

정책과 기술 01

Digital&Graphic 기술 기반 효율적 고속도로 포장 상태 운영 관리를 위한 제안 : 스마트 포장 관리 통합 플랫폼

문기훈 | 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원

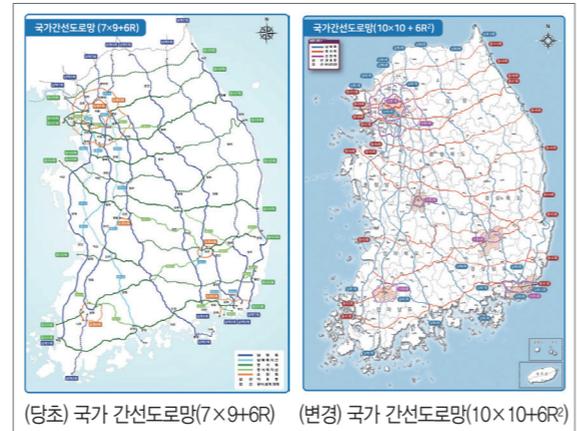
1. 서론

도로가 인류 역사에 가장 중요하게 기여한 분야는 단연 “경제, 산업 및 문화 분야에서의 광범위한 소통”이다. 이 소통은 인류 역사상 모든 삶의 전반에서 오랜 기간 동안 이어졌으며, 이를 통해 인류는 현재 눈부신 문명화를 이룰 수 있었다.

대한민국은 일제 강점기를 거쳐, 6.25 전란 후 모든 산업 기반이 파괴된 아픈 역사를 가지고 있다. 하지만 지금의 대한민국은 세계를 이끄는 주도국으로서 그 역할을 충실히 수행하고 있다. 그리고 이런 대한민국이 과거의 폐허를 딛고 지금의 세계 경제대국으로 발돋움 할 수 있게 한 중심에는 단연 도로가 있다.

대한민국 고속도로는 1970년대 서울과 부산을 잇는 경부고속도로를 시작으로 현재 그 연장이 55개 노선 약 4,939km(한국도로공사 관리: 34개 노선 약 4,107km, 민간 관리: 21개 노선 약 832km)에 달하고 있는 광범위성을 자랑한다.

또한 정부의 제2차 국가도로망 종합계획(‘21~’30: 도로법 제 5조에 따른 10년 단위의 도로정책 및 건설 분야 최상위 법정계획)에 따르면 국가 간선도로망(고속도로망)은 7×9+6R에서 10×10+6R²로 큰 폭으로 확장될 예정이다. 참고로 R은 방사형 도로망을 의미하며, R²은 동일 지역에 방사형 도로가 2개 있는



것을 의미한다. 위와 같은 도로정책 변화에 따라 고속도로의 연장은 현재 약 4,939km에서 2030년 약 6,500km로 확장될 예정이다.

과거 1980년대에서 2000년대 초반까지 고속도로공사에서 가장 중요한 키워드는 “신설 및 확장”이었다. 이는 대한민국의 경제성장에 맞추어 그에 상응하는 기반 시설의 구축이 절실히 필요했기 때문이다. 하지만, 2000년대 이후 차량 대수가 지속적으로 증가하고 고속도로의 연장 및 공용 수명이 증가할수록 기존 포장의 노후화에 따른 다양한 하자가 발생하기 시작하였다. 이를 바탕으로 고속도로는 신설과 함께 그 유지관리의 중요성이 대두되기 시작한다. 즉, 국민에게 최고의 도로 서비스를 제공하기 위해 고속도로 신설뿐만 아니라 기존 도로의 유지관리 필요성이 증가하기 시작했다.

