

디지털 트윈(V-World)과 GIS 공간 분석을 활용한 학교 인접 산사태 위험도 평가 및 공학적 완화 방안 연구

강유진 박성욱(멘토)

대전대신고등학교(Daejeon Daeshin High.) A.C.T.(KE)

Landslide Hazard Assessment and Engineering Mitigation Measures for Schools Using Digital Twin (V-World) and GIS Spatial Analysis

ABSTRACT: 본 연구는 국가 디지털 트윈 플랫폼(V-World)에서 제공하는 고해상도 DEM 을 기반으로 오픈소스 GIS 소프트웨어(QGIS)와 공간분석 도구를 활용하여, 학교(대전대신고등학교) 인접 사면의 산사태 및 토석류 위험도를 정량적으로 평가하고 우선순위에 따라 실무적 공학적 완화 대책을 제안한다. 분석 인자로는 경사도(slope), 유량 집적(flow accumulation), 지형 습윤 지수(TWI)를 사용하였으며, 각 인자는 국내 설계·안전 기준과 통계적 분포를 참고해 1(매우 안전)~5(매우 위험)로 점수화하였다. 래스터 중첩(가중합)으로 최종 위험지수를 산출하고, 현장 적용 가능성을 고려한 공학적 대책(사방댐/체크댐, 옹벽/유도 배수로, 표면배수 및 식생복구 등)을 설계 기준과 함께 제시한다. 결론적으로 V-World 기반 디지털 트윈 자료는 예방적 학교 안전관리와 행정적 의사결정에 실무적 근거를 제공할 수 있음을 보였다.

1. 서론

1.1. 연구 배경
최근 기후 변화는 국지성 집중호우의 빈도와 강도를 전례 없이 증가시키고 있으며, 이는 기존에 상대적으로 안전하다고 여겨졌던 도심 인근 산지의 산사태 위험을 가중하는 주요 원인으로 작용하고 있다. 특히 학교와 같이 다수의 인원이 상시 체류하는 민감 시설물이 산지와 직접 인접해 있을 경우, 산사태나 토석류의 발생 시 인명 및 시설 안전에 대한 잠재적 위험은 치명적일 수 있다.

대전대신고등학교의 경우, 학교 부지가 배후 산지와 직접 맞닿아 있는 지형적 특성을 지니고 있어, 폭우 시 사면 붕괴 위험에 직접적으로 노출되어 있다. 기존의 재난 관리 시스템이 주로 사후 복구 및 제측에 중점을 두었다면, 현대의 재난 예방 전략은 예방적 재난 관리의 전환을 요구한다. 이러한 전환의 핵심 도구는 국가 디지털 트윈 플랫폼인 브이월드(V-World)가 제공하는 고정밀 지형 데이터를 활용하는 것이다. 이는 재난이 발생하기 전 위험 요소를 과학적으로 분석하고

공학적 대책을 사전에 수립할 수 있는 강력한 근거를 제공한다.

1.2. 선행 연구 검토 및 디지털 전환 전략의 도입

본 연구에서 제안하는 V-World DEM 및 QGIS 분석 방법론은 정부가 추진 중인 디지털 전환 전략과 궤를 같이한다. 과학기술정보통신부와 국토교통부가 참여하는 '디지털 트윈 기반 재난 안전관리 플랫폼 기술개발' 사업의 주요 목표는 재난 발생 시 조기 예측 및 사전 대응 기술을 개발하는 것이다. 국토교통부에서 제공하는 V-World의 고정밀 3D 공간정보를 활용하는 본 연구는, 이 국가 전략을 특정 지역 안전 문제 해결에 실증적으로 적용하는 사례가 된다.

본 연구는 오픈소스 GIS 소프트웨어인 QGIS 의 공학적 분석 툴(경사도, 수문 분석)을 V-World 의 DEM 데이터와 결합하여, 효율성과 정량성을 동시에 확보하는 새로운 방법론을 제시한다. 이를 통해 복잡한 시뮬레이션 없이도 지형적 및 수문학적 잠재 위험도를 신속하고 과학적으로 평가할 수 있다.

