

# 적응적 컨벡스헬 알고리즘을 이용한 항공라이다 데이터의 건물 경계 재구성

## Building Boundary Reconstruction from Airborne Lidar Data by Adaptive Convex Hull Algorithm

이정호<sup>1)</sup> · 김용일<sup>2)</sup>  
Lee, Jeong Ho · Kim, Yong Il

### Abstract

This paper aims at improving the accuracy and computational efficiency in reconstructing building boundaries from airborne Lidar points. We proposed an adaptive convex hull algorithm, which is a modified version of local convex hull algorithm in three ways. The candidate points for boundary are first selected to improve efficiency depending on their local density. Second, a searching-space is adjusted adaptively, based on raw data structure, to extract boundary points more robustly. Third, distance between two points and their IDs are utilized in detecting the seed points of inner boundary to distinguish between inner yards and inner holes due to errors or occlusions. The practicability of the approach were evaluated on two urban areas where various buildings exist. The proposed method showed less shape-dissimilarity(8.5%) and proved to be two times more efficient than the other method.

Keywords : Building extraction, Building boundary, Airborne Lidar, Convex hull algorithm, Scanline structure

### 초 록

본 논문은 항공라이다 데이터로부터 추출한 건물점으로부터 건물 경계를 재구성하는데 있어서 정확도와 연산 효율성을 향상시키는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 3가지 측면에서 수정한 적응적 컨벡스헬 알고리즘을 제안하였다. 첫째, 연산 효율성을 향상시키기 위하여 점들의 밀도에 따라 경계 후보점을 먼저 추출한 후 경계점을 추출한다. 둘째, 폐색이나 오차가 포함된 건물에서 보다 안정적으로 건물 경계점을 추출하기 위하여 원시 데이터 구조를 바탕으로 탐색 반경을 적응적으로 변화시킨다. 셋째, 안마당과 오차에 의한 홀을 구분하기 위하여 점들 간의 거리와 ID를 이용한 내부 경계 초기점 탐지 기법을 적용한다. 제안 방법의 활용가능성을 평가하기 위하여 다양한 건물들을 포함하는 두 도시 지역에 적용한 결과, 모양상이성이 8.5%로써 기존의 대표적인 경계점 추출 방법에 비하여 우수하였으며 연산 효율성은 약 2배 향상된 것을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 건물 추출, 건물 경계, 항공라이다, 컨벡스헬 알고리즘, 스캔라인 구조

## 1. 서론

항공라이다는 광역 공간에 대해 높은 수직 위치 정확도의 3차원 좌표 정보를 제공할 수 있는 기술이다. 이와 같은 장점으로 인하여 수치표고모델 생성, 건물 모델링,

3차원 도시 모델링, 산림 정보 추출, 고해상도 광학 영상과의 융합 등 여러 분야에서 많은 활용이 이루어지고 있다. 최근에는 데이터의 정확도 및 점밀도의 향상과 더불어 건물 추출 및 재구성이 항공라이다 데이터의 가장 활발한 연구 분야 중 하나이다.

1) 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사후연구원(E-mail : ilome79@snu.ac.kr)  
2) 교신저자 · 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 교수(E-mail : yik@snu.ac.kr)

건물 경계 재구성은 건물의 경계를 이루는 점들을 추출하는 것으로부터 시작된다. 건물 경계점을 추출하기 위해서 TIN 구조에서 삼각형의 선분 길이나 각 선분의 인접 삼각형 개수를 이용하거나(오재홍, 2001; Xu, 2010) 가상격자 구조를 활용할 수 있다(조우석 등, 2003). 최근에는 불규칙하게 분포하는 점들로부터 직접적으로 건물 경계점을 추출하기 위하여 Jarvis(1977)가 제안한 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하거나(Sampath and Shan, 2007; Lee et al., 2011; Habib et al., 2010), Edelsbrunner et al.(1983)이 제안한 알파쉐입 알고리즘을 적용하는 방식이 널리 적용되고 있다(Lach and Kerekes, 2008; Dorninger and Pfeifer, 2008; Shen, 2008).

국지적 컨벡스헬 알고리즘이나 알파쉐입 알고리즘은 탐색반경(또는 알파값)에 의하여 경계점 추출 결과가 상이하게 나타난다. 폐색이나 데이터의 누락과 같은 오차로 건물 경계 부근에 빈 공간이 존재할 경우, 국지적 컨벡스헬 알고리즘이나 알파쉐입 알고리즘의 탐색 반경을 크게 해야 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있다. 그러나 탐색반경이 커질수록 건물 경계의 오목한 부분에서 상세한 표현이 어려워지는 문제가 발생한다. 한편, 컨벡스헬 알고리즘은 내부 경계를 추출할 수 없고 알파쉐입 알고리즘은 오차나 폐색으로 인한 건물 내부의 홀(hole)<sup>1)</sup>을 내부 경계로 잘못 추출할 수 있다는 문제가 있다.

