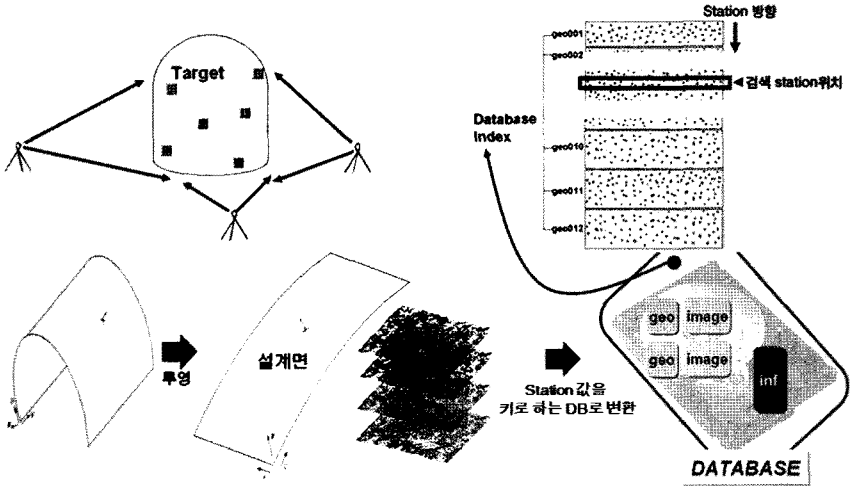


그림 8. 데이터베이스 흐름도

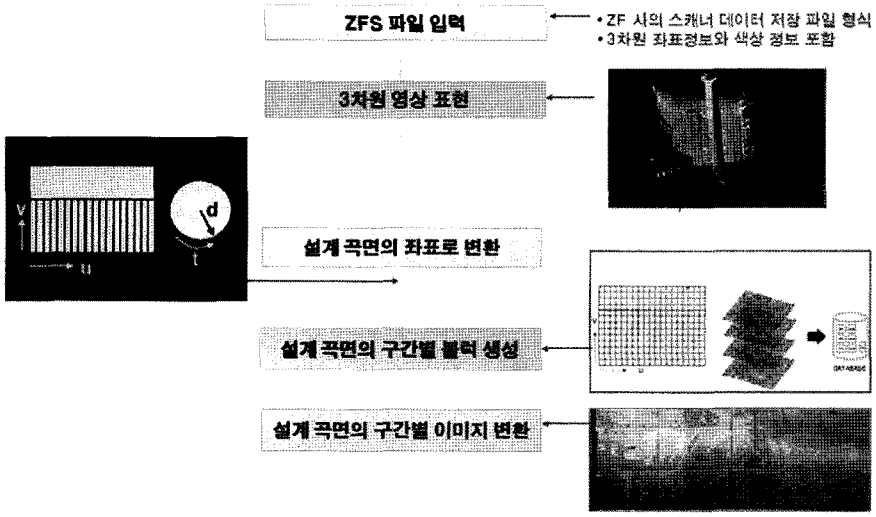


그림 9. 데이터베이스 구성 과정

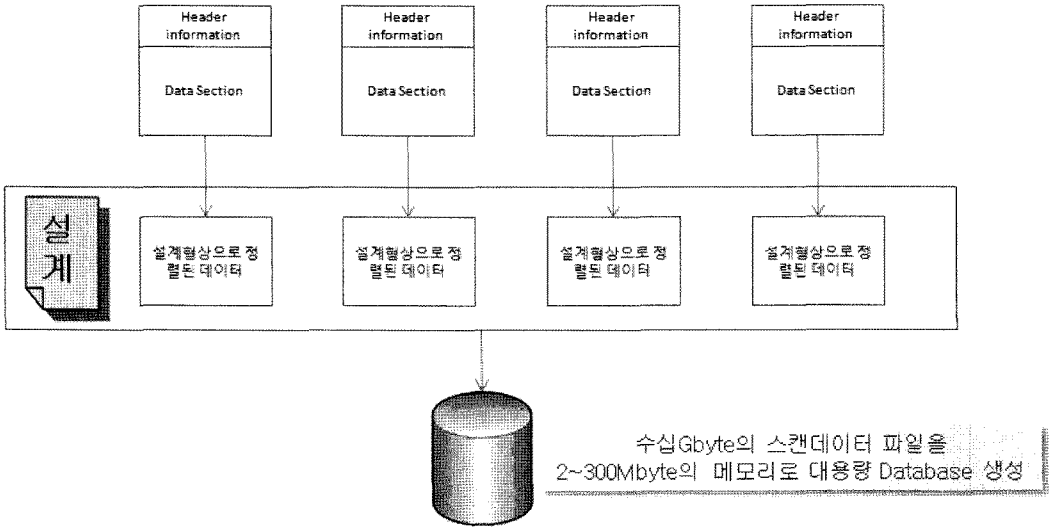


그림 10. 대용량 데이터베이스 처리 흐름도

3차원 레이저 스캐너를 이용하여 취득된 데이터와 구조물의 설계데이터(선형정보, 종구배정보, 단면정보)를 이용하여 그림 9와 같은 순서로 본 연구에서 개발되는 소프트웨어의 통합 데이터베이스를 구성하였다. 구조물의 설계곡면을 u, v 좌표로 정의하고 수집된 데이터를 해당 곡면에 투영한 값으로 변환한 후에 구간별로 잘라서 저장을 하였고, 마지막 그림은 구간별로 이미지를 불러온 화면을 보여준다.

터널의 경우 종방향 길이가 매우 길기 때문에 스캐닝 파일이 많이 생성된다. 그러나 스캐닝 파일을 한 번에 모두 불러와서 변환하는 방식은 컴퓨터의 메모리에 부담을 주기 때문에, 데이터 처리에 있어서 중간과정이 필수적이다. 따라서 중간정렬 과정을 거쳐서 중간파일 형태로 변환하고, 순차적으로 중간파일을 읽도록 데이터를 처리하도록 하였다(그림 10). 이러한 방식으로 데이터베이스를 처리하면, 파일을 열었을 때 큰 메모리를 요구하지 않기 때문에 많은 수의 스캐닝 파일을 동시에 빠르게 처리할 수 있다.

