

브이월드 DEM 데이터를 활용한 공공데이터의 3차원 공간 탐색 및 고도 매핑

윤수민¹, 송하주^{2*}

¹국립부경대학교 데이터공학과 학생, ²국립부경대학교 데이터공학과 교수

3D Spatial Exploration and Elevation Mapping of Public Data Using V-World DEM Data

Su-Min Yun¹, Ha-Joo Song^{2*}

¹Student, Department of Data Engineering, Pukyong National University

²Professor, Department of Data Engineering, Pukyong National University

요약 최근 3차원 GIS(Geographic Information System) 기술이 발전하면서, 더욱 사실적이고 정밀한 공간 분석이 가능하게 되었다. 특히 디지털 트윈 기술과 결합된 3차원 GIS 기술은 도시 계획, 환경 모니터링, 자율주행 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 이러한 기술 발전에 맞춰, 국내의 브이월드(V-World) 플랫폼은 디지털 표고 모델(DEM, Digital Elevation Model) 데이터를 제공하고 있으며, 이를 공공데이터와 결합하여 3차원 공간 분석의 활용성을 극대화하는 방안을 연구하고자 한다. 본 연구에서는 2차원 경위도 데이터와 DEM 데이터를 결합해 3차원 공간상에서 정확한 위치 정보를 도출하는 기법을 제안한다. DEM 타일 데이터를 활용하여 특정 지점의 고도 값을 추출하며, 다수의 지점에 대해 효율적으로 고도 값을 추출하기 위해 쿼드트리(Quad-Tree) 구조를 활용한다. 지역별로 해상도가 다르게 제공되는 브이월드 DEM 데이터의 특성을 고려해 각 지역에서 가장 높은 해상도의 데이터를 사용하여 정확도를 높인다. 제안기법을 기존의 2차원 공공데이터에 적용한 예시를 통해 그 실효성을 확인한다.

주제어 : 3차원 GIS, 디지털 트윈, 공간정보오픈플랫폼, 브이월드, 디지털 표고 모델, 공공데이터 결합

Abstract With the recent advancements in 3D GIS(Geographic Information System) technology, more realistic and precise spatial analysis has become possible. In particular, 3D GIS technology combined with digital twin technology is now widely applied in fields such as urban planning, environmental monitoring, and autonomous driving. Keeping pace with these technological developments, South Korea's V-World platform provides DEM(Digital Elevation Model) data, enhancing the potential for 3D spatial analysis by integrating it with public data. This study proposes a method to derive accurate spatial location information by combining 2D geographic coordinate data with DEM data in 3D space. The research method involves utilizing DEM tile data to extract elevation values for specific points and employs a QuadTree structure to efficiently retrieve elevation values for multiple locations. Considering the characteristics of V-World DEM data, which provides different resolutions for each region, accuracy is improved by using the highest resolution data in each region. The effectiveness of the proposed technique is confirmed through an example of applying it to existing two-dimensional public data.

Key Words : 3D GIS, Digital Twin, Spatial Information Open Platform, V-World, Digital Elevation Model (DEM), Integration of Public Data

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (RS-2023-00242528)

*교신저자 : 송하주(hajoosong@pknu.ac.kr)

접수일 2025년 01월 07일 수정일 2025년 01월 22일 심사완료일 2025년 02월 12일

1. 서론

최근 국내에서는 3차원 GIS 기술이 다양한 디지털 트윈 기반 산업에 활용되고 있다[1]. 이를 뒷받침하여 최근 국토교통부는 '국가공간정보 기본법'을 개정하여 고정밀 3차원 공간정보를 산업용으로도 제공할 수 있도록 법적 기반을 마련했다[2]. 이는 3차원 정밀지도 제공을 확대하여, 자율주행, 스마트시티, AR/VR 등 산업의 경쟁력을 강화할 것으로 기대되고 있다. 현실 세계의 3차원 공간에서 지형은 빼놓을 수 없는 중요한 요소이다. 지형의 높낮이, 경사, 고도 차이는 모든 공간 데이터를 정확하게 해석하는 데 필수적인 정보이다. 우리나라는 브이월드 플랫폼을 통해 디지털 표고 모델(DEM) 데이터를 서비스하고 있으며, 이를 활용하여 다양한 분야에서 3차원 공간 분석을 수행할 수 있다[3].

우리나라는 공공데이터 플랫폼을 통해 국민 생활과 밀접한 다양한 정보도 제공하고 있으며, 이를 통해 교통, 환경, 건강, 안전 등 일상에서 유용하게 활용할 수 있는 서비스를 지원하고 있다. 이러한 공공데이터는 국민이 데이터 분석 및 새로운 서비스 개발에 이바지할 수 있도록 개방되어 있다[4]. 그러나 공공데이터 포털에서 제공하는 데이터 대부분은 경도, 위도로 구성된 2차원 기반 정보가 많아 지형의 고도 정보를 포함하지 못하는 경우가 많다. 3차원 공간은 경도, 위도와 같은 수평적 위치뿐만 아니라 해발 고도와 같은 높이 정보가 있어야 정확한 위치 표현이 가능하다. 따라서 공공데이터와 브이월드의 DEM 데이터를 결합하여 3차원 공공데이터를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 요구를 바탕으로 2차원 기반 공공데이터에 지형 결합이 가능하도록 브이월드 데이터를 효과적으로 결합하는 기법을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 관련된 기존 연구를 설명하고 3장에서는 제안하는 브이월드 DEM 데이터를 활용한 고도 검색 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 기존 공공데이터에 제안기법을 적용한 예시를 통해 제안기법의 유효성을 확인하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 관련 연구

2차원 위치 정보는 주로 경위도 좌표계를 통해 표현되며, 이는 지구 표면에서 특정 위치를 나타내기 위해 가장 널리 사용되는 방식이다. 2차원 경위도 정보는 교통 관리, 환경 분석, 공공데이터 시스템 등에서 광범위하게 사

용된다. 예를 들어, 교통 데이터 분석 시 경위도 정보를 활용하여 차량 흐름을 파악하거나, 특정 지역의 오염원을 추적할 수 있다. 하지만 경위도 정보만으로는 위치의 고도나 지형적 특성을 반영하지 못하기 때문에, 3차원 공간에서의 분석에는 한계가 있다.

