

숫자와 그림으로 보는 터널 이야기

- 제13강 숫자와 그림으로 보는 스마트 터널 -

Trends and Changes of Smart Tunnel



김영근

(주)건화 R&D센터 부사장,
한국터널지하공간학회 감사, 공학박사/기술사



[스마트 터널 Smart Tunnel]은 터널의 설계-시공-운영 전 과정을 디지털 기술 기반으로 통합하여, 터널의 안전성·효율성·지속가능성을 극대화한 차세대 터널 운영 체계를 말한다. 최근 건설분야에서의 AI 기술 및 스마트 기술 적용에 대한 관심이 많아지면서 스마트 터널은 새로운 핵심 이슈

가 되고 있다. 표 1에는 스마트 터널의 주요 특성과 기술 트렌드를 핵심 키워드로 정리하였다. 본고에서는 10가지 핵심 키워드를 중심으로 스마트 터널의 적용 사례와 스마트 터널 구축에 있어 해결해야 할 과제와 향후 전망에 대하여 기술하였다.

[표 1] 스마트 터널 Smart Tunnel의 핵심 키워드

	Key Word	As-is	To-be
1	Digital Twin 터널	3D 시각화	예측시뮬레이션
2	BIM 기반 통합관리	설계-시공 BIM	설계-시공-운영 통합
3	센싱·모니터링 고도화	개별 센서	자동데이터 융합
4	AI 기반 위험예측 및 의사결정	제한적 알고리즘	고정확 예측시스템
5	스마트 시공 자동화	부분 자동화	전공정 자동화
6	초연결 인프라 터널	ITS 부분 연계	완정융합 ITS
7	스마트 환기·환경 제어	센서 기반 제어	AI 최적화 운영
8	스마트 유지관리	단발성 기계적 점검	예측 유지관리
9	비상대응·재난안전 자동화	부분 자동 제어	실시간 자동대응
10	초미래 Hyper-Smart Tunnel	개별 디지털 요소	메가 통합 플랫폼

1. Digital Twin 터널

1.1 디지털 트윈의 특성

스마트 터널로의 전환에서 가장 핵심적인 기술은 디지털 트윈(Digital Twin)이다. 디지털 트윈은 터널을 하나의 가상 공간에 동일하게 구현한 가상 쌍둥이 구조물로, 지반·구조물·환기·교통·안전설비 등의 상태를 실시간으로 반영하고 미래 상황을 예측하는 지능형 관리 플랫폼이다. 터널 내부의 모든 센서, 장비, CCTV가 디지털 트윈 모델과 연동되며, 가상공간에서 다양한 시나리오를 실험할 수 있다는 점이 가장 큰 장점이다.

특히 화재·침수·붕괴·연기 확산과 같은 비상 상황을 사전에 시뮬레이션함으로써 대응 의사결정을 과학적으로 최적화할 수 있다. 기존 운영 방식이 '사후 대응 중심'이었다면, 디

지탈 트윈 터널은 예측·진단·선제 대응 중심의 운영 체계로 진화하고 있다. 터널 운영자는 디지털 트윈 화면을 통해 장비 오작동, 환기 상태, 교통 정체, 연기 확산 등을 직관적으로 파악하고 현장에서 즉시 대응할 수 있다.

[그림 1] 디지털 트윈

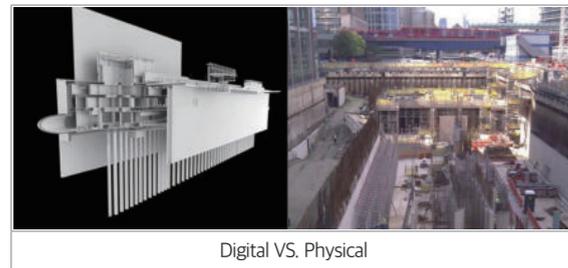


1.2 디지털 트윈 터널 사례

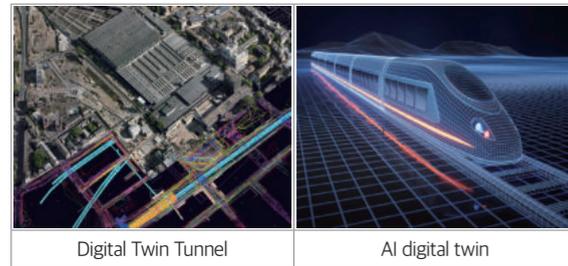
싱가포르 LTA는 지하철·지하철승센터·도로터널 전반에 통

합 디지털 딜리버리 기술(Integrated Digital Delivery)을 적용하여, 공정부터 운영까지 모든 데이터를 디지털 트윈으로 관리하고 있다. 영국 Crossrail 프로젝트 또한 BIM 기반 디지털 트윈을 구축해, 시공 단계의 간섭 검토부터 운영 단계의 설비 배치·유지관리까지 디지털 플랫폼에서 처리한다. 국내에서는 일부 고속도로 터널과 도시철도에서 디지털 트윈 기반의 환기·조명 제어 시범 사업이 진행되고 있다.