6. 소프트웨어 구성 및 기능

터널의 이상 유무를 검사하기 위해 현재 사용되는 방법은 현장인력이 육안으로 직접 검사하는 방식과 사진측량 차량을 이용하는 방식이 있다. 그러나 이 방법들은 현실적으로 터널의 상태를 판단하고 관리 하는데 있어서 객관성이 결여되고 한계점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 터널의

선형정보, 종구배정보, 단면정보 그리고 스캐닝된 이미지를 바탕으로 구성된 데이터베이스를 기반으로 하는 소프트웨어 Mextunnels를 개발하였다.

본 연구에서 개발한 소프트웨어는 크게 설계정보를 입력하는 설계화면, 설계정보와 실제측정된 스캐닝 데이터를 기반으로 하는 데이터베이스 생성화면, 설계정보와 스캐닝 데이터를 비교하고 분석할 수 있는 보기화면으로 구성된다(그림 11).

설계화면에서는 터널의 선형설계정보, 종구배정보, 단면정보를 입력할 수 있으며, 데이터베이스 생성 화면에서 앞서 설명한 프로세스처럼 터널에 적합한 데이터베이스를 생성한다. 보기화면에서는 터널의 설계단면과 실제 시공단면을 측정한 스캐닝 데이터를 2차원 이미지로 변환하여 2개의