추출된 경계점들은 건물 경계를 정확하게 표현하지 못하기 때문에 보다 정확한 건물 경계를 재구성하기 위하여 정규화를 수행한다. 여러 연구에서 건물 주 방향을 계산한 후 이를 기반으로 평생성과 직교성에 의해 경계 세그먼트들을 조정하였다(Ma, 2004; Sampath and Shan, 2007; Shen, 2008; Lach and Kerekes, 2008; Lee et al., 2011). 한편, 에너지 함수나 스코어 함수를 활용하여 직각에 가까운 부분에 높은 가중치를 부여하여 정규화를 수행하는 연구들도 있다(Weidner and Förstner, 1995; 손건호 등, 2007; 이동혁, 2008; Zhang, 2006)).

본 연구에서는 경계점을 추출하는데 있어서 앞에서 언급한 문제점을 해결하기 위하여 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 3가지 측면에서 수정한 적응적 컨벡스헬 알고리즘을 제안하였다. 개선 사항은 다음과 같다. 첫째, 점들의 밀도에 따라 경계 후보점을 먼저 추출한 후 실제 경계점을 추출함으로써 연산 효율성을 향상시킨다. 둘째, 원시 데이터 구조를 바탕으로 탐색 반경을 적응적으로 변화시켜 폐색이나 오차가 포함된 건물에서 보다 안정적으로 건물 경계점을 추출한다. 셋째, 점들 간의 거리와 ID를 이용한 내부 경계 초기점 탐지 기법을 통해 중점과 같은 건물 내부 경계와 오차 또는 폐색에 의한 홀을 구분한다. 다음으로, 추출된 경계점들로부터 일반화 알고리즘을 적용하여 특징점을 찾고 건물의 주방향을 계산한다. 마지막으로 각각의 경계 세그먼트의 방향에 따른 조정을 통해 정규화된 건물 경계를 재구성한다.

## 2. 건물 경계점 추출

### 2.1 컨벡스헬 알고리즘

컨벡스헬 알고리즘은 불연속적으로 분포하는 점들을 포함하는 최소의 볼록다각형을 결정하는 알고리즘인데, 그 결정 방식에 따라 Graham scan, Jarvis march, Divide and conquer 등이 있다. Jarvis march 알고리즘은 Gift wrapping 알고리즘이라고도 불리며 평면상에 존재하는 점들에 대해서 적용할 수 있는 가장 간단한 알고리즘 중 하나이다. 각 단계에서 이전에 찾은 경계점을 연결한 선분으로부터 최소의 시계방향각을 이루는 점을 그 다음 경계점으로 선택하는 원리이다. 다음 점을 찾을 때 탐색하는 범위에 따라서 전역적 방식(그림 1(a))과 국지적 방식(그림 1(b))으로 나눌 수 있다. 항공라이다 데이터로부터 건물 경계점을 추출하는데 있어서는 주로 국지적 방식을 이용한다.

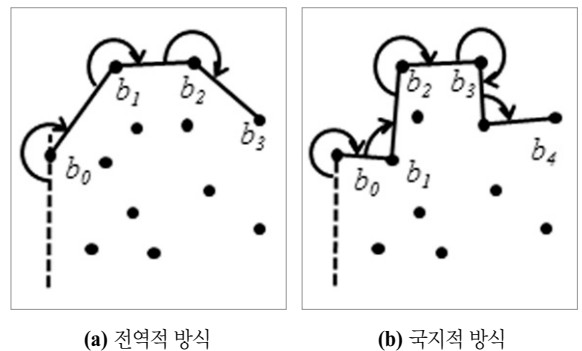


그림 1. Jarvis march 알고리즘

1) 불규칙하게 분포하는 점들의 집합으로 표현된 건물에서 폐색, 오차, 안마당 등으로 인하여 2차원 공간(xy-평면) 상에서 점들이 분포하지 않는 빈 공간이 건물의 내부에 존재할 때, 이를 홀이라고 표현하기로 한다.

### 2.2 경계 후보점 추출

포인트 형식인 항공라이다 데이터에 컨벡스헬 알고리즘을 효율적으로 적용하기 위하여, 경계점을 추출하기 전에 건물 경계 부근에 위치하는 점들을 경계 후보점으로 선택한다. 이를 위하여 원시 데이터 상에서 스캔라인 구조(이정호 등, 2011)를 기반으로 구축한 이웃구조를 활용한다. 스캔기반 이웃구조는 최대 8개의 이웃점을 가질 수 있다.

