AI 기반 스마트 도로포장 관리시스템의 기술 동향과 예방적 유지관리 전략

김시로 | 위프코㈜ 대표이사

1. 사회기반시설의 노후화와 관리 위기

도로, 교량, 댐, 저수지 등 사회기반시설(SOC; Social Overhead Capital)은 국민의 일상과 산업 활동을 떠받치는 핵심 공공자산이다. 이들 시설물은 설계수명 내에서 요구성능을 유지할 때 비로소 본래의 기능을 발휘하며, 성능 저하나 기능 상실은 곧 직접적인 사회·경제적 손실로 이어진다. 그러나 우리나라의 고도 성장기에 집중 건설된 시설물들이 일제히 노후화 단계에 접어들면서, 관리 수요는 폭증하는 반면, 이를 감당할 전문인력과 재정은 한계에 봉착하고 있다.

2024년 1월 국토교통부가 발표한 표 1의 '인프라 총조사' 결과는 이 같은 현실을 수치로 명확히 보여주고 있다. 준공일자 확인이 가능한 383,281개 시설물 중, 건설 후 20년 이상 경과한 시설이 51.2%에 달하며, 30년 이상 노후 시설도 25.2%를 차지한다. 시설 유형별로는 저수지의 30년 이상 노후 비율이 96.5%로 가장 심각하고, 통신설비(64.4%), 댐(44.9%)이 뒤를 잇고 있다. 신규 시설이 추가되지 않는다는 전제하에 현재의 추세가 지속될 경우, 2033년 이후에는 현재 20년 이상 시설 전체가 30년 이상 시설로 편입되면서 노후 시설 비율이 산술적으로 86.4%에 달할 전망이다. 안전등급 측면에서도 D·E등급(미흡·불량) 판정을 받은 시설물 763개 중 도로가 172개(22.5%)로 가장 높은 비중을 차지하고 있어, 도로 인프라에 대한 체계적이고 선제적인 안전 관리가 시급한 과제임을 보여주고 있다.

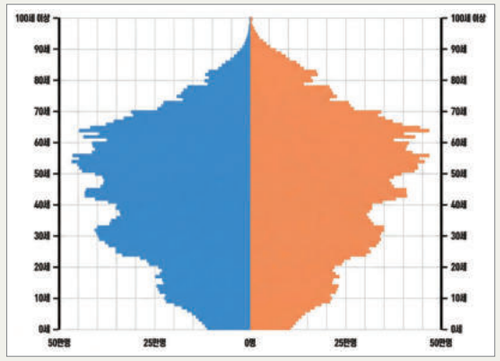
[표 1] 기반시설별 사용연수 현황

구분		인프라 총조사	사용연수 조사현황	10년 미만		10년 이상~20년 미만		20년 이상~30년 미만		30년 이상	
도로		100,982	63,283	12,128	19.2%	19,979	31.6%	19,080	30.2%	12,096	19.1%
철도		174,925	137,764	34,151	24.8%	50,576	36.7%	34,035	24.7%	19,002	13.8%
항만	항만	1,595	1,519	208	13.7%	455	30.0%	378	24.9%	478	31.5%
	어항	2,148	1,397	247	17.7%	455	32.6%	390	27.9%	305	21.8%
공항		760	441	161	36.5%	130	29.5%	120	27.2%	30	6.8%
수도		16,184	13,153	4,751	36.1%	5,228	39.7%	1,711	13.0%	1,463	11.1%
전기		137,101	137,055	19,733	14.4%	32,785	23.9%	40,821	29.8%	43,716	31.9%
가스		650	649	152	23.4%	293	45.1%	147	22.7%	57	8.8%
열		210	206	94	45.6%	82	39.8%	19	9.2%	11	5.3%
통신		216	216	0	0.0%	6	2.8%	71	32.9%	139	64.4%
공동구		39	39	12	30.8%	7	17.9%	8	20.5%	12	30.8%
송유		26	26	1	3.8%	0	0.0%	20	76.9%	5	19.2%
하천		22,379	8,483	1,114	13.1%	2,756	32.5%	2,048	24.1%	2,565	30.2%
저수지		17,375	17,313	140	0.8%	197	1.2%	268	1.5%	16,708	96.5%
댐		139	138	7	5.1%	33	23.9%	36	26.1%	62	44.9%
하수도		3,570	1,599	348	21.8%	727	45.5%	420	26.3%	104	6.5%
합계		478,299	383,281	73,247	19.1%	113,709	29.7%	99,572	26.0%	96,753	25.2%

