

디지털지도 기반 위험도로 기하변수 추출 알고리즘 개발

문현석*, 김병일*, 정재훈^o

Extraction Algorithm of Geometrical Variables for Risky Roads Based on Digital Map

Hyunseok Moon*, Byungil Kim*, Jaehoon Jung^o

요 약

교통사고는 기하요인 및 인적요인 등 다양한 원인에 의해서 사고가 발생된다. 정부는 이를 개선하기 위해 위험도로 선형개량 사업이나 교통사고 잦은 곳 개선사업 등을 시행하고 있다. 이들 사업은 위험도로 선형개량을 위해 기하요소의 적합성에 대한 정량적 평가를 시행하고 있다. 여기서 기하요소의 배점기준을 보면 행정안전부는 40점, 국토교통부는 55점으로 그 중요도가 높은 것으로 확인되었다. 그러나 위험도로의 기하요소를 확인하고 평가하는 것은 시간과 비용 소요되는 일이며, 그러한 과정에 객관화되지 못해 많은 오류를 발생시키고 있다. 연구에서는 이를 해결하기 위해 디지털 지도를 활용하여 위험도로 개량 우선순위 평가를 위한 기하요소로서 회전반경과 종단경사에 대한 추출 알고리즘을 개발하고 검증하였다. 이를 통해 회전반경의 계산은 기하학적 방법이 매우 적합한 방식으로 도출되었고 종단경사는 TIN보간법을 활용하여 561 개의 검증자료를 기반으로 RMSE가 38.3m 오차가 도출되어 역거리 가중법 보다 높은 추정 결과를 도출하였다. 향후 실제와의 오차를 줄이는 것이 필요하며, 3차원 정밀지도가 구축되면 그 정확도는 매우 높을 것으로 기대된다.

키워드 : 위험도로, 기하변수, 디지털지도, 회전반경, 종단구배

Key Words : Risk road, Geometrical variables, Digital map, Turning radius, Longitudinal Slope

ABSTRACT

Traffic accidents are caused by various causes such as geometric and human factors. The Korea government is implementing projects to improve the alignment of dangerous roads or to improve places where traffic accidents are frequent. These projects are conducting quantitative evaluation on the suitability of geometric elements for linear improvement of risk roads. Here, looking at the criteria for geometric elements, the MOIS scored 40 points and the MLIT scored 55 points, confirming their importance. However, it is time and money consuming works to check and evaluate the geometric elements of the risk road, and many errors are occurred because the process is not objective. In order to solve this problem, this study developed and verified an extraction algorithm for turning radius and longitudinal slope as geometric factors for melioration priority evaluation of the risk road using digital maps. Therefore, the calculation of the turning radius was derived in a way that the geometric method is suitable, and the longitudinal slope was derived by using the TIN interpolation method, based on 561 verification data. Afterwards, it is necessary to reduce errors with the real world, and its accuracy is expected to be high once the 3D precision map is built.

* 본 연구는 국토교통부 지능화 기술기반의 위험도로 선형개량 모델 생성 및 기하 검증 핵심기술 개발(R&D) 연구비 지원에 의해 수행된 연구임. 과제번호: 21CTAP-C164336-01.

• First Author : Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, hsmoon@kict.re.kr, 정희원

o Corresponding Author : Oregon State University, jaehoon.jung@oregonstate.edu, 정희원

* Andong National University, bkim@anu.ac.kr

논문번호 : 202301-001-D-RU, Received December 31, 2022; Revised January 10, 2023; Accepted January 17, 2023

I. 서론

1.1 개요

국토교통부와 경찰청 교통사고 통계(2012~2020)에 따르면 국내에서는 해마다 교통사고로 인해 약 4,000명 이상의 사망자가 발생하고 있다. 교통사고 발생에는 다양한 원인이 있으며, 그 중에서도 도로의 회전반경 및 경사가 증가하는 지점에서 사고 빈도가 높아지는 것으로 확인된다.

국토교통부와 경찰청에서 위험도로 개량 및 교통사고 잦은 곳 개선사업시 기하요소를 높은 배점(35점)으로 반영하고 있는데 이때 기하요소로서 회전반경, 종단경사, 시거, 확폭, 교차로 유무 등을 매뉴얼적으로 판단하고 있다.

특히 도로 회전반경 및 경사는 도로 설계도면을 통해 수집할 수 있지만, 자료 수집 및 분석에 많은 시간과 비용이 필요하고, 오래된 도로의 경우 설계도면이 존재하지 않을 수 있다. 또한 현장 상황으로 인해 설계도면과 실제로 시공된 도로와 차이가 발생하는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국토지리정보원에서 제공하는 수치지도 자료를 이용하여 특정 기간 내에 발생한 전국 교통사고 지점들을 대상으로 인접한 도로의 회전반경 및 경사를 자동으로 추정할 수 있는 방법론을 제시하고자 하였다.

본 연구는 더욱 정밀한 도로 정보를 추출하고, 도로 환경에 따른 교통사고와의 상관성 분석에 활용할 수 있는 기초 자료 생성을 목표로 한다.

본 연구는 도로의 회전반경 분석, 도로 종단경사 분석의 두 가지 측면에서 기하추출을 위한 기존 알고리즘 개선 방안을 제시한다.