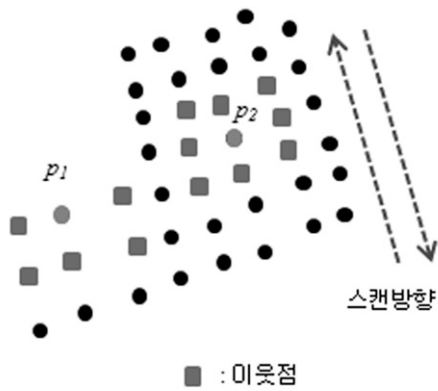


그림 2. 스캔기반 이웃구조에 의한 이웃점

그림 2의  $p_2$ 와 같이 8개의 방향에 대하여 모두 이웃점을 갖는 점은 경계점일 가능성이 매우 낮다고 볼 수 있다. 좀 더 안정적인 선택을 위하여 한 점이 8방향에 대하여 모두 이웃을 가지면서 이웃점들 또한 8방향에 대하여 이웃을 갖고 있으면 그 점은 경계후보에서 제외된다.

### 2.3 탐색 반경 결정

경계점들을 최대한 조밀하게 추출하면서 오차나 폐색 등에 의한 영향을 최소화하기 위하여 본 연구에서는 마지막에 찾은 경계점을 기준으로 점들 간의 이웃구조를 이용하여 탐색 반경을 적응적으로 변화시킨다. 그림 3(a)와 같이 일반적인 상황에서는 반경이 작아짐으로써 경계점을 조밀하게 추출하고 그림 3(b)와 같이 오차나 폐색으로 인한 빈 공간이 존재하는 상황에서는 반경이 커지도록 한다.

보다 구체적으로, 마지막에 찾은 경계점을 기준으로 이웃점들과의 거리와 평균 점간격을 비교하여 최댓값의  $k$ 배를 탐색반경으로 설정한다. 스캔라인 방향과 비행방향에 대하여 점들 간의 분포 간격이 다르기 때문에

두 방향에 대하여 탐색 반경을 각각 다르게 결정하여 결과적으로 식 (1)과 같이 타원형의 탐색 범위가 결정된다.

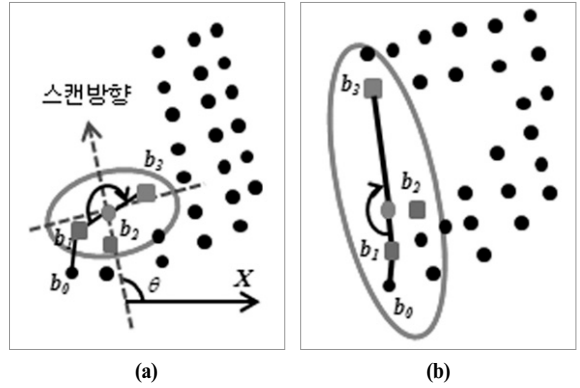


그림 3. 탐색 반경의 적응적 변화

$$\left( \frac{(x-x_i)\cos\theta + (y-y_i)\sin\theta}{k \times S_i^s} \right)^2 + \left( \frac{-(x-x_i)\sin\theta + (y-y_i)\cos\theta}{k \times S_i^f} \right)^2 \leq 1 \quad (1)$$

여기서  $\theta$ 는  $x$ 축의 양의 방향으로부터 스캔 방향까지 반시계방향으로 측정된 각이고,  $(x_i, y_i)$ 는 가장 마지막에 찾은 건물 경계점의 좌표이다.  $k$ 는 버퍼를 위한 상수이고,  $S_i^s$ 와  $S_i^f$ 는 각각 스캔 방향과 비행방향의 탐색반경으로서 식 (2)와 같이 계산된다.

$$S_i^s = \max(d_{i,i+1}, d_{i,i-1}, S_{mean}^s) \quad (2)$$

$$S_i^f = \max(d_{i,B(i)}, d_{i,F(i)}, S_{mean}^f)$$

$d_{i,j}$ 는 두 점  $P_i$ 와  $P_j$ 사이의 2차원 거리이고,  $S_{mean}^s, S_{mean}^f$ 는 각각 스캔방향과 비행방향의 평균 점간격이다.  $B(i), F(i)$ 는 각각  $P_i$ 의 후방 이웃점, 전방 이웃점이다.

이와 같이 결정된 탐색 범위에서 다음 경계점을 탐색한 후 만약 경계점이 없으면, 이 경우에는 주변에 오차 등으로 인하여 점이 없는 경우일 가능성이 높기 때문에 탐색 반경을 평균 점간격의 3배 정도로 확장하여 재탐색한다.

### 2.4 내부 경계 초기점 탐지

일반적인 컨벡스헐 알고리즘은 점들의 내부에 존재하는 경계를 추출할 수 없기 때문에 건물 내부 경계를 추출하기 위해서는 추가적인 처리가 필요하다. 그러나 건물 내부의 홀은 지면에 의한 것일 수도 있지만 오차나 건물의 더 높은 부분으로 인한 폐색에 의한 것일 수도 있기 때문에 건물 내부 경계점들을 찾는 것은 간단하지 않은 문제이다.

그림 4(a)의 건물 내에는 6개의 크고 작은 홀이 존재하는데, 이 중 1개만 실제 중정이고 나머지 5개는 주변의 더 높은 부분으로 인한 폐색 때문이다. 그림 4(b)의 건물 내부의 홀은 데이터가 취득되지 못한 부분인데, 이는 지붕면의 특성으로 인한 것으로 판단된다.

