

# 스캔 라인 기반의 인접 관계를 이용한 항공레이저측량 자료의 필터링

## Filtering Airborne Laser Scanning Data by Utilizing Adjacency Based on Scan Line

이정호<sup>1)</sup> · 염준호<sup>2)</sup> · 김용일<sup>3)</sup>

Lee, Jeong Ho · Yeom, Jun Ho · Kim, Yong Il

### Abstract

This study aims at filtering ALS points into ground and non-ground effectively through labeling and window based algorithm by utilizing 2D adjacency based on scan line. Firstly, points adjacency is constructed through minimal search based on scan line. Connected component labeling algorithm is applied to classify raw ALS points into ground and non-ground by utilizing the adjacency structure. Then, some small objects are removed by morphology filtering, and isolated ground points are restored by IDW estimation. The experimental results shows that the method provides good filtering performance(about 97% accuracy) for diverse sites, and the overall processing takes less time than converting raw data into TIN or raster grid.

Keywords : Filing, Lidar, Adjacency, Morphology, Labeling, Scanline

### 초 록

본 연구는 스캔라인 기반의 2차원 이웃 관계를 활용하여 레이블링 알고리즘과 윈도우 기반의 알고리즘을 함께 적용함으로써 항공레이저측량 자료의 지면점과 비지면점을 효과적으로 분리하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 스캔라인 구조를 바탕으로 최소의 탐색을 통해 점들의 인접 관계를 구축하고, 구축된 인접관계를 기반으로 연결성분 레이블링 알고리즘을 적용하여 항공레이저측량 자료를 지면점과 비지면점으로 분리하였다. 그리고, 모폴로지 필터링을 통해 작은 개체를 추가로 제거하고 거리반비례 추정을 통해 고립 지면점을 복원하여 정확도를 향상시켰다. 다양한 특성을 나타내는 지역에 적용하고 평가한 결과 대부분의 점들이 올바르게 분리 되었고 약 97%의 전체 정확도를 도출하였으며, 인접관계 구축 및 데이터 처리 시간이 TIN 또는 격자 구조 자료 구축 시간에 비하여 적게 소요되었다.

핵심어 : 필터링, 라이다, 인접 관계, 모폴로지, 레이블링, 스캔라인

## 1. 서 론

항공레이저측량 시스템은 날씨, 계절, 시간 등에 영향을 적게 받는 능동센서이고 높은 정확도의 3차원 좌표정보를 제공하기 때문에 수치표고모델 제작, 건물 추출, 도시 모델링 등에 활용되고 있다. 항공레이저측량 자료는

지면과 비지면에 대한 점들이 함께 존재하므로 건물, 수목, 지형 등과 같은 의미 있는 정보를 추출하기 위해서는 지면점들과 비지면점들을 분리하기 위한 필터링 또는 세그멘테이션이 선행되어야한다. 항공레이저측량 자료는 3차원 공간상에 불규칙하게 분포되어있는 포인트 구조이므로 필터링이나 세그멘테이션 과정에 있어서 정확도뿐

1) 정희원 · 서울대학교 건설환경시스템 공학부 박사과정(E-mail : ilome79@snu.ac.kr)

2) 학생희원 · 서울대학교 건설환경시스템 공학부 박사과정(E-mail : salt2525@snu.ac.kr)

3) 교신저자 · 정희원 · 서울대학교 건설환경시스템 공학부 교수(E-mail : yik@snu.ac.kr)

만 아니라 연산 효율성이 고려되어야 한다.

필터링 기법을 데이터 처리 방식에 따라서 구분해보면 항공레이저측량 자료의 원 데이터를 그대로 처리하는 방법(Elmqvist, 2002; Vosselman, 2000), 정규 격자를 이용하는 방법(Kilian et al., 1996; 최연웅과 조기성, 2005; 유환희 등, 2005; 최승식, 2007; Meng et al., 2009), Triangulated Irregular Network (TIN) 구조를 바탕으로 하거나(Axelsson, 2000; Vosselman and Mass, 2001), 가상 격자를 사용하는 방법(좌윤석, 2003), 인접성 그래프 구조를 이용하는 방법(이임평, 2006) 등이 있다.

