

# 3차원 스캐너의 토공현장 적용을 위한 정밀도 및 생산성 분석

## Analysis of Accuracy and Productivity of Terrestrial Laser Scanner for Earthwork

김석, 박재우

한국건설기술연구원 건설정책연구소

Seok Kim(kimseok@kict.re.kr), Jae-Woo Park(jwpark@kict.re.kr)

### 요약

3차원 스캐너는 실제 대상을 손쉽게 디지털화한다는 점에서 제조업, 건설업, 조선업 등 여러 산업분야에 적용되고 있으며, 최근에는 토공 중장비의 자동제어 및 가이드를 위한 기초자료 제공을 위해 토공현장을 3차원 이미지화하는 작업에 사용되고 있다. 본 연구에서는 토공현장의 정밀도측과 최근에 주목받고 있는 3차원 고해상도 레이저 스캐너의 정밀도 및 생산성을 비교하였다. 그 결과, 정밀도 측면에서 중해상도와 고해상도 스캔을 통해 얻은 데이터 값이 토달스테이션을 통해 정밀 측정된 데이터의 좌표와 비교하여 99% 이상의 정밀도를 나타내었으며, 평균 2.0mm이내의 오차가 발생하는 것으로 분석되어 높은 정밀도를 보였다. 생산성 측면에서는 단순 타겟당 소요시간 비교를 통해 중해상도 스캔시 토달스테이션을 이용한 정밀측정에 비해 71%의 시간절감효과가 있는 것으로 나타났다. 본 연구를 통해 3차원 스캐너를 활용하여 토공현장을 측정하는 것이 우수한 정밀도와 높은 생산성을 발휘하는 것을 확인할 수 있다.

■ 중심어 : | 3차원 스캐너 | 토공작업 | 정밀도 | 생산성 |

### Abstract

3D scanners are applied to many industries, such as manufacturing, construction, and shipbuilding. Recently, 3D scanner is used in 3D imaging of worksite in order to control and guide earthmoving heavy equipments, which provides basic information for intelligent excavation. This study compares the accuracy and productivity between total stations and high-resolution 3D scanners. The analysis results show that 3D scanner has high accurate rate of greater than 99 percent and has low error rate of less than 2.0mm compared to total stations. In terms of productivity, 3D scanner saves 71 percent of measuring time compared to the total station. This study confirms that 3D scanner can measure the earthwork sites with high accuracy and better productivity.

■ keyword : | 3D Scanner | Earthwork | Accuracy | Productivity |

## I. 서론

### 1. 연구의 배경 및 목적

3차원 스캐너, 항공사진, 위성영상 등을 이용하여 3차

원 공간정보를 수집·분석하고 이를 지형모델링에 이용하는 연구가 꾸준히 되어오고 있다[1][2]. 특히, 3차원 스캐너는 레이저를 이용하여 실제 대상을 스캔포인트로 이루어진 3차원 표면의 형태로 구현하는 기기이며,

\* 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B079344-01)에 의해 수행되었음

접수일자 : 2015년 08월 26일

심사완료일 : 2015년 09월 17일

수정일자 : 2015년 09월 17일

교신저자 : 박재우, e-mail : jwpark@kict.re.kr

LiDAR(Light Detection And Ranging) 혹은 TLS(Terrestrial Laser Scan)로도 불린다. 각 스캔포인트는  $x, y, z$ 의 좌표값을 가지며, 이러한 위치정보값을 이용하여 mesh와 solid 등의 추가 모델링 작업이 가능하다[3][4]. 3차원 고해상도 레이저 스캐너(이하 3차원 스캐너)는 실제 대상을 손쉽게 디지털화한다는 점에서 제조업, 건설업, 조선업 등 여러 산업분야에 적용되고 있으며, 문화재 보존 및 예술작품 복원 등 다양한 용도로 사용되고 있다.

3차원 스캐너는 토공현장에서 토공량 산정[5][6], 지형변위 계측[7-9], 터널형상 점검[10-12], 댐변위 계측[13] 등 다양한 분야에서 적용되고 있다. 최근에는 토공 작업에 투입되는 굴삭기, 불도저 등 중장비의 자동제어 및 가이드를 위한 기초자료 제공을 위해 토공현장을 3차원 이미지화하는 작업에 사용되고 있다[14][15].

토공현장에서 운용되고 있는 중장비를 효과적으로 관제하기 위해서는 현장지반에 대한 정밀한 3차원 계측이 필요하다. 정밀 계측된 3차원 지반지형 디지털형상은 장비의 운용계획수립에 이용될 뿐만 아니라 공정 관리를 위한 기본적인 데이터를 제공하여 스마트 시공 관제를 위한 기본적인 정보를 제공할 수 있다. 따라서, 신속하고 정확한 시공관제가 가능하기 위해서는 데이터의 높은 신뢰도가 요구될 뿐만 아니라 빠른 계측을 통한 데이터 취득이 요구된다.

본 연구에서는 토공현장의 정밀계측을 위해 주로 사용되는 토탈스테이션과 최근에 주목받고 있는 3차원 스캐너의 정밀도 및 생산성을 비교하고자 한다. 두 계측기의 정밀도와 생산성을 비교하여 정략적인 측면과 정성적인 측면의 적용효과를 규명하고 스마트 시공관제를 위한 가장 적합한 계측형태를 정의하고자 한다.

## 2. 연구의 범위 및 방법

### 2.1 실험 개요 및 범위

본 연구를 위한 실험은 한국건설기술연구원 내에 위치한 면적 약  $100\text{m}^2$  크기인 건설자동화 실험실에서 진행하였다. 본 실험을 위해서 실험실내 측정기로부터 최소 2.6m ~ 최대 12.5m 내에서 거리를 달리한 임의 설정 7개 지점에 타겟을 배치하였으며 각 지점마다 3개의

타겟을 동일 수직선상에 배치하였다. 경사에 따른 정밀도를 분석하기 위해, 바닥으로부터 1m 지점에 첫 번째 타겟을 부착하고 첫 번째 타겟으로부터 1m 상단에 두 번째 타겟을 다시 1m 상단에 세 번째 타겟을 위치 시켰다. 이는 실제 환경에서 고지차가 있는 지형에 산재하여 위치한 타겟을 가정한 배치하였다.

