

# 항공 LiDAR 데이터를 이용한 건물추출과 상부구조물 특성분석 및 모델링

## Utilizing Airborne LiDAR Data for Building Extraction and Superstructure Analysis for Modeling

정형섭<sup>1)</sup> · 임새봄<sup>2)</sup> · 이동천<sup>3)</sup>

Jung, Hyung Sup · Lim, Sae Bom · Lee, Dong Cheon

### Abstract

Processing LiDAR (Light Detection And Ranging) data obtained from ALS (Airborne Laser Scanning) systems mainly involves organization and segmentation of the data for 3D object modeling and mapping purposes. The ALS systems are viable and becoming more mature technology in various applications. ALS technology requires complex integration of optics, opto-mechanics and electronics in the multi-sensor components, i.e. data captured from GPS, INS and laser scanner. In this study, digital image processing techniques mainly were implemented to gray level coded image of the LiDAR data for building extraction and superstructures segmentation. One of the advantages to use gray level image is easy to apply various existing digital image processing algorithms. Gridding and quantization of the raw LiDAR data into limited gray level might introduce smoothing effect and loss of the detail information. However, smoothed surface data that are more suitable for surface patch segmentation and modeling could be obtained by the quantization of the height values. The building boundaries were precisely extracted by the robust edge detection operator and regularized with shape constraints. As for segmentation of the roof structures, basically region growing based and gap filling segmentation methods were implemented. The results present that various image processing methods are applicable to extract buildings and to segment surface patches of the superstructures on the roofs. Finally, conceptual methodology for extracting characteristic information to reconstruct roof shapes was proposed. Statistical and geometric properties were utilized to segment and model superstructures. The simulation results show that segmentation of the roof surface patches and modeling were possible with the proposed method.

Keywords : Airborne LiDAR data, Building extraction, Superstructure segmentation, Digital image processing

### 초 록

항공 레이저 스캐닝(ALS) 시스템으로부터 획득한 LiDAR 데이터를 이용하여 3차원 객체 모델링과 지형도 제작을 위해서는 데이터의 기하학적 및 의미적인 분할과 같은 체계적인 데이터 처리가 선행되어야 한다. ALS로부터 활용 가능한 LiDAR 데이터를 획득하기 위해서는 GPS, INS 및 레이저 스캐너 데이터의 통합이 필수적이다. 본 연구에서는 건물추출과 지붕 구조물 분할을 위해서 LiDAR 데이터를 영상화하여 디지털 영상처리 기법을 적용하였다. 영상화된 데이터를 사용하는 주요 장점 중 하나는 기존의 다양한 영상처리 알고리즘을 사용할 수 있다는 점이다. 격자화 및 정량화를 거치는 영상화 과정에서 원시 LiDAR 데이터가 한정된 밝기값으로 변환되므로 평활화 및 상세 정보의 손실이 발생할 수 있지만, 평활화된 데이터는 표면분할과 모델링에 오히려 적합하다. 건물의 경계선은 윤곽선 추출 연산자를 이용하여 정확하게 추출하였으며, 건물 모양에 적합하도록 규격화 하였다. 건물 지붕의 구조물의 분할은 영역확산을 기반으로 수행하였다. 이 결과 다양한 디지털 영상처리 기법을 복합적으로 적용하여 건물추출과 지붕 구조물의 면분할이 가능함을 보여주었다. 또한 지붕의 형태를 재현하기 위한 특성정보 추출에 관한 개념적 방법을 제안하였다. 지붕 데이터를 분할하고 모델링을 위해 통계적 및 기하적 특성을 이용하였으며, 제안한 방법에 의한 시뮬레이션 결과는 지붕면을 분할하고 모델링하는데 가능함을 보여주고 있다.

핵심어 : 항공 LiDAR 데이터, 건물추출, 상부구조물 분할, 디지털 영상처리

1) 연세대학교 이과대학 지구시스템과학과 박사후 연구원(E-mail:geohyung@yonsei.ac.kr)

2) 세종대학교 대학원 지구정보공학과 석사과정(E-mail:sblee@sju.ac.kr)

3) 연결저자 · 세종대학교 공과대학 지구정보공학과 교수(E-mail:dlee@sejong.ac.kr)

## 1. 서 론

본 논문은 2008년 한국측량학회 춘계학술발표회에서 발표한 “디지털 영상처리 기법에 의한 LiDAR 표고 영상으로부터의 건물추출 및 지붕 상부구조물 분할”(이동천 등, 2008) 논문을 기반으로 작성하였으며, 더 나아가 다양한 건물의 3차원 세부 지붕 모델링을 위한 지붕형태의 특성분석 방법을 제시하고 이를 시뮬레이션 LiDAR 데이터에 적용한 결과를 분석하여 제시한 방법의 타당성 연구임을 밝힌다.

ALS 시스템은 기상의 영향을 덜 받으면서 넓은 지역을 대상으로 신속하고 정확하게 고밀도의 3차원 좌표 데이터를 획득할 수 있는 장점이 있지만, ALS 시스템에 의해 획득된 LiDAR 데이터로부터 다양한 형태의 객체 및 지표면에 대한 의미적인 정보추출과 3차원 모델링을 위해서는 분류, 분할 및 특성정보 추출 등과 같은 체계적인 데이터 처리가 요구된다(Kraus, 2002; Elaksher & Bethel, 2002). LiDAR 데이터를 이용한 수치표면모델(DSM), 3차원 건물 및 도시 모델링, 수치지형도 제작 등 다양한 활용분야에 필요한 3차원 공간정보 생성을 위한 연구와 기술개발이 국내외적으로 수행되고 있다(김성삼 등, 2006; 이동천 등 2005; Maune, 2007). ALS의 핵심기술은 GPS, INS, 레이저 스캐너의 데이터의 통합과 획득된 LiDAR 데이터로부터 필요한 정보를 추출하여 다양한 공간정보를 효율적으로 도출하는 데 있다. 또한 LiDAR 데이터를 영상 및 다양한 데이터 등과 융합 또는 복합적으로 이용하여 지형·지물의 3차원 모델링에 대한 연구가 진행되고 있다(Fabio 등, 2006; Habib 등, 2006; Lee 등, 2008; Rottensteiner 등, 2002).

본 연구에서는 디지털 영상처리 기법을 이용하여 건물을 추출하고 상부구조물 데이터의 분할을 위해 LiDAR 데이터를 영상화 하였다. LiDAR 데이터의 표고값이 밝기값으로 영상화된 데이터를 사용하면 기존의 다양한 영상처리 기법을 적용할 수 있는 장점이 있다. 영상화를 위한 격자화(griding) 및 정량화(quantization) 과정에서 정보의 손실이 발생할 수 있지만, 노이즈의 일부가 제거되고 화소값이 평활화 되어 면분할(surface patch segmentation) 및 모델링에 유리한 장점이 있다. 다양한 디지털 영상처리 방법을 적용하여 건물을 추출하고 규격화 하였으며 지붕의 상부구조물에 대한 면분할의 가능성을 제시하고 있다. 건물추출은 기존의 윤곽선 탐지 연산자의 문제점을 보완

하고 화소이하 단위의 윤곽선 추출이 가능한 윤곽선 추출 연산자인 Lanser 필터를 사용하였으며, 건물의 조건에 부합되는 조건을 부여하여 건물 경계선을 규격화 하였다. 지붕 구조물에 대한 면분할은 영역확장(region growing) 기반의 분할 방법을 적용하였다.

또한 개념적인 방법으로, 지붕의 형태를 파악하기 위해 특성정보를 추출하여 활용하는 방안을 제시하고 있다. 지붕은 단순한 평면이 아니고 다양한 형태로 구성되어 있으며, 복잡한 상부구조물로 인하여 LiDAR 데이터로부터 상세부분까지 모델링하는 것은 어려우며 묘사에 한계가 있다. 제안하는 방법은 지붕 모양의 특성정보인 높이의 평균, 표준편차 및 경사도를 이동영역에 대하여 지역별로 계산하여 추출된 정보를 복합적으로 활용하여 지붕의 면을 분할하고 분할된 부분에 최적의 수학적 함수를 적용하여 모델링하는 것이다.

## 2. 건물추출

LiDAR 데이터를 사용하여 건물을 추출하거나 모델링할 경우 일반적으로 LiDAR의 3차원 좌표 데이터를 사용하거나 LiDAR 반사강도 정보, 항공영상 및 위성영상 또는 수치지도 등을 복합적으로 사용하기도 한다. 본 연구에서는 LiDAR 데이터만을 사용하여 3차원 건물 모델링을 목적으로, LiDAR 데이터를 영상화하고 다양한 디지털 영상처리 기법을 적용하여 건물을 추출하여 건물의 윤곽선을 결정한 후, 지붕에 대한 면분할 및 지붕형태를 실제 형태와 유사한 함수로 모델링하는 것이며 전체 연구과정의 흐름도는 그림 1과 같다.

### 2.1 LiDAR 데이터의 영상화

사용된 LiDAR 데이터는 대전광역시의 아파트 건물이 분포된 지역에 대해 Optech ALTM3070로 고도 1,000m에서 점밀도 6점/m<sup>2</sup> 으로 획득하였다. 그림 2-(a)는 LiDAR의 3차원 좌표의 분포를 보여주고 있으며, 그림 2-(b)는 LiDAR 데이터를 0.6m GSD(ground sample distance)로 격자화하고 표고값을 8비트 영상으로 영상화한 데이터이다. 그림 3은 LiDAR 데이터의 영상화를 위한 격자화(griding) 및 정량화(quantization) 과정을 도식적으로 보여주고 있으며, 그림 4는 건물지붕의 상부를 확대한 영상이며, 표고값이 8비트 영상화 과정에서 256개의 정수로 변환된 밝기값으로 표현되므로 표고값이 평활화된 결과

를 보여주고 있다. 평활화는 상세 정보에 대한 손실이 발생되지만 그룹핑 및 지붕의 면분할에 효과적인 장점이 있다.