위에서 언급한 대부분의 방법들은 2차원 이웃 영역을 찾고 저장하기 위하여 많은 계산과 저장 공간이 소모되거나, 데이터 구조 구축을 위한 전처리 연산에 많은 시간을 필요로 한다(Shan and Sampath, 2005). 격자 방식의 대표적인 기법인 모폴로지 필터링을 이용하는 연구에서는 정확도를 향상시키기 위하여 윈도우의 크기를 늘려가며 반복 연산을 한다(Zhang et al., 2003; Chen et al., 2007).

이러한 이유로 항공레이저측량 자료의 스캔 라인을 따라서 1차원 세그멘테이션을 한 후, 이웃 스캔라인의 세그먼트들을 병합하거나(Patane and Spagnuolo, 2002), 스캔라인 구조에 기반하여 1차원 레이블링 연산을 양방향으로 수행하는 연구도 있다(Shan and Sampath, 2005). 이와 같은 방법들은 빠른 연산이 가능하지만, 데이터들의 2차원 관계를 효과적으로 반영하지 못한다는 한계가 있다. Han et al. (2007)은 탐색공간을 일부 스캔라인으로 제한하고 메모리 효율성을 고려한 세그멘테이션 알고리즘을 제안하였는데, 일부 작은 개체가 오분리 되었다. 위 방법들은 1차원 이웃 관계만 정의 되므로 적용할 수 있는 알고리즘이 제한적이며, 특히 윈도우를 이용하는 알고리즘을 적용하기 위해서는 이웃 점들을 찾기 위해 많은 연산이 필요하다.

이에 본 연구에서는 스캔라인을 기반으로 데이터들의 2차원 이웃 관계를 활용하여 레이블링 알고리즘과 윈도우 기반의 알고리즘을 적용하여 지면점과 비지면점을 효과적으로 분리하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 스캔라인 구조를 바탕으로 최소의 탐색을 통해 점들의 인접 관계를 구축하고, 인접 구조를 기반으로 2차원 이웃 관계에 있는 인접점들간의 기울기에 따른 연결성분 레이블링 알고리즘을 적용하여 일차 필터링을 수행하였다. 그리고, 작은 크기의 윈도우를 이용한 모폴로지 필터를 적용함으로써 자동차, 수목 등의 작은 개체를 추가적으로 제거하고, 거리 반비례 추정을 통해 고립된 지면점과 일부 오분류 점들을 수정하여 정확도를 향상시키고자 하였다.

## 2. 항공레이저측량 자료의 필터링

본 연구의 항공레이저측량 자료의 필터링 방법론은 4 단계로 구성되며, 각 단계는 효율적인 계산을 위한 스캔라인 분리 및 인접관계 구축, 큰 개체 제거를 위한 연결성분 레이블링, 작은 개체 제거를 위한 모폴로지 필터링, 고립 지면점 복원을 위한 거리 반비례 추정이다. 전체적인 데이터 처리 흐름도는 그림 1과 같다.

