

LiDAR 데이터를 이용한 토공량 산정

The Determination of Earthwork Volume using LiDAR Data

강준목¹⁾ · 윤희천²⁾ · 민관식³⁾ · 위광재⁴⁾

Kang, Joon Mook · Yoon, Hee Cheon · Min, Kwan Sik · We, Gwang Jae

¹⁾ 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail:jmkang@cnu.ac.kr)

²⁾ 충남대학교 공과대학 토목공학과 조교수(E-mail:hcyoon@cnu.ac.kr)

³⁾ 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정(E-mail:geodesy@naver.com)

⁴⁾ 성균관대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정(E-mail:gjwe@hist.co.kr)

Abstract

In recent years, civil-engineering work is desired the terrain information to be more efficient in earthwork volume calculation. One method for collecting elevation data is LiDAR. Lidar data was used to produce rapidly an accurate digital elevation model of the terrain, compared with the conventional ground surveys, photogrammetry, and remote sensing. Raw Lidar data is combined with GPS positional data to georeference the data sets. Lidar data is edited and processed to generate surface models, elevation models, and contours. Here we can either create a Tin Volume Surface or a Grid Volume Surface. Triangulated Irregular Network(TIN) has complex data structure, but it can describe well terrain surface features. As we have seen, we search the efficiency for earthwork volume calculation using Lidar data. One conclusion we can draw from this study is that Lidar data is more accurate result than digital map in the calculation of earthwork volume.

1. 서 론

일반 토목공사에서 토공 작업은 중요한 부분을 차지하며 특히 토공량의 정확한 산정은 공기 및 공사비에 직간접으로 영향을 줌으로 그 산정 방법 및 정확도에 신중을 기하여야한다. 그러므로 본 연구에서는 보다 정확한 토공량 산정을 위하여 최근 도입되어 측량에 이용되는 LiDAR(Light Detection and Ranging)시스템의 데이터를 활용해 좀 더 정밀한 수치표고모델(DEM : Digital Elevation Model)을 만들어 수치지형도와 비교 평가 하고자 한다. LiDAR 기술은 고품질의 3차원 정보가 필요한 분야에서 신속하고 정확하게 지표면에 대한 표고정보를 취득할 수 있어 기존의 측량방법을 대체하고 있으며, LiDAR는 선형적인 지형에 해당하는 도로, 철도와 같은 노선측량에 활용되고, 또한 정밀한 수치표고모델이 생성 가능하기 때문에 대규모 산림지역이나 해안지역 및 도로 설계를 위한 토공량 계산 등의 기본 자료로 활용도가 매우 높다. 왜냐하면 LiDAR 자료를 이용할 경우 지형에서 지물 및 수목의 추출이 가능하기 때문에 순수한 지표면의 3차원 모형 생성이 가능하고 이를 기반으로 토공량 산정 및 토공 계획을 수립할 수 있다. 지형에서의 표고자료 획득 방법으로 현지측량, GPS(Global Positioning System)측량, 사진측량, LiDAR등의 방식이 이용되고 있으며, 현지측량, GPS측량 및 사진측량 등은 많은 시간과 비용이 소요되고 비접근 지역의 표고자료를 획득하기가 어렵다는 단점이 있으나 LiDAR는 지상의 표고자료 획득에 있어서 최근 이들 측량의 대안으로 새롭게 부각되는 기술이다. LiDAR 체계는 항공기에 장착된 짧은 파장의 레이저 빔을 지상으로 보내어 반사되는 특성을 이용하는 능동 원격탐사로 식물과 지표면에서 반사되어 오는 레이저를 함께 기록함으로써 식물의 높이와 지표면의 정확한 표고를 측정할 수 있는 특성을 가지고 있다. 국내에서는 국토지리정보원을 중심으로 LiDAR를 이용한 DEM 구축과 관련하여 연

