
산림수계 수치지도 구축 및 산사태 관리 고도화를 위한 이탈리아 · 스위스 사례 조사

2025. 02.

1. 출장 개요

1.1 출장 목적 및 배경

1.1.1 출장 배경

- 한국은 매년 여름철 집중호우로 인해 산사태 및 토석류 피해가 빈번하게 발생하는 국가이다. 특히, 기후 변화의 영향으로 강우 패턴이 변화하면서, 단시간 내 강한 비가 집중되는 경향이 뚜렷해지고 있다. 이러한 변화는 산사태 및 토석류 발생의 주요 요인이 되며, 현재 운영 중인 위험 예측 시스템의 한계를 보완하고 보다 정밀한 예측 모델을 구축할 필요성이 제기되고 있다.
- 현재 한국의 산사태 및 토석류 위험 예측 모델은 확률적 접근법(Probabilistic Approach)을 기반으로 한 랜덤 워크 모델(Random Walk Model, RWM)이 주요 방식으로 활용되고 있다. 그러나 RWM은 강우량 및 지형 경사와 같은 제한된 요소만을 반영하는 단순한 모델로, 물리적 메커니즘(Physics-Based Mechanics) 및 실제 지형 변화(Dynamic Terrain Change)를 충분히 반영하지 못하는 한계를 지닌다.
- 이에 따라, 물리 기반 모델(Physics-Based Model), 머신러닝 기반 예측 기법, 원격 탐사 기술(Remote Sensing Technology), 유역(Watershed) 접근법을 결합한 보다 정밀한 예측 시스템을 구축하는 것이 필요하다. 이를 위해, 산사태 및 토석류 연구가 활발한 스위스 및 이탈리아의 선진 연구기관을 방문하여 최신 연구 동향을 분석하고 협력 가능성을 논의하는 것이 본 출장의 주요 배경이다.

1.1.2 출장 목적

- 본 출장은 한국의 산사태 및 토석류 위험 평가 체계를 개선하고, 최신 연구 기법을 분석하여 국내 적용 가능성을 검토하는 것을 주요 목표로 한다.
 - 현재 한국에서는 확률적 모델(Random Walk Model, RWM)을 활용한 산사태 예측이 이루어지고 있으나, 이는 물리적 메커니즘을 충분히 반영하지 못하며, 지반 특성과 강우 변화에 대한 정밀한 해석이 부족한 한계를 가진다.
 - 이를 해결하기 위해, 본 출장은 RAMMS 및 Dan3D와 같은 물리 기반 모델, 머신러닝 기반 예측 모델, 유역 기반 분석, 원격 탐사 및 드론 기술의 적용 가능성을 종합적으로 검토하고, 이를 한국 환경에 적용할 수 있는 연구 방향을 모색하는 것을 목표로 한다.
- 첫째, RAMMS 및 Dan3D 모델의 한국 적용 가능성을 검토한다.
 - 스위스 WSL에서 개발한 RAMMS 모델은 토석류 이동 경로 및 영향을 정밀하게 예측하는 데 효과적이며, ETH Zurich의 Dan3D 모델은 산사태 이동 경로 및 런아웃(Runout) 예측에 강점이 있는 물리 기반 시뮬레이션 모델이다.
 - 두 모델을 한국의 강우 특성과 지형 조건에 맞춰 최적화할 경우, 현재 RWM(Random Walk Model)의 한계를 극복하고 보다 신뢰성 높은 산사태 및 토석류 위험 지도(Debris Flow Hazard Map)를 구축할 수 있을 것으로 기대된다.
- 둘째, 머신러닝과 물리 기반 모델을 결합한 새로운 예측 기법을 연구한다.
 - CNR-IMATI 및 ETH Zurich 연구진과의 협력을 통해 머신러닝 모델이 높은 예측 성능을 가지지만, 설명 가능성(Explainability)이 부족하여 정책 적용이 어려울 수 있음을 논의하였다.
 - 따라서, RAMMS/Dan3D 같은 물리 모델과 머신러닝을 결합하여 데이터 기반 패턴 인식과 물리적 해석이 동시에 이루어지는 예측 시스템을 구축하는 방안을 연구할 계획이다.
 - 이를 통해, 기존 확률적 모델이 가지는 한계를 보완하고, 보다 정밀하고 해석 가능한 산사태 예측 시스템을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

- 셋째, 유역 기반(Watershed-Based) 접근법을 도입하여 보다 정밀한 산사태 예측 모델을 구축하는 방안을 검토한다.
 - 기존의 픽셀 기반(Point-Based) 분석 방식은 개별 지점의 위험도를 평가하는 데 초점을 맞추고 있어, 산사태의 전반적인 발생 메커니즘을 반영하기 어렵다. 반면, 유역 기반 분석은 강우, 지형, 수문학적 흐름을 종합적으로 고려하여 산사태 발생 가능성을 보다 정밀하게 평가할 수 있는 장점이 있다.
 - 스위스 및 이탈리아에서 유역 기반 예측 모델이 어떻게 운영되고 있는지를 분석하고, 이를 한국에 적용할 수 있는 방법을 연구할 계획이다.

- 넷째, 원격 탐사(Remote Sensing) 및 드론 기술을 활용하여 산사태 예측 정확도를 향상시키는 방안을 연구한다.
 - 스위스 및 이탈리아에서는 LiDAR 기반 드론 데이터 수집을 통해 실시간 DEM(Digital Elevation Model) 업데이트 및 토석류 감지를 수행하고 있다. 본 출장을 통해 이러한 원격 탐사 기술이 한국에서도 적용될 수 있는 방안을 모색하고, 이를 활용한 실시간 예측 시스템 구축 가능성을 검토하였다.
 - 또한, LiDAR 기반 DEM 갱신이 기존 산사태 예측 모델의 정밀도를 얼마나 향상시킬 수 있는지를 분석하고, 이를 실제 시스템에 반영할 방법을 연구할 계획이다.

- 마지막으로, 국제 협력 네트워크 구축 및 공동 연구 추진 방안을 논의한다.
 - 산사태 및 토석류 연구는 국가 간 협력이 중요한 분야이므로, FAO(국제연합 식량농업기구), CNR-IMATI, ETH Zurich, WSL, CAI(이탈리아 알파인 클럽) 등과 협력 가능성을 살펴보았다.
 - 또한, 국제 산사태 연구 네트워크(ICL, International Consortium on Landslides)와의 협력 방안을 논의하고, 최신 연구 동향을 공유하며 공동 연구 추진을 위한 기반을 마련 방안을 구상하고자 한다.

1.2 출장 일정 및 방문 기관

○ 출장자 및 기간: 총 2명

소속	출장자	직급	출장지	출장기간
산림경제연구실	구자춘	연구위원	이탈리아·스위스	2025.2.11(화)-2025.2.21(금)
신산업인력연구실	정도채	연구위원		

○ 출장일정

일 자	지 역	일 정
2/11(화)	인천 밀라노	○ 밀라노 도착
2/12(수)	밀라노 제노바	○ CNR-IMATI 방문 ○ Dr. Alessandro Mondini, Dr. Andrea Bressan 외 연구자 면담 및 워크숍
2/13(목)	밀라노 로마	○ Club Alpino Italiano 방문 및 담당자 면담 ○ 밀라노-로마 이동
2/14(금)	로마	○ UN FAO 방문 ○ 이상익 국장, Thomas Hofer(산림 부문 Leader) 면담·회의
2/15(토)	페루자	○ CNR-IRPII Dr. Fausto Guzzetti 자문
2/16(일)	바뇨레조	○ 산사태 관리 사례지역 조사
2/17(월)	로마 취리히	○ 로마-취리히 이동
2/18(화)	취리히	○ ETH Zurich 산사태 연구팀 방문 ○ Jordan Aaron 교수 자문회의
2/19(수)	취리히 다보스	○ WSL 방문 및 WSL, RAMMS 산사태 전문가 워크숍 참석 ○ Marc Christen(RAMMS), Christoph Graph(WSL) 외 자문 ○ 산사태 위험지역 사례조사
2/20(목) 2/21(금)	취리히 인천	○ 도착 후 연구원 이동

2. 한국의 상황

2.1 한국의 산사태 발생 현황 및 주요 사례

2.1.1 한국의 산사태 발생 특성

- 한국은 지형적으로 산지가 많고, 국토의 약 63%가 산림으로 이루어져 있어 산사태 및 토석류 발생 위험이 높은 국가 중 하나이다. 여름철(6~9월)에는 강수 집중 현상이 뚜렷하며, 최근 기후 변화로 인해 강우 패턴이 변화하고 있다. 특히 국지성 폭우(Localized Heavy Rainfall)의 발생 빈도가 증가하면서 짧은 시간 내에 많은 비가 내리는 사례가 빈번해지고 있으며, 이는 산사태 및 토석류를 유발하는 주요 요인으로 작용하고 있다.
- 최근 10년간 산사태 및 토석류 발생 빈도가 증가하면서 기존의 강우량 중심 위험 평가 방식의 한계가 드러나고 있다. 단순히 강우량을 기준으로 산사태 위험을 예측하는 방식은 지반 포화도나 지형적 요인을 충분히 반영하지 못하기 때문에, 보다 정밀한 물리 기반 모델과 머신러닝 기법을 활용한 분석이 필요하다.
- 또한, 도심에서도 산사태가 발생할 가능성이 증가하고 있어, 기존의 산림 및 산악 지역 중심의 예측 시스템을 보완하여 도시 지역까지 포함하는 종합적인 산사태 예측 체계 구축이 요구된다.

2.1.2 주요 사례 분석

- 한국에서 발생한 대표적인 산사태 사례로는 2002년 태풍 루사에 의한 강릉 지역 산사태와 2011년 서울 우면산 산사태가 있다. 2002년 태풍 루사는 강릉 지역에 단 하루 동안 800mm 이상의 기록적인 강우량을 초래하여 대규모 산사태 및 토석류를 발생시켰다. 이로 인해 주택과 도로가 매몰되었고, 다수의 인명 피해가 발생했다. 이 사건을 계기로 한국의 산사태 대응 체계를 점검하는 노력이 강화되었으며, 이후 산사태 예방 및 대응 정책이 체계적으로 발전하는 계기가 되었다.

- 하지만 여전히 강우량 중심의 위험 평가 모델이 주를 이루고 있어, 물리적 메커니즘을 고려한 보다 정밀한 예측 모델이 요구된다.
 - 2011년 서울 우면산 산사태는 도심에서 발생한 대규모 산사태로, 하루 동안 300mm 이상의 폭우가 집중되면서 대규모 토사 붕괴가 일어났다. 강남 지역을 포함하여 도심 곳곳에서 피해가 발생하였으며, 사망자를 포함한 심각한 인명 피해를 초래하였다.
 - 이 사건 이후 한국 정부는 산사태 예방을 위한 법적·행정적 대책을 강화하였으며, 산사태 위험 지역에 대한 관리 기준을 더욱 엄격하게 설정하였다.
 - 그럼에도 불구하고 여전히 강우량 중심의 위험 예측 방식에 의존하고 있어, 지반 특성과 도시 환경을 고려한 종합적인 예측 시스템 구축이 필요하다.