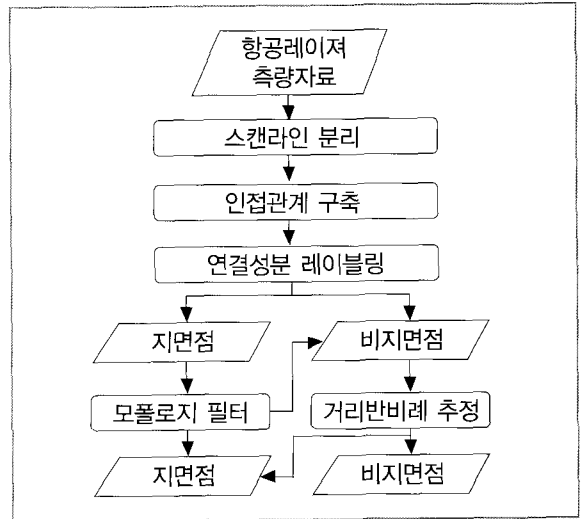


그림 1. 연구 방법 흐름도

### 2.1 인접 관계 구축

본 연구의 필터링 알고리즘은 zigzag-line 형태의 스캔라인을 기반으로 하며, 점들의 인접 관계를 구축하기 위하여 일차적으로 스캔라인을 분리한다. 원시 데이터의 x좌표값 또는 y좌표값이 국지적으로 최대이거나 최소이면 그 점은 새로운 스캔라인의 시작점이 된다. 원시 데이터는 동일한 스캔라인에 위치하는 점들에 대하여 스캔라인과 나란한 방향의 인접 관계를 갖고 있으며, 스캔라인이 분리되면 이웃하는 스캔라인에 대한 정보를 알 수 있다(그림 2(a)). 이 상태에서는 1차원 연산만 가능하며 2차원 연산을 위해서는 주변 스캔라인에 존재하는 모든 점을 탐색해야 한다.

2차원 연산을 효율적으로 적용하기 위해서는 스캔라인을 가로지르는 방향의 인접 관계가 필요하다(그림 2(b)). 따라서 본 연구에서는 최소한의 탐색을 통해 스캔라인을 가로지르는 방향으로 인접 관계를 구축하였다. 두 점의 높이차가 크지 않을 경우에는 점들이 비교적 고른 분포를

나타내므로 인접 관계가 존재하지만, 지면과 건물의 경계와 같이 높이차가 클 경우에는 두 점의 수평 거리가 매우 클 수 있기 때문에 인접 관계가 존재하지 않을 수 있다. 따라서 한 점  $P_i$ 의 인접 관계를 구축하는데 있어서 이전 점의 인접 관계가 존재하는지에 따라서 다른 조건을 적용하였다. 점  $P_i$ 의 인접 관계를 구축하는 구체적인 방법은 다음과 같다.

Step 1) 탐색 영역 결정

-우측 인접점  $P_{R(i-1)}$ 가 존재할 경우

$$A = \{P_m | i-1-k_1 \leq m \leq i-1\}$$

-인접점이 존재하지 않을 경우

$$A = \{P_m | R(f) + i - f - k_2 \leq m \leq R(f) + i - f + k_2\}$$

$P_f$ : 인접점을 갖고 있는 마지막 점

$k_1, k_2$ : 탐색 영역 크기

Step 2) 오른쪽 인접점  $P_{R(i)}$  결정

$$P_{R(i)} = \operatorname{argmin}(d(P_i, P_m))$$

$$(P_m \in A, d(P_i, P_m) < r)$$

$d(P_i, P_m)$ :  $P_i$ 와  $P_m$  사이의 2차원 거리

Step 3)  $P_{R(i)}$ 의 왼쪽 인접 관계 생성

$$P_{L(R(i))} = P_i$$

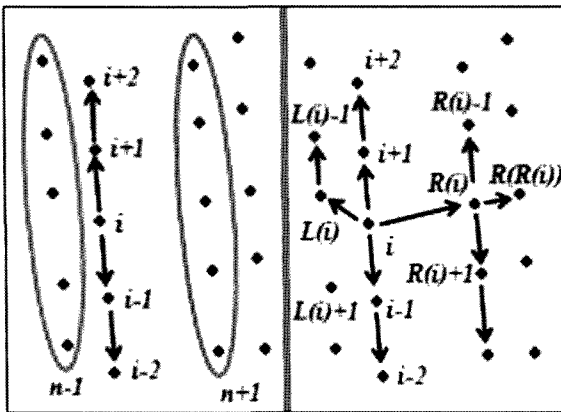


그림 2. 스캔라인 상에서의 인접 관계  
(a) 1차원 인접 관계, (b) 2차원 인접 관계

각 점에 대하여 인접 관계를 구축하면, 그림 2(b)와 같이 한 점에 대하여 모든 방향으로 인접점을 바로 찾을 수 있고 원하는 거리 이내의 점들을 빠르게 탐색할 수 있다. 따

라서 래스터 형태의 데이터에 적용할 수 있는 알고리즘을 적용하는 것이 가능하므로, 이와 같은 인접 관계 구조를 기반으로 연결성분 레이블링과 모폴로지 필터를 적용하였다.