구가 활발히 수행되고 있으며, 광범위한 지역을 대상으로 기존의 항공사진 및 위성영상 등에서 추출하던 지형공간정보를 단시간 내에 경제적으로 취득할 수 있다는 장점 때문에 건설공사 및 지형도 제작의 분야에 활용하기 위한 연구가 추진되고 있다. 연구 결과 LiDAR가 다른 측량기법에 비해 표고 정확도와 비용 측면에서 우세한 것으로 나타나고 있으며 공공측량 및 일반측량에 활용하기 위한 연구를 통해 수직위치에 대한 오차가 축척 1:1000 수치지형도의 정확도 $\pm 0.33m$ 기준을 만족시키는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 LiDAR의 특성을 이용하여 정밀한 수치표고모델을 생성하여 연구대상 지역의 정확한 토공량을 산정하고 기존의 수치지형도와 비교 분석함으로써 LiDAR에 의한 토공량 산정의 효용성 및 타당성을 입증하고 건설공사의 토공계획 및 토목시공에서의 활용 가능성을 제시하고자 한다.

2. LiDAR

2.1 기본원리

LiDAR 시스템의 구성 체계는 GPS, IMU(Inertial Measurement Unit), 레이저 스캐너, 제어부와 비행기 항법장치 등으로 구성 되어 있으며 레이저 스캐너의 경우 거리측량부와 스캐닝부분으로 나누어지고 이들은 제어부를 통해 통합 운영된다. GPS 및 IMU에 의하여 센서의 위치와 자세를 결정하고 레이저 스캐너에 의해 센서와 지표면과의 거리를 관측하여 지표면 상의 표고점에 대한 3차원 좌표를 결정하는 것이 LiDAR의 위치결정의 기본원리이다. 또한 시스템에는 지표의 모델링 과정과 형상을 분류하는 디지털 이미지를 얻기 위한 디지털 카메라를 가지고 있다.

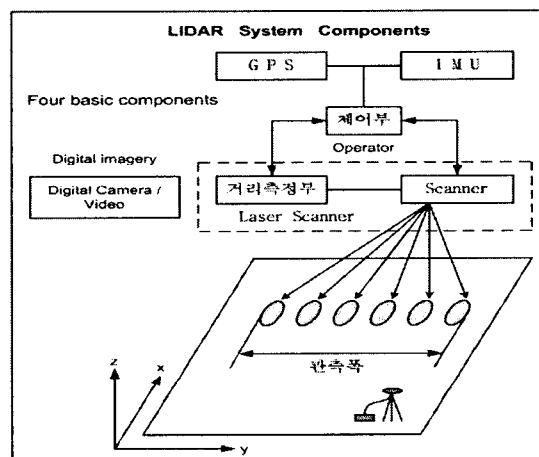


그림 2-1 LiDAR 측량 시스템의 구성

2.1.1 LASER 거리측량

레이저에 의한 거리 관측에는 크게 펄스를 이용한 방법과 지속적으로 방사되는 레이저 광선인 CW(Continuous Wave)를 이용한 위상차 방법이 있으며, LiDAR 측량에서는 주로 펄스 레이저를 사용하고 있다. 펄스 방식을 사용하는 경우 거리를 관측하는 가장 직접적인 방법은 펄스가 방사되고 수신되는 사이의 왕복시간을 관측하는 것으로 레이저 펄스의 왕복시간은 식 (1)과 같고 거리의 해상도 ΔL 은 시간측정의 해상도 Δt_L 에 정비례하며 식 (2)와 같이 유도 된다. 이때 거리의 정확도(σ_R)는 펄스 생성시간 (Generation Time), S/N 비율, 관측비율 등에 의해 식 (3)과 같이 결정된다. 일반적으로 사용되는 LiDAR 체계에서 거리관측의 정확도는 수 cm 단위를 가진다. 여기서 L 은 거리관측부와 지표면 객체간의 거리이고, c 는 빛의 속도, t_{rise} 는 펄스 생성시간, S 는 광다이오드 전류의 신호강도, N 은 광다이오드와 증폭기의 열잡음 강도를 나타낸다.