1.2 연구동향

하태준 외(2008)¹⁾는 지방부 2차로 도로를 대상으로, 곡선부 사고요인을 기하구조, 시선유도시설, 속도 및 운전자 사고요인으로 분류하여, 곡선부 사고와의 상관관계 분석을 실시하고, 곡선부 사고와 밀접한 관련이 있는 주요 곡선부 사고요인을 파악하여 곡선부 위험도 판정척도를 계산할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

문세동 외(2019)²⁾는 사업용 자동차에 차량의 위치, 속도, 가속도, 방향, 핸들조작, 브레이크 조작 등을 기록하는 장치인 운행기록장치(DTG)에 의해 수집된 운행 기록 데이터를 기반으로 운전자의 위험운전행동(과속, 급가감속, 급회전 등)을 분석하고, 도로 기하구조와의 상관성을 분석하고자 하였다. 검증에는 독립변

수로 위험운전행동을, 종속변수로는 사고 횟수를 입력한 회귀모형이 이용되었고, 도로의 기하구조 요소인 곡률, 상향경사, 하향경사를 조절변수로 반영하여 기하구조가 위험운전행동과 사고 사이의 관계에 미치는 영향을 분석하였다.

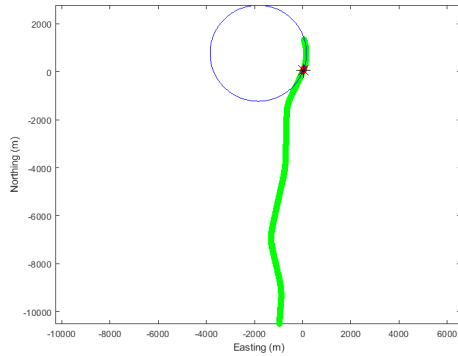
또한 정아람 외(2021)³⁾는 곡선부 초고속주행 시 고령 운전자의 횡 방향 주행 안전성을 나타낼 수 있는 평가 지표를 선정하고, 주행 안전성 취약 구간을 도출하고자 하였다. 실험지역은 서울-세종 고속도로의 안정-용인 구간으로 설정하였으며, 실시간 차량 동역학 시뮬레이션 시스템이 탑재된 초대형 도로 주행 시뮬레이터를 이용하여 다양한 연령층의 운전자 71명에 대한 주행 데이터가 분석에 사용되었다.

대부분의 기존 연구^{2,4,5)}들은 운전자의 주행 기록이나 현장 조사를 통해 취득한 자료를 기반으로 한 국소 지역의 위험도 분석을 목표로 하고 있으며, GIS 자료를 활용한 전국 규모의 위치기반 곡률 및 종단경사의 위험도 분석에 관한 연구는 아직 국내에서 활발히 연구되지 않은 것으로 나타났다.

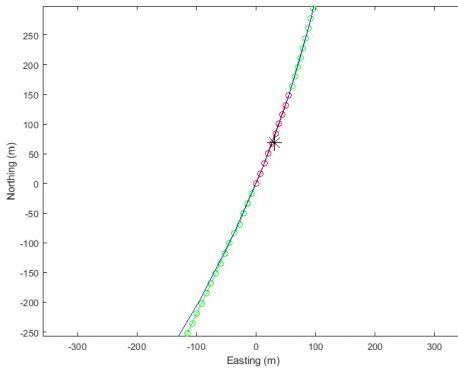
II. 기하변수 계산을 위한 접근 방법론

전국 1:5,000 수치지도 자료는 20GB에 달하는 방대한 지형 정보를 폴리라인 형태의 벡터 자료로 제공하고 있다. 방대한 자료로부터 교통사고 주변에 대한 효과적인 지형 정보 추출을 위해 계층적 자료 검색법을 제시하였다. 우선 각 등고선 및 도로망을 구성하는 절점들의 평균 x, y 를 계산하고, 사고지점과의 2차원 수평 거리를 계산한다. 2차원 수평 거리를 기반으로 kd-tree 데이터 구조 및 kNN(k Nearest Neighbor) 검색 알고리즘⁶⁾을 이용하여 사고지점으로부터 인접한 100개의 등고선과 100개의 도로 자료를 추출한다. 선택된 100개의 등고선과 100개의 도로 자료로부터 추가 절점 생성을 통한 더 정밀한 검색을 통해 사고지점과 근접한 도로 및 10개의 등고선 절점을 선정한다. 이 단계에서 100개의 도로로부터 사고지점에 가장 근접한 1개의 도로를 검색한다. 회전반경 계산을 위해 그림 1-(a)와 같이 도로의 절점을 kd-tree로 구성하고, kNN 검색을 통해 그림 1-(b)와 같이 사고지점에서 가장 근접한 10개의 포인트를 선정하였다.

아래의 선정된 10개의 최근린 포인트를 대상으로 최소제곱법을 통해 회전반경을 계산한다. 본 연구에서는 회전반경 계산에 있어 더욱 정확한 기하적 거리(geometric distance)에 기반한 최소제곱법 방식을 적용하고 그 결과를 대수적 거리 방식과 비교하였다.



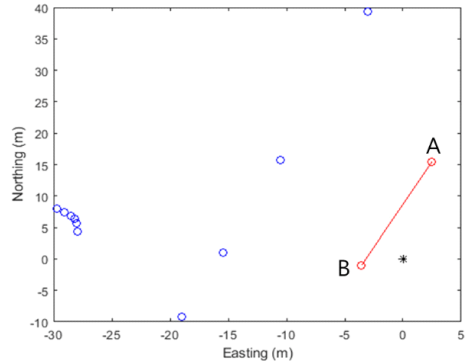
(a)



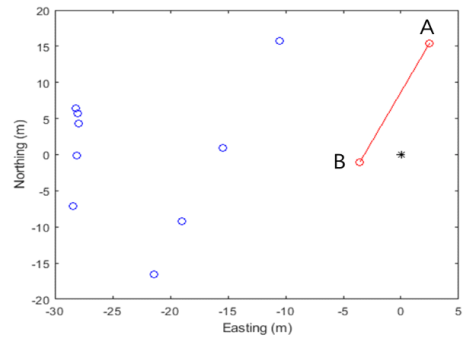
(b)

그림 1. 도로 회전반경 계산 및 10개 최근린 포인트 추출
Fig. 1. Calculation of Road Turning Radius and Extraction of the Nearest 10 Points

