

온도감응형 노면표시를 적용한 결빙사고 사전 예측 시스템

이병덕 | (주)제일트레이딩 연구소장
권기창 | (주)제일트레이딩 대표이사
공유석 | 한국도로공사 환경연구실 차장

1. 서론

최근 이상기후에 따른 환경변화로 도로 살얼음 발생횟수가 증가하면서 2024년 11월 행정안전부에서는 민·관 합동 '겨울철 도로 결빙 교통사고 재난원인조사반'을 구성하고, '결빙 교통사고 발생과 피해 확대 원인을 분석하고, 예방 및 대응역량 강화로 인명피해 최소화'를 목표로 4대 분야 14개 중점 추진과제를 확정했다. 한국도로교통공단 교통사고 분석시스템(2023년)에 따르면 근래 5년간 평균('19~'23) 결

빙 교통사고(3,944건)로 인명 피해(사망 95명, 부상 6,589명), 또한 삼성교통안전문화연구소 보고서(2023년)에 의하면 결빙 교통사고 1건당 평균 재산 피해액은 432만원으로 일반 교통사고 242만원 대비 1.8배 높은 수준으로 지속 발생한다고 조사되었다. 특히, 결빙 교통사고(노면상태가 '서리/결빙'인 교통사고)로 인한 교통사고 100건당 사망자수로 나타내는 치사율(2.4)은 결빙 외 교통사고(1.4)에 비해 약 1.7배 높은 것으로 나타났다[표 1].

[표 1] 국내 노면상태별 교통사고 발생현황

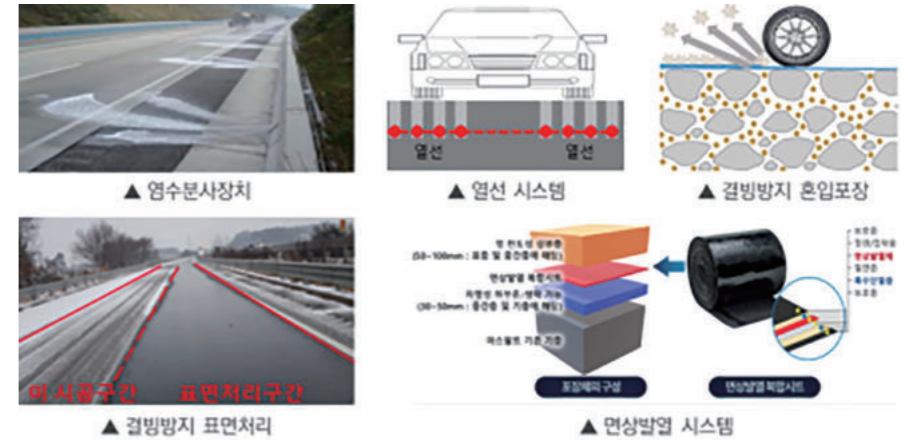
구분		'19	'20	'21	'22	'23	평균
결빙	사고(건)	478	527	1,204	1,042	693	788.8
	사망(명)	24	14	22	23	12	19
	치사율	5.0	2.7	1.8	2.2	1.7	2.4
결빙 외	사고(건)	229,122	209,127	201,926	195,794	197,603	206,714
	사망(명)	3,325	3,067	2,894	2,712	2,539	2,907
	치사율	1.5	1.5	1.4	1.4	1.3	1.4

이러한 결빙취약구간의 안전을 확보하기 위해 [표 2]와 같이 다양한 공법(도로열선, 염수분사장치, 표면처리, 융설시스템

등)들을 적용하고 있으나, 유지관리 및 경제성 등의 한계로 인해 제한적으로 적용되고 있는 실정이다.

[표 2] 결빙방지공법 종류 및 특징

공법	특징
염수분사장치	염수살포 시설(설비, 통신 등)의 유지관리가 필요하며, 염화물 영향에 따른 구조물의 손상 및 노후화 발생
열선 시스템	전기열선 매립에 따른 포장손상 가능성이 있으며, 전기로 발생으로 유지관리비 소요
결빙방지 혼입포장	아스팔트 포장(SMA)내에 혼입하여 생산 시공하며, 공용기간에 따른 결빙방지성능이 저하(마모)됨
결빙방지 표면처리	시공이 간단하며 모든 포장형식에 적용 가능하지만, 공용기간에 따른 결빙방지성능 저하(마모) 발생
면상발열 시스템	아스팔트 포장구간에 적용하며, 전기로 발생으로 유지관리비 소요