고속도로에서 유지관리의 중요성이 부각 된 다른 이유로는 “고속도로 적용 포장 공법의 고급화 및 다양화”이다. 과거 고속도로는 콘크리트 포장의 경우 무근 콘크리트 포장(JCP: Jointed Concrete Pavement), 아스팔트 포장의 경우 일반 밀입도 포장(HMA: Hot Mix Asphalt) 공법이 주로 적용되었다. 하지만 고속도로의 전반적인 품질 수준 제고 및 파손 저감을 위해 한국도로공사는 연구개발 및 현장적용을 통해 다양한 도로포장 재료와 관련 공법을 개발하였다. 대표적으로 쇠석골재 메스틱 포장(Stone Mastic Asphalt), 배수성 포장(Porous asphalt) 및 연속 철근 콘크리트 포장(Continuous Reinforced Concrete Pavement) 등이 그 예이다. 이를 통해 “보다 높은 품질의 품격 있는 고속도로: Providing better and elegant expressway to its people”를 국민에게 제공할 수 있는 기반을 구축하였다.

현재 고속도로에 적용되는 대표적인 공법은 아래 <표 1>과 같다. 또한 <표 1>에서 언급된 포장 공법 외에 다수의 시공 및 보수공법이 고속도로 신설 및 유지관리 현장에 적용되고 있다. 따라서 향후 시공 구간에 대한 지속적인 추적 조사를 통해 다양한 포장재료와 공법의 효용성에 대한 검증이 필요하다. 현재 한국도로공사는 해당 조사 결과를 향후 고속도로 운영 전략(안) 수립 및 의사 결정을 위한 도구로 적극 활용하고 있다.

<표 1> 고속도로 적용 포장 공법

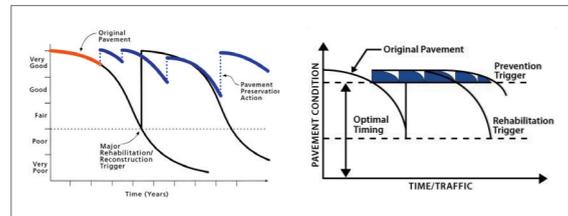
구분	적용공법	비고
콘크리트 포장	• 무근콘크리트 포장(JCP) - Jointed Concrete Pavement	• 철근없음 • 조인트간격 6m
	• 연속철근 콘크리트 포장(CRCP) - Continuous Reinforcement Concrete Pavement	• 조인트 없음 • 철근매설
아스팔트 포장	• 일반 밀입도 포장(HMA) - Hot Mix Asphalt	• 다양한 골재 • 혼합물 밀도기반 • 공극률 4~5%
	• 쇠석골재 메스틱 포장(SMA) - Stone Mastic Asphalt	• 조골재 위주 • 골재 결합력기반 • 공극률 1~3%
	• 배수성 포장(PA) - Porous Asphalt pavement	• 조골재 위주 • 빗길 안전성 • 공극률 16%~
기타 포장	• 특수 아스팔트 포장 중간층 - 복합 포장에 적용 (노후 콘크리트 위 덧씌우기 포장)	• 복합 포장 시공 시 노후 콘크리트 포장 위에 시공

이처럼 고속도로의 효율적 유지관리는 다음의 이유로 인하여 반드시 필요하다. ① 기존 공용 노선의 효율적 관리 및 최적의 개량, 확장 및 보수 계획(안) 수립, ② 새로운 포장재료, 공법 적용에 대한 효과적 및 정량적 검증체계 정립, ③ 향후 고속도로 신설 노선 계획 시 타당성(경제성, 적정성) 검토 자료 활용. 다만, 고속도로 유지관리를 수행하면서 담당 실무자가 가질 수 있는 대표적인 질문은 다음과 같다.

① 고속도로 특정 구간의 파손 여부는 어떤 지표로 측정하며 이와 관련된 포장상태의 양호, 불량 여부를 표현해 주는 지표는 무엇인가? ② 고속도로 포장의 전반적 상태를 나타내주는 정량적 지표(Global standard)는 무엇인가?

이러한 관점에서 2000년대 이후 오늘날 고속도로 및 국도에서 전반적으로 수행되고 있는 포장관리시스템(PMS: Pavement Management System)이 탄생하였다. 이는 현재포장 상태를 파악하여 적절한 시기에 유지보수를 수행하는 것이 공용 수명 경과 후 전면 재포장을 시행하는 것에 비해 경제·운영적 측면에서 효율적이라는 기존 연구 사례를 바탕으로 두고 있다.

