

레이저 스캐닝 데이터를 이용한 터널 시설물 및 손상부위 검출 알고리즘

윤정숙¹, 사공명^{2*}, 이준석³, 이규성⁴

A detection algorithm for the installations and damages on a tunnel liner using the laser scanning data

Jong-suk Yoon · Myung Sagong · Jun-chuk Lee · Kyu-sung Lee

Abstract Tunnel management is a time-consuming and expensive task. In particular, visual analysis of tunnel inspection often requires extended time and cost and shows problems on data gathering, storage and analysis. This study proposes a new approach to extract information for tunnel management by using a laser scanning technology. A prototype tunnel laser scanner developed was used to obtain point clouds of a railway tunnel surface. Initial processing of laser scanning data was to separate those laser pulses returned from the installations attached to tunnel liner using radiometric and geometric characteristics of laser returns. Once the laser returns from the installations were separated and removed, physically damaged parts on tunnel lining are detected. Based on the plane formed by laser scanner data, damaged parts are detected by analysis of proximity. The algorithms presented in this study successfully detect the physically damaged parts which can be verified by the digital photography of the corresponding location on the tunnel surface.

Keywords : Tunnel inspection, laser scanning, intensity, geometric characteristics, plane fitting

요 지 시설물의 안전성을 위한 유지 관리는 시간과 인력에 따른 경비가 상당히 소모되는 작업이다. 특히 인력에 의한 육안 검사에 의해 이루어지는 터널과 같은 시설물 관리에는 많은 시간과 경비가 요구되고 있으며, 데이터의 보관이나 저장 등에 어려움이 많다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 최근 신기술로 떠오르는 레이저 스캐닝 기술에 의하여 획득한 데이터를 이용하여 터널의 유지 관리에 필요한 정보를 추출하는 접근방법을 제안하고자 한다. 터널의 레이저 스캐닝 데이터는 시작점으로 제작된 레이저 스캐너를 이용하여 촬영하였으며, 고밀도 점 데이터의 형태로 저장된 자료를 이용하였다. 터널의 스캐닝 데이터의 기하학, 광학적 특성을 이용하여 터널 내부에 장착된 시설물들을 제거 한 후, 터널의 라이닝 상에 나타나는 물리적인 손상부위나 균열을 탐지하는 방법을 제시한다. 물리적인 손상부위는 터널의 라이닝이 성립하는 면을 기준으로 근접성을 바탕으로 탐지된다. 이 연구에서는 제안된 알고리즘을 적용하여 현장의 디지털 사진에서 확인할 수 있는 물리적인 손상 부위를 탐지 할 수 있었다.

주요어 : 터널 검출, 레이저 스캐닝, 반사 강도, 기하학적 특성, 평면맞추기

1. 서 론

시간이 경과함에 따라 주변의 시설물에 나타나는 외관의 손상과 같은 물리적 변화를 미리 감지하고 상태를 보존 및 보완하는데 많은 인력과 경비가 소모되고 있다. 특히, 터널의 경우 현재까지 사람이 직접적으로 접근하여 육안을 통한 외관조사에 의지하고 있는 실정이다. 이러한 비효율적인 관리 방법을 보완하기 위하여 최근 빠

르게 발전하는 기술을 도입 및 활용하여 시설물을 보다 효율적이고 객관적인 방법으로 유지 관리하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 현재 과학기술의 발달로 시설물 계측 방법이 다양화되고 있다, 시설물 유지 관리에 있어서 활용되고 있는 과학기술 방법으로는 고가의 고성능 카메라가 필요한 광학적 영상을 이용한 방법이 있으며, 영상처리 기술 이외의 방법으로 최근에 레이저 스캐닝 방법이 도입되고 있다. 레이저 스캐너는 촬영 시 빛을 필요로 하지 않는 능동 시스템(active system)의 한 종류로서 고밀도의 공간 정보를 획득할 수 있는 기술이며 태양의 빛이 닿지 않는 터널과 같은 공간에서 효과적으로 사용 될 수 있다. 또한 레이저 스캐닝 방법은 거리

¹비회원, 인하대학교 지리정보공학연구소 박사후연구원

²정회원, 한국철도기술연구원 계도토목연구본부 선임연구원

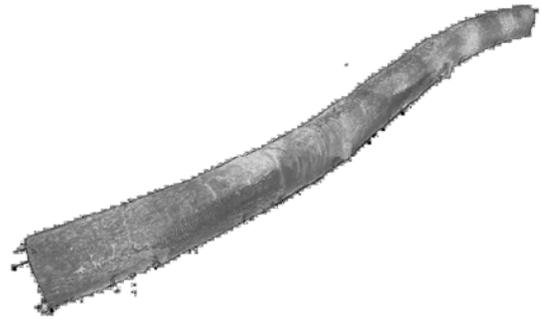
³정회원, 한국철도기술연구원 계도토목연구본부 본부장

⁴비회원, 인하대학교 환경토목공학부 교수

*교신저자 : 사공명 (rockcore@krrri.re.kr)



(a)



(b)

그림 1. Z+F 사의 Imager 5300 스캐너를 이용한 10m 터널 구간의 레이저 데이터(a)와 전체 터널의 스캐닝 데이터 (b) (Schulz와 Ingensand, 2004)

측정의 정확도가 높다는 장점이 있으므로 계측용 목적으로 사용된다. 이러한 장점들과 더불어 레이저 시스템은 고정밀도의 3차원 위치 정보 이외에 반사 강도(intensity)의 광학적 정보를 함께 공급함으로써 그 이용 가치가 크다.

