

지상 LiDAR 자료의 절토량 산정 실험 Experiment of Computation of Ground Cutting Volume Using Terrestrial LiDAR Data

김중화* · 편무욱** · 김상국*** · 황연수**** · 강남기*****

Kim, Jong Hwa · Pyeon, Mu Wook · Kim, Sang Kuk · Hwang, Yeon Soo · Kang, Nam Gi

要 旨

지상라이더는 대용량 3차원 지형좌표의 획득이 가능하여 이를 활용한 터널계측, 시설물 변위 측정 등 각종 토목공사에서의 적용이 시도되고 있다. 본 실험에서는 토목 공사 공정 중 많은 시간과 자본은 필요로 하는 토공 과정 중 지상 라이더를 이용하여 절토량을 구하는 방법에 대해서 다루었다. 실험방법은 절토지역에 대하여 지상라이더 측량을 실시하고, 현황도, 계획평면도의 3D Cad 데이터와 획득한 라이더 자료를 비교하여 절토현황을 계산하였다. 사용된 라이더가 보유한 해상도별 절토량 계산 값들을 실험을 통해 비교하였다.

핵심용어 : 지상라이더, 절토량, 점군

Abstract

Terrestrial LiDAR can measure high capacity 3D-topography coordinates and try to apply to various public works such as tunnel surveying, facility deformation surveying. This experiment is about how to calculate ground cutting volume because the stage of the earth work spend lots of money and time among civil engineering works. Surveying cutting area using Terrestrial LiDAR and then calculating cutting area in planned area comparing sectional plan before construction and planned section and LiDAR data. Also, the values of the calculating ground cutting volume by three different resolution LiDAR has are compared and analyzed.

Keywords : Terrestrial LiDAR, ground cutting volume, point cloud

1. 서 론

토탈스테이션과 같은 광측량장비는 관측결과와 정확성에서 많은 향상이 진행되었지만, 건설현장에서 요구하는 대용량의 고정밀도 측량자료 획득을 위해서는 장비 운용 특성상 많은 시간과 인력을 필요로 한다. 따라서 측량결과와 높은 정확도와 함께 높은 정밀도를 가진 광역의 대용량 자료 획득 및 처리 방법의 필요성이 대두되고 있다. 라이더(LiDAR : Light Detection And Ranging)는 항공기, 지상에 설치하여 점밀도가 높은 3차원 지형자료를 획득할 수 있는 장비로서 최근 많은 연구가 진행중이다(Dold, 2006; Wolfgang von Hansen, 2006; 김형태 등, 2008).

특히 건설현장의 토공량 계산의 경우, 건설비용에 많은 영향을 미치며 정확한 토공량 산정이 사전에 계획되고 공사중 토공량 현황을 파악해 하는 것이 전체 공사 비용 관리에 유용하다. 토공량 산정 기법과 관련한 연구로는 GPS 측량에 의한 방법과 수치사진기법에 의한 방법들이 수행된 바 있고, (박운용 등, 2003; 이종출 등, 2003; 김진수 등, 2004) 항공라이더에 의한 토공량 산정 및 토량환산계수 연구도 시작되고 있다(강준목 등, 2006; 이재기 등, 2006).

본 연구에서는 실험지역에 지상라이더를 설치하여 절토현장의 3차원 자료를 획득, 처리하였다. 실험지역의 현황도와 계획도를 3차원 CAD 모델링하였고 3차원 라이더자료를 처리하여 측정당시의 절토량과 추후

2009년 3월 13일 접수, 2009년 4월 10일 채택

* 건국대학교 신기술융합학과 석박사통합과정(fff307@konkuk.ac.kr)

** 교신저자 · 정회원 · 건국대학교 신기술융합학과 부교수(neptune@konkuk.ac.kr)

*** (주)이산 상무이사(kskjoa@korea.com)

**** (주)이산 이사(hwang1431@naver.com)

***** 건국대학교 신기술융합학과 석사과정(rkdskarl@konkuk.ac.kr)

절토될 량을 계산하였다. 또한 지상라이다의 해상도를 달리하면서 절토량 계산 결과 추이를 비교하였다.

2. 실험 자료 및 방법

2.1 실험지역 및 자료

실험지역은 화성시 서부우회도로 터널 공사 현장으로서 2009년 1월 19일에 지상라이다 측량을 실시하였다(그림 1 참조). 절토량 측량을 위해 Amberg profiler 5003 장비를 적용, preview, middle, high 3가지 해상도의 스캔 옵션을 수행하였으며 각각의 해상도는 표 1과 같다.

