

## LiDAR 자료를 이용한 도로의 선형정보 구축

### Construction of Road Alignment Information Using LiDAR Data

이종출<sup>1)</sup>·김희규<sup>2)</sup>·서용철<sup>3)</sup>·노태호<sup>4)</sup>

Lee, Jong Chool·Kim, Hee Gyoo·Seo, Yoong Cheol·Roh, Tae Ho

<sup>1)</sup> 부경대학교 공과대학 건설공학부 교수(E-mail : jcleee@pknu.ac.kr)

<sup>2)</sup> 경남정보대학 스페이스디자인 계열 교수(E-mail : kimhg51@hanmail.net)

<sup>3)</sup> 부경대학교 환경·해양대학 위성정보과학과 교수(E-mail : Suh@pknu.ac.kr)

<sup>4)</sup> 부경대학교 산업과학기술연구소 전임연구원(E-mail : rth1348@pknu.ac.kr)

#### Abstract

On the road, geometric structure such as horizontal alignment, vertical alignment and crossing inclination are important to explain characteristics of road and safety analysis. Especially, horizontal and vertical alignment are have to do with safety of covering.

In existing road, for the safety analysis or alignment improvement and expansion pavement, it needs alignment factor of road. Alignment factor of road can be acquired by design drawing. But, design drawing can be not exist because of rack of facility management and national policy that centered to construction. And also, existing design drawing have a lot of differences in comparison with another existing design drawing cause of alignment improvement. In this case, for the precise analysis of alignment, 3-dimensional location information on the road centerline and acquisition of location information which related geometric structure are must to be preceded.

In this study, therefore, it provide alignment factors which needed to alignment improvement and road safety analysis by acquisition of road space information and extraction of road centerline data using LiDAR data.

#### 1. 서 론

도로에서 평면선형, 종단선형 및 횡단경사 등과 같은 기하구조는 도로의 특성을 설명하거나 도로의 안전성 분석에 필요한 중요한 요소이다. 특히, 평면 및 종단선형은 도로의 사용성 측면에서 직접적으로 영향을 미치며, 선형의 양부는 주행의 안전성과 직접관련이 있다. 기존도로에 대하여 선형 개량 및 확포장을 하거나 안전성 분석을 하기 위해서는 도로의 선형요소가 필요하다. 도로의 선형요소는 설계도를 이용하여 취득할 수 있지만 기존 도로의 경우 그동안의 건설위주의 국가정책으로 인해 시설물 관리가 합리적으로 수행되지 못하여 설계도가 없는 경우가 있을 수 있으며, 설계도가 존재하는 경우라도 선형 개량 등의 이유로 기존 도면과 상이한 경우가 있다. 이러한 경우 도로의 선형을 정확히 분석하기 위해서는 도로 중심선에 대한 3차원 위치정보 뿐만 아니라 기하구조에 관련한 위치정보의 획득이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구는 도로에 대해 LiDAR 자료를 이용하여 도로공간정보를 획득하고 도로 중심선에 대한 자료를 추출하여 선형개량 및 도로안전성 분석에 요구되는 선형요소를 제공하고자 한다.

#### 2. Douglas-Peucker 알고리즘

도로 선형에 있어서 평면선형은 직선, 원화곡선, 원곡선으로 구성되며, 종단선형은 직선과 곡선으로 구성된다. 이러한 도로 선형의 구성요소를 추출하기 위해서는 평면선형에서의 IP(intersection point) 위치와 종단선형에서의 VPI(vertical

point of intersection) 위치가 우선 결정되어야 하며, 이를 위해 직선 및 곡선구간의 분리가 선행되어야 한다. LiDAR 의해 취득된 점군 자료는 점밀도가 매우 높으므로, 방대한 양의 도로 중심선 자료를 이용하여 도로 선형의 구성요소를 추출하기 위해서는 선형 자료의 일반화가 필수적이다.