선형 비례식에 의한 변환함수인 히스토그램 스트레칭(linear histogram stretching) 방법으로 표고값이 밝기값으로 변환되어 LiDAR 데이터가 영상화되며, 다음과 같은 식을 사용한다.

$$I = \frac{(E - E_{min})}{(E_{max} - E_{min})} (I_{max} - I_{min}) + I_{min} \quad (1)$$

여기서 I는 특정 LiDAR 표고값(E)에 대한 밝기값,  $E_{min}$ 은 최소 표고값,  $E_{max}$ 는 최대 표고값,  $I_{min}$ 은 최소 밝기값,  $I_{max}$ 는 최대 밝기값이며, 일반적으로 8bit 영상에서는  $I_{min}=0$ ,  $I_{max}=255$ 로 정하지만, 경우에 따라 이 범위 내에서 다른 값을 사용할 수 있다. 또한 특정 부분을 강조하거나 부각시키기 위해서는 전 지역에 대하여 일률적으로 식(1)을 적용하지 않고 특정 높이에 따라 적용범위를 설정하여 다른 변환식을 사용하는 piece-wise histogram

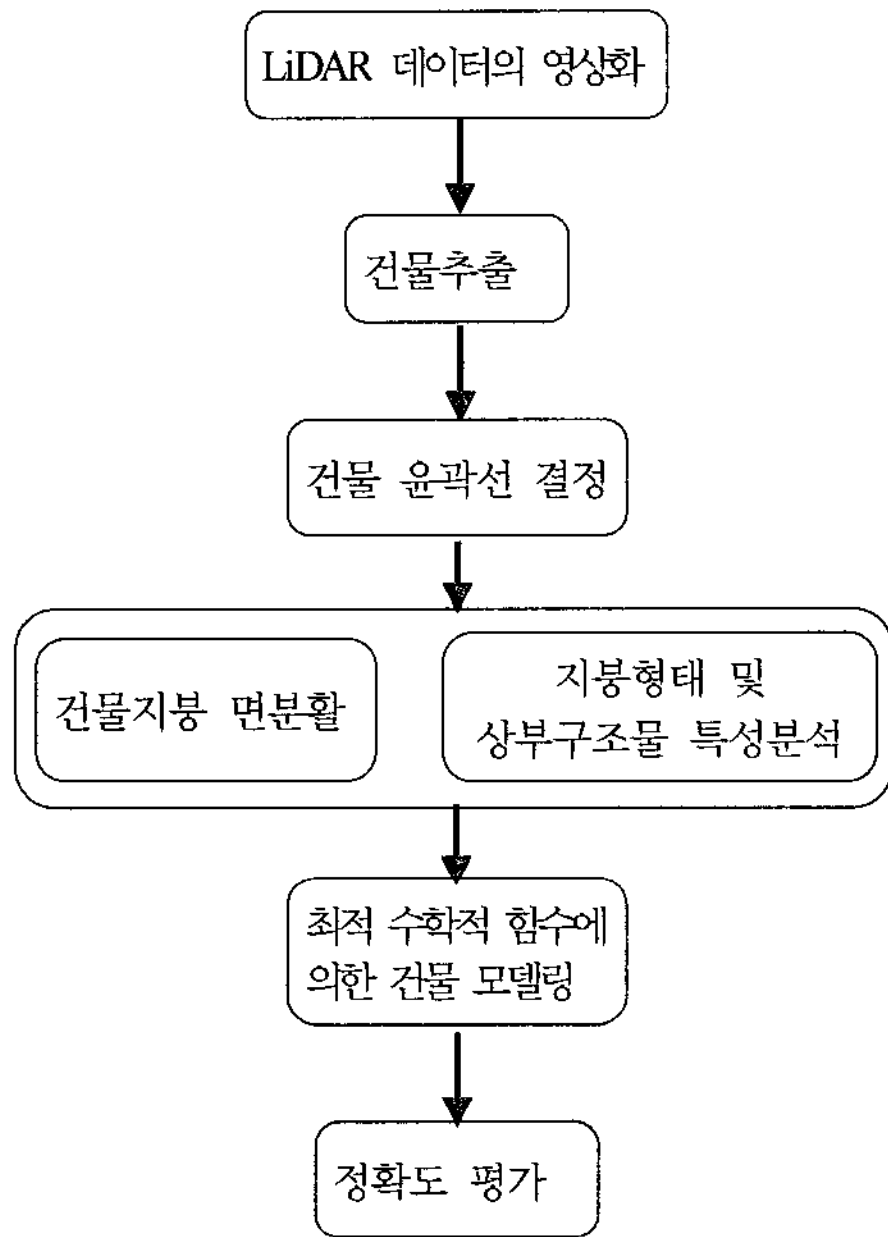
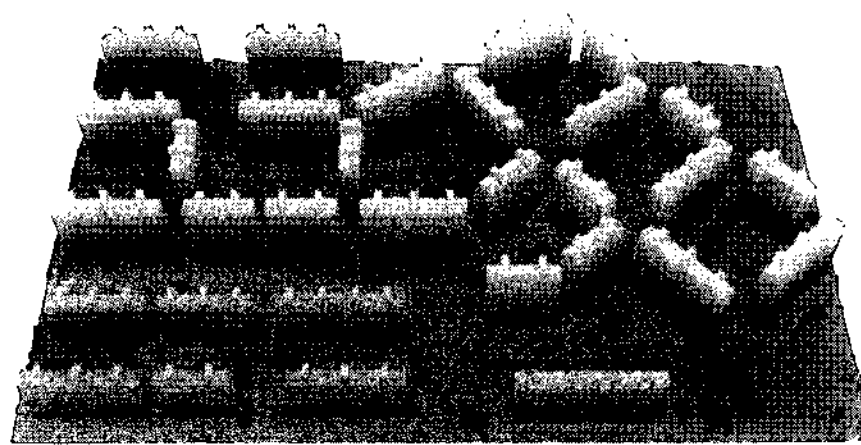
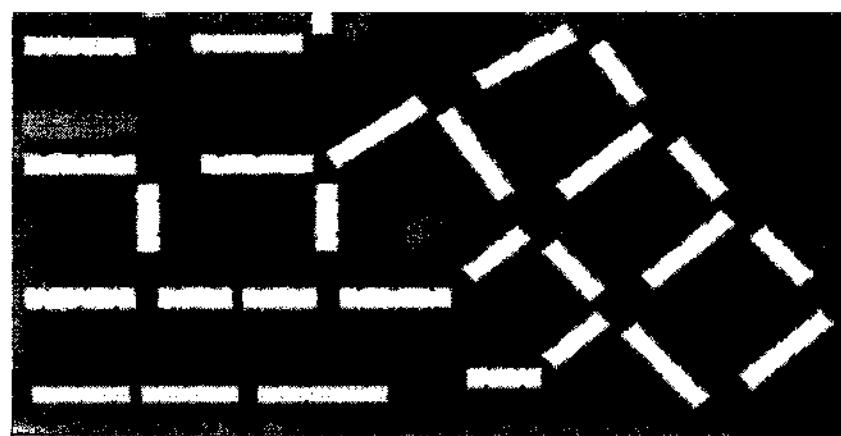


그림 1. 연구과정의 흐름도

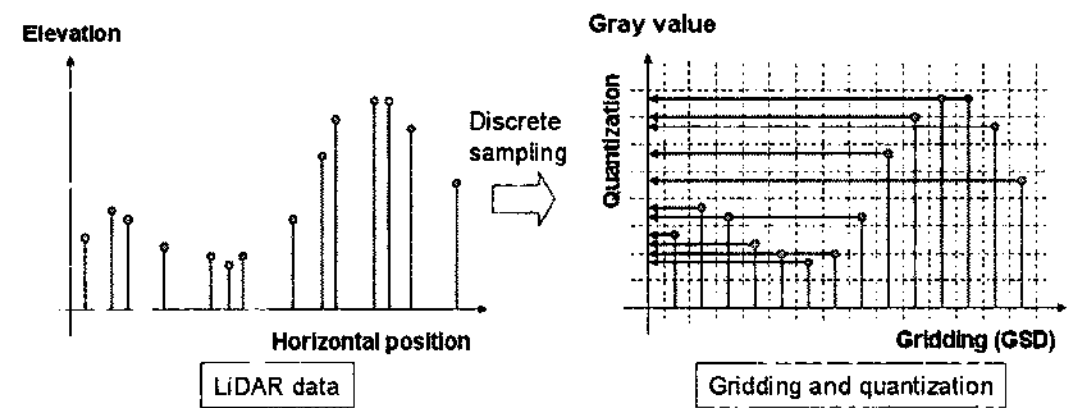


(a) LiDAR 데이터

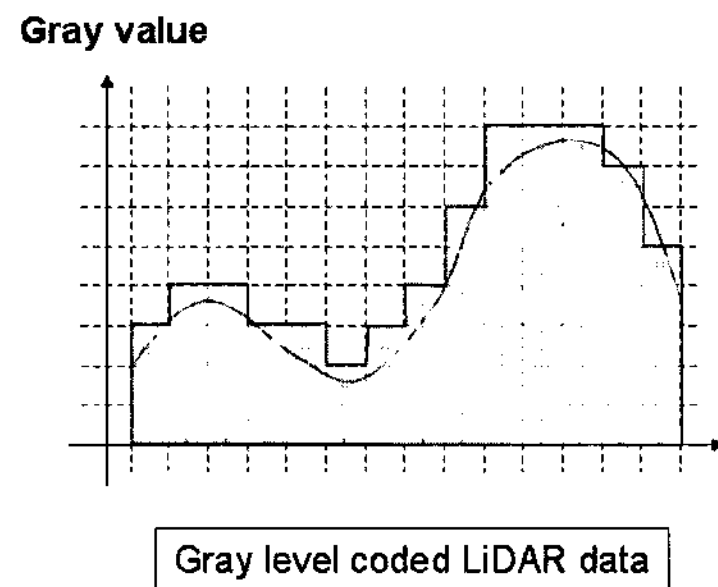


(b) 영상화한 LiDAR 데이터

그림 2. LiDAR 데이터



(a) LiDAR 데이터의 격자화 및 정량화



(b) 평활화 및 균일화 현상

그림 3. LiDAR 데이터의 영상화



(a) 건물지붕의 LiDAR 데이터



(b) 정량화에 의한 영상화

그림 4. 영상화에 의한 지붕에 대한 화소값의 평활화 현상

stretching을 적용할 수 있다(그림 5 참조). LiDAR 데이터를 영상화하여 건물을 추출하는 방법을 적용할 경우, 다음과 같은 지역에서는 건물의 밝기값이 지형의 밝기값에 비하여 상대적으로 낮을 수 있으므로 건물을 정확하게 추출하지 못하거나 건물이 추출되지 않을 수 있다.

- (1) 평지가 아닌 산악지역과 같이 지형의 기복이 큰 지역
- (2) 주위의 지형이 건물의 높이보다 높은 지역

이와 같은 문제점은 다음과 같은 방법으로 해결이 가능하다.

- (1) 선형 비례적으로 영상화하는 대신에 구간별로 서로 다른 히스토그램 스트레칭을 적용하여 영상화하여 건물의 높이값이 분포된 특정 구간을 강조(piece-wise histogram stretching)(그림 5 참조)
- (2) 전 지역에 대하여 영상화하는 대신에 대상지역을 특정 크기로 분할하여 각 지역별로 영상화를 수행(local histogram stretching)(그림 6 참조)

이런 방법을 적용하기 위해서는 대상지역의 지형적 특성분석, 대략적인 건물의 높이를 예측 및 분할 지역의 크기 결정이 필요하며, 최적의 결과 얻기 위해서는 다양한 경우에 대한 실험과 경험이 요구된다.

연구지역은 평탄한 지역에 건물이 분포하고 있으므로 앞에서 언급한 문제점이 발생하지 않았다. 그러므로 구간별 영상화 및 지역분할은 수행하지 않았다.