2.2 실험 방법

3가지 해상도별로 지상라이다 관측을 수행한 후, 획득된 자료의 스캐너 바이너리 포맷(ZFS)을 포인트 교환 아스키(PTX) 형식으로 변환하여 자료를 처리하였다. 지상라이다 자료는 폐색지역을 최대한 줄이기 위해 복수의 라이다 설치점에서 관측하였고, 지형좌표를 부여하기 위해 관측지역 내에 타겟을 설치하여 토탈스테이션으로 타겟의 위치를 측정하였다. 또한, 절토량 산정은 절토전 현황도, 라이다 자료, 터널입구 계획평면도와의 체적량을 비교하였고, 이를 해상도별로 계산하였다.



(a) 실험지역 평면도 (b) 실험지역전경
그림 1. 실험지역 현황도면 및 작업전경

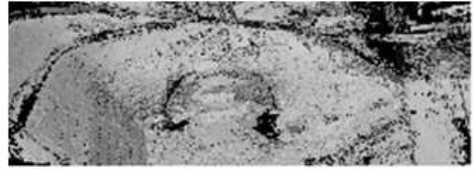


그림 2. 실험지역 지상라이다 영상

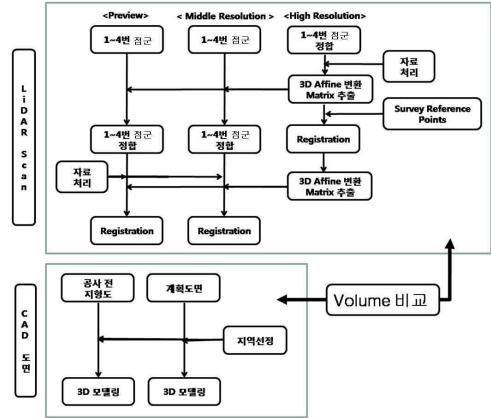


그림 3. 실험 흐름도

3. 대상지역 라이다자료 구축

3.1 자료 취득

지상라이다 스캔을 통해 얻은 점군은 스캐너 중심점이 (0,0,0)이고, 스캔방향을 Y축으로 하는 상대좌표만을 가지고 있기 때문에, 지형좌표로의 변환이 필요하다. 지상좌표기준점은 계획도면과 동일한 공사측량으로 설치된 기준점을 사용하였고, Leica 토탈스테이션 TPS 1201으로 관측지역내 설치한 타겟중심을 측정하였다. 타겟은 그림 4와 같은 가로세로 30cm 타겟을 이용하였다.



그림 4. 타겟

표 1. 실험에 적용된 지상라이다 스캔옵션

해상도	점밀도	측량시간
High Resolution	10,000Pixel/Line 5000Lines H=0.036° V=0.036°	3min22sec
Middle Resolution	5000Pixel/Line 2500Lines H=0.072° V=0.072°	1min40sec
Preview	1250Pixel/Line 625Lines H=0.288° V=0.288°	25sec

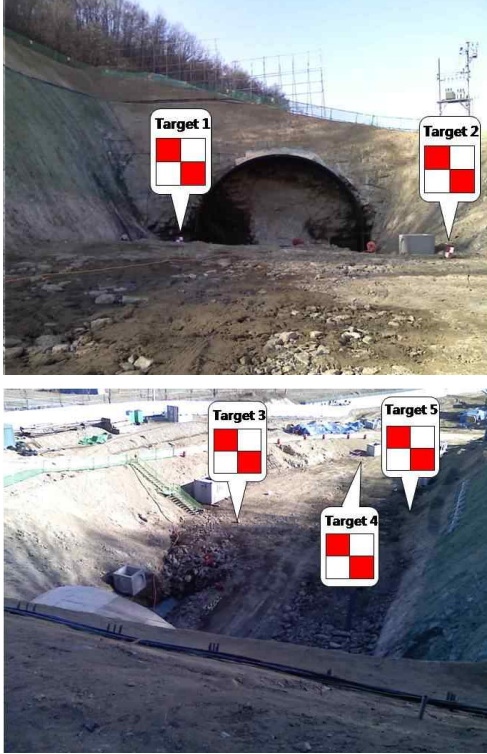


그림 5. 타겟 설치 위치

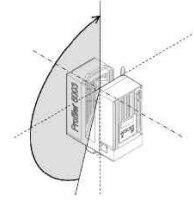
표 2. 토탈스테이션으로 취득한 좌표
- TM좌표(중부원점) (단위 : m)