2.2 한국의 산사태 위험 예측 시스템

2.2.1 기존의 산사태 위험 평가 모델

- 현재 한국에서 운영 중인 산사태 및 토석류 위험 예측 모델은 정적 지도(Static Map)와 동적 지도(Dynamic Map)의 두 가지 방식으로 구분된다.
- 정적 지도는 과거 산사태 발생 이력과 지형적 특성을 기반으로 산사태 및 토석류 발생 가능성이 높은 지역을 사전에 설정하는 방식이다.
 - 이를 통해 1등급 및 2등급 지역으로 구분하여 위험 지역을 설정하고 이에 따른 관리 및 대응 계획을 수립하는 데 활용된다.
 - 하지만 이 방식은 실시간 변화하는 강우량이나 지반 상태를 반영하지 못하여, 현재의 기후 변화 및 강수 패턴 변동성을 고려한 예측에는 한계가 있다.
- 반면, 동적 지도는 실시간 강우량 데이터를 반영하여 48시간 내 산사태 발생 가능성을 예측하는 방식으로 운영된다.
 - 한국의 기후 특성상 강우량이 산사태 발생의 주요 원인이므로, 강우량 데이터를 기반으로 위험도를 평가하며, 한국 산림청 및 기상청에서는 이를 활용하여 산사태 위험 예보를 제공하고 있다. 그러나 강우량 중심의 평가 방식은 지반 포화도나 지형적 요인을 충분히 반영하지 못하기 때문에, 산사태 이동 거리(Runout) 및 토석류 이동성(Mobility) 등을 고려한 모델 개발이 필요하다.

2.2.2 Korea Landslide Early Warning System (KLES)의 한계점 및 개선 방향

- KLES(Korea Landslide Early Warning System)는 한국에서 운영 중인 산사태 조기경보 시스템으로, 기상청의 강우 예측 데이터를 기반으로 경보를 발령한다.
 - 그러나 강우량만을 기준으로 경보를 발령하는 방식은 지반 포화도 및 지질 특성을 반영하지 못하여 실제 위험 지역을 정밀하게 예측하는 데 한계가 있다.
 - 또한, 산사태 이동 거리 및 영향을 분석하는 모델이 부족하여, 발생 가능성뿐만 아니라 실제 영향 범위를 예측하는 기능이 미흡하다.
- 이를 개선하기 위해서는 RAMMS 및 Dan3D 모델과 같은 물리 기반 시뮬레이션을 활용하여 위험 예측 모델을 보다 정밀하게 구축할 필요가 있다. 또한, 유역 기반 분석을 도입하여 산사태 및 토석류 이동 경로를 보다 정확하게 분석하고, 강우량뿐만 아니라 지형, 지질, 지반 포화도를 종합적으로 반영하는 새로운 예측 체계를 개발해야 한다.

2.3 한국의 유역(Watershed) 기반 접근법 연구

2.3.1 유역 기반 접근법의 필요성 및 향후 연구 방향

- 기존의 픽셀 기반(Point-Based) 분석 방식은 특정 지역의 위험도를 평가하는데 초점을 맞추고 있으며, 강우-토사 흐름의 자연적 연결성을 충분히 반영하지 못하는 한계를 가지고 있다. 이에 따라 유역 단위(Watershed-Based) 분석을 활용한 예측 시스템 구축이 필요하다. 유역 기반 접근법은 강우, 지형, 수문학적 흐름의 상호작용을 보다 정밀하게 반영할 수 있어 예측 정확도를 향상시키는 장점을 가진다. 기존 확률적 예측 모델과 결합할 경우 보다 실용적인 위험 예측 시스템을 구축할 수 있으며, 이를 통해 변화하는 기후 조건과 다양한 지형 특성을 반영한 보다 정밀한 산사태 예측이 가능하다.
- 향후 연구 방향으로 RAMMS 및 Dan3D 모델과 결합하여 보다 정밀한 유역 기반 산사태 예측 모델을 구축하는 것이 필요하다. 또한, LiDAR 및 드론 기반 DEM 업데이트를 통해 지형 변화를 실시간 반영하는 모델을 개발하여 산사태 및 토석류 발생 위험을 보다 정확하게 예측할 수 있도록 연구를 확대해야 한다. 이를 통해 한국의 산사태 예측 시스템을 보다 정교하게 개선하고, 실시간 데이터 분석을 통한 조기 경보 시스템의 신뢰도를 높이는 것이 중요하다.

3. 방문 기관별 논의 내용 및 시사점

3.1 CNR-IMATI (이탈리아 제노아) - Dr. Alessandro Mondini & Dr. Andrea Bressan

3.1.1 논의 내용

- 이탈리아 CNR-IMATI 연구소에서 진행된 논의는 머신러닝 기반 산사태 예측 연구, 머신러닝과 물리 모델의 결합 가능성, 한국과 이탈리아의 강우-산사태 모델 비교, 그리고 물리 모델을 활용한 산사태 위험 평가 방법을 중심으로 이루어졌다.
- Mondini 박사는 머신러닝 기반 산사태 예측 연구와 관련하여 강우량, 지형 특성, 산사태 발생 이력 등의 데이터를 조합하여 머신러닝 모델을 훈련하는 방식을 설명했다. 특히, 딥러닝(Deep Learning) 모델이 강우와 산사태 발생 간의 관계를 빠르게 학습하는 데 강점을 가지지만, 모델의 설명 가능성(Explainability)이 부족하다는 점이 정책적 활용의 한계라고 강조했다. 이러한 한계를 극복하기 위해 SHAP(Shapley Additive Explanations) 분석, 피처 중요도(Feature Importance) 분석과 같은 해석 가능한 인공지능(Explainable AI) 기법을 적용하는 것이 필요하다고 제안했다.
- 머신러닝과 물리 모델(Physics-Based Model)의 결합 가능성에 대한 논의도 이루어졌다. Mondini 박사는 머신러닝 단독 모델보다는 물리 모델(예: TRIGRS, RAMMS)과 결합하는 것이 더 효과적인 예측 기법이 될 수 있다고 강조했다. 물리 모델과 머신러닝 모델을 조합하면 데이터 기반 패턴 인식과 물리적 해석이 동시에 적용될 수 있어 보다 정밀한 예측이 가능하다. 그러나 이러한 결합 모델을 구축할 경우, 서로 다른 스케일(Scale)의 데이터를 어떻게 통합할 것인가에 대한 기술적 문제가 존재한다고 지적했다. 머신러닝 모델은 고해상도 데이터를 활용하는 반면, 물리 모델은 거시적 지형 및 강우 흐름을 반영하는 경향이 있어, 이를 해결하기 위한 다중 해상도(Multi-Resolution) 데이터를 처리

하는 모델링 기법과 머신러닝 모델 보정(Calibration) 연구가 필요하다고 설명했다.

- Bressan 박사는 물리 모델을 활용한 산사태 위험 평가 방법에 대해 발표했다. 그는 산사태 위험도를 평가하는 주요 요소로 토양의 무게(Driving Force)와 토양 입자 간 마찰력(Resisting Force)을 강조했으며, 이를 정량화하는 방법으로 안전율(Factor of Safety, FoS) 개념을 적용하는 것이 필요하다고 설명했다. 기존의 물리 모델이 활용하는 안전율(FoS) 계산 방식이 머신러닝과 결합될 경우, 보다 신뢰성 높은 산사태 예측이 가능할 것이라고 제안했다. 토양의 마찰각(Friction Angle)과 결합력(Cohesion)이 산사태 발생에 미치는 영향을 설명하면서, 물리 기반 모델을 활용하면 강수량뿐만 아니라 지반 포화도와 같은 요인을 함께 고려할 수 있어 예측 정확도가 향상될 것이라고 강조했다. 특히, 토양의 물리적 특성이 강우에 따라 변화하는 방식(예: 물의 유입으로 인한 마찰력 감소 및 결합력 약화)을 정확하게 반영하기 위해, Richards' Equation을 활용한 물 침투(Water Infiltration) 시뮬레이션이 필요하다고 설명했다. 이를 통해 강수량뿐만 아니라 토양 내부의 수분 분포까지 예측할 수 있으며, 보다 정교한 산사태 위험 평가가 가능할 것으로 보인다.
- 마지막으로, 한국의 강우-산사태 모델과의 비교가 이루어졌다. Mondini 박사는 한국의 기후 특성을 고려할 때, 단기 집중 강우(Short-Duration, High-Intensity Rainfall)가 산사태 발생의 주요 원인으로 작용하는 반면, 이탈리아는 강수량의 장기적 누적(Antecedent Moisture Condition)이 중요한 변수로 작용한다는 점을 강조했다. 즉, 이탈리아에서는 지반 포화 상태가 산사태 발생에 중요한 요인이 되지만, 한국에서는 짧은 시간 동안 강수량이 급증하는 것이 보다 직접적인 산사태 유발 요인으로 작용한다. 따라서 한국에서 머신러닝 모델을 적용할 때에는 단기 강수량을 반영하는 기법을 도입하는 것이 중요하며, 강우 지속 시간(Duration) 및 강우 강도(Intensity)에 따른 산사태 발생 위험도를 분석하는 연구가 필요하다고 조언했다.

3.1.2. 시사점 및 향후 연구 방향

- CNR-IMATI와의 논의를 통해, 머신러닝 기반 산사태 예측 연구에서 설명 가능성이 중요한 요소이며, 정책 결정자가 신뢰할 수 있는 모델을 구축하기 위해 해석 가능한 머신러닝 기법을 적용해야 한다는 점이 확인되었다. 또한, 물리 모델과 머신러닝 모델을 결합할 경우, 서로 다른 해상도의 데이터를 처리할 수 있는

기법이 필요하며, 이를 위해 다중 해상도 기반 모델링 기법과 머신러닝 모델 보정 기법을 연구해야 한다는 점이 강조되었다.

- 특히, Bressan 박사의 발표를 통해, 산사태 위험 예측에서 물리 모델을 활용하면 보다 신뢰성 높은 예측이 가능하며, 물의 침투 효과까지 반영한 예측 모델이 필요하다는 점이 확인되었다. 이를 위해 RAMMS 및 Dan3D와 같은 물리 모델을 기반으로, 머신러닝 기법을 활용한 하이브리드 모델을 개발하는 것이 효과적인 방안이 될 수 있다.
- 향후 연구에서는 Richards' Equation을 활용한 물 침투 모델을 머신러닝과 결합하는 연구를 확대하고, 한국의 단기 집중 강우 패턴을 반영한 예측 모델을 구축하는 것이 필요하다. 또한, 강수량뿐만 아니라 토양의 물리적 변화(예: 마찰력 및 결합력 변화)까지 반영할 수 있는 종합적인 산사태 예측 시스템을 구축하는 것이 중요하다. 이를 통해, 한국형 산사태 위험 예측 모델을 보다 정밀하게 개선하고, 강우 변화에 따른 산사태 위험을 사전에 경고할 수 있는 체계를 마련할 필요가 있다.