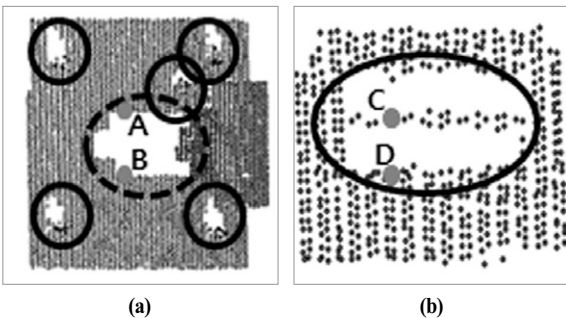


그림 4. (a) 폐색(실선)과 안마당(점선)에 의하여 내부에 홀이 있는 건물, (b) 오차(실선)에 의하여 홀이 있는 건물

중정에 의한 홀과 오차 또는 폐색에 의한 홀을 구분하기 위하여 본 연구에서는 두 점 사이의 거리와 원시 데이터 포인트의 ID를 함께 이용한다. 그림 4(a)에서 점 A와 점 B는 연속하는 점이지만 원시 데이터 상태에서는 두 점 사이에 약 20개의 지면점들이 존재하였기 때문에 두 점의 ID가 20정도 차이가 난다. 반면 그림 4(b)에서 연속하는 점인 점 C와 점 D는 원시 데이터 상태에서도 연속하는 점이였기 때문에 두 점의 ID 차이가 1이다.

만일 동일 스캔라인 상에 존재하는 연속하는 두 점의 식 (3)을 만족하면 두 점은 내부 경계 초기점 후보로 선택된다.

$$d(p_i, p_j) < d_{thr} \tag{3}$$

$$ID(p_i) - ID(p_j) < k$$

여기서  $d(p_i, p_j)$ 는 점  $p_i$ 와  $p_j$ 의 2차원 유클리디언 거

리고  $ID(p_i)$ 는 점  $p_i$ 의 원시 데이터 상에서의 ID이다.

건물 내부 경계의 초기점을 자동으로 선택한 후, 외부 경계점을 추출하는 것과 동일한 방법으로 내부 경계점을 추출한다.

### 3. 경계 정규화

추출된 경계점들로부터 보다 향상된 건물 경계를 재구성하기 위해서는 건물 경계 세그먼트들의 평행성과 직교성을 고려하는 정규화 과정이 필요하다. 본 연구에서는 우선 Douglas and Peucker 일반화 알고리즘을 적용하여 특징점을 찾은 후, 경계점들을 동일한 세그먼트에 대응되는 점들로 군집화한다.

각각의 군집에 속하는 점들의 적합식을 도출하여 각 세그먼트의 방향각을 계산한 후, 식 (4)와 같이 방향각의 길이 가중 평균값을 건물의 주방향( $\theta_d$ )으로 설정한다 (Ma, 2004).

$$\theta_d = \frac{\sum_i \theta_i \times l_i}{\sum_i l_i} \tag{4}$$

여기서  $l_i$ 와  $\theta_i$ 는 각각  $i$ 번째 세그먼트의 길이와 방향각이다.

각 세그먼트의 방향과 건물 주방향의 유사도에 따라 군집을 주방향, 수직방향, 기타방향으로 분류하고, 유형에 따라 서로 다른 식을 적용하여 건물 경계 정규화를 수행한다. 건물의 주방향과 거의 평행이거나 수직인 군집에 대해서는 주방향에 정확하게 평행 또는 수직이 되도록 식 (5)에서  $\theta_i$ 를  $\theta_d$  또는  $\theta_d + \pi/2$ 로 강제 조정하고, 기타방향인 군집은 일반적인 최소제곱법에 의하여 독립적으로 조정한다.

$$x_{ij} \cos(\theta_i + \pi/2) + y_{ij} \sin(\theta_i + \pi/2) = d_i \tag{5}$$

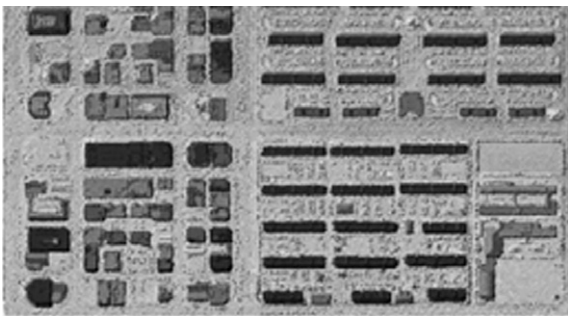
여기서  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$ 는 각각  $i$ 번째 직선 군집의  $j$ 번째 점의  $x$ 좌표와  $y$ 좌표이고,  $\theta_i$ 는  $x$ 축으로부터  $i$ 번째 군집까지의 반시계방향 각이다. 이에 대한 보다 자세한 설명은 Lach et al.(2008), Lee et al.(2011) 등을 참고한다. 정규화 후에 형성된 군집들 중에서 매우 짧은 세그먼트, 인접하면서 평행한 세그먼트, 매우 작은 크기의 각을 이루는 인접 세그먼트 등에 대해서 병합, 삼입, 또는 삭제 등과 같은 반복조정을 통해 최종 건물 경계를 생성한다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 데이터 및 적용

그림 5와 같이 100여 개의 건물을 포함하며 각각 다른 지형 및 건물 특성을 나타내는 대전 지역의 두 곳을 실험 지역으로 선정하였다.