도로 경사 계산을 위해 사고지점에서 가장 인접한 도로 폴리라인을 선정한다. 사고 지점에 인접한 100개의 등고선 폴리라인을 구성하는 절점에 대해 kd-tree를 구성한다. 두 도로의 절점 (A, B) 으로부터 인접한 10개의 등고선 절점을 kNN 알고리즘을 통해 검색한다(그림 2). 선정된 등고선 절점에 대해 거리 역거리 가중법 (Inverse distance weighting: IDW)을 이용하여 포인트의 고도를 추정하고, 두 지점의 고도 차이로부터 경사를 추정한다. 하지만, 역거리 가중법을 적용할 경우, 거리감쇠 관계는 전 지역에 걸쳐 일정하다고 가정하며, 이는 다른 보간법에 비해 정확하지 못한 예측값을 제공하는 원인이 된다. 또한 고도의 변화가 심하거나 실측값이 밀집한 지형에 역거리 가중법을 사용할 경우, 실측값에 지나치게 민감한 결과를 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존 역거리 보간법을 대체하기 위한 방



(a)



(b)

그림 2. 등고선 절점에 기반한 도로 경사 계산
Fig. 2. Road Slope Calculation based on Contour Nodes

법으로 TIN 보간법을 새롭게 제시하였고, 그 결과를 선행연구와 비교 및 분석하였다.

III. 교통사고 도로망 구성을 위한 자료 전처리

3.1 수치지형도 자료 수집 및 처리

본 연구에서는 국토지리정보원으로부터 취득한 전국 1:5,000 수치지도를 활용하였다. 우선 수치지도에서 폴리라인(Polyline) 형태로 저장된 지형 등고선을 추출하고 지형 등고선 자료는 3차원 좌표 두 개의 절점으로 구성된 선분이 모여 복잡한 지형의 고저와 굴곡을 나타낸다. 그림 3은 등고선 자료 예시를 나타낸다.

3.2 디지털 도로망 자료 수집 및 처리

1:5,000 수치지도에서 속성정보 검색을 통해 전국 도로망 자료를 추출하였다. 도로망 자료는 3차원 좌표를 지닌 두 개의 절점으로 구성된 선분이 모여 복잡한 도로의 굴곡을 나타낸다.

다음의 그림 4는 도로망 자료 예시를 나타내고 있다.

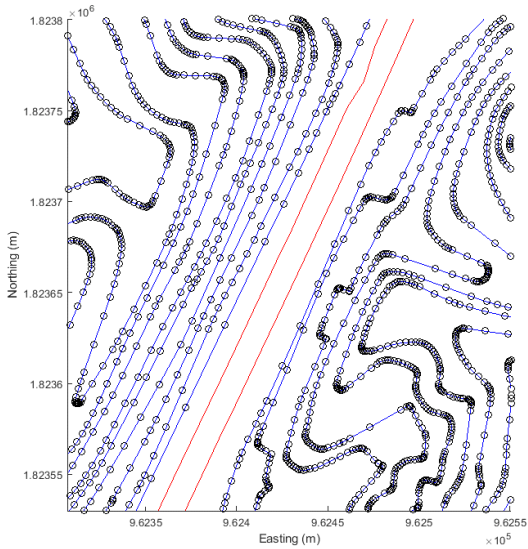


그림 3. 등고선 및 도로의 표현
Fig. 3. Example of Contour and Road(Red Color)

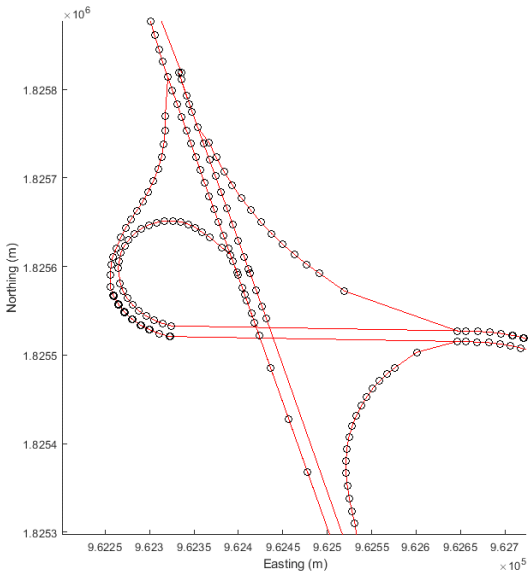


그림 4. 도로망 추출의 예
Fig. 4. Example of Road Network

3.3 TAAS를 활용한 교통사고 지점 데이터 수집

교통사고 지점에 대한 위치 정보는 교통사고분석시스템(Traffic Accident Analysis System: TAAS)에서 취득할 수 있다. TAAS는 경찰, 보험사, 공제조합 등의 교통사고 자료를 수집·통합·분석하여 교통안전 정책 수립 등에 활용할 수 있도록 교통사고 정보를 제공하고 있다. (교통사고분석시스템, 2020). 그림 5는 TAAS를 통해 제공되는 교통사고 지점에 대한 GIS



그림 5. TAAS에서 교통사고 지점 GIS 분석 화면
Fig. 5. Screen of GIS Analysis in the spot of Traffic Accident from TAAS

분석 화면 예시를 나타내고 있다.

3.4 TAAS 기반 교통사고 지점 데이터 수집 및 처리

이러한 각각의 교통사고 지점에 대한 분석 자료와 더불어 TAAS에서는 설정한 기간에 따른 전체 교통사고 지점에 대한 위치 정보를 CSV (comma-separated values) 형태로 제공하고 있다. 해당 교통사고 지점은 위경도 및 UTM-K 좌표체계 자료를 포함하고 있다.