〈CNR-IMATI 방문 및 워크숍 참석〉



3.2. CNR-IRPI FAUSTO GUZZETTI 박사와의 면담

3.2.1 논의 내용

(가) 유역 기반 접근법(Watershed-Based Approach)의 한계와 해결책

- KREI의 기존 픽셀 기반(Point-Based) 예측 방식에서 유역 기반(Watershed-Based) 접근법으로의 전환을 논의했다. Guzzetti 박사는 유역 기반 분석이 보다 정밀한 예측을 가능하게 할 수 있으나, 대규모 유역(1,000km² 이상)은 장기적인 취약성을 평가하는 데 유용하지만, 조기경보에는 부적합할 수 있으며, 반대로 소규모 유역은 해상도를 높일 수 있지만 대규모 수문학적 영향을 반영하기 어려울 수 있다고 지적했다. 또한, 유역 경계와 행정 경계가 일치하지 않기 때문에 정책 적용이 어려울 수 있다는 점도 고려해야 한다고 강조했다. 이에 따라, 픽셀 기반 분석과 유역 기반 분석을 결합한 하이브리드 접근법이 현실적인 해결책이 될 수 있다는 결론이 도출되었다. 특히, TRIGRS와 같은 물리 모델은 픽셀 기반 데이터가 필요하므로, 벡터 기반(유역)과 래스터 기반(픽셀)의 장점을 결합하는 방식이 필요하다는 점이 강조되었다.

(나) 위험(Risk), 재해위험성(Hazard), 취약성(Susceptibility)의 개념 구분

- Guzzetti 박사는 위험(Risk)과 재해위험성(Hazard)을 혼동해서는 안 되며, 진정한 의미의 위험 분석은 재해위험성뿐만 아니라 노출(Exposure) 및 취약성(Vulnerability) 요소를 포함해야 한다고 강조했다. 현재 KLES(Korea Landslide Early Warning System)는 재해위험성 예측 도구에 해당하며, 취약성과 노출 요소를 포함하지 않는 점에서 위험 예측 시스템(Risk Assessment System)과는 다르다는 점이 확인되었다. 이 개념의 차이는 정책 결정, 자원 배분, 장기적인 위험 저감 계획 수립에 있어 중요한 의미를 가지며, 향후 KLES 모델을 개선할 때 위험(Risk), 재해위험성(Hazard), 취약성(Susceptibility)을 명확히 구분하여 모델을 설계할 필요가 있다.

(다) 머신러닝과 데이터 기반 예측 기법

- Guzzetti 박사는 머신러닝이 산사태 예측에 강력한 도구가 될 수 있으나, 설명

가능성(Explainability)이 부족한 점이 정책 적용에 한계를 초래할 수 있다고 지적했다. 특히, 신경망(Neural Networks) 모델은 높은 예측 정확도를 제공할 수 있지만, 정책 결정자가 신뢰하기 어려운 "블랙박스(Black Box)" 모델이 될 가능성이 높다. 따라서, 머신러닝 모델이 신뢰성을 확보하려면 SHAP 분석(Shapley Additive Explanations), 피처 중요도 분석(Feature Importance Analysis)과 같은 해석 가능성 기법을 적용하는 것이 필요하다.

- 그러나 Guzzetti 박사는 머신러닝 모델의 설명 가능성이 중요한지는 모델의 목표에 따라 다르다고 강조했다. 즉, 산사태 발생 원인을 이해하려는 경우 설명 가능성이 중요하지만, 단순히 예측 성능을 최적화하려는 경우에는 설명 가능성이 필수적이지 않을 수도 있다. 따라서, KREI가 머신러닝을 도입할 때 모델의 목적을 명확히 정의하는 것이 필요하다.

(라) 조기경보 시스템의 임계값 설정(Threshold Setting) 개선

- KREI가 산사태 정보 시스템에서 60%, 80%, 90%의 임계값을 설정하는 기준을 질문하였으며, 이에 대해 Guzzetti 박사는 이탈리아에서도 과학적 정확성과 공공·정치적 수용성을 균형 있게 고려해야 하는 문제라고 설명했다. 그는 '통계적 검증(Statistical Validation), 민감도 분석(Sensitivity Analysis), 불확실성 정량화(Uncertainty Quantification)'를 통해 정보 임계값을 결정해야 하며, 단일한 기준보다는 여러 방법을 결합하여 최적화된 임계값을 도출하는 것이 보다 신뢰성 높은 정보 시스템 구축에 기여할 수 있다고 조언했다.

(마) 다중 해상도 데이터 통합 및 표준화 방안

- 현재 KLES는 DEM(Digital Elevation Model), 토양 및 지질 데이터, 수문학적 데이터, 과거 산사태 기록 등을 통합하여 예측을 수행하고 있으나, 이러한 데이터들이 해상도 및 스케일이 서로 다르기 때문에 통합 시 오류가 발생할 가능성이 높다. Guzzetti 박사는 산사태 유형별로 요구되는 입력 변수가 다르므로, 데이터 통합 시 단순히 해상도를 일치시키는 것이 아니라, 각 변수를 적절하게 조정하여 최적의 해상도를 찾아야 한다고 강조했다. 그는 특히, 벡터-래스터 변환(Vector-to-Raster Conversion)을 통한 데이터 정합성을 높이는 방안을 논의하면서, 벡터 데이터를 기반으로 분석을 수행하고, 래스터 데이터를 보완적으로 활용하는 방식이 보다 적절한 접근법이 될 수 있다고 설명했다.

(바) 장기적인 산사태 위험 관리 및 정책 고려사항

- KLES가 현재 단기적인 위험 예측에 초점을 맞추고 있다면, 한국도 이탈리아와

같은 장기적인 산사태 위험 저감 전략을 고려할 필요가 있다고 조언했다. 이러한 장기적인 대응 방안으로는 고위험 지역에서의 개발 제한, 토지 이용 계획 및 규제 강화, 산림 복구 및 재해 예방 조치 시행 등이 포함될 수 있다. 또한, 산사태 위험을 기후 변화 및 산불, 홍수 등과 결합하여 평가하는 다중 재해 (Multi-Hazard) 프레임워크를 적용하는 것도 필요하다.

3.2.2 시사점 및 향후 연구 방향

- KREI가 산사태 예측 모델을 개선하기 위해서는 유역 기반 접근법과 픽셀 기반 접근법을 결합한 하이브리드 모델을 개발하고, 벡터 및 래스터 데이터를 최적화하여 통합하는 방법을 연구할 필요가 있다. 또한, 위험(Risk), 재해위험성(Hazard), 취약성(Susceptibility)의 개념을 명확히 구분하여 정책 및 연구 방향을 수립해야 한다. 머신러닝 모델을 도입할 경우, 설명 가능성이 중요한 요소인지 여부를 모델의 목표에 따라 결정해야 하며, 신뢰성을 높이기 위해 SHAP 분석, 피쳐 중요도 분석 등 해석 가능성 기법을 적용하는 방안을 검토해야 한다.
- 또한, 산사태 조기경보 시스템의 임계값을 검토하여 보다 정교한 기준을 설정하고, 통계적 검증과 민감도 분석을 통해 신뢰성을 향상시키는 연구가 필요하다. 데이터 통합과 관련하여서는, 단순히 해상도를 맞추는 것이 아니라 각 변수별 최적 해상도를 고려하여 데이터 정합성을 유지하는 방향으로 연구를 진행해야 한다.
- 마지막으로, KLES가 단기적인 예측 시스템에서 벗어나 장기적인 위험 저감 전략을 수립하고, 산림 복구 및 다중 재해 프레임워크를 도입하여 보다 종합적인 산사태 관리 시스템을 구축할 필요가 있다. 이를 위해, 이탈리아 및 유럽의 토지 이용 정책, 재해 위험 관리 체계를 참고하여 한국의 정책 개선 방향을 검토하는 것이 필요하다.

〈IMATI-IRPI FAUSTO GUZZETTI 박사 면담 및 자문회의〉



3.3 ETH Zurich (스위스 취리히) - Dr. Jordan Aaron 연구팀

3.3.1 논의 내용

- ETH Zurich에서 진행된 논의는 Dan3D 모델을 활용한 산사태 및 토석류 이동성(Mobility) 및 런아웃(Runout) 예측, 베이지안 통계를 이용한 모델 보정(Bayesian Calibration), 고해상도 LiDAR 데이터를 활용한 이동 속도 분석, 수문학적 영향 반영 방안, 실용적 활용 및 정책적 적용에 초점을 맞추었다.
- 먼저, 산사태 및 토석류 이동 모델링 개선과 관련하여 한국 연구팀은 현재 Random Walk Model (RWM)을 활용하여 토석류 이동을 예측하고 있으나, 해당 모델이 물리적 특성을 충분히 반영하지 못하고 이동 거리의 정확성이 떨어지는 문제가 있다고 설명했다. 이에 대해 Dr. Aaron은 Dan3D 모델이 RWM보다 물리 기반 접근법을 제공하며, 중력, 내부 압력 구배, 기저 저항(Basal Friction), 침식 효과 등을 반영할 수 있다고 강조했다. Dan3D 모델은 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 사용하여 산사태 운동 방정식을 해결하며, 보다 현실적인 이동 경로와 속도 예측이 가능하다. 특히, 기저 저항은 Voellmy 유변학(Voellmy Rheology)을 적용하여 마찰 계수(f)와 난류 계수(ξ)를 보정할 수 있으며, 한국에서도 적용 가능하지만 식생과 지표면 거칠기 등의 지역적 특성을 반영한 추가적인 보정이 필요하다고 설명했다.
- 다음으로, 베이지안 통계를 이용한 모델 보정(Bayesian Calibration)에 대한 논의가 이루어졌다. 한국 연구팀은 현재 토석류 이동 예측 정확도를 높이기 위해 파라미터 보정이 필요하지만, 다양한 매개변수 조합이 동일한 결과를 초래하는 매개변수 비유일성(Non-uniqueness of parameters) 문제를 겪고 있다고 설명했다. 이에 대해 Dr. Aaron은 베이지안 사후 분석(Bayesian Posterior Analysis)을 활용하면 사전 분포를 기반으로 새로운 데이터가 추가될 때마다 모델을 보정할 수 있으며, 이를 통해 불확실성을 줄일 수 있다고 제안했다. 또한, Gauss-Marquardt-Levenberg (GML) 최적화 알고리즘을 활용하면 관측된 산사태 데이터와 시뮬레이션 결과 간의 차이를 최소화할 수 있으며, 속도 제약 조건을 추가하면 매개변수 비유일성을 효과적으로 해결할 수 있다고 강조했다.