DEM 데이터는 지표면의 고도를 수치화하여 표현한 3차원 지형 데이터를 의미하며, 지형의 높낮이, 경사, 굴곡 등을 분석하는 데 사용된다.[5] DEM 데이터는 항공 촬영, 위성 영상, LiDAR(레이저 스캐닝) 등 다양한 방법을 통해 수집된다[6]. 데이터에는 해상도가 존재하며 고해상도일수록 더 정밀한 지형 형상을 표현할 수 있고 저해상도일수록 정밀도는 떨어지나 다소 적은 용량으로 지형을 표현할 수 있다. DEM 데이터는 일반적으로 래스터 형식으로 제공되며, 이는 일정한 간격의 격자(그리드 또는 타일) 형태이다. 각 격자의 값은 해당 위치의 고도를 나타내며, 해상도가 높을수록 더 작은 셀 크기로 세밀한 지형 형상을 표현할 수 있다. 고해상도의 DEM 데이터는 더 세밀한 분석을 가능하게 하지만, 그만큼 데이터 용량이 커지고 처리량도 늘어난다. 이를 해결하기 위해, DEM 데이터는 쿼드트리 같은 데이터 분할 방식을 사용하여 큰 영역의 지형 데이터를 계층적으로 나누어 필요한 부분만을 처리할 수 있도록 구성되어 있다. 브이월드에서 제공하는 DEM 데이터는 지역에 따라 해상도가 다르게 제공된다. 일반적으로 도심 지역의 DEM 데이터는 고해상도로 제공되며, 외곽 지역이나 산악 지대는 상대적으로 해상도가 낮은 DEM 데이터가 제공된다.

DEM 데이터는 토지 관리, 토지 환경 분석, 홍수를 포함한 각종 재난 분석 위험 분석, 토지 퇴화 분석 등을 위해 널리 사용된다[7, 8]. 다양한 해상도의 DEM 데이터를 활용해 지진으로 인한 산사태 위험을 평가한 연구가 있으며[9] 국내외에서도 관련 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이처럼 DEM을 활용한 다양한 연구들은 DEM 데이터를 통해 지형 및 환경 변화를 분석하고 예측하는 데 중요한 역할을 하고 있다[10].

2차원 좌표 데이터와 결합하여 3차원 공간 정보를 생성하는 연구들은 DEM 데이터를 활용하여 도로 고도 분석, GNSS 신호 예측, 수문 모델링, 지형 기반 경로 탐색 등의 분야에서 응용 가능성을 제시하였다. 먼저 Wang et al.[11]의 연구에서는 Google Earth의 DEM 데이터를 활용하여 도로의 고도 정보를 추출하고, 이를 통해 도로 네트워크에서의 고도 정확도를 평가하였다. 본 연구와 유사하게 2D 좌표 데이터를 기반으로 3D 공간에서 고도를 매핑하는 방법을 적용하였으며, DEM 데이터의

정확성을 분석하고 공간적 활용 가능성을 평가한 점에서 공통점을 가진다. 그러나 해당 연구는 Google Earth 기반의 고도 데이터를 활용하며, 연구 대상이 도로에 대한 정보만 제공하는 한계가 있다. Cahalane[12]의 연구에서는 2D 수치지도와 저밀도 고도 데이터를 GIS 환경에서 결합하여 GNSS(전 지구 위성항법 시스템) 신호 예측을 개선하는 방법을 제안하였다. 이는 본 연구와 마찬가지로 2D 좌표 데이터를 활용하여 3D 공간 정보를 생성하는 기법을 도입하였으나, GNSS 신호의 음영 지역을 분석하고 이를 보완하는 데 중점을 두었다는 점에서 본 연구와 차이를 가진다. Bakula et al.[13]의 연구에서는 다양한 고도 데이터 소스가 2D 수문 모델링(유압 모델링, Hydraulic Modeling)에 미치는 영향을 분석하였다. 이 연구는 본 연구와 마찬가지로 DEM 데이터를 기반으로 다양한 해상도의 고도 정보를 비교 분석하였으며, 고도 데이터의 해상도가 공간 분석의 결과에 미치는 영향을 평가하는 공통점을 가진다. 그러나 해당 연구는 수문학적 분석을 위한 DEM 데이터의 활용에 집중하고 있으며, 공공데이터를 3D 공간 정보로 변환하는 목적과는 차이가 있다. Lee et al.[14]의 연구에서는 2D 레이저 스캐너 데이터를 기반으로 양자화된 DEM(Quantized Digital Elevation Map)을 생성하여 지형 정보를 활용한 경로 탐색 기법을 제안하였다. 본 연구와 마찬가지로 DEM 데이터를 기반으로 공간 분석을 수행하지만, 해당 연구는 DEM 데이터를 이용하여 통행 가능 영역(Traversable Region)을 추출하는 데 중점을 두었는데, 이 연구 역시 공공데이터의 결합보다는 이동 경로 탐색을 위한 활용에 초점을 맞추고 있다.