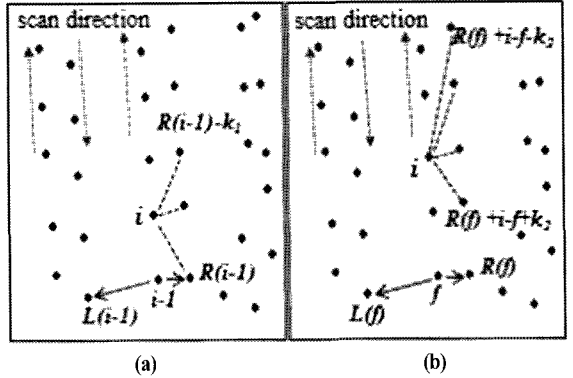


그림 3. 인접 관계 구축을 위한 탐색 방법  
(a)이전점의 인접 관계가 있을 경우, (b)이전점의 인접 관계가 없을 경우

2.2 연결성분 레이블링

지면점들은 일반적으로 일정 경사 이내에서 서로 연결되며, 특정 방향으로는 불연속적인 부분(break line)이 존재하는 경우도 있지만 이러한 지면도 다른 방향으로는 이웃 지면 부분과 연결되는 특성을 나타낸다. 따라서 일정한 경사 이내로 인접한 점들에 동일한 레이블을 할당함으로써 지면점들을 분리할 수 있다.

인접 관계에 있으면서 거리가 가까운 두 점이 일정 경사 또는 높이 이내이면 식 (1)에 의하여 연결된 성분이라고 판단하여, 동일한 레이블을 할당한다.

$$\Delta z < f(d) = \begin{cases} h_1 & (0 \leq d \leq d_1) \\ d \tan(\theta) & (d_1 \leq d \leq d_2) \\ h_2 & (d_2 \leq d \leq r) \end{cases} \quad (1)$$

$$(d_1 = h_1 \cot(\theta), \quad h_2 = d_2 \tan(\theta))$$

모든 점에 대하여 레이블을 할당한 후, 각 동치 테이블 집합에서 최소 레이블을 찾고, 동치 테이블의 레이블에 해당하는 점들은 최소 레이블로 변경한다. 레이블링이 모두 완료된 후, 동일한 레이블을 갖는 점의 개수가 임계치 ( $N_{min}$ ) 이상인 그룹들을 지면점으로 결정한다.

### 2.3 모폴로지 필터링

좁은 영역 내에서는 비지면점이 지면점보다 항상 높은 곳에 위치한다는 특성을 바탕으로 모폴로지 필터를 이용하여, 이전 단계에서 제거되지 않은 일부 작은 크기의 개체를 제거한다. 모폴로지 필터의 적용에 있어서 필터의 크기가 클 경우에는 지면의 왜곡이 발생할 가능성이 높아 지므로, 작은 크기의 필터를 한 번만 적용하여 작은 개체를 제거하였다.

모폴로지 필터의 기본 요소는 수축연산과 확장연산이다. 수축연산은 필터 내에서 가장 낮은 높이값을 갖는 점의 높이값을 얻게 되고, 확장 연산은 필터 내에서 가장 높은 높이값을 갖는 점의 높이값을 얻게 된다. 개방연산은 수축연산 후에 확장연산을 하는 것으로써, 항공레이저측량 자료에 개방연산을 적용하면 필터의 크기보다 작은 개체만 제거할 수 있다. 본 연구에서는 작은 개체를 제거하기 위한 목적으로 스캔 라인 구조를 기반으로 구축된 인접 관계를 이용하여 고정된 크기( $r_{mp}$ )의 원형 필터를 적용하며, 모폴로지 필터 적용 후의 높이값이 원래 높이값보다 일정값( $h_{mp}$ ) 이상 작으면 해당점을 제거하였다.