- 고해상도 LiDAR 데이터를 활용한 이동 속도 분석과 관련하여 Dr. Aaron은 LiDAR 데이터를 활용하면 산사태 이동 속도를 더욱 정밀하게 분석하고, 모델 보정을 수행할 수 있다고 설명했다. LiDAR는 산사태 발생 후의 지형 변화를 고해상도로 측정할 수 있어, 실제 이동 데이터와 모델링 데이터를 비교하여 Dan3D 모델의 신뢰성을 검증하는 데 유용하다. 다만, 한국과 같이 숲이 우거진 지역에서는 LiDAR 적용이 어려울 수 있기 때문에, 주요 흐름 경로를 사전에 분석하여 최적의 측정 지점을 선정하는 것이 중요하다고 조언했다.
- 수문학적 영향 반영 방안에 대해서는, 한국 연구팀이 강우량과 토양 포화도가 토석류 이동성에 미치는 영향을 모델에 직접 반영하기 어려운 문제를 제기했다. 특히, 포화된 토양과 비포화 토양에서 이동 경로가 달라지며, 이를 정확히 예측하는 것이 어려운 점을 강조했다. Dr. Aaron은 현재 Dan3D 모델이 토양 수분 포화도를 직접 반영하지 않지만, 과거 강우 사건 데이터를 분석하여 건조기/우기 조건별 모델 보정을 수행하는 방식이 효과적이라고 설명했다. 실제 사례 연구에서도 수분 함량을 직접 반영하는 방식이 모델의 정확도를 크게 개선하지 못했다는 결과가 확인되었기 때문에, 간접적인 방법을 활용하는 것이 현실적인 접근이라고 조언했다.
- 마지막으로, 실용적 활용 및 정책적 적용과 관련하여 Dr. Aaron은 GPU 가속을 적용하여 모델 실행 속도를 200배 이상 향상했으며, 기존 40분 이상 걸리던 시뮬레이션을 몇 초 내에 완료할 수 있도록 개선했다고 설명했다. 이러한 기술을 활용하면 실시간 예측 모델 구축이 가능하며, 지역 단위로 확률적 예측을 수행할 수 있다. 또한, 한국 연구팀은 정책 결정자와 대중이 낮은 확률의 위험을 과소평가하는 문제를 제기했으며, 이에 대해 Dr. Aaron은 스위스 및 뉴질랜드에서 사회과학 연구와 기술적 분석을 결합하여 위험 커뮤니케이션을 개선하는 전략을 활용하고 있다고 설명했다. 이를 통해, 위험을 명확하게 전달하는 방법을 연구하고, 정책적으로 효과적인 산사태 예측 시스템을 구축할 필요가 있다고 조언했다.

3.3.2 시사점 및 향후 연구 방향

- ETH Zurich와의 논의를 통해, Dan3D 모델이 기존 랜덤 워크 모델(RWM)의 한계를 보완할 수 있으며, 보다 정밀한 산사태 이동 거리 및 유동성 예측이 가능하다는 점이 확인되었다. 또한, 베이지안 보정을 활용하면 모델 매개변수를 최적화하여 보다 신뢰성 높은 예측 결과를 도출할 수 있으며, LiDAR 기반 실측 데이터를 활용하면 모델의 정확도를 검증하고 보정할 수 있다는 점이 강조되었다.

- 향후 연구 방향으로서는 Dan3D 모델을 한국의 산사태 위험 평가에 적용할 가능성을 검토하고, 베이지안 모델 보정(Bayesian Calibration) 기법을 활용하여 한국 지형에 적합한 모델을 최적화하는 연구를 추진하는 것이 필요하다. 또한, LiDAR 기반 실측 데이터를 적극적으로 활용하여 모델을 검증하고 보정하는 연구를 확대해야 한다.
- 특히, 수문학적 영향을 직접 반영하는 방식보다는, 강우량 및 우기/건기 조건을 반영한 간접적 모델 보정 방식을 연구하는 것이 현실적인 접근이 될 수 있다. 이와 함께, GPU 가속 기술을 활용하여 실시간 예측이 가능한 시스템을 개발하고, 대중 및 정책 결정자를 설득할 수 있는 효과적인 위험 커뮤니케이션 전략을 마련하는 것이 중요하다.
- 이를 통해, 한국형 산사태 예측 시스템의 정밀도를 높이고, 실시간 위험 평가 및 조기 경보 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. Dr. Aaron과의 논의를 바탕으로, 향후 협력 방안을 모색하고, 한국의 연구 환경에 적합한 Dan3D 기반 산사태 예측 모델 개발을 지속적으로 추진할 필요가 있다.

〈ETH Zurich 산사태 연구팀 방문 및 자문회의〉



3.4 UN FAO (이탈리아 로마) - Thomas Hofer(Forestry Division, Leader)

3.4.1 논의 내용

- UN FAO(국제연합 식량농업기구)와의 논의는 다중 재해(Multi-Hazard) 접근법을 활용한 산사태 평가, 공공 위험 소통(Risk Communication) 및 정책적 활용 방안, 국제 협력 네트워크 구축, 그리고 생물공학(Bioengineering)과 물리공학(Structural Engineering)의 비교를 중심으로 진행되었다.
- 먼저, 다중 재해(Multi-Hazard) 접근법과 산사태 평가에 대한 논의에서 FAO는 산사태를 개별적인 자연재해로 분석하기보다는 다중 재해 프레임워크(Multi-Hazard Framework)를 활용하여 보다 포괄적인 위험 평가를 수행해야 한다고 강조했다. FAO는 파키스탄과 네팔에서 수행한 프로젝트 경험을 바탕으로, 산사태가 단독으로 발생하는 것이 아니라 산불, 지진, 홍수, 기후 변화 등과 밀접한 연관이 있으며, 각 재해 요소를 통합적으로 분석하는 것이 효과적이라는 점을 설명했다.
- FAO는 또한 산사태 위험 관리를 단순히 개별 사면에 집중하는 것이 아니라 유역(Watershed) 단위에서 수행하는 것이 필요하다고 조언했다. FAO가 수행한 연구에 따르면, 산사태는 국지적인 문제가 아니라 수문학적 과정과 토지 이용 변화에 의해 영향을 받는 광범위한 문제이므로, 개별 지역이 아니라 유역 전체를 고려한 종합적인 위험 평가 시스템이 효과적이라는 점이 강조되었다. 이에 따라, 한국에서도 기존의 픽셀 기반 예측 모델에서 벗어나, 유역 기반 접근법(Watershed-Based Approach)을 도입하는 것이 중요하다는 점이 논의되었다.
- 다음으로, 공공 위험 소통(Risk Communication) 및 정책적 활용 방안과 관련하여, FAO는 산사태 경고 시스템이 단순한 기술적 예측에 그치지 않고, 대중이 신뢰하고 실질적으로 대응할 수 있도록 적절한 커뮤니케이션 전략이 필요하다고 강조했다. 일본과 유럽에서는 산사태 경고 시스템과 대중 인식을 연결하는 다양한 정책이 시행되고 있으며, 이를 참고할 필요가 있다고 조언했다. 특히, 일본에서는 경고 시스템이 주민들이 신속하게 대피할 수 있도록 맞춤형 정보 전달 방식을 활용하며, 단순한 위험 등급 제공이 아니라 구체적인 행동 지침을 포함하는 경고 체계를 운영하고 있다. 이에 반해, 한국의 산사태 경고 시스템은 기술적인

정확도는 높지만, 대중의 행동을 유도하는 측면에서 개선이 필요하다는 점이 지적되었다.

- FAO는 또한 국제협력(International Consortium on Landslides, ICL) 네트워크 구축의 필요성을 강조했다. ICL은 산사태 연구 및 예방 정책을 수립하는 국제 기구로, 글로벌 연구기관 및 정부 기관과 협력하여 산사태 위험을 분석하고 대응책을 마련하고 있다. FAO는 한국이 ICL과 협력하여 글로벌 산사태 연구 동향을 분석하고, 국제 공동 연구에 참여하는 것이 필요하다고 제안했다. 이를 통해 한국의 산사태 예측 기술을 국제적으로 공유하고, 선진국의 최신 연구 동향을 반영하여 보다 효과적인 대응 시스템을 구축할 수 있는 기회를 마련할 수 있다는 점이 논의되었다.
- 생물공학(Bioengineering)과 물리공학(Structural Engineering)의 비교에 대한 논의도 이루어졌다. 한국 연구팀은 생물공학적 접근법이 물리적 공학 기술(예: 콘크리트 옹벽, 보강 구조물)과 비교하여 어느 정도의 효과를 가지는지에 대해 질문했고, FAO는 파키스탄과 네팔에서 수행한 사례 연구를 바탕으로 생물공학이 장기적으로 효과적인 해결책이 될 수 있음을 입증했다고 설명했다.
- FAO는 버드나무(Willow)와 지역 식생을 활용하여 사면 안정성을 강화하고, 자연적인 침식 방지 구조를 형성하는 방식이 장기적으로는 지속 가능하며 비용 효율적이라고 강조했다. 또한, 이러한 방법은 유지보수가 용이하고, 지역 사회가 직접 참여할 수 있어 실질적인 효과를 거둘 수 있다는 점을 설명했다. 다만, 물리적 공학 방법과 생물공학적 접근법은 상호 보완적인 관계이며, 특히 인프라 보호가 필요한 지역(예: 마을, 도로, 건물 인근)에서는 물리 공학적 방법이 여전히 필요하다는 점도 논의되었다.

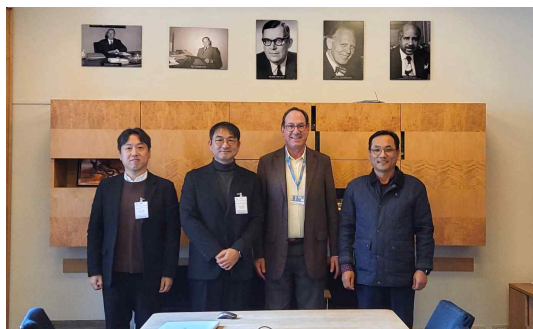
3.4.2 시사점 및 향후 연구 방향

- FAO와의 논의를 통해, 산사태를 개별적인 자연재해로 분석하기보다는 다중 재해(Multi-Hazard) 프레임워크 내에서 분석하는 것이 필요하다는 점이 확인되었다. 특히, 산불, 홍수, 지진, 기후 변화 등의 영향이 산사태 발생 위험을 증가시킬 수 있으므로, 기존 강우 중심의 산사태 예측 모델을 확장하여 다양한 환경적 요인을 함께 고려하는 연구를 수행해야 한다는 점이 강조되었다.
- 또한, 공공 커뮤니케이션 및 대중 인식을 개선하기 위한 전략이 필요하며, 일본과 유럽의 사례를 참고하여 보다 효과적인 대중 참여 방안을 마련해야 한다는 점이 확인되었다. 한국의 경우, 산사태 정보 시스템이 기술적으로는 발전했지만,

대중이 이를 이해하고 즉각적으로 대응할 수 있도록 하는 커뮤니케이션 전략이 미흡한 점이 문제로 지적되었다. 따라서, 위험 전달 방식 및 행동 가이드라인을 보다 명확하게 정리하고, 정책적 활용 방안을 마련하는 것이 중요하다.