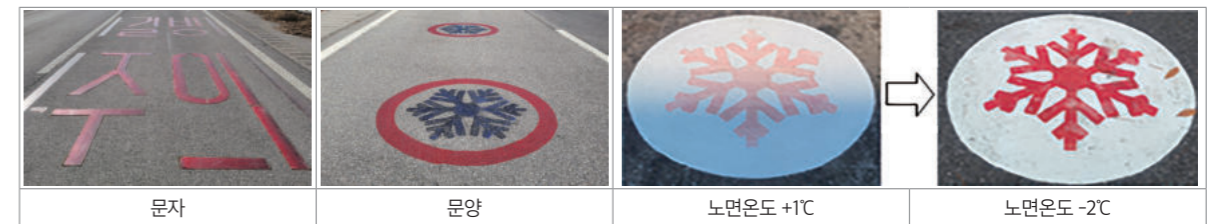
2. 시스템 추진 현황 및 향후 계획

2.1 시스템 개요

본 고에서는 외부의 물리적 또는 화학적 자극에 스스로 반응하여 화학적 성질 및 물리적 형상을 가역적 혹은 비가역적으로 제어할 수 있는 자극 반응 응용 소재 기술인 시온도

료를 이용하여 고속도로 전역 곳곳에 설치되어 있는 관리용 CCTV를 통해 모니터링하고 AI 기술을 활용한 영상분석으로 고속도로 CCTV 관리자 및 운전자에게 노면의 결빙 예측 정보를 제공하기 위한 시스템 개발 현황을 소개하고자 한다.

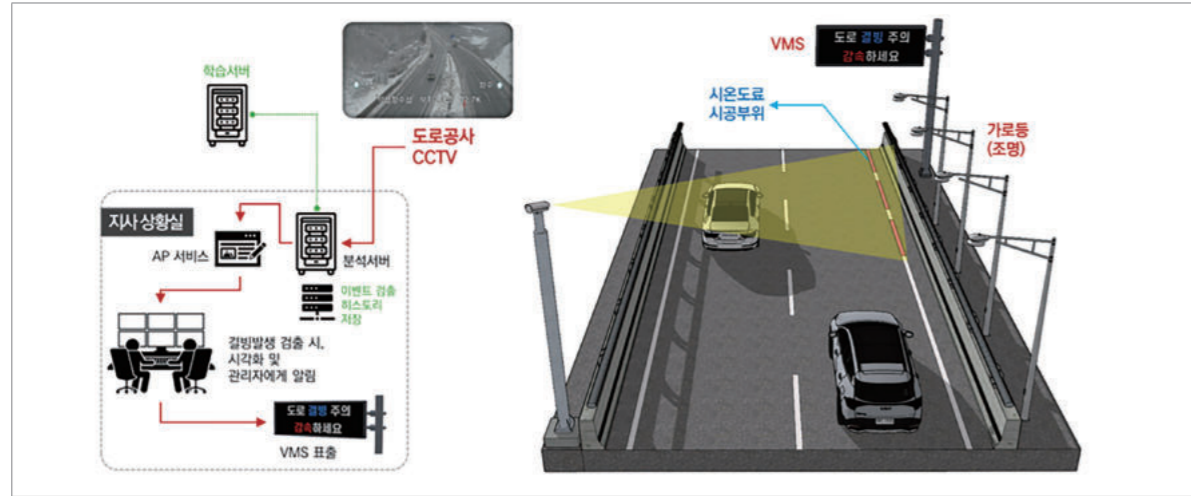
[그림 1] 온도감응형 도로의 노면표시 적용 형태



‘온도감응형 노면표시를 적용한 결빙사고 사전 예측 시스템 구축’은 [그림 2]와 같고, 노면의 온도가 특정 온도 이하로 내려갔을 경우 색상이 변하는 시온도료는 갓길부 차선

에 시공하여 주행 차량의 휠 패스로 인한 내구성 저하를 방지하고자 하였다.

[그림 2] 시스템 개요도



학습서버는 시온도료 색상변화 이벤트 발생 시, 이를 살얼음 예상 상황으로 판정하기 위한 기준을 수립하는 목적이며, 이를 위해서는 AI 솔루션의 학습을 위한 동절기 CCTV 영상 데이터가 필요하다.

CCTV, 가로등, VMS와 같은 기존 고속도로 시설물을 활용하며, CCTV가 촬영한 시온도료 시공부위의 색상 변화에 대해 학습 결과가 장착된 분석서버가 살얼음 예상 상황으로 판정시, 상황실 내 관리자가 이를 인지하고 VMS에 안내하는 프로세스로 구성하였다.