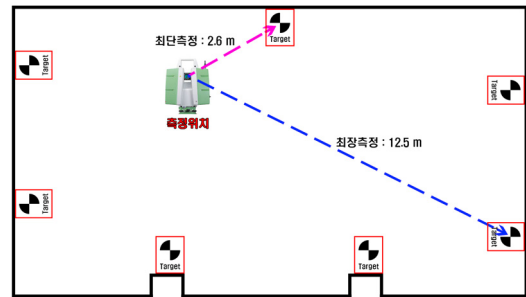


그림 1. 실험환경 개략도(평면도)

본 실험에서 사용된 타겟은 일반적으로 'Black and White 타겟'이라고 부르는 타겟이며 이는 흑과 백의 색상 대비를 통해 타겟을 인식하는 방식으로 사용되는 타겟이다. 토탈스테이션의 경우 작업자가 시준을 통해 중점을 찾는 방식으로 진행 하였고 3차원 스캐너는 타겟 자동 인식 기능을 이용하여 소프트웨어를 통해 타겟을 중점을 자동으로 찾는 방식(해상도별 스캔)과 현장에서 타겟 추정 점을 작업자가 지정하면 스캐너 스스로 해당 영역을 추가 스캔을 통해 타겟 중점을 찾는 반자동 방식(내장카메라 기반 스캔) 모두를 적용 하였다. 토탈스테이션의 경우 전용 타겟의 사용 시 원거리 정밀 측정이 가능하나 이는 광파기전용 타겟으로 3차원 스캐너에서 타겟 인식이 불가능하여 본 연구에서는 사용하지 않았다.

### 2.2 실험 방법

실험은 전용 삼각대를 설치하고 먼저 토탈스테이션으로 모든 타겟에 대한 측량 값을 측정한 후 동일 삼각대에 3차원 스캐너를 거치한 후 3차원 스캔을 실시하였다. 앞에서 밝힌 바와 같이, 토탈스테이션은 거치 후 모든 타겟 좌표를 취득하는 것으로 실험을 완료 하였으나

3차원 스캐너의 경우 아래와 같은 총 4가지 방식으로 실험을 진행하였다. 4개의 3차원 스캔 방식 중 첫 번째 방식(내장카메라 기반 스캔)을 제외 하고는 모두 현장이 아닌 사무실에서 소프트웨어를 통해 타겟의 좌표를 취득하는 후처리 과정이 요구되는 방식이다.

- ① 3차원 스캐너 내장 카메라를 이용, 현장에 대한 이미지를 취득한 후 작업자가 취득 이미지에서 타겟을 육안으로 찾아 선택하고 이 정보를 이용하여 다시 스캐너가 타겟의 중점을 찾는 방식
- ② 이미지 취득 없이 현장을 12.5mm 해상도로 스캔한 후 소프트웨어를 통해 타겟의 중점 좌표 취득 방식
- ③ 이미지 취득 없이 현장을 6.3mm 해상도로 스캔한 후 소프트웨어를 통해 타겟의 중점 좌표 취득방식
- ④ 이미지 취득 없이 현장을 3.1mm 해상도로 스캔한 후 소프트웨어를 통해 타겟의 중점 좌표 취득방식

### 2.3 분석 방법

본 실험을 통하여 다양한 계측방법에 따른 타겟의 위치정보와 계측시 소요되는 시간을 측정하였다. 계측방법에 따른 정밀도는 토탈스테이션을 이용한 정밀측정값을 기준으로 3차원 스캐너를 이용한 다양한 측정값의 오차율을 계산하여 검증하였다. 또한, 토탈스테이션과 3차원 스캐너의 생산성은 각 측량기의 계측 프로세스를 분석하고 소용되는 작업 및 작업현장의 비정형성 등을 고려하여 분석하였다.

## II. 3차원 스캐너의 정밀도 분석

3차원 스캐너의 정밀도를 분석하기 위해, 우선 토탈스테이션을 이용하여 모든 타겟의 중심점을 측량 한 후 이를 기준좌표로 하고 3차원 스캐너의 4가지 타겟 취득방법을 통해 취득된 타겟 중심점 좌표를 기준좌표와 비교하였다.

3차원 스캐너의 경우 특별한 경우를 제외하고는 매 스캔 시 마다 새로운 상대 좌표계를 생성한 후 데이터 취득을 진행한다. 따라서, 토탈스테이션 값과의 비교를

위해서는 후처리 과정을 통해 3차원 스캐너로부터 취득된 데이터를 토탈스테이션 좌표계에 일치 시키는 작업이 필수적이다. 통상 특정 상대좌표계에 여타 다른 상대 좌표계를 일치시키는 작업을 정합(Registration)이라 하며 기지점 및 GNSS 등에서 취득한 절대 좌표에 상대좌표계를 일치 시키는 것을 Geo-Referencing이라 한다. 두 개의 좌표계의 좌표정합을 위해서는 최소 3개 이상의 레퍼런스 포인트가 필요하며, 3개의 레퍼런스 포인트는 가능한 커다란 삼각형 형태를 이루는 것이 이상적이다. 이에 본 실험에서는 총 21개의 타겟 중 3개의 특정 타겟을 토탈스테이션과 3차원 스캐너 데이터 간 좌표정합을 위한 레퍼런스 포인트로 사용하였다.

### 1. 토탈스테이션 정밀도 측정값

삼각대 거치 후 토탈스테이션의 측정은 작업자가 측정이 필요한 측점을 광학장치를 이용하여 시준한 후 측정 버튼을 눌러 측량을 실시하는 방식으로 이루어졌다. 아래 그림은 토탈스테이션을 이용하여 취득한 좌표점을 3차원 공간에 도시한 것이다.

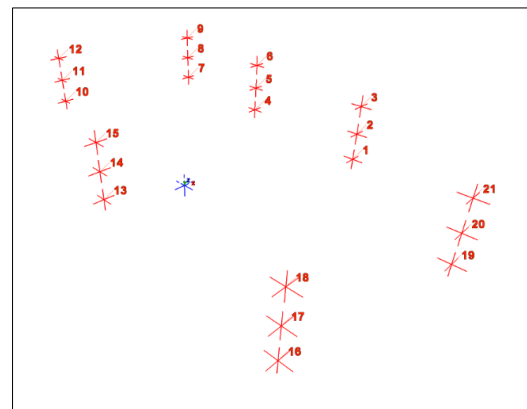


그림 2. 토탈스테이션을 이용한 측정결과 화면

아래 표는 토탈스테이션을 이용하여 개별 타겟 중심점의 좌표를 취득한 결과 값이다. 타겟의 위치는 x, y, z의 3차원 좌표로 나타나며, 토탈스테이션과 타겟 간 거리도 함께 나타났다. 21개의 포인트 가운데 1, 14, 16번 타겟은 3차원 스캔 데이터와의 좌표 정합을 위한 레퍼런스 포인트로 사용하였다.