$$\text{레이저펄스의 왕복시간} : t_L = 2 \frac{L}{c} \quad (1)$$

$$\text{거리의 해상도} : \Delta L = \frac{1}{2} c \Delta t_L \quad (2)$$

$$\text{거리의 정확도} : \sigma_R = \frac{c}{2} t_{rise} \frac{1}{\sqrt{S/N}} \quad (3)$$

2.1.2 LASER 스캐닝

LiDAR 시스템에서 스캐닝의 의미는 거리관측용 레이저를 특정한 형태에 따라 굴절시켜 높은 점밀도로 대상물체의 표면을 샘플링 하는 것이라고 할 수 있으며, 레이저 광선은 비행방향을 가로질러 이동하여 측량 대상지역을 주사하고 탑재기인 비행기의 진행방향에 의해 반복 지상 점들의 데이터를 관측하여 디지털 형태로 저장한다. 스캔 방향의 점간거리, 비행 방향의 점간거리 및 스캔 폭 (SW)은 아래식 식 (4), 식(5), 및 식(6)에 의하여 구해진다. 여기서 θ 는 스캔각, θ_{inst} 는 순간스캔각, $\overline{\theta_{inst}}$ 는 순간 스캔 각속도(rad/s), h 는 비행고도, PRF는 펄스의 반복 횟수, v 는 비행기의 지상속도, t_{sc} 는 한 스캔 방향의 관측에 소요되는 시간으로 진동거울의 왕복주기를 나타낸다.

$$\text{스캔방향의점간거리} : dx_{acrossinst} = \frac{h}{\cos^2(\theta_{inst})} \frac{\overline{\theta_{inst}}}{PRF} \quad (4)$$

$$\text{비행방향의 점간거리} : dx_{along} = v t_{sc} \quad (5)$$

$$\text{스캔 폭} : SW = 2 h \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (6)$$

2.1.3 GPS 및 IMU

GPS장비는 LiDAR 시스템에 시간 및 위치 정보를 제공하며 측량시 사용되는 수신기로는 2주파 수신기를 사용하고 데이터 처리는 항공기에 탑재한 수신기 및 지상의 수신기로 항법용 GPS에서 발생하는 부정확성을 교정하기 위해 On-The-Fly(OTF) DGPS를 사용하여 3차원 좌표로 처리되며 현재 사용되는 장비로는 기지국이 있는 곳에서 수직위치를 최대 $\pm 0.15\text{m}$ 의 정확도를 확보 할 수 있다.

일반적으로 레이저 장치는 항공기가 비행하는 동안에 지표면과 수직이 되도록 고정되어 있으나 비행 중 발생하는 다양한 항공기의 자세(roll, pitch and heading)변화로 인하여 레이저빔은 수직으로 주사되지 않게 된다. 따라서 고정밀 자이로스코프(gyroscope)를 이용한 IMU는 항공기의 자세관측에 사용되며 이 자세 데이터는 GPS 위치정보와 함께 LiDAR 점 데이터의 3차원 좌표결정에 이용된다.

2.1.4 LiDAR 위치결정

항공레이저측량에서 지상점의 위치결정을 위해서는 검정과정을 거쳐 LiDAR 시스템 구성요소간의 상호 위치 및 자세관계가 규명되어야 하나 검정과정은 현재 표준화된 공정은 없으며 장비제조업체에서 각각 독자적인 작업방법에 의해 조정을 수행한다. 정밀하게 관측된 거리를 이용하여 기준좌표계에 대한 지표면 좌표는 식 (7)을 이용하여 계산할 수 있으며 레이저 스캐너의 위치, 레이저 광선의 순간스캔각을 포함한 자세 및 목표물까지의 거리등의 관측값을 이용하여 표고점의 좌표를 식 (8)에 의하여 계산할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{pmatrix} + (R_{IMU} \cdot R_{IMU}^{LS}) \cdot \begin{pmatrix} l_X \\ l_Y \\ l_Z \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서,