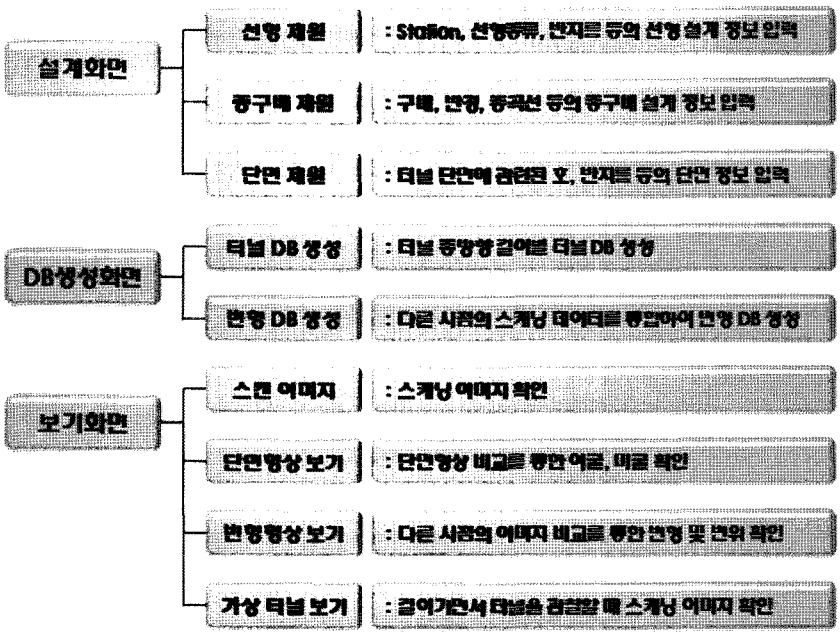
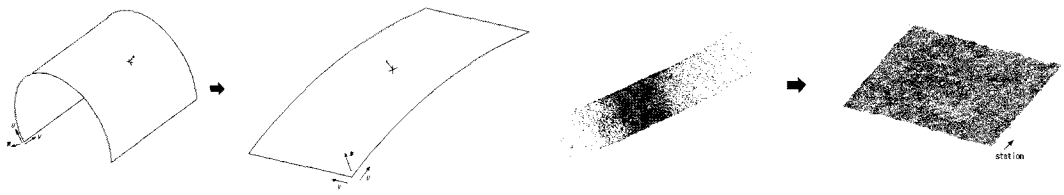


그림 11. 소프트웨어 구성도



(a) 설계정보 2차원 이미지로 변환 (b) 스캐닝 데이터 2차원 이미지로 변환

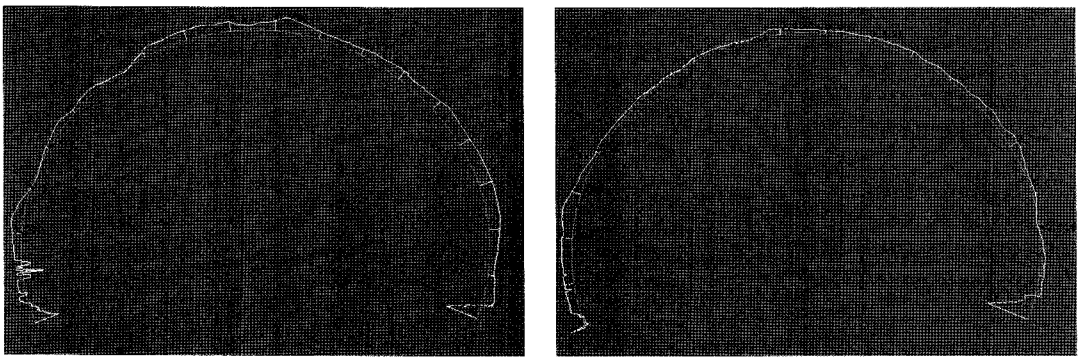
그림 12. 2차원 이미지 변환 과정

이미지 파일을 비교함으로써 미굴·여굴 여부를 분석할 수 있다(그림 12). 또한 스캐닝 데이터를 기반으로 균열·백태·누수 검출, 가상현실 기능을 제공한다. 또한 이외에도 보고서 자료 출력, 엑셀이나 캐드같은 범용 프로그램에서 사용할 수 있도록 데이터 출력 등의 부가적인 기능을 제공한다.