- FAO는 생물공학(Bioengineering)이 장기적으로 지속 가능하고 경제적인 대안이 될 수 있음을 강조했으며, 한국에서도 산사태 예방을 위한 생물공학적 접근법을 시험적으로 도입하고, 정책적으로 활용할 방안을 모색할 필요가 있다는 점이 논의되었다. 그러나, 생물공학적 방법은 모든 상황에서 단독으로 적용될 수 없으며, 인프라 보호가 필요한 지역에서는 물리 공학적 방법과 병행하여 사용하는 것이 바람직하다는 점도 강조되었다.
- 마지막으로, ICL과의 협력을 강화하여 국제 연구 네트워크에 참여하는 것이 필요하다는 점이 강조되었다. 이를 통해, 글로벌 산사태 연구 동향을 분석하고, 한국의 연구 결과를 국제적으로 공유하는 기회를 확대할 수 있다. 특히, ICL과의 협력을 통해 선진 연구기관과의 공동 연구를 추진하고, 최신 산사태 예측 기법을 도입할 수 있는 기반을 마련해야 한다.
- 향후 연구 방향으로는, 산사태를 다중 재해(Multi-Hazard) 프레임워크 내에서 분석하는 방법 검토, 공공 커뮤니케이션 및 대중 인식 개선 전략 연구, ICL과의 협력 가능성 검토 및 국제 연구 네트워크 구축, 생물공학적 접근법과 물리 공학적 접근법의 병행 적용 가능성 연구
- 이를 통해, 한국의 산사태 예측 및 대응 시스템을 보다 정교하게 발전시키고, 국제적으로도 신뢰받는 연구 및 정책 모델을 구축할 필요가 있다.

〈UN FAO Forestry Division 방문 및 자문회의〉



3.5 WSL (스위스 다보스) - Dr. Christoph Graf 및 RAMMS 모델 관계자

3.5.1 논의 내용

- WSL(Wald, Schnee und Landschaft, 스위스 산림·눈·경관 연구소)는 스위스 내 산악 재해(Alpine Hazards) 연구를 주도하는 기관으로, 산사태, 토석류, 홍수, 눈사태, 암석 낙하(Rockfall), 빙하 호수 폭발(GLOF, Glacial Lake Outburst Flood) 등의 연구를 수행하고 있다. 특히, 토석류(Debris Flow)와 얕은 산사태(Shallow Landslide)는 생태계와 인프라에 심각한 영향을 미칠 수 있는 주요 자연재해로 분류되며, 그 발생 및 이동 과정은 지형(Geometry), 강수량(Precipitation), 퇴적물(Sediment), 토양 투수성(Infiltration), 식생(Vegetation) 등의 다양한 환경적 요소에 의해 영향을 받는다. 이를 보다 정밀하게 평가하기 위해 WSL은 지형 분석, 원격 탐사(Remote Sensing), 수문학적 모델링(Hydrological Modeling), 감응도 분석(Susceptibility Analysis) 등의 최신 기법을 활용하고 있다. 스위스의 접근 방식은 다양한 물리적·환경적 요인을 통합적으로 분석하여 보다 종합적인 예측 모델을 구축하는 것을 목표로 하고 있으며, 한국에서도 유사한 접근법을 도입하여 토석류 및 산사태 위험 평가의 정밀도를 높이는 것이 필요하다는 점이 강조되었다.
- RAMMS(Rapid Mass Movement Simulation) 모델은 스위스에서 개발된 대표적인 토석류 예측 및 위험 평가 모델로, 강우량, 유량, 지질 특성 등의 입력값을 기반으로 토석류 이동 거리(Runout Distance), 속도(Velocity), 침식량(Erosion), 퇴적 패턴(Deposition Patterns) 등을 시뮬레이션할 수 있다. 또한, DEM(Digital Elevation Model)을 활용하여 지형의 변화와 토석류 영향을 정밀하게 분석하는 기능을 제공한다. 그러나 WSL 연구진은 RAMMS 모델이 침식(Erosion) 과정과 연속적인 토석류 이벤트(Sequential Flow Events)를 반영하는 기능이 부족하며, 수문학적 요소(Hydrological Components)와의 통합이 어려운 한계가 있다고 설명했다. 따라서 RAMMS 모델을 한국 환경에 맞춰 보정 및 적용하는 방안을 연구할 필요가 있으며, 강우량이 많고 토양 포화도가 높은 한국의 특성을 고려하여 강우-침식-토사 이동 요소를 결합한 보다 정밀한 모델을 개발할 필요성이 제기되었다.

- 원격 탐사(Remote Sensing) 및 드론 활용과 관련하여, WSL은 드론 기반 LiDAR(Light Detection and Ranging), 다중 스펙트럼 영상(Multispectral Imaging), 레이더 및 항공 촬영 기술을 활용한 지형 분석 연구를 수행하고 있다. 이러한 기술을 활용하면, 산사태 및 토석류 발생 지역의 지형 변화를 실시간으로 모니터링하고, DEM을 정기적으로 업데이트할 수 있다. 특히, 스위스에서는 드론을 활용하여 지형 변화를 지속적으로 관측하고, 산사태 및 토석류 발생 후의 영향 분석(Event Documentation and Validation)을 수행하는 시스템을 운영 중이다. 연구진은 한국에서도 LiDAR 기반 DEM을 업데이트하는 체계를 구축하면 보다 정밀한 산사태 및 토석류 위험 평가가 가능할 것이라고 평가했다. 이를 위해, 드론을 활용한 실측 데이터 수집 방안을 마련하고, 지형 변화 감지를 위한 실시간 모니터링 체계를 도입하는 것이 중요하다는 점이 논의되었다.
 - RAMMS 모델링의 주요 기술적 과제로는 토석류의 복잡한 유변학(Rheology), 침식 및 퇴적 과정, 구조물과의 상호작용 모델링 등이 있다. WSL 연구진은 RAMMS 모델이 실무 적용에 효과적인 도구이지만, 다음과 같은 기술적 한계를 보완해야 한다고 설명했다.
 - 혼합 성분(Composite Nature) 문제: 토석류는 토사(Sediment), 물(Water), 유기물(Organic Material)이 혼합된 복합적 흐름이며, 이러한 상호작용을 보다 정밀하게 모델링할 필요가 있다.
 - 침식(Erosion) 모델의 한계: RAMMS의 기존 침식 모델은 침식 깊이(Erosion Depth), 전단 응력(Shear Stress), 침식률(Erosion Rate) 등을 반영하지만, 침식 과정의 정확한 계측이 어렵고 실측 데이터와의 차이가 발생할 수 있다.
 - 연속적 이벤트 모델링 부족(Sequential Flow Events): 토석류는 단일 사건이 아니라 여러 차례 발생하는 경우가 많으며, 기존 RAMMS 모델은 이러한 연속적 이벤트를 반영하는 기능이 부족하다.
 - WSL 연구진은 이러한 한계를 극복하기 위해 실측 데이터와 머신러닝 기반 보정을 결합한 연구를 진행하고 있으며, 머신러닝을 활용하여 물리 모델의 한계를 보완할 가능성을 검토 중이라고 설명했다.

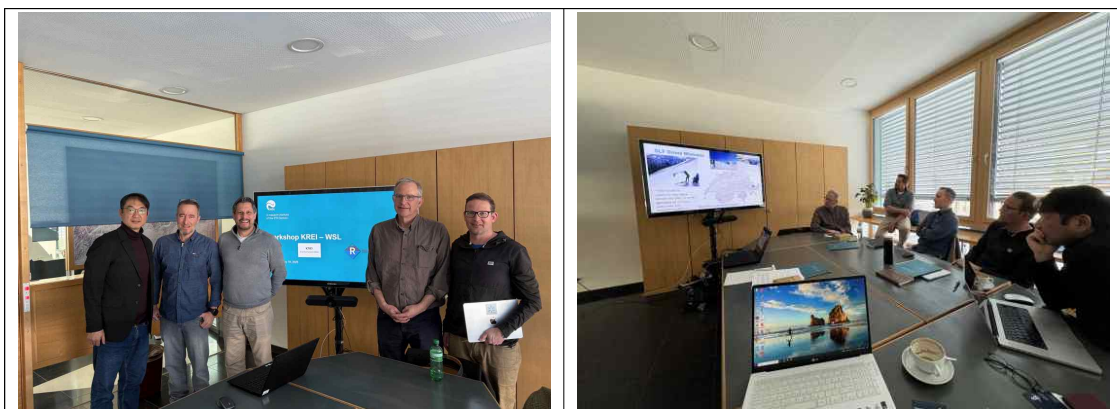
3.5.2 시사점 및 향후 연구 방향

- WSL과의 논의를 통해, RAMMS 모델이 한국의 토석류 위험 예측에 적용 가능하지만, 한국 환경에 맞춘 추가적인 보정이 필요하다는 점이 확인되었다. 특히,

강우-침식-토사 이동 요소를 통합한 보다 정밀한 모델을 개발하여 한국의 기후 및 지질 조건에 적합한 형태로 RAMMS 모델을 조정하는 연구가 필요하다는 점이 강조되었다.

- 또한, LiDAR 기반 DEM을 활용하여 보다 정교한 위험 지도를 개발하고, 드론을 활용한 실측 데이터 수집 및 DEM 갱신 방안을 마련하는 것이 필요하다는 점이 논의되었다. 한국에서도 실시간 원격 탐사 체계를 구축하면 위험 지역을 효과적으로 모니터링하고, 산사태 및 토석류 예측의 정밀도를 향상시킬 수 있을 것이라는 점이 강조되었다.
- RAMMS 모델의 한계를 보완하기 위해, 머신러닝 기반 보정 기법을 연구하고, 기존 물리 모델과의 결합을 통해 예측 정확도를 높이는 방안을 마련해야 한다는 점도 주요 연구 방향으로 제시되었다. 이를 통해, 침식 과정 및 연속적 토석류 발생을 보다 정밀하게 반영하는 고도화된 모델을 개발할 수 있을 것이다.
- 향후 연구 방향으로는, RAMMS 모델을 한국 토석류 위험 예측에 적용할 가능성 검토, RAMMS의 한계를 보완할 수 있는 강우-침식-토사 이동 요소 결합 모델 연구, LiDAR 기반 DEM을 활용한 보다 정교한 위험 지도 개발 가능성 검토, 드론을 활용한 실측 데이터 수집 및 DEM 갱신 방안 연구, RAMMS 모델의 한계를 보완하기 위해 머신러닝 기반 보정 기법 연구가 제안되었다. 이를 통해, 한국의 토석류 및 산사태 위험 평가 체계를 보다 정밀하게 개선하고, 실시간 모니터링 및 조기 경보 시스템의 신뢰도를 높이는 방향으로 연구를 지속할 필요가 있다.