<그림 2> Pavement preservation: a proactive approach



(출처: U.S. National Park Service)

2. 고속도로 포장관리 시스템: HPMS(Highway Pavement Management System)

한국도로공사는 고속도로의 효율적인 운영과 유지관리 등 향후 전략 방안을 수립하기 위해 2000년도부터 고속도로 포장관리 시스템(HPMS)을 구축하여 운영하고 있다. HPMS에서 조사하는 주요 항목 및 관련 장비는 다음 <표 2>, <그림 3>과 같다.

한국도로공사는 전문 조사기관을 통해 전국 고속도로망을 연 1회 전수조사 후 데이터베이스(DB)를 L=100m 간격으로 정리·표준화·축적하여 도로망의

<표 2> HPMS 조사항목

구분	적용공법	비고
평탄성 (m/km)	• IRI (International Roughness Index) - 포장 표면의 주행관점의 평탄한 정도	• 콘크리트 포장 • 아스팔트 포장
균열 (%)	• SD (Surface Damage) - 단위 면적당 포장 표면 균열정도	• 콘크리트 포장 • 아스팔트 포장
소성변형 (mm)	• RD (Rut Depth) - 포장표면의 하중에 의한 변형(침하)	• 아스팔트 포장
포장상태 지수 (HPCI)	• HPCI: Highway Pavement Condition Index - 포장상태 종합 평가지수(1:양호~7:불량)	• 콘크리트 포장 • 아스팔트 포장

<그림 3> 포장상태 조사장비



(출처: 한국도로공사 도로교통연구원)

상태를 분석하고 있다. 이를 통해 최고 상태의 고속도로를 국민에게 제공하기 위해 노력하고 있다. 하지만 고속도로와 달리 국도 이하 도로는 그 연장이 상대적으로 길고(약 110,000km) 조사 장비 투입이 원활하지 않기 때문에 현재까지도 전수조사가 어려운 실정이다. 여기서 염두해야 할 점은 상기의 HPMS 조사에 따른 고용량의 조사 데이터가 매년 생성·축적되고 있다는 점이다(10TB 이상/년). 또한 조사 DB(=Data Base)의 연차별 누적(조사기간: 10년 이상)으로 인하여 현재 수치 위주의 방대한 DB가 지속적으로 축적되어 빅데이터화(Big Data) 되어 있다.

최근 4차산업혁명 기술 중 빅데이터 DB 마이닝 기술은 향후 인공지능(AI) 및 머신러닝 핵심 코드 개발

에 필수적인 기술이며, 그 기술의 중심에 있는 방대한 빅데이터 DB를 어떻게 효율적으로 검색·분석하여 관리하느냐 하는 점이다. 따라서 이러한 기술 추세를 도로분야에 적용한다면, 향후 HPMS는 정확한 고속도로 포장상태 전수조사 활동 외에도 다양한 고속도로 관련 정책 수립을 위해 조사 및 축적된 빅데이터 HPMS DB를 효율적으로 검색하고 활용하는 것이 그 어느 때보다 중요하다.

3. 빅데이터의 시각화: Infographics

현재 HPMS 관리 및 운영에 있어서 이슈가 되는 사항은 수치 위주의 빅데이터 DB의 “사용자 관점의 직관적 이해 및 신속한 검색”이다. 과거 HPMS DB는 수치 위주의 책자로 제공되었다. 이와 관련하여 포장의 시공, 확장, 유지관리 공사를 최전선에서 담당하는 한국도로공사 실무진은 <표 3>과 같이 HPMS 업무 개선사항을 도로처 및 도로교통연구원에 지속적으로 요청하였다.

이에 도로교통연구원은 대한민국 고속도로 설계, 시공 및 유지관리 효율성 극대화를 목적으로 2017년부터 “스마트 포장관리 통합 플랫폼”을 기획 및 개발하였다. 현재 Microsoft Windows기반(PC 버전) 및 Android/IOS기반(모바일 버전)이 동시에 개발되고 있으며, 2023년 최종 시제품의 완성과 함께 실무진에 배포되어 2024년부터 HPMS DB 관리 및 관련 응용 업무에 적극적으로 활용될 예정이다. 이를 통해 궁극적으로 대한민국 고속도로 유지관리 및 정책(안) 구축에 한 단계 더 높은 업무성과를 창출하여 보다 품격 있는 고속도로를 국민에게 제공할 예정이다.