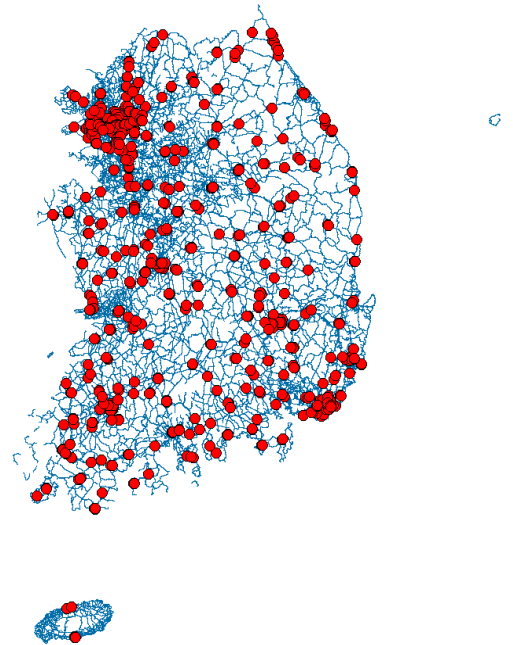


그림 6. 전국 도로망 지도에서의 교통사고 지점 예시
Fig. 6. Example of Traffic Accident Points in Domestic Road Network

본 위치자료는 위·경도 CSV 자료를 사용하여 변환하였으며, ArcGIS를 통해 위경도 좌표를 UTM-K 좌표로 변환하였다. 이러한 좌표 변환된 전국 교통사고 지점(붉은색 포인트)과 수치지도로부터 추출된 도로망 지도(푸른색)의 중첩화면은 그림 6과 같다.

IV. 전처리 자료 기반 위험도로 기하요소 추출 알고리즘 개발

4.1 회전반경 분석 및 추출 알고리즘

최소제곱법(Least squares approximation)은 모델로 추정된 추정치와 관측치 사이의 거리(잔차, residual) 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 최적화 기법 중의 하나이다.

2차원 평면 상에서 n 개의 좌표 (x_i, y_i) , $i = 1:n$ 가 주어져 있을 때 곡률 반경을 계산하기 위한 원의 방정식은 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (1)$$

여기에서 (a, b)는 원의 중심, r 은 반지름을 나타낸다. 원의 방정식을 추정하기 위한 잔차값은 다음의 그림 7과 같이 기하적 거리 (geometric distance, d_1)와 대수적 거리 (algebraic distance, d_2)로 구분할 수 있다.

그림 7에서 (x_i^p, y_i^p) 는 임의의 좌표 (x_i, y_i) 가 원 위에 y 축 값을 기반으로 수직 투영(projection)되었을 때의 좌표를 나타낸다. 기하적 거리와 대수적 거리는 각각 다음의 수식 (2)와 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_1 = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2} - r \quad (2)$$

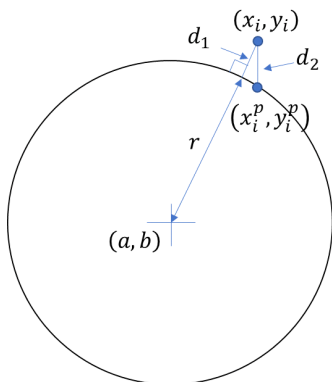


그림 7. 기하적 거리와 대수적 거리의 관계
Fig. 7. Relationship between geometric and algebraic distances

$$d_2 = y_i - y_i^p \quad (3)$$

대수적 거리는 기본적으로 x 좌표가 a 에 근접할 수록 기하적 거리에 가까운 값을 나타내나, a 에서 멀어질 수록 잔차의 왜곡이 커지는 결과를 나타낸다. 대수적 거리를 적용한 최소제곱법 방식은 결정론적 분석(deterministic approach)으로 다수의 관측값과 모델 파라미터와의 관계를 행렬로 정리하고, 특이값 분해(singular value decomposition)를 통해 계산할 수 있다. 더 자세한 과정은 다음과 같다⁸⁾.

4.1.1 대수적인 방법(Algebraic Fitting)

다수의 관측값에 대하여 수식 (1)을 행렬을 포함한 선형방정식 형태로 변환하면 다음의 수식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x) = ax^T x + b^T x + c = 0 \quad (4)$$

여기서 \mathbf{x} 는 2차원상의 좌표점들에 대한 벡터 $\mathbf{x}=(x_{i1}, x_{i2})$ 이며, 수식 (4)에 삽입하면 다음의 수식 (5)와 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$B = \begin{bmatrix} x_{11}^2 + x_{12}^2 & x_{11} & x_{12} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1}^2 + x_{m2}^2 & x_{m1} & x_{m1} & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

수식 (4)의 미지수를 $\mathbf{u} = (a, b_1, b_2, c)^T$ 로 정의할 때, 잔차의 제곱의 합이 최소가 되기 위한 조건식은 다음의 수식 (6)과 같이 정의된다.

$$\|B\mathbf{u}\| = \min \text{ subject to } \|\mathbf{u}\| = 1 \quad (6)$$

조건식을 만족하기 위한 \mathbf{u} 의 값은 특이값을 통해 구할 수 있으며, 최종적으로 원의 중심 (\mathbf{z})과 반지름(r)의 값은 다음의 수식 (7)~(9)를 통해 구할 수 있다.

$$\left(x_1 + \frac{b_1}{2a}\right)^2 + \left(x_2 + \frac{b_2}{2a}\right)^2 = \frac{\|b\|^2}{4a^2} - \frac{c}{a} \quad (7)$$

$$\mathbf{z} = (z_1 \quad z_2) = \left(-\frac{b_1}{2a} \quad -\frac{b_2}{2a}\right) \quad (8)$$

$$r = \sqrt{\frac{\|b\|^2}{4a^2} - \frac{c}{a}} \quad (9)$$

4.1.2 기하학적인 방법(geometric fitting)

