

국외출장노트

(미국)

부서 : 인프라기술연구실

자료제공 : 정연중

작성일 : 2026년 4월 30일

게시요망일 : 2026년 5월 10일

제목: 미국 서부 극한 기후 노출 기반시설의 연쇄적 성능 저하 조사

1. 출장목적

- **공용 중인 기반시설의 연쇄적 기후 열화(Cascading Degradation) 메커니즘 육안 실증**
 - 세계 최고 수준의 기후 가혹도를 지닌 미 서부 4개 주를 횡단하며, 서울시가 기존에 경험하지 못한 미증유의 기후 위기가 실제 운행 중인 인프라의 물리적 성능을 저하시키는 연쇄적 열화 메커니즘을 현장 육안으로 검증함.
 - 기상 이변이라는 1차적 기후 요인(Primary Climate Factor)이 수계 고갈 및 지반 수축이라는 2차적 환경 변위(Secondary Environmental Displacement)를 유발하고, 궁극적으로 공용 인프라의 구조적 손상 및 사용성 상실이라는 3차적 한계 상태(Tertiary Limit State)로 전이되는 과정을 거시적으로 실증함.
 - 극한 기후 스트레스 누적과 일상적인 운행 하중(Traffic Load)의 결합이 야기하는 주행 안전성 저하(타이어 파손 등) 리스크를 현장에서 규명함.
- **사후 육안 점검의 한계 극복을 위한 선진 스마트 모니터링 기술 벤치마킹**
 - 구조적 손상이 가시화된 이후에 대응하는 육안조사의 한계를 보완하기 위해, 네바다 대학교(UNR) 및 사막연구소(DRI)를 방문하여 비개입형(Non-intrusive) 스마트 센싱 및 예측 알고리즘 기술을 조사함.
 - 기후 스트레스 예측 데이터를 주정부 교통자산관리계획(TAMP) 예산 배분 시스템과 연계하는 데이터 거버넌스 체계를 확인함.

2. 출장내용

2.1 수문학적 연쇄 재난: 기후 변화(1차)에서 지반-구조물 한계 상태(3차)로의 전이 실사

- 1차 기후 요인에 따른 2차 수문-지반 환경 변위 실태 확인
 - 상류 록키산맥의 적설량 급감(1차 요인)이 유타·애리조나 광역 수계(Kayenta, Cameron 등)의 기저유출 단절을 유발하여, 대형 하천 유로가 완전 건천(Dry Wash) 및 하상 지반 건조 수축(2차 변위) 단계로 진입하였음을 육안으로 확인함.
- 2차 환경 변위에 따른 3차 구조적 손상 및 세굴 취약성 점검
 - 건천화 및 하상 지반 수축(2차)의 결과로, 운행 중인 간선도로(US-163, US-89) 횡단 교량의 교대(Abutment)와 확대기초(Spread Footing)가 대기 중으로 노출되는 3차 구조적 취약성이 발생함.
 - 구조물과 토양 간 이격(Separation Gap)으로 전단 지지력이 저하된 한계 상태에서 국지성 호우(Flash Flood) 발생 시, 노출 기초가 즉각적인 심층 세굴(Scour) 파괴에 직면할 위험성을 가시적으로 실증함.

2.2 고온 및 극단적 기온 진폭에 따른 공용 도로 복합 파손 실사

- 1차 기후 요인 → 2차 재료 열화 → 3차 포장 파손 및 안전 리스크 실증
 - 애리조나 고산 고원지대의 극단적 일교차 및 폭염(1차 요인)이 아스팔트 바인더의 화학적 취성화(Embrittlement)와 야간 서리 빼기(Frost Wedging) 작용(2차 열화)을 유발함.
 - 이러한 재료적 열화가 일상적 운행 하중과 결합하여 고밀도 군집형 포트홀(Pothole Clustering) 및 거대 블록 균열(3차 손상)을 발생시킴.
 - 물류 대동맥인 I-40 고속도로 갓길 전역에 방치된 다수의 파열된 타이어(Blowout) 잔해들을 직접 확인하며, 3차 손상이 공용 인프라의 주행 안전성을 직접적으로 저해하는 현상을 체감함.
 - 통행 하중이 사실상 배제된 노후 보존 도로(Route 66)에서도 기후 요인 단독으로 포장 기능이 전면 소실됨을 육안으로 입증함.

2.3 사후 육안 점검의 한계 극복을 위한 UNR/DRI 선진 기술 협의

- 연쇄적 열화 예측을 위한 데이터 기반 예방적 자산관리 거버넌스 벤치마킹
 - 현장 육안조사만으로는 1차 기후 요인이 2차, 3차 손상으로 전이되는 내부 열

- 화 및 기능 상실 임계점을 선제적으로 파악하기 어렵다는 한계를 인지함.
- 이를 보완하기 위한 비개입형 광섬유/진동 센싱 체계 및 AI 기반 예측 결과를 주정부의 TAMP 예산 편성에 연동하는 선진 거버넌스 모델을 협의함.

3. 주요 시사점

- **[거버넌스] 연쇄적 성능 저하를 방어하는 지형 맞춤형 '투 트랙(Two-Track)' 자산관리**
 - (산지/지류 권역) 1차 국지성 호우가 2차 표면유출을 거쳐 3차 구조물 손상으로 이어지는 전이 과정을 차단하기 위해, 도림천 등 소하천 횡단 공용 교량의 '세굴 특별 취약성' 가중치를 대폭 상향하고 방어공 선제 보강 지침을 마련해야 함.
 - (분류/한강 권역) 1차 가뭄이 2차 지반 이완을 거쳐 3차 기초 노출로 전이되는 현상을 감시하기 위해, '노출 기초 탄산화 깊이 측정'을 성능평가 지표(SPI)에 의무 산입할 것을 제언함.
- **[평가 체계] 육안조사 한계 보완을 위한 복합 기후 피로 지수(CCFI) 신설**
 - 서울시가 본격적으로 직면할 기후 인자의 연쇄적 열화에 대응하기 위해, 1차 기후 변수(일교차)와 2차 재료 변수(산화도)를 결합한 평가지표 신설이 필요함.
 - 이를 통해 북악스카이웨이 등 고지대 우회도로의 해빙기 3차 파손(포트홀 집중 발생)을 예측하고 선제 보수 예산을 투입하는 매뉴얼 고도화가 요구됨.
- **[자원 전략] '최소 사용성 유지 한계(MSL)' 적용 및 자산관리 포트폴리오 재편**
 - 공용 인프라의 연쇄적 기후 성능 저하 실증 결과를 바탕으로, 우회로가 충분히 확보된 하위 시설물에 대해 막대한 전면 개량 예산 투입을 억제하고 붕괴 방지만을 목적으로 하는 최저 관리 등급(MSL, Minimum Serviceability Limit) 신설을 제안함.
 - 절감된 경상 유지보수 예산(OPEX)을 1종 핵심 공용 시설물(장대교량, 대심도 터널)의 육안 점검 한계를 극복할 스마트 센싱망 구축(CAPEX) 재원으로 전용하는 예산 재구조화 전략을 도출함.

[주요 사진]



Colorado School of Mines 방문



University of Nevada 방문



Desert Research Institute 방문

자료제공 및 문의처 :
인프라기술연구실 정연중 연구위원(2144-2913)