두 지역에 건물 경계점 추출 및 정규화 알고리즘을 적용하는 과정에서 적용된 임계값은 표 1과 같다. 적응적 컨벡스헬 알고리즘을 적용하여 경계점들을 추출한 결과는 그림 6과 같고, 정규화를 통해 최종적으로 재구성한 2차원 건물 경계는 그림 7과 같다.



(a) 지역 1

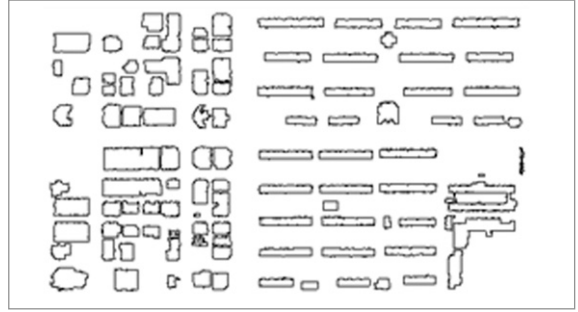


(b) 지역 2

그림 5. 실험 데이터; (a) 지역 1, (b) 지역 2

표 1. 건물경계 재구성에 적용된 임계값

항 목	임계값
적응적 컨벡스헬 알고리즘 적용 시 곱해지는 상수	1.5
DP 알고리즘 적용 시 직교거리	1m
군집의 최소 길이	1.5m
군집 유형을 결정할 때의 방향 차이	15°

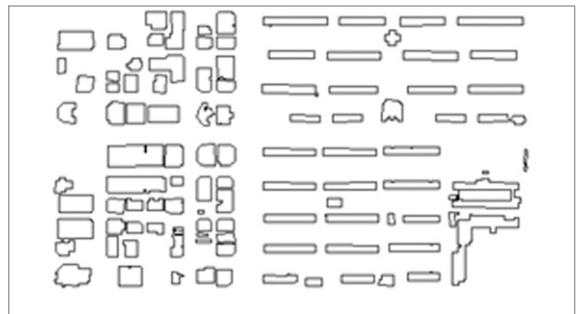


(a) 지역 1

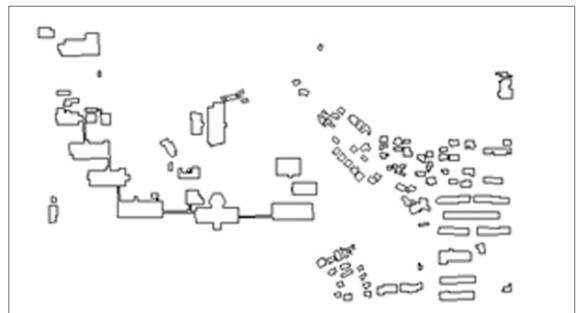


(b) 지역 2

그림 6. 건물 경계점 추출 결과; (a) 지역 1, (b) 지역 2



(a) 지역 1



(b) 지역 2

그림 7. 건물 경계 재구성 결과; (a) 지역 1, (b) 지역 2

### 4.2 시각적 분석

그림 8과 같이 몇 가지 유형의 건물에 대한 시각적 분석을 통해 본 연구 방법론의 효용성을 평가하였다. 그림의 각 열은 왼쪽부터 각각 항공라이다 포인트, 건물점과 추출된 건물 경계점, 정규화된 건물 경계와 참조자료이다. 참조자료는 1:1000 수치지도의 건물 레이어를 이용하였는데, 누락된 건물이나 잘못 도화된 건물은 실험에 사용한 항공라이다와 비슷한 시기에 취득된 스테레오 항공사진(해상도 0.25m)에서 건물의 모서리점을 수동으로 추출한 후 공간교회를 실시하여 수정하였다.