원의 중심과 반지름을 각각 \mathbf{z} 와 r 로 정의할 때, 다수의 관측값에 대하여 기하적 거리를 최소화하기 위한 원의 파라미터를 찾는 과정은 다음의 수식 (10)~(12)와 같이 정의된다.

$$d_i^2 = (\|\mathbf{z} - \mathbf{x}_i\| - r)^2 \tag{10}$$

$$\mathbf{u} = (\mathbf{z}_1 \quad \mathbf{z}_2 \quad r)^T \tag{11}$$

$$\sum_{i=1}^m d_i(\mathbf{u})^2 = \min \tag{12}$$

기하적인 방법의 경우 Gauss-Newton 기법을 이용한 반복 연산을 통해 최적해를 찾게 된다. 2차원상의 좌표점들을 벡터로 정의할 때 $\mathbf{X}=(x_{i1}, x_{i2})$, \mathbf{u} 에 대한 도함수의 Jacobian 행렬은 다음의 수식 (13)과 같이 정의된다.

$$J(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{u_1-x_{11}}{\sqrt{(u_1-x_{11})^2+(u_2-x_{12})^2}} & \frac{u_1-x_{11}}{\sqrt{(u_1-x_{11})^2+(u_2-x_{12})^2}} & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{u_1-x_{m1}}{\sqrt{(u_1-x_{m1})^2+(u_2-x_{m2})^2}} & \frac{u_1-x_{m1}}{\sqrt{(u_1-x_{m1})^2+(u_2-x_{m2})^2}} & -1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

반복 연산을 거칠 때마다 해는 점점 잔차를 최소화 하는 최적해에 수렴하게 되며, 사용자가 설정한 반복 횟수나 잔차의 합이 일정 임계값 이하로 수렴할 경우 연산은 종료하게 된다.

4.2 도로 종단경사 분석

도로 종단경사 계산을 위해서는 보간법(Interpolation)을 이용한 도로의 두 종점 주변의 지형 정보로부터 고도값 추정이 필요하다. 도로망 자료에는 고도값이 포함되어 있지 않으므로 도로의 종점에 인접한 등고선으로부터 고도값을 추정해야 한다.

도로 경사 계산을 위해서는 우선 사고지점에서 가장 인접한 도로 폴리라인을 검색하고, 이로부터 폴리라인을 구성하는 두 개의 종점 좌표를 취득할 수 있다. 이후, 사고지점에 인접한 100개의 등고선 폴리라인을 검색하고, 이로부터 다시 도로의 두 종점 좌표로부터 인접한 등고선 포인트를 기반으로 보간법을 수행하게 된다. 보간법에는 역거리 가중법 (Inverse distance weighting: IDW) 및 TIN(Triangulated Irregular Network) 보간법을 비교하였다.

4.2.1 역거리 가중법

역거리 가중법은 지리학적 거리에 기반한 공간 보

간법 중 하나이다. 임의의 주어진 두 지점의 실측값이 연결되어 있지만 그것들의 유사성은 두 위치 사이의 거리에 반비례한다는 원리를 이용하여 미지점의 특성 값을 계산할 수 있다. 역거리 가중법에는 예측 효율에 영향을 미치는 중요한 변수로 거리감쇠계수(distance decay parameter)가 있다. 거리감쇠계수는 결과적으로 거리 가중치를 보정하는 것으로 지점 사이의 공간 보간법에 사용된다³⁾.

일반적으로 역거리 가중법을 적용할 경우, 거리감쇠 관계는 전 지역에 걸쳐 일정하다고 가정한다. 하지만, 이러한 가정은 다른 보간법에 비해 정확하지 못한 예측값을 제공하는 원인 중의 하나이다.

또한 고도의 변화가 심하거나 실측값이 밀집한 지형에 역거리 가중법을 사용할 경우, 실측값에 지나치게 민감한 결과를 나타낼 수 있다.

4.2.2 TIN 보간법

TIN 보간법은 우선 주어진 실측값에 대해 Delaunay Triangulation을 구성한다. 이 알고리즘은 평면상에 주어진 점들에 대해 삼각형 집합을 생성하는 데 있어, 각 삼각형의 외접원 내에 어떠한 다른 점도 속하지 않도록 삼각형을 생성하는 방법이다. 이러한 삼각형들은 주어진 점들에 대해 내각의 최소값이 최대가 되도록 생성되며, 결과적으로 왜곡이 최소화된 삼각형들의 집합을 생성하게 된다⁴⁾.

TIN 보간법은 실측값이 많을수록 부드러운 지형이 생성되는 장점이 있다. 하지만, 수집된 지역을 벗어나는 보외법(extrapolation)에 적합하지 않으므로, 미지점이 TIN 내에 위치하도록 충분한 실측값이 주변에 수집되어야 한다. 다음의 그림 8은 미조사 지점 X에 대해 TIN 보간법 예시를 나타낸다.

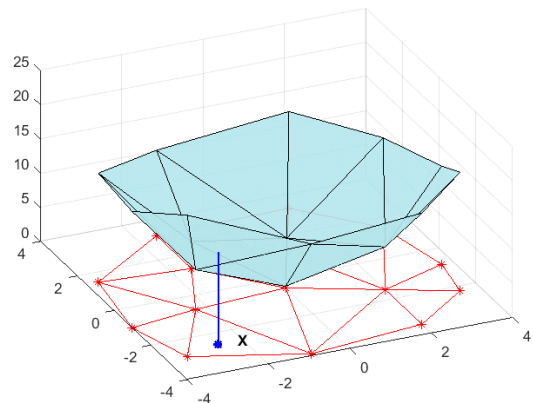


그림 8. TIN 보간법 예시
Fig. 8. TIN interpolation example

V. 기하요소 추출의 알고리즘 검증

5.1 회전반경 추출 알고리즘 검증

다음의 그림 9는 이러한 대수적인 방법과 기하적인 방법을 통해 구하게 된 최적해를 시뮬레이션을 통해 비교한 결과의 예시이다. 본 연구에서는 대수적인 방법^[12], 기하적인 방법^[11,12] 을 구현한 원적합법 (circle fitting)을 오픈소스 코드를 통해 구현하였고, 세 가지 결과를 비교·분석하였다.