일반화와 관련된 주요 알고리즘은 여러 응용분야에서 개발된 것으로, 이들 알고리즘은 간단히 기하학적 성질을 이용한 것부터 플랙탈 차원을 이용한 다양한 알고리즘이 개발되었다(김감래 등, 1996). 본 연구에서는 선형 자료의 일반화 전후의 데이터에 의한 선형의 기하학적 특성에 큰 영향을 주지 않고, 자료의 처리속도를 크게 줄일 수 있는 Douglas-Peucker 알고리즘을 이용하여 선형을 일반화하였다(정의환, 2004). Douglas-Peucker 알고리즘은 선형사상을 구성하고 있는 전체 점들을 동시에 고려하는 전역적 단순화 기법으로써 단순화 정도를 결정하는 최소 기준치의 임계띠(tolerance band,  $\epsilon$ )를 설정하여 필요 없는 점들을 제거하는 방식의 알고리즘이다(Douglas, D.H. et al, 1973). Douglas-Peucker 알고리즘의 절차는 그림 1과 같다. 먼저 양 끝점을 이은 선분의 양쪽에 최소기준치 만큼의 임계띠를 씌우고, 중간에 있는 모든 점들과 선분에 내린 수선의 길이를 비교하여 그 최대길이를 갖는 점을 구한다. 그 점이 임계띠 외부에 존재할 경우, 최소기준치를 초과하므로 제거되지 않으며, stack에 저장된다. 다음 단계에서 임계띠는 저장된 점을 유동점으로 양 끝점과의 사이에 걸쳐지고 전 단계의 작업을 반복

하여 최대 수선길이를 갖는 점을 구하고 stack에 저장한다. 이와 같은 방법으로 임계치가 계속 이동하면서 임계치 외부에 해당되는 점들을 찾아 stack에 저장한다. 이렇게 탐색이 진행되면서 부동점과 유동점 사이에 중간점이 없거나 중간점들이 모두 최소기준치 미만인 경우 stack에 저장된 점을 유동점으로 이용하게 된다. 결국 stack에 저장된 점들은 일반화가 진행된 후의 최종 선형을 이루는 점들만 남게 되어 선형 단순화가 이루어지게 된다.

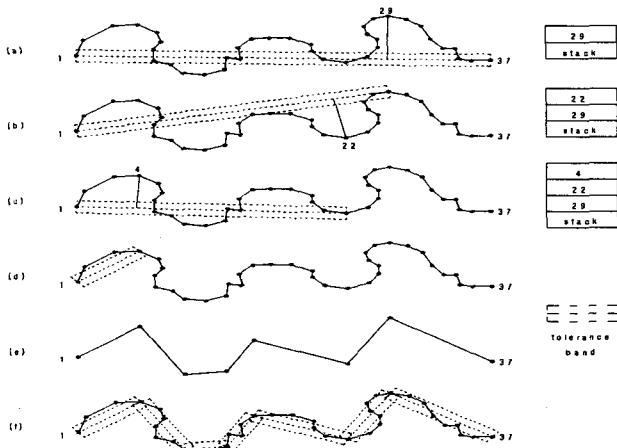


그림 1. Douglas-Peucker 알고리즘

(a)에서 점 1을 부동점으로, 점 37을 이동점으로 하여 임계치를 씌우고, 중간에 있는 모든 점들(2~36)에서 점 1과 점 37을 연결한 선분에 내린 수선의 길이를 구한다. 각 수선의 길이를 비교하여 최대 길이를 갖는 점 29를 구한다. 점 29는 임계치 외부에 존재하므로 제거되는 점에서 제외되며 stack에 저장된다. (b)에서 임계치는 점 29를 유동점으로 점 1과 점 29사이에 걸쳐지고, 전 단계의 작업을 반복하여 최대 수선길이를 갖는 점 22를 구한다. 점 22도 임계치 외부에 존재하므로 제거되는 점에서 제외되며 stack에 저장한다. (c)에서 점 22를 유동점으로 하여 계산하여, 임계치 외부에 존재하는 최대수선길이를 갖는 점 4를 stack에 저장한다. (d)에서 점 4를 유동점으로 하여 계산하면, 모든 수선의 길이가 임계치 범위내에 있으므로 점 2, 3을 제거한다. 부동점과 유동점 사이의 모든 점들이 삭제되었으므로, 유동점을 부동점으로 하고 stack에서 새로운 유동점 22를 불러온다. 이와 같은 방법으로 계속 계산해 가면 (e)에서 나타나는 최종 선형을 얻을 수 있다. (f)는 Douglas-Peucker 알고리즘에 의한 일반화 처리과정에서 부동점과 유동점 사이의 모든 점들이 임계치 내부에 있는 경우를 나타낸 것이다.