[그림 2] 디지털 트윈 터널 적용사례 - Crossrail



[그림 3] 디지털 트윈 터널 적용사례 - HS1



1.3 디지털 트윈 터널의 과제와 전망

디지털 트윈의 완성도를 결정하는 요소는 '센서 데이터의 신뢰성'과 '데이터 표준화'이다. 센서 오작동, 데이터 전송 지연, 네트워크 장애가 발생하면 DT의 가치가 급격히 떨어지므로 고신뢰·고내구성 계측기 구축이 필수적이다. 또 설계-시공-운영 단계에서 생성되는 데이터를 하나의 표준으로 정렬하지 않으면 통합 관리가 어렵다. 그럼에도 디지털 트윈은 향후 도시 전체의 지하공간을 통합 관리하는 'Underground Digital Twin City' 개념으로 확장될 전망이며, 스마트 터널의 중요한 운영 기반으로 자리 잡을 것이다.

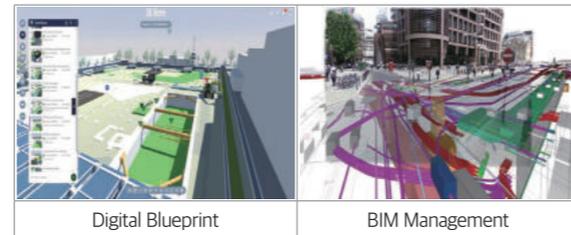
2. BIM 기반 통합관리

2.1 BIM 기반 통합관리의 특성

스마트 터널은 더 이상 단순한 3D 모델링 시대가 아니다. 시공 단계의 공정(4D), 비용(5D), 재료정보와 유지관리 속성(6D·7D)까지 통합 관리하는 4D·5D BIM 기반의 디지털 딜리버리 시대로 전환되고 있다.

4D BIM은 공정(Schedule), 5D BIM은 비용(Cost)을 3D 모델과 연동함으로써 설계-시공-운영 전 과정을 하나의 디지털 플랫폼에서 관리할 수 있게 한다. 이는 터널 시공에서 매우 중요하다. 굴진 방향, 공정 흐름, 장비 배치, 환기 덕트, 전기·기계 설비 공간 등이 BIM 모델에서 사전 검토되기 때문에 시공 중 공정 간섭을 사전에 제거하고 설계 변경을 즉시 반영할 수 있다. 또한 5D BIM은 자재 투입량, 공사비 변동, 장비 가동률 등을 실시간으로 계산해 프로젝트 관리의 정확도를 높인다.

[그림 4] BIM 기반 통합관리



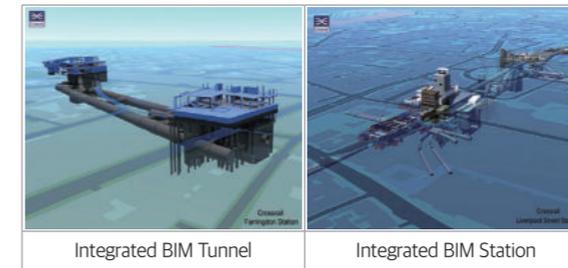
설계-시공-유지관리(Life-Cycle)를 하나의 플랫폼에서 연계함으로써, 현장 변경사항(Design Change), TBM 굴진 데이터, NATM 계측 결과, 공정 지연 위험 등을 실시간으로 3D 모델에 반영할 수 있다. 이를 통해 공정 충돌(Clash Detection), 공기 지연, 위험요소를 사전에 예측할 수 있으며, 특히 복잡한 도시 터널·대심도 터널에서 활용도가 높다.