(X, Y, Z) : 지상점의 위치

(X_0, Y_0, Z_0) : GPS 장비에 의한 레이저 스캐너의 위치

(X_G, Y_G, Z_G) : 좌표계 변환에 의한 GPS 위치 오차

R_{IMU} : 기준좌표계와 IMU간의 회전행렬

R_{IMU}^{LS} : 레이저 스캐너와 IMU간의 회전행렬

(l_X, l_Y, l_Z) : 레이저 스캐너에서의 레이저 광선 벡터(위치벡터)를 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{LS} \\ Y_{LS} \\ Z_{LS} \end{pmatrix} + D \begin{pmatrix} \cos \kappa_L & -\sin \kappa_L & 0 \\ \sin \kappa_L & \cos \kappa_L & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin \phi_L \\ \sin \omega_L \\ (1 - \cos \omega_L)(1 - \cos \phi_L) \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서,

(X_{LS}, Y_{LS}, Z_{LS}) : 레이저 스캐너의 위치

$(\omega_L, \phi_L, \kappa_L)$: 레이저 광선의 순간스캔각을 포함한 자세

D : 목표물까지의 거리를 나타낸다.

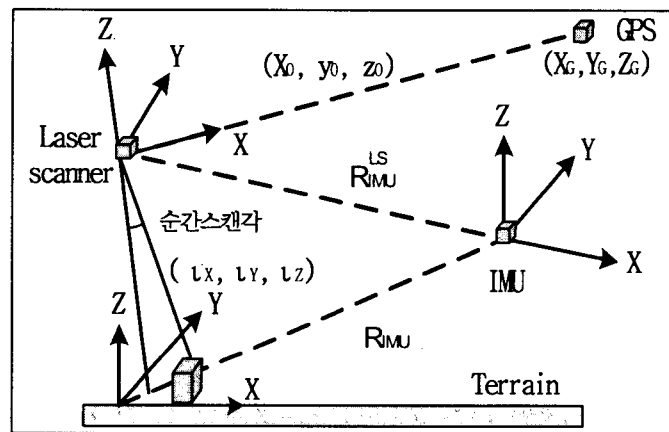


그림 2-2 LiDAR 구성요소의 위치 및 자세

2.2 DEM 구축

수목이 울창한 산림지역에서 일부의 광선은 지상물에 반사되고 나머지 광선은 투과성이 강하여 통과하기 때문에 다른 지상물에 반사되는 현상이 발생하는데 이로 인해 한 방향에 대하여 반사광이 시간차를 두고 관측되는 현상을 볼 수 있으며 이를 다중에코(multi-echo)라고 한다. LiDAR 자료에는 하나의 지상점에 대해 두 개 이상의 표고정보가 기록될 수 있고 이를 이용하여 수목과 같은 지상물을 포함한 DSM(Digital Surface Model)과 지상물을 포함하지 않은 DEM(Digital Elevation Model)을 동시에 추출할 수 있으며 수목 지역의 LiDAR 자료로부터 정밀한 수치표고모형을 생성하기 위해서는 고밀도 스캔율, 저속의 비행, 좁은 주사각 및 지상까지 침투할 수 있는 강한 레이저 펄스를 가져야 한다. 그림 2-3은 레이저의 다중에코 특성을 나타내고 있으며 그림 2-4는 LiDAR 자료로부터 생성된 수치표고모형의 예를 보여주고 있다.