그림 8의 A1과 같이 경계 부근에 폐색에 의한 빈 공간이 있는 경우에도 경계가 옳음 들어간 형태로 왜곡되지 않고 올바르게 추출되었다. 아울러 그림 8의 B1과 같이 건물의 오목한 부분에서 경계점이 조밀하게 추출되어 오목한 코너의 대부분이 올바르게 표현된 것을 볼 수 있

다. 일반적으로 경계점 추출 시에 탐색 반경이 클수록 폐색이나 오차에 영향을 덜 받는 반면 탐색 반경이 작을수록 오목한 부분에서 경계점을 보다 조밀하게 추출할 수 있다. 본 연구에서 제안한 적응적 컨벡스헬 알고리즘은 이웃점들까지의 거리에 따라 탐색 반경이 적응적으로 변하기 때문에, 모든 건물에 대하여 동일한 임계값(탐색 반경 버퍼 계수)을 적용하면서도 폐색에 의한 빈 공간(그림 8의 A1)과 오목한 부분(그림 8의 B1) 모두에서 경계점이 잘 추출 되고 올바르게 재구성되었다. 그림 8의 B2와 같이 매우 짧은 균집이 포함된 오목한 부분에서는 두 균집이 한 개로 표현되는 경우도 있었다.

그림 8의 C1은 건물 내부에 빈 공간이 있는 경우를 나타내고 있는데, 54번 건물은 지붕재질의 특성으로 인하여 데이터가 존재하지 않는 부분으로 일종의 오차에 의한 것이라고 볼 수 있고, 학교인 97번 건물은 내부 지면이 존재하는 경우이다. 본 연구에서 제안한 내부경계 초기점 탐지 기법은 연속하는 점들의 거리와 함께 점들의 ID를 이용함으로써 오차나 폐색으로 인한 내부 홀은 추출하지 않으면서 실제 지면에 의한 내부 경계를 올바르게 추출할 수 있었다.

### 4.3 정량적 비교 평가

지역 1의 106개 건물에 대한 건물 경계 재구성 결과를 중복면적에 의한 포함오차, 누락오차, 상대적 모양상이성 등을 이용하여 평가하였다(Henricson and Baltasvias, 1997; 오재홍, 2001).

본 연구에서 제안한 건물 경계 재구성 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 국지적 컨벡스헬 알고리즘(비교 방법 1)과 알파쉐입 알고리즘(비교 방법 2)을 적용한 후 건물 경계 정규화를 수행한 결과물과 비교하였다. 경계점 추출에 있어서 탐색반경의 크기에 의한 영향을 함께 살펴보기 위하여 비교 방법 1은 평균 점간격의 4배보다 약간 작은 탐색반경을 적용하였고 비교 방법 2는 평균 점간격의 2배보다 약간 작은 탐색반경을 적용하였다.

지역 1의 복잡한 건물 45개에 대하여 개별 건물의 포함면적, 누락면적, 오차면적을 계산하고 이를 합산한 후 3가지 방법에 의한 45개 건물의 평균 포함오차, 누락오차, 모양상이성을 계산한 결과는 표 2와 같다. 표 2에서 팔호안의 값은 전체 건물(106개)에 대하여 평가한 것이다. 복잡한 건물은 박스형이나 볼록 오각형 등과 같은 형태가 아닌 건물들로서 오목한 부분이 포함된 건물, 경계 부근에 오차나 폐색으로 인한 빈 공간이 존재하는 건물,

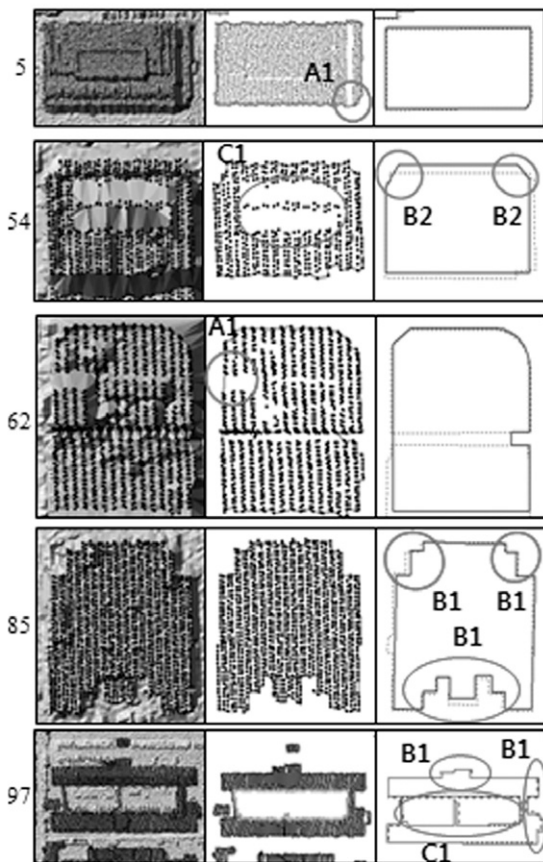


그림 8. 일부 건물의 경계 재구성 결과(왼쪽부터 항공라이다 포인트, 건물점과 경계점, 재구성한 건물 경계(실선)와 참조자료(점선))

내부에 홀이 있는 건물 등을 의미한다.