타겟명	X	Y	Z
Target1	199759.902	412726.702	44.487
Target2	199777.722	412727.312	44.645
Target3	199786.383	412720.649	44.578
Target4	199797.689	412706.777	44.761
Target5	199782.812	412704.778	44.676

타겟은 지상라이다 스캔 때에도 타겟 상의 점군이 취득 가능하도록 배치되어야 하므로 지상라이다를 세울 위치를 미리 정한 후 그 주변에 5개를 설치했다(그림 5 참조).

라이다는 최소한 3개 이상의 타겟이 점군 내 인식 가능하며, 폐색지역이 최소한으로 발생할 지역을 선정하여 총 4곳에 설치하였다. 또한 실험에 사용되는 장비의 구조상 수직아래에서 25°까지는 스캔이 불가능하기 때문에 위에서 아랫방향으로 스캔을 할 때는 이를 고려하여 설치하였다.

V 25 - 180



V 180 - 335

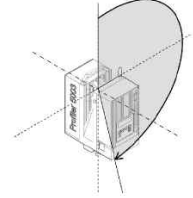


그림 6. profiler 5003 수직방향 스캔가능 각도



그림 7. profiler 5003 설치 위치

3.2 축 변환

3D Affine 변환 행렬을 이용하여 서로 다른 좌표계에 존재하는 점군을 하나의 좌표계로 이동시킬 수 있다.

$$\begin{matrix} x' = x + t_x \\ y' = y + t_y \\ z' = z + t_z \end{matrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{matrix} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \\ z' = z \end{matrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)은 이동변환을 나타내는 행렬이며, $x'=x+tx$ 는 tx만큼 방향으로 이동시켜준다는 것을 의미한다. 식 (2)

는 z축을 중심으로 한 θ 만큼의 회전변환을 나타내는 행렬이다. 회전 방향은 음수방향을 바라보고 반시계 방향이 양의 값을 갖는다. 위의 이동변환 행렬과 x, y, z 축 중심의 회전변환 행렬을 조합하여, 좌표변환 행렬을 만들 수 있다(이병래, 2006).

3.2.1 점군간 정합

각 각의 점군 영상을 정합하는 과정을 실시하였다. 폐색지역이 가장 적게 생기도록 지상라이다의 위치를 옮겨 스캔을 실시하게 되는데, 이렇게 취득한 점군 데이터를 정합을 통해 하나의 영상으로 만들어주는 작업이 필요하다.

각각의 중첩된 점군들을 정합하는 방법으로는 독립적인 방법과 종속적인 방법으로 구분될 수 있는데 (김형태 등, 2009) 본 연구에서는 타겟의 설치가 점군별로 3점씩 안정적으로 확보되고 토탈스테이션에 의한 타겟 위치 측정이 이루어졌으나 작업의 효율성을 위한 중속적 정합을 수행하였다. 또한, 작업의 효율성을 위해 중첩된 점군간의 정합시 편차량을 고려한 최적면을 생성하였다.

한 위치에서 3가지 옵션(High· Middle Resolution, Preview)으로 스캔을 하기 때문에, 이때 얻어진 세종류의 점군간 영상은 같은 상대좌표를 가지게 된다. 따라서 High Resolution으로 취득한 영상을 가지고 동일한 3점을 이용하여 정합을 실시하고 각 각의 점군간 영상에서 식 (1), 식 (2)의 4×4 축 변환행렬을 표 3과 같이 구한 다음, 나머지 Middle Resolution과 Preview 영상의 점군간 정합 시 이 변환행렬을 적용하여 정합을 실시하였다. 정합을 실시 후 정합오차를 구하기 위해서 Polyworks의 Alignment & comparison을 이용하였다. 그림 8은 정합오차를 표현 한 것이다. 그림 8의 오른쪽 정합오차의 양을 표시하는 그래프를 보면 진한 파란색 부분은 10cm 이하의 정합 오차를 표시한다. 그림에서 알 수 있듯이 대부분의 실험 지역은 10cm 이하의 정합 오차를 보여준다.