본 연구는 이러한 기존 연구들과 달리 2D 기반의 공공데이터를 브이월드의 DEM 데이터와 결합하여 3D 공간 분석을 지원한다. 이 과정에서 효율적인 다중 지점 고도 검색을 위해 브이월드의 타일링 구조와 동일한 쿼드트리 기반의 공간 분할 기법을 적용하여 데이터 요청 및 탐색 성능을 높일 수 있게 하였다. 이를 통해 기존의 2D 기반 공공데이터에 고도 정보를 추가한 3차원 데이터 분석 및 활용이 가능하다.

3. 브이월드 DEM 데이터를 활용한 고도 검색 기법

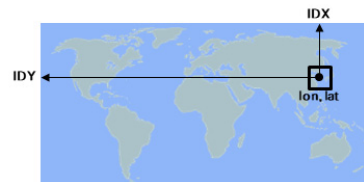
3.1 단일 지점에 대한 고도 정보 탐색

DEM 데이터를 이용해 특정 경위도 위치에 해당하는 고도를 얻기 위해서는, 해당 위치를 포함하는 타일 데이터를 정확하게 찾아내야 한다[15]. 이는 쿼드트리 기반의 타일 구조를 사용하여, 2차원 경위도 좌표를 특정 타일 인덱스(IDX, IDY)로 변환하는 과정을 포함한다. 이 과정에서 필요한 매개변수는 경도(longitude), 위도(latitude), 그리고 타일의 레벨(level) 값이며 다음과 같은 순서로 진행된다.

- ① 경위도 위치에 따른 타일 인덱스 탐색
- ② 타일 데이터 요청
- ③ 고도 값 추출

3.1.1 경위도 위치에 따른 타일 인덱스 탐색

경위도 좌표를 이용해 해당 위치가 속하는 DEM 타일을 찾기 위해서는 타일 인덱스(IDX, IDY)를 계산해야 한다. IDX와 IDY는 디지털 표고 모델(DEM) 타일 구조에서 경도와 위도를 기반으로 각각의 타일을 구분하기 위해 사용되는 인덱스 값이다(Fig. 1). 경위도 좌표를 활용해 IDX, IDY 인덱스 값을 구하는 수식은 다음과 같다. (수식1, 수식2)



[Fig. 1] Tile IDX and IDY Containing a Specific Location

$$\lfloor IDX \rfloor = \frac{longitude + 180.0}{360.0 / (10 \times 2^{level})} \quad (1)$$

경도(longitude)는 -180도에서 180도까지 범위를 가지며 이를 0 이상의 양수 값으로 변환하기 위해 +180을 더해준다. 360은 지구의 전체 경도 범위(360도)를 나타낸다. 2^{level} 은 해당 레벨에서 타일을 가로 방향으로 몇 개로 나눌지를 결정하는 값이다. 레벨이 증가할수록 타일이 2배씩 더 많이 나누어지므로, 2^{level} 로 나누는 횟수를 증가시키고, 이를 10으로 곱하여 가로 방향의 타일 개수를 결정한다. 레벨 0에서는 10개의 타일로 지구 가로 방향 범위를 나누고, 레벨 1에서는 20개의 타일로 나누다. 이 과정에서 IDX 값은 정수형 변수로 적용하여 소수점 이하 값은 삭제한다.

$$\lfloor IDY \rfloor = \frac{latitude + 90.0}{180.0 / (5 \times 2^{level})} \quad (2)$$

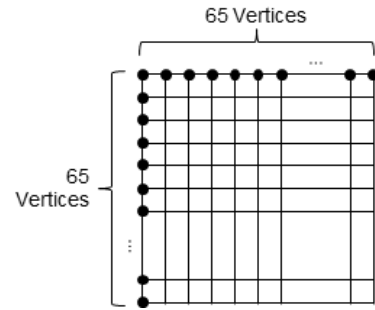
위도는 -90도에서 90도까지 범위를 가지므로, latitude + 90.0을 통해 0 이상의 양수 값으로 변환한다. 경도에 따라 나눌 때는 지구를 가로로 10개 타일로 나누지만, 세로 방향인 위도에서는 지구를 세로 방향으로 5개의 타일로 나누므로 세로 방향의 타일 수는 5×2^{level} 이다. 레벨이 증가할수록 타일의 크기는 작아지고, 그에 따라 더 많은 타일로 지구 표면을 세분화할 수 있다. 레벨 0에서 15까지의 범위에서 레벨별 IDX, IDY 인덱스 범위는 각각 1..10, 1..5 (레벨 0)에서 1..10485760, 1.. 5242880 (레벨15)까지 가능하다.

3.1.2 DEM 타일 요청

고도 값이 필요한 경위도 좌표에 대응되는 타일의 IDX, IDY 값이 호출되었다면 브이월드 서버로 DEM 타일을 요청해야 한다. 요청은 브이월드 REST API를 통해 이루어진다. 브이월드 API는 지도, 공간 분석, 디지털 표고 모델(DEM) 데이터 등 다양한 지리 정보 서비스를 제공하며 데이터 요청 시 사전에 발급된 API Key 인증이 필요하다. 브이월드 서버는 IDX, IDY, 그리고 레벨 값으로 특정되는 표고 타일을 반환하는 REST API를 지원하며, 요청 URL과 파라미터는 아래와 같은 형식으로 구성된다.

- ① Layer = dem
- ② Level = {타일 레벨}
- ③ IDX = {IDX}
- ④ IDY = {IDY}
- ⑤ APIKey = {사전에 승인받은 API 키}

Layer=dem은 디지털 표고 모델(DEM)을 요청하는 것을 나타내며, {레벨}, {IDX}, {IDY}, {API키}는 각각 타일의 레벨, IDX, IDY 값, 그리고 API 인증키로 대체된다. 서버에 요청을 보내면 해당 타일의 DEM 데이터가 반환되며, 이 데이터는 가로와 세로가 각각 64칸으로 구성된 그리드 형태로, 총 65×65개의 4바이트 부동소수점(float) 배열로 이루어져 있다(Fig. 2). 이 배열은 해당 타일 내의 고도 값을 나타내며 타일의 왼쪽 아래부터 고도 값이 시작된다.