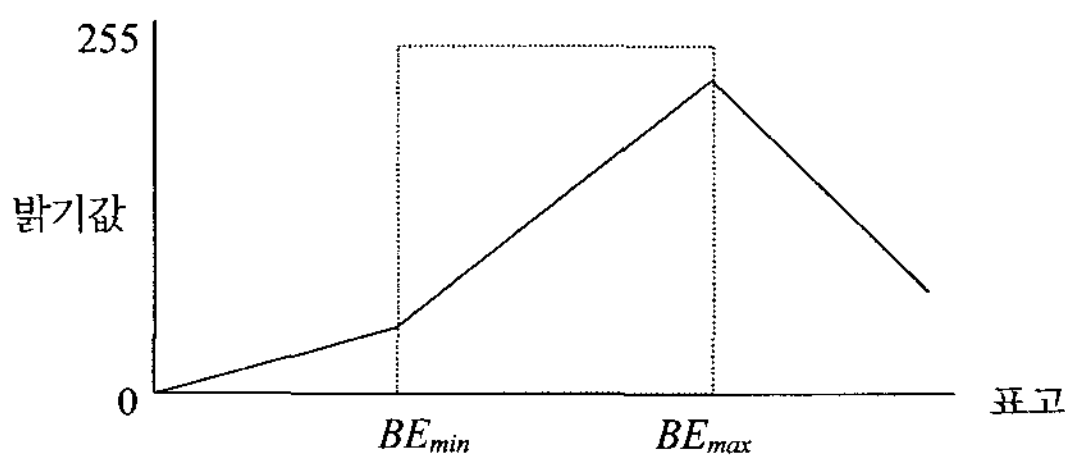


그림 5. 표고 구간별 영상화 방법(piece-wise histogram stretching)

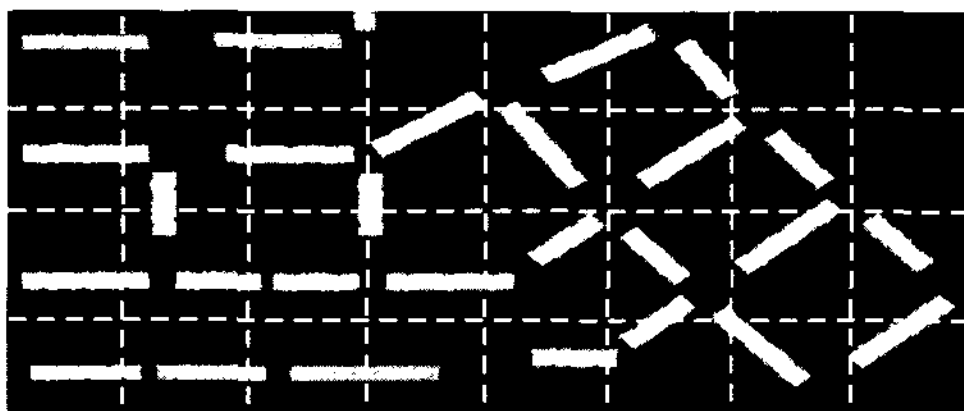


그림 6. 지역별 영상화를 위한 지역분할

## 2.2 영상화된 LiDAR 데이터의 전처리

건물추출 결과를 향상시키기 위한 전처리로 비등방성 확산(anisotropic diffusion) 기법을 적용하여 건물 윤곽선(edge)의 손실을 최소화하고 노이즈를 효과적으로 제거하여 각 객체의 면에 대해 균일한 화소값을 얻을 수 있다. 노이즈 제거에 사용되는 대부분의 연산자 또는 필터는 노이즈 제거와 함께 윤곽선과 같은 중요한 상세 정보가 손상되는 반면에 비등방성 확산 필터는 윤곽선에 대한 대조비와 방향을 동시에 고려하여 윤곽선에서는 노이즈 제거에 의한 화소값의 변형 및 평활화를 억제하여 윤곽선의 위치와 형태를 유지하면서 반복적으로 노이즈를 제거할 수 있는 장점이 있다(Bovik, 2005; Jähne 등, 2000).

즉 윤곽선으로 추정되는 화소들은 과대오차로 간주하여 윤곽 경계선에서는 확산을 정지하는 기법(edge-stopping diffusion)을 적용할 필요가 있다(Sapiro, 2006). 기본적으로 비등방성 확산 연산은 다음과 같은 편미분식(PDE)으로 표현된다.

$$\frac{\partial g(x)}{\partial x \partial y} \Big|_t = \text{div}[c(x) \nabla g_t(x, y)] \quad (2)$$

여기서  $\text{div}$ 는 편미분 성분의 합을 표시하며  $g(x)$ 는 화소(pixel)의 밝기값을 나타내며,  $\nabla g(x)$ 는 밝기값의 변화량(gradient)을 의미하며 인접한 화소의 밝기값의 차이로 계산된다.  $c(x)$ 는 확산계수이며 일정한 상수값을 사용할 경우에는 등방성 확산(isotropic diffusion)이 되며, 밝기값의 변화에 따라 지역별로 다른 값을 적용할 경우에 비등방성 확산이 된다.  $t$ 는 반복회수를 나타낸다. 확산 연산은 가장 가까운 4개 방향 또는 대각선 방향까지 포함한 8개 방향에 대하여 수행하게 된다.

확산연산은 반복적으로 수행되므로 다음과 같은 식으로 새로운 값을 계산하게 된다. 반복연산의 회수는 미리 일정 수자로 지정하거나, 나중에 계산한 결과와 바로 직전에 수행한 결과의 차이가 미소할 때까지 수행할 수 있다. 즉, 확산의 변화가 없을 때까지 반복적으로 수행한다.

$$g(x, y) \Big|_{t+1} = g(x, y) + (\Delta T) \sum_{d=1}^n C_n(x, y) \nabla g_d(x, y) \Big|_t \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 확산 방향의 수를 의미하고,  $\nabla g_d(x, y)$ 는 각 방향에 대한 미분을 표시한다. 디지털 영상과 같이 연속적 함수가 아닌 이산적 함수에서의 미분은 단순히 인접

화소값의 차이를 계산하면 된다. 또한 4방향에 대하여 연산할 경우  $\Delta T$ 는 1/4 보다 같거나 작은 값을 사용한다.

확산계수의 선택에 따라 윤곽선의 손실 또는 보존이 좌우되므로 적합한 계수의 선택은 중요한 문제이며, 단순한 상수값을 사용하지 않고 윤곽선을 보존하고 노이즈 제거 효과를 향상시키기 위하여 다양한 종류의 함수를 사용한다. 확산계수는 윤곽선에서는 평활화를 방지하는 역할을 하여 원래의 윤곽선을 보존하게 된다. 확산계수는 윤곽선의 특성에 따라 서로 다른 경중율을 부여하는 개념으로서 기본적으로는 화소에 대한 편미분 값에 반비례하는 함수 형태로 정의될 수 있다. 즉 윤곽선이 존재하는 경우에는 편미분 값이 크므로 확산을 억제하기 위해서 작은 확산계수값이 지정되어야 한다. 다음은 일반적으로 사용되는 확산계수 함수들이다.

$$C(x,y) = 1/|\nabla g(x,y)| \quad (4)$$

$$C(x,y) = 1/[1 + \nabla g(x,y)/k^2] \quad (5)$$

$$C(x,y) = \exp[-\nabla g(x,y)/k^2] \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 임계값이며 화소값의 변화량에 따라 설정되는 값이며, 일반적으로  $k^2 = 2\sigma^2$ 을 사용하며, 여기서  $\sigma$ 는 노이즈 제거에 사용하는 Gaussian 함수의 표준편차이다.

비등방성 확산의 적용 결과는 그림 7에서 보여주는 것과 같이 인위적인 노이즈를 추가한 경우에도 효과적임을 알 수 있다. 그림 7-(a)는 영상화된 LiDAR 데이터에 10%의 Gaussian 노이즈를 추가한 것이며, 그림 7-(b)는 비등방성 확산을 적용한 후의 결과를 보여주고 있다. 상부구조물의 형태와 윤곽을 유지하면서 노이즈가 제거되었으며 각 지붕면은 균일한 밝기값을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다.

### 2.3 Lanser 필터의 특성

일반적으로 Canny 연산자와 Deriche 필터는 윤곽선을 추출하기 위한 목적으로 사용되고 있지만, 보다 향상된 결과를 얻기 위해서는 각 각의 단점을 보완하여 화소단위 이하(sub-pixel)의 건물 윤곽선을 추출하기 위해 재귀적(recursive) 필터인 Lanser 필터를 적용하였다. Lanser 필터는 Canny 연산자를 기반으로 개발된 Deriche 필터 적용 시 발생하는 문제점을 보완한 필터로서, 객체의 윤곽선 및 경계선을 효과적으로 추출하는데 사용된다. Deriche 필터는 IIR(infinite impulse response) 필터이므로

IIR 필터의 단점인 주파수 영역에서 각 주파수마다 위상차가 비선형적으로 변하는 특성이 있다.

그러므로 차단 주파수에서 윤곽선의 방향에 따라 진폭에 왜곡이 발생할 수 있다(Hamming, 1988). 즉 Canny 연산자는 회전에 불변한 장점이 있지만 비재귀적(non-recursive) 필터이므로 필터의 크기에 따라 계산량이 증가하고, Deriche 필터는 재귀적 필터의 장점인 필터 크기가 증가함에 따른 계산량의 증가가 발생하지 않는 반면 윤곽선의 회전에 따라 변하는 단점(rotation variant)인 윤곽선의 방향에 따라 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 문제점들을 보완하여 화소단위 이하의 정확도를 유지하는 최적의 윤곽선을 추출할 수 있도록 개발된 연산자가 Lanser 필터이다(Lanser, 1992; Hornberg, 2006). 영상에서 윤곽선은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E^\phi(x,y) = \begin{cases} A, & \tan\phi \leq \left(\frac{y}{x}\right) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $A$ 는 진폭,  $\phi$ 는 윤곽선의 방향이며, 필터를 적용한 후 진폭은 다음과 같이 계산된다.

$$A' = \sqrt{X(\phi)^2 + Y(\phi)^2} A \quad (8)$$

여기서  $X(\phi) = 1/[1/(1+\tan\phi)]$ ,  $Y(\phi) = 1/[1/(1+\cot\phi)]$ . 그림 8은 다양한 윤곽선 추출 필터인 Sobel, Laplacian, DoG(Difference of Gaussian), Canny, Robert 및 Lanser 필터를 적용한 결과를 보여주고 있으며, Lanser 필터에 의한 건물의 윤곽선 추출이 다른 필터에 의한 결과 및 실제 지역의 영상 데이터와 시각적으로 비교하여 우수함을 알 수 있다.