〈KREI-WSL(RAMMS) 공동 워크숍 개최〉



3.6 CAI (이탈리아 밀라노) - Club Alpino Italiano (이탈리아 알파인 클럽)

3.6.1 논의 내용

- 이탈리아 알파인 클럽(CAI, Club Alpino Italiano)은 이탈리아의 산악 환경 보호와 지속 가능한 산악 개발을 촉진하는 역할을 수행하는 기관으로, 산사태 및 산악 재해 대응, 구조 활동, 지속 가능한 산악 관광 정책 수립 등을 주요 활동으로 하고 있다.
- CAI는 산악 지역의 안전을 확보하고 재난 발생 시 신속한 대응이 가능하도록 다양한 협력 사업을 운영하고 있으며, 특히 책임 있는 산악 관광과 생태 보전을 조화롭게 운영하기 위한 정책을 개발하고 있다. CAI는 산사태 예방과 지속 가능한 산악 환경 조성을 위해 자연 보호와 문화유산 보존을 고려한 지속 가능한 관광 정책을 수립하고 있으며, 탐방객들이 환경을 훼손하지 않도록 등산로 사용 지침을 제공하고 있다. 또한, 등산객과 탐방객의 안전을 고려하여 등산로를 체계적으로 관리하고 지도 제작을 수행하며, 산사태 위험이 높은 지역의 등산로는 계절별 점검을 통해 위험도를 평가하고 필요할 경우 보수 작업을 진행하고 있다.
- 이를 통해 산악 지역의 환경을 보호하면서도 관광객들이 보다 안전하게 산악 지형을 이용할 수 있도록 하고 있다. CAI는 또한 국립 산악 및 동굴 구조대(CNSAS, Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico)와 협력하여 산악 재난 발생 시 효과적인 대응 체계를 운영하고 있다. CNSAS는 CAI 소속의 공식 구조 조직으로, 산사태, 산악 사고, 동굴 사고 등 다양한 재난 발생 시 신속한 대응이 가능하도록 체계적인 훈련을 받고 있다. 구조대원들은 최신 구조 장비를 활용하여 산악 환경에서 효과적인 구조 활동을 수행하며, 드론과 원격 탐사 기술을 활용하여 구조의 효율성을 높이고 있다.
- 또한, 지방자치단체 및 정부 기관과 협력하여 산사태 대응을 위한 법적·행정적 지원 체계를 구축하고 있다. 산사태 예방을 위해 CAI는 실시간 지질학적 모니터링 시스템을 운영하며, 산악 지형의 변화와 위험 요소를 감시하고 분석하여 예방 조치를 마련하고 있다. 산사태 발생이 빈번한 지역을 지속적으로 모니터링하여 위험도를 평가하며, 센서 및 원격 탐사 기술을 활용하여 실시간으로 위험 요소를 감지한다. 또한, 기후 변화가 산사태 발생에 미치는 영향을 분석하고, 온실가스 감축 및 산림 보호를 통해 기후 변화 대응 모델을 구축하는 등 장기적인 환경 보호 정책을 시행하고 있다.

3.6.2 시사점

- CAI와의 논의를 통해 확인된 핵심 사항은 산악 지역의 관광과 재난 관리를 조화롭게 운영하는 전략이 필요하다는 점이다. 지속 가능한 산악 관광 모델을 구축하여 환경 보호와 관광 개발을 동시에 고려하는 접근이 중요하며, 등산로 안전 평가 및 사전 모니터링 시스템을 강화하여 관광객들이 보다 안전하게 산을 이용할 수 있도록 해야 한다.
- 또한, CAI의 구조 시스템을 벤치마킹하여 한국의 산림청 및 소방청과 협력하는 방안을 검토하고, 산사태 발생 후 신속한 대응이 가능하도록 구조대 운영 체계를 보완할 필요가 있다. CNSAS의 운영 모델을 분석하여 한국 내 유사 모델을 적용할 가능성을 검토하고, 드론 및 원격 탐사 기술을 활용하여 구조 활동의 속도를 높이고 위험 지역을 실시간으로 감시하는 기술을 도입하는 방안이 필요하다. 기후 변화 대응과 관련해서는 실시간 지질학적 모니터링 시스템을 구축하여 위험 예측 정밀도를 향상시키고, 산림 보호 및 복원 프로그램을 확대하여 산사태 발생을 예방하는 방향으로 정책을 보완할 필요가 있다. 특히, 기후 변화로 인해 산사태 발생 가능성이 높아지고 있는 상황에서, 이러한 예방적 접근은 매우 중요한 과제가 될 것이다. CAI의 경험을 바탕으로, 한국에서도 장기적인 기후 변화 대응 전략을 마련하고, 산림 보호 및 재해 예방 정책을 강화하는 것이 필요하다. 또한, 실시간 위험 감지 및 예방 조치를 위한 기술적·법적 지원 체계를 구축하여 보다 효과적인 산사태 예방 및 대응 시스템을 마련해야 한다. CAI와의 협력을 통해 한국의 산악 환경 관리 및 재난 대응 전략을 발전시키는 방안을 지속적으로 모색할 필요가 있다.

〈CAI 2025 교육프로그램 예시〉

CAI SCUOLA
LA MONTAGNA INSEGNA E UNISCE
EDUCA ALLA SOSTENIBILITA'

CORSI NAZIONALI 2025 CAI SCUOLA
di formazione per insegnanti

1 **CAMPANIA:** dal 28 febbraio al 4 marzo 2025
"Il Cerchio delle Sirene" - Parco Regionale dei Monti Lattari
LXX Corso Cai Scuola - Località: Massa Lubrense (NA) -

2 **LAZIO:** dal 23 al 27 aprile 2025
"Le forme dell'acqua nel Centro d'Italia" - Cascate, fiumi e laghi tra la Valnerina e il Rastino
LXXI Corso nazionale Cai Scuola - Località: Rieti

3 **PUGLIA:** dal 30 aprile al 4 maggio 2025
"Refe-Natura2000: una diversità biologica e geologica tutta da esplorare" - Parco Nazionale dell'Alta Murgia - Parco Regionale Murgia Materana
LXXII Corso Cai Scuola - Località: Gravina in Puglia (BA)

4 **SARDEGNA:** dal 24 al 28 settembre 2025
Nuova Sardegna e Pianargia: arte, natura e cultura nella Sardegna nord-occidentale - Parco nazionale dell'Asinara - Parco regionale di Porto Cervo
LXXIII Corso Cai Scuola - Località: Alghero (SS) -

5 **PIEMONTE:** dal 2 al 5 ottobre 2025
"Langhe e Roero" - Passaggi geologici, letterari e gastronomici - Colline delle Langhe, patrimonio UNESCO
LXXIV Corso Cai Scuola - Località: Alba (CN) -

6 **FRIULI VENEZIA GIULIA:** dal 16 al 19 ottobre 2025
ritorno dai grandi carnovari: la Linea, scologia, storia, ricerca e convivenza - Foresta di Tarvisio
LXXV Corso Cai Scuola - Località: Tarvisio (UD)

con il patrocinio di
Federparchi
ASVIS

Club Alpino Italiano e Scuola
promuovono l'avvicinamento
dei giovani alle "sterre alte".
www.caiscuola.cai.it

<https://caiscuola.cai.it/>



3.7. 현장 조사

3.7.1. Civita di Bagnoregio, 이탈리아

(가) 조사 개요

- Civita di Bagnoregio는 이탈리아 중부 비테르보 지방에 위치한 마을로, 로마에서 북쪽으로 약 120km 떨어져 있다. 이곳은 화산 응회암으로 형성된 고원 위에 자리 잡고 있으며, 지속적인 침식과 산사태로 인해 '죽어가는 도시(The Dying City)'로 불린다. 현재 상주 인구는 11명에 불과하지만, 관광 활성화로 인해 여름철에는 많은 방문객이 찾는 지역이다.
- 본 마을은 약 2,500년 전 에트루리아인에 의해 형성되었으며, 중세 건축물이 잘 보존된 곳이다. 2013년부터 도입된 통행료 정책을 통해 재정을 확보하여 마을 유지 및 보수를 위한 자금을 마련했으며, 2023년에는 지속 가능한 관광 모델로 인정받아 '최우수 관광 마을(Best Tourism Villages)' 상을 수상했다. 이번 조사의 목적은 Civita di Bagnoregio의 지질적 불안정성과 산사태 문제를 조사하고, 해당 지역의 보존 및 안정화 전략을 분석하여 한국의 산사태 연구 및 대응 방안 수립에 참고하는 것이다.

(나) 지질학적 특징 및 산사태 발생 원인

- Civita di Bagnoregio는 하천 침식으로 형성된 계곡 사이의 응회암 절벽 위에 위치하고 있으며, 지질학적 특징은 다음과 같다. 마을은 상층의 단단한 응회암과 하층의 상대적으로 약한 층상 응회암으로 구성되어 있으며, 기저부는 점토질-사질 퇴적물로 이루어져 있어 지반이 불안정하다. 지속적인 암석 낙하와 토석류가 발생하면서 마을의 면적이 점진적으로 축소되고 있다.
- 산사태 발생 원인은 자연적 요인과 인위적 요인이 복합적으로 작용한 결과로 분석된다. 자연적 요인으로는 지속적인 하천 작용으로 인한 하방 침식, 점토층의 풍화로 인한 지반 약화, 폭우로 인한 토사 유실 및 표면 침식이 있다. 기후 요인 또한 영향을 미치며, 강수량 증가로 인해 절벽 가장자리에 균열이 확대되면서 추가적인 붕괴 위험을 초래하고 있다. 인위적 요인으로는 과거 삼림 벌채로 인해

식생이 감소하면서 토양 유실이 심화된 점이 중요한 요소로 작용한다.

(다) 보존 및 대응 전략

- Civita di Bagnoregio의 지질적 불안정을 해결하고 역사·문화적 가치를 보존하기 위해 다양한 대응 방안이 추진되고 있다. 우선, 지속 가능한 도시 복원과 절벽 안정화를 위한 종합적 마스터 플랜이 수립되었으며, 절벽 보강 작업이 진행 중이다. 이를 위해 첨단 기술을 활용하여 절벽 일부를 보강하고 있으며, 실시간 모니터링 시스템을 구축하여 붕괴 위험을 감시하고 있다.
- 특히, 절벽 붕괴 위험을 감지하기 위해 경사계(TDR 장착), 압력계, 3D 변형률계, 균열 측정기, 기상 관측소, GPS 네트워크, 암석 소음 측정기, 지상 기반 레이더 간섭계 등의 장비를 활용한 실시간 모니터링이 이루어지고 있다. 또한, 북쪽 절벽 보강 프로젝트가 추진 중이며, 기존 구조물의 기능을 유지하면서 사면 안정성을 확보하고 향후 복원을 용이하게 하기 위한 설계가 진행되고 있다.
- 파일럿 프로젝트를 통해 수동 앵커, 미세 말뚝망, 강화된 흙, 배수 우물 등을 활용하여 지반을 안정화하고 침식을 방지하는 실험적 대응이 진행 중이다. 복원 과정에서 환경적 영향을 최소화하는 방향으로 접근하고 있으며, 지질학, 지형학, 역사, 문화유산 보존 기술, 지속 가능한 개발 전략 등을 통합한 다학제적 접근 방식이 적용되고 있다.