[Fig. 2] Elevation Distribution in Raster-Based DEM

3.1.3 특정 위치 고도 값 추출

브이월드 서버로부터 DEM 타일 데이터를 수신하였다면 다음으로 타일 내 2차원 경위도 좌표에 해당하는 고도 값을 추출해야 한다. 이때, 타일 내에서 주어진 2차원 경위도 좌표에 가장 가까운 고도 값을 해당 고도 값으로 채택한다. 타일 내에서 2차원 경위도 좌표가 차지하는 위치를 정확히 식별해야 하므로 먼저 타일의 경계가 되는 최대, 최소 경위도 좌표를 계산한다. 타일의 최대 및 최소 경위도 좌표와 타일의 가로, 세로 크기를 이용해 고도를 구하려는 2차원 경위도 좌표의 비율을 계산할 수 있다. 이를 통해 해당 경위도 좌표가 타일 내에서 상대적 위치를 파악하고, 그에 해당하는 셀의 인덱스를 찾을 수 있다. 타일의 최소 경위도 좌표는 다음 수식을 통해 구할 수 있다.(수식3, 수식 4)

$$\min Lon = IDX \times \frac{360.0}{10 \times 2^{level}} - 180.0 \quad (3)$$

$$\min Lat = IDY \times \frac{180.0}{5 \times 2^{level}} - 90.0 \quad (4)$$

위 수식은 앞서 구한 IDX, IDY 계산 수식을 경위도 좌표 중심으로 재구성한 것이다. 최대 경위도 좌표는 다음 타일의 최소 경위도 좌표와 같으므로, IDX와 IDY 값을 각각 한 칸씩 이동하여 계산할 수 있으며 수식은 다음과 같다.(수식5, 수식6)

$$\max Lon = (IDX + 1) \times \frac{360.0}{10 \times 2^{level}} - 180.0 \quad (5)$$

$$\max Lat = (IDY + 1) \times \frac{180.0}{5 \times 2^{level}} - 90.0 \quad (6)$$

다음 수식은 주어진 경위도(lon, lat)가 타일 내에서

어느 셀에 위치하는지 계산하여 가장 가까운 셀 인덱스 (cellX, cellY)를 도출하는 수식이다.(수식7, 수식8) 이때 타일은 64×64 그리드로 구성되며, 0부터 시작하는 인덱스 값이 적용된다. 인덱스 값은 소수점을 반올림한 정수형이다.

$$\lfloor cellX \rfloor = \frac{longitude - \min Lon}{(\max Lon - \min Lon)/64} \quad (7)$$

$$\lfloor cellY \rfloor = \frac{latitude - \min Lat}{(\max Lat - \min Lat)/64} \quad (8)$$

마지막으로 구한 셀 인덱스를 이용해 DEM 그리드 배열에서 해당 위치의 고도 값을 추출한다.

$$altitude = DEM[(cellX*65)+cellY]$$

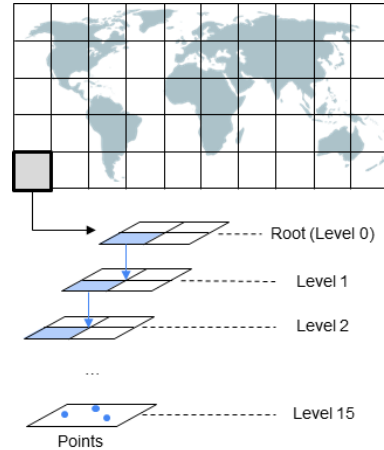
3.2 다수 지점에 대한 효율적인 고도 정보 탐색

공간 데이터는 대부분 대량의 지점을 포함한다. 공공 데이터 포털 등에서 제공되는 위치 데이터는 수천에서 수만 개의 점을 포함하는 경우가 많으므로 앞서 수행하는 과정을 하나의 점에 대해서 진행하게 된다면 대량의 네트워크 요청을 유발하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 데이터에 포함된 다수의 점을 하나의 타일에 묶어 처리하는 과정이 필요하다.

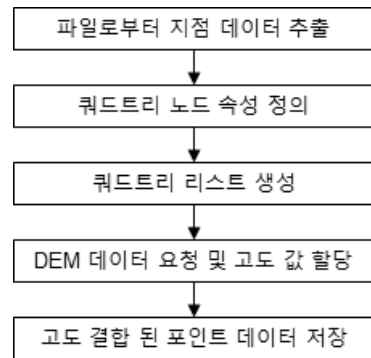
3.2.1 타일 매칭을 위한 다수 지점 공간 분류

브이월드 DEM 타일 데이터는 전 지구의 영역을 포함하므로, 모든 지점은 반드시 특정 타일에 속하게 된다. 해상도가 낮은 타일일수록 넓은 영역을 포함하므로 여러 지점이 같은 타일에 포함될 가능성이 크다. 또한, 지점 데이터가 국소적인 경우에도 지점들이 같은 타일에 포함될 가능성이 크다. 따라서 다수의 지점을 DEM 타일과 효율적으로 매칭하려면, 브이월드 타일 구조와 같은 그리드 기반의 쿼드트리 형식으로 지점 데이터를 재구성해야 한다. Fig. 3과 같이 지점들을 DEM 데이터의 자료구조와 같은 형식으로 배치하면 같은 타일에 속한 지점들에 대해 중복 요청을 줄일 수 있다. 브이월드의 DEM 타일 데이터는 세계를 가로 10개, 세로 5개의 타일로 나누며, 각 타일은 쿼드트리 방식으로 분할되며 세분된다. 각 지점이 속한 타일을 찾기 위해서는, 먼저 해당 지점이 브이월드의 50개의 타일 중 어느 타일에 속하는지 파악한

후, 최대 15레벨까지 쿼드트리 노드를 분할하여 트리에 배치하여야 한다. 배치를 마치면 같은 타일에 속한 지점들은 단 한 번의 타일 로드로 고도 값을 얻을 수 있으며, 이를 통해 데이터 요청 수를 줄일 수 있다. Fig. 4는 이러한 과정을 순차적으로 나타낸 것이다.