2.2 BIM 기반 통합관리 사례

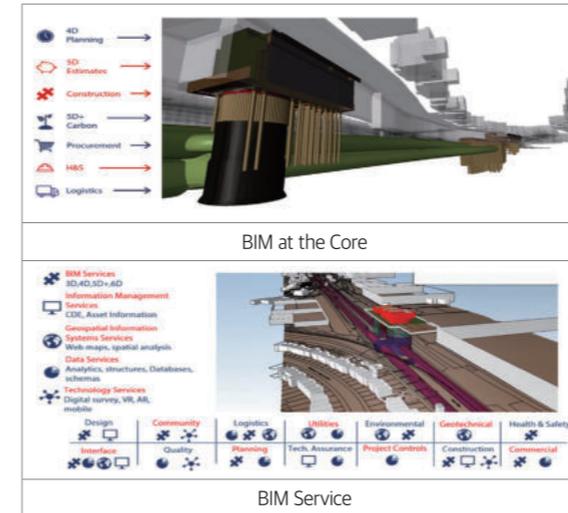
싱가포르 Thomson-East Coast 라인에서는 터널 공사 모든 과정에서 BIM 모델을 활용하여 공정·자재·사고 위험을

사전 검토하였다. 싱가포르 IDD 사례에서는 설계-시공-운영을 단일 BIM 모델로 통합하여 공정 시간 약 20%, 현장 오류 약 30% 감소의 효과가 보고되었다. 영국 HS2 고속철도 터널 역시 BIM 기반으로 충돌 검토와 위험 분석을 실시하고 있으며, 국내에서는 GTX-A 노선에서 지하구조물의 공정 시뮬레이션과 공간 배치 검토에 BIM이 적극 활용되고 있다.

[그림 5] BIM 기반 통합관리 적용사례 - Crossrail Project



[그림 6] BIM 기반 통합관리 적용사례 - HS2 Project



2.3 BIM 기반 통합관리의 과제와 전망

하지만 BIM 기반 통합관리에는 데이터 속성 표준화, 실무자 교육, 설계-시공 간 데이터 단절 등 현실적 문제가 존재한다. 운영 단계에서 BIM을 지속적으로 활용하기 위해서는 시공 중 발생하는 데이터가 모델에 자동 반영되는 체계가

필요하다. 장기적으로 BIM은 운영 데이터를 포함한 6D·7D BIM으로 확장되며 디지털 트윈과 융합된 Full Life-Cycle 관리체계로 자리 잡을 전망이다.

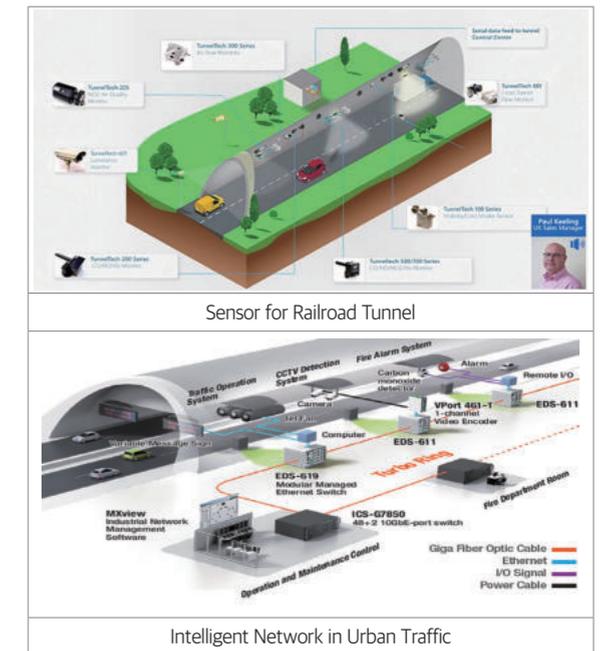
3. 센싱·모니터링 고도화

3.1 센싱·모니터링 고도화 특성

스마트 터널의 기초는 정확한 계측과 모니터링이다. 기존의 터널 계측은 인력 기반의 수동 측정 위주였으나, 최근에는 IoT·섬유광학(FBG)·레이저 스캐너·AI-CCTV 등 지능형 센싱기술의 발전으로 실시간 자동 모니터링(SHM: Structural Health Monitoring)이 가능해졌다.

터널 라이닝의 변위, 균열, 하중, 내공변형, 지반 침하, 온·습도, CO₂, 미세먼지, 연기 농도 등이 자동 측정되며, 설비 상태 역시 실시간 진단된다. 이러한 데이터는 디지털 트윈·BIM과 연동되어 구조물의 위험을 정량화된 수치로 평가할 수 있어 정성적 경험 중심 관리에서 정량적 위험관리로 전환되고 있다.