표 1. 토달스테이션 계속 데이터

| 타겟 | x         | y         | z       | 거리(m)  |
|----|-----------|-----------|---------|--------|
| 1  | 1006.6436 | 999.9108  | 11.1377 | 6.661  |
| 2  | 1006.6451 | 999.9106  | 12.139  | 6.668  |
| 3  | 1006.6444 | 999.915   | 13.166  | 6.828  |
| 4  | 1005.8329 | 1005.8448 | 11.1289 | 8.271  |
| 5  | 1005.8332 | 1005.8333 | 12.135  | 8.267  |
| 6  | 1005.8309 | 1005.8291 | 13.1419 | 8.388  |
| 7  | 1004.9451 | 1011.5109 | 11.1358 | 12.536 |
| 8  | 1004.9452 | 1011.5147 | 12.1599 | 12.544 |
| 9  | 1004.9474 | 1011.5125 | 13.1623 | 12.627 |
| 10 | 998.3148  | 1010.6214 | 11.1432 | 10.763 |
| 11 | 998.3163  | 1010.6197 | 12.1405 | 10.765 |
| 12 | 998.3222  | 1010.6195 | 13.1378 | 10.860 |
| 13 | 997.6154  | 1001.0048 | 11.1453 | 2.626  |
| 14 | 997.6111  | 1001.0083 | 12.1494 | 2.650  |
| 15 | 997.614   | 1000.9819 | 13.1393 | 3.005  |
| 16 | 999.2179  | 992.9923  | 11.1501 | 7.066  |
| 17 | 999.2224  | 993.0002  | 12.1496 | 7.065  |
| 18 | 999.2374  | 992.9994  | 13.1663 | 7.215  |
| 19 | 1005.0388 | 993.7882  | 11.1563 | 8.011  |
| 20 | 1005.0459 | 993.7886  | 12.1531 | 8.023  |
| 21 | 1005.0558 | 993.7944  | 13.1832 | 8.160  |

2. 3차원 스캐너 정밀도 측정값

3차원 스캐너는 일정영역을 스캔 영역으로 설정하고 취득할 데이터의 스캔 해상도를 설정한 후 스캔을 실시하여 데이터를 취득하는 방식으로 작동하게 된다. 따라서 3차원 스캐너에 있어 해상도와 스캔속도 등은 측정 오차 및 생산성의 중요 요소가 된다.

스캔 영역은 흔히 FOV(Field of View)라 부르는데 스캔 영역의 설정은 측정 대상을 파악하여 선택적으로 스캔을 실시할 구간을 설정하는 단계이다. 본 실험에서는 현장에서 주로 사용하는 Target All 즉, 3차원 스캐너가 스캔 가능한 모든 범위(수평방향 360°\*수직방향 270°)를 스캔하는 방식으로 실험을 진행 하였다.

3차원 스캐너에서 해상도(Scan Resolutions)는 최단 인접 측정 점간의 거리를 의미하는데 필요한 데이터의 수준에 따라 해상도를 결정하여 사용하게 된다. 해상도를 높일수록 취득되는 데이터 내의 인접점 간의 거리는 작아지게 되어 대상에 대해 정밀한 표현이 가능해 지나 현장 작업에서 데이터 취득에 걸리는 시간이 커지며 취득된 데이터의 크기 또한 커져 후처리 작업에 부하를 주게 되므로 취득 목적에 부합한 설정을 하는 것이 유리하다.

위와 같은 3차원 스캐너 세팅 요소를 기초로 하여 아래와 같이 대별하여서는 네 가지 방법으로 타겟 중심점 취득 테스트를 실험하였다.

- (1) 3차원 스캐너 내장 카메라를 이용, 타겟의 대략 위치를 작업자가 수동으로 찾은 후 스캐너가 타겟을 찾는 반자동 방법
- (2) 3.1mm @ 10m 해상도로 스캔을 실시하고 Cyclone에서 스캔 데이터 Import시 자동으로 연산하여 타겟 중심점을 찾는 방법
- (3) 6.3mm @ 10m 해상도로 스캔을 실시하고 Cyclone에서 스캔 데이터 Import시 자동으로 연산하여 타겟 중심점을 찾는 방법
- (4) 12.5mm @ 10m 해상도로 스캔을 실시하고 Cyclone에서 스캔 데이터 Import시 자동으로 연산하여 타겟 중심점을 찾는 방법

내장 카메라를 이용한 타겟 관측 방법은 스캐너 내장 카메라를 이용 현장에 대한 파노라마 Image 취득 후 취득된 Image에서 작업자가 타겟의 대략적인 중심점을 선택하면, P20스캐너 스스로 스캔을 실시한 후 타겟 중심점을 자동으로 취득해내는 방법이다. 본 연구에 사용한 3차원 스캐너의 경우 'Target All' 설정 시 총 260여 장의 이미지를 취득하게 되며 개별 이미지는 500만 화소의 해상도를 갖는다.

스캔 해상도에 의한 타겟 취득 방법은 내장 카메라를 이용한 타겟 관측 방법에 비해 현장에서 추가적인 타겟 취득 과정을 생략하게 되므로 현장작업에 소요되는 시간을 단축할 수 있다. 하지만 작업자의 판단 없이 해상도를 높여 스캔을 실시하면 이후 데이터 후처리 및 데이터 연산 시간이 매우 증가하므로 작업자가 현장 환경 및 대상물을 파악 후 가장 적합한 해상도를 설정하는 것이 중요하다.

내장 카메라를 이용하여 타겟 중심점 취득을 진행 한 결과는 아래 표와 같다. 표에서 확인 가능하듯 9번, 11번 타겟의 취득에는 실패 하였는데 이는 사용자가 타겟 중심점의 대략적인 위치를 지정할 때 발생한 문제로 추정 된다.