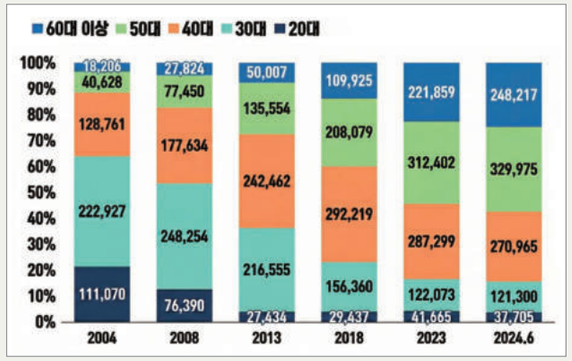
노후화 시설의 증가로 점검 수요는 꾸준히 늘어나는 반면, 이를 감당할 전문인력은 오히려 줄어드는 상황이 심화되고 있다. 우리나라는 2024년 12월, 65세 이상 인구 비중이 20%를 돌파하며 공식적으로 초고령 사회에 진입했다. 건설기술인 평균 연령은 2004년 37.5세에서 2024년 51.4세로 20년간 약 14세 상승한 반면, 같은 기간 건설·엔지니어링 분야 인력 수요는 47.8% 증가해 수급 불균형이 구조적 문제로 고착되고 있다. 이러한 인구구조의 변화는 단순한 노동력 부족을 넘어, 숙련된 점검 인력의 절대적 감소와 전문 기술의 세대 간 단절이라는 질적 위기로 이어지고 있다.

일본 역시 인구 고령화와 인프라 노후화라는 복합적인 위기 국면에 처해 있다. 이에 일본 정부는 2013년 "인프라 장수명화 기본계획"을 수립하여, 사후대응 중심의 유지관리에서 벗어나 예방점검과 계획적 갱신을 통해 시설물의 공용 수명을 연장하는 '장수명화(Long-life Extension)' 전략을 채택한 바 있다. 이는 한정된 재정 여건 속에서 노후 시설물을 효율적으로 관리하기 위한 정책으로서, '조기 건설·조기 폐기' 방식에서 '장기 사용·효율적 관리'로의 패러다임 전환이었다. 나아가 일본 국토교통성은 2016년 'i-Construction'을 발표하며 건설현장의 디지털 전환에 착수하였고, 8년 만인 2024년 4월에는 후속 정책인 'i-Construction 2.0'을 발표하였다. 새 정책은 2040년까지 건설현장 투입 인력을 30% 감축하고 생산성을 1.5배 향상시키는 것을 핵심 목표로 삼으며, 무인화·탈현장화를 통해 인력 의존도를 근본적으로 해소함으로써, 산업 전체의 패러다임 전환을 본격 추진하고 있다. 이는 유사한 구조적 과제에 직면한 우리나라의 정책 방향에도 많은 시사점을 제공하고 있다.