### 2.4 거리 반비례 추정

고립되어 존재하는 지면점들은 레이블링 과정에서 올바르게 탐지되지 않을 수 있다. 비지면점으로 오분리된 고립 지면점들을 복원하기 위하여 거리 반비례 추정을 이용하였다. 비지면점  $P_i$ 를 기준으로 스캔 정·역방향으로 각각 최근린 지면점( $P_1, P_2$ )을 찾은 후, 이들로부터  $P_i$ 의 지면 높이값( $z_i'$ )을 추정하여 지면에 대한 상대 높이값를 식 (2)와 같이 계산한다.  $h_i$ 가  $h_1$ (연결성분 레이블링 단계에서 사용된 값)보다 작으면 점  $P_i$ 를 지면점으로 변경한다.

$$h_i = z_i - z_i' = z_i - \frac{d_{i1}z_{i2} + d_{i2}z_{i1}}{d_{i1} + d_{i2}} \quad (2)$$

$z_{i1}, z_{i2}$  :  $P_1, P_2$ 의 높이값

$d_{i1}, d_{i2}$  :  $P_i$ 로부터  $P_1, P_2$ 까지의 거리

## 3. 필터링 적용 및 분석

### 3.1 실험 대상지역

본 연구의 효용성을 평가하기 위하여 대전(Site 1), 마산(Site 2-3), 천안(Site 4) 등 총 4개 Site를 실험 대상지역으로

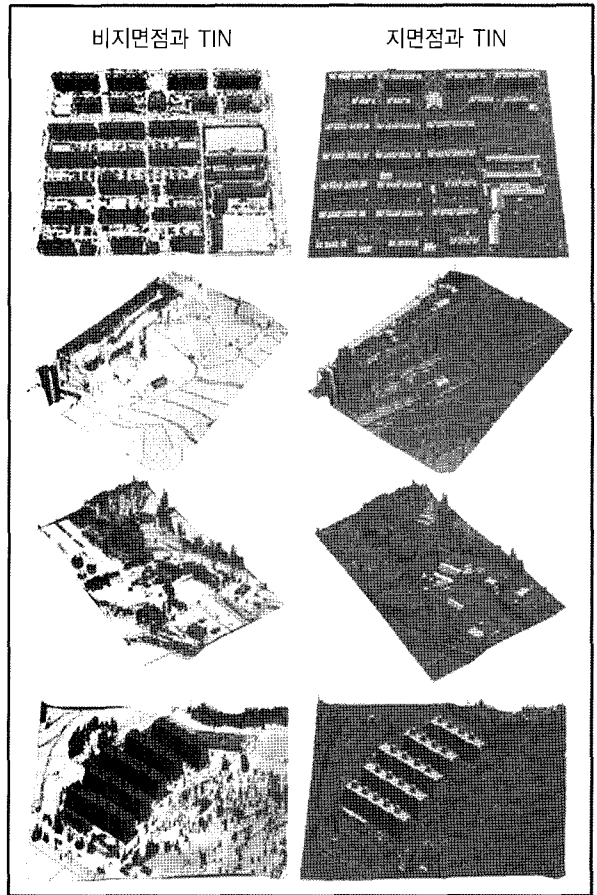


그림 4. 필터링 결과 (위쪽부터 각각 Site 1-4)

선정하였으며(그림 4), 각 지역에 대한 특징은 표 1과 같다. Site1은 경사가 비교적 완만한 아파트 지역으로써 수목이 줄고 길게 늘어선 형태로 밀집되어 분포한다. Site 2는 계단형 경작지가 포함되어 있고 작은 건물과 매우 긴 형태의 건물이 혼재하며 수목이 산재한다. Site 3은 지형 표면의 불연속선이 존재하며 소형 주택과 산림지역이 혼재하는 특성을 보이고, Site 4는 경사가 매우 급한 지형으로써 아파트 건물과 산림이 함께 존재한다

표 1. 각 사이트의 크기

Site	점 개수 (개)	크기 (m <sup>2</sup> )
1	212394	460 × 363
2	43484	246 × 172
3	89297	296 × 170
4	88513	225 × 210