[그림 7] 센싱·모니터링 고도화



스마트 터널의 기반은 정확한 계측이다. 기존의 인력 점검 방식은 주기적·선택적 점검에 불과했지만, SHM은 IoT 센서·FBG·LiDAR·고해상도 변형 계측 시스템 등을 활용하여 터널의 변형, 균열, 누수, 진동, 가스농도, 미세먼지 등을 실시간으로 측정한다. 특히 FBG 센서는 대심도·고수압 환경에서도 장기적 정확도를 유지하며, 터널 라이닝 전체의 변형 패턴을 연속적으로 감시할 수 있다. 그 결과, 구조물 위험 징후를 초기 단계에서 발견하는 것이 가능해진다.

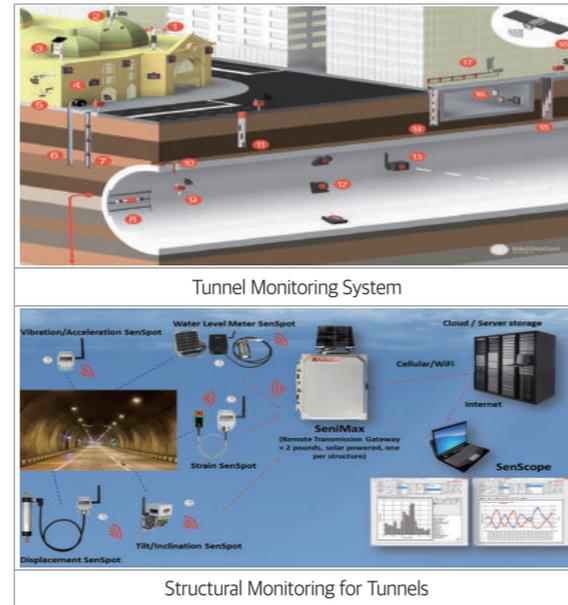
3.2 센싱·모니터링 고도화 사례

일본의 도심지 대심도 유틸리티 터널에서는 FBG 센서를 통해 라이닝 변위·온도 변화·지반 거동을 장기간 모니터링하고 있으며, 유럽 고속철도 터널에서는 LiDAR 스캐너가 통과할 때마다 터널의 내공 변형을 자동으로 기록해 디지털 모델과 비교한다. 국내에서는 도시철도·상수도 터널에서 자동 계측 시스템 구축이 확대되는 추세다.

[그림 8] 센싱·모니터링 고도화 적용사례



[그림 9] 센싱·모니터링 고도화 적용사례



3.3 센싱·모니터링 고도화 과제와 전망

센싱 데이터는 많지만 이를 해석할 전문 인력이 부족하다는 점이 가장 큰 문제다. 또한 터널 환경은 고습·고열·유지 관리 접근성이 어려워 센서 고장이 잦다. 향후에는 데이터 축적이 진행됨에 따라, SHM 시스템 자체가 위험 패턴을 분석하고 자동으로 경보를 발령하는 '지능형 SHM' 개념으로 진화할 전망이다.

4. AI 기반 위험예측 및 의사결정

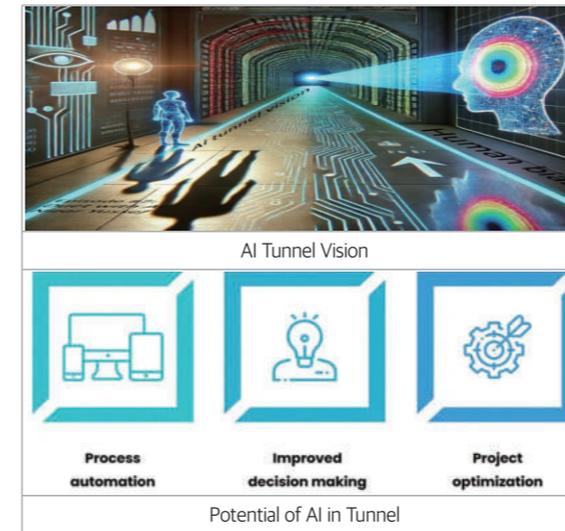
4.1 AI 기반 위험예측 및 의사결정의 특성

지능형 터널 관리의 핵심은 AI 기반 위험예측 시스템이다. AI는 대규모 센서 데이터와 과거 사고 이력을 학습하여 지반 불안정, 침하, 누수, 라이닝 균열, 화재 위험 등을 발생 전 단계에서 탐지한다.