레이저(Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)의 발명 직후 레이저의 특성을 이용하여 정확한 거리를 측정할 수 있는 기기들이 제작되었으며, 이러한 레이저 기기들은 laser radar, LIDAR (Light Detection And Ranging), LADAR(LASer Detection And Ranging) 등의 용어들로 명명되고 있다(Wehr와 Lohr, 1999). 최근 레이저 스캐닝 기술은 계측 분야에서 급부상하는 기술로써 그 영역이 점점 확장되고 있으며, 여러 분야에서 그 응용에 대한 연구가 진행되고 있다.

Schulz와 Ingensand (2004)는 위상차를 이용한 100m 이내의 사물을 스캐닝 할 수 있는 독일의 Zoller+Froehlich사의 Imager 5300 스캐너를 이용하여 터널의 변형 분석이나 profile 또는 철도의 궤도에 대한 분석을 목적으로 10m 단위 (그림 1(a))로 100m의 터널(그림 1 (b))을 촬영한 예를 보여준다. 이처럼 시설물의 유지관리와 관련 된 레이저 스캐너에 대한 활용 사례는 레이저 스캐너 데이터를 획득하는 예를 소개 할 뿐, 레이저 스캐너 데이터에서 원하는 정보를 제공하는 방법 등에 대한 연구는 아직 미흡한 단계라고 할 수 있다. Jeneras 등 (2004)은 산악지대에 놓인 철도 궤도에서 일어나는 산사태에 대하여 산사태 발생 지점 예측 및 산사태 발생 후 재난 지역의 파악을 위하여 지상 (Terrestrial) 레이저

스캐너와 항공(Airborne) 레이저 스캐너 데이터를 함께 이용하는 방법에 대한 연구를 소개하였으며, 레이저 스캐너 데이터가 정밀한 지형 데이터를 제공함으로써 여러 가지 측정 결과를 제공 할 수 있다는 장점이 있음을 설명하였다.

레이저 스캐너를 항공기에 장착하여 지표면을 촬영하는 분야에서는 지형정보를 획득하는 목적으로 레이저 스캐닝 자료를 많이 활용하고 있다. 특히, 산림 지역과 같은 식생이 분포되어 있는 지역에서는 레이저 광선이 식생을 투과한다는 특성을 이용하여 측량을 통한 지면에 대한 정보를 얻기가 어려운 산림지역에서의 지형 모델을 제작하는 방법 등이 연구되어 왔다. 지표면을 촬영한 고밀도의 점 데이터(point clouds)에서 지면점만을 분리하는 연구와 같은 경우, 점 데이터로 기록된 레이저 스캐너 데이터의 기하학적 특성을 이용한 필터링(filtering) 방법이나 또는 점 데이터를 보간 처리하여 격자형으로 공간을 표현하여 처리하는 방법 등 많은 연구가 진행되고 있다(Sithole 과 Vosselman, 2003). 이 연구에서 이용한 터널의 레이저 스캐닝 데이터를 처리하는데 있어서도 점 데이터를 이용한다는 점에 있어서 지면점 분리에서 연구되어 왔던 여러 가지 방법들을 활용할 수 있다.

이 연구는 레이저 스캐너 데이터를 효율적으로 처리하여 정확한 정보를 추출하는 접근 방법에 관한 연구로서, 레이저 스캐너로 촬영한 터널의 데이터를 바탕으로 객관적이며 효율적으로 터널을 관리하기 위한 방법을 제공하고자 한다. 레이저 스캐너에 의하여 기록된 수많은

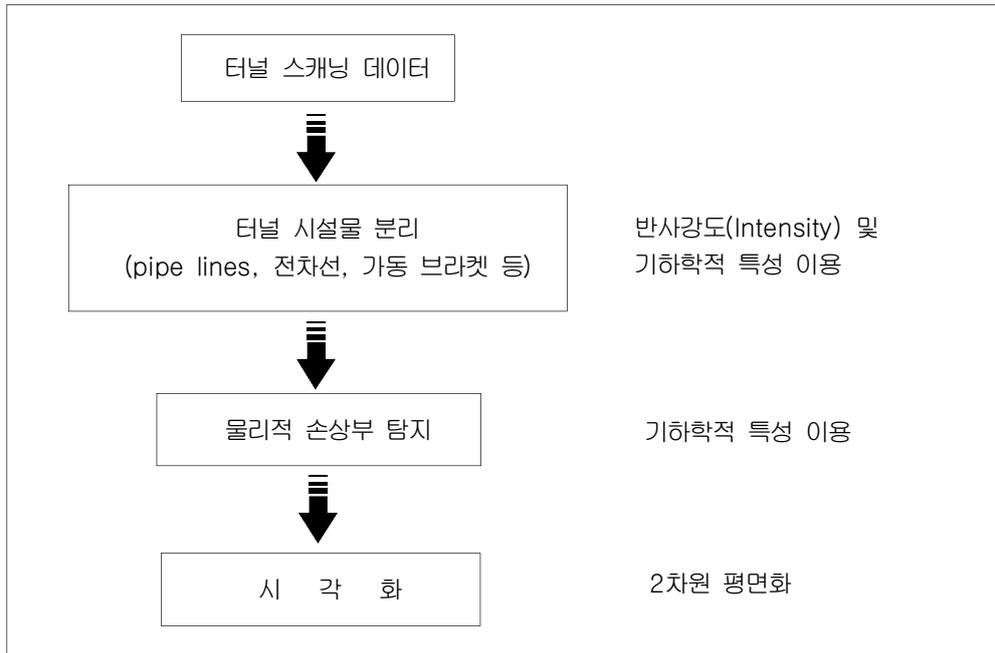


그림 2. 터널 라이닝 손상대 자동 검측 알고리즘의 연구 절차

은 레이저 데이터를 분석하여 터널의 손상 및 균열 된 위치 및 정도를 파악하며 이를 시각화하여 레이저 데이터를 이용한 터널의 효율적인 유지관리에 있어서 활용하고자 하는데 목적을 두고 있다.