(라) 시사점

- Civita di Bagnoregio 사례는 한국의 산사태 대응 전략 수립에 중요한 시사점을 제공한다. 첫째, 자연적 요인뿐만 아니라 인위적 요인도 고려하여 산사태 발생 메커니즘을 종합적으로 분석해야 한다. 둘째, 실시간 모니터링 시스템을 구축하여 관찰 및 예측이 가능하도록 최신 기술을 도입해야 한다. 셋째, 피해 복구보다는 사전 예방 중심의 정책을 추진해야 하며, 지역 특성에 맞춘 대응 전략이 필요하다.
- 또한, 지역 주민의 참여를 유도하는 관리 시스템을 도입하고, 과거 산사태 발생 기록을 기반으로 위험 지역을 선제적으로 관리해야 한다. 학제 간 협력을 통해 지질학, 토목공학, 환경공학 등의 전문가들이 종합적인 해결책을 마련해야 하며, 환경을 고려한 지속 가능한 개발 방식을 통해 산사태 위험을 최소화해야 한다. 본 조사는 Civita di Bagnoregio 사례를 바탕으로 한국의 산사태 대응 전략을 발전시키는 데 기여할 것으로 기대된다.

〈Civita di Bagnoregio 사례 조사〉



(Civita di Bagnoregio 전경)



(미세 말뚝망 설치 사례)



(절개지)



(미세 말뚝망 설치 사례)

3.7.2. Brienz, 스위스: 산사태 위험에 처한 마을

(가) 조사 개요

- WSL 다보스 연구소에서 열린 KREI-WSL 워크숍에 참석한 후, WSL의 추천을 받아 스위스 Brienz 마을을 방문하였다. Brienz는 거대한 산사태 위험에 직면해 있으며, 알프스 산맥에서 약 120만 입방미터(m^3)의 암석이 무너질 가능성이 높은 지역이다.
- 이 지역은 오랜 기간에 걸쳐 서서히 이동하고 있었으나, 최근 20년간 지반 이동이 급격하게 가속화되었다. 이에 따라 당국은 2023년 5월과 11월 두 차례에 걸쳐 주민 대피 명령을 내렸으며, 주민들은 임시 거주 시설에서 생활하고 있다. 정부는 주민들이 필수 소지품을 가지고 최대 6개월 동안 대피할 수 있도록 지원하고 있으나, 개인 물품에 대한 피해 보상은 제공되지 않고 있다.

(나) 산사태 위험 및 대응 전략

- Brienz는 지질학적 요인으로 인해 지속적인 지반 이동이 발생하고 있으며, 이는 강우, 침식, 지하수 흐름 증가 등과 복합적으로 작용하고 있다. 이에 따라 지하수 압력을 줄이기 위한 배수 작업이 진행되고 있으나, 불확실성이 크기 때문에 제어된 폭파(Controlled Explosion) 등의 방법은 배제된 상태이다.
- 2023년 6월에는 약 200만 입방미터(m^3) 규모의 암석이 산에서 무너졌으며, 마을을 직접적으로 강타하지는 않았지만, 여전히 많은 암석들이 위험한 상태로 남아 있다. 당국은 이를 예의주시하며 추가적인 재해를 방지하기 위해 대비책을 마련하고 있다.

(다) 시사점

- Brienz 사례는 자연재해 대응의 한계를 보여주는 동시에, 체계적인 예방 및 대응 전략의 중요성을 강조한다. 지반 이동이 장기적으로 진행되는 경우 사전 경보 시스템을 강화하고, 지역 사회와 협력하여 재해 발생 시 효과적인 대피 시스템을 구축하는 것이 필수적이다.
- 또한, 대규모 지질 재해는 인간이 완전히 통제할 수 없는 영역이므로, 이에 대한 정책적 대응과 기술적 보완이 함께 이루어져야 한다. Brienz 사례를 통해 한국에서도 지반 이동을 포함한 대규모 산사태 위험에 대비하기 위한 연구를 강화하고, 지역 사회와 협력하여 실질적인 재난 대응 체계를 마련하는 것이 필요하다는 점이 확인되었다.

〈스위스 산사태 위험 지역(Brienz) 사례 조사〉



4. 정책적 시사점 및 연구 적용 방향

- 이번 출장에서는 스위스와 이탈리아의 산사태 및 토석류 위험 평가, 대응 전략, 연구 동향을 조사하고 이를 한국에 적용할 수 있는 방안을 도출하였다. Guzzetti 박사와의 논의를 반영하여, 산사태 위험 평가를 보다 정교하게 수행하고 정책적 적용성을 높이기 위한 연구 방향을 재정립하였다. 특히, 위험(Risk), 재해위험성(Hazard), 취약성(Susceptibility)을 명확히 구분하는 모델 설계, 픽셀 기반과 유역 기반 분석을 결합한 접근법, 데이터 해상도 및 정합성을 고려한 다중 스케일 데이터 통합 기법, 신뢰성 높은 머신러닝 예측 모델 개발 등의 필요성이 강조되었다.

4.1 머신러닝과 물리 모델 결합 연구

- CNR-IMATI 및 ETH Zurich 연구진과의 논의를 통해 머신러닝 모델이 강력한 예측 성능을 보유하고 있지만, 설명 가능성(Explainability)이 부족할 경우 정책 적용 및 의사결정 과정에서 신뢰도를 낮출 수 있음이 확인되었다. Guzzetti 박사는 머신러닝 모델의 해석 가능성 문제가 모델의 목표에 따라 중요도가 달라질 수 있다고 언급하며, 산사태 발생 원인을 이해하려면 설명 가능성이 중요하지만, 단순한 예측 성능을 최적화하려면 신경망(Neural Networks)이나 딥러닝(Deep Learning) 기법도 효과적인 선택이 될 수 있음을 강조하였다.
- 이에 따라, 한국의 산사태 예측 모델을 개선하기 위해서는 RAMMS, Dan3D, TRIGRS와 같은 물리 모델을 머신러닝 기법과 결합한 하이브리드 모델을 구축하고, 예측 결과의 신뢰성을 높이기 위한 설명 가능성 기법(SHAP 분석, 피쳐 중요도 분석 등)을 적용하는 방안이 필요하다. 또한, 전통적인 통계 모델과 머신러닝 모델을 조합하는 방식도 고려하여, 데이터 기반 패턴 인식과 물리적 해석이 함께 이루어지는 최적의 예측 체계를 개발할 필요가 있다.

4.2 RAMMS 및 Dan3D 모델 적용 가능성 검토

- WSL 연구진은 RAMMS 모델이 한국의 토석류 예측에 적용 가능하지만, 강우량이 많고 지형적 특성이 다른 한국의 환경에서는 추가적인 보정이 필요하다고 평가하였다. ETH Zurich 연구진은 Dan3D 모델이 산사태 이동 경로 및 런아웃(Runout) 예측에 유용할 가능성이 있으며, 두 모델을 조합하면 보다 정밀한 예측이 가능할 것이라고 제안하였다.
- RAMMS는 토석류 이동 경로 및 물리적 특성을 반영한 모델, Dan3D는 산사태 이동성(Mobility) 및 런아웃 예측 모델로 활용할 수 있다. 두 모델을 결합하면 보다 종합적인 물리 기반 예측 시스템을 구축할 수 있으며, 강우량 및 지반 포화도를 고려한 보정 작업이 필요하다. 이를 위해 RAMMS 모델이 수문학적 요인(Hydrological Factors)을 보다 정밀하게 반영할 수 있도록 연구를 진행할 필요가 있다.
- 또한, Guzzetti 박사는 위험 평가를 수행할 때 단순한 재해위험성(Hazard) 예측을 넘어 노출(Exposure) 및 취약성(Vulnerability) 요소를 포함하는 종합적인 위험 평가 체계를 고려할 필요가 있다고 강조하였다. 따라서, RAMMS 및 Dan3D 모델을 한국 지형 및 기후 특성에 맞춰 보정하는 것뿐만 아니라, 실제 영향을 평가할 수 있도록 정책적 차원의 위험 평가 모델을 설계할 필요가 있다.

4.3 유역 기반 접근법 도입을 통한 위험 예측 정확도 향상

- 현재 한국에서는 픽셀 기반(Point-Based) 접근법을 활용하여 특정 지역의 산사태 및 토석류 위험을 평가하고 있으나, Guzzetti 박사는 유역 기반(Watershed-Based) 접근법이 더 넓은 공간적 맥락에서 강우-토사 흐름을 분석하는 데 유용할 수 있지만, 조기경보 시스템 구축에는 한계가 있을 수 있음을 지적했다.
- 특히, 픽셀 기반 분석과 유역 기반 분석을 결합한 하이브리드 접근법이 보다 현실적인 해결책이 될 수 있으며, 벡터 데이터(유역)와 래스터 데이터(픽셀)의 강점을 최적화하는 방식으로 모델을 개발할 필요가 있다. TRIGRS와 같은 물리 모델은 픽셀 기반 데이터가 필요하기 때문에, 벡터-래스터 변환

(Vector-to-Raster Conversion)을 최적화하여 다양한 해상도의 데이터를 통합하는 방식이 효과적일 수 있다.

- 이에 따라, 한국형 산사태 및 토석류 예측 모델을 구축하기 위해 유역 기반 분석을 활용한 RAMMS 및 머신러닝 기반 모델을 통합하는 새로운 접근법을 연구할 필요가 있다.

4.4 원격 탐사(Remote Sensing) 및 드론 기술 활용 확대

- WSL은 드론을 활용하여 DEM(Digital Elevation Model) 업데이트 및 토석류 이동 감지 연구를 진행하고 있으며, LiDAR, 열화상(Thermal Imaging), 다중 스펙트럼 센서를 활용한 실측 데이터 수집이 이루어지고 있다. Guzzetti 박사는 이러한 원격 탐사 기술이 한국에서도 필수적으로 적용되어야 하며, 산사태 및 토석류 예측 모델의 정밀도를 높이기 위해 실시간 데이터 수집 및 통합 시스템을 구축하는 것이 중요하다고 강조했다.
- 한국에서도 LiDAR 기반 드론 데이터 수집을 통해 DEM을 정밀하게 갱신하고, RAMMS 및 Dan3D 모델의 예측 정확도를 향상시킬 필요가 있다. 이를 위해 드론을 활용한 실시간 토석류 위험 감지 시스템 구축 및 기존 토양 및 강우 데이터를 결합하여 예측 모델을 고도화하는 연구가 필요하다. 또한, 산사태 발생 후 신속한 구조를 위한 실시간 드론 모니터링 시스템 구축을 검토해야 한다.