예를 들어, TBM 굴진 중 토크·추력·RPM 패턴을 분석하여 지반조건 변화를 탐지, NATM 터널 내공변형 패턴을 AI가 분석하여 위험 지점을 자동 예측, 환기·연기센서 데이터를 분석하여 화재 확산 속도를 즉시 계산, 도심지 교통량·속도

데이터를 바탕으로 사고 위험 구간 자동 경보, 이처럼 AI 기반 스마트 터널은 기존의 반응적 운영이 아닌, 사전예방적 운영(Preventive Operation)을 가능하게 한다. 영국·싱가포르·일본에서는 이미 AI 기반 터널 관제시스템이 상용화되고 있다.

[그림 10] AI 기반 위험예측 및 의사결정

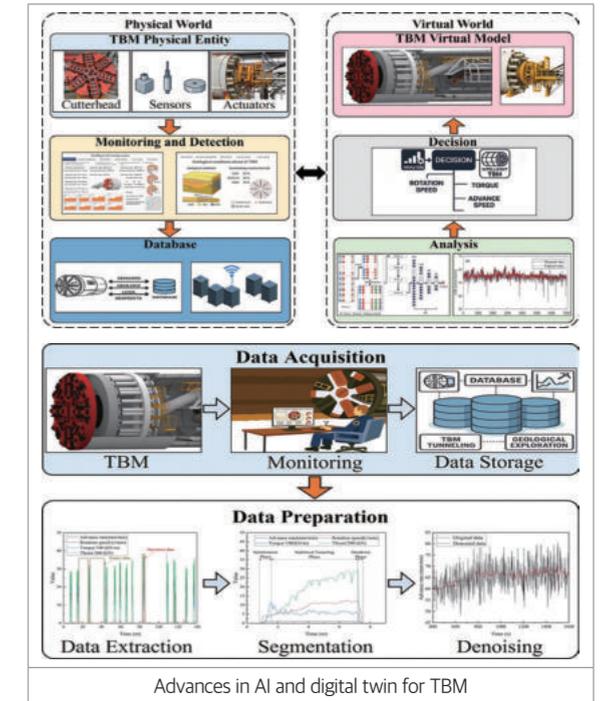


AI는 센서에서 들어오는 방대한 데이터를 분석하여 인간이 인식하기 어려운 패턴까지 탐지해 낸다. AI는 지반 침하 패턴, 연기 농도 변화, 철도·차량 속도 변화 등을 학습하여 화재·침수·붕괴·사고 위험을 사전에 알려준다. 특히 지하터널에서의 화재는 초기 연기 확산 속도가 빠르기 때문에 AI 기반 예측은 인명 안전에 결정적인 역할을 한다.

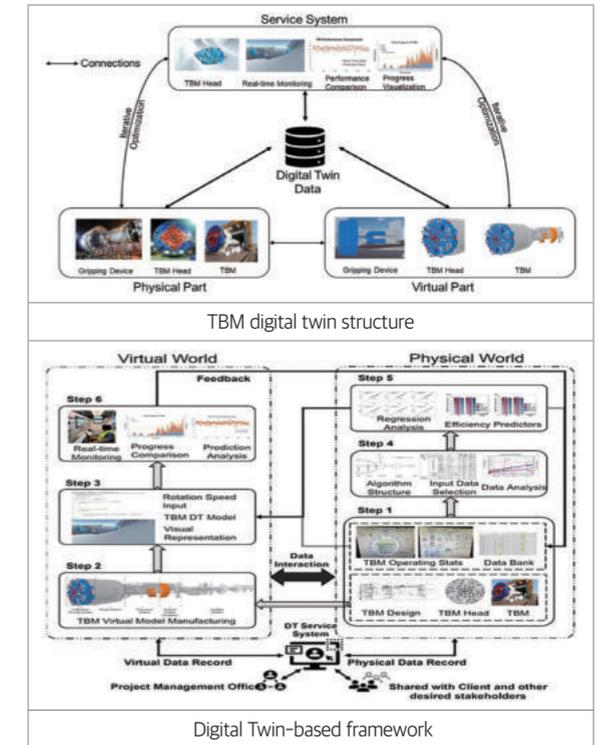
4.2 AI 기반 위험예측 및 의사결정 사례

유럽 도심지 터널에서는 AI 기반 사고 위험 예측 시스템을 활용해 교통사고 가능성이 높은 시간대·환경을 분석하고 조치를 취한다. 미국의 일부 도로터널에서는 교통량·차종별 비율·기상정보를 학습해 사고 위험을 자동으로 예측한다. 국내에서도 연기 농도 변화 패턴을 AI가 분석해 고장 또는 화재 위험을 조기에 감지하는 시스템이 도입되는 단계이다.