2. 연구 방법

이 연구에서는 터널의 라이닝 손상대의 자동 검측을 위해서 터널 내부를 profile 방식으로 촬영한 레이저 스캐닝 데이터의 기하학적 및 광학적 특성을 이용하여 손상 부위를 찾고자 한다. 그림 2는 이와 같은 연구 목적에 따라서 이 연구에서 제안하는 연구 절차를 보여준다. 사용하는 터널 레이저 스캐닝 데이터는 ASCII 파일로 저장된 정밀도가 높은 점 데이터들을 말한다. 터널의 라이닝 상에서 나타나는 물리적인 손상 및 균열을 탐지하기 위하여 첫째, 스캐닝 된 터널 데이터에서 터널 내부에 장착되어 있는 시설물들을 스캐닝 데이터의 기하학적, 광학적 특성을 이용하여 분리한다. 시설물이 분리 및 제거 된 후 터널의 라이닝 부분이라고 판단되는 데이터들만을 이용하여 물리적인 손상 부위를 탐지하는 단계를

거치게 된다. 끝으로 3차원의 정보를 가진 터널의 라이닝 데이터를 2차원으로 표현함으로써 도면의 출력이나 터널의 유지관리에 필요한 데이터를 출력하는데 편리하도록 하는 과정을 거친다.

2.1 터널 스캐닝 자료 특성

터널 레이저 스캐너 데이터는 (사공 등, 2006)에서 설명하는 시제품인 스캐너를 이용하여 촬영하였다. 제작된 레이저 스캐너는 Time-of-Flight 방식의 거리 측정계인 Laser Range Finder와 회전 거울이 부착되어 있는 Liner scanner와의 조합으로 터널 내부를 거울이 회전하면서 profile 방식으로 데이터를 기록한다. Time-of-Flight 방식은 레이저 거리 측정 방법 중 하나로 빛의 속도와 시간과의 관계를 통하여 거리를 측정하는 방식이며, 레이저 광선이 반사 되어 돌아오는 지점의 3차원 좌표와 그 지점의 반사 강도를 기록한다. 제작된 레이저 스캐너를 이용하여 경기도 양평의 구둔 터널 현장을 촬영하였다.

Time-of-Flight 방식의 레이저 스캐너 데이터는 점(point) 데이터로 구성이 되며, 상당한 수의 데이터가 저



그림 3. 경기도 양평 구둔 터널

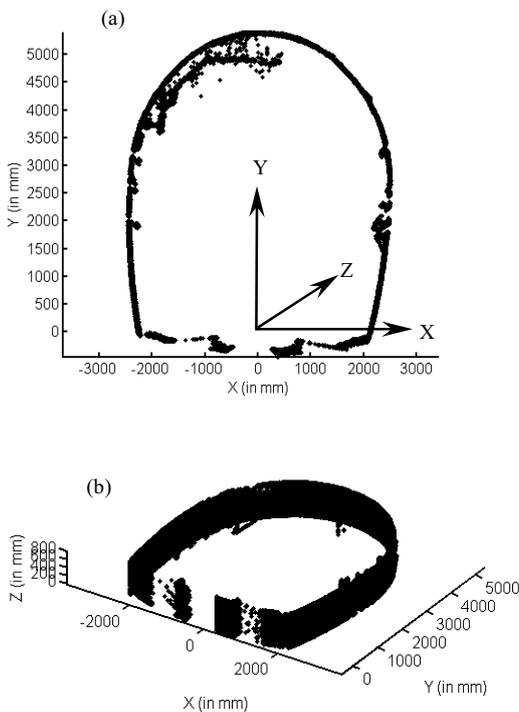


그림 4. 기록된 터널 레이저 스캐너 데이터: 2차원(a) 및 3차원(b)의 표현 (X축: 터널의 폭, Y축: 터널의 높이 방향, Z축: 터널의 진행방향)

장되기에 point clouds 라는 용어으로써 표현이 되기도 한다. 촬영된 터널의 스캐너 데이터는 전처리 과정을 거쳐 ASCII 파일 형태로 X, Y, Z와 반사 강도의 4개의 데이터로 구성된다. 그림 4는 스캐닝하여 획득한 터널의 데이터를 2차원 및 3차원으로 보여준다. 각 점 데이터의

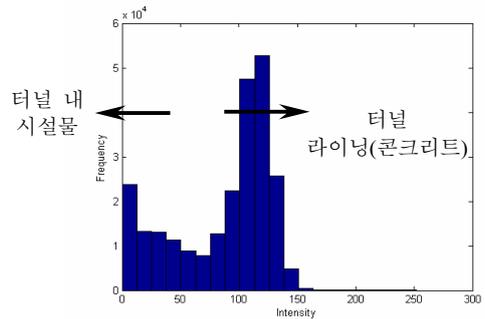


그림 5. 반사강도 분포도 (Histogram)

표 1. 양평 구둔 터널의 레이저 스캐너 데이터의 공간 좌표 및 반사 강도의 범위

값 범위	최소	최대	범위(range)
X (in mm)	-2457	2509	4966
Y (in mm)	-447	5405	5852
Z (in mm)	0	800	800
반사강도(Intensity)	0	252	252

X축은 터널의 폭 방향(수평 방향)이 되며, Y축은 터널의 높이방향 그리고 Z축은 스캐너의 이동 방향으로써, 터널의 축 방향에 해당된다. 레이저 스캐닝 데이터의 결과는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 또한 표 1에서는 레이저 스캐너 데이터의 각 좌표의 범위를 보여준다. 표 1에서 볼 수 있듯이 스캐닝 된 구둔 터널의 폭은 약 5m 정도가 되며, 터널의 높이는 약 6m 정도이다. Z축은 스캐너가 이동하는 방향으로, 한 위치에 놓인 스캐너가 이동하면서 80cm 구간의 터널이 기록되며, 전체 점 데이터의 수가 245,006개로 ASCII 파일의 데이터 용량은 약 8.48 MB 정도이다.