표 2. 건물 경계 추출 오차(%)

방 법	항 목		
	포함오차	누락오차	모양상이성
제안 방법	2.81(2.62)	5.81(6.06)	8.53(8.58)
비교 방법 1	7.29(5.48)	3.94(4.25)	11.49(9.80)
비교 방법 2	2.60(2.52)	8.43(7.32)	10.88(9.71)

비교 방법 1은 포함오차가 크게 나타났고 누락오차가 가장 작게 나타났다. 이는 큰 반경의 국지적 컨벡스헬 알고리즘을 적용함으로써 누락오차를 줄일 수 있었으나 그림 9(a)와 같이 건물의 오목한 부분에서 경계점을 조밀하게 추출하지 못하고 포함오차가 증가하였기 때문이다. 또한 그림 9(b)와 같이 중정이 포함된 건물에서 내부 경계를 추출하지 못함으로써 포함오차가 증가하였다. 반면에 비교 방법 2는 포함오차가 작았고 누락오차가 매우 컸다. 작은 반경의 알파셰입 알고리즘을 적용하였기 때문에 포함오차는 작았으나 그림 9(c)와 같이 경계 부근에 오차나 폐색으로 인한 빈 공간이 존재할 경우에 누락오차가 증가하였다. 또한 그림 9(d)와 같이 중정이 아닌 건물 내부의 홀도 경계로 추출함으로써 누락 오차가 더욱 증가하였다.

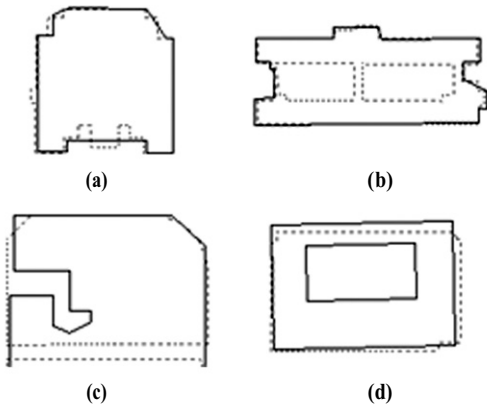


그림 9. 건물 경계 재구성 결과 비교; (a), (b) 비교 방법 1, (c), (d) 비교 방법 2(실험결과(실선), 참조자료(점선))

본 연구에서 제안한 방법은 이웃점들과의 거리를 기반으로 탐색반경을 적응적으로 변화시킴으로써, 건물의

오목한 부분에서는 경계점을 조밀하게 추출하면서 오차나 폐색이 존재하는 부분에서는 탐색반경이 커지기 때문에 경계의 왜곡을 줄일 수 있었다. 또한 연속하는 두 점 간의 거리와 점의 ID를 함께 이용하여 내부경계 초기점을 탐지함으로써 안마당에 의한 홀과 오차나 폐색으로 인한 홀을 구분할 수 있었다. 또한, 탐색반경과 관련된 임계값으로 고정된 값을 사용하면서도 다양한 건물들에 대하여 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

결과적으로 제안 방법에 의한 복잡한 건물의 경계 재구성 정확도가 두 가지 비교 방법보다 우수하였으며, 포함오차, 누락오차, 모양상이성은 각각 2.81%, 5.81%, 8.58%였다.

#### 4.4 처리 시간 및 연구의 한계

MATLAB을 사용하여 제안한 알고리즘을 구현하였다. 실험에 사용한 두 지역에서 건물점의 개수는 각각 약 11만점과 약 6만점이고 건물의 개수는 두 지역 모두 100여 개였다. 건물 경계 재구성에 소요된 전체 처리 시간은 두 지역에 대하여 각각 157초, 303초였다. 경계 정규화에 의하여 경계점 추출에 훨씬 많은 시간이 소요되었으며 두 지역에 대하여 각각 약 2분, 약 4분이었다.

지역 1의 데이터 크기(건물점의 개수)가 더 크고 두 지역의 건물 개수는 비슷하지만 지역 2의 처리에 2배 정도 많은 시간이 소요되었다. 이는 지역 2에 2만개 정도의 점으로 구성된 연구소 건물이 포함되어 있기 때문이다. 이 건물은 점 개수가 많을 뿐만 아니라 건물 경계에 오목한 부분이 많아서 처리하는데 매우 많은 시간이 소요된 것으로 판단된다.

한편, 경계 후보점을 추출하지 않았을 때 건물 경계 재구성에 소요된 처리 시간은 두 지역에 대하여 각각 302초, 786초였다. 이는 경계 후보점을 먼저 추출한 제안 방법에 의한 처리 시간의 약 2배이다. 즉, 본 연구에서 제안한 경계 후보점 추출을 통해 전체 처리 시간을 약 50% 단축시킬 수 있었다.