표 2. 내장카메라 기반 스캔 결과값

| 타겟 | x         | y         | z       | 거리(m)  |
|----|-----------|-----------|---------|--------|
| 1  | 1006.6429 | 999.9107  | 11.1378 | 6.660  |
| 2  | 1006.6454 | 999.911   | 12.139  | 6.668  |
| 3  | 1006.6446 | 999.9156  | 13.1659 | 6.827  |
| 4  | 1005.8317 | 1005.8443 | 11.1276 | 8.270  |
| 5  | 1005.8319 | 1005.8334 | 12.1335 | 8.266  |
| 6  | 1005.8308 | 1005.8298 | 13.1403 | 8.388  |
| 7  | 1004.9449 | 1011.5108 | 11.1322 | 12.537 |
| 8  | 1004.9448 | 1011.5149 | 12.1562 | 12.544 |
| 9  | X         | X         | X       | X      |
| 10 | 998.316   | 1010.6209 | 11.1395 | 10.763 |
| 11 | X         | X         | X       | X      |
| 12 | 998.3221  | 1010.6199 | 13.1345 | 10.860 |
| 13 | 997.6158  | 1001.0034 | 11.1457 | 2.626  |
| 14 | 997.6116  | 1001.0082 | 12.1493 | 2.650  |
| 15 | 997.6112  | 1000.9838 | 13.1402 | 3.007  |
| 16 | 999.2181  | 992.9925  | 11.1501 | 7.065  |
| 17 | 999.2227  | 992.9999  | 12.1496 | 7.065  |
| 18 | 999.2371  | 992.9999  | 13.1658 | 7.214  |
| 19 | 1005.0389 | 993.7891  | 11.1567 | 8.010  |
| 20 | 1005.0456 | 993.7905  | 12.1536 | 8.020  |
| 21 | 1005.0549 | 993.7954  | 13.1836 | 8.158  |

저해상도 스캔을 통한 타겟 취득 결과는 아래 표와 같이 매우 좋지 않았다. 전체 21개중 성공적으로 타겟 좌표를 취득 한 것은 6개뿐이며 나머지 15개의 타겟은 자동 좌표 취득에 실패하였다. 이는 타겟 자동 추출을 위해 필요한 수준의 데이터의 밀도에 미치지 못하여 발생한 것으로 보인다. 저해상도 스캔의 결과를 고려 할 때, 저해상도 스캔은 대강의 지형을 빠르게 파악하고자 할 때 유용하며, 클라우드 포인트를 통해 정밀한 정보를 취득하기에는 무리가 있는 것으로 확인된다.

표 3. 저해상도 스캔 결과값

| 타겟 | x         | y         | z       | 거리(m) |
|----|-----------|-----------|---------|-------|
| 1  | 1006.6433 | 999.9103  | 11.1377 | 6.660 |
| 2  | X         | X         | X       | X     |
| 3  | X         | X         | X       | X     |
| 4  | X         | X         | X       | X     |
| 5  | X         | X         | X       | X     |
| 6  | X         | X         | X       | X     |
| 7  | X         | X         | X       | X     |
| 8  | X         | X         | X       | X     |
| 9  | X         | X         | X       | X     |
| 10 | X         | X         | X       | X     |
| 11 | X         | X         | X       | X     |
| 12 | X         | X         | X       | X     |
| 13 | 997.6149  | 1001.0052 | 11.1452 | 2.627 |
| 14 | 997.6107  | 1001.0088 | 12.1495 | 2.651 |
| 15 | 997.6115  | 1000.9838 | 13.1399 | 3.007 |
| 16 | 999.2185  | 992.9924  | 11.15   | 7.066 |
| 17 | 999.2231  | 993.0003  | 12.1517 | 7.065 |
| 18 | X         | X         | X       | X     |
| 19 | X         | X         | X       | X     |
| 20 | X         | X         | X       | X     |
| 21 | X         | X         | X       | X     |

아래 표는 중해상도로 스캔한 결과이다. 중해상도 스캔을 통한 데이터 취득 시에는 모든 타겟의 자동 좌표 취득이 가능함을 알 수 있다.

표 4. 중해상도 스캔 결과값

| 타겟 | x         | y         | z       | 거리(m)  |
|----|-----------|-----------|---------|--------|
| 1  | 1006.6433 | 999.9105  | 11.1377 | 6.660  |
| 2  | 1006.6457 | 999.9099  | 12.1398 | 6.669  |
| 3  | 1006.6443 | 999.915   | 13.167  | 6.828  |
| 4  | 1005.8324 | 1005.8443 | 11.1313 | 8.270  |
| 5  | 1005.8328 | 1005.8321 | 12.1374 | 8.266  |
| 6  | 1005.8302 | 1005.8288 | 13.1448 | 8.388  |
| 7  | 1004.9471 | 1011.5104 | 11.1363 | 12.537 |
| 8  | 1004.9454 | 1011.5143 | 12.1617 | 12.544 |
| 9  | 1004.9483 | 1011.5127 | 13.164  | 12.629 |
| 10 | 998.3176  | 1010.6221 | 11.1406 | 10.764 |
| 11 | 998.3196  | 1010.6197 | 12.139  | 10.765 |
| 12 | 998.3234  | 1010.6201 | 13.1368 | 10.861 |
| 13 | 997.6153  | 1001.0052 | 11.1454 | 2.627  |
| 14 | 997.6111  | 1001.0083 | 12.1494 | 2.650  |
| 15 | 997.6118  | 1000.9837 | 13.1404 | 3.008  |
| 16 | 999.2183  | 992.9926  | 11.1501 | 7.065  |
| 17 | 999.2208  | 993.0002  | 12.1492 | 7.064  |
| 18 | 999.2366  | 992.9998  | 13.1661 | 7.214  |
| 19 | 1005.0386 | 993.788   | 11.1584 | 8.011  |
| 20 | 1005.0449 | 993.7888  | 12.1556 | 8.021  |
| 21 | 1005.0538 | 993.7942  | 13.1854 | 8.159  |

아래 표는 고해상도로 스캔한 결과 값이다. 고해상도 스캔 또한 중해상도 스캔과 동일하게 모든 타겟의 중심 점 좌표 취득이 성공적으로 이루어짐을 확인 할 수 있다.

표 5. 고해상도 스캔 결과값

| 타겟 | x         | y         | z       | 거리(m)  |
|----|-----------|-----------|---------|--------|
| 1  | 1006.6432 | 999.9107  | 11.1377 | 6.660  |
| 2  | 1006.646  | 999.9112  | 12.1391 | 6.669  |
| 3  | 1006.6445 | 999.9165  | 13.1658 | 6.827  |
| 4  | 1005.8321 | 1005.8453 | 11.1312 | 8.270  |
| 5  | 1005.8323 | 1005.833  | 12.1372 | 8.266  |
| 6  | 1005.8301 | 1005.8304 | 13.1436 | 8.389  |
| 7  | 1004.9451 | 1011.5115 | 11.1366 | 12.537 |
| 8  | 1004.9444 | 1011.5153 | 12.1607 | 12.544 |
| 9  | 1004.9466 | 1011.5129 | 13.1631 | 12.628 |
| 10 | 998.3143  | 1010.6215 | 11.1416 | 10.764 |
| 11 | 998.3159  | 1010.6193 | 12.1392 | 10.765 |
| 12 | 998.3218  | 1010.6196 | 13.136  | 10.861 |
| 13 | 997.6152  | 1001.0044 | 11.1452 | 2.627  |
| 14 | 997.6112  | 1001.0088 | 12.1494 | 2.651  |
| 15 | 997.612   | 1000.9831 | 13.1408 | 3.007  |
| 16 | 999.2182  | 992.9919  | 11.15   | 7.066  |
| 17 | 999.2225  | 992.9998  | 12.1499 | 7.065  |
| 18 | 999.2377  | 992.9999  | 13.1664 | 7.214  |
| 19 | 1005.0384 | 993.7887  | 11.1585 | 8.010  |
| 20 | 1005.0465 | 993.7897  | 12.1558 | 8.022  |
| 21 | 1005.0562 | 993.7954  | 13.1854 | 8.160  |