Time-of-Flight 방식의 레이저 스캐너 데이터는 공간적 위치를 나타내는 좌표를 기록하는 동시에 광학적 정보인 반사 강도(intensity)가 기록된다. 반사 강도는 레이저 신호가 반사되는 지점의 물체 표면의 반사 특성(reflectance)의 영향을 가장 많이 받는다. 터널의 레이저 데이터에 대한 반사강도의 분포 특성(그림 5)은 이항분포(Binomial Distribution)로, 반사강도 70~80 사이의 분기점을 기준으로 100~130에 이르는 높은 반사강도를 나타내는 부분과 분기점을 기준으로 이보다 낮은 쪽에 많은 데이터들이 분포되어 있음을 알 수 있다. 전체 반사 강도의 평균은 86.636이다. 이러한 두 부분으로

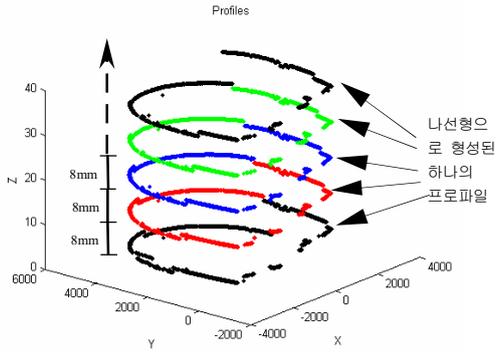


그림 6. 레이저 스캐닝 데이터의 profile의 구성

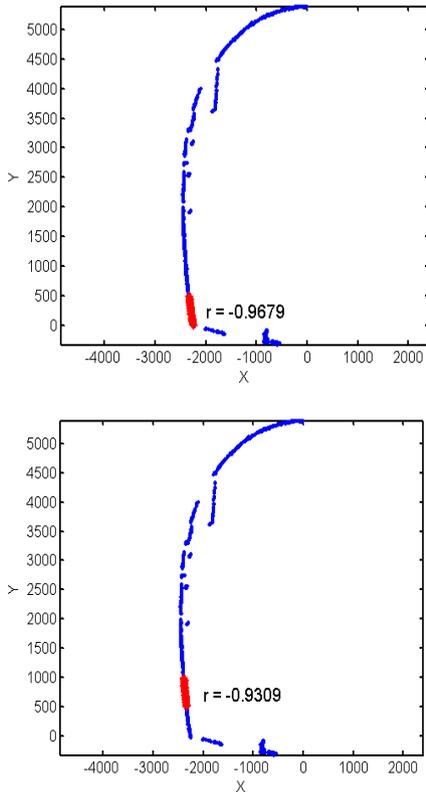


그림 7. X축과 Y축 좌표의 높은 상관관계를 보이는 터널 라이닝 구간

히스토그램이 분리되는 현상은 콘크리트로 구성된 터널 라이닝 부분과 터널 내부에 장착된 시설물들의 영향으로 나타난다. 즉, 터널 라이닝 부분은 높은 반사강도를

보이 가동브라켓 및 벽면 시설물들의 재질은 검정색 플라스틱이나 철근과 같은 재질로 낮은 반사강도를 나타낸다.

스캐닝 한 터널의 데이터는 스캐너의 이동 방향에 따라 profile 방식으로 스캐너 시스템 내부의 회전 거울이 회전하면서 80cm가 촬영이 된다. 즉, 80cm의 터널의 길이는 여러 개의 터널 모양의 profile 들로 구성되는데, 이러한 터널 데이터의 구성은 그림 6에서 살펴 볼 수 있다. 그림 6은 터널을 촬영한 스캐너가 하나의 profile 을 형성하는데 8 mm 정도 진행하는 것을 보여주며 또한 터널 스캐닝이 나선형으로 이루어지고 있음을 보여준다.

2.2 시설물 분리

터널 스캐닝 데이터의 특성을 바탕으로 라이닝 상의 물리적 손상 부위를 탐지하기 위하여 터널 내부에 장착된 터널의 시설물들을 분리 및 제거 한다. 이러한 과정은 터널 전체의 데이터를 모두 처리하는 것이 아니라 구간별 처리함으로써 데이터 처리의 효율성을 도모한다. 그러므로 시설물 탐지를 위하여 나누는 구간의 길이는 터널의 수직(Y 축) 방향으로 50cm로 설정하며, 이 구간에서 존재하는 X축과 Y축 좌표 사이의 상관관계를 이용하여 시설물이 존재하는 구간을 판단하도록 한다.

일반적으로 상관계수는 자료의 선형 관계에 따라 -1에서 1까지로 계산이 되며, 시설물이 존재하지 않는 터널 라이닝만 존재하는 구간 일 경우 X축과 Y축의 좌표의 상관계수가 상당히 높게 나오는 반면, 시설물이 포함된 부위는 낮은 상관 계수를 보이게 된다(그림 7, 그림 8). 그림 7은 시설물이 존재하지 않는 터널의 라이닝 구간으로 X축 좌표가 감소하면서 Y축 좌표는 증가하므로 상관계수는 -0.9309~ -0.9975로써 높은 상관관계를 보인다. 그림 8은 시설물이 존재하는 터널의 구간에서 계산되는 낮은 상관계수를 보여준다. 그러므로 구간 별 상관계수를 계산 한 후 상관 계수가 낮은 구간은 시설물이 존재 하는 구간으로 구분되며, 그 외의 구간은 시설물이 없는 곳으로 판단되어, 시설물을 탐지 및 분리하는 과정에서 제외된다.