2.2 추진 현황

본 시스템의 개발 및 적용성 검토를 위해 한국도로공사 전북본부 진안지사와의 협업으로 진안지사 관내에 테스트베드를 구축하여 시온도료를 시공하고 지사에 분석서버 및

AI 솔루션을 설치하였다. 테스트베드의 CCTV 영상을 통해 시온도료의 온도감응에 따른 변화에 대해 AI 솔루션의 학습 및 검증을 실시하였다.

① 테스트베드 선정

본 ‘온도감응형 노면표시를 적용한 결빙사고 사전 예측 시스템’ 구축을 위한 테스트베드는 [표 3]과 같이 진안지사에서 제공한 관내 11개소 설치 예상지점 중, 다음과 같은 조건에 따라 검토하여 선정하였다.

- 1) 시온도료 시공 이후 안정적으로 시공위치를 포착할 수 있는 화각 확보 여부
- 2) 육안상 CCTV 화질 우수성
- 3) CCTV 인근 VMS 설치 여부
- 4) CCTV 인근 가로등 설치 여부

[표 3] 온도감응형 노면표지 설치 구간 검토 및 선정

노선명	방향	VMS 이점(km)	CCTV 명칭 /이점	가로등 설치 여부	가로등 야간 운영	CCTV 화질 (육안)
순천완주선 (5개소)	완주	96.6	용암4터널 / 98.4k	0	0	중
	순천	88	중금교 / 87k	0	0	상
	순천	96.6	슬치터널 / 96.5k	0	0	중
	순천	102.2	죽림3터널 / 101.8k	0	0	하
	순천	116.2	덕진1터널 / 111.5k	0	0	하
완주장수선 (6개소)	익산	19.6	소양천교 / 18k	0	0	상
	익산	46.2	마이산 졸음쉼터 (장수) / 35k 마이산 졸음쉼터 (익산) / 35k	0	0	중
	장수	25.3	곰티터널 / 27k	0	0	상
	장수	29.8	부귀2터널 / 32.7k	X	X	하
	장수	39.4	방곡터널 / 50.3k	X	X	중
	장수	57.1	장수 / 58k	0	0	중

- 슬치터널(96.5k) : 사이트 내 터널관리사무소가 위치하여 시공 시 안전 및 상시전원 확보 용이
- 곰티터널(27k) : CCTV 화질 최상급이나 교량구간 대한 안정 위험성이 있으며, 상시전원 확보 어려움

② 시온도료 시공

시온도료는 CCTV 영상 내에서 가장 잘 보일 수 있는 위치에 시공하는 것이 영상분석에 유리하므로 [그림 4]와 같이 현장에서 CCTV를 확인하면서 AI 솔루션이 검지할 수 있는 위치를 선정하였다.

[그림 4] 시온도료 시공위치 선정 절차



이어서 테스트베드로 선정된 구간 내 시공위치에 차선도 색 장비를 이용하여 [그림 5]와 같이 ‘위치 선정(CCTV 고려) ⇒ 베이스 도포 ⇒ 온도감응형 도로 도포’순서로 시공하였다.

[그림 5] 시온도료 시공 과정



③ 조명 및 계측 시스템 구축

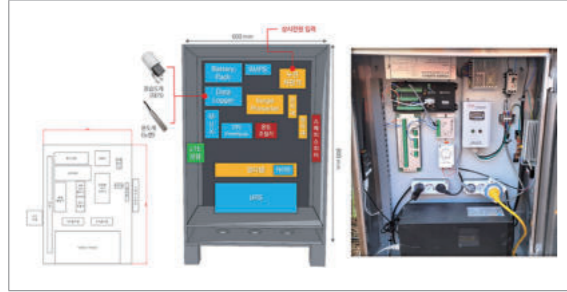
가로등이 없는 구간에서 CCTV 영상의 광량 확보를 위한 조명과 온도감응형 도로 색상변화 시 노면온도 및 대기 온습도 측정을 위한 계측시스템을 설계하였으며, 현장에 설치 후

[그림 3] 테스트베드 선정 위치



데이터 수집, 데이터 전송, 조명 전원 공급, 조명 구동 타임 설정(야간) 등을 위한 합체를 다음과 같이 구성하였다.

[그림 6] 조명 및 계측 시스템 합체 설계 및 구성 결과



계측 데이터는 원격으로 수집이 가능하도록 설정하여 매일 자동으로 24시간 측정 데이터를 원격지에서 저장하도록 구성하였다.

[그림 7] 계측데이터 취득 프로세스 및 설치 전경



전술한 내용과 같이 구축된 조명 및 계측 시스템은 [그림 8]과 같이 안전 확보 및 상시전원 공급이 가능한 슬리터널 구간에 설치하였다. 조명, 대기 온습도계, 포장면 온도계는 시온도로 시공 위치를 고려하여 설치하고 테스트를 마쳤다.