7. 현장 적용성 시험

3D 레이저 스캐너와 본 연구에서 개발된 소프트웨어의 현장 적용성을 평가하기 위하여 굴착공정이 진행 중인 2개의 현장, 라이닝 타설 중인 1개의 현장에서 현장 시험을 진행하였다.

충주-제천 ○○공구의 3개의 터널 중 현재 시공 중인 ○○터널의 STA.3910~STA.4060 구간에서 미굴·여굴 여부를 파악하기 위한 현장시험을 하였다. 현장 시험이 진행된 터널은 현재 굴착공정이 진행 중이기 때문에 숏크리트면에 대한 스캐닝을 수행하였다. 설계단면과 스캐닝 파일을 2차원 이미지로 변환 후 비교를 통해 미굴·여굴 여부를 분석한 결과 중, Station 4000~4020 구간에 대한 단면을 그림 13에 나타냈다. 그림 13에서 숫자는 설계단면과 숏크리트면의 차이를 m단위로 출력한 것이다. 설계면과 시공단면의 그림으로 살펴보았을 때 굴착이 대체적으로 잘된 것으로 판단된다(그림 13). 그러나 터널 바닥면에서 미굴이 많은 것으로 나타났는데, 시공 중에 발생된 버럭들이 완전히 치워지지 않고 바닥면에 쌓여 있기 때문에 스캐닝 데이터에 반영이 된 것으로 보인다. 또한 소프트웨어 상의 기능을 이용하여 미굴 및 여굴량을 체적을 계산한 결과 여굴량은 76.318 m^3, 미굴량은 11.941 m^3으로 나타났는데, 여굴량이 꽤 큰 것으로 나타나서 추후 라이닝 작업 시에 콘크리트가 많이 소요되므로 좀 더 정확한 굴착이 필요할 것으로 판단된다.



(a) Station 4000 지점 (b) Station 4020 지점

그림 13. 설계단면과 시공단면 비교

그림 14. 단면비교 및 단면의 스캐닝이미지

소프트웨어 상에 있는 평면처리 기능을 이용하여 특정 Station 영역의 단면을 선택하면 그 부근의 2차원 이미지와 함께 미굴, 여굴 상태를 칼라로 표현된 이미지를 얻을 수 있으며 이를 등고선 형태로 표현할 수도 있다. 이를 통하여 현장에서 측정된 데이터를 등고선 형태로 변환하여 그림 14에 나타냈는데, 빨간색 부분은 여굴부분을 나타내며, 파란색 부분은 미굴부분을 나타낸다. 그리고 녹색 부분은 미굴이나 여굴이 거의 없이 설계단면과 거의 비슷하게 굴착된 부분을 의미한다.

이번시험에서는 현장 여건 상 최종 숏크리트 타설면만 스캐닝 하였는데 실제 현장에서 3차원 레이저 스캐너를 시공관리 용도로 사용할 때는 굴착 직후, 숏크리트 타설 후에 스캐닝을 수행함으로써 숏크리트와 라이닝의 시공 물량을 측정할 수 있을 것이다.

특정시점에서 스캐닝된 데이터로 만든 곡면 1과, 일정시간이 지난 후에 스캐닝된 데이터로 만든 곡면 2를 서로 겹쳐서 비교하면 일정시간동안 발생한 천단변위, 내공변위를 파악할 수 있다. 따라서