상관계수를 이용하여 시설물이 있는 구간으로 분리된 후, 시설물들을 정확하게 분리 해 내기 위해서는 터널 라이닝과 시설물들의 데이터를 선별 해 낼 수 있는 특성을 이용하는 것이 분리 정확도를 높일 수 있다. 그

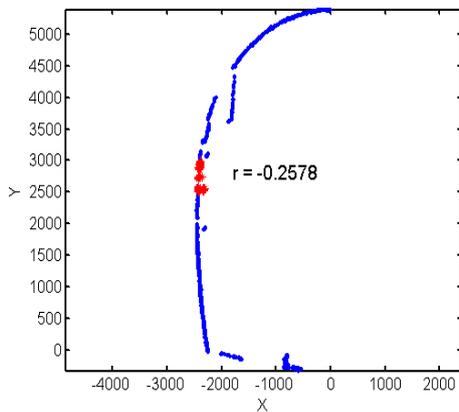
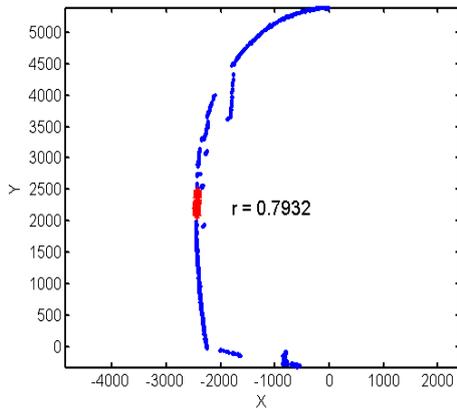
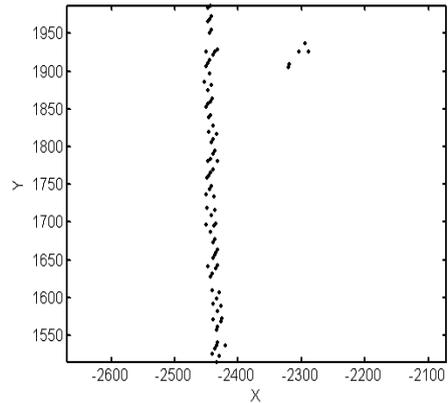
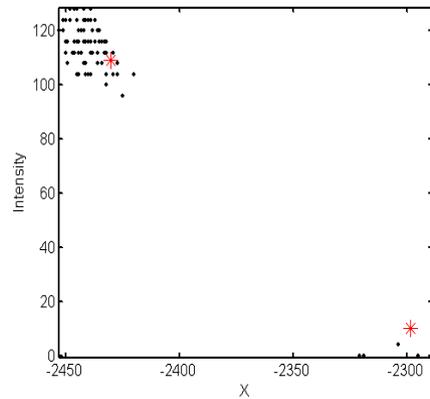


그림 8. X축과 Y축 좌표의 낮은 상관관계를 보이는 시설물이 존재하는 구간



(a)



(b)

그림 9. 시설물이 포함된 구간 (a) 및 X축 좌표와 반사강도 그래프 (b)

그림 9는 시설물이 존재하는 구간에서 반사강도와 시설물의 위치에 따른 특징을 보여준다. 그림 9(a)는 X와 Y의 상관 관계에 의하여 시설물이 존재하는 부위로 선정된 곳이며, 이 구간에 포함되는 데이터의 반사 강도와 X축 좌표의 그래프(그림 9(b))를 살펴보면 거리 상 뚜렷하게 구분될 수 있음을 볼 수 있다. 이것은 시설물과 터널 라이닝이 가지는 뚜렷한 반사강도의 차이와 시설물이 터널 내부에 장착되는 X축 좌표에 대한 기하학적 특성이 때문이다. 그러므로 시설물과 터널 라이닝 데이터를 구분 할 수 있는 반사강도의 광학적 특성과 시설물의 위치에 따른 기하학적 특성을 이용하였다.

시설물을 분리하는데 이용하는 방법은 반사강도와 X축 좌표를 이용하여 각 데이터와 데이터가 속한 구간의

시설물과 터널 라이닝을 대표하는 데이터와의 거리를 계산하는 것이다. 계산된 거리를 이용하여 식 (1) 과 같이 각 데이터들은 시설물과 터널 라이닝 그룹으로 각각 분류된다. 그림 10은 한 구간의 레이저 스캐닝 데이터들과 이 구간에서 이용하는 시설물과 터널 라이닝의 반사 강도와 X축 좌표의 대표값을 보여준다. 즉, 하나의 데이터는 한 구간에서 터널 라이닝과 시설물의 대표값까지의 두 개의 거리로 계산되며, 이 중 가까운 거리의 그룹으로 i 번째 데이터의 그룹이 결정 된다. 그림 10에서 계산된 두 개의 거리를 비교 해보면 $d1 > d2$ 이므로, 점 P는 터널 라이닝 그룹 보다는 시설물 그룹에 더 가까운 거리 및 특성을 가지므로 점 P는 시설물 쪽으로 결정이 된다.