[그림 11] AI 기반 위험예측 및 의사결정 적용사례 - TBM



[그림 12] AI 기반 위험예측 및 의사결정법 적용사례 - TBM



4.3 AI 기반 위험예측 및 의사결정 과제와 전망

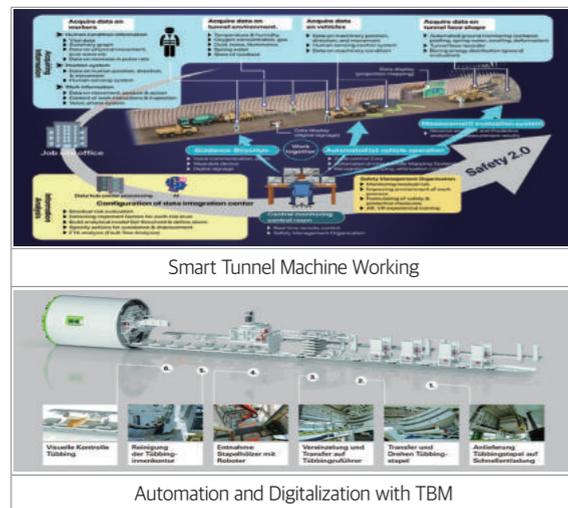
AI 예측의 정확성을 담보하기 위해서는 방대한 학습 데이터가 필요하지만, 국내는 터널 사고가 많지 않아 데이터 축적이 부족한 문제가 있다. 또한 AI 판단의 오류가 발생할 경우 책임 소재 문제도 남아 있다. 그럼에도 AI는 향후 자동화된 운영체계의 중심이 되며, 디지털 트윈·SHM과 결합하여 안전한 '예측형 스마트 터널'을 구현할 전망이다.

5. 스마트 시공(Smart Construction) 자동화

5.1 스마트 시공의 특성

터널 시공 현장은 AI·IoT·로봇·BIM을 결합한 스마트 시공 기술로 빠르게 변화하고 있다. TBM 굴진 현장에서는 토크, 추력, 이그레스 압력, 이수량 등이 자동 수집되고, 시가 지반 변화에 따라 Cutterhead RPM을 자동 조정하는 AI-TBM 운용 기술이 확산되고 있다. NATM 현장에서도 자동 계측 센서, 드릴로봇, 쇼크리트 로봇, 3D 스캐닝 기반 라이닝 품질 확인, 등이 도입되며 사람의 위험을 줄이고 품질을 향상시키고 있다. 또한 자율주행 로봇(Inspection Robot), 트랙 드론 등이 굴착면 및 라이닝을 자동 스캔해 굴진 상황을 실시간 파악하여 공정과 품질에 활용할 수 있다.

[그림 13] 스마트 시공 기술



터널 시공 단계에서부터 디지털화가 이루어지는 것이 스마트 터널의 기본이다. TBM 굴진 데이터를 실시간 수집하고 AI 분석을 통해 토크·추력·RPM을 자동 조정하는 기술, 로봇을 활용한 드릴링·지보공 설치·쇼크리트 작업 등이 대표적이다. 또한 3D 스캐닝을 통해 라이닝 시공 품질을 실시간으로 확인하고 즉시 수정하는 과정도 증가하고 있다.

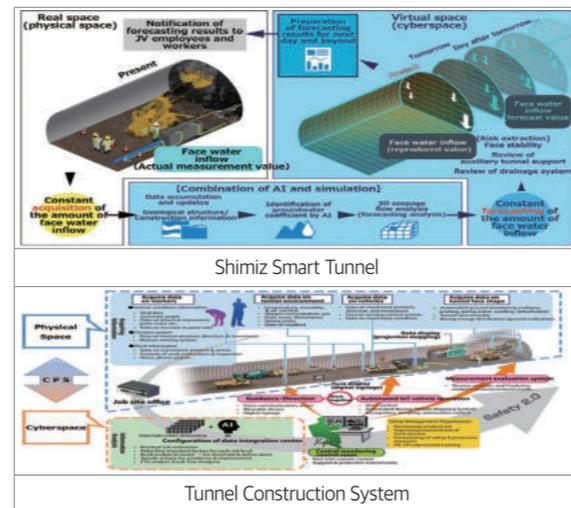
5.2 스마트 시공 사례

일본 및 중국의 Mega TBM 프로젝트는 AI 기반 자동굴진 제어 시스템을 적용하여 굴진 효율·정확성을 향상시켰다. 유럽의 NATM 터널에서는 로봇으로 드릴링·격자지보 설치·쇼크리트 타설을 수행해 인력 위험을 최소화했다. 국내에서는 일부 사면·갱구 구간에서 로봇 점검 및 자동 계측 기술이 활용되고 있다.