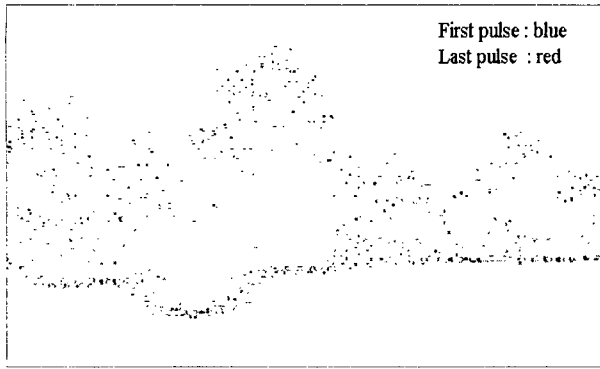


그림 2-3 레이저의 다중에코 특성

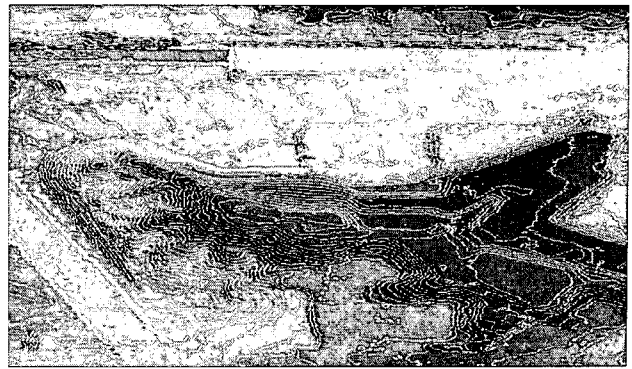


그림 2-4 LiDAR 자료로부터 생성된 수치고도모형

2.3 토공량 산정

수치표고모델을 이용한 토공량 산정 방법으로는 관측점의 좌표값으로부터 면적을 구하는 좌표법(Volumes by coordinate method)과 불규칙한 높이의 경우 세 구간을 하나로 묶어 면적을 구하는 심프슨법칙(Simpson's formula)을 사용하여 단면의 면적을 구할 수 있으며, 토공량의 체적은 일반적으로 양 단면평균법(End area formula), 중앙단면법(Middle area formula), 각주공식(Prismoidal formula)등에 의하여 간단히 구할 수 있다.

3. 연구의 방법

3.1 연구대상지역

토공량 산정을 위한 LiDAR 데이터 취득의 연구 대상지로 선정된 곳은 대전광역시 유성구 궁동 일원의 독립된 야산으로 주변은 평지로 이루어졌으며 평지로부터 정상까지의 표고차는 약 37m 이고 남동 방향 및 북서쪽의 경사는 비교적 완만한 모습을 보이고 있으며, 남서 및 북동쪽은 가파른 경사를 보이고 있다. 본 연구를 수행하기 위해 우선 LiDAR 측량을 실시하여 획득한 원시 데이터와 해당지역의 1:1000 수치지형도 및 항공사진측량 사진을 확보하였다. 그림3-1은 대상지역의 항공사진 및 1:1000 수치지형도를 보여주고 있다.

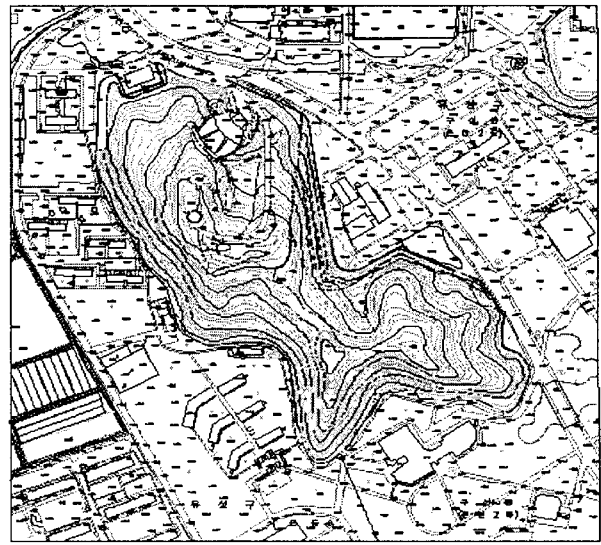
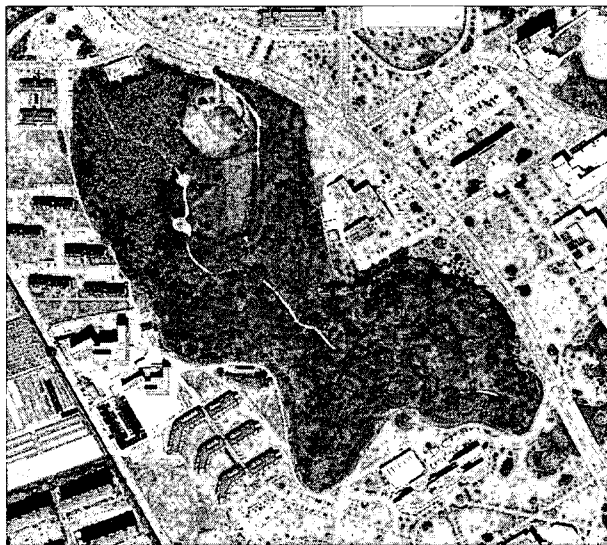