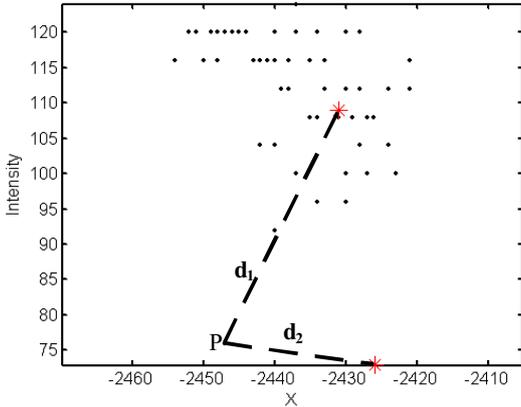


그림 10. 시설물 분리를 위하여 계산되는 거리

2.3 손상부 검출

시설물을 분리 한 후 터널 라이닝 상의 물리적 손상부 탐지를 위한 방법은 라이닝을 하나의 면(plane)으로 고려하여 면 표면에서 발생된 기하학적인 변화를 탐지한다. 그러므로 시설물 탐지 및 분리의 과정은 하나의 profile 내에서 구간 별로 처리가 되었다면, 물리적 손상부위의 탐지는 모든 profile이 이루는 구간을 면 단위로 처리하게 된다. 처리 구간은 시설물 탐지와 같은 터널의 수직 방향 (y축 방향)으로 50cm로 결정하였으므로, 손상부 검출을 위한 하나의 구간 크기는 80 x 50cm이다. 전체 터널의 모양은 완만한 곡선형태를 보이지만, 각 50cm에 해당하는 구간으로 나누었을 때, 각 구간은 하나의 평면으로 간주 될 수 있다. 그러므로 이러한 구간은 하나의 평면의 방정식으로 표현할 수 있다. 면은 각 데이터의 X, Y, Z축 좌표를 이용하여 식 (2)처럼 하나의 평면 (plane)을 성립하는 계수를 결정하게 된다. 식 (2)는 일반적인 면의 방정식이다.

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (2)$$

식 (2)에 의하여 성립된 평면을 기준으로 각 데이터들과의 거리를 계산할 수 있다. 물리적으로 손상이 된 부분 즉, 터널의 라이닝의 콘크리트가 충격에 의하여 떨어져 나간 경우나, 균열이 발생한 경우, 레이저 데이터에서 터널 라이닝의 면까지의 거리는 커지게 된다. 거리 계산은 방향성을 유지하기 위하여 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$d_i = \frac{ax_i + by_i + cz_i + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (3)$$

식 (3)에 의하여 계산되는 거리는 식 (4)에서 설명되듯이 임계치에 의하여 터널의 라이닝 부분과 시설물 또는 손상부로 분류된다. 식 (3)에서 계산된 거리가 임계치보다 작은 경우 터널 라이닝으로 데이터는 터널 라이닝으로 분류되며, 거리가 임계치보다 큰 경우는 시설물이나 손상부에 해당하는 데이터로 분류된다.

$$P_i = \begin{cases} \text{터널라이닝} & \text{if } d_i < \text{임계치} \\ \text{시설물 또는 손상부} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

3. 연구 결과

3.1 시설물 분리 결과

시설물을 분리하는 과정은 터널 라이닝에서 손상부를 탐지하고자 할 때, 평면의 방정식을 유도하는 접근 방법을 도입하기 위한 이상점(outlier)를 제거하는 과정이라고 할 수 있다. 획득 된 데이터를 이용하여 선이나 평면의 방정식으로 유도하는 경우, 이상점들을 최대한 제거해 주는 것이 좋은 결과를 기대할 수 있다. 그러므로 손상부 탐지를 위한 평면의 방정식 유도를 위하여 터널 라이닝으로부터 시설물 데이터의 분리가 선행되어야 한다. 시설물을 분리하기 위하여 터널 라이닝과 시설물의 데이터를 명확히 구분할 수 있는 반사 강도와 터널의 수평 방향 (X 축) 위치 정보를 이용하여 계산한 거리를 이용하였다. 그림 11은 하나의 프로파일 내 여러 개의 구간에서 시설물이 분리된 결과를 보여주며, 그림 12는 전체 80cm 터널의 레이저 데이터에서 분리된 결과를 보여준다. 그림 12에서 터널 라이닝만 반사강도로 표현하였으며 분리된 시설물은 빨간색으로 표시하였다.

3.2 손상부 탐지 결과

물리적 손상 부위의 검출은 레이저 스캐닝 한 터널의 데이터에서 대부분의 시설물들이 제거 된 후에 진행된다. 시설물이 대부분 제거 된 후 80cm 길이에 해당하는 전체 데이터를 수직 방향으로 50cm 구간으로 구분하여 처리한다. 물리적 손상부를 탐지하는데 필요한 임계치는 터널 라이닝이 형성하는 평면과 데이터의 연직 거리를 계산하여 결정이 되는데, 하나의 구간에 계산되어지