[그림 1] 2025년 대한민국 인구 피라미드



[그림 2] 건설기술인 연령별 현황

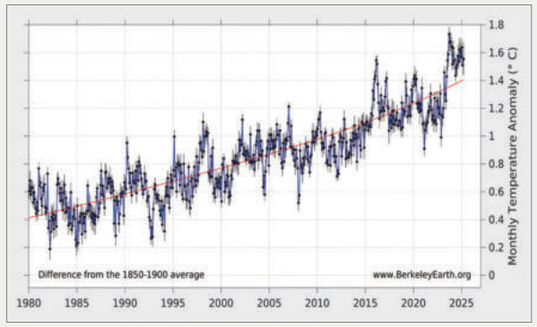


2. 기후변화와 도로 인프라에 대한 복합적 위협

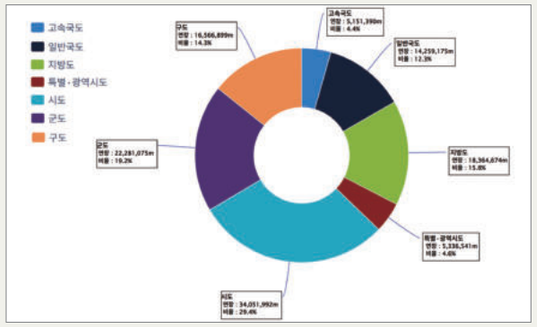
인력 위기와 더불어, 기후변화 또한 인프라에 대한 위협을 가속화하는 핵심 요인으로 부상하고 있다. 세계기상기구(WMO)에 따르면, 2024년 지구 평균 기온은 산업화 이전 대비 1.55℃ 상승해 175년 관측 역사상 최고치를 기록했으며, 파리협정의 1.5℃ 임계값을 연간 단위에서 처음으로 초과했다. 2015년부터 2025년까지 11년 연속으로 기온 기록이 경신되며 온난화 추세가 고착화되고 있다.

한반도도 이 같은 추세에서 예외가 아니다. 2024년 전국 평균 기온은 평년보다 2.0℃ 높은 14.5℃를 기록했고, 여름철 강수의 약 79%가 장마 기간에 집중되는 등 강수 강도의 극단화가 뚜렷이 나타나고 있다. 여기에 한반도 주변 해역의 해수면 온도가 최근 10년 평균 대비 1.3℃ 상승하면서 폭염과 집중호우를 더욱 강화하는 요인으로 작용하고 있다. 이러한 극단적 기상 현상의 빈도와 강도 증가는 도로포장의 열화를 가속화하고 유지관리 비용을 구조적으로 끌어올리는 직접적 요인이 된다.

[그림 3] 글로벌 평균 기온 편차(1850~2025년)



[그림 4] 2024년 도로현황



3. 국내 도로 현황과 포장 유지관리의 중요성

2024년 기준 대한민국의 총 도로 연장은 116,012km이며, 이 중 107,458km(약 92.6%)가 개통·운영 중이다. 도로 등급별로는 지방자치단체 관리 도로의 비중이 압도적으로 높은데, 시도(34,052km)·군도(22,281km)·지방도(18,365km) 순으로 전체 도로망의 대부분을 구성한다. 고속국도는 5,151km로 전체의 4.4%에 불과하지만, 장거리 이동과 물류를 뒷받침하는 핵심 간선 인프라로서의 역할을 수행한다. 포장 현황을 보면 개통 도로의 95.7%(102,847km)가 포장도로이며, 미포장 구간 4,611km는 대부분 군도에 집중되어 있다.

아스팔트 도로는 단순히 지표면을 덮는 피복재가 아니라, 교통 하중을 효율적으로 분산시키기 위해 역학적 원리에 따라 설계된 '다층 복합 구조체(Multi-layered Composite Structure)'으로서, 표층, 기층, 보조기층으로 구성된 각 층은 상부의 수직 하중을 점진적으로 분산시켜 노상에 전달되는 응력을 최소화하는 역할을 한다. 아스팔트 혼합물의 핵심 바인더(Binder; 결합재)인 비투멘(Bitumen)은 골재 간의 결합력을 유지하며 외부 하중에 저항하는 점탄성(Viscoelasticity)을 제공한다.