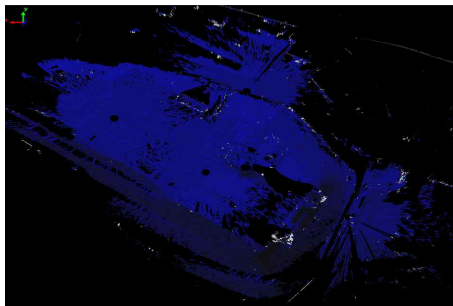


그림 8. 점군간 정합 후 오차분포

표 3. 점군간 정합시 도출한 변환행렬

점군 번호	4×4 변환행렬			
#1	-9.482e-001	3.176e-001	-3.595e-004	-1.392e+001
	-3.176e-001	-9.482e-001	-8.013e-004	-2.031e+001
	-5.954e-004	-6.457e-004	9.999e-001	4.406e-002
	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000	1.000e+000
#2	9.999e-001	1.027e-005	4.459e-005	-1.639e-003
	-1.027e-005	9.999e-001	1.087e-004	-6.392e-004
	-4.459e-005	-1.087e-004	9.999e-001	3.401e-003
	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000	1.000e+000
#3	-9.996e-001	2.952e-002	-2.100e-004	1.546e+001
	-2.952e-002	-9.996e-001	1.591e-004	-1.883e+001
	-2.052e-004	1.652e-004	9.999e-001	4.365e+000
	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000	1.000e+000
#4	-9.447e-001	3.280e-001	2.411e-003	2.555e+001
	-3.280e-001	-9.447e-001	1.424e-003	2.254e+001
	2.744e-003	5.551e-004	9.999e-001	1.165e+001
	0.000e+000	0.000e+000	0.000e+000	1.000e+000

3.2.2 지형좌표

위에서 점군간 정합을 실시하였고, 정합한 영상에 자료취득 시 토탈스테이션으로 측량한 지형좌표를 입력하는 작업을 실시하였다.

정합이 된 High Resolution 영상을 polyworks에서 GEO1~5까지의 점을 만들어 표2의 좌표를 입력한다. 그런 다음, IMInspect의 Align N Pairs of Center

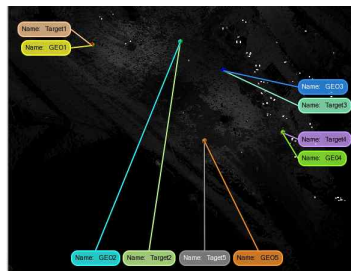
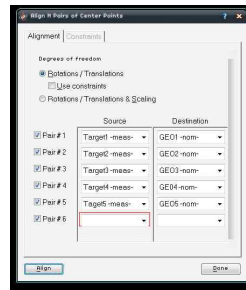


그림 9. Polyworks를 이용한 지형좌표 입력

Points를 이용하여, 타겟 중앙의 점 Target1~5를 GEO1~5와 일치시켜주는 작업을 실시한다(그림 9 참조).

위와 같은 작업을 통해서, 상대좌표 만을 가지고 있던 정합된 영상은, 실제 도면과 같은 지형좌표를 가지게 된다.

위의 작업을 통해 High Resolution 정합영상은 지형좌표를 갖게 되었고, 그 과정에서 4×4 축 변환행렬이 도출된다. 이 행렬을 Middle Resolution과 Preview 정합영상에 적용하여, 두 영상에도 지형좌표를 입력하는 과정을 실시한다(그림 10 참조).

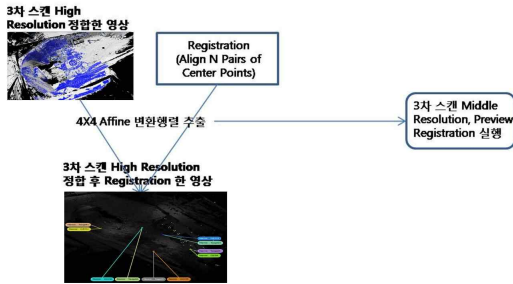


그림 10. 변환행렬을 이용한 지형좌표입력

표 4. 지형좌표 입력시 도출한 변환행렬

해상도	4×4 변환행렬
High	$\begin{bmatrix} 2.021e-001 & 9.793e-001 & -1.118e-002 & 1.998e+005 \\ -9.794e-001 & 2.021e-001 & 2.769e-003 & 4.127e+005 \\ 4.971e-003 & 1.039e-002 & 9.999e-001 & 4.674e+001 \\ 0.000e+000 & 0.000e+000 & 0.000e+000 & 1.000e+000 \end{bmatrix}$