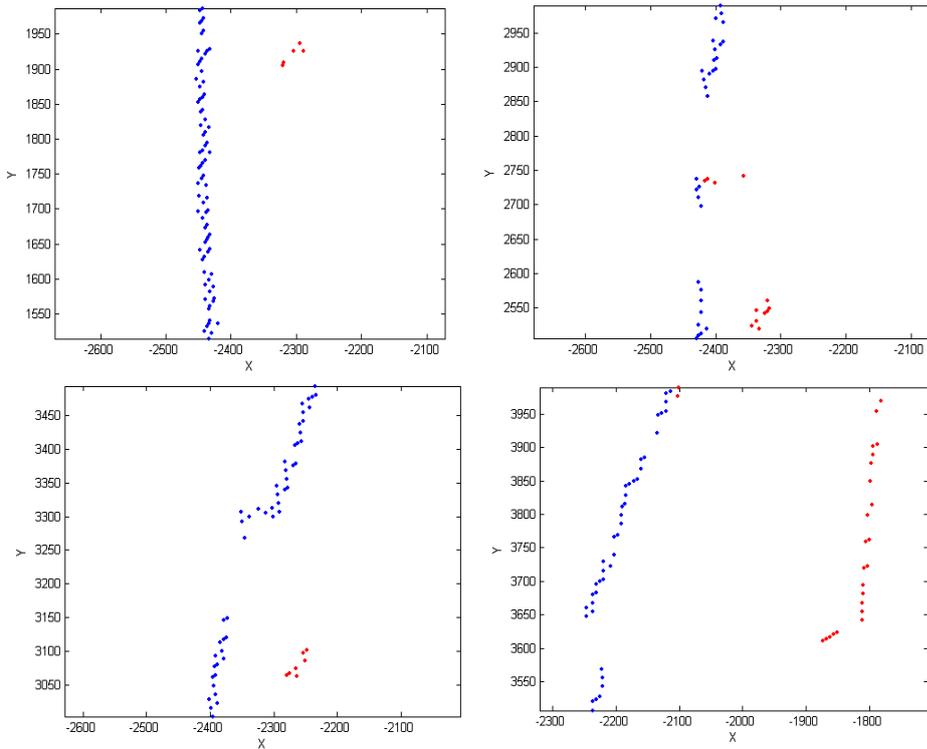


그림 11. 하나의 profile 내의 각 구간 별 시설물 분리 결과



그림 12. 전체 터널 스캐너 데이터에서 시설물의 분리 결과

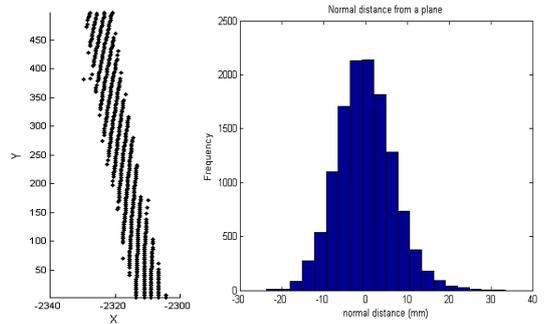


그림 13. 구간별 레이저 데이터의 분포와 기준 평면과 자료의 거리 분포

는 거리의 분포를 바탕으로 설정되었다. 거리의 분포는 평면으로부터의 연직 거리는 평균이 0으로, 평균을 기점으로 거의 대칭의 분포를 보인다(그림 13). 터널의 라이닝을 바탕으로 성립되는 평면을 기준으로 시설물은 터널 내부에, 손상부는 터널 외부에 나타나게 되므로 연직 거리의 방향성을 고려하면 시설물과 손상부의 분리를

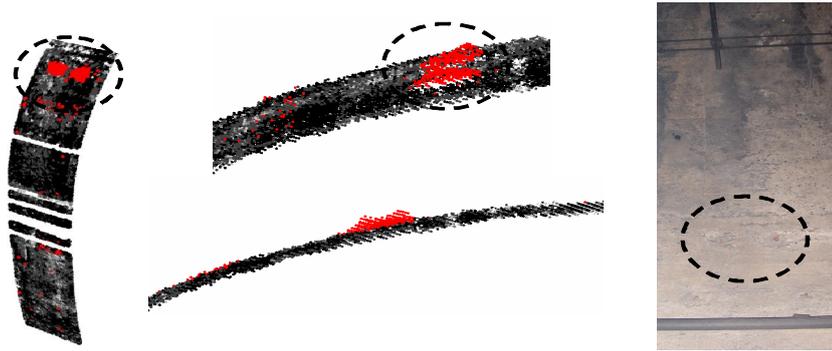


그림 14. 터널 라이닝의 반사강도와 함께 표현된 시설물 데이터 및 손상 부위 (원)

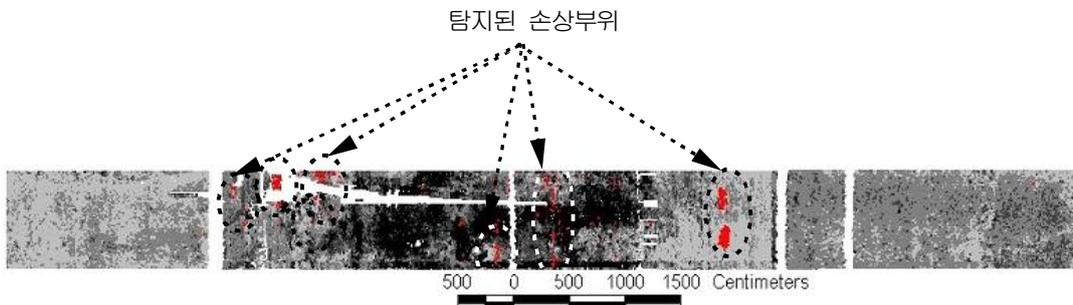


그림 15. 2차원 표현된 터널의 스캐닝 데이터 및 탐지된 손상 부위

할 수 있게 된다. 계산된 거리의 분포를 살펴보면 시설물이 존재하지 않는 구간에서 대부분의 데이터는 유도된 평면에서부터 $-30 \sim 30 \text{ mm}$ 사이에 위치하는 것을 알 수 있다. 그러므로 거리의 분포를 바탕으로 시설물과 손상부를 결정하는 임계치를 설정할 수 있다.

임계치를 여러 가지 수치로 설정하여 탐지되는 결과를 살펴 보면, 임계치가 작아질수록 손상부 및 시설물로 분류되는 데이터의 수가 많아지게 되므로 터널 라이닝에 해당하는 상당한 수의 데이터들도 시설물로 분리되는 것을 볼 수 있다. 여러 가지 임계치를 시험한 결과 시설물과 손상부의 임계치를 달리하여 시설물에 대해서는 20mm 정도 떨어진 데이터부터 시설물로 판단하였으며, 손상부에 대해서는 평면에서 30mm 정도 떨어진 데이터부터 손상부로 설정하였다.