저·중·고 해상도로 설정한 후 취득한 데이터를 이용하여 자동 타겟 인식에 소요된 시간과 성공적으로 타겟 취득된 좌표수를 아래표와 같이 정리하였다. 저해상도는 빠른 데이터 처리 속도를 보여주나 6개의 타겟만을 인식하였으며, 중, 고 해상도에서는 정보처리에 시간이 소요되는 대신 21개의 모든 타겟을 성공적으로 취득하였다. 개별 해상도별 자동 타겟 분석을 위한 소요 시간은 데이터의 사이즈에 비례하여 시간이 소요됨을 확인하였다.

표 6. 스캔 해상도별 데이터처리 시간 및 발견 타겟수

| 해상도          | 처리 속도  | 좌표취득 개수 |
|--------------|--------|---------|
| 3.1mm @ 10m  | 4분 40초 | 21개     |
| 6.3mm @ 10m  | 1분 15초 | 21개     |
| 12.5mm @ 10m | 20초    | 6개      |

### 3. 정밀도 측정값 비교분석

본 연구에서는 토탈스테이션의 측량 값을 기준으로 하여 3차원 스캐너 측정 타겟 좌표 값을 비교하여 정밀도를 평가하였다. 오차는 3차원 Vector 방법을 적용하여 계산하였으며 이는 토탈스테이션 측량 값과 3차원 스캐너 측량 값 간의 3차원 공간상에서 Euclidean Distance를 의미한다.

아래 표는 내장 카메라 기반의 관측 결과값의 오차를 나타내고 있다. 타겟 인식에 실패한 9번, 11번 좌표를 제외한 19개의 타겟에서 발생한 오차의 평균은 1.7mm 정도로 나타났다.

표 7. 내장카메라 기반 스캔 측정값의 오차

| 타겟    | x      | y      | z      | 거리(m)  | 비고     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | 0.001  | 0.000  | 0.000  | 6.660  | 0.0010 |
| 2     | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 6.668  | 0.0000 |
| 3     | 0.000  | -0.001 | 0.000  | 6.827  | 0.0010 |
| 4     | 0.001  | 0.000  | 0.001  | 8.270  | 0.0014 |
| 5     | 0.001  | 0.000  | 0.002  | 8.266  | 0.0022 |
| 6     | 0.000  | -0.001 | 0.002  | 8.388  | 0.0022 |
| 7     | 0.000  | 0.000  | 0.004  | 12.537 | 0.0040 |
| 8     | 0.000  | 0.000  | 0.004  | 12.544 | 0.0040 |
| 9     | X      | X      | X      | X      | X      |
| 10    | -0.001 | 0.000  | 0.004  | 10.763 | 0.0041 |
| 11    | X      | X      | X      | X      | X      |
| 12    | 0.000  | 0.000  | 0.003  | 10.860 | 0.0030 |
| 13    | 0.000  | 0.001  | 0.000  | 2.626  | 0.0010 |
| 14    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 2.650  | 0.0000 |
| 15    | 0.003  | -0.002 | -0.001 | 3.007  | 0.0037 |
| 16    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.065  | 0.0000 |
| 17    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.065  | 0.0000 |
| 18    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.214  | 0.0000 |
| 19    | 0.000  | -0.001 | 0.000  | 8.010  | 0.0010 |
| 20    | 0.000  | -0.002 | -0.001 | 8.020  | 0.0022 |
| 21    | 0.001  | -0.001 | 0.000  | 8.158  | 0.0014 |
| 오차 평균 |        |        |        |        | 0.0017 |

6개의 타겟 좌표만을 획득한 저해상도 스캔 데이터는 결과분석에서 제외하였다. 아래 표는 중해상도 스캔 결과값의 오차를 나타내고 있다. 최대오차는 4.4mm이고 평균오차는 1.9mm로 내장 카메라 기반의 관측 결과보다 정밀도가 조금 떨어지는 것으로 나타났다.

표 8. 중해상도 스캔 측정값의 오차

| 타겟    | x      | y      | z      | 거리(m)  | 비고     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 6.660  | 0.0000 |
| 2     | -0.001 | 0.001  | -0.001 | 6.669  | 0.0017 |
| 3     | 0.000  | 0.000  | -0.001 | 6.828  | 0.0010 |
| 4     | 0.000  | 0.000  | -0.002 | 8.270  | 0.0020 |
| 5     | 0.000  | 0.001  | -0.002 | 8.266  | 0.0022 |
| 6     | 0.001  | 0.000  | -0.003 | 8.388  | 0.0032 |
| 7     | -0.002 | 0.000  | -0.001 | 12.537 | 0.0022 |
| 8     | 0.000  | 0.000  | -0.002 | 12.544 | 0.0020 |
| 9     | -0.001 | 0.000  | -0.002 | 12.629 | 0.0022 |
| 10    | -0.003 | -0.001 | 0.003  | 10.764 | 0.0044 |
| 11    | -0.003 | 0.000  | 0.002  | 10.765 | 0.0036 |
| 12    | -0.001 | -0.001 | 0.001  | 10.861 | 0.0017 |
| 13    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 2.627  | 0.0000 |
| 14    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 2.650  | 0.0000 |
| 15    | 0.002  | -0.002 | -0.001 | 3.008  | 0.0030 |
| 16    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.065  | 0.0000 |
| 17    | 0.002  | 0.000  | 0.000  | 7.064  | 0.0020 |
| 18    | 0.001  | 0.000  | 0.000  | 7.214  | 0.0010 |
| 19    | 0.000  | 0.000  | -0.002 | 8.011  | 0.0020 |
| 20    | 0.001  | 0.000  | -0.002 | 8.021  | 0.0022 |
| 21    | 0.002  | 0.000  | -0.002 | 8.159  | 0.0028 |
| 오차 평균 |        |        |        |        | 0.0019 |

아래 표는 고해상도 스캔 결과값의 오차를 나타내고 있다. 고해상도 스캔의 최대오차는 3.3mm이고, 평균오차는 1.4mm로 가장 높은 정밀도를 보여주고 있다.