그림 3-1 대상지역의 항공사진 및 1:1,000 수치지형도

3.2 사용장비

LiDAR 데이터 취득을 위하여 사용된 항공레이저측량 장비는 캐나다 Optech사의 ALTM 30/70 모형으로 레이저 펄스 주사율이 최대 70kHz이며 정확도는 비행고도 약 1,000m 에서 관측될 경우 수직 ±15cm, 수평 ±50cm의 정확도를 갖는 장비로 하나의 펄스로 최대 4회의 반사파를 구할 수 있어 산림지대에서 투과성이 특히 우수한 것으로 나타났다. 또한 이 장비는 Leica사의 RC30 항공사진측량 카메라의 플랫폼 요소를 공유하며, 항공용 GPS수신기와 관성항법체계 및 파일럿 디스플레이 장치를 갖추고 있다. 표 3-1 및 그림 3-2는 Optech사의 ALTM 30/70 모형의 세부사양과 항공레이저측량기 사진 및 센서를 나타내고 있다.

표 3-1 Optech사의 ALTM 30/70 모형의 세부사양

비행고도	200 ~ 3,000m
평면 정확도	1/2,000×고도(1σ)
표고 정확도	< 15cm at 1,200m(1σ) < 25cm at 2,000m(1σ) < 35cm at 3,000m(1σ)
반사 해상력	1cm 이상의 객체
반사파 감지력	last pulse를 포함한 4 개의 반사파
반사 분해력	12 bit
스캔 주기	최고 70Hz
스캔각	0 ~ ±25° (±1° 씩 증감)
주사폭	(0 ~ 0.93) × 비행고도
레이저 펄스 주사율	33kHz (최고 비행고도가 3km 이내) 50kHz (최고 비행고도가 2km 이내) 70kHz (최고 비행고도가 1.5km 이내)

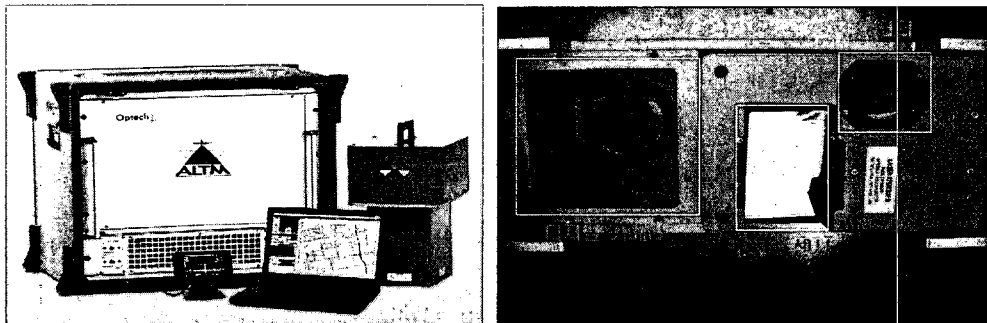


그림 3-2 ALTM 30/70 항공레이저측량기(좌) 및 센서하단(우)

3.3 DEM 추출 및 토공량 계산

토공량 산정을 위한 등고선의 추출은 상용소프트웨어인 TerraModel을 이용하여 원시 LiDAR 데이터로부터 등고선 추출에 필요한 대상 지역이 포함된 주변의 데이터를 분류하여 DSM을 생성하였으며, 토공량 산정에 필요한 독립된 야산의 DEM은 1:1000 수치지도 및 1:5000 수치지도와의 면적 및 토공량 비교를 위하여 1m와 5m 간격으로 DEM을 추출하여 보았다. 등고선을 추출하는 방법은 먼저 원시 Lidar 데이터로부터 TIN(Triangulated Irregular Network)을 형성하고 보간기법을 이용하여 동일한 높이의 점들을 찾아 이어주는데 본 연구에 사용된 TerraModel은 B-spline 보간법을 적용하여 보간함수들의 가장 완만한 결과물을 산출하여 등고선을 1m 및 5m 로 추출 하였다. 그림 3-3 및 그림 3-4는 대상지역의 세