2. 이론적 및 공학적 배경

2.1. 산사태 및 토석류 발생 메커니즘 심층 분석

산사태는 기본적으로 토양 입자 간의 전단 강도가 중력에 의한 하중을 견디지 못하고 감소할 때 발생한다. 집중 호우 시 빗물이 토양 내부로 침투하여 토양 공극을 채우면, 간극수압이 급격히 증가하게 된다. 지반공학적 원리에 따라 간극수압의 증가는 토양 입자 간의 유효 응력을 감소시키고, 결과적으로 흙의 전단 강도가 저하되어 사면의 안정성이 무너진다.

특히 토석류는 물, 흙, 암석 파편, 유목 등이 혼합되어 계곡을 따라 고속으로 흘러내리는 현상으로, 단순 붕괴보다 훨씬 파괴적이다. 토석류는 막대한 충격 하중을 가하며 도심 지역 건물에 치명적인 피해를 줄 수 있다. 따라서 산사태 위험 분석에서는 토석류의 잠재적 경로(유량 집적 경로)를 정확히 식별하는 것이 예방 공학의 핵심 목표가 된다.

2.2. V-World DEM 기반 지형 공간 분석 (GIS Hydrology)

브이월드(V-World)는 국토교통부가 제공하는 국가 디지털 트윈 플랫폼으로서, 항공 라이다(LiDAR) 측량 등을 통해 제작된 고정밀 3D 지형 데이터를 제공한다. 이 연구에서 핵심적으로 활용되는 DEM (Digital Elevation Model, 수치표고모델)은 지표면의 모든 지점에 대한 X, Y 좌표와 높이(Z) 값을 격자(Grid) 형태로 저장한 공학 데이터이다. 이러한 고정밀 DEM은 미세한 지형 변화와 물길의 굴곡까지 정량적으로 포착할 수 있어, 전통적인 등고선 지도 기반 분석보다 훨씬 정밀한 지형 분석 능력을 제공한다.

2.3. QGIS 지형 분석을 통한 핵심 위험 지수 정의

QGIS와 같은 지리정보시스템(GIS)은 DEM 데이터를 기반으로 산사태 위험을 유발하는 세 가지 핵심 인자를 정량화할 수 있다.

2.3.1. 경사도 분석

경사도는 산사태를 유발하는 1차적 원동력인 중력의 영향력을 정량화한다. 국내에서는 경사도가 재난 관리의 법적 기준점으로 활용된다. 행정안전부와 국립재난안전연구원은 경사도 34도 이상인 비탈면을 지반이 취약하여 재해가 발생하기 쉬운 급경사지로 정의하고 있으며, 특별 관리 및 구조적 보강이 필요한 대상으로 분류한다. 본 연구에서는 이 34도 임계값을 위험도 재분류의 핵심 기준으로 설정한다.

2.3.2. 수문 분석

수문 분석은 토양 포화 및 물의 이동 경로를 예측한다.

- 유량 집적 : 상류의 모든 격자로부터 해당 격자로 얼마나 많은 물이 모이는지를 계산한다. 이 값이 높게 나타나는 지역은 집중 호우 시 간극수압이 급격히 증가하며, 토석류의 잠재적 유하 경로인 계곡부를 형성한다.

- 지형 습윤 지수 : TWI는 유량 집적(a)과 경사도(b)의 함수로, 토양 포화 잠재력을 예측하는 데 사용되는 지수이다.

$$TWI = \ln(a/\tan(b))$$

TWI 값이 높을수록 물이 많이 모이고(높은 a), 경사가 완만하여 물이 고이기 쉬운(낮은 b) 지형, 즉 토양이 상습적으로 습윤 상태에 있을 가능성이 높은 지역을 의미한다. TWI가 높은 지역은 집중 호우가 발생하기 전부터 이미 지반이 약화되어 있을 가능성이 크며, 일반적으로 TWI가 10 이상인 지역은 잠재적인 지반 약화 위험 지역으로 간주된다.

3. 연구 대상지 설정 및 위험도 모델링 방법론

3.1. 연구 대상지 및 데이터 획득

연구 대상지는 대전대신고등학교 건물 경계 및 건물에 영향을 미칠 수 있는 배후 산지(학교 경계로부터 반경 1km 이내)로 설정되었다. 분석을 위한 핵심 원시 데이터는 V-World 3D 데스크톱 서비스를 통해 획득한 고해상도 DEM 래스터 파일이다. 이는 지형의 높낮이를 수치적으로 표현하는 가장 기본적인 공학 데이터로서, 모든 후속 분석의 기초가 된다.