4.5 다부처 협력 및 민간 참여 확대

- 스위스에서는 민간 엔지니어링 회사들이 RAMMS 모델을 활용하여 실측 데이터를 수집하고 연구에 참여하고 있다. 반면, 한국에서는 현재 공공 부문(정부)이 대부분의 데이터를 수집 및 연구를 주도하고 있으며, 이에 따라 민간 부문과 협력하여 연구 효율성을 높일 필요가 있다.
- RAMMS와 같은 연구 모델을 민간 부문에서 활용할 수 있도록 정책적 지원을 마련하고, 공공-민간 협력 체계를 구축하여 원격 탐사 및 실시간 위험 분석 기술 개발을 지원하는 것이 중요하다. 특히, 민관 협력 모델을 구축하여 위험 데이터 수집 및 연구에 대한 참여를 확대하는 방안을 검토할 필요가 있다.

4.6. 연구 적용 방향 정리

- 머신러닝과 물리 모델의 결합 연구
 - 머신러닝 기반 모델과 RAMMS/Dan3D 같은 물리 모델을 결합한 예측 기법 개발
 - 머신러닝 모델의 설명 가능성을 향상시키기 위한 기법 연구 (SHAP 분석, 피쳐 중요도 분석)
 - RAMMS, Dan3D와 같은 기존 물리 모델과 머신러닝을 접목하여 하이브리드 모델 개발 검토
- RAMMS 및 Dan3D 모델의 한국 적용 가능성 연구
 - 한국의 지형 및 기후 특성에 맞춰 보정 및 적용 연구
 - 두 모델을 결합하여 보다 정밀한 물리 기반 예측 시스템 구축 가능성 분석
 - RAMMS 모델이 수문학적 요인을 보다 정밀하게 반영할 수 있도록 연구 및 보정 진행
- 유역 기반 접근법 도입 및 실용화 연구
 - 벡터 기반과 래스터 기반 접근법을 최적화하여 데이터 정합성 유지
 - 기존 확률적 모델과 물리 모델을 결합하여 유역 기반 산사태 위험 예측 시스템 구축
- 원격 탐사 및 드론 기술 적용 확대
 - 드론을 활용한 DEM 갱신 및 실시간 토석류 위험 감지 시스템 구축
 - 실시간 드론 모니터링 시스템 구축 검토
- 민관 협력 모델 구축 및 연구 효율성 증대
 - 공공-민간 협력 체계를 구축하여 연구 효율성 향상

5. 결론 및 향후 연구 방향

- 이번 출장에서는 스위스와 이탈리아의 산사태 및 토석류 위험 예측, 예방, 대응 전략을 분석하고, 한국에 적용할 수 있는 기술 및 정책 방향을 도출하였다. 연구 기관과의 협력을 통해 유역 기반(Watershed-Based) 예측 모델, 머신러닝과

물리 모델 결합, 원격 탐사 및 드론 활용, 다중 재해(Multi-Hazard) 접근법, 공공 위험 소통 및 정책적 고려 사항 등의 핵심 연구 방향을 확인하였다. 특히, 산사태 위험(Risk), 재해위험성(Hazard), 취약성(Susceptibility)의 개념을 명확히 구분하고, 이를 정책 결정 과정에 반영하는 것이 중요함을 Guzzetti 박사와의 면담을 통해 확인하였다.

5.1 연구 질문에 대한 답변

- 연구 질문 1: 산사태 위험을 정량적으로 평가하는 데 가장 중요한 지형 및 환경 변수는 무엇이며, 이를 모델링하기 위한 최적의 데이터 통합 방법은 무엇인가?
 - 산사태 위험을 평가하는 데 있어 경사도, 고도, 지질 특성, 강수량, 지반 포화도, 침투율, 식생 및 토양 특성이 핵심 변수로 작용함이 확인되었다. 스위스 WSL, ETH Zurich 및 이탈리아 CNR-IMATI 연구소에서는 이러한 변수를 결합하여 RAMMS, Dan3D, TRIGRS 등의 물리 모델을 활용하고 있었으며, 머신러닝 기반 모델과 통합할 경우 예측 정확도를 더욱 향상시킬 가능성이 있음이 논의되었다.
 - RAMMS 모델은 토석류 이동 경로 및 영향을 분석하는 데 효과적이며, Dan3D 모델은 산사태 이동성(Mobility) 및 런아웃(Runout) 예측에 강점이 있음이 확인되었다. 그러나 한국의 강수량이 높은 환경에서는 추가적인 보정이 필요하며, 기존 확률적 모델과 물리 모델을 결합하는 연구가 필요하다. 이에 따라, RAMMS와 Dan3D를 한국 지형 및 기후 조건에 맞춰 보정하고, 유역 기반 분석을 적용하여 보다 정밀한 예측 시스템을 구축하는 방안이 제안되었다.
- 연구 질문 2: 데이터를 활용한 시뮬레이션 기술을 국내 산림 재난 관리 체계에 효과적으로 통합하기 위한 기술적·정책적 고려사항은 무엇인가?
 - 스위스 및 이탈리아에서는 LiDAR 기반 원격 탐사(Remote Sensing) 및 드론 기술을 활용하여 DEM(Digital Elevation Model)을 지속적으로 갱신하고 있었으며, 이를 통해 RAMMS 및 Dan3D 모델의 예측 정확도를 향상시키고 있었다. 특히, 고해상도 LiDAR 데이터, 열화상(Thermal Imaging), 다중 스펙트럼 센서를 활용한 실측 데이터 수집이 이루어지고 있으며, 이를 통해 산사태 및 토석류 위험 감지를 실시간으로 수행하고 있었다.

- 따라서, 한국에서도 드론을 활용한 DEM 갱신 및 실시간 토석류 위험 감지 시스템 구축이 필요하며, 기존 토양 및 강우 데이터를 결합하여 예측 모델을 고도화하는 연구가 요구된다. 또한, 산사태 발생 후 신속한 대응을 위해 실시간 드론 모니터링 시스템을 구축하고, 이를 산림청·기상청·소방청과 연계하는 정책적 지원이 필요하다.
- 연구 질문 3: 수치 모델링 기반 예측 기술의 국내 적용 가능성과 실제적 장점은 무엇인가?
 - RAMMS 및 Dan3D 모델은 한국의 산사태 및 토석류 예측에 적용 가능하지만, 강우량이 많고 지반 포화도가 높은 한국 환경에 맞춰 보정이 필요한 것으로 확인되었다. 또한, 스위스 및 이탈리아에서는 기존의 픽셀 기반(Point-Based) 분석 방식에서 벗어나 유역 기반(Watershed-Based) 접근법을 활용하여 보다 정밀한 위험 예측을 수행하고 있었다.
 - 유역 기반 접근법을 도입하면 강우, 지형, 수문학적 흐름의 상호작용을 보다 정밀하게 반영할 수 있어 예측 정확도가 향상되며, 기존 확률적 예측 모델과 결합하면 보다 실용적인 위험 예측 시스템 구축이 가능하다. 이에 따라, RAMMS 및 Dan3D 모델과 유역 기반 분석을 결합하여 한국형 산사태 예측 시스템을 구축하는 방안을 연구할 필요가 있다.
- 연구 질문 4: 지역 커뮤니티와 협력하여 지속 가능한 산림 및 산악 재난 관리 방안
 - 이탈리아 CAI(Club Alpino Italiano)에서는 책임 있는 관광(Promoting Responsible Tourism), 등산로 관리(Trail Mapping & Maintenance), 지역 커뮤니티 지원(Supporting Local Communities) 등의 정책을 운영하고 있었다. 특히, 국립 산악 및 동굴 구조대(CNSAS, Corpo Nazionale Soccorso Alpino e Speleologico)를 운영하여 산악 지역의 재난 대응 역량을 강화하고 있었으며, 실시간 지질학적 모니터링 시스템을 구축하여 산사태 위험을 감시하고 있었다.
 - 한국에서도 산악 지역에서 지속 가능한 관광 모델을 도입하고, 지역 커뮤니티가 재난 관리에 참여할 수 있는 체계를 구축하는 것이 필요하다. 또한, 산림청 및 소방청과 협력하여 신속한 구조 체계를 구축하고, 드론 및 원격 탐사 기술을 활용한 실시간 감시 시스템을 운영하는 방안이 필요하다.

- 연구 질문 5: 국제 기구의 산림 재난 관리 전략 중 국내 적용 가능성
 - FAO(국제연합 식량농업기구)는 산사태를 단독 재해로 평가하는 것이 아니라, 홍수, 산불, 기후 변화 등과 연계된 다중 재해(Multi-Hazard) 프레임워크를 활용하는 접근법을 강조하고 있었다. 이는 산림 재해가 단독으로 발생하는 것이 아니라, 다른 환경적 요인들과 상호작용하며 발생한다는 점에서 중요한 시사점을 제공한다.
 - 따라서, 한국에서도 기존 강우 중심의 산사태 예측 모델에서 벗어나 다양한 환경적 요인을 함께 고려하는 연구를 수행해야 하며, 국제 기구 및 연구기관과의 협력을 통해 최신 연구 동향을 반영한 정책을 개발할 필요가 있다. 특히, FAO 및 ICL(국제 산사태 컨소시엄)과 협력하여 글로벌 연구 네트워크를 구축하고, 공동 연구를 추진하는 것이 중요하다.

5.2 결론 및 향후 연구 방향

- 본 출장을 통해 한국의 산사태 및 토석류 위험 예측 시스템을 개선하는 데 필요한 핵심 연구 방향을 도출할 수 있었다. 특히, RAMMS 및 Dan3D 모델을 활용한 물리 기반 예측 시스템 도입 가능성을 검토하고, 머신러닝과 물리 모델을 결합하는 연구 필요성을 확인하였다. 기존의 픽셀 기반 접근법에서 벗어나 유역 기반 접근법을 적용하면 산사태 위험 예측의 정밀도를 높일 수 있으며, 드론과 원격 탐사 기술을 활용한 실시간 데이터 수집이 중요하다는 점도 강조되었다.
- 향후 연구 계획으로는 RAMMS 및 Dan3D 모델을 활용한 한국형 산사태 예측 시스템 구축, 머신러닝과 물리 모델을 결합한 하이브리드 모델 개발, 드론 및 원격 탐사 기술을 활용한 실시간 위험 감지 시스템 구축등이 포함된다. 또한, 공공-민간 협력을 확대하여 연구 효율성을 높이고, 다부처 협력을 강화하여 보다 정밀한 산사태 위험 분석 및 대응 체계를 마련하는 것이 필요하다.
- 본 출장에서 확보한 연구 결과를 바탕으로, 향후 국내 산림 재난 관리 및 산사태 대응 체계를 보다 정교하게 발전시키기 위한 연구를 지속적으로 추진할 예정이다.