부적인 토공량 산정에 있어 입체적 모델링을 위한 방향에 따른 종단도 및 1m 등고선을 보여주고 있으며, 그림 3-5 및 그림 3-6은 대상지역의 LiDAR 데이터로부터 생성된 DSM 및 B-spline 보간법을 이용하여 추출한 5m 등고선을 나타내고 있다. 또한, TIN 및 DEM을 그림 3-7 및 그림 3-8에 나타내었다.

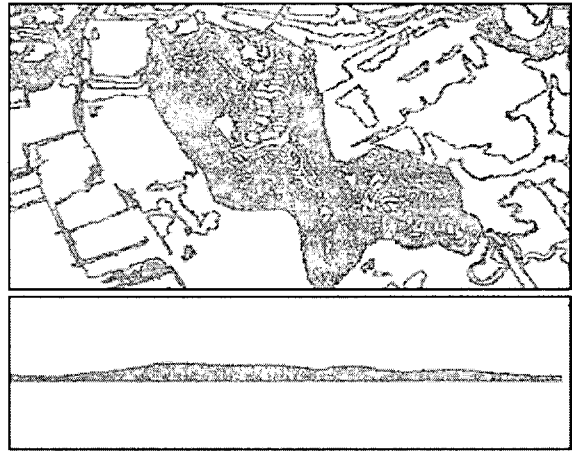
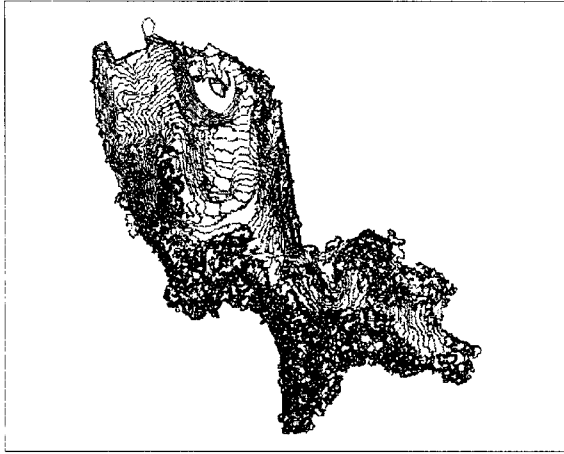