### 2.4 건물추출 및 규격화

추출된 건물의 윤곽선은 직선으로 선형화하고 폐합시킨 후 하나의 객체로 결합한다. 건물의 규격화(또는 정형화)를 위해 최소제곱법으로 건물의 윤곽선을 직선화하고 서로 마주보는 선은 평행하게 하고 건물의 모서리는 90도를 유지한다. 이를 위하여 각 건물에 대해서 추출된 윤곽선의 화소들 이용하여 최소제곱법으로 선형 방정식으로 fitting(선형회기)하고, 건물의 모서리 점에서는 fitting 오차가 크게 발생하므로 일정 임계오차를 초과하는 과대 오차가 발생하는 지점은 건물의 모서리 점으로 지정한다.



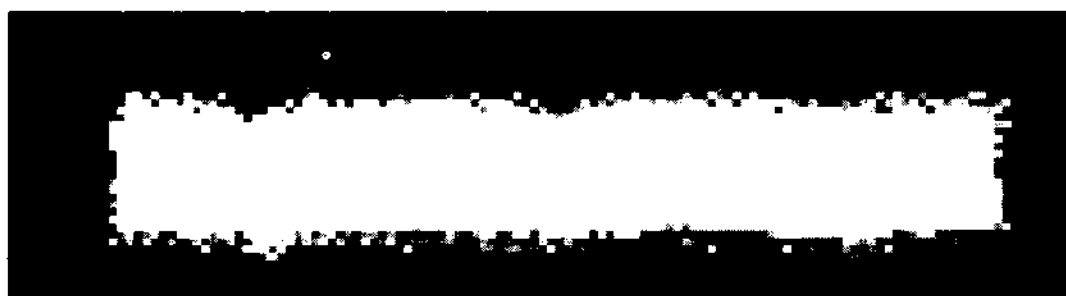
건물 윤곽선의 직선화는 다음과 같은 식을 이용하여 수행한다.

$$Y_i = aX_i + b \quad (9)$$

여기서  $X_i$ 와  $Y_i$ 는 건물 윤곽선의 좌표이며, 최소제곱법으로부터 결정된 직선의 방정식 계수  $a$ 와  $b$ 를 이용하여 각 화소에서 다음과 같이 fitting 오차( $e_i$ )를 계산하여 모서리 점의 좌표를 구한다.

$$e_i = \sum_{i=1}^n \sqrt{(\hat{X}_i - X_i)^2 + (\hat{Y}_i - Y_i)^2} \quad (10)$$

여기서  $n$ 은 경계선 화소의 개수,  $\hat{X}$ 와  $\hat{Y}$ 는  $X$ 와  $Y$ 에 대한 추정값이다. 이에 대한 자세한 내용은 Lee 등(2007b)에서 서술되어 있다. 건물의 규격화에 관한 방법은 이정호 등 (2007), Sohn 등(2007)과 같은 논문에서 제시되고 있다. 본 연구에서는 건물의 모서리 점을 기반으로 최적의 직사각형으로 규격화 하였으며, 그림 9는 건물추출 및 윤곽선 결정 방법에 대한 흐름도이며, 그림 10은 최종적

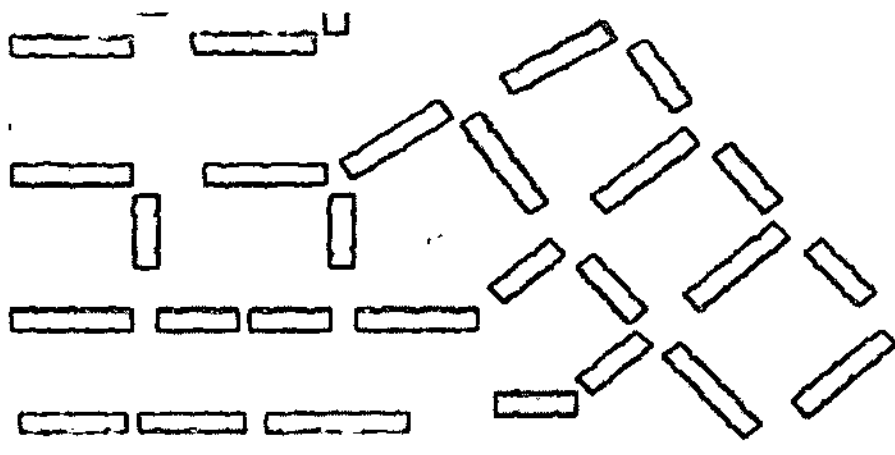


(a) Gaussian 노이즈(10%) 추가

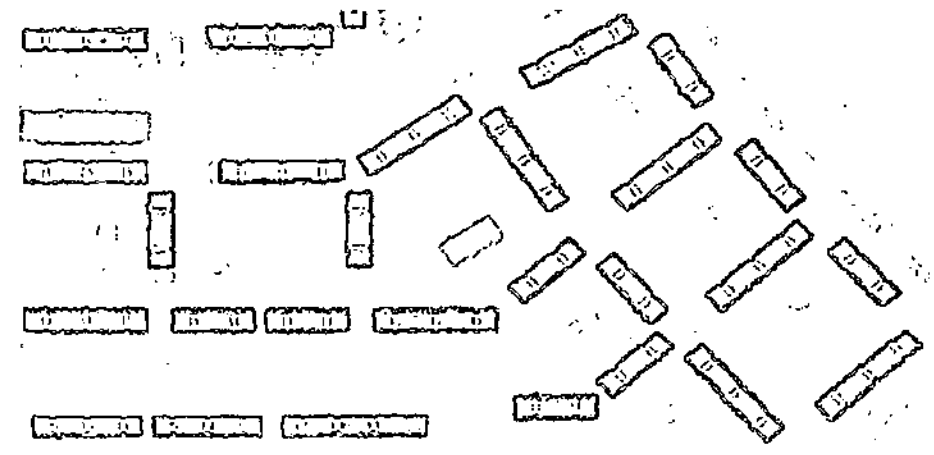


(b) 비등방성 확산 필터 적용결과

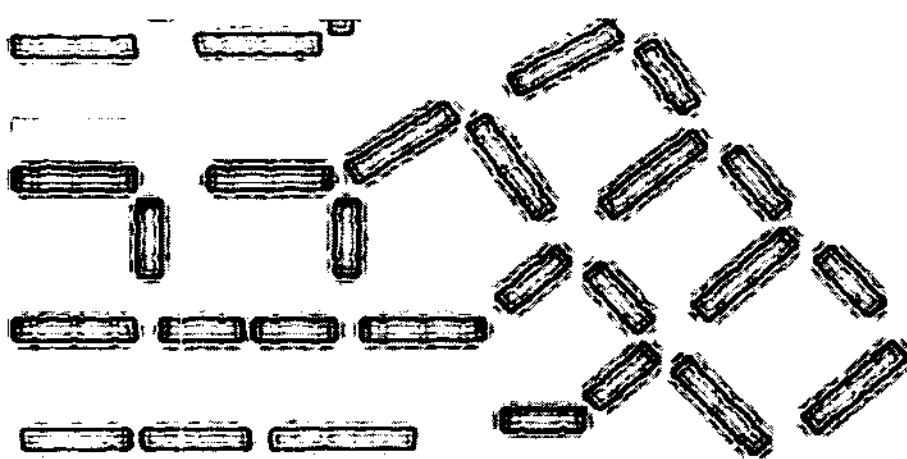
그림 7. 비등방성 확산 필터링 결과



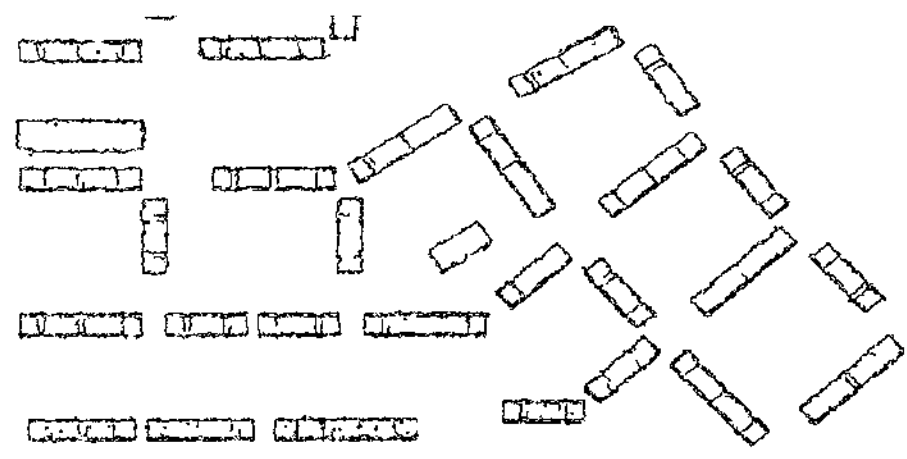
(a) Sobel 필터



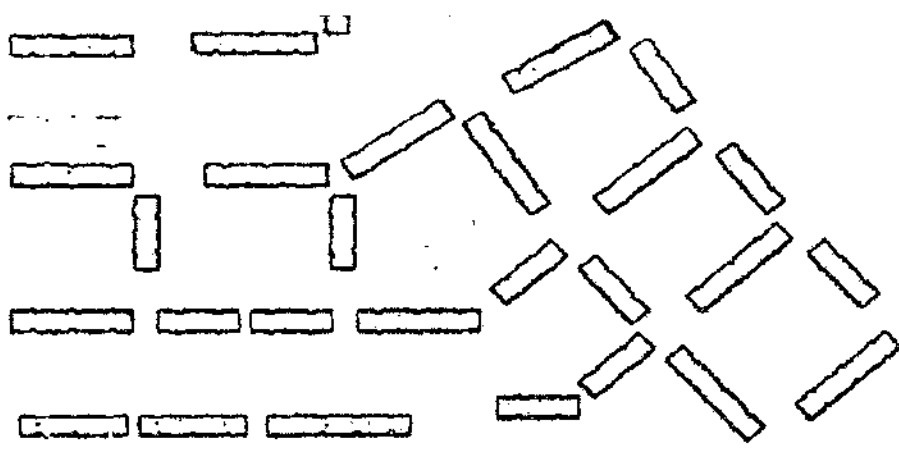
(b) Laplacian 필터



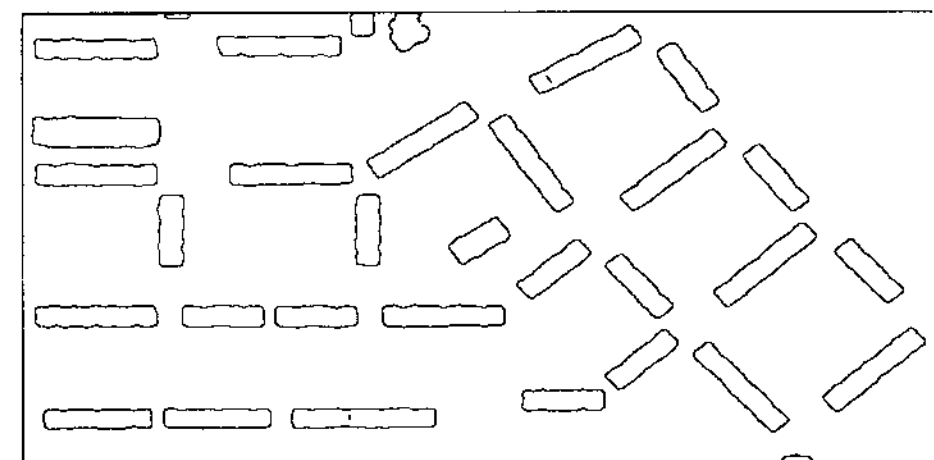
(c) DoG 필터



(d) Canny 필터



(e) Robert 필터



(f) Lanser 필터

그림 8. 다양한 윤곽선 추출 필터링 결과

으로 추출된 건물의 결과를 보여주고 있다. 건물의 규격화 과정에서 좌측상단 지역의 건물(그림 10에서 점선타 원으로 표시한 건물)에 회전이 발생하였다. 이는 건물 윤곽선 추출이 완전하지 못하여 규격화 과정에서 발생한 오류이다.