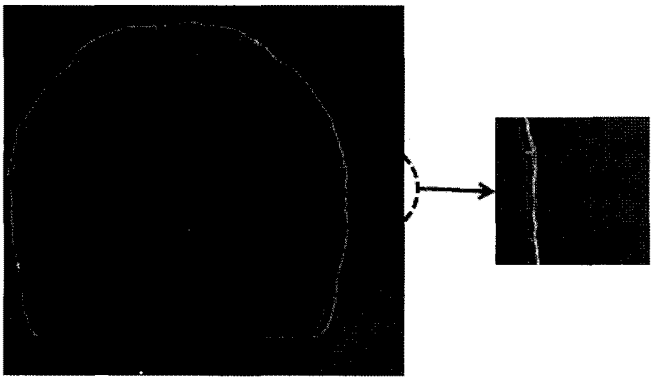


그림 15. 다른 시점의 스캐닝 데이터 비교를 통한 미굴, 여굴 및 내공변위 산출

별도의 계측과정 없이 스캐닝만으로만 터널의 변형을 측정할 수 있다. 실제 터널 현장에서는 터널 천단과 측벽부에 표적을 부착한 후에 광파기를 통해 위치를 측량하여 내공변위를 측정하는데, 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 스캐닝하게 되면 광파기로 표적을 측량하는 과정이 필요치 않기 때문에 스캐닝하는 시간으로 인하여 공기지연은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

철도 터널 현장에서 스캐닝을 한번 수행하여 데이터를 획득하고 23일 후에 스캐닝을 수행하여 터널의 천단 및 측벽의 변위를 비교하여 그림 15에 나타냈다. 첫 번째 숫자는 설계단면과 굴착면과의 미굴·여굴량을 나타내며, 두 번째 숫자는 설계단면에 수직방향으로의 이전 스캐닝데이터와 현재 스캐닝 데이터의 차이인 내공변위를 의미한다. 비교 결과 약 23일동안 천단에서 16 mm, 우측벽 25 mm, 좌측벽 2 mm가 발생한 것을 확인할 수 있었다. 결과에서 볼 수 있듯이 우측벽에서 25 mm의 변위가 나타났지만 우측벽보다 약간 상부에서는 66 mm의 변위가 나타났다. 일반적으로 허용되는 변위기준치보다 좀 더 큰 것으로 판단되며, 터널 안정성에 영향을 끼칠 것으로 생각된다. 즉 기존의 측량방식은 천단변위와 내공변위만 파악할 수 있으나, 3차원 레이저 스캐너를 이용하면 전체적인 단면에서의 변위를 파악할 수 있으므로 터널의 안정성을 평가하는데 좀 더 도움이 될 것으로 판단된다. 다만 본 연구에서 사용된 스캐너의 정밀도가 6 mm이고 기준점 보정에 대한 과정에서 발생하는 오차로 인하여 내공변위의 정밀한 측정에는 어려움이 있음으로 이에 대한 고려가 수반되어야 한다.

라이닝 타설중인 터널 현장에 3차원 레이저 스캐너를 이용하여 라이닝 표면에 대한 스캐닝을 수행하였다. 실제 현장에서는 터널 내부는 어둡기 때문에 육안으로 라이닝 표면에서 균열, 백태, 누수 등을 찾기 어려우나, 스캐닝 데이터를 이용하여 보다 쉽게 라이닝 단면에서 백태, 누수를 파악할 수 있었다. 터널 단면에 물이 있는 경우 레이저 반사강도가 약하기 때문에 속성정보로 변환시 어두운색으로 변환되서 표시되기 때문에 어두운 부분은 누수로 파악할 수 있으며, 백태의 경우 콘

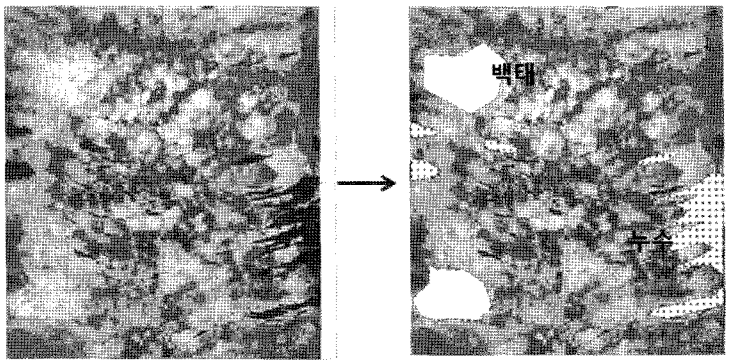
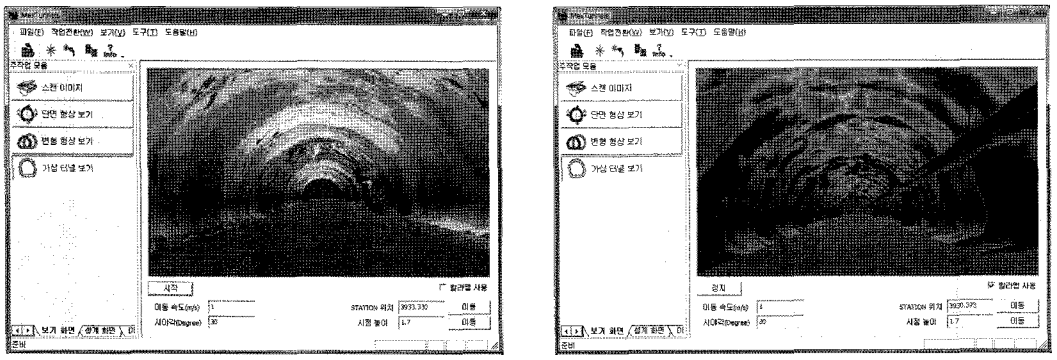