2차원 평면상에서 오차를 포함하는 100개의 좌표를 무작위로 생성하였으며, 그림 9에서 청색은 대수적인 방법^[12], 녹색 및 적색은 각각 기하적인 방법^[11,12] 결과를 나타낸다. 기하적인 방법의 경우 두 경우 모두 잔차의 임계값은 0.00001, 반복 횟수의 임계값은 100 회로 설정하였다.

총 1000번의 시뮬레이션을 반복한 결과 평균 Root Means Squares Error (RMSE)는 Richard Brown의 대수적인 방법이 0.4462, Richard Brown의 기하적인 방법이 0.4262, 그리고 Nikolai Chernov의 기하적인 방법이 0.4289로 나타났다. 예상대로 기하적인 방법이 대수적인 방법에 비해 곡률반경을 구하는 데 있어 보다 적합한 방식으로 나타났으며, Nikolai Chernov^[11] 와 Richard Brown^[12] 방법 중 보다 정확한 결과를 나타낸 Richard Brown의 원적합법을 도로 곡률반경을 구하는데 적용하였다.

상기의 분석 결과와 같이 청색 원은 Richard Brown(2022)에 기반한 대수적인 방법, 녹색 및 적색 원들은 각각 Richard Brown(2022) 및 Nikolai Chernov(2022)에 기반한 기하적인 방법 결과를 나타낸다.

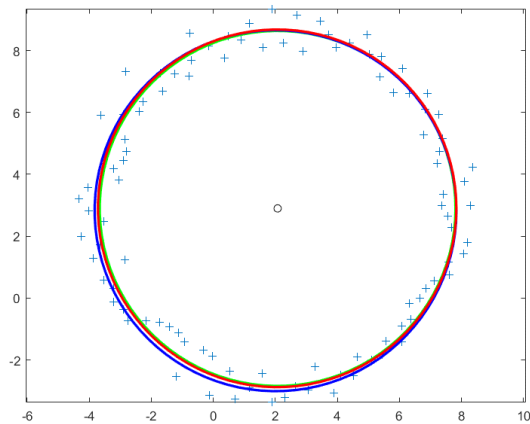


그림 9. 대수적인 방법과 기하적인 방법에 기반한 원적합법 (Circle Fitting)의 비교 결과
Fig. 9. Comparative results of Algorithms

5.2 도로 종단경사 추출 알고리즘 검증

다음의 그림 10은 두 보간법을 비교하기 위해 사용된 테스트 지형 자료를 나타낸다. 테스트 자료는 Matlab^[10]에서 제공하는 1:24,000 샌프란시스코 지형 고도 모형 자료를 사용하였다.

보간을 위한 학습자료로는 765개의 포인트를, 검증 자료로는 561개의 포인트를 일정한 간격으로 추출하여 사용하였다. 다음의 그림 11은 각각 학습자료 및 검증자료의 위치를 나타낸다. 실측값은 원지형 고도 모형이 갖는 좌표 값을 추정하여 포인트를 표시한 것이다. 이는 지형 고도 모형의 좌표값과 실측값은 해당 점 포인트의 동일한 고도값을 나타냄을 알 수 있다.

다음의 그림 12와 그림 13은 각각 765개의 학습자료를 활용한 역거리 가중법 및 TIN 보간법에 의한 지형 추정 결과 전체 사진을 나타낸다. 그림 12에서 역거리 가중법에 의한 지형보간은 지형고도모형과 실측값과 비교하여 다소 과한 추정을 보여주며, 실제 지형 고도 모형과 고도의 차이가 발생함을 알 수 있다. 그

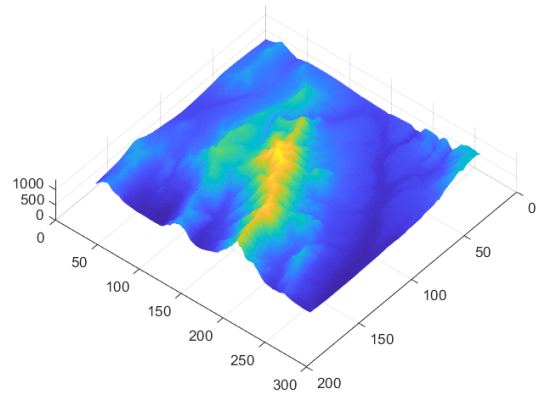


그림 10. 1:24,000 샌프란시스코 지형고도모형
Fig. 10. 1:24,000 San Francisco Topographic Elevation Model

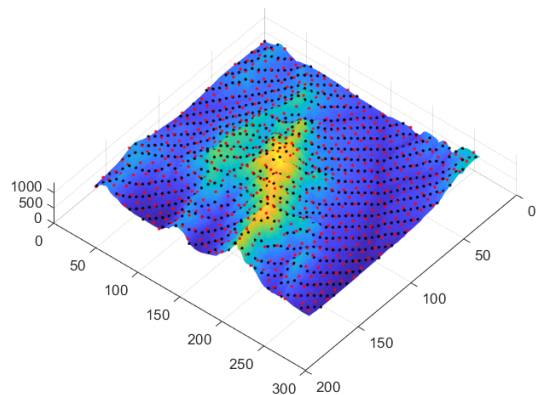


그림 11. 실측값 추출
Fig. 11. Extraction of measured values

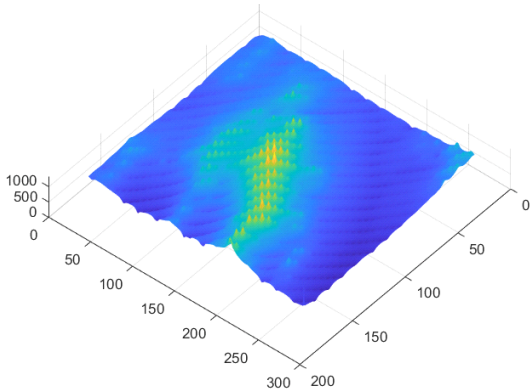


그림 12. 역거리 가중법에 의한 지형 보간 결과
Fig. 12. Terrain interpolation result by inverse distance weighting method