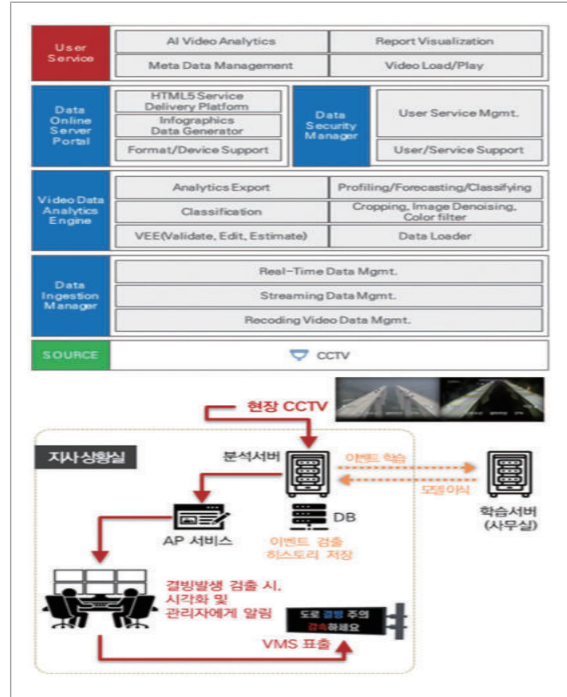
[그림 8] 조명 및 계측 시스템 현장 설치



④ AI 기반 CCTV 영상분석 체계 구축

AI 영상 분석은 현장 CCTV로부터 영상을 취득하여 분석, 결과 도출 등 일련의 과정을 수행하도록 체계를 구축하였으며, 구성 내용은 [그림 9]와 같다.

[그림 9] 영상분석 아키텍처(좌) 및 영상분석 체계 구성도(우)



분석서버는 현장 상황실에 설치되어 CCTV 영상 내 이벤트 검출 및 결과 알림을 수행하며, 학습서버는 분석서버에서 취득되는 영상을 통해 이벤트 여부를 학습하고 학습 결과를 다시 분석서버에 모델 형태로 이식한다.

분석서버는 [그림 10]과 같이 진안지사 서버실에 설치하고, CCTV 영상으로 학습서버가 알고리즘 정립 후, 분석서버에 모델을 이식하는 순서로 진행하였다.

[그림 10] 분석서버 설치 및 CCTV 영상 조회 테스트



⑤ AI 기반 CCTV 영상분석

1) 영상분석 방향 설정

AI 기반 CCTV 영상분석을 위해 영상분석 방향을 [표 4]와 같은 확인사항에 따라 온도감응형 노면표시의 색상변화 구간 식별 및 외부 환경에 대한 변화 정도를 확인할 수 있도록 설정하였다.

[표 4] 영상분석 방향 설정을 위한 확인사항

필수 확인사항	추가 확인사항
- CCTV View에서 소색과 발색 상태에서 도로 변화 식별 여부	- 노이즈(비, 눈, 안개 등)에 대한 견고성 테스트
- 주간 흐림 상태와 햇볕이 내리 쬐는 상태에서의 소색 및 발색 상태에서의 도로 색상 확인	- 계측데이터, 날씨 등 환경 요인 확인
- 야간 일정한 조명이 보장된 상태에서의 소색 및 발색 상태에서의 도로 색상 확인	- 실시간 처리여부 테스트 (솔루션 최종 구현 후)

2) AI 기반 결빙 예측 알고리즘 완성
시온도로 시공 후, CCTV 영상에 대해 '발색(Red) ↔ 소색(Yellow)'에 대한 AI 솔루션 학습을 진행하여 알고리즘을 완성하고, 이를 다시 적용하여 학습 결과에 대한 검증을 수행하였다.

[그림 11] AI 학습 알고리즘 검증



3) AI 학습을 통한 기능 구현

그 다음은 구축한 알고리즘을 AI 솔루션의 기능으로 구현하는 단계로, 분석 영역의 설정, 다수의 현장 관리 기능을 구현하였다.

[그림 12] AI 솔루션 기능 구현



CCTV 영상에서 시온도로 시공 부위를 분석 영역으로 설정하고, 분석 영역에서의 '발색(Red) ↔ 소색(Yellow)' 여부 판단 과정에서 이벤트(발색) 발생 시, 팝업/소리/색상으로 알리도록 설정하였다.

[그림 13] 이벤트 발생 시, 관리자에게 알리기 위한 기능



또한, 관리자가 실시간으로 현장을 감시하기 위해 다수의 CCTV 모니터링 및 즐겨찾기, 이벤트 감지 현황, 이벤트에 대한 통계, 사용자 관리 등의 기능을 구현하였다.