건물을 직사각형 형태로 규격화하는 것은 단순한 형태의 건물에는 잘 적용될 수 있지만, 다양하고 복잡한 형태의 건물에 대하여 일률적으로 규격화할 경우에는 건물의 모델링 결과가 실제 건물과 부합되지 않을 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 여러 가지 사항을 고려할 필요가 있으며, 다음과 같은 제약 조건을 적용할 수 있다.

- 서로 마주보는 윤곽선 각도의 차이가 어느 한계를 벗어나면 서로 평행하게 규격화 하지 않는다.
- 모서리 점에서 각도가 90도 보다 현저하게 차이가 나면(예: 60도 또는 120도) 90도로 규격화 하지 않는다.
- 모서리 점이 4개가 아닌 경우에는 사각형 건물이 아니므로 직사각형으로 규격화 하지 않는다.

### 3. 지붕의 면분할

건물의 정밀 3차원 모델링을 위해서는 지붕의 다양한 형태와 상부구조물 등의 묘사가 요구된다. 그러나 이를 자동으로 처리하는 것은 어려운 문제이며, 이에 대한 다양한 모델링 방법들이 제시되고 있다(문지영 등, 2005; 송낙현 등, 2007; Lee 등, 2001; Lee 등, 2007a). 많은 연구들은 LiDAR 데이터와 다양한 영상 및 수치지도 데이터를 복합적으로 활용하여 건물 모델링 기법을 제안하고 있다. 이러한 방법들은 서로 다른 데이터를 상호 보완적으로 이용한 시너지 효과를 얻을 수 있으며 향상된 결과를 도출할 수 있는 장점이 있는 반면, 경우에 따라 LiDAR 데이터만 존재하는 지역에 대해서는 다양한 데이터를 활용할 수 없는 문제점이 발생하게 된다.

본 연구에서는 LiDAR 데이터만 이용하여 지붕의 상부 구조물을 탐지하고 지붕면을 분할하기 위하여 anisotropic diffusion에 의해 처리된 영상에서 인접 화소값 간의 차이를 비교하여 영역을 구분하는 영역확장 기법을 적용하여 서로 다른 지붕면과 지붕 구조물을 영역별로 분할하였다. 영역확장은 기본적으로 화소값을 비교하여 영역을 집단화(grouping)하므로 노이즈에 매우 민감하므로 노이즈를 적절하게 제거되지 않으면 좋은 결과를 얻기 어렵다.

그러나 본 연구에서는 2장에서 설명한 바와 같이

LiDAR 데이터의 영상화 과정에서 화소값이 균일화 되었으며, 전처리 과정에서 노이즈가 효과적으로 제거된 anisotropic diffusion된 영상을 사용하여 영역확장을 적용하기에 적절한 데이터를 이용하였다. 영역확장은 인접 화소값의 차이가 허용범위보다 작으면 동일 영역으로 지정하는 단순한 알고리즘이며 다음과 같이 표현된다.

$$A \supset \{(x,y);(x+i,y+j)\} \text{ if } |g(i,j) - g(i+n,j+m)| \leq \delta \quad (11)$$

여기서  $A$ 는 그룹화된 동일영역을 의미하고,  $\delta$ 는 허용 범위이다. 또한 노이즈 혹은 의미없는 화소값에 의해서 새로운 영역이 형성되는 것을 방지하고, 의미있는 영역을

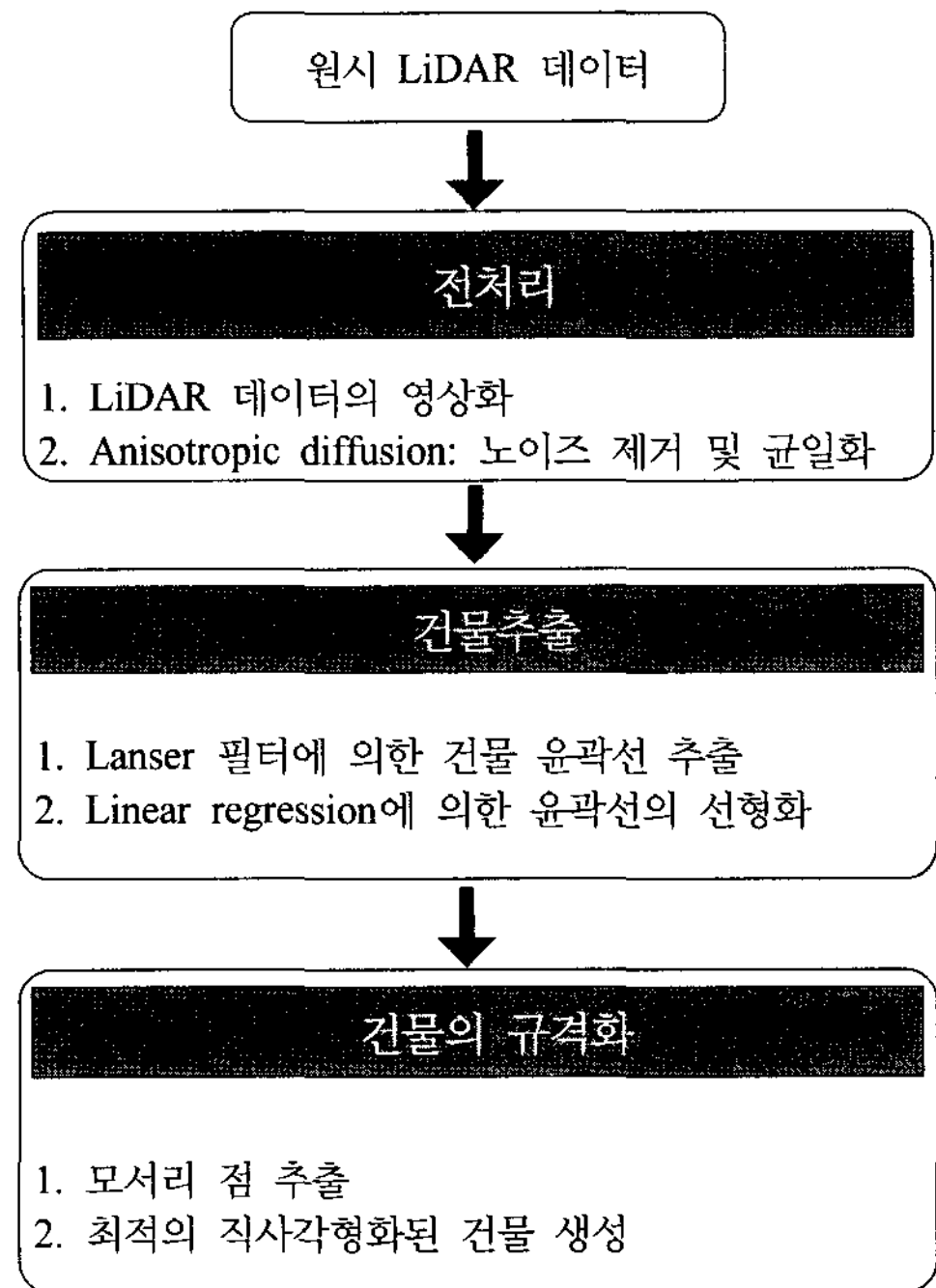


그림 9. 건물추출 방법의 흐름도

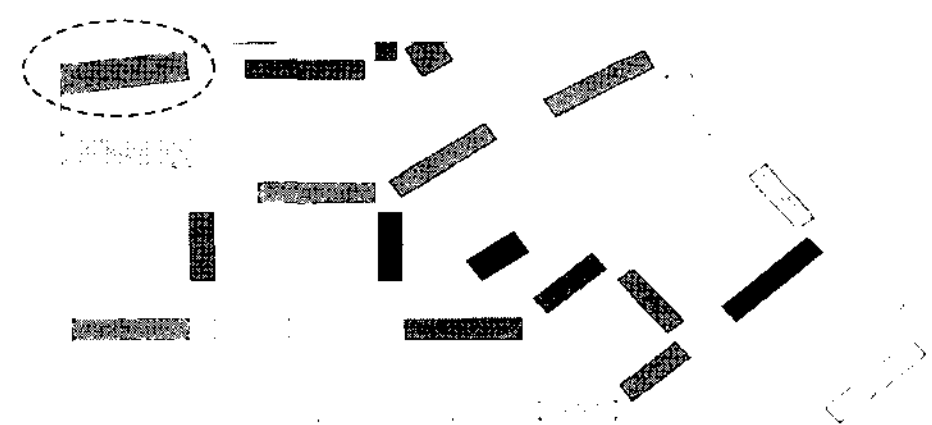


그림 10. 건물추출 및 규격화(점선으로 표시한 건물은 오류가 발생함)

구성하기 위해서는 최소 영역크기가 정의되어야 하여야 한다. 건물지붕의 구조물 및 서로 다른 지붕면의 면적은 하나의 화소값에 비해 크기 때문에 충분한 크기의 최소 면적을 정의하여야 한다.

영역확장 기법을 적용할 경우, 특정 영역에 포함되지 못하는 화소들은 빈 영역 즉, 아무 영역에도 포함되지 않는 화소들이 발생할 수 있다. 이런 문제를 해결하기 위하여 부가적으로 화소값을 확장하는 방법(pixel value expanding)으로 모든 화소가 일정한 영역에 속하도록 하여 데이터를 분할하였다. 그림 11은 연구지역내의 모든 건물의 지붕에 대해 면분할된 결과를 보여주고 있다. 그림 12-(a)는 지붕면과 상부구조물이 구별되는 것을 상세하게 보여주고 있으며, 그림 12-(b)는 복층구조로 된 건물의 지붕면이 분할된 결과를 상세하게 보여주고 있다.