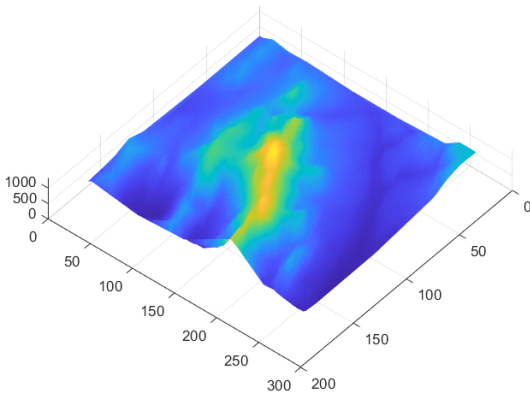


그림 13. 삼각측량 기법에 의한 지형보간 결과
Fig. 13. Terrain interpolation result by triangulation technique

그림 13은 TIN 보간법에 의한 고도 추정을 나타낸 것으로 지형고도 모형과의 오차는 발생하나 유사한 고도 값을 추정함을 알 수 있으며, 이의 결과를 상세히 확대한 것은 그림 14~16에서 확인할 수 있다.

그림 14, 15, 16은 각각 학습자료의 위치를 중첩한 지형 고도 모형 테스트 자료 및 역거리 가중법과 TIN 보간법에 의한 지형 추정 결과 근접 이미지를 나타낸다.

상기의 근접 사진 결과에서 알 수 있듯이, 역거리 가중법은 학습자료의 위치에 매우 민감한 결과를 나타내며, 특히 고도의 변화가 심하고 학습자료가 밀집한 지역일수록 지형 고도 추정에 있어 편차가 심한 것으로 나타났다. 이는 실제 지형 고도 모형과 비교하여 시각적으로 추정 고도가 과하게 계산되었음을 알 수 있다.

반면, TIN 보간법은 학습자료가 밀집한 지역에서 오히려 보다 정확한 실제 지형의 추정이 가능하다. 상

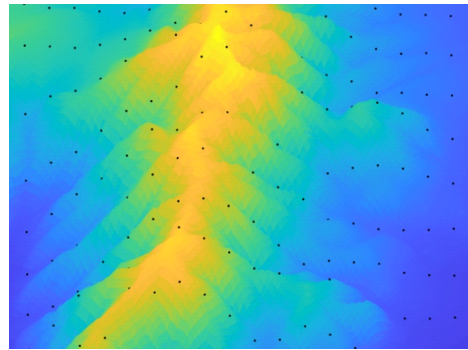


그림 14. 지형고도모형 근접사진
Fig. 14. Topographic elevation model close-up

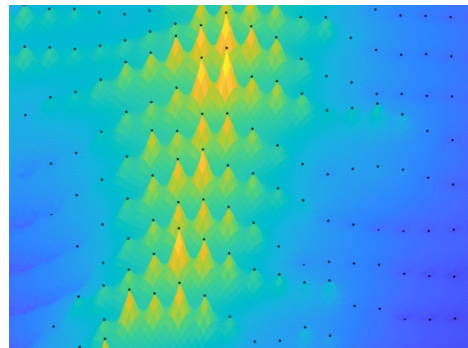


그림 15. 역거리 가중법에 의한 지형 추정 결과 근접사진
Fig. 15. Close-up picture of topography estimation result by inverse distance weighting method

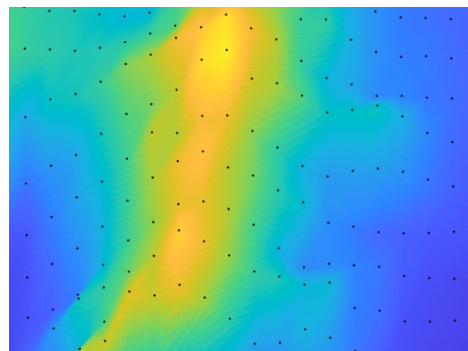


그림 16. TIN 보간법에 의한 지형 추정 결과 근접사진
Fig. 16. Close-up picture of topography estimation result by TIN interpolation method

기 그림과 같이 근접 사진을 확인한 결과 지형 고도 모형과 밀접하게 고도가 추정되었음을 알 수 있다.

561개의 검증자료를 기반으로 한 Root Mean Squares Error (RMSE) 계산 결과에서 역거리 가중법은 88.6m의 오차를, TIN 보간법의 경우 38.3m의 오차를 나타내어 정량적 분석에 있어서도 TIN 보간법이 더욱 안정적인 추정 결과를 나타냄을 알 수 있었다.