[Fig. 3] Quad-Tree Structure of DEM Tiles



[Fig. 4] Spatial Classification Stages for Multiple Points

쿼드트리를 사용하는 이유는 브이월드 타일 구조의 특성과 클라이언트 측에서의 데이터 요청 방식에 기인한다. 브이월드의 DEM 데이터는 정적인 쿼드트리 구조를 가지며, 최대 15레벨까지 구성되지만 모든 타일이 동일한 15레벨을 가지는 것은 아니다. 도심 지역에서는 15레벨의 고해상도 DEM 데이터가 제공되지만, 산간 지역과 같은 외곽 지역에서는 14레벨 또는 13레벨과 같이 낮은 해상도의 타일이 존재한다.

문제는 클라이언트가 요청하려는 특정 지점이 어느 레벨의 타일에 속하는지 사전에 알 수 없다는 점이다. 만약 모든 타일이 동일한 15레벨을 유지한다면, 단순한 해시

테이블을 이용하여 O(1) 시간 복잡도로 데이터 검색이 가능할 것이다. 그러나 브이월드 타일 구조는 지역에 따라 최대 해상도가 다르며, 클라이언트는 특정 좌표가 어느 수준의 타일에 포함되는지 사전에 알 수 없다. 이러한 불확실성을 해결하기 위해, 요청 지점이 포함된 타일이 존재하지 않을 경우 상위 타일로 이관하여 데이터를 재요청하는 과정이 필요하다. 예를 들어, 특정 좌표의 데이터를 15레벨 타일에서 검색하려 했으나 해당 타일이 존재하지 않는다면, 14레벨에서 다시 검색해야 한다. 이때, 상위 타일로 효율적으로 이관하는 과정이 필요하며, 쿼드트리 구조는 이러한 계층적인 데이터 이동을 자연스럽게 처리할 수 있는 자료구조이다. 이 과정은 이후 4.2 항목에서 그림과 함께 상세히 기술하였다.

동일한 타일에 대해 브이월드 서버에 중복 요청을 방지하고 불필요한 네트워크 부하를 줄이기 위해, 본 연구에서는 브이월드 DEM 파일과 동일한 구조를 클라이언트 측에 쿼드트리 형식으로 구축하였다. 이를 통해, 클라이언트는 동일한 타일에 대한 고도 데이터를 한 번만 요청하고 저장한 후, 동일한 타일을 참조하는 지점이 있을 경우 저장된 데이터를 재사용할 수 있다. 이를 통해 대규모 지점 데이터를 처리할 때 네트워크 요청 수를 줄일 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 브이월드 타일 구조와 동일한 계층적 데이터 구조를 유지하고, 필요에 따라 포인트를 동적으로 상위 타일로 이관하도록 쿼드트리를 활용하였다.

3.2.2 다수 지점 공간 분류를 통한 타일 매칭

데이터 파일을 읽어 각 지점의 경도, 위도 데이터를 추출한 후, 이를 지점 리스트로 반환한다. 본 연구에서는 데이터 파일의 크기와 형식에 구애받지 않고 유연하게 데이터를 처리하기 위해 Pandas 라이브러리의 DataFrame 구조를 활용하였다. 이 과정에서 CSV, Excel, JSON 등 다양한 형식의 데이터 파일을 지원하며, 대량 데이터를 효율적으로 처리할 수 있는 구조를 구축하였다. 데이터 파일에서 필요한 열을 선택하고 불필요한 열을 제거하는 과정을 통해 데이터의 일관성을 유지하고, 잘못된 데이터나 결측치를 사전에 제거하여 데이터의 품질을 높였다. 이를 통해, 각 지점에 대한 경도, 위도 데이터를 포함한 정제된 리스트를 생성하였다.

다음으로 브이월드 DEM 타일 구조에 맞춰, 전 지구를 50개의 기본 타일로 나누는 쿼드트리를 생성한다. 쿼드트리의 생성 과정에서는 전 지구를 가로 10개, 세로 5개의 타일로 분할하는 초기 레벨 0 구조를 기반으로, 각

타일을 재귀적으로 4개로 세분화하여 하위 노드를 생성한다. 이 과정은 최대 15레벨까지 진행되며, 각 레벨에서 타일의 해상도가 점진적으로 증가한다. 각 노드는 부모 노드와 하위 자식 노드 간의 관계를 유지하면서, 타일의 경계와 레벨 정보를 포함하여 구조화된다. 쿼드트리의 각 노드에는 타일의 위치와 관련된 다양한 속성이 정의된다. 이 속성들은 데이터의 구조와 처리 과정을 최적화하는 데 사용된다. 구체적인 노드 속성은 Table 1과 같다.