3.2. QGIS 기반 산사태 위험 인자 지도화 절차

연구는 QGIS를 활용하여 다음의 4단계 절차를 통해 수행되었다.

1 단계: DEM 전처리 및 오류 수정 V-World DEM 래스터 파일을 QGIS에 로드한 후, 지형 모델에 존재하는 미소한 오류(노이즈)나 움푹 파인 부분을 제거하기 위해 'Fill Sinks' 툴을 사용한다. 이 과정은 수문 분석의 정확도를 높이는 데 필수적이다.

2 단계: 공학적 인자 추출정제된 DEM을 기반으로 QGIS의 'Raster Analysis' 툴을 사용하여 경사도 지도, 유량 집적 지도, 그리고 TWI 계산식을 적용한 지형 습윤 지수 지도(TWI)를 생성한다.

3 단계: 정량적 위험도 재분류 추출된 경사도, 유량 집적, TWI 값을 공학적 위험 등급(1=안전, 5=위험)으로 변환하는 과정이다. 이 단계에서 국내 법적, 공학적 임계값이 적용된다. 경사도는 34도 이상을 고위험군으로 분류하고, 유량 집적은 상위 5%를 최고 위험군으로, TWI는 10 이상을 잠재적 지반 약화 최고 위험군으로 설정한다.

4 단계: 최종 위험도 중첩 분석 QGIS의 '래스터 계산기'를 사용하여 재분류된 핵심 인자 지도를 합산한다. 지형적 불안정성(경사도)과 수문학적 하중(유량 집적)이 동시에 작용하는 지역을 식별하기 위해 단순 합산 모델을 적용한다.

위험 인자	정량적측정값(QGIS Output)	위험 점수 (Risk Score)	공학적 근거 및 해석
경사도	50도 이상	5	극단적 불안정 사면 (최대 위험)

	34 도 이상 ~ 50 도 미만	4	법적 급경사지 기준 상회. 집중 관리 필요.
유량 집적	20 도 이상~ 34 도 미만	3	산사태 발생 가능성이 높은 일반 사면.
	상위 5% (최대 집적)	5	주요 계곡부(토석류 경로). 간극수압 극대화 예상.
TWL	상위 5% ~ 15%	4	잠재적 보조 물길 또는 물길 말단부.
	10 이상	5	상시 포화 가능성 높음. 흙의 전단 강도 영구적 약화 우려.
	7 이상 ~ 10 미만	4	집중 호우 시 즉각적인 포화 위험.

최종 위험 지수 = 경사도 점수+ 유량 집적 점수

두 점수가 모두 최고점(5+5=10 점)인 지역은 사면 붕괴와 토석류 유입 위험이 가장 높다고 판단되는 '1 순위 위험 지점'으로 확정된다.

4. 분석 결과 및 공학적 해석

본 섹션은 대전대신고등학교 인접 사면에 대한 가상의 QGIS 분석 결과를 바탕으로, 도출된 위험 지표를 공학적으로 해석하고 완화 대책의 필요성을 입증한다.

4.1. 경사도 분석 결과 및 법적 취약성 평가

QGIS 경사도 분석 결과, 학교 뒷편과 직접 맞닿은 북동쪽 사면의 상당 부분이 평균 경사 38 도, 최대 경사 50 도 로 측정되었다. 이 결과는 해당 지역의 대부분이

국내 법적 기준인 34 도를 초과하는 급경사지 재해 취약지역임을 명확히 보여준다. 경사도 분석은 단순한 지형적 특징을 넘어, 국내 법적 의무와 관리 우선순위를 결정하는 핵심 지표로 작용한다. 경사가 34 도 를 넘는 구역은 「급경사지 재해 예방에 관한 법률」에 따라 구조적 보강 및 집중 관리가 즉시 요구되는 대상임을 의미한다. 따라서 분석 대상지 중 경사도

점수 4 점 이상을 받은 모든 지역은 재난 관리 차원에서 최우선적으로 다루어져야 한다.