도로의 내구성을 뒷받침하는 비투멘(Bitumen)은 시간이 흐를수록 산화와 휘발에 의해 유연성이 낮아지고, 깨지기 쉬운 취성(Brittleness) 상태로 변한다. 문제는 지구온난화에 따른 극한 기후가 이 과정을 더욱 재촉한다는 점이다. 기록적인 고온과 불규칙한 강수 패턴은 바인더의 노화를 촉진하는 촉매제가 되어, 도로 포장의 수명을 단축시키는 결정적인 원인이 되고 있다. 여름철 폭염은 아스팔트 표면 온도를 60℃ 이상으로 끌어올려 소성변형(러팅, Rutting)을 유발하고, 겨울철 혹한과의 반복적인 온도 교차는 횡방향 균열을 심화시킨다. 자외선 노출은 표면층 강성을 35~40% 높여 미세 균열을 유발하며, 집중호우 시 빗물이 균열부로 급속히 침투하면 아스팔트와 골재 간 결합력이 저하되는 박리 현상이 가속화된다. 포화 상태의 노반은 지지력을 급격히 잃어 중차량의 반복 통행에 의한 거북등 균열(Alligator Cracking)과 포트홀(Pothole)로 이어지는 악순환이 반복된다.

서울시 전체 도로의 90% 이상을 차지하는 아스팔트 포장은 이처럼 기후변화로 인한 폭염과 집중호우의 이중 압박 속에서 열화가 가중되고 있으며, 젖은 노면에서의 교통사고 위험 또한 함께 높아지고 있다. 포장 손상 유형으로는 거북등 균열(Alligator Cracking), 종·횡방향 균열, 포트홀(Pothole), 러팅(Rutting), 라벨링(Raveling), 블리딩(Bleeding), 쇼빙(Shoving) 등이 있으며, 이들은 서로 복합적으로 작용하여 파손을 가속시킨다.

국토교통부의 최신 도로보수 비용 자료에 따르면, 포장 관련 비용이 전체의 35.8%를 차지한다. 구조물, 안전시설, 위험도로, 자전거도로 등 여타 항목에서 포장과 직·간접적으로 연관된 비용까지 합산하면, 실질적인 포장 관련 투자 비중은 전체의 50%에 근접하는 것으로 추산된다. 포장 항목에는 소파보수(Patching), 표면처리, 덧씌우기(Overlay), 재포장, 균열 실링(Sealing), 교면포장, 포트홀 보수 등 다양한 공정이 포함된다. 공용 기간이 15년 이상인 포장의 경우, 전체 손상의 약 36%가 기후변화 및 지반 조건 등 환경적 요인에서 비롯되는 것으로 나타난 만큼, 초기 단계에서의 조기(早期) 발견과 적기(適期) 보수가 유지관리 비용을 최소화하는 핵심 전략이다.

[표 2] 도로 보수 비용

항목	보수비		2024년 비율
	2023년	2024년	
포장	1,362,846	1,493,025	35.8
구조물	777,060	809,736	19.4
안전 시설	777,060	809,736	19.4
위험도로 개선	249,450	178,430	4.3
병목 지점	191,801	167,487	4.0
재해·응급복구	209,967	297,226	7.1
자전거 도로	42,987	25,046	0.6
기타 소계	314,190	394,056	9.4
총계	4,353,095	4,561,472	100.0

4. 도로포장관리시스템(PMS)과 포장상태 평가지수

도로포장은 교통하중과 환경 조건의 영향을 지속적으로 받기 때문에, 체계적인 상태 관리가 무엇보다 중요하다. 이러한 유지관리를 효과적으로 수행하기 위해서는 포장 상태를 객관적으로 파악하는 체계적인 관리시스템이 필요하다. 이를 위해 국토교통부, 서울시, 한국도로공사 등 주요 도로 관리 기관에서는 도로포장관리시스템(PMS, Pavement Management System)을 구축하여 운영하고 있다.