물리적 손상 부위를 검측 하는 단계를 거치면 터널의 레이저 스캐닝 데이터는 시설물이 완전하게 분리된 터널 라이닝만의 데이터와 물리적인 손상으로 고려되는 데이터들로 분리된다. 그림 14는 시설물이 분리된 결과와 손상부가 탐지된 결과를 보여준다. 이 연구에서 사

용한 터널의 레이저 스캐닝 데이터에서 탐지된 물리적 손상 중에서 현장에서 촬영한 디지털 사진과 비교가 가능한 물리적 손상부는 터널 라이닝 상에 못을 박아 패인 부분으로, 그림 14의 디지털 사진에서 그 위치를 확인할 수 있다.

탐지된 터널의 라이닝 상의 손상부는 2차원의 표현으로 그림 15와 같이 시각화 될 수 있다. 그림 15는 터널의 스캐닝 데이터의 반사강도를 이용하여 표시한 그림이며, 2차원으로 터널 전체를 보여준 후 그 위에 탐지된 터널 라이닝 상의 손상부를 보여준다.

4. 결론 및 고찰

최근 들어 신기술로 떠오르는 레이저 스캐닝 기술은 촬영 시 조명을 필요로 하지 않는 능동 시스템이며, 정확한 기하학적 위치 정보와 함께 광학적 정보를 함께 제공함으로써 터널과 같은 시설물의 관리에 있어 이용 가치가 크다고 할 수 있다. 현재, 레이저 스캐닝의 기술은 여러 분야에서 활용하기 위하여 도입하는 단계로서

자료에서 정보를 추출하는 방법에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 그러므로 이 연구에서는 터널의 레이저 스캐닝 자료를 이용하여 터널의 유지관리에 필요한 정보를 추출하는 방법을 제시하였다. 레이저 스캐너를 사용하여 촬영된 터널의 데이터를 이용하여 데이터의 구조적 또는 광학적 특성의 분석을 바탕으로 라이닝 상의 시설물 및 손상부위를 탐지하는 접근 방법을 제시한다.

라이닝 상의 손상부위를 검출하는 방법은 터널의 라이닝 표면의 레이저 스캐닝 자료가 이루는 면을 기준으로 탐지하는 방법을 이용하였다. 이러한 기하학적인 방법을 적용하기 위하여 시설물과 같은 이상점(outlier)들을 먼저 분리 및 제거 하는 단계를 거친다. 효과적으로 시설물들을 제거하는 방법으로 레이저 스캐닝 자료의 반사강도 특성과 터널 내부에 설치된 시설물의 위치 특성을 이용하였다.

터널 스캐닝 자료에서 대부분의 시설물 자료들이 제거된 후, 세그먼트 별로 기준이 되는 면을 형성한다. 이 면을 기준으로 손상부위가 탐지되거나 남아 있는 시설물의 자료가 분리될 수 있다. 이 때 기준면으로 부터 손상 부위를 찾아내는데 필요한 임계치는 여러 임계치를 설정하여 결과를 비교 분석하였으며, 시설물에 대한 임계치로 20mm, 손상부에 대한 임계치로 30mm를 설정하였다. 탐지된 손상부에 대한 검증은 현장의 디지털 사진에서 확인 할 수 있는 곳을 제시하였다. 보다 미세한 손상부에 대한 정량적인 정확도 검증은 향후 연구에서 뒷받침 되어야 할 것이며, 임계치 설정에 대한 보다 객관적인 방법의 검토가 이루어 져야 한다. 결론적으로 이 연구는 제안된 방법에 의하여 터널 표면의 손상부를 탐지함으로써 터널의 유지관리에 있어서 레이저 스

캐닝 기술의 적용 가능성을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 자체연구사업인 “철도 시설물 검측 자동화를 위한 Robo-Rail System 기초기술 연구”의 연구비 지원에 의해 수행된 연구로서 저자는 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 사공명, 문철이, 이준석, 황선근, 김병홍, “3D 레이저 스캐너 기반의 터널스캐너 개발” 한국터널공학회 논문집 제출.
2. Janeras, M., Navarro, M., Arno, G., Ruiz, A., Kornus, W., Talaya, J., Barbera, M., and Lopez, F. (2004), “LIDAR Applications to Rock Fall Hazard Assessment in Vall de Nuria”, 4th ICA Mountain Cartography Workshop, Vall de Nuria, Catalonia, Spain, Sep. 30 -Oct. 2.
3. Schulz, T. and Ingensand, H. (2004), “Terrestrial Laser Scanning-Investigations and Applications for High Precision Scanning”, TS26 Positioning and Measurement Technologies and Practices II- Laser Scanning and Photogrammetry, FIG Working Week 2004, Athens, Greece, May 22-27.
4. Sithole, G. and Vosselman, G. (2003), “Report:ISPRS Comparison of Filters”, ISPRS Commission III WG 3.
5. Wehr, A. and Lohr, U. (1999), “Airborne laser scanning an introduction and overview”, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54 (2), pp. 68-82.



윤 정 속

인하대학교
지리정보공학연구소
박사후연구원

E-mail : yjs91@daum.net



사 공 명

한국철도기술연구원
케도토목연구본부
선입연구원

E-mail : rockcore@krri.re.kr



이 준 석

한국철도기술연구원
케도토목연구본부
본부장

E-mail : jslee@krri.re.kr



이 규 성

인하대학교
환경토목공학부 교수

E-mail : ksung@inha.ac.kr