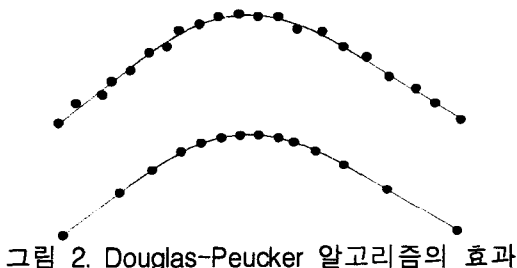


그림 2. Douglas-Peucker 알고리즘의 효과

Douglas-Peucker 일반화 알고리즘을 적용하여 도로 중심선을 단순화하면 그림 2와 같이 직선구간에서는 같은 직선상에 있는 절점들이 제거되면서 세그먼트의 간격이 넓어지고 곡선구간에서는 세그먼트의 간격이 상대적으로 좁게 형성된다(김성민, 2004).

### 3. 평면선형 설계요소 추출

도로의 평면선형은 도로의 사용성 측면에서 직접적으로 영향을 미치며, 특히 평면선형의 양부는 주행의 안전성과 직접 관련된다. 평면선형 설계요소에는 직선, 원곡선, 완화곡선의 3 종류가 있으며, 완화곡선에서도 여러 종류가 있으나 도로 설계에서는 자동차의 주행궤적과 형상이 비슷한 clothoid 곡선을 주로 사용하고 있다. 평면선형 설계요소를 추출하기 위해서는 IP 위치 결정, 원곡선의 반경(R) 결정, 완화곡선의 길이(L) 및 파라미터(A)의 결정이 순차적으로 이루어져야만 한다.

#### 3.1 최소제곱선 결정

도로 중심선에 관련된 점군 자료를 이용하여 평면선형의 구성요소를 추출하기 위해서는 IP(intersection point) 위치가 결정되어야 하며, 이를 위해서는 표본관측치  $(x_i, y_i)$ 를 이용한 2개의 표본회귀선의 결정이 우선시 된다. 본 연구에서는 최소제곱법을 이용하여 IP 결정을 위한 두 개의 표본회귀선을 결정하였다. 최소제곱법을 행렬로 표시할 때의 정규방정식은 식 (1)과 같다.

$$X^T \cdot Y = X^T \cdot X \cdot B \quad (1)$$

여기서,  $X^T$ 는  $X$ 의 전치행렬이며,  $x_1, x_2, \dots, x_n$ 는 관측된  $x$ 값이며,  $y_1, y_2, \dots, y_n$ 는 관측된  $y$ 값이며,  $b_1, b_2$  : 미지수이다. 그리고 미지수 행렬  $B$ 는 식 (2)에 의하여 구할 수 있다.