〈Table 1〉 Qua-Tree Attributes

| 속성 ID | 속성 내용 |
|-------------|--|
| idx | 타일 X 좌표 인덱스 |
| idy | 타일 Y 좌표 인덱스 |
| level | 타일 레벨 (0-15) |
| child_index | 부모 노드에서의 자식 노드 인덱스, 최대 4개의 값을 가질 수 있다(0-3). |
| parent | 부모 노드에 대한 참조 |
| dem | 해당 노드에 대한 DEM 데이터 |
| points | 해당 타일에 포함된 지점 리스트. 타일 내의 경도, 위도 정보를 기반으로 지점들이 그룹화 되어 저장된다. |

쿼드트리가 생성된 이후에는 각 타일에 대해 DEM 데이터를 요청하는 단계가 진행된다. DEM 데이터는 브이월드 서버로부터 REST API를 통해 요청되며, 요청된 데이터를 노드의 dem 속성에 저장한다. 데이터 요청이 실패하는 경우 상위 노드로 지점을 이관하여 다시 데이터를 요청하는 방식으로, 실패 상황을 처리하며 데이터의 정확성을 유지한다.

각 노드별 DEM 데이터는 dem 속성에 저장되고, dem 속성과 지형 결합이 필요한 지점 리스트는 points 속성에 저장된다. 각 노드에 대해 지점 리스트의 분배를 마치면 총 50개의 쿼드트리가 생성된다. 이 중 points에 값을 가진 노드에 한해 DEM 데이터를 브이월드 서버에 요청한다. DEM 데이터를 수신하면, 앞서 설명한 단계를 통해 각 points에 대응되는 고도 값을 추출한다. 최종적으로 트리의 모든 points는 자신의 고도 값을 가지게 된다.

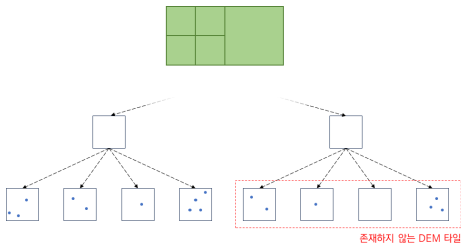
이후 고도 값이 할당된 좌표들은 별도의 파일로 저장한다. 본 연구에서는 CSV 파일로 points 데이터를 저장하였다. 저장 시 파일의 접근 단계를 최소화하기 위해 타일 단위로 points 값을 저장한다.

3.3 지역별 최대 해상도 고도 반환

브이월드 DEM 데이터는 각 지역에 따라 해상도가 다르다. 이러한 점을 고려해 특정 지역에서 가장 높은 해상

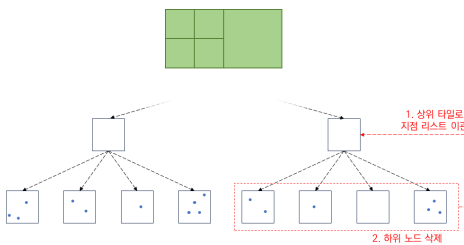
도로 고도 값을 추출하는 과정이 필요하다. 브이월드 DEM 데이터는 타일 노드 레벨(0~15)에 따라 해상도가 결정되며, 레벨이 높을수록 더 세밀한 지형 데이터를 표현한다. 도심 지역은 최대 15레벨까지 DEM 데이터가 존재하며, 산간 지역과 같은 외곽 지역은 13, 14레벨 수준으로 낮은 해상도의 DEM 데이터가 존재한다. 따라서 지역에 따라 타일 노드의 레벨이 항상 고정되지 않으므로 고도 값을 반환하는 지역에 가장 높은 해상도의 DEM 데이터를 적용하여 정확한 고도 값을 얻어야 한다.

브이월드 서버로부터 DEM 타일 데이터를 요청하는 과정에서, 서버에 존재하는 레벨 이상의 DEM 타일을 요청하는 경우 데이터를 수신하지 못한다. 이러한 상황에서는 타일에 대한 데이터가 없으므로, 해당 타일에 속한 지점들을 상위 노드로 이관하여 더 넓은 범위의 타일에서 고도 값을 처리해야 한다(Fig. 5).



[Fig. 5] Characteristics of DEM Tiles with Varying Resolution by Region

제안기법에서는 DEM 데이터를 요청하고 실패했을 경우 ValueError 예외를 발생하여 해당 타일의 데이터 수신을 실패한 경우 소속된 지점들은 부모 노드로 이관되며, 이후 상위 노드가 해당 지점들에 대해 고도 값을 처리하도록 하였다(Fig. 6).



[Fig. 6] Transfer of Coordinate List Belonging to The Non-Existent Tiles

상위 노드로 포인트가 이관된 후, 상위 노드는 다시 DEM 데이터를 요청하여 고도 값을 반환한다. 상위 노드

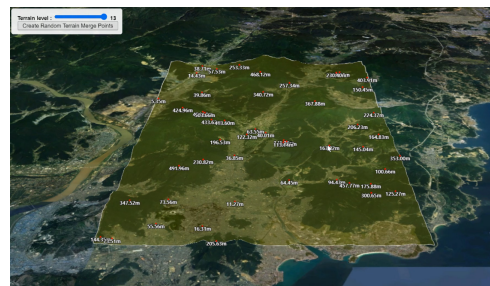
는 더 큰 범위를 커버하는 타일에 해당하므로, 상위 노드에서 얻은 고도 값은 해당 타일 내 모든 하위 지점에 적용될 수 있다. 이 때 비동기 요청으로 인해 하위 노드가 동시에 상위 노드에 접근하는 것을 방지하기 위해 상위 노드의 locking 처리 과정을 추가하였다.