### 3.2 실험 및 결과 분석

본 연구의 필터링 기법을 Microsoft Visual C++로 구현하였고, 다양한 특성을 나타내는 4개 지역에 필터링을 적용한 결과는 그림 4와 같다. 각각의 그림에서 왼쪽은 지면점을 TIN모델과 함께 나타낸 것이고, 오른쪽은 비지면점을 TIN모델과 함께 나타낸 것이다. 각각의 지역에 대하여 경사도 임계치( $\theta$ )는 20도, 30도, 30도, 40도를 각각 적용하였고, 인접점을 정의하기 위한  $r$ 은 원 데이터의 점 간격을 고려하여 2m로 설정하였다. 모폴로지 필터 적용에 있어서  $r_{mp}$ 는 5m로 설정하였고,  $h_{mp}$ 값은 완만한 도시지역인 Site 1에 대해서는 0.5m로, 나머지 지역에 대해서는 1m로 설정하였다. 이는 국지적으로 솟아있는 지면이 모폴로지 필터에 의하여 제거되는 오류를 줄이기 위해서다. 한편, 실험 지역에는  $N_{min}$ 을 2000개로 적용하였을 때 오류가 발생하지 않았다. 하지만,  $N_{min}$ 보다 작은 개수의 점으로 구성된 지면 영역이 존재할 경우 그 부분이 비지면으로 오분리 되는 오류가 발생할 수 있으므로 이에 대한 보완이 필요하다.

정량적 평가를 위하여 각 지역마다 약 5000점을 임의로 선택한 후, 시각적 판독을 통하여 참조자료를 구축하였으며, 이를 바탕으로 실험 결과에 대하여 정확도 평가를 수행하였다. 전체 실험 지역에 대한 평균 정확도는 약 97%이며, 모든 지역에 대하여 95%이상의 정확도를 얻었다. 모든 실험 지역에서 양호한 결과를 도출하였으나 Site 3에서 지면점에 대한 누락오차가 높게 나타났고, Site 4에서 지면점에 대한 포함오차가 높게 나타난 것을 볼 수 있다.

Site 3에서 누락오차가 높게 나타난 것은, 국지적으로 솟

아오른 지형의 일부 지면점들이 비지면점으로 오분리되었기 때문이다(그림 5-(a)). 이는 모폴로지 필터를 적용하는 과정에서 국지적으로 가장 높은 지면점들의 일부가 제거되어, 비지면점으로 오분리되었기 때문이다. Site 4에서 포함오차가 높게 나타난 것은 개체와 지면의 경계 부근인 개체의 측면에서 반사된 점으로 인하여 개체 점들과 지면점이 연결된 관계로 나타나서(그림 5-(b)), 개체 점들이 주변의 지면점들과 동일한 레이블로 잘못 분리되었기 때문이다. 또한 이 개체의 크기가 모폴로지 필터의 크기보다 크기 때문에 모폴로지 필터를 적용한 후에도 지면점으로부터 분리가 되지 않은 것으로 판단된다.

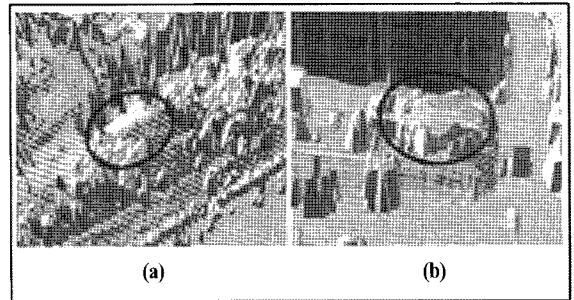


그림 5. 필터링 후 지면점에서의 오류  
(a) 누락 오류, (b) 포함 오류

본 연구의 3단계 처리 기법에 의한 결과를 분석하기 위하여 Site 1 지역 내의 일부 영역을 확대하여 분석하였다. 그림 6의 (a), (b)는 각각 연결성분 레이블링과 모폴로지 필터링 후의 결과이고, (c), (d)는 각각 모폴로지 필터링 후의