3.3 자료 처리

3.3.1 불필요점 제거

지상라이다를 이용하여 스캔을 했을 때, 실제 원하는 데이터 이외의 노이즈가 획득되는 경우가 많다. 노이즈는 주로 사람, 건설장비, 자재 등이 있다. 항공라이다를 이용하여 광범위한 지역의 데이터를 취득할 시에는 이와 같은 노이즈가 크게 문제가 되지 않지만, 지상라이다를 이용한 소규모 지역의 데이터 취득 시에는 결과 값에 영향을 줄 수 있으므로 제거해 주는 것이 좋다.

3.3.2 표면 최적화

표면 최적화를 하는 목적은 점 밀도를 균등하게 맞춰주는 데 있다. 본 연구에서 실시한 라이다 자료 취득은 폐색지역을 최소화하기 위해 여러 위치에서 스캔을 실시하여 정합을 하기 때문에, 한곳을 두 번 이상 스캔하

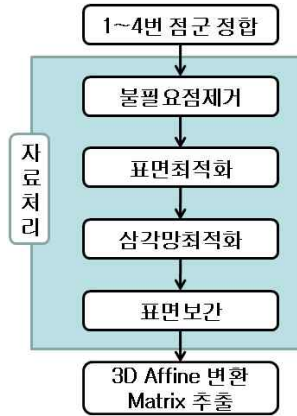


그림 11. 자료처리 실험 흐름도

는 지역이 발생한다. 이렇게 두 번 이상 동일한 곳을 스캔한 점을 제거하기 위해서 일정한 지역을 선정하여 그 범위에 들어오는 동일한 점을 제거해 주는 것이 표면 최적화이다.

표면 최적화를 통해서 정합과정에서 발생하는 오차를 최소화 할 수 있으며, 절토량을 계산하기 위해서는 삼각망을 만들어야 하는데, 이 과정을 최적화 할 수 있다.

표면 최적화를 한 다음, Polyworks에서 Optimize Mesh 메뉴를 사용해서 델로니 삼각망을 구성함으로써 또 한번의 삼각망 최적화 과정을 거친다. 델로니 삼각망으로 지형을 표현하면 최소단위의 삼각형으로 표현 가능하며, 지형의 특징을 잘 살릴 수 있다(공지영 등, 2002).

델로니 삼각망법은 XY평면기준으로 2차원(혹은 2.5차원)적인 최적화 기법이지만, XY평면, YZ평면, ZX평면의 3개의 평면을 기준으로 최적화를 수행하여 최대 삼각망 선분길이(1m 사용)를 정하기 때문에 입체적이고 최적화된 표면을 만들 수 있었다.

TIN(Triangulated Irregular Network, 불규칙 삼각망)은 불규칙하게 분포된 점들의 3차원 좌표를 추출한 후 각 점을 삼각형으로 연결하여 지형을 표현하는 방식이며, 델로니 삼각망 (Delaunay Triangulation)은 세 개의 절점을 연결한 삼각형의 외접원안에 다른 점이 포함되어 있지 않도록 연결된 불규칙 삼각망이다. 이러한 불규칙 삼각망을 이용하여 지형의 경사도와 경사방향 등 지형의 특성을 알 수 있다(공지영 등, 2002).

3.3.3 표면 보간

절토량을 계산하기 위해서는 삼각망을 만들어 한다. 이때 만들어진 삼각망으로 공간을 만들어 부피를 계산함으로써 절토량을 구하는데, 삼각망에 빈 공간이 생기

면 부피를 계산할 수가 없다. 그래서 빈 공간을 채워주는 작업을 해주어야 한다. 지상라이다 스캔 데이터에서 빈 공간은 폐색지역, 노이즈를 제거할 때 주로 생긴다. 이렇게 발생하는 빈 공간은 NURBS 모델을 이용하여, 보정작업을 통해 채워준다.