#### 4. 지붕형태 및 상부구조물 특성분석 방법

##### 4.1 통계적 및 기하적 특성추출

앞 장에서는 영상화된 LiDAR 데이터에 영상처리 기법을 이용하여 건물을 추출하고 지붕을 분할하는 방법에 대하여 제안하였다. LiDAR 데이터만을 이용하여 다양한 형태 및 복잡한 구조를 가지고 있는 지붕의 상부구조물을 모델링하는 것은 불완전할 수 있다. 그러므로 본 장에서는 추출된 건물에 대하여 지붕의 형태를 분석하고 데이터를 분할한 면에 대하여 모델링하기 위한 특성정보를 추출할 수 있는 방법을 제시한다. 이를 위하여 본 연구에서는 지붕형태에 대한 특성정보는 통계적 및 기하적 요소로 구분하였으며, 건물과 같은 인공 구조물을 분할하면 일반적으로 평면, 경사면, 곡면과 같은 수학적 함수로 표현할 수 있다. 즉 분할된 지역에 존재하는 LiDAR 표고점으로 부터 최소제곱법을 이용하여 각 각의 분할면(surface patch)에 적합한 fitting 함수를 정의함으로써 건물 모델

링이 가능하다. 3차원 건물 모델링을 위한 여러 연구(송낙현 등, 2007; Chilton 등, 1999; Csathó 등, 1999; Elaksher, 2002; Habib 등, 2006; Lee 등, 2007a; Moon 등, 2007)가 국내외적으로 진행되고 있다.

본 장에서는 지붕면을 세밀하게 분할하기 위해 추출된 건물에 대해 이동영역(moving window)를 설정하고, 이 영역을 이동하면서 영역 내에서 LiDAR 표고 데이터의 평균 표고값과 표준편차를 계산한다. 또한 인접 LiDAR 점간의 경사도를 구한다. 경사각 또는 곡률을 기반으로 객체의 형태를 인식하고 묘사하는 방법은 컴퓨터 시각(computer vision 또는 machine vision) 분야에서 활용하고 있다 (Ballad 등, 1982; Jain 등, 1995). 그림 13은 추출된 건물의 지붕에 이동영역의 적용을 보여주고 있다.

(1) 이동평균: 이동영역내의 표고의 평균을 계산

$$Z_{avg} = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{n} \quad (12)$$

여기서 n은 이동영역 내에 존재하는 LiDAR 점의 수이다.

(2) 이동표준편차: 이동영역내의 표고에 대한 표준편차를 계산

$$\sigma_z = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Z_i - Z_{avg})^2}{n-1}} \quad (13)$$

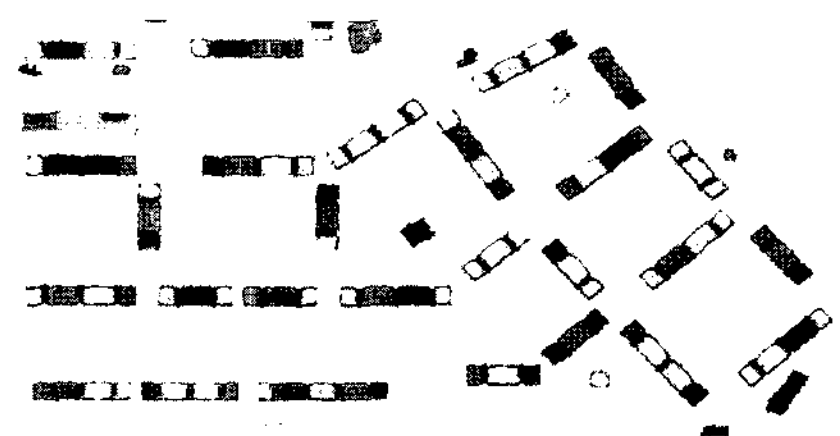
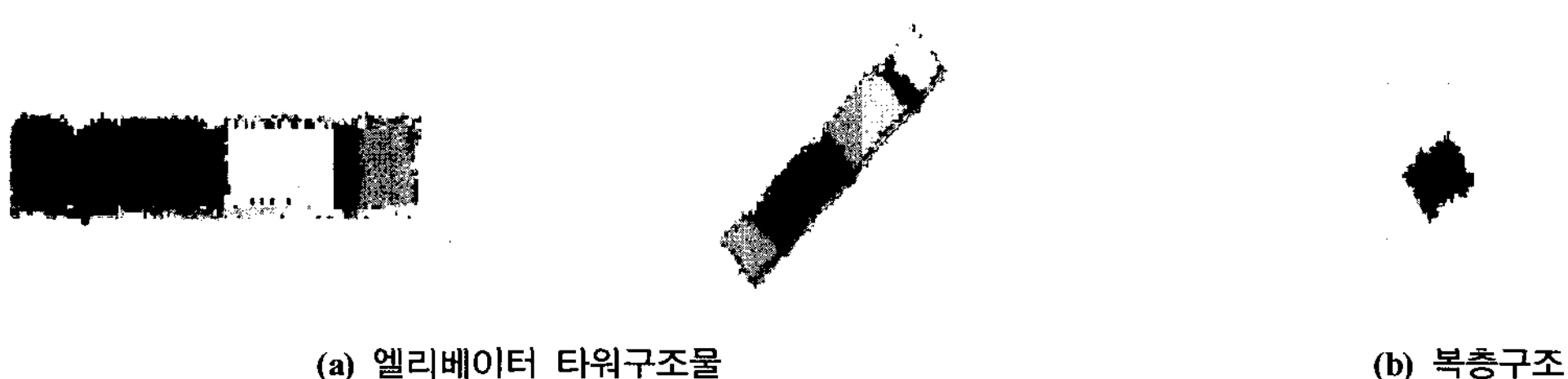


그림 11. 지붕 상부구조물의 면분할 결과



(a) 엘리베이터 타워구조물

(b) 복층구조

그림 12. 지붕의 상부구조물 분할 특성



(3) 인접점 간의 경사: 두 점간의 경사도를 계산

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{Z_{i+1} - Z_i}{X_{i+1} - X_i} \right) \quad (14)$$

#### 4.2 분할면 Fitting

그림 14는 이동영역에 대해 분할 경계선의 위치를 추정하는 방법을 도식적으로 나타내고 있다. 분할 경계선은 표고가 서로 다른 지점에서 발생하며, 분할 경계선의 위치는 통계값과 경사각이 급격히 변하는 곳에 존재한다 (그림 15 참조).

그림 15는 제시한 방법의 개념을 설명하기 위하여 시뮬레이션 LiDAR 데이터의 대표적인 지붕단면 형태의 예와 도출된 특성정보를 도식적으로 보여주고 있다.

분할면의 위치와 형태(즉 분할면에 fitting될 최적의 함수)는 표고에 대한 평균(AVG), 표준편차(STD) 및 경사각(SLOPE)을 종합적으로 분석하여 도출할 수 있으며, 3D 건물 모델링의 자동화를 위해서는 다음과 같은 알고리즘을 기반으로 구현할 수 있다.

if  $\{(AVG) \leq \Delta\epsilon \ \& \ (STD) \cong 0 \ \& \ (SLOPE) \cong 0\}$   
 then fit surface patch with a "flat planar" function

if  $\{(AVG) = \Delta\epsilon \ \& \ (STD) \cong 0 \ \& \ (SLOPE) \cong 0\}$   
 then fit surface patch with a "slant planar" function

if  $\{(AVG) = \Delta\epsilon \ \& \ (STD) \cong 0 \ \& \ (SLOPE) = \Delta\tau\}$   
 then fit surface patch with a "curved" or "spherical" function

여기서  $\Delta\epsilon$ 는 평균값의 변화량을 의미하며,  $\Delta\tau$ 는 경사각의 변화량을 의미한다. 곡면으로 구성된 분할면은 다항식으로 표시할 수 있다. 분할된 면을 일반적인 다항식으로 fitting하기 위한 계수 ( $a_{kk} \dots a_{00}$ )는 다음 표 1과 같이 구성할 수 있다.

표 1. 다항식의 계수구성 (k는 다항식의 차수)

독립변수의 차수	$Y^k$	$Y^{k-1}$	...	$Y^0$
$X^k$	$a_{kk} X^k Y^k$	$a_{kk-1} X^k Y^{k-1}$	...	$a_{k0} X^k$
$X^{k-1}$	$a_{k-1k} X^{k-1} Y^k$	$a_{k-1k-1} X^{k-1} Y^{k-1}$	...	$a_{k-10} X^{k-1}$
...	...	...	...	...
$X^0$	$a_{0k} Y^k$	$a_{0k-1} Y^{k-1}$	...	$a_{00}$

건물의 지붕과 같은 인공 구조물의 경우, 곡면은 최대 2차 다항식 또는 구면 방정식으로 모델링하는 것이 적합하다고 판단된다. 최소제곱법에 의한 fitting 함수는 분할된 면의 종류에 따라 다음과 같은 함수를 사용할 수 있다.

(1) 평면(Planar surface):  $Z = aX + bY + c$  (15)

(2) 곡면(Curved surface):  $Z = aX^2 + bXY + cY^2 + dX + eY + f$  (16)

(3) 구면(Spherical surface):  $R^2 = (X-a)^2 + (Y-b)^2 + (Z-c)^2$  (17)

또는 구면의 일반식:  $X^2 + Y^2 + Z^2 + aX + bY + cZ + d = 0$  (18)

여기서  $X, Y, Z$ 는 LiDAR 데이터의 3차원 좌표값이며,  $a, b, \dots, f$ 는 함수의 계수이고,  $R$ 은 구의 반지름이다. Fitting 함수의 계수를 결정하기 위한 관측방정식은 다음과 같다.

$$Z_{n \times 1} = A_{n \times m} \xi_{m \times 1} + e_{n \times 1}, \quad e \sim (0, \sigma_0^2 I_{n \times n}) \quad (19)$$

여기서  $Z$ 는 LiDAR 데이터의 표고값,  $A$ 는 미지계수의

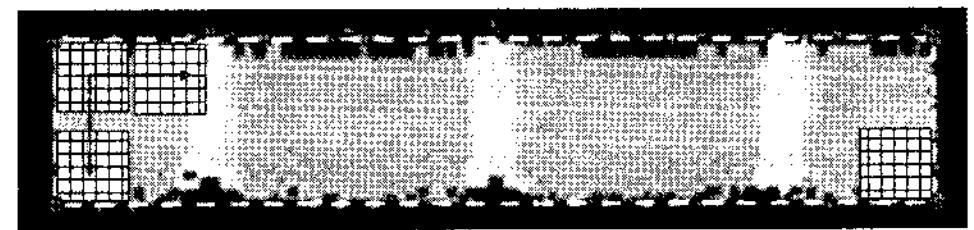
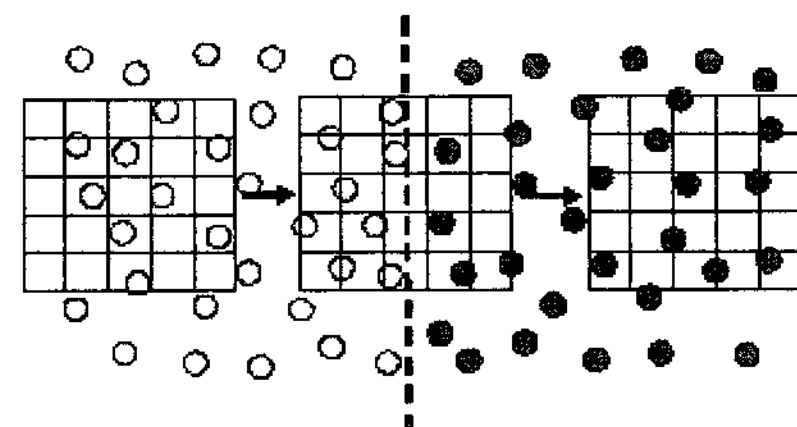