상위 노드가 성공적으로 DEM 데이터를 수신하면, 이 데이터는 상위 노드에 속한 모든 지점에 고도 값을 할당하게 된다. 이 과정은 지점이 속한 하위 노드에서 데이터 수신이 실패하더라도 상위 노드에서 성공적인 요청이 이루어질 때까지 재처리된다. 이를 통해 결과적으로 가장 높은 해상도의 DEM 데이터를 적용할 수 있게 된다.

4. 실험분석

4.1 임의의 위치와 DEM 결합

첫 번째 실험은 제안한 고도 추출 방법이 실제 지형 표면을 정확히 반영하는지 확인하는 것이다. 먼저, 실험을 위해 임의의 위치 50개를 선정하여 각 위치의 고도 값을 DEM 데이터로부터 추출하였다. 이때, 선정된 위치는 다양한 지형을 포함하도록 하여 평지, 산지, 해안가 등 다양한 고도 특성을 반영하도록 구성하였다. 추출한 고도 값은 경위도 좌표에 대한 고도 정보를 정확히 제공하는지 평가하는 기준으로 사용하였다. 추출된 고도 값을 시각화하기 위해 각 위치에 POI(Point of Interest) 객체를 생성하여, 지형 표면 위에 고도 값을 텍스트 형태로 표기하였다. 각 POI는 해당 지점의 고도를 나타내며, 이를 통해 DEM 데이터와 위치 좌표가 적절히 매핑 되는지를 시각적으로 확인하였다. 실험 결과, 50개의 임의의 위치에 추가된 POI가 지형 표면에 정확히 위치함을 확인하였다(Fig. 7).

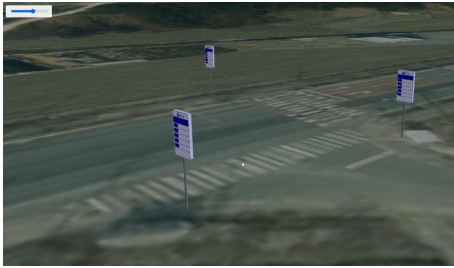


[Fig. 7] Visualization Results of DEM-Based Elevation Data for Arbitrary Locations

4.2 공공데이터 버스정류장 정보와 DEM 결합

두 번째 실험은 2차원 공공데이터와 DEM 데이터를 결합하여 실제 환경에서의 위치 정보 정확성을 검증하는 실험이다. 이 실험에는 국토교통부에서 2023년 공개한 전국 버스정류장 정보이다. 여기에는 각 정류장의 경위도 좌표가 포함되어 있는데, 각 정류장의 정확한 고도 값을 DEM 데이터에서 추출하고 이를 활용하여 3차원 공간상에서의 위치 정확성을 확인하였다.

Fig 8은 실험 결과를 보인 것으로 버스정류장을 시각적으로 명확히 나타내기 위해 버스정류장 표지판 형태의 3D 모델을 적용하였고, 정류장 모델의 바닥 부분이 지형 표면과 자연스럽게 접하는 것을 시각적으로 확인할 수 있다.



[Fig. 8] Integration Results of Public Bus Stop Locations with DEM Data

4.3 공공데이터 가로수 위치 정보와 DEM 결합

다음은 2023년도에 공개된 경기도 양평군의 가로수 위치 정보에 제안기법을 적용하였다. 이 데이터에는 총 60,106개의 가로수 경위도 좌표가 포함하는데, 시각화를 통해 가로수가 고도 정보 결합을 통해 지형에서 올바른 고도에 위치하는지 확인한다. 가로수 데이터는 DEM



[Fig. 9] Integration Results of Public Street Tree Locations with DEM Data

데이터로부터 추출된 고도 값을 바탕으로 각 지점에 가로수 모델을 배치하였으며, 이를 통해 모델의 지형 표면 접합 여부를 확인하였다. Fig. 9는 가로수 모델이 지형의 표면에 자연스럽게 접합되었음을 보여준다.

4.4 실측 고도 데이터를 이용한 성능 분석

고도 추출 결과의 시각적인 검증과는 별개로 실제 측정된 3D 점군 데이터의 고도 데이터와 그 것의 2D 정보로부터 제안 기법을 사용하여 추정된 고도 값의 차이를 비교 평가하였다. 이 실험은 다음과 같은 세 가지 데이터셋에 대해 수행하였다.

- [DS#1] 경상남도 긴급구조표준 AWS 관측 데이터 (2024-09-25 일자)
- [DS#2] 충청남도 기상관측망 지점정보 (2024-09-09 일자)
- [DS#3] 국립공원공단 기상관측망 지점정보 (2014-12-19 일자)

각 데이터셋은 측정된 경위도 좌표와 해당 위치의 실제 고도값(real)을 포함하고 있으며, 제안 기법을 통해 추정된 고도값(est)과 비교한다. 실험 측정값은 다음과 같으며 Table 2는 실험결과를 나타낸 것이다.

- 평균 절대 오차(MAE, Mean Absolute Error): 각 점에 대한 $|est - real|$ 의 평균(m)
- 표준 편차(STD, Standard Deviation): 각 점에 대한 $|est - real|$ 의 표준 편차 (m)
- 상관 계수(R, Correlation Coefficient): 각 점에서 est와 real 간의 상관 관계

<Table 2> Comparison test result

| DS | Number of Data points | MAE(m) | STD(m) | R |
|----|-----------------------|--------|--------|-------|
| #1 | 20,004 | 9.031 | 15.004 | 0.990 |
| #2 | 124 | 11.077 | 30.866 | 0.736 |
| #3 | 28 | 7.533 | 10.238 | 0.998 |

실험 결과 제안기법으로 추정된 고도값은 실측 데이터와 매우 강한 상관 관계를 가지며 (>0.7), 특정 지역에서는 비교적 정확한 고도 값을 제공함을 확인하였다(>0.99). 전체적으로 MAE는 7미터에서 11미터 내외인데 데이터셋에 사용된 점군 데이터의 고도가 수백미터 수준인 것을 감안하면 고도 추정오차는 1%-2% 정도인 것으로 파

악할 수 있다. 위성 기반 DEM 수준이 10m 이상의 오차를 가진다는 점을 감안하면 제안하는 기법이 지형분석 또는 수문학 모델링 응용에 충분한 정밀도를 제공하는 것으로 볼 수 있다.