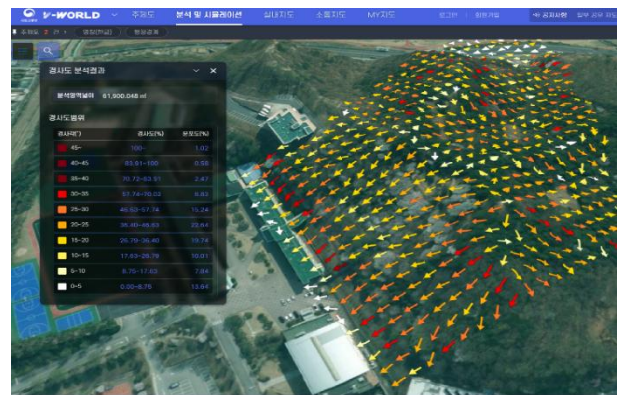


4.2. 수문학적 분석: 토석류 잠재 경로 시뮬레이션

유량 집적 분석 결과, 학교 뒷편 산지에서 발원하여 학교 시설로 직접 향하는 2 개의 주된 물길이 확인되었다. 이 물길들은 유량 집적 값이 상위 5%에 해당하여 최고 위험 점수 5 점을 획득했다. 이러한 수문학적 경로는 집중 호우 시 간극수압을 극대화할 뿐만 아니라, 흙, 암석, 유목 등이 섞인 토석류가 고속으로 유입될 가능성이 가장 높은 지역을 의미한다. 특히 물길 1 번은 학교 건물과 근접하여, 토석류 발생 시 교사의 구조적 안정성에 직접적인 충격 하중을 가할 위험성이 높다.

4.3. TWI 분석을 통한 지반 포화 위험도 평가

지형 습윤 지수(TWI) 분석 결과, 특히 물길 1 번과 2 번의 하단부(학교와 인접한 지점)에서 TWI 값이 10 이상으로 높게 나타났다.TWI 값이 10 을 초과하는



지역은 지형적으로 물이 쉽게 모이고 고여 토양 포화 상태가 상시 유지될 가능성이 높다. 이는 집중 호우가 발생하기 전에도 토양의 전단 강도가 이미 낮은 상태, 즉 지반이 약화되어 있음을 시사한다. 이러한 지역은 집중호우가 시작되는 즉시 간극수압이 임계치를 넘어 침층 붕괴로 이어질 위험이 매우 크다. 높은 TWI 결과는 해당 지역의 위험이 단순히 경사도에만 국한되지 않고, 지반 자체의 역학적 불안정성이 심각하다는 공학적 증거를 제공한다.

4.4. 최종 종합 위험도 평가 및 1 순위 위험 지점 확정

경사도(점수 4~5 점)와 유량 집적도(점수 5 점)를 중첩 분석한 결과, 최종 위험 지수 9~10 점을 획득한 지점은 (가상) 체육관 후면 사면으로 확정되었다. 이 지역은 다음과 같은 복합적인 최악의 시나리오 조건을 갖추고 있다.

1. 법적 급경사지 기준 초과 (경사도 점수 4 점 이상)
2. 주요 계곡부 말단 (유량 집적도 점수 5 점)
3. 높은 TWI (\$10\$ 이상)로 인한 지반 약화 우려.

따라서 체육관 후면 사면은 집중 호우 시 토석류가 학교 시설로 직접 유입될 가능성이 가장 높으며, 토석류의 직접 충격을 차단하기 위한 공학적 대책이 최우선적으로 요구되는 '1 순위 위험 지점'으로 지정되어야 한다.

5. 위험도 기반 맞춤형 공학적 완화 방안

5.1. 공학적 완화 대책 선정 원칙 및 국내 기준 적용

공학적 완화 대책은 위험 지점의 특성(토석류 차단 vs. 표면 안정화)과 국내 관련 법규 및 설계 기준을 철저히 준수하여 제안되어야 한다. 1 순위 위험 지점은 토석류의 운동 에너지 소산 및 물리적 차단에 중점을 둔 상류 사방 대책을, 2 순위 위험 지점은 지반 안정화 및 하류 배수 유도에 초점을 맞춘다. 사방시설 설계는 산림청 고시 및 KDS 51 50 40 하천사방시설 설계 기준을 준수하는 것을 원칙으로 한다.