그림 3-3 대상지역 1m 등고선(1:1000수치지도) 그림 3-4 대상지역 종단도

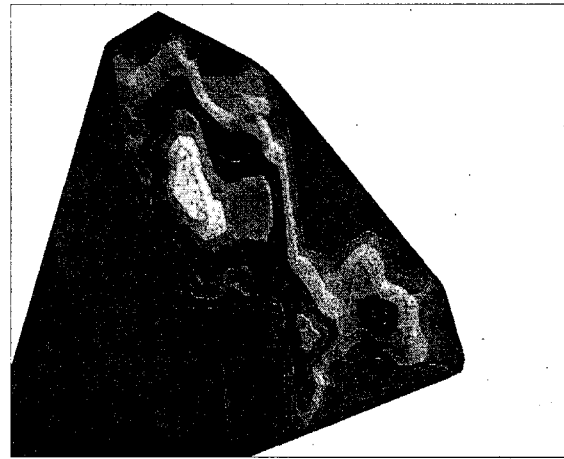


그림 3-5 대상지역의 LiDAR 데이터로부터 생성된 DSM 그림 3-6 B-spline 보간법을 이용하여 추출한 5m 등고선

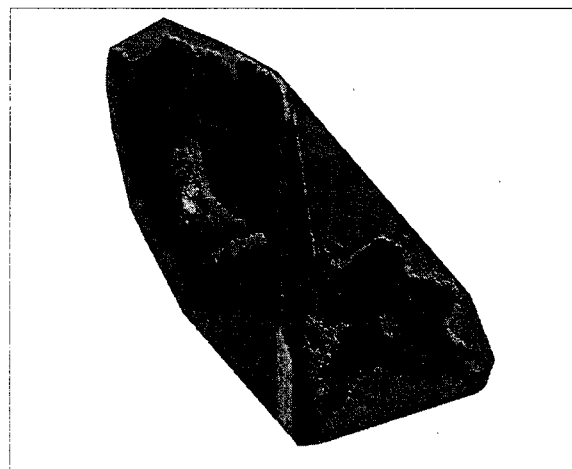


그림 3-8 대상지역 1m DEM(TerraModel) 그림 3-7 대상지역 1m TIN(ArcView)

4. 결 론

본 연구는 LiDAR 데이터를 TerraModel을 이용하여 1m 간격의 등고선을 생성하여 기존의 1:1000 수치지도상의 등고선과 비교하고 연구지역의 토공량을 산정하여 정량적 비교를 수행해 보았다. 연구결과 LiDAR 데이터로부터 추출된 등고선과 수치지도상의 등고선은 차이가 있었으며, 이는 등고선 추출 과정의 차이로 수학적 방법 및 B-spline 보간법을 이용하여 추출한 LiDAR 데이터가 객관성 및 정확도 면에서 수치지형도 보다 유리할 것으로 사료된다. LiDAR 데이터에서 추출된 면적 및 토공량은 동일 지역의 수치지형도에서 추출된 값에 비하여 -6.5%(면적), -8%(토공량) 정도 감소를 보이고 있으며 이는 향후 토공량 산정의 중요한 자료가 될 것으로 사료된다. 또한 대상지역을 입체적으로 모델링 하기위한 DSM의 생성, 중단 및 횡단면도의 생성도 LiDAR 데이터로 표현이 가능함으로 3차원 입체적 지형에서의 토공량 산출이 가능 할 것으로 사료되는 바이다.

참고문헌

- 강준목, 강영미, 이형석 (2004), 도심의 정밀 모니터링을 위한 LiDAR 자료와 고해상영상의 융합, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 한국측량학회, pp. 383-388.
- 최운수, 한상득, 위광재 (2002), 도화원도를 이용한 LiDAR 데이터의 정확도 평가 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제20권, 제2호, pp. 127-136.
- 류재철, 이승훈, 문두열 (2002), 스플라인 곡면을 이용한 토공량 결정에 관한 연구, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제20권, 제1호, pp. 85-92.
- 조우석, (2003), 레이저 스캐닝 데이터를 이용한 수치표고모델 생성, 인하대학교
- 서정현, 조우석, 박홍기, 임삼성 (2000), 항공레이저측량을 이용한 지형정보 제작에 관한 연구, 국토지리정보원
- 건설교통부 국토지리정보원 (2005), 다차원 공간정보구축에 관한 연구.
- 이강원 (2005), GIS 다중자료를 이용한 재해 탐지체계에 관한 연구, 충남대 대학원 박사학위논문
- Peter Doucette and Kate Beard. (2000), Exploring the Capability of Some GIS Surface Interpolators for DEM Gap Fill, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66, No. 7, pp. 881-888.
- Vincent Tao, C., Yong Hu. (2001), A review of post-processing algorithms for airborne LiDAR data, proceeding of the ASPRS Annual Conference, April, pp. 23-27
- Sithole, G., Vosselman, G. (2003), Test on extracting DEMs from point clouds: a comparison of existing automatic filters, ISPRS Technical Report, pp. 93-99
- Wehr, A. and Lohr, U. (1999), Airborne Laser Scanning - an introduction and overview. ISPRS Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54 (NOS. 2-3), PP. 68-82
- Yong Hu, C. Vincent Tao (2004), hierarchical recovery of DTM from single and multiple returns LiDAR data, Proceedings of the ASPRS Annual Conference, April