표 9. 고해상도 스캔 측정값의 오차

| 타겟    | x      | y      | z      | 거리(m)  | 비고     |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1     | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 6.660  | 0.0000 |
| 2     | -0.001 | -0.001 | 0.000  | 6.669  | 0.0014 |
| 3     | 0.000  | -0.002 | 0.000  | 6.827  | 0.0020 |
| 4     | 0.001  | 0.000  | -0.002 | 8.270  | 0.0022 |
| 5     | 0.001  | 0.000  | -0.002 | 8.266  | 0.0022 |
| 6     | 0.001  | -0.001 | -0.002 | 8.389  | 0.0024 |
| 7     | 0.000  | -0.001 | -0.001 | 12.537 | 0.0014 |
| 8     | 0.001  | -0.001 | -0.001 | 12.544 | 0.0017 |
| 9     | 0.001  | 0.000  | -0.001 | 12.628 | 0.0014 |
| 10    | 0.000  | 0.000  | 0.002  | 10.764 | 0.0020 |
| 11    | 0.000  | 0.000  | 0.001  | 10.765 | 0.0010 |
| 12    | 0.000  | 0.000  | 0.002  | 10.861 | 0.0020 |
| 13    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 2.627  | 0.0000 |
| 14    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 2.651  | 0.0000 |
| 15    | 0.002  | -0.001 | -0.002 | 3.007  | 0.0030 |
| 16    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.066  | 0.0000 |
| 17    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.065  | 0.0000 |
| 18    | 0.000  | 0.000  | 0.000  | 7.214  | 0.0000 |
| 19    | 0.000  | 0.000  | -0.002 | 8.010  | 0.0020 |
| 20    | -0.001 | -0.001 | -0.003 | 8.022  | 0.0033 |
| 21    | 0.000  | -0.001 | -0.002 | 8.160  | 0.0022 |
| 오차 평균 |        |        |        |        | 0.0014 |

아래의 그래프는 거리별 오차 분포를 도식화한 것이다. 스캐너로부터 4m 이하 근거리의 경우 내장카메라 기반, 중해상도 스캔이 고해상도 스캔보다 더 정확한 것으로 나타났다. 하지만, 4m 이상 원거리의 경우 고해상도 스캔이 더 정밀한 것으로 나타났으며, 거리가 멀어질수록 고해상도 스캔 결과가 더 적은 오차를 보이고 있다. 오차 결과 값을 분석하면 고해상도 스캔이 가장 적은 오차를 보이며 중해상도 스캔이 가장 큰 오차를 갖는 것을 확인 할 수 있다.

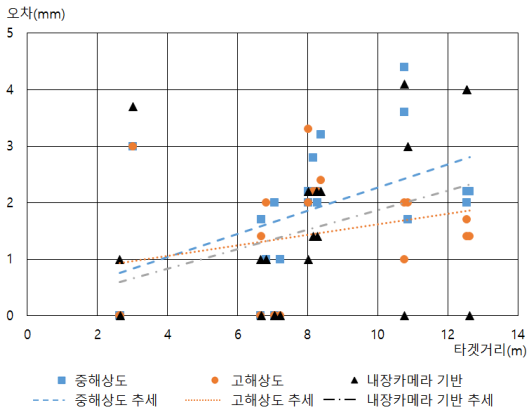


그림 3. 해상도별 관측값의 거리별 오차 분포

낮은 해상도로 인해 스캔이 되지 않은 저해상도 기반 스캔 결과 값과 사용자 타겟지정 오류로 인해 스캔이 완료되지 않은 이미지기반 스캔 결과 값을 제외한 중해상도 스캔 값과 고해상도 스캔 값을 바탕으로 3차원 스캔측량의 오차율을 아래 표와 같이 산출하였다. 중해상도와 고해상도의 평균오차율은 각각 0.015%와 0.014%로 고해상도 평균오차율이 조금 작기는 하나 거의 비슷함을 알 수 있다. 또한 토탈스테이션을 통한 정밀측정과 비교해서 3차원 스캐너의 평균오차율은 0.015% 수준으로 정확도가 99% 이상임을 확인 할 수 있다.

표 10. 해상도별 스캔오차율

| 타겟 | 중해상도 스캔 |        |        | 고해상도 스캔 |        |
|----|---------|--------|--------|---------|--------|
|    | 거리(m)   | 거리(m)  | 오차율(%) | 거리(m)   | 오차율(%) |
| 1  | 6.661   | 6.660  | 0.015  | 6.660   | 0.015  |
| 2  | 6.668   | 6.669  | 0.015  | 6.669   | 0.015  |
| 3  | 6.828   | 6.828  | 0.000  | 6.827   | 0.015  |
| 4  | 8.271   | 8.270  | 0.012  | 8.270   | 0.012  |
| 5  | 8.267   | 8.266  | 0.012  | 8.266   | 0.012  |
| 6  | 8.388   | 8.388  | 0.000  | 8.389   | 0.012  |
| 7  | 12.536  | 12.537 | 0.008  | 12.537  | 0.008  |
| 8  | 12.544  | 12.544 | 0.000  | 12.544  | 0.000  |
| 9  | 12.627  | 12.629 | 0.016  | 12.628  | 0.008  |
| 10 | 10.763  | 10.764 | 0.009  | 10.764  | 0.009  |
| 11 | 10.765  | 10.765 | 0.000  | 10.765  | 0.000  |
| 12 | 10.860  | 10.861 | 0.009  | 10.861  | 0.009  |
| 13 | 2.626   | 2.627  | 0.038  | 2.627   | 0.038  |
| 14 | 2.650   | 2.650  | 0.000  | 2.651   | 0.038  |
| 15 | 3.005   | 3.008  | 0.100  | 3.007   | 0.067  |
| 16 | 7.066   | 7.065  | 0.014  | 7.066   | 0.000  |
| 17 | 7.065   | 7.064  | 0.014  | 7.065   | 0.000  |
| 18 | 7.215   | 7.214  | 0.014  | 7.214   | 0.014  |
| 19 | 8.011   | 8.011  | 0.000  | 8.010   | 0.012  |
| 20 | 8.023   | 8.021  | 0.025  | 8.022   | 0.012  |
| 21 | 8.160   | 8.159  | 0.012  | 8.160   | 0.000  |
|    |         | 평균 오차율 | 0.015  | 평균 오차율  | 0.014  |

### III. 3차원 스캐너의 생산성 분석

앞 절에서는 3차원 스캐너의 측정값이 얼마나 정밀한지를 비교분석하였다. 현장의 지반지형을 정확하게 계측하는 것은 측량에 있어 가장 중요한 목적임에 틀림없다. 하지만, 광범위한 작업현장을 측량하기 위해서는 계측 생산성 또한 반드시 고려해야할 요소이다. 이번 절에서는 토탈스테이션과 3차원 스캐너의 작업 프로세스와 계측 소요시간 등을 비교하여 3차원 스캐너의 생산성을 분석하였다.