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (2)$$

취득된 두 개의 직선구간 자료를 식 (2)에 대입하면 식 (3)과 식 (4)와 같이 두 개의 최소제곱선이 결정되어진다.

$$Y = b_{21} \cdot X + b_{11} \quad (3)$$

$$Y = b_{22} \cdot X + b_{12} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 연립하면 식 (5)와 같이 교점의 좌표  $(X_{IP}, Y_{IP})$ 를 계산할 수 있다.

$$X_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{12}}{b_{21} - b_{22}}$$

$$Y_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{21}}{b_{21} - b_{22}} \cdot b_{21} + b_{11}$$

$$\text{or } Y_{IP} = -\frac{b_{11} - b_{21}}{b_{21} - b_{22}} \cdot b_{22} + b_{12} \quad (5)$$

#### 3.2 원곡선의 반경 결정

도로의 원곡선 구간에서는 설계속도와 편경사에 따라 그림 1과 같이 최소곡선반경을 정하고

있으며, 이는 직선 및 완화곡선 구간과 조화를 이루어야만 한다. 원곡선의 반경(R)은 도로 선형의 설계에 있어서 가장 중요한 요소로써, 완화곡선의 제원을 결정하기 위해서는 직선구간의 표본회귀선과 함께 원곡선의 반경이 결정되어야만 한다. 본 연구에서는 최소제곱원리를 이용한 LSC(least square circle) 기법을 이용하여 원곡선에 관련한 다중회귀 방정식을 결정하였다.

원곡선 구간의 중심선 좌표를  $(x_i, y_i)$ 로 하고, 원곡선의 중심 좌표 및 반경을  $(a, b)$ 와  $r$ 로 하는 원곡선의 방정식은 식 (6)과 같다.

$$(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 = r^2 \quad (6)$$

식 (6)을 원곡선에 관련한 최소제곱법에 적용하면 식 (7)과 같이 잔차의 제곱합( $I$ )으로 나타낼 수 있으며, 이를 전개하면 식 (8)과 같다.

$$I = \sum_{i=1}^n [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - r^2]^2 \quad (7)$$

$$I = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 - 2ax_i - 2by_i + a^2 + b^2 - r^2]^2 \quad (8)$$

식 (8)에  $A = -2a$ ,  $B = -2b$ ,  $C = a^2 + b^2 - r^2$ 을 적용하면

$$I = \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C]^2 \quad (9)$$

식 (9)를 각 항에 대해 편미분하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial I}{\partial A} = 2 \sum_{i=1}^n [x_i^2 + y_i^2 + Ax_i + By_i + C][y_i] \quad (10)$$

또한, 식 (3.10)은 식 (3.11)과 같은 행렬식으로 나타낼 수 있으며,

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i^2) & \sum_{i=1}^n (x_i * y_i) & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n (x_i * y_i) & \sum_{i=1}^n (y_i^2) & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_{i=1}^n (x_i^3) - \sum_{i=1}^n (x_i * y_i^2) \\ -\sum_{i=1}^n (y_i^3) - \sum_{i=1}^n (x_i^2 * y_i) \\ -\sum_{i=1}^n (x_i^2) - \sum_{i=1}^n (y_i^2) \end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $x_i, y_i$  : 원곡선 구간의 중심선 좌표이며,  $n$  : 원곡선 구간의 중심선 측정 개수를 의미한다.

최종적으로 결정된 미지수  $A, B, C$ 를 이용하여 원곡선의 중심 좌표  $(a, b)$  및 반경( $r$ )을 결정할 수 있다.

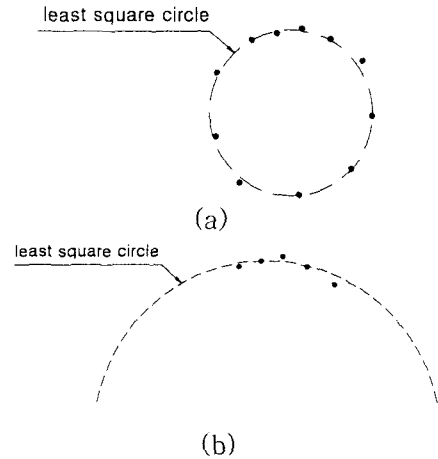


그림 3. 최소제곱원의 오차

그러나 그림 3의 (a)와 같이 원곡선 구간의 중심선 자료의 분포가 양호한 경우에는 LSC 기법의 결과가 비교적 정확하게 결정되지만, 그 분포가 그림 3의 (b)와 같이 편중된 경우에는 원곡선의 반경( $r$ )의 크기가 매우 크게 결정되므로 신뢰할 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 식 (11)과 같이 LCS 기법에 의해 결정된 원곡선의 중심 좌표  $(a, b)$ 와 원곡선 구간의 중심선 좌표  $(x_i, y_i)$ 간의 길이를 평균하여 원곡선의 반경을 최종적으로 결정하였다.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2})}{n} \quad (12)$$