<표 3> HPMS 개선 관련 실무진 요청사항

구분	적용공법
요청사항 ①	• 본부(지사)별 포장관리 현황에 대한 전반적 조회권 - 관리 노선의 연장, 포장 형식 적용 비율 조회 - 특정 구간의 포장 건전도 조회 불가 - 연차별 조회 시스템 추가 필요
요청사항 ②	• 이용자 니즈에 부합하는 조사자료 반영 등 개방성 미흡 - 응력완화 줄눈 설치, 알칼리-골재반응구간 조사 및 배수성 포장 현황 등 - 향후 사용자 요청 신규 포장조사 DB의 신속한 반영을 통한 개방적 시스템 구축 필요
요청사항 ③	• 사용자 중심의 쉽고, 빠르고 직관적인 조회환경 기존 인트라넷내 제한적 HPMS DB조회 시스템 개선 Wi-Fi기반 PC(Windows) 기반 5G, LTE 기반 모바일 (Android, IOS)기반 시스템
요청사항 ④	• 오류, 누락 및 중복 DB의 효율적 발견, 수정 및 관리 기존 수치 및 책자 위주의 조회환경을 통한 고속도로 전수조사DB 검토 곤란 개선 수치의 효율적 그래픽 환경기반 조회 시스템 구축을 통한 고속도로 조사 대상구간의 효과적인 오류, 누락 및 중복 DB 발견 및 운영체계 구축

4. 한국도로공사 고속도로 통합관리 플랫폼

한국도로공사에서 기획 및 개발한 고속도로 통합관리 플랫폼은 기본적으로 “수치위주 빅데이터 DB의 직관적 시각화(Visualization)”이다. 이는 업무 관련 정보를 시각화하여 사용자가 원하는 정보를 실용적, 직관적으로 높은 이해도를 바탕으로 전달하는 인포그래픽(Infographics)의 개념에 기반하고 있다. <그림 4>는 인포그래픽을 통한 정보 전달의 효율성을 제고한 예를 보여주고 있다.

방대한 고속도로 HPMS DB는 매우 중요한 자료이다. 특히, Infographics 작업을 통해 현재 수치 위주의 자료를 보다 가치 있게 재창출 할 수 있다. ① 내용의 빠른 이해 및 기억력 제고 ② 통계·연구 또는 조사 자료의 시각화를 통한 복잡한 내용의 용이한 설명 ③ 복잡한 보고 내용의 단순화 및 다양한 옵션의 비교·

〈그림 4〉 Infographics의 예



(출처: RGD, Company biographic)

대조 가능 ④ 조사 및 연구 결과의 분석 및 문제점, 개선사항 도출 용이 등.

한국도로공사는 상기의 Infographics의 장점을 응용하여 4년의 연구개발 과정을 거쳐 상용화 프로그램 Tableau 기반 “사용자 중심 스마트 포장관리 통합 플랫폼”을 개발하였다. 모든 DB는 도로포장 전문 조사 기관에서 매년 시행하는 고속도로 전수조사 데이터 (L=4,500km/1차로)를 활용하였으며, 도로의 지형정보는 100m 간격으로 좌표가 있는 GPS데이터를 기반으로 작성하였다. 〈표 4〉는 스마트 포장관리 통합 플랫폼 관련 지향점 및 최종 개발 목표를 보여주고 있다.