그림 16. 라이닝 단면을 통한 백태, 누수 검출



(a) 흑백 이미지 (b) 컬러 이미지

그림 17. 개발된 소프트웨어(Mextunnels)에서 구현된 가상현실 화면

크리트가 흰색으로 변질되어 있기 때문에 흰색의 특성상 반사강도가 강하고 속성정보로 변환시 밝은색으로 표시되기 때문에 백태로 파악할 수 있다(그림 16).

또한 스캐닝 데이터 이외에 카메라 등의 영상장비를 추가적으로 이용하여 획득된 2D 이미지와 스캐닝 데이터를 합치는 처리과정을 거치면 균열, 백태, 누수의 좀 더 정확한 상태를 파악할 수 있는데, 현장 여건상 조명시설로 인하여 추가적인 영상장비를 활용하기 어려웠다. 다만 현재 개발된 소프트웨어는 사용자가 수동으로 균열, 백태, 누수를 찾아야 하기 때문에 전문가가 아닌 경우에는 이를 찾기가 다소 어려운 단점이 존재하기 때문에 추후에 스캐닝데이터로부터 자동으로 균열, 백태, 누수를 찾아주는 기능을 개발할 예정이다.

현장에서 얻은 터널 종방향 길이별 스캐닝 파일은 개별적으로 저장 되어, 일일이 단면별로 터널의 상태를 관찰하는 것은 시간이 많이 소요되는 단점이 있었다. 따라서 실제 터널 종방향으로 걸어가면서 터널을 관찰하는 형태로 표현된 가상현실 기능을 이용하여, 개별적으로 저장된 모든 스캐닝 파일을 열어보지 않고 필요한 곳(균열, 백태, 누수가 관찰된 곳)만 스캐닝 파일을 열어볼 수 있었다. 이 기능을 이용하여 터널의 전체적인 상태를 파악하는데 80 m 구간을 살펴보는데 있어서 약 2분 정도의 시간이 소요되었다(그림 17).