5. 결론

제안 연구는 공공데이터와 브이월드의 디지털 표고 모델(DEM) 데이터를 결합하여 3차원 공간에서 위치 정보의 정확성을 높이고 지형과의 일치성을 확보할 수 있음을 보였다. 특히, DEM 데이터 타일링을 통해 필요한 타일만 접근하고, 쿼드트리 구조를 이용해 위치 데이터를 공간적으로 분류함으로써 고도 매칭을 위한 처리 효율성을 높였다. 실험 평가에서는 실제 데이터를 사용하여 지형과의 일치성을 확인하고 지형분석 및 수문학 모델링 응용에 적용 가능한 수준임을 보였다. 추후에는 대규모 데이터 처리 성능 개선을 위한 실행 성능 향상을 위한 연구를 진행할 예정이다.

REFERENCES

[1] A. Logg, "Towards urban digital twins: A workflow for procedural visualization using geospatial data," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 1939, 2024.

[2] 국토지리정보원, "공간정보 오픈플랫폼," Accessed Dec. 11, 2024. [Online]. Available: https://www.ngii.go.kr/kor/board/view.do?board_code=dictionary&sq=65445.

[3] eToday, "업종 장벽 걷었다 공간정보 '규제완화' 국가공간정보 기본법 개정안 시행," Accessed: Oct. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.etoday.co.kr/news/view/2341137>

[4] 행정안전부, "국민생활 밀접 공공데이터 묶음 30개 개방...데이터경제 활성화 기대," 대한민국 정책브리핑, Jul. 20, 2023. [Online]. Available: <https://korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148917968>

[5] J. Jiang, H. Xia, and D. Wen, "Vertical Accuracy Assessment and Improvement of Five High-Resolution Open-Source Digital Elevation Models Using ICESat-2 Data and Random Forest: Case Study on Chongqing, China," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 1903, 2024.

[6] J. R. Escobar Villanueva, L. Iglesias Martínez, and J. I. Pérez Montiel, "DEM Generation from Fixed-Wing UAV Imaging and LiDAR-Derived Ground Control Points for Flood Estimations," *Sensors*, vol. 19, no. 14, p. 3205, 2019.

[7] S. Li, Y. Zhu, and J. Wang, "The trend analysis of land use degradation in Beijing surrounding area using TM data and high resolution DEM," in *Proc. IEEE*, 2020.

[8] N. A. Sulaiman, F. Husain, K. A. Hashim, I. Ma'arof, and A. M. Samad, "A study on the extraction of Digital Elevation Model (DEM) using Remote Sensing and Geographic Information System (GIS) for flood risk assessment," in *Proc. IEEE*, 2021.

[9] P. A. Buah, Z. Yingbin, D. A. Y. Bakah, M. K. Ahiabu, and L. Zhibin, "Earthquake-Induced Landslide Susceptibility Analysis: The Effect of DEM Resolution," in *Proc. IEEE*, 2022.

[10] 이사로, 김민지, "DEM을 이용한 지형/수문 분석 데이터 구축 및 서비스," *GEO DATA*, vol. 2, no. 2, pp. 36-44, Dec. 2020. doi: <https://doi.org/10.22761/DJ2020.2.2.006>.

[11] Y. Wang, Y. Zou, K. Henrickson, Y. Wang, J. Tang, and B.-J. Park, "Google Earth elevation data extraction and accuracy assessment for transportation applications," *PLOS ONE*, vol. 12, no. 4, 2017. doi: 10.1371/journal.pone.0175756.

[12] C. Cahalane, "Combining 2D mapping and low density elevation data in a GIS for GNSS shadow prediction," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 4, no. 4, pp. 2769-2791, 2015. doi: 10.3390/ijgi4042769.

[13] K. Bakula, M. Stępnik, and Z. Kurczyński, "Influence of elevation data source on 2D hydraulic modelling," *Acta Geophysica*, vol. 64, pp. 1176-1192, Dec. 2016. doi: 10.1515/acgeo-2016-0030.

[14] L.-K. Lee and S.-Y. Oh, "Fast and efficient traversable region extraction using quantized elevation map and 2D laser rangefinder," in *Proc. VDE*, 2017.

[15] 박찬수, 서용철, "실시간 시각화를 위한 계층 구조 구축 기법 개발," *大韓土木學會論文集*, 제29권, 제2D호, pp. 311-318, 2009.

윤 수 민(Su-Min Yun)

[준회원]



- 2014년 8월 : 부산대학교 IT응용 공학과(공학사)
- 2014년 5월 ~ 현재 : ㈜이시스 기술연구소 책임연구원
- 2023년 3월 ~ 현재 : 국립부경대학교 데이터공학과 석사과정

<관심분야>

사물인터넷, 데이터가시화, GIS(Geographic Information System), 그래픽 엔지니어링

송 하 주(Ha-Joo Song)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학과(공학사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학과(공학석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 컴퓨터 공학과(공학박사)

- 2001년 3월 ~ 2003년 8월 : ㈜아이티포웍 수석연구원
- 2003년 9월 ~ 현재 : 국립부경대학교 컴퓨터인공지능공학부 교수

<관심분야>

빅데이터, 데이터베이스 시스템, 데이터사이언스