〈표 4〉 스마트 포장관리 플랫폼 개발 지향점

지향점	주요내용
통합성	• 포장조사자료 통합을 통한 검색 분산화 한계 보완 예) 노선정보, 연장, HPMS DB, 파손 현황 등의 통합조회기능
신속성	• One click 조회체계 구축을 통한 업무 능률성 향상 예) 프로그램 → 파일실행 → 검색 및 분석환경 구축
직관성	• 수차 위주 DB의 그래픽, 도표 위주의 표현 예) Infographics 구현을 통한 사용자 이해도 극대화
개방성	• 신규 포장 조사자료의 플랫폼내 손쉬운 반영 예) 다양한 자료의 플랫폼내 추가 반영을 통한 Easy add-on
이동성	• 즉각적 현장 조회 및 조치 사항 반영을 통한공국의 Active mobility 실현 예) 스마트폰, 태블릿을 활용한 업무 Mobility 혁신성 실현

효율적 빅데이터 DB의 시각화를 위해 우선적으로 수행되어야 할 사항은 저장량 통합 DB file을 구축하는 일이다. 이에 한국도로공사는 스마트 포장관리 플랫폼 시제품 개발의 메인 플랫폼으로 상용 그래픽 비주얼 프로그램 Tableau를 선정했다. 그래픽 비주얼 프로그램 Tableau를 최종적으로 선정한 사유는 다음과 같다.

- ① 컴퓨터의 CPU 요구사항이 상대적으로 낮으며(7세대 Intel i5 이상 및 RAM 8GB 이상 등) *.twgdx file compression logic에 의거 10년 정도의 고속도로 포장상태 조사 DB의 원본 대비 1%의 압축화가 가능하기 때문이다(PC 버전 : 1.0GB → Tableau file : 100MB).
- ② PC저장장치의발전(HDD→2.5인치 SSD→NVMe SSD)에 힘입어 보다 신속한 자료 조회 및 분석환경 제공이 가능하다.
- ③ PC 및 모바일 기기(스마트폰, 태블릿)에 사용 가능한 어플리케이션이 있어서 진정한 포장 관리 업무의 Active mobility*를 현실화 할 수 있다.

* PC버전: 무료 Reader program 다운로드
모바일버전 : ID/PS 라이선스 부여 방식

〈그림 5〉는 통합 DB 구축의 기본 개념을 개략적으로 묘사한 내용이다. 최초 스마트 포장관리 통합 플랫폼을 개발하는 과정에서 고려한 DB는 고속도로 현황 및 HPMS 조사 빅데이터 DB 두 종류였다. 하지만, 개발 및 시연을 거치면서 포장분야 실무진이 요청하는 다양한 조사 DB가 추가되었다. 현재 개발 중인 스마트 포장관리 통합 플랫폼은 Microsoft Excel과 유사한 DB Sheet expression 형태를 지니고 있다. 즉 추가하고 싶은 DB가 있다면, 기본 데이터를 바탕으로 GUI(Graphic User Interface) 작업을 완료 뒤 기

존 개발 완료된 DB Sheet 옆에 간단히 추가하면 되는 방식이다.

〈표 5〉 스마트 포장관리 플랫폼 보유DB 및 시각화(Visualization) 목록

① 고속도로 포장현황('14~'23, 10년) - 노선명 및 번호 (본부/노선별) - 포장 형식 및 종류 • 아스팔트 포장(밀입도, SMA, 배수성 등) • 콘크리트 포장(밀반죽, 연속철근 등)	② 보수공법 현황 ('02~'23,22년) - 보수공법 • 일반/절삭덧씌우기, 단면보수, 균열실링, 그라인딩 등 - 보수일자, 보수재료, 투입 공사비 등
③ 고속도로 포장상태('14~'23, 10년) - 고속도로 포장상태 지수(HPCI, 1~7등급) - IR(m/km),RD(mm),SD(%)	④ 전국 교량 및 터널 현황 - 전국 교량, 터널 위치 및 분포현황 - 본부(지사) 및 노선별 검색가능
⑤ 교통량 및 제설재 사용량 현황 - 노선별 교통량 분포현황 - 노선별 제설재 사용량 분포현황	⑥ 응력완화줄눈 설치현황 ('18~'20) - 본부(및 지사)별 설치현황(갯수, 위치) - 성능 추적조사 결과 (온도, 줄눈폭 변동)
⑦ 일칼리-골재 등급 조사 ('18~'22) - 본부(및 지사)별 발생 현황 - 등급별 발생 현황(1~4등급, 보수원료 등)	⑧ 배수성포장 현황 ('04~'20) - 전국 시험시공 현황 (재료,단면,연도 등) - 성능 평가 결과 (투수,조도,소음 등)