여기서,  $R$ 은 원곡선의 반경이며,  $x_i, y_i$ 는 원곡선 구간의 중심선 좌표이며,  $a, b$ 는 원곡선의 중심 좌표이며,  $n$ 은 원곡선 구간의 중심선 측정 개수이다.

### 3.3 완화곡선길이 및 파라미터 결정

평면곡선부에는 곡률이 서서히 변화하고 직선과 원곡선을 매끄럽게 연결할 수 있는 완화곡선이 필요하며, 설계속도가 60km/hr 이상인 도로의 곡선부에는 완화곡선을 설치해야만 한다. 완화곡선에서도 여러 종류가 있으나 도로 설계에서는 자동차의 주행궤적과 형상이 비슷한 clothoid 곡선을 주로 사용하고 있다. clothoid 완화곡선의 파라미터( $A$ )의 크기는 접속하는 원곡선의 반경( $R$ )의 크기와 균형이 필요하며, 그 크기의 상한은 실용성을 고려하여 1,000m이하로 하는 것이 바람직하다. 또한 직선과 원곡선 사이에 완화곡선을 설치할 경우에는 직선과 원곡선을 직접 접속하는 경우에 비하여 이정량( $\Delta R$ )을 고려해야만 한다. 본 연구에서는 이미 결정된 원곡선의 반경( $R$ )과 이정량( $\Delta R$ )을 이용하여 평면선형의 중요 설계요소인 완화곡선의 파라미터( $A$ )와 완화곡선의 길이( $L$ )를 결정하였다.

이정량( $\Delta R$ )은 이미 결정된 원곡선의 중심 좌표  $(a, b)$ 에서 식 (3)과 식 (4)에 나타낸 두 개의

최소제곱선에 내린 수선의 길이( $l$ )와 원곡선의 반경( $R$ )의 차이로 설명될 수 있다.

$$\Delta R_1 = \sqrt{\left(\frac{b_{21} \cdot b - b_{21} \cdot b_{11} + a}{b_{21}^2 + 1} - a\right)^2 + \left(\frac{b_{21}^2 \cdot b + b_{21} \cdot a + b_{11} - b}{b_{21}^2 + 1}\right)^2} - R \quad (13)$$

$$\Delta R_2 = \sqrt{\left(\frac{b_{22} \cdot b - b_{22} \cdot b_{12} + a}{b_{22}^2 + 1} - a\right)^2 + \left(\frac{b_{22}^2 \cdot b + b_{22} \cdot a + b_{12} - b}{b_{22}^2 + 1}\right)^2} - R \quad (14)$$

여기서,  $\Delta R_1$ 과  $\Delta R_2$ 는 원곡선의 시점부와 종점부에서의 이점량이다. 또한 각각의 이점량은 식 (15)와 같이 원곡선의 반경( $R$ )과 시·종점부의 완화곡선의 길이( $L$ )의 관계식으로 산정할 수 있다.

$$\Delta R_1 = \frac{1}{24} \cdot \frac{L_1^2}{R}, \quad \Delta R_2 = \frac{1}{24} \cdot \frac{L_2^2}{R} \quad (15)$$

위의 두 식을 단위 clothoid 곡선의 요소로 전개하면 식 (16)과 같다.

$$l_1 = \left(24 \cdot \frac{\Delta r_1}{r}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad l_2 = \left(24 \cdot \frac{\Delta r_2}{r}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (16)$$