PMS는 균열·포트홀·탈리 등의 노면 결함(Surface Distress)을 비롯해 소성변형(Rutting), 종단 평탄성(IRI), 그리고 하부 공동(Subsurface Cavity) 등 도로의 구조적 건전성과 주행 안전성을 결정짓는 핵심 지표들을 바탕으로 포장 상태를 종합적으로 평가한다.
이러한 정보를 종합하여 도로의 상태를 객관적으로 평가하고, 보수 시기와 방법을 결정하게 된다. 우리나라의 일반국도와 고속국도는 비교적 체계적인 관리가 이루어지고 있지만, 전체 도로의 약 80% 이상을 차지하는 지방자치단체 관리 도로는 아직 PMS 구축이 충분히 이루어지지 않은 상황이다. 현재 지자체 가운데서는 서울시가 대표적으로 PMS를 운영하고 있으며, 다른 지자체에서도 도입이 확대되는 추세다.
서울시의 도로포장 평가지표인 SPI(Seoul Pavement Index)는 균열, 소성변형, 평탄성을 종합하여 0~10점으로 도로 상태를 정량화하며, 점수에 따라 '매우 양호(10~8점: 보수 불필요)', '양호(8~7점: 일상 유지관리)', '보통(7~5점: 예방적 유지관리)', '불량(5~3점: 보수·보강)', '매우 불량(3~0점: 재포장)' 등으로 세분화하여 체계적인 유지보수 의사결정의 근거로 활용하고 있다. 이를 통해 사후 대응에서 '선제적 예방 관리'로 패러다임을 전환한 서울시는 SPI 6.75 이상의 평탄성 유지 전략으로 재포장 주기를 6.6년에서 10년 이상으로 연장하며, 상당한 예산 절감 효과를 거두고 있다. 아울러 '서울형 도로포장 표준모델' 도입으로 포트홀 발생률을 27% 감축시켰으며, 로드스캐너와 GPR 데이터를 결합해 도로 상·하부를 통합 관리하는 고도화된 시스템을 구축했다.

이러한 데이터 기반 관리 체계는 관리 주체별 맞춤형 기준을 제시하며 국가 도로의 내구성 향상을 견인하고 있다. 일반국도 NHPC나 고속도로 HPCI가 노선별 교통 특성을 반영하는 것과 맥을 같이하며, 특히 경기도는 GPCI(경기도 도로포장 상태지수)를 AI 기반 GR-PMS(Gyeonggi-do Road Pavement Management System)와 연계해 방대한 노선의 파손 가능성을 정밀하게 예측하고 있다. 이처럼 각 지자체는 고도화된 지표와 신기술을 결합하여 지역 특성에 최적화된 자산관리 효율을 극대화하고 있으며, 이는 지속 가능한 도시 인프라 구축의 핵심적인 기술적 토대가 되고 있다.

5. AI 기반 도로포장 상태 평가 시스템

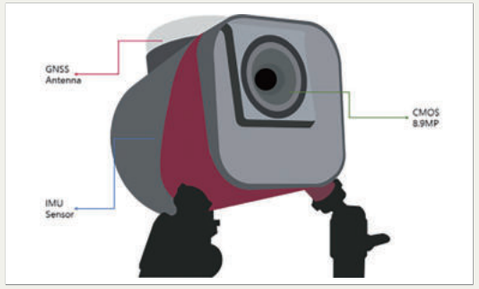
PMS가 효과적으로 작동하기 위해서는 도로 상태를 지속적이고 정확하게 파악할 수 있는 조사 체계가 필수적이다. 그러나 기존의 도로 점검은 조사 인력이 직접 현장을 확인하는 방식에 크게 의존해 왔다. 과거에는 조사 인력이 직접 도로를 점검하는 방식이 일반적이었지만, 이러한 방식은 조사자의 경험에 따라 결과가 달라질 수 있고, 조사 인력 부족이나 안전 문제 등의 한계도 존재한다. 또한 일정한 조사 주기 사이에 발생하는 손상을 즉시 파악하기 어렵다는 문제도 있다.