본 연구에서는 모든 처리를 단일 스트립 데이터를 기준으로 하였으므로, 현재 상황에서는 단일 스트립 데이터에만 적용할 수 있다는 한계가 있다. 건물 경계점 추출은 개별 스트립 데이터로 처리하여 효율성과 정확도를 향상시킨 후, 서로 다른 스트립에서 추출된 경계점들을 중첩하면 될 것으로 판단된다. 경계점 추출 이후의 처리과정인 정규화에서는 스캔기반 이웃구조를 활용하지 않으므로 다른 스트립에서 추출된 경계점들을 중첩하더라도 본 연구의 알고리즘을 적용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 항공라이다 데이터에서 추출한 건물점으로 부터 건물 경계를 재구성하는데 있어서, 정확성과 효율성을 향상시키기 위하여 국지적 컨벡스할 알고리즘을 3가지 측면에서 수정한 적응적 컨벡스할 알고리즘을 제안하였다. 두 개의 도시 지역 데이터에 적용하고 이에 대하여 시각적 분석을 통해 복잡한 형태의 건물에 대해서 8.5%의 모양상이성을 얻음으로써 대표적인 경계점 추출 알고리즘 보다 우수함을 확인하였다. 또한 경계 후보점을 추출하지 않았을 때보다 처리 시간이 50%정도 단축되어 제안 방법이 연산 효율적인 것을 확인할 수 있었다.

제안한 방법론은 단일 스트립 데이터를 기준으로 한 것이므로, 향후에는 단일 스트립 데이터에서 생성된 결과를 중첩하는 연구를 추가로 수행하여 본 연구의 활용성을 높여야 할 것이다.

## 참고문헌

- 손건호, 좌윤석, Tao, V., 조우석 (2007), Geometric Regularization of Irregular Building Polygons: A Comparative Study, 한국측량학회지, 제 25권 제 6-1호, 한국측량학회, pp. 545-555.
- 오재홍 (2001), Laser Scanning Data를 이용한 건물 외곽선 추출에 관한 연구, 석사학위논문, 서울대학교.
- 이동혁(2008), 신뢰성 있는 구조물 추출을 위한 DSM과 광학 영상의 융합, 박사학위논문, 서울대학교.
- 이정호, 염준호, 김용일 (2011), 스캔 라인 기반의 인접 관계를 이용한 항공레이저측량 자료의 필터링, 한국측량학회지, 제 29권, 제 4호, 한국측량학회, pp. 359-365.
- 조우석, 좌윤석, 이영진 (2003), 항공 레이저 스캐닝 데이터를 이용한 건물 자동추출, 대한토목학회논문집, 제 23권, 제 5호, 대한토목학회, pp. 591-751.
- Dorninger, P. and Pfeifer, N. (2008), A Comprehensive Automated 3D Approach for Building Extraction, Reconstruction, and Regularization from Airborne Laser Scanning Point Clouds, *Sensors*, Vol. 8, pp. 7323-7343.
- Edelsbrunner, H., Kirkpatrick, D., and R. Seidel (1983), On the Shapes of a Set of Points in the Plane, *IEEE Transactions on Information Theory*, IT29(4), pp. 551-559.
- Habib, A. F., Zhai, R., and Kim, C. (2010), Generation of Complex Polyhedral Building Models by Integrating Stereo-Aerial Imagery and Lidar Data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 76, No. 5, pp. 609-623.
- Henricsson, O. and Baltasvias, E., 3-D Building Reconstruction with ARUBA: A Qualitative and Quantitative Evaluation, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Image(II)*, 1997, pp. 65-76.
- Jarvis, R. A. (1997), Computing the Shape Hull of Points in the Plane, *Proceedings of IEEE Computer Society Conference Pattern Recognition and Image Processing*, pp. 231-241.
- Lach, S. and Kerekcs, J. (2008), Robust Extraction of Exterior Building Boundaries from Topographic Lidar Data, *IEEE Proc. IGARSS*, Boston, USA, pp. 85-88.
- Lee, J., S. Han, Byun, Y., and Kim, Y. (2011), Extraction and Regularization of Various Building Boundaries with Complex Shapes Utilizing Distribution Characteristics of Airborne LIDAR Points, *ETRI Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 547-557.
- Ma, R. (2004), *Building Model Reconstruction from Lidar Data and Aerial Photographs*, The Ohio State University, Dissertation.
- Sampath, A., and Shan, J. (2007), Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne Lidar Point Clouds, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 73, No. 7, pp. 805-812.
- Shen, W. (2008), Building Boundary Extraction Based on Lidar Point Clouds Data, *International Archives Photogrammetry, Remote Sens., Spatial Info. Sci.*, Beijing, Vol. 37, part B3b, pp. 157-161.
- Weidner, U., and Förstner, W. (1995), Towards Automatic Building Extraction from High-Resolution Digital Elevation Models, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 50, pp.38-49.
- Xu, J., Y. Wan, and Yao, F. (2010), A method of 3D Building Boundary Extraction from Airborne Lidar Points Cloud, *IEEE 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronic*.
- Zhang, K., Yan, J., and Chen, S. C. (2006), Automatic Construction of Building Footprints from Airborne LiDAR Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 44, No. 9, pp. 2523-2533.