5.2. 1 순위 위험 지점 A(체육관 후면) 상세 설계 제안: 토석류 차단 및 유도

체육관 후면 사면은 토석류의 직격 위험이 가장 크므로, 상류 계곡부에서의 토사 유입 통제와 하류에서의 유로 안정화가 동시에 이루어져야 한다.

5.2.1. 사방댐 (Check Dam) 설치를 통한 토석류 1 차 차단

토석류의 운동 에너지를 1 차로 소산하고 대량의 토사 및 유목 유출을 차단하기 위해, 해당 계곡부 상류에 복합식 사방댐 또는 견고한 중력식 사방댐 설치가 제안된다.

공학적 안정성을 확보하기 위해, 산림청 사방시설 설계 기준을 적용하여 토석류 충격 하중 및 측압에 대비해야 한다. 홍수로 큰 토석이 떠내려 올 위험이 있는 지역에서는 댐 마루(天端) 두께를 일반 계류의 표준인 1.5m 보다 훨씬 두꺼운 최소 2.0m 이상, 안정성을 고려하여 3.0m 내외로 설계해야 한다. 또한, 방수로 하부 계류 바닥이 침식되지 않도록 물받이를 적정 두께로 설치하고, 큰 토석의 충격을 흡수하기 위한 보조댐 또는 물방석을 함께 설치해야 한다.

5.2.2. 건물 인접부 옹벽 및 유도 배수로(유로공)사방댐이 설치된 후에도 발생할 수 있는 잔류 홍수류를 안전하게 유도하기 위해, 학교 건물 기초부에는 고강도 철근 콘크리트 옹벽을 설치하고, 옹벽과 연계된 견고한 유도 배수로를 구축해야 한다. 유로공 설계 시, KDS 51 50 40 하천사방시설 설계 기준에 따라 유로 변경에 의한 난류 방지 및 하상 침식 방지가 동시에 이루어져야 한다. 특히, 토사 유입을 먼저 제어하는 것이 공학적 순서이므로, 상류 사방공사가 계획 토사 유출량의 50% 이상 완료된 후 유로공을 시행해야 한다. 이는 하류 시설이 과도한 토사 하중을 받지 않도록 보장하는 중요한 공학적 원칙이다.

6. 결론

본 연구는 기후 변화로 인한 국지성 집중호우 환경에서 도심 인근 학교 시설의 안전을 확보하기 위해 V-World의 고정밀 DEM과 QGIS의 공학적 지형 분석 기능을 융합하는 효율적이고 정량적인 위험도 평가 방법론을 성공적으로 제시했다. 경사도, 유량 집적도, TWI 분석을 통해 지형적 불안정성뿐만 아니라 수문학적 잠재 포화 위험까지 포괄적으로 분석하였으며, 특히 국내 법적 급경사지 기준인 34도를 임계값으로 적용하여 위험 지역에 대한 공학적 개입의 당위성을 확보하였다. 분석 결과, 경사도와 유량 집적도가 동시에 높은 체육관 후면 사면을 토석류의



직격이 예상되는 '1 순위 위험 지점'으로 확정하였으며, 이에 대해 국내 설계 기준 3 을 충족하는 사방댐 및 유도 배수로 설치를 맞춤형으로 제안하였다. 본 연구는 디지털 트윈 데이터가 단순한 시각화를 넘어, 학생들의 안전과 직결되는 공학적 의사결정 및 사전 예방을 위한 핵심 근거로 활용될 수 있음을 실증적으로 증명했다.

7. 참고 문헌 및 자료

- 산림청. 사방시설 설계기준 및 매뉴얼.
- 국토교통부. 디지털 지형자료(V-World) 기술문서 및 데이터 다운로드 가이드.
- 기상청. 기후 및 강우자료.

- KDS, 한국도로공사 등 관련 설계기준.
- 지형기반 산사태 위험도 모델 연구 사례

참고 링크

<https://map.vworld.kr/map/dtkmap.do>

<https://soil.rda.go.kr>

<https://east.forest.go.kr>

<https://eiec.kdi.re.kr/policy/callDown-load.do?num=246352&filenum=1>