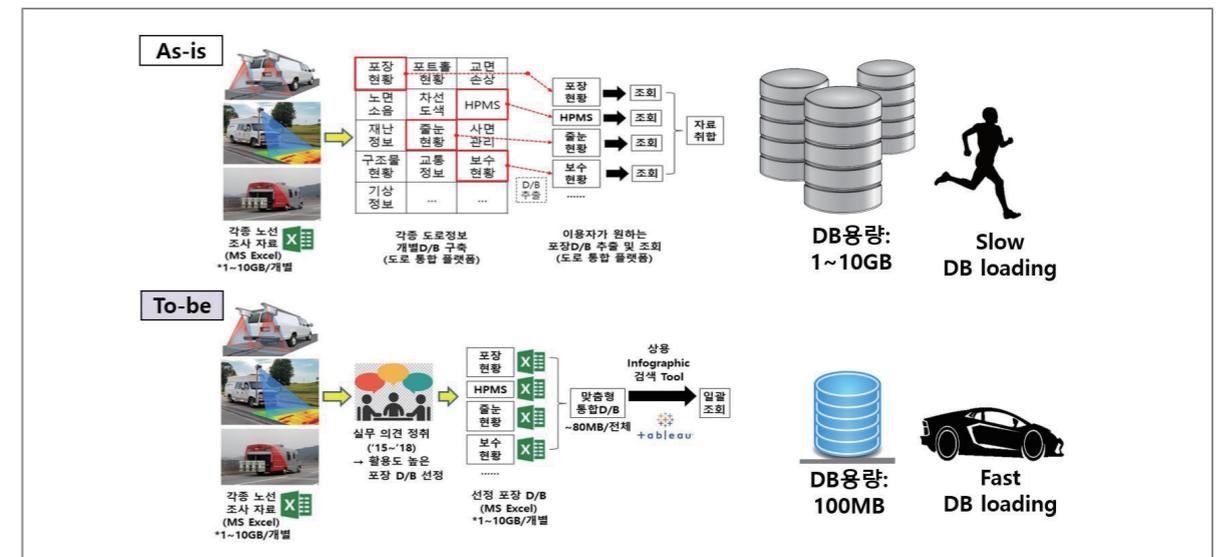
〈표 5〉는 현재 개발 되고 있는 스마트 포장관리 통합 플랫폼에서 시각화하고 있는 각종 포장관련 DB 목록을 보여준다.

〈그림 6, 7, 8〉은 개발 완료 및 진행 중인 “한국도로공사 스마트 포장관리 플랫폼” 개발 화면을 보여준다. 현재 PC 버전은 개발이 완료된 상태이며, 모바일 버전은 PC 버전 그래픽의 단순화(Migration) 및 중앙서버 구축 및 시험 운영 등이 진행되고 있는 상황이다. 2023년 시제품 개발 완료를 목표로 하고 있으며, 2024년부터 한국도로공사 전 직원에게 배포하여 사용될 예정이다.

현재 PC버전은 *.twgdx file의 제작 및 배포를 통해서 오프라인으로 운영되고 있으며, 모바일 버전은 중앙서버 중심으로 온라인 접속 방식으로 시험 운영되고 있다. 앞서 언급한 것처럼 2023년 최종 시제품 개발까지 그 완성도를 높여 2024년부터 본격적으로 시험 운영 및 개방 성과물 고도화를 실시할 예정이다.