여기서,  $l_1, l_2$ 은 시·종점부에서의 단위 clothoid 곡선의 길이이며,  $\Delta r_1, \Delta r_2$ 은 시·종점부에서의 단위 이점량이며,  $r$ 은 단위 clothoid 곡선에서의 곡선반경이다. 이렇게 결정된 시·종점부에서의 단위 clothoid 곡선의 길이를 이용하여 식 (17)과 의해 완화곡선의 파라미터( $A$ )가 결정된다.

$$R \cdot l_1 = A_1, \quad R \cdot l_2 = A_2 \quad (17)$$

최종적으로 아래의 식들에 의해 완화곡선의 길이( $L$ )이 결정되어진다.

$$L_1 = \frac{A_1^2}{R}, \quad L_2 = \frac{A_2^2}{R} \quad (18)$$

#### 4. 연구대상 지역 선정 및 평면선형의 요소 추출

본 연구 제시한 평면선형알고리즘을 이용하여 평면선형을 추출하기 위하여 그림 4와 같이 대전시 일대의 LiDAR 자료를 이용하여 수치지형도와 비교하였다. 산정된 선형을 20m 간격의 30개의 측점으로 나누고 각 측점에서 선형의 중심선까지 거리를 이용하여 분석하였다. 그 결과는 표 1에 나타난 것과 같다. 30개의 측점에서 0.352~1.643의 이격거리로 평균 0.810m의 차이로 나타났다.

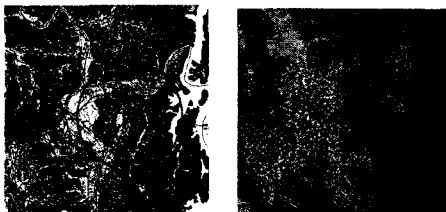


그림 4. 연구대상지역  
(좌 : 수치지형도, 우 : LiDAR 자료)  
표 1. 수치지형도의 선형과

#### LiDAR 자료와의 비교

No.	Distance(m)	No.	Distance(m)	No.	Distance(m)
1	0.456	11	0.987	21	0.879
2	0.754	12	0.985	22	1.001
3	0.689	13	0.863	23	1.085
4	0.963	14	0.547	24	0.753
5	0.855	15	0.874	25	1.082
6	0.984	16	0.352	26	0.232
7	1.121	17	0.452	27	1.643
8	0.876	18	0.837	28	0.435
9	0.538	19	0.937	29	0.985
10	0.784	20	0.574	30	0.784

#### 5. 결론

본 연구에서 결정된 선형요소와 LiDAR 자료로서 도로의 수많은 점군 자료를 이용하여 설계도면이 없는 도로의 기하구조정보와 주변 시설물에 대한 정보를 과학적이고 효율적으로 취득할 수 있을 것이며, 도로의 유지관리 및 안전진단에 있어 중요한 자료를 제공할 수 있을 것이다.

#### 참고문헌

- 김민석, 2004, "수치지도와 LiDAR 자료를 이용한 도시지역 도로의 선형 설계요소 추출에 관한 연구", 공학석사학위논문, 서울대학교 대학원.
- 박홍기, 2002, "레이저 빔 스캐닝 기술을 이용한 3차원 형상 측정", 공학석사학위논문, 경희대학교 대학원.
- 오윤석, 2005, "LiDAR와 칼라항공영상을 이용한 산림지역 내 위험지역 판정기법 개발", 공학박사학위논문, 인하대학교 대학원, pp.38-39.
- 김진수, 2006, "레이저 스캐닝 기법에 의한 도로기하정보시스템 개발", 공학박사학위논문, 부경대학교 대학원.
- 정의환, 2004, 철도 선형 복원을 위한 GPS 데이터 단순화 방법의 적용, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제22권 제1호, pp.63-71.
- Ackermann, F., 1999, "Airborne Laser Scanning—Present Status and Future Expectations", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, Vol.54, pp.64-67.