역거리 가중법 및 TIN 보간법에는 각각 Andres Tovar (2022)가 구현한 오픈소스^[6]와 Matlab 내장함수^[7]가 활용되었으며, 이중 보다 안정적인 지형 추정 결과를 나타낸 TIN 보간법을 실제 도로 경사 추정에 활용할 수 있음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 수치지형도를 기반으로 교통사고 기하요인으로 가장 큰 영향을 받는 도로의 회전반경과 종단경사를 추출하는 알고리즘을 구축하였다. 도로의 회전반경 계산은 곡률반경 계산을 위한 기하학적 거리에 기반한 최소제곱법 방식을 적용하고 그 결과를 대수적 거리 방식과 비교하였다. 이를 통해 기하적인 방법이 대수적인 방법에 비해 곡률반경을 구하는 데 있어 보다 적합한 방식으로 나타났다. 또한 종단경사 분석에서는 본 연구팀이 개발한 기존 역거리 보간법을 대체하기 위해 TIN 보간법을 새롭게 제시하였다. 그 결과 561개의 검증자료를 기반으로 한 Root Mean Squares Error (RMSE) 계산 결과에서 역거리 가중법은 88.6m의 오차를, TIN 보간법의 경우 38.3m의 오차를 나타내어 TIN 보간법이 보다 안정적인 추정 결과를 도출하였음을 확인하였다.

본 연구에서는 회전반경과 종단경사만을 추출하고 있으나 기존 수치지형도가 정밀하지 못해 정확한 값을 추출하고 표현하는 것이 어렵고 실제 도로에 대한 디지털 모델을 구축하였을 경우와 비교하여 많은 오차가 발생되었다. 또한 위험도로의 판정을 위해서는 상기의 두 요소 외에 교차로 판정, 중앙분리대 유무, 시거, 확폭 등에 대한 요소를 추출하여야 하나 현재의 수치지형도 사항에 분석하는 것이 어려움을 확인하였다. 그러나 향후 국내 도로망의 3차원 정밀지도가 구축된다면 해당 도로의 다양한 교통사고 기하위험 요소를 효율적으로 분석할 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 이러한 알고리즘은 위험도로의 신속한 기하변수 추출을 통해 도로의 위험을 효과적으로 확인할 수 있고 디지털 모델과 연동할 경우 최적의 도로 대안모델을 생성하는데 활용될 것으로 기대한다.

References

[1] B. Kim, S. Shin, and J. Jung, "An agent-based modeling approach for estimating inundation areas over time," *Korean J. Construction Eng. and Manag.*, vol. 17, no. 4, pp. 20-27, 2016.

(<https://doi.org/10.6106/KJCEM.2016.17.4.020>)

[2] S. Moon, H. Park, S. Cho, and D. Kim, "Effects of road geometry on relationship between dangerous driving behaviors and crashes of commercial vehicles," in *Proc. KOR-KST Conf.*, pp. 130-135, 2019.

[3] J. Yu, M. Waseem, J. Shin, and T. Kim, "Evaluation of extended inverse distance weighting method for constructing a flow duration curve at ungauged basin," *J. The Korean Soc. Hazard Mitigation*, vol. 15, no. 3, pp. 329-337, 2015. (<https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2015.15.3.329>)

[4] A. Jung, J. Jang, H. Park, and C. Oh, "Evaluation of lateral driving safety for elderly drivers in high-speed curve driving conditions," *J. Korean Soc. Transport.*, vol. 39, no. 3, pp. 280-298, 2021. (<https://doi.org/10.7470/jkst.2021.39.3.280>)

[5] T. Ha, J. Jeong, J. Lee, and S. Lee, "Development of measure of effectiveness (MOE) and algorithm for hazard level at curve sections," *J. The Korean Soc. Civil Eng. D*, vol. 28, no. 5D, pp. 627-638, 2008.

[6] A. Tovar, *Inverse distance weight function* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46350-inverse-distance-weight-function>), MATLAB Central File Exchange, Retrieved Apr. 24, 2022.

[7] J. L. Bentley, "K-d trees for semidynamic point sets," in *Proc. Sixth Annu. Symp. Computational Geometry*, pp. 187-197, 1990.

[8] W. Gander, G. H. Golub, and R. Strebler, "Least-squares fitting of circles and ellipses," *BIT Numerical Math.*, vol. 34, no. 4, pp. 558-578, 1994.

[9] Matt Foster, *MATLAB Multivariate Interpolation Toolbox*, <https://github.com/mattfoster/matlab-interpolation-toolkit>, 2009.

[10] MathWorks, *Intersection points for lines or polygon edges*, <https://www.mathworks.com/help/map/ref/polyxpoly.htm>, 2022.

[11] N. Chernov, *Circle Fit (Pratt method)* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange>

ge/22643-circle-fit-pratt-method), MATLAB Central File Exchange, Retrieved April 23, 2022.

- [12] R. Brown, *fitcircle.m*(<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/15060-fitcircle-m>), MATLAB Central File Exchange, Retrieved April 23, 2022.

문 현 석 (Hyounseok Moon)



2009년 8월 : 경상국립대 토목공학과 박사
 2010년 10월 : Teesside University, CCIR Center, Post-Doc
 2013년 1월 : University of Michigan(Ann Arbor), LIVE, Post-Doc

2021년 1월~현재 : 한국BIM학회 부회장
 2012년 12월~현재 : 한국건설기술연구원 BIM클러스터 클러스터장
 <관심분야> BIM, 디지털건설, 인공지능
 [ORCID:0000-0002-2543-4070]

김 병 일 (Byungil Kim)



2007년 2월 : 연세대학교 토목환경공학과 졸업
 2009년 2월 : 연세대학교 토목공학과 석사
 2012년 8월 : 연세대학교 토목환경공학과 박사
 2014년 3월~현재 : 안동대학교 토목공학과 부교수

<관심분야> 건설관리, 시뮬레이션

정 재 훈 (Jaehoon Jung)



2007년 8월 : 연세대학교 토목환경공학과 졸업
 2014년 8월 : 연세대학교 토목환경공학과 박사
 2016년 8월 : 독일본대학 사진측량공학과 객원연구원
 2020년 12월 : 미국오리건주립

대학 토목및건설공학과 전문연구원
 2021년 1월~현재 : 미국오리건주립대학 토목및건설공학과 조교수 (선임연구원)
 <관심분야> 공간정보, 원격탐사, 기계학습
 [ORCID:0000-0003-1592-1876]