표 2. 정확도 평가

데이터	참조자료		필터링결과		정확도 (%)
	항 목	점 개수	지면 개수(비율)	비지면 개수 (비율)	
Site 1	지면	3351	3190 (95.2)	161 (4.8)	96.36
	비지면	1653	21 (1.3)	1632 (98.7)	
Site 2	지면	4270	4242 (99.3)	28 (0.7)	99.38
	비지면	1063	5 (0.5)	1058 (99.5)	
Site 3	지면	5525	5156 (93.3)	369 (6.7)	95.11
	비지면	2087	3 (0.1)	2084 (99.9)	
Site 4	지면	3897	3853 (98.87)	44 (1.13)	97.84
	비지면	1287	68 (5.28)	1219 (94.72)	
평 균	지면	17043	16441 (96.5)	602 (3.5)	96.97
	비지면	6090	97 (1.6)	5993 (98.4)	

결과와 거리 반비례 추정 후의 결과로써 파란색 점은 지면점들을 나타낸다. 연결성분 레이블링을 통해 큰 개체로부터 반사된 점들의 대부분이 지면점들과 올바르게 분리되었으나, 가까이 위치하는 두 점들 간의 기울기만을 이용하므로 일부 낮은 개체에서 반사된 점들이 올바르게 분리되지 않은 것을 확인할 수 있다(그림 6-(a)의 원으로 표시한 부분). 항공사진과의 비교를 통해 확인한 결과 이러한 점들은 대부분 승용차나 높이가 낮은 작은 수목으로부터 반사된 점들이었다. 모폴로지 필터를 통해 이와 같은 점들의 대부분이 제거된 것을 확인할 수 있다. 그림 6-(d)의 타원으로 표시한 부분은 학교 건물에 둘러 쌓여있어서 오분류 되었으나 거리반비례 추정을 통해 올바르게 지면점으로 복원된 것을 나타낸다.

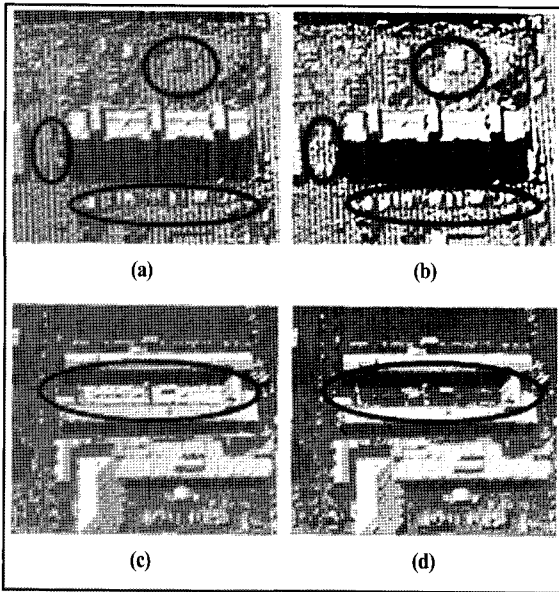


그림 6. 필터링 단계별 지면점  
 ((a) 연결성분 레이블링 후, (b)와 (c) 모폴로지 필터링 후,  
 (d) 거리반비례 추정 후)

연산 효율성을 측정하기 위하여 2개의 항공레이저측량 원시 데이터에 대하여 소요 시간을 측정하고, 이를 TIN 생성 및 래스터 생성에 소요되는 시간과 비교하였다. 제안한 기법은 Microsoft Visual C++로 구현하였고, 인접관계 구축에 소요되는 시간 및 필터링 처리에 소요되는 시간을 측정하였다. TIN 생성과 래스터 생성은 ESRI ArcMap 9.3을 이용하였고, 래스터 생성은 IDW 보간 기법을 이용하고 보간에 사용하는 주변점은 3점으로 제한하였다. 약 99만점과 167만점의 데이터를 처리하는데 소요된 시간은

각각 8.4초, 15.5초로써 TIN 데이터 구조 또는 래스터 데이터 구조를 생성하는데 소요되는 시간에 비하여 적게 소요되었다.