[그림 14] 스마트 시공 기술 적용사례 - 싱가포르



[그림 15] 스마트 시공 기술 적용사례 - 일본 Shimiz 건설



5.3 스마트 시공의 과제와 전망

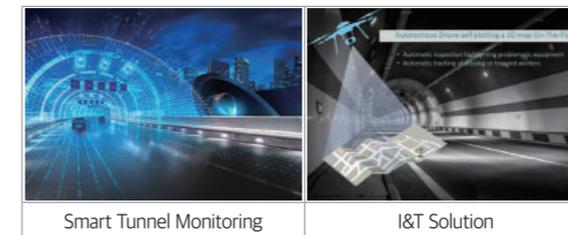
스마트 시공 장비는 고가이고, 기존 인력 기반 시공 방식과의 충돌도 있어 현장 적용이 쉽지 않다. 또한 로봇·AI 장비 운용에 대한 교육이 부족하다. 그럼에도 스마트 시공은 터널 시공의 기본으로 자리 잡을 것이며, 시공 데이터는 운영 단계로 자동 연계되어 '시공-운영 데이터 일체형 터널 관리'가 가능해질 전망이다.

6. 초연결 인프라 터널 (Connected Intra Tunnel)

6.1 초연결 인프라 터널의 특성

스마트 터널은 터널 내부 장비·차량·관제센터가 네트워크로 연결되는 초연결(Hyper-Connected) 인프라이다. 모든 센서, 환기장치, 조명, CCTV, ITS(지능형교통체계), 운전자 정보 시스템(VMS), 소방설비 등이 실시간으로 상호 통신하며, 중앙 관제센터에서 이를 통합적으로 제어한다. 특히 자율주행차 시대를 대비하여 V2I(Vehicle to Infrastructure), V2T(Vehicle to Tunnel), 도로-철도-유틸리티 통합 관제가 필수 요소로 대두되고 있다.

[그림 16] 초연결 인프라 터널



6.2 초연결 인프라 터널사례

해외 선진국의 SMART Tunnel(말레이시아), 중국·일본의 복합 관제센터 등이 대표 사례이며, 국내에서도 서울·부산의 도시터널과 고속도로 터널에서 단계적 도입이 시작되고 있다. 말레이시아 SMART Tunnel은 홍수 배수 및 교통 운영 기능을 하나의 통합 관제센터에서 관리하는 대표적 초

연결 인프라이다. 네덜란드의 도심 터널도 ITS·신호·환경데이터를 통합하여 운영 효율을 극대화하고 있다. 국내에서는 대도시 주요 터널에서 통합 관제센터가 확대되고 있다.

[그림 17] 초연결 인프라 터널 적용사례



[그림 18] 초연결 터널 적용사례



6.3 초연결 인프라 터널의 과제와 전망

네트워크 지연이나 서버 장애는 스마트 터널의 방재 기능을 저하시킬 수 있는 치명적인 요인이므로, 반드시 고신뢰성 이중화 시스템을 구축해야 한다. 아울러 이기종 장비 간

의 원활한 데이터 연동을 위해 통신 프로토콜의 표준화 작업이 선행되어야 한다. 이러한 기반이 마련된다면 터널은 단순한 통로를 넘어 차량과 도시를 하나로 잇는 '초연결 지하 스마트 그리드' 인프라로 거듭날 것이다.

7. 스마트 환기·환경 제어

7.1 스마트 환기·환경제어의 특성

터널 내 공기질과 환기 시스템은 스마트 터널의 핵심 요소이다. 최근에는 AI 기반 환기 알고리즘을 적용하여 연기·미세먼지·유해가스·온도·습도 등을 자동으로 분석하고, 상황에 따라 풍량과 방향을 최적화하는 지능형 시스템이 도입되고 있다. 화재 발생 시 연기 흐름을 실시간 시뮬레이션하여 배연팬 제어, 비상구 유도 교통 정체 차단, 온도 상승 대비를 자동으로 수행한다.