최근에는 이러한 한계를 해결하기 위해 영상기술과 인공지능(AI)을 활용한 도로포장 상태 평가 시스템이 도입되고 있다. 이 시스템은 일반 차량에 장착한 영상장치를 통해 도로 상태를 촬영하고, 인공지능이 이를 자동으로 분석하는 방식이다. 기존의 전용 조사 차량은 장비 가격이 수억 원에 달해 지자체나 중소기업이 도입하기 어려웠지만, 최근에는 소형 영상 장치를 차량에 장착하는 방식으로 비용 부담을 크게 낮출 수 있게 되었다. 이러한 시스템은 크게 세 가지 기술로 구성된다.

1) 영상 취득 기술

차량에 장착된 고해상도 카메라를 통해 도로 표면을 촬영하고, 위치 정보(GNSS)와 주행 정보를 함께 수집한다. 이를 통해 도로 상태를 대규모로 효율적으로 조사할 수 있다. 고해상도 영상 장치는 도로 표면을 정밀하게 촬영하고 깊이 정보를 분석할 수 있으며, 터널이나 고가교 하부에서도 정확한 위치 정보를 확보할 수 있다. 일반 차량에 간편하게 장착할 수 있어 비용 효율적으로 대규모 도로 데이터를 수집할 수 있다.

[그림 5] 영상 취득장치(예시)



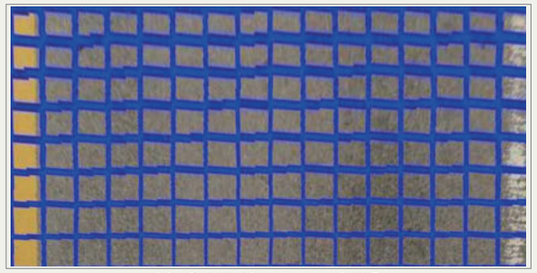
차량 탑재 | 열차 탑재

2) AI 기반 균열 자동 검출

촬영된 영상을 인공지능이 분석하여 균열, 포트홀 등 도로 손상을 자동으로 검출한다. 이를 통해 기존의 육안 조사보다 객관적이고 일관된 분석 결과를 얻을 수 있다.
균열 검지 방식은 크게 픽셀 기반 방식과 패치 기반 방식으로 구분된다. 픽셀 기반 방식은 영상의 각 픽셀 단위까지 분석하여 균열의 형상과 분포를 정밀하게 파악하는 데 유리하며, 패치 기반 방식은 영상을 여러 작은 영역으로 나누어 분석함으로써 학습 데이터 확보와 연산 효율성을 높일 수 있다. 이러한 딥러닝 기반 자동 검지 기술은 기존 육안 조사에서 발생할 수 있는 주관성과 편차를 줄이고, 보다 객관적이고 신뢰도 높은 도로 상태 진단을 가능하게 한다.

[그림 6] 균열 검출

(a) 픽셀 기반(Pixel-based) 검출



(b) 패치 기반(Patch-based) 검출

[그림 7] 균열 검출 소프트웨어 인터페이스(예시)

3) 포장 상태 자동 평가

검출된 균열 정보를 바탕으로 도로 상태를 평가하고, 유지보수 시기와 공법을 판단할 수 있도록 지원한다. 이처럼 영상 취득 → 손상 검출 → 상태 평가로 이어지는 자동화된 분석 체계를 통해 기존의 인력 중심 조사 방식보다 비용과 시간을 크게 줄이고 관리 효율을 높일 수 있다.