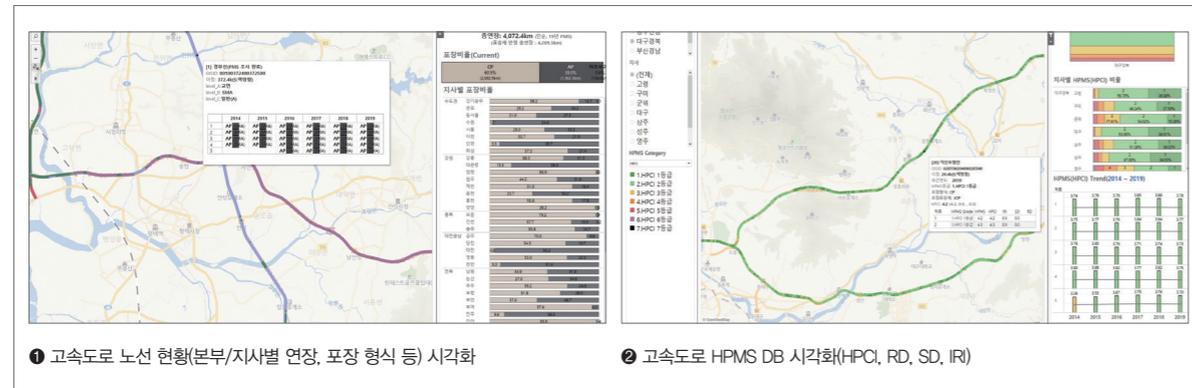
〈그림 5〉 스마트 포장관리 통합 플랫폼 DB 파일 제작 개념도

(출처: 도로교통연구원)



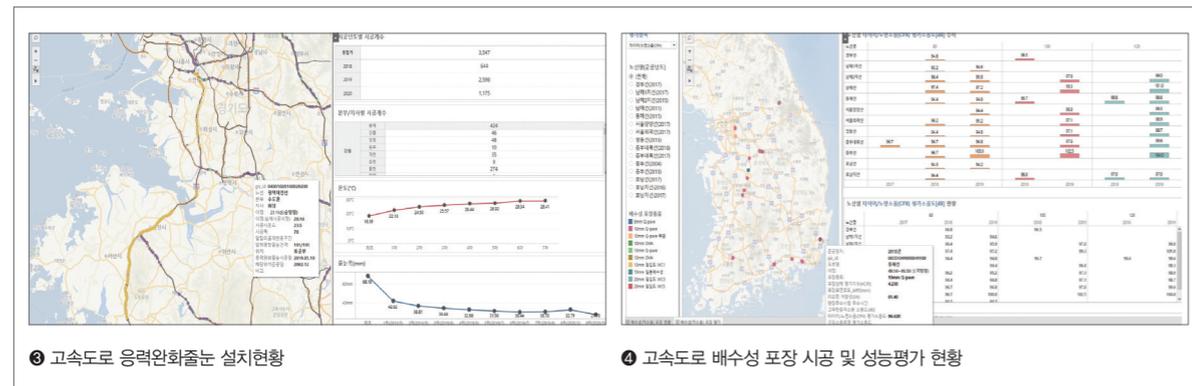
(그림 6) 고속도로 스마트 포장관리 통합 플랫폼 개발화면 (PC, Windows)

(출처: 한국도로공사 도로교통연구원)