#### 1. 측량기의 작업 프로세스 분석

토탈스테이션을 위해서는 우선 계측할 지점들에 측량보조원이 타겟을 계측지점으로 이동하거나 설치한다. 측량사는 삼각대를 안정적인 지형 위에 설치하고 토탈스테이션을 삼각대에 고정한 후 수평 및 원점을 맞춘다. 프로젝트 설정 및 세팅이 완료 된 후 대상 타겟을 시준 하여 계측하는 순서로 측량이 이루어진다. 토탈스테이션의 경우 1인 계측도 가능하나 실제 환경에서는 타겟 설치, 이동 시 전·후시 측량을 위해서는 최소 2인 이상의 작업자가 요구되며 일반적인 경우 측량사와 측

량보조원 2인이 1조로 측량을 실시한다.

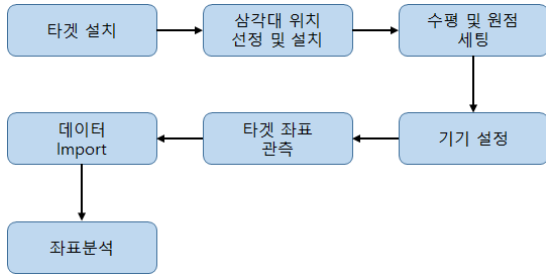


그림 4. 토탈스테이션 계측 프로세스

3차원 스캐너를 이용한 계측은 아래 그림과 같은 프로세스로 진행된다. 3차원 스캔의 특징은 특정 타겟을 따로 설정할 필요가 없다는 점이다. 따라서 타겟을 설치하기 위한 인력이 따로 요구되지 않는다. 스캔을 하기 위해 토탈스테이션과 동일하게 삼각대를 안정적인 지형 위에 설치하고 스캐너 거치 후 스캐너의 수평 및 원점을 세팅한다. 이후 내장카메라 기반 계측을 할 것인지, 저·중·고 해상도 계측을 할 것인지 설정한 후 스캔을 시작한다. 3차원 스캐너는 토탈스테이션과 달리 특정 타겟이 필요치 않아 1인 작업이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 반면에 계측한 데이터를 현장에서 바로 처리가 어려우며 통상 현장작업 후 사무실 환경에서 필요한 후처리 작업을 진행하는 것이 일반적이다.

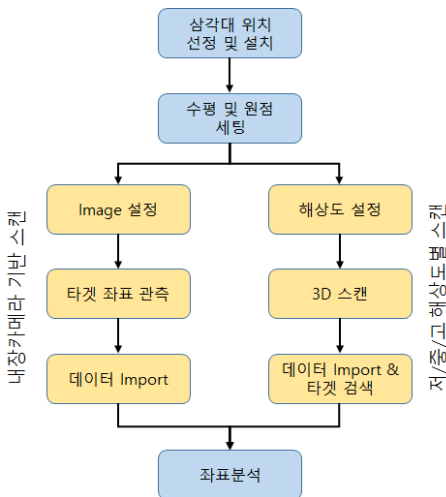


그림 5. 3차원 스캐너 계측 프로세스

## 2. 생산성 측정값 비교분석

생산성 비교를 위해 실험환경을 대상으로 토탈스테이션과 3차원 스캐너의 계측 시간을 측정하였다. 실험에서 사용된 타겟 중심점 측정에 소요된 시간은 아래 표와 같다. 토탈스테이션을 이용한 정밀측량과 내장카메라 기반 스캔방식은 따로 후처리에 소요되는 시간이 필요치 않다.

표 11. 측량기의 측정 소요시간

| 사용 장비   | 측정 방법        | 현장계측 소요시간 | 후처리 소요시간 |
|---------|--------------|-----------|----------|
| 토탈스테이션  | 정밀측량         | 6분 30초    | 없음       |
| 3차원 스캐너 | 내장 카메라 기반 스캔 | 27분 50초   | 없음       |
|         | 저해상도 스캔      | 1분 44초    | 20초      |
|         | 중해상도 스캔      | 3분 25초    | 1분 15초   |
|         | 고해상도 스캔      | 6분 47초    | 4분 40초   |

아래의 표는 총소요시간을 타겟수로 나눈 결과로 내장카메라 기반 관측과 저해상도 스캔의 경우 21개의 전체 타겟을 측정하지 못하고 각각 19개, 6개의 타겟만을 취득 하였으므로 이를 반영하여 타겟당 계측에 소요되는 시간을 측정 하였다.

표 12. 측정방법별 타겟당 계측 소요시간

| 사용 장비/측정 방법            | 총 소요 시간 | 취득 타겟 수 | 타겟당 계측 소요시간 |
|------------------------|---------|---------|-------------|
| 토탈스테이션/정밀측정            | 6분 30초  | 21      | 18.57초      |
| 3차원 스캐너 - 내장 카메라 기반 스캔 | 27분 50초 | 19      | 87.89초      |
| 3차원 스캐너 - 저해상도 스캔      | 2분 4초   | 6       | 120.66초     |
| 3차원 스캐너 - 중해상도 스캔      | 4분 40초  | 21      | 13.33초      |
| 3차원 스캐너 - 고해상도 스캔      | 11분 27초 | 21      | 32.71초      |

위의 표에서 확인 가능하듯 1개 타겟 취득에 소요되는 총 시간은 3차원 스캐너를 이용하여 중해상도 스캔을 진행 하였을 때가 가장 우수한 것으로 나타났다. 두 번째로 토탈스테이션을 이용한 정밀측정이 타겟당 계측 소요시간이 작은 것으로 나타났다.

하지만, 위의 생산성 결과는 단지 21개의 타겟 만을 대상으로 측정된 것이며 대량의 타겟 데이터를 얻을 경



우 결과는 달라진다. 예를 들면, 본 실험에서 사용된 3차원 스캐너의 경우 초당 1,000,000포인트의 데이터 취득이 가능하다. 이를 토탈스테이션을 이용하여 1,000,000포인트의 데이터를 얻기 위해서는 214일(1점당 데이터 취득시간 18.58초 적용)이 소요된다.