6. 도로포장 파손모형과 기술적 특성

이와 같이 수집된 도로 상태 데이터는 단순한 현황 파악에 그치지 않고, 포장의 미래 상태를 예측하는 분석 모델 구축에도 활용될 수 있다. 도로포장은 차량 하중, 온도 변화, 강우 등 다양한 환경 요인의 영향을 받으며 시간이 지남에 따라 점차 성능이 저하된다. 이러한 열화 과정을 분석하고 미래 상태를 예측하기 위해 활용되는 것이 도로포장 파손모형(deterioration model)이다. 파손모형은 도로 상태가 앞으로 어떻게 변화할지를 예측하여 적절한 보수 시기와 공법을 결정하는 데 활용되는 PMS의 핵심 도구이다. 현재 국내에서는 균열률을 주요 포장 상태 지표로 활용하고 있지만, 장기적인 공용 데이터가 충분하지 않아 정교한 예측 모델 구축에는 아직 한계가 있는 상황이다. 효율적인 도로 관리를 위한 포장 상태 예측은 도로 자산 관리의 핵심이다. 일반적으로 포장 파손모형은 데이터 처리 방식과 예측 논리에 따라 다음과 같이 세 가지 방법으로 구분할 수 있다.

1) 결정론적 방법(Deterministic Method)

포장 상태가 시간 경과에 따라 일정한 패턴으로 변화한다고 가정하는 방식으로서, 주로 회귀 분석이나 경험적 공식을 통해 열화 과정을 수식화하며, 모형 구조가 단순하고 이해하기 쉬워 전통적인 유지관리 설계에서 널리 활용되어 왔다. 다만, 현장의 복잡한 변수와 불확실성을 모두 반영하기에는 일정 부분 한계가 있다.

2) 확률론적 방법(Probabilistic Method)

재료의 불균질성, 하중 변동성, 환경적 불확실성을 통계적으로 고려하여 상태 변화를 분석하는 접근법이다. 단일 예측값이 아닌 미래 상태로의 '전이 확률'을 산출함으로써, 보다 현실적이고 유연한 예측이 가능하다. 이를 위해 베이지안 추론을 통한 통계적 보정, 상태 변화 경로를 추적하는 마르코프 연쇄(Markov Chain), 파손 시점의 분포를 다루는 해저드 모형(Hazard Model) 등이 주요 도구로 활용되고 있다.

3) 딥러닝 기반 방법

포장 상태 빅데이터를 기반으로 인공지능이 복잡한 비선형 열화 패턴을 스스로 학습하고 예측하는 최신 기법이다. 인공신경망(ANN)은 교통량, 포장 두께, 기온 등 다각적인 변수를 종합 분석하며, 순환신경망(RNN) 계열은 시간에 따른 시계열적 열화 특성을 정밀하게 반영할 수 있다. 최근에는 영상 처리에 특화된 CNN과 장기(Long-term) 기억 능력이 우수한 LSTM을 결합한 하이브리드 모델이 주목받고 있다. 이는 영상 기반 균열 탐지와 미래 상태 예측을 동시에 수행함으로써, 실시간 진단과 열화 예측을 통합한 '스마트 PMS(Smart Pavement Management System)'의 핵심 기술로 평가받고 있다.

7. 결론 및 전망

노후 인프라 증가, 전문 인력 감소, 기후변화로 인한 열화 가속이라는 복합적 환경 속에서 AI 기반 스마트 도로포장 관리 시스템의 도입은 점차 필수적인 관리 전략으로 자리 잡고 있다. 영상취득장치, 딥러닝 균열 자동 검지, 포장상태 등급 자동 판정의 세 핵심기술이 유기적으로 통합된 시스템은 기존 인력 조사의 한계를 극복하고, 데이터 기반의 예방적 유지관리 체계 구현을 가능하게 한다.

결정론적·확률론적·딥러닝 방법론을 병행 적용하는 다층적 파손모형의 발전은 도로 노선별 열화 패턴을 더욱 정밀하게 예측하고 유지보수 의사결정의 신뢰성을 높이는 방향으로 진화할 것이다. 특히 YOLOv8 기반 실시간 균열 탐지와 LSTM 열화 예측을 결합한 통합 파이프라인은 국내 PMS 고도화의 핵심 동력이 될 것으로 기대된다. 궁극적으로 스마트 도로포장 관리 시스템의 전국 확산은 인프라 수명 연장, 유지관리 예산의 효율적 운용, 그리고 국민의 안전한 도로 이용 환경 조성에 실질적으로 기여할 것이다.