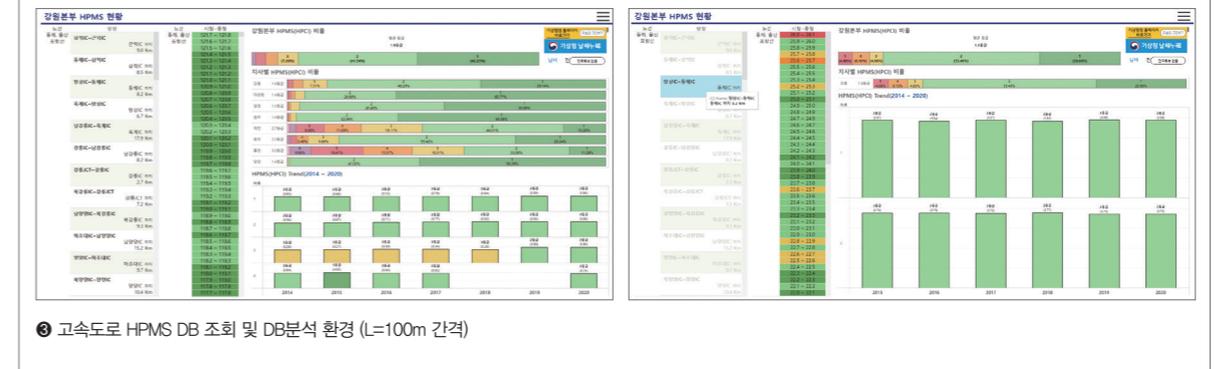
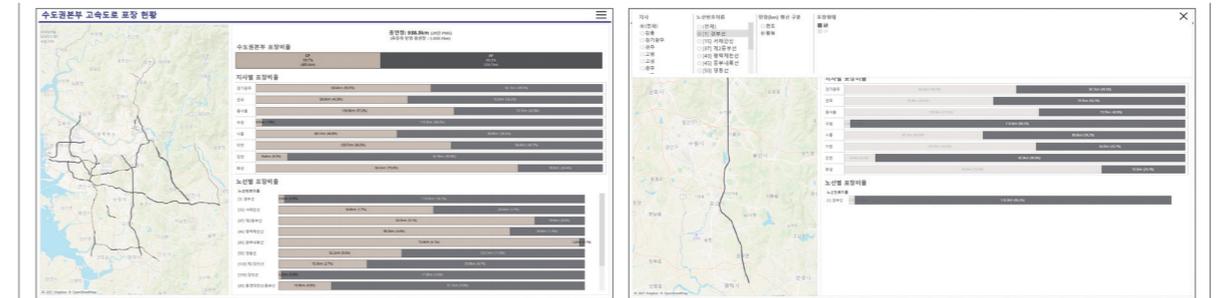
(그림 7) 고속도로 스마트 포장관리 통합 플랫폼 개발화면 (PC, Windows)

(출처: 한국도로공사 도로교통연구원)



(그림 8) 고속도로 스마트 포장관리 통합 플랫폼 개발화면 (모바일, Android/IOS)

(출처: 한국도로공사 도로교통연구원)



이를 통해 한국도로공사는 고속도로 포장관리의 진정한 One-click active mobility를 실현할 수 있을 것이다.

5. 시사점

고속도로는 과거 대비 유지관리의 중요성이 크게 부각되는 상황이며, 효율적 유지관리 업무의 수행을 위해서는 HPMS 빅데이터 DB의 정확한 조회와 분석이 반드시 필요하다. 이런 대용량 빅데이터 DB를 효율적이고 능동적으로 다루기 위해서 시각화, 즉 수치의 인포그래픽화(Infographics)는 매우 효과적인 수단이다. 현재 한국도로공사에서 개발 중인 고속도로 스마트 포장관리 통합 플랫폼은 디지털 트윈 기반의 미래 지향적 고속도로 포장조사 DB 운영의 한 방향성을 보여

주는 가시적 성과이다. 한국도로공사 도로교통연구원은 앞으로도 개발된 및 실무진과 지속적인 소통을 통해 디지털 고속도로를 실현하여 국민에게 보다 편안하고 안전하며 품격 있는 도로를 제공하도록 노력하겠다.

참고문헌

- 김영훈, 디지털 트윈 어떻게 전개될 것인가?, 포스코 경영연구원, 2018.
- 변성현, 디지털 트윈과 세물레이터, 전기의 세계, 2018
- Moradi, Maryam, and Gabriel J. Assaf, "Building an Augmented Reality Experience on Top of a Smart Pavement Management System," Buildings 12.11 (2022): 1915.
- Shon, Heeseung, et al, "Autonomous condition monitoring-based pavement management system," Automation in Construction 138 (2022): 104222.
- Gharieb, M., Nishikawa, T., Nakamura, S., & Thepvongsa, K. (2022). Modeling of pavement roughness utilizing artificial neural network approach for Laos national road network. Journal of Civil Engineering and Management, 28(4), 261-277.
- Jalenauskienė, E., & Kasperuniene, J. (2022). Infographics in higher education: A scoping review. E-Learning and Digital Media, 20247530221107774.