그림 13. 지붕형태의 특성분석을 위한 이동영역(moving window) 설정



<분할면 A> 분할 경계선의 위치 <분할면 B>

그림 14. 이동영역에 의한 분할 경계선의 결정

편미분행렬,  $\xi$ 는 다항식의 미지계수,  $e$ 는 오차,  $\sigma_0^2$ 는 분산,  $I$ 는 단위 행렬을 나타낸다.  $n$ 은 데이터의 수,  $m$ 은 함수를 구성하는 미지계수의 수이다. 식 19의 관측방정식을 행렬로 표시하면 식 20와 같다.

$$Z = \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ \dots \\ Z_n \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} X_1^k Y_1^k & X_1^k Y_1^{k-1} & \dots \\ X_2^k Y_2^k & X_2^k Y_2^{k-1} & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ X_n^k Y_n^k & X_n^k Y_n^{k-1} & \dots \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} a_{kk} \\ a_{kk-1} \\ \dots \\ a_k \\ a_{k-1k} \\ a_{k-1k-1} \\ \dots \\ a_{00} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} X_1^k & X_1^{k-1} Y_1^k & X_1^{k-1} Y_1^{k-1} & \dots & 1 \\ X_2^k & X_2^{k-1} Y_2^k & X_2^{k-1} Y_2^{k-1} & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_n^k & X_n^{k-1} Y_n^k & X_n^{k-1} Y_n^{k-1} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} a_{kk} \\ a_{kk-1} \\ \dots \\ a_k \\ a_{k-1k} \\ a_{k-1k-1} \\ \dots \\ a_{00} \end{bmatrix} \quad (20)$$

최소제곱법에 의한 미지 다항식 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\xi} = (A^T A)^{-1} (A^T Z) \quad (21)$$

### 4.3 시뮬레이션 데이터 및 실험결과

그림 16은 다양한 지붕 상부구조물을 시뮬레이션한 LiDAR 데이터와 제안한 방법의 적용을 도식적으로 보여주고 있다. 연구지역의 실제 건물은 평면지붕 상부에 직육면체의 엘리베이터 타워가 있는 단순 평면들로 이루어진 아파트 건물이므로 분할된 면들은 3차원 평면방정식으로 fitting 하여 그림 17과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 모델링 결과에 대한 정량적인 정확도 분석은 기준 데이터(예: 3차원 수치지도 또는 지상측량 성과 등)의 부재로 직접 할 수 없으므로, 평면에 대한 분할 및 fitting 결과를 시각적으로 평가하여 합리적임을 알 수 있었다.

연구지역에는 다양한 형태의 지붕으로 구성된 건물이 존재하지 않으므로, 제안한 방법의 실험 및 검증에 위하여 격자간격을 0.5m로 구성하고, 표고값에 -0.4m~+0.4m 범위의 무작위 노이즈(random noise)를 추가한 아치형 및

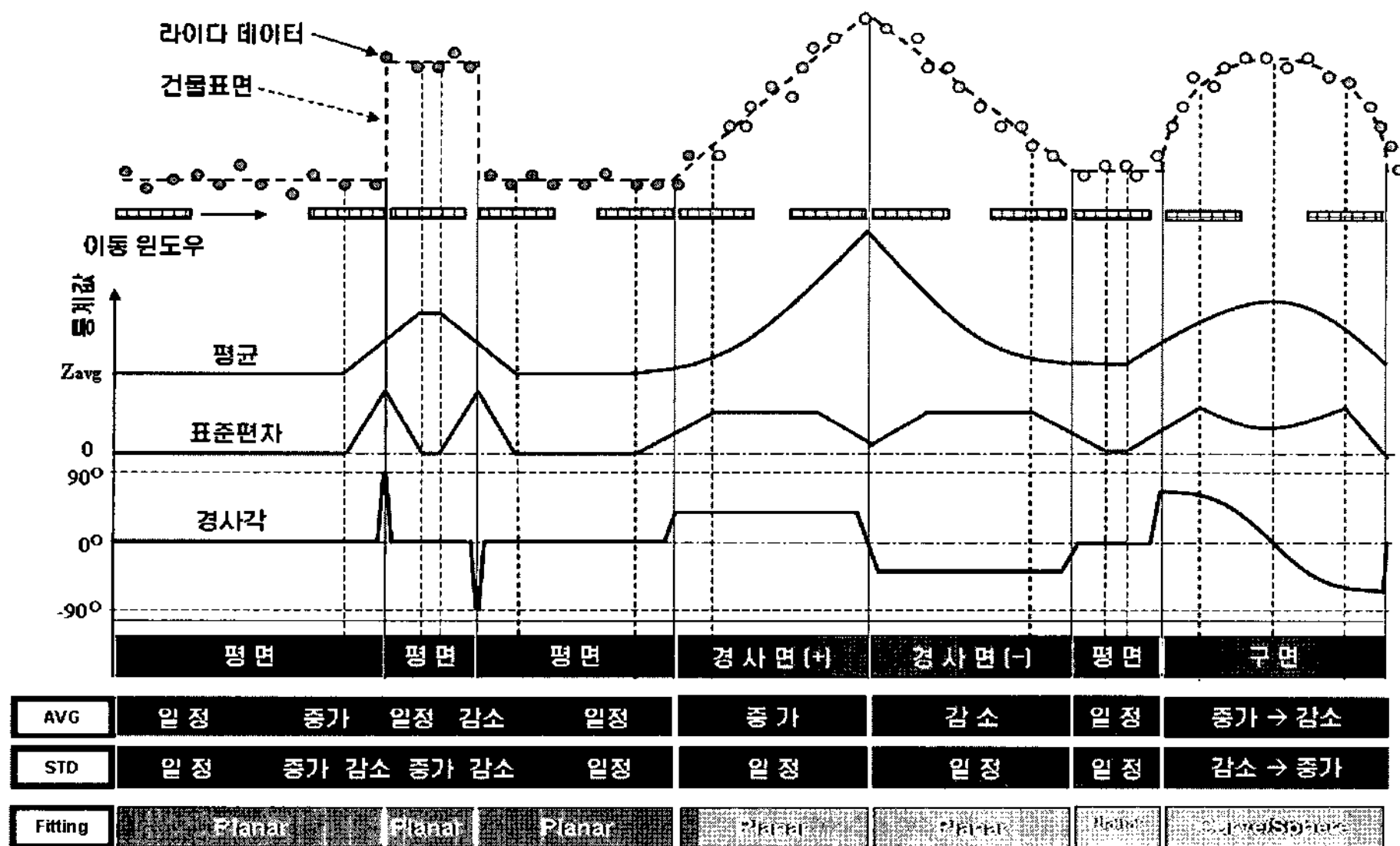


그림 15. 지붕단면 형태분석을 위한 특성정보 도출

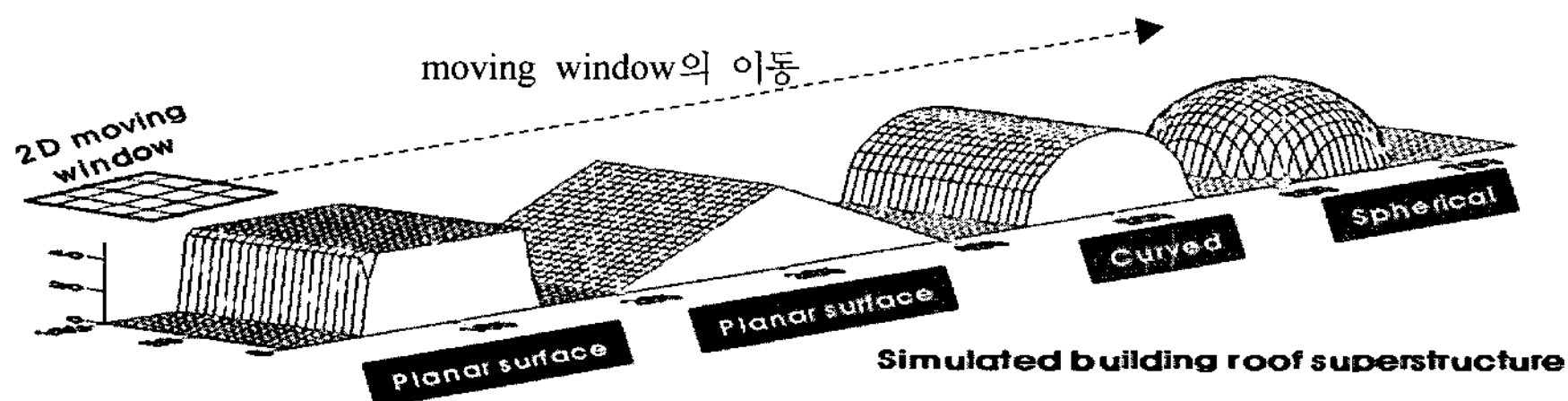


그림 16. 시뮬레이션 LiDAR 데이터 및 분할면 fitting을 위한 함수결정

돔형 지붕의 시뮬레이션 LiDAR 데이터를 생성하였다. 그림 18은 아치형 및 돔형형태의 시뮬레이션 LiDAR 데이터와 2차 곡면함수 fitting에 의한 모델링 결과를 보여주고 있다. 2차 곡면함수로 fitting한 결과, 아치형 지붕의 RMSE(평균제곱근오차)는 1.13m, 돔형지붕의 RMSE는 1.99m 이다. 분석결과 RMSE가 상대적으로 큰 원인은 다음과 같이 설명된다.

아치형 시뮬레이션 데이터는 원통 방정식으로 생성되었고, 돔형 시뮬레이션 데이터는 구의 방정식으로 생성되었으므로, 이를 2차 곡면함수로 fitting할 경우 부분적으로 오차가 크게 발생하는 지역이 있다.

2차 곡면함수는 포물선 형태이므로, 원을 기반으로 한 구면(spherical surface) 시뮬레이션 데이터의 완전한 재현에는 한계가 있다.