3차원 스캐너의 생산성은 타겟의 숫자만이 아니라 실제 토공현장을 고려할 경우 토탈스테이션에 비해 더 우수함을 알 수 있다. 예를 들어, 토탈스테이션의 경우 이동을 위해서는 전·후시점에 고정타겟을 배치한 후 이전 좌표를 연결하는 트래버스 방법을 주로 사용하는데 이 트래버스 방법을 위해서는 측정대상이 되는 타겟 이외에 좌표 연결을 위한 추가 타겟 설치가 요구되며 트래버스 측량 후 추가적인 계산에 시간이 소요 되므로 본 실험처럼 단일 측정 점에서 측량을 실시 할 때에 비해 추가되는 시간이 상당할 것으로 예상된다. 그에 반해 3차원 스캐너의 경우 현장 작업 시 좌표 연결을 위한 추가 작업이 없으며, 레퍼런스 포인트를 이용하여 데이터 후처리시 정합을 통해 좌표를 연결하게 되어 생산성의 차이는 더 커진다.

#### IV. 결론 및 향후연구

건설 현장 내외를 이동하는 굴삭기, 그레이더, 덤프트럭 등 다수의 건설장비군의 움직임을 모니터링하고 토공량을 산정을 통한 자동화된 공정관리를 실현하기 위해서는 토공 현장의 3차원 지반지형에 대한 계측데이터의 취득이 필수적이다. 본 연구에서는 디지털화된 지반지형 구현을 위해 사용이 가능한 3차원 스캐너의 정밀도와 생산성을 분석하고자 하였다.

정밀도 측면에서 중해상도와 고해상도 스캔을 통해 얻은 데이터 값이 토탈스테이션을 통해 정밀 측정된 데이터의 좌표와 비교하여 99%이상의 정밀도를 나타내었으며, 평균 2.0mm이내의 오차가 발생하는 것으로 분석되어 토공현장 계측에 적용 가능한 것으로 나타났다. 그에 반해, 내장카메라 기반 스캔과 저해상도 스캔의 경우, 일부 타겟을 인식하지 못하여 현장에 적용하기가 어려울 것으로 판단된다.

생산성 측면에서는 단순 타겟당 소요시간 비교를 통해 중해상도 스캔시 토탈스테이션을 이용한 정밀측정에 비해 71%의 시간절감효과가 있는 것으로 나타났으며, 고해상도 스캔은 정밀측정에 비해 생산성이 떨어지는 것으로 나타났다. 하지만, 계측 타겟의 수가 많을수록 실제 토공현장과 같은 비정형일수록, 3차원 스캐너의 생산성이 점점 커진다는 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구를 통해 3차원 스캐너의 정밀도와 생산성을 검토하였으며, 토공현장 적용가능성을 확인하였다. 하지만, 본 실험은 한정된 특정 타겟을 대상으로한 계측 결과를 바탕으로 생산성 검증이 이루어진 한계를 지니고 있다. 향후 실제 토공현장을 대상으로 실질적인 생산성 검토가 이루어질 필요가 있다.

#### 참고 문헌

- [1] 김용석, 홍순현, 옥치율, “3차원 지형모델링에 의한 경관정보 분석과 Web GIS 구현”, 한국콘텐츠학회논문지, 제7권, 제9호, pp.204-211, 2007.
- [2] 연상호, 이영욱, “공간정보를 이용한 복선 철도노선 선정에서의 3차원 지형분석 및 모델링”, 한국콘텐츠학회논문지, 제5권, 제9호, pp.248-254, 2005.
- [3] E. J. Jaselskis, Z. Gao, and R. C. Walters, “Improving transportation projects using laser scanning,” *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol.131, No.3, pp.377-384, 2005.
- [4] 이진덕, 도철호, 한승희, “지상 레이저스캐너를 이용한 고건축물의 3차원 모델링”, 한국콘텐츠학회 추계 종합학술대회 논문집, 제5권, 제2호(상), pp.30-34, 2007.
- [5] J. C. Du and H. C. Teng, “3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation,” *Automation in Construction*, Vol.16, No.5, pp.657-663, 2007.
- [6] K. T. Slattery, D. K. Slattery, and J. Peterson

“Road Construction Earthwork Volume Calculation Using Three-Dimensional Laser Scanning,” *Journal of Surveying Engineering*, Vol.138, No.2, pp.96-99, 2012.

[7] Y. M. Hashash, J. N. Oliveira Filho, Y. Y. Su, and L. Y. Liu, “3D laser scanning for tracking supported excavation construction,” *Geo-Frontiers* 2005, pp.24-26, 2005.

[8] Y. M. Hashash and R. J. Finno, “Development of new integrated tools for predicting, monitoring, and controlling ground movements due to excavations,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol.13, No.1, pp.4-10, 2008.

[9] A. Prokop and H. Panholzer, “Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides,” *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol.9, No.6, pp.1921-1928, 2009.

[10] M. Pejić, “Design and optimisation of laser scanning for tunnels geometry inspection,” *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.37, pp.199-206, 2013.

[11] 박정준, 신재철, 황주환, 이강현, 서형준, 이인모, “3차원 레이저 스캐너 및 BIM을 활용한 터널 과대·과소 굴착 평가”, *한국터널지하공간학회논문집*, 제14권, 제4호, pp.437-451, 2012.

[12] T. Nuttens, A. Wulf, B. Wit, L. Carlier, M. Ryck, and H. Baker, “High resolution terrestrial laser scanning for tunnel deformation measurements,” *FIG Congress*, 2010.

[13] S. H. Park, D. H. Choi, and D. Y. Han, “Deformation Measurements of Dam using Terrestrial Laser Scanner,” *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol.27, No.1, pp.645-655, 2009.

[14] 채명진, 이규원, 김정렬, 박재우, 유현석, 조문영,

“지능형 굴삭 시스템을 위한 모바일 3D 이미징 시스템 및 자동 정합 알고리즘의 개발”, *한국건설관리학회논문집*, 제10권, 제1호, pp.136-145, 2009.

[15] M. J. Chae, G. W. Lee, J. Y. Kim, J. W. Park, and M. Y. Cho, “A 3D surface modeling system for intelligent excavation system,” *Automation in Construction*, Vol.20, No.7, pp.808-817, 2011.

저 자 소 개

김 석(Seok Kim)

정회원



- 2006년 8월 : 중앙대학교 대학원 토목공학과(공학석사)
- 2011년 12월 : Texas A&M Univ. Dept. of Civil Eng. (Ph.D.)
- 2012년 7월 ~ 2012년 12월 : 중앙대학교 연구교수
- 2012년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원  
<관심분야> : 건설관리, 건설자동화, 의사결정

박 재 우(Jae-Woo Park)

정회원



- 2002년 2월 : 중앙대학교 토목공학(공학석사)
- 2002년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 건설정책연구소 수석연구원

<관심분야> : 건설자동화, USN, 건설관리