표 3. 처리 소요 시간 비교 (단위 : 초)

점 개수	Sample 1 990,517	Sample 2 1,675,935
인접관계 구축	2.4	3.7
필터링	6.0	10.8
TIN 생성	42.4	68.3
래스터 생성	230.5	398.8

#### 4. 결 론

본 연구에서는 항공레이저측량 자료의 스캔라인 구조를 기반으로 최소한의 탐색을 통해 래스터 구조와 유사한 점들 간의 인접관계를 구축하고, 이를 기반으로 항공레이저측량 자료를 빠르고 효과적으로 필터링하였다. 2차원 인접관계 구조를 기반으로 연결성분 레이블링, 모폴로지 필터링, 거리반비례 추정 등의 3단계로 구성된 필터링 기법을 적용하였는데, 2차원 이웃관계를 효율적으로 이용함으로써 복잡하고 다양한 지역에서 대부분의 점들이 올바르게 분리되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 레이블링 알고리즘과 모폴로지 필터를 함께 적용함으로써 수목 및 자동차와 같은 작은 개체를 효과적으로 제거할 수 있었다. 한편, 인접관계 구축 및 필터링에 소요되는 데이터처리 시간은 TIN이나 래스터 데이터 구조 변환 시간보다 적게 소요되었다.

향후 연구에서는 제안한 인접관계 구조를 기반으로 다른 영상처리 알고리즘을 적용하여 그 결과를 비교해보고, 제안한 방법을 수정하여 지상 라이다 자료에도 적용해 볼 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 논문은 국방광역감시 특화연구센터 프로그램의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 유환희, 김성삼, 정동기, 홍재민 (2005), LIDAR 자료를 이용한 DEM 생성 정확도 평가, *한국측량학회지*, 제 23권, 제 3호, pp. 261-272.
- 이임평 (2006), 항공 라이다 데이터의 분할: 점에서 패치로, *한국측량학회지*, 제 24권, 제 1호, pp. 1-11.
- 좌윤석 (2003), 항공레이저 스캐닝데이터를 이용한 건물 자동추출에 관한 연구, 석사학위논문, 인하대학교
- 최승식, 송낙현, 조우석 (2007), Airborne LiDAR 필터에 관한 연구, *한국측량학회지*, 제 25권, 제 1호, pp. 55-62.
- 최연웅, 조기성 (2005), 도시지역 LiDAR DSM으로부터 DEM추출기법 연구, *한국지형공간정보학회지*, 제 13권, 제 1호, pp. 19-25.
- Axelsson, P. (2000), DEM generation from laser scanner data using TIN adaptive models, *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 33, part B3, pp. 85-92.
- Chen, Q., P. Gong, D. Baldocchi, and G. Xie (2007), Filtering airborne laser scanning data with morphological methods, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 73, No. 2, pp. 175-185.
- Elmqvist, M. (2002), Ground surface estimation from airborne laser scanner data using active shape models. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 34 (Part 3A), pp. 114-118.
- Han, S., J. Lee, and K. Yu (2007), An approach for segmentation of airborne laser point clouds utilizing scan-line characteristics, *ETRI Journal*, Vol. 29, No. 5, pp. 641-648.
- Kilian, J., N. Haala, and M. English (1996), Capture and evaluation of airborne laser scanner data, *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 31, Part B3, pp. 383-388.
- Meng, X., L. Wang, J. Silván, and N. Currit (2009), A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 64, No. 1, pp. 117-124.
- Patane, G. and M. Spagnuolo (2002), Multiresolution and slice-oriented feature extraction and segmentation of digitized data. *Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications*, June 17-21, Saarbrücken, Germany, pp. 305-312.
- Shan, J. and A. Sampath (2005), Urban DEM generation from raw lidar data: a labeling algorithm and its performance, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 71, No. 2, pp. 217-226.
- Vosselman, G. (2000), Slope based filtering of laser altimetry data, *International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 33, part B4, pp. 958-964
- Vosselman, G. and H. Mass (2001) Adjustment and filtering of raw laser altimetry data, *Proceedings OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, March 1-3, Stockholm.
- Zhang, K., S. Chen, D. Whitman, M. Shyu, J. Yan, and C. Zhang (2003), A progressive morphological filter for removing nonground measurements from airborne LIDAR data, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 4, pp. 872-882.