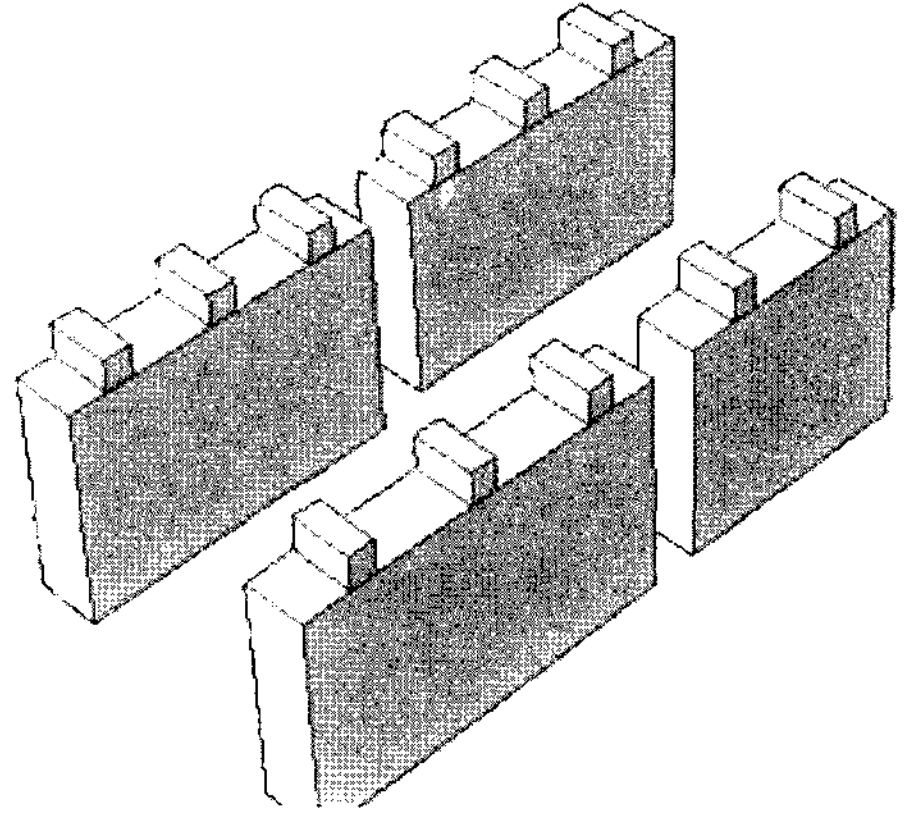


그림 17. 실제 건물의 3차원 평면식에 의한 건물 모델링 결과

지붕형태	아치형 지붕	돔형 지붕
시뮬레이션 데이터		
2차 곡면함수 fitting에 의한 모델링 결과		
2차 곡면함수의 제곱근 fitting에 의한 모델링 결과		

그림 18. 시뮬레이션 LiDAR 데이터와 모델링 결과

포물면 형태를 구면에 근사한 형태로 묘사하기 위해서 2차 곡면함수에 제곱근을 취하면, 전체적인 fitting 형태는 시뮬레이션 데이터와 유사한 결과를 보여주고 있다.

본 장에서 제안한 방법은 지붕 구조물의 모델링을 위한 특성정보의 추출과 분할면에 최적의 fitting 함수를 결정하는 것이며, 이를 시뮬레이션 데이터에 적용한 결과를 기반으로 방법론적 제시를 목적으로 하고 있다. 제안한 방법은 건물지붕의 3차원 모델링에 활용이 가능함을 보여주고 있다. 세부적인 기하학적 특성을 분석하여 곡면 또는 구면과 같은 형태의 지붕을 정밀 모델링하기 위한 최적의 fitting 함수를 결정하는 방법은 어려운 일이다. 제안한 방법은 정확도는 상대적으로 낮지만, 전체적인 특성과 형태가 타당한 수학적 함수에 의한 3차원 건물 모델링의 자동화를 목적으로 하고 있다.

## 5. 결 론

LiDAR 데이터로부터 건물을 추출하고 지붕의 구조물의 분할을 위해 디지털 영상처리 기법을 적용하는 방법과 지붕의 형태 및 상부구조물 분석을 위한 특성정보 추출 방법을 제시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

LiDAR 데이터를 영상화하여 다양한 디지털 영상처리 기법을 활용하여 효율적으로 건물을 추출할 수 있었으며, 지붕의 상부구조물에 대한 세부 3차원 모델링을 위해서는 지붕형태 및 상부구조물에 대한 정보를 추출하여야 하며 이를 위해서는 면분할 과정이 요구된다. 추출된 건물에 대하여 유사한 데이터를 집단화하는 영역확장 기법을 기반으로 지붕면을 분할 할 수 있었다.

지붕의 면분할은 지붕의 형태와 상부 구조물의 특성을 분석하고 이를 기반으로 3차원 건물 모델링에 적용할 수 있는 방안을 제시하였다. 이를 위하여 추출된 건물에 이동영역에 대하여 지역적으로 평균, 표준편차 및 경사도를 계산하여 분할면의 경계선과 지붕의 모델링 함수를 결정하는데 적용될 수 있었다. 그러므로 제시한 건물추출 및 지붕 면분할 방법은 3차원 세부 건물 모델링의 기초 데이터 처리과정으로 활용될 수 있다고 판단된다.

실제 건물 데이터에 적용한 경우 건물 형태에 적합한 3차원 평면함수로 모델링한 결과는 시각적으로 평가하여 그 결과가 타당함을 알 수 있었으며, 곡면과 구면으로 이루어진 시뮬레이션 데이터의 경우에는 약 1~2m 이내의 정확도로 모델링 되었다. 그러므로 복잡한 형태의 건물에

높은 정확도가 요구되는 전문분야(예: 대축척 정밀 3차원 수치지도 제작)에 적용하는 데는 한계가 있지만, 그 외의 다양한 활용분야에 적용이 가능할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 서울시 산학연 협력사업(10540)의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- 김성삼, 구신희, 김원석, 유환희 (2006), LiDAR 자료를 이용한 수치지도 건물레이어 갱신, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 2006년 4월, pp. 411-417.
- 문지영, 이임평, 유병민 (2005), LiDAR 데이터와 디지털 영상을 이용한 표면의 분할, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 2005년 4월, pp. 267-274.
- 송낙현, 신성웅, 조홍범, 조우석 (2007), LiDAR 데이터를 이용한 옥트리 분할 기반의 지붕요소 자동추출, 한국측량학회지, 25권, 4호, pp. 327-336.
- 이동천, 염재홍 (2005), LiDAR 데이터를 이용한 수치지도의 건물 및 등고선 레이어 생성, 한국측량학회지, 23권, 3호, pp. 313-322.
- 이동천, 정형섭, 임세봄, 염재홍 (2008), 디지털 영상처리 기법에 의한 LiDAR 표고 영상으로부터의 건물추출 및 지붕 상부구조물 분할, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 2008년 4월, pp. 129-132.
- 이정호, 한수희, 변영기, 유기윤 (2007), 라이다 분할포인트로부터 복잡한 건물의 외곽선 추출 기법, 한국측량학회 춘계학술발표회 논문집, 2007년 4월, pp. 153-156.
- Ayman, H. and Kim, C. (2006), LiDAR-Aided True Orthophoto and DBM Generation System: in Innovations in 3D Geo-Information Systems, Abdul-Rahman, A., Zlatanova, S. and Coors, V. (editors), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 47-65.
- Ballad, D. and Brown, C. (1982), Computer Vision, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 237-258.
- Bovik, A. (2005), Handbook of Image and Video Processing, 2nd ed., Academic Press, New York, NY, pp. 555-586.
- Chilton, T., Jaafar, J. and Priestnall, G. (1999), The Use of Laser Scanner Data for the Extraction of Building Roof Detail Using Standard Elevation Derived Parameters, International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 32, Part 3W14, pp. 137-143.
- Csathó, B., Boyer, K. and Filin, S. (1999), Segmentation of Laser Surfaces, International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 32, Part 3W14, pp. 73-80.
- Elaksher, A. and Bethel, J. (2002), Reconstructing 3D Buildings from LiDAR Data, Proceedings of Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III, Symposium 2002, September, 2002, Graz, Austria, pp. 102-107.
- Fabio P., Dell'Acuqa, F., Lisini, G. and Gisotta, F. (2006),



- Improving Building Footprints in InSAR Data by Comparison with a Lidar DSM, PE & RS, Vol. 72, No.1, pp. 63-70.
- Jain, R. Kasturi, R. and Schunck, B. (1995), *Machine Vision*, McGraw Hill, New York, NY, pp. 186-233.
- Jähne, B. and Haußecker, H. (2000), *Computer Vision and Applications: A Guide for Students and Practitioners*, Academic Press, New York, NY, pp. 439-458.
- Kraus, K. (2002), Principles of airborne laser scanning, *Journal of the Swedish Society for Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol. 1, pp. 53-56.
- Hamming, R. (1983), *Digital Filters*, 2nd ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., pp. 1-18.
- Hornberg, A. (2006), *Handbook of Machine Vision*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp. 587-612.
- Lanser, S. and Eckstein, W. (1992), A Modification of Deriche's Approach to Edge Detection, 11th IAPR International Conference on Pattern Recognition, Conference C: Image, Speech, and Signal Analysis, <http://citeseer.ist.psu.edu/522604.html>.
- Lee, D.C., Jung, H.S. and Yom, J.H. (2007a), 3D Building Reconstruction and Visualization by Clustering Airborne LiDAR Data and Roof Shape Analysis, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 25, No. 6-1, pp. 507-516.
- Lee, D.C., Jung, H.S., Yom, J.H., Lim, S.B. and Kim, J.H. (2007b), Automatic Generation of Building Footprints from Airborne LIDAR Data, *Proceedings of International Symposium on Remote Sensing 2007*, October 2007, Jeju, Korea, Unpagged CD-ROM.
- Lee, D.H., Lee, K.M. and Lee, S.U. (2008), Fusion of Lidar and Imagery for Reliable Building Extraction, PE & RS, Vol. 74, No. 2, pp. 215-225.
- Lee, I. and Schenk, T. (2001), Autonomous Extraction of Planar Surfaces from Airborne Laser Scanning Data, ASPRS Annual Conference, St. Louis, MO, USA, unpagged Proceedings.
- Maune, D. (2007), *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*, 2nd ed., ASPRS, Bethesda, M.D., pp. 199-252.
- Moon, J. and Lee, I. (2007), A Region Based Approach to Surface Segmentation Using LIDAR Data and Images, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 25, No. 6-1, pp. 575-583.
- Rottensteiner, F. and Jansa, J. (2002), Automatic Extraction of Building from LIDAR Data and Aerial Images. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 34, Part 4, pp. 295-301.
- Sapiro, G. (2006), *Geometric Partial Differential Equations and Image Analysis*, Cambridge University Press, New York, NY, pp. 221-284.
- Sohn, G., Jaw, Y., Tao, V. and Cho, W. (2007), Geometric Regularization of Irregular Building Polygons: A Comparative Study, *Korean Journal of Geomatics*, Vol. 25, No. 6-1, pp. 545-555.

---

(접수일 2008. 4. 14, 심사일 2008. 5. 31, 심사완료일 2008. 6. 21)