8. 결 론

본 연구에서는 3D 레이저 스캐너를 이용하여 얻어진 고용량 데이터를 빠르게 처리할 수 있도록 터널 현장에 적합한 데이터베이스 프로세스를 구축하고, 이를 터널 현장에 적용하여 시공관리에 활용할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 3D 레이저 스캐너로부터 얻어지는 스캐닝 데이터 파일을 분석하고 종방향으로 길이가 긴 터널 특성을 고려하였다. 따라서 종방향 길이에 따라서 데이터를 관리하도록 터널 현장에 적합한 데이터베이스를 구성하였다. 또한 다수의 스캐닝 파일을 중간 과정을 거쳐서 적은 메모리로 동시에 신속하게 처리할 수 있는 데이터베이스를 구축하였다.
2. 설계정보와 스캐닝 데이터로부터 터널 특성에 적합한 데이터베이스를 구축하고 이를 비교함으로써 터널의 단면 및 변형형상을 볼 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.
3. 터널 현장에 스캐닝을 수행하고 본 연구에서 개발된 소프트웨어를 적용하여 숏크리트면에 대한 스캐닝을 통해 미굴·여굴을 판단하고 실제 소요될 라이닝 물량을 계산할 수 있었으며, 시간에 따른 터널 전체단면에 대한 내공변위를 구할 수 있었다. 또한 스캐닝 데이터의 외관 이미지를 이용하여 라이닝 표면의 백태·누수를 검출하였다. 이는 터널의 시공관리 및 유지관리에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업의 "첨단센서 기반의 대형 건설현장 실시간 시공관리 기술 개발" 연구비지원(09기술혁신E05)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 곽영주, 장용구, 강인준(2005), "사면재해 평가의 3차원 스캐닝 기법 적용", 한국지형공간정보학회 논문집, 제13권, 제2호, pp. 45-50.
2. 김인섭, 임수봉(2007), "터널굴착시 3차원레이저스캐너에 의한 내공단면 측량에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제27권, 제4D호, pp. 541-546.
3. 노태호, 김진수, 이영도(2008), "지상 레이저 스캐닝 자료를 이용한 터널단면관리시스템 개발", 한국지리정보학회지, 제11권, 제1호, pp. 90-104.
4. 사공명, 문철이, 이준석, 황선근, 김병홍(2006), "3D 레이저 스캐너 기반의 터널스캐너 개발", 한국터널공학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 377-388.
5. 사공명, 문철이, 윤정숙, 이준석(2007), "유도주행 장치에 탑재된 레이저 기반의 터널 스캐닝 시스템", 한국터널공학회 정기학술발표대회 논문집, 서울, pp. 167-172.
6. 이강현, 허인욱, 한병원, 이인모(2010), "3차원 레이저 스캐너의 고용량 데이터 처리 및 터널현장 적용 연구", 한국방재학회 정기학술발표대회 논문집, 서울, pp. 568-571.

7. 이승호, 황영철, 김세현, 심석래, 정태영(2004), "3D-Laser scanner를 이용한 암반 절리의 정밀 측정에 관한 연구", 대한화약발파공학회 논문집, 제22권, 제3호, pp. 103-111.

8. 이종출, 문두열, 김남식, 서동주(2006), "3차원 레이저 스캐너를 이용한 터널 여굴량 산정", 대한토목학회 정기학술발표대회 논문집, pp. 4608-4611.

9. 이종출, 차성렬, 서용철, 김진수(2007), "지상 레이저 스캐닝 기법을 이용한 터널 여굴량 산정", 대한토목학회 정기학술발표대회 논문집, pp. 4443-4446.

10. 이태형, 오영석, 신용석, 김성태(2008), "3D 레이저 스캐너를 활용한 터널진단 사례연구", 한국터널공학회 정기학술발표대회 논문집, 서울, pp. 297-303.

11. 임은상, 김범주, 오석훈, 임정열, 김영경(2006), "3차원 스캐닝을 활용한 사면의 안정성 평가 및 대책공법 수립", 한국지반공학회 춘계학술발표대회 논문집, 서울, pp. 711-719.

12. 한수희, 손홍규, 김종석, 우선규(2008), "3차원 레이저 스캐너를 이용한 공사현장의 시공검측", 한국GIS학회 공동춘계학술대회 논문집, 서울, pp. 525-528.

13. Gordon, S.J., Lichti, D., Stewart, M. (2001), "Application of a high-resolution, ground-based laser scanner for deformation measurements", 10th FIG International Symposium on Defromation Measurements, California, USA, pp. 23-32.

14. Lindenbergh, R., Pfeifer, N., Rabbani, T. (2005), "Accuracy analysis of the Leica HDS-3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring", ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop "Laser Scanning 2005", The Netherlands, pp. 24-30.

15. Yoon, J.S., Sagong, M., Lee, J.S., Lee, K.S. (2009), "Feature extraction of a concrete tunnel liner from 3D laser scanning data", NDT&E International, Vol. 42, pp. 97-105.