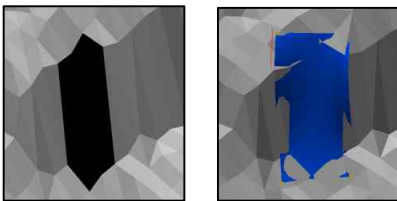
NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline)는 컴퓨터로 곡선을 표현하는 방법 중 하나이며, 현재 가장 발전된 방법이며 토공량 산정에도 적용된 바 있다(문두열, 2000; 류재철, 2002). NURBS는 다른 곡선을 만드는 방식들의 장점을 고루가지고 있다. 시작점과 끝점의 컨트롤 포인트를 지나면서 중간점들에서는 ‘주변’을 지나기 때문에 부드러운 곡률을 갖는다. 컨트롤 포인트 외에도 커브위에 존재하는 edit point라고 하는 별도의 조절점들을 갖기 때문에 직접 커브가 지나는 위치를 조절가능하다. 또, 각각의 컨트롤 포인트마다 weight를 조정할 수 있다.

3.4 대상지역 비교자료 구축

비교자료는 현황측량 및 설계에 의하여 완성된 CAD 자료의 등고선, 표고점 도로구간 라인을 이용하여 절토이전의 표면모델과 절토완료 후의 표면모델을 생성하였다(그림 12 참조). 이때, 절토이전 초기자료는 등고선과 표고점으로부터 아스키 XYZ를 추출한 후 삼각망을 구성하였다.

4. 절토량 계산

위의 실험방법과 같이 절토이전과 절토이후의 캐드 모델과 해상도별 라이다 자료의 볼륨차이를 구하였다.



(a) 표면보간 전 (b) 표면보간 후
그림 12. 표면보간 결과

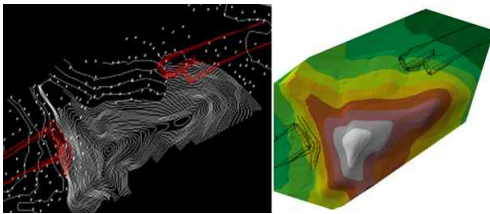


그림 13. 현황측량 CAD 모델링

평면 바운더리를 그림 14와 같이 가로×세로를 약 62m×51m로 선정하였다.

바운더리를 설정한 후 볼륨차를 통해서 지상라이다 스캔 시까지의 절토량과 앞으로 수행해야 할 절토량을 계산했다. 그림 15는 절토량을 구한 방법에 대한 모식도이다.

그림 15에서 알 수 있듯이, 본 연구에서는 지상라이다 스캔을 실시한 시점을 기준으로 절토전과의 바운더리 지역 내의 볼륨차이를 구하여 실시한 절토량을 계산했으며(표 5 참조), 절토완료 후와의 볼륨차이를 구하여 예상 절토량(앞으로 실시해야할 절토량)을 계산했다(표 6 참조). 계산결과는 해상도별로 다음 표 5, 6와 같다.

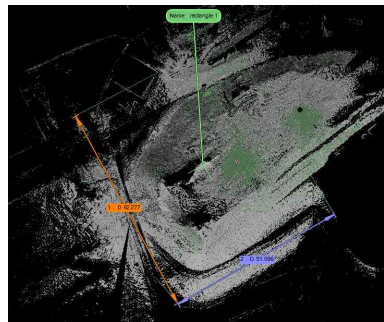


그림 14. 절토량을 구하는 영역 설정

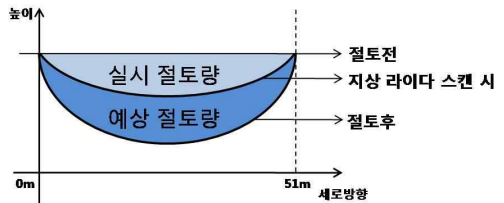


그림 15. 절토량 계산 방법 모식도

표 5. 해상도별 절토량 계산 결과_1

- 절토전 캐드자료와 비교 (단위 m³)

Preview	Middle Resolution	High Resolution
-11067.45	-10054.33	-9982.02

표 6. 해상도별 절토량 계산 결과_2

- 절토후 캐드자료와 비교 (단위 m³)

Preview	Middle Resolution	High Resolution
+552.07	+493.56	+484.87

5. 결 론

참고문헌

지상라이다에 의한 절토량 산정을 할 수 있었으며, 실험지역에 대한 절토 이전 현황도를 3차원 캐드모델링 한 자료와 절토 영역을 비교한 결과, 스캔해상도가 높아질수록 절토된 양이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 또한 절토 이후 계획도를 3차원 캐드모델링 한 자료와 절토 영역을 비교한 결과, 스캔해상도가 높아질수록 절토된 양이 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 해상도가 낮아질수록 지형의 급격한 변화를 반영하기 힘들기 때문에 나타난 결과이다.