[그림 14] 실시간 CCTV 설정(좌)과 이벤트 발생 현황(우) 메뉴



㉞ 시스템의 현장 적용 및 검증

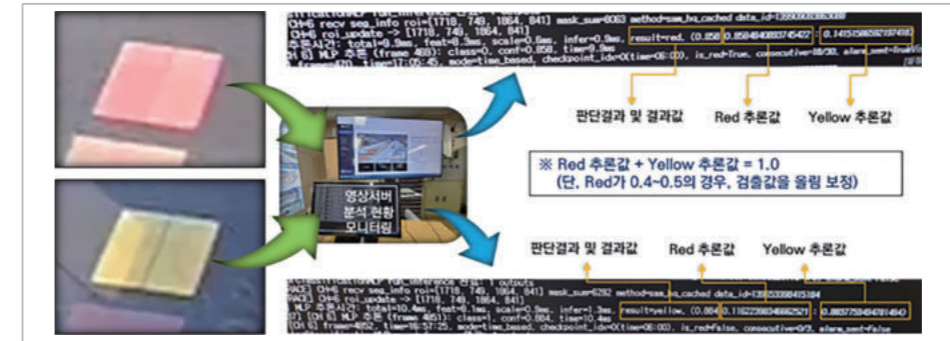
1) 진안지사 CCTV 상황실 내 AI 영상분석 솔루션 셋업 완료된 AI 학습 알고리즘을 진안지사에 설치했던 분석서버에 적용하고, 이를 실시간으로 모니터링하기 위해 진안지사 상황실에 AI 솔루션 관제 체계를 설치하였다.

[그림 15] AI 솔루션 관제 셋업(진안지사 CCTV 상황실)



2) 최종 시공 데이터에 대한 실시간 검증
 슬리터널 테스트베드 현장에서 온도감응형 노면표시 변화에 따른 AI 솔루션의 실시간 감지 및 이벤트 알림 성능을 확인하고자 하였으며, [그림 16]과 같이 CCTV 화면의 분석 영역을 실시간 분석 ⇒ 분석서버가 학습한 결과를 토대로 Red/Yellow 여부 추론 ⇒ 발색/소색에 대한 추론값 기준으로 정상적인 알림 및 로그 이벤트 저장까지 확인 완료하였다.
 전술한 상황이 실제 담당자에 관제할 AI 솔루션 구동 화면에서는 실시간으로 결빙이 예측되는 발색(Red) 이벤트 상황 시, 알림 메시지(팝업) 및 경고음을 표출하며, 발생한 이벤트 기록은 10초 단위로 저장되어 이후에도 열람할 수 있다.

[그림 16] 영상서버 분석 log에서의 추론 결과



[그림 17] 실시간 시스템 검증



2.3 향후 계획

본 시스템은 상시 운영 중인 고속도로 CCTV와 온도감응형 도로, AI 기법을 적용하여 신속한 운영이 가능한 '도로 결빙사고 예방을 위한 온도감응형 노면표시 자동감지 시스템 구축'에 대한 가능성을 확인하였다. 도로(노면표시), AI 기법, 운영 측면에서 각각에 대한 추가 연구를 수행하여 본 기술이 다양한 현장에 빠르게 보급될 수 있도록 고도화할 계획이다.

3. 결론

도로에 발생한 살얼음은 적설 상태와 다르게 육안으로 바로 인식이 어려우며, 제설작업 이후에도 발생할 수 있다는 점에서 운전자가 미리 대응하기가 매우 어렵다.

본 고에서 소개한 '온도감응형 노면표시'를 적용한 결빙사고 사전 예측 시스템은 도로 결빙 시점에서 색상이 변하는 온도감응형 도로의 발색 여부를 고속도로 CCTV 영상을 통해 AI 기반으로 판단하고 관리자에게 알리는 전 과정을 구현하였다. 한국도로공사의 인프라와 AI 기술을 접목한 본 시스템은 '신속한 대응'에 초점을 두고 있으며, 이는 동절기 결빙사고를 예방 및 도로 관리자의 업무 효율성 증대를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) 한국도로공사 도로교통연구원(2022), 외부자극 감응 재료 및 통행차량의 특성을 고려한 도로교통 안전 향상 기술 개발
- (2) 한국교통연구원(2021), AI-빅데이터 기반 도로 살얼음(블랙아이스) 진단 및 대응방안
- (3) 국토교통부(2023), 스마트 도로조명 플랫폼 개발 및 실증 연구