지형의 변화를 가장 잘 반영한 High Resolution에 의한 결과가 가장 신뢰도가 높다고 가정했을 때, 표 7, 8과 같은 High Resolution을 기준으로 한 결과값 차이를 나타낼 수 있다.

표 7. 해상도별 절토량 계산 결과 차이_1

- 절토전 캐드자료와 비교

Preview	Middle Resolution	High Resolution
10.9%	0.72%	-

표 8. 해상도별 절토량 계산 결과 차이_2

- 절토후 캐드자료와 비교

Preview	Middle Resolution	High Resolution
14.0%	1.9%	-

표 7, 8에서 알 수 있듯이 Preview는 High Resolution과 비교했을 때 10% 이상의 차이가 나기 때문에 그 결과를 절토량 산정에 사용하기에 무리가 있다. 반면, Middle Resolution의 경우 1% 안팎의 차이가 발생하고, 취득데이터의 크기나 처리시간에 있어서 High Resolution에 비해 훨씬 유리하였기 때문에, 자료처리 방법의 개선을 통해서 그 결과 값의 차이를 줄일 수 있다면, 더 쉽고 빠르게 절토량 결과를 구할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 해상도별 비교 실험시 고해상도 자료를 기반으로 한, 축 변환을 다른 해상도 영상에도 적용하여 실험이 용이 하였으며 실험지역의 대용량 자료 처리 및 전체적 형상 파악이 용이하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업 - 지능형국토정보기술혁신 사업과제의 연구비지원(07국토정보C04)에 의해 수행되었습니다.

1. 강준목, 윤희천, 민관식, 위광재, 2006, "LiDAR 데이터를 이용한 토공량 산정", *한국측량학회 춘계학술발표회 논문집*, 한국측량학회, pp.533-540.
2. 공지영 강현주, 윤식준, 2002, "지표면 모델링 및 폴리곤 검색기법에 관한 연구", 2002년 추계학술대회 논문집, 한국시물레이션학회, pp.163-170.
3. 김진수, 서동주, 이종출, 2004, "수치사진측량기법을 이용한 토량환산계수 산정", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제22권, 4호, pp.339-347.
4. 김형태, 편무옥, 박재신, 강민수, 2008, "건물 실내 공간 모델링을 위한 지상라이다 영상 정합 방법에 따른 정확도 분석", *대한원격탐사학회지*, 대한원격탐사학회, 제24권, 4호, pp.333-340.
5. 류재철, 이승훈, 문두열, 2002, "스플라인 곡면을 이용한 토공량 결정에 관한 연구", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제20권, 1호, pp.85-92.
6. 문두열, 2000, "Spline 보간법을 이용한 토공량 결정에 관한 연구", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제 18권, 3호, pp.305-313.
7. 박운용, 정창식, 이동락, 배정호, 2003, "RTK GPS 측량에 의한 토공량 산정과 DTM 자료 취득에 관한 연구", *한국측량학회 춘계학술발표회 논문집*, 한국측량학회, pp.119-122.
8. 이병래, 강현철, 김용규, 김학수, 2006, *컴퓨터 그래픽스 WITH OPENGL*, 홍릉과학출판사.
9. 이재기, 정성혁, 이계동, 2006, "디지털 사진측량 및 3D 레이저스캐너를 이용한 토량환산계수의 산정", *한국측량학회지*, 한국측량학회, 제24권, 2호, pp.227-234.
10. 이종출, 김희규, 김대현, 노태호, 2003, "수치사진측량을 이용한 토공량 산정 적용", *한국측량학회 춘계학술발표회 논문집*, 한국측량학회, pp.215-218.
11. Besl, P. J. and McKay, N., 1992. "A Method for Registration of 3-D Shapes", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.239-256.
12. Christoph Dold, Claus Brenner, 2006, "Registration of Terrestrial Laser Scanning Data Using Planar Patches and Image Data", *Symposium of Commission 5 symposium*, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp.78-83.
13. Wolfgang von Hansen, 2006, "ROBUST AUTOMATIC MARKER-FREE REGISTRATION OF TERRESTRIAL SCAN DATA", *Symposium of Commission III*, International Society of Photogrammetry and Remote Sensing.