[그림 19] 스마트 환기·환경 제어

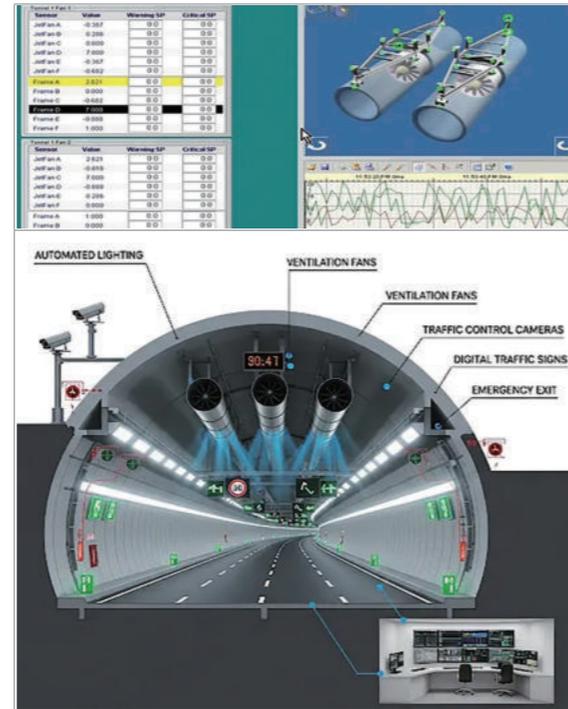


스마트 환기 시스템은 터널 내부의 CO, NOx, PM10, 연기 농도, 온도·습도 데이터를 실시간 분석해 시가 자동으로 환기팬 풍량·풍향을 조절한다. 기존의 고정식 환기에 비해 에너지 효율이 높고 화재 시 빠른 배연이 가능하다.

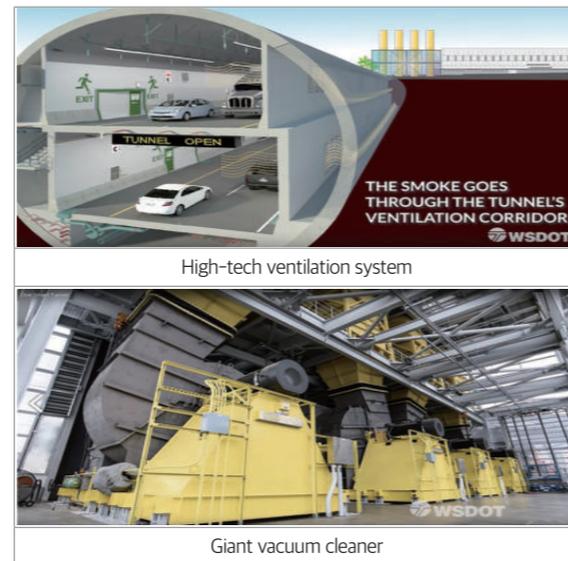
7.2 스마트 환기·환경제어의 사례

일부 국가에서는 AI 기반 환기 제어로 에너지 사용량 약 15~20% 절감 효과가 검증되었다. 유럽의 여러 도로터널은 AI 기반 환기 제어로 에너지 소비를 20% 가까이 절감했다. 일본 도심지 터널은 연기 농도 변화 패턴을 분석해 배연 방향을 자동 조정한다. 국내에서도 미세먼지·온도 기반 환기 시스템이 확대되고 있다.

[그림 20] 스마트 환기·환경 제어 적용사례 - Heysen Tunnel



[그림 21] 스마트 환기·환경 제어 적용사례 - Seattle Tunnel



7.3 스마트 환기·환경제어의 과제와 전망

센서 오염으로 인한 오작동 문제, 환기 에너지 절감과 방재 기능의 균형 확보가 주요 과제이다. 디지털 트윈 기반 연기

확산 시뮬레이션과 결합해 화재 대응 능력을 획기적으로 늘릴 수 있으며, 장기적으로는 '자율 배연 시스템'으로 진화될 것이다.

8. 스마트 유지관리(Smart Maintenance)

8.1 스마트 유지관리의 특성

터널 유지관리 스마트 기술 도입의 효과가 가장 큰 분야이다. 기존의 점검 방식은 사람이 직접 터널을 순찰하며 결함을 탐지하는 방식이었으나, 스마트 유지관리 AI·센서·3D 스캐닝·GPR 탐사 기술을 적용하여 결함을 자동 인식하고 평생 관리(Life-Cycle Maintenance)**를 가능하게 한다. 특히 라이닝 균열·박락 자동 검출, 누수 패턴 변동 자동 감지, 덕트·전기실 장비 고장 예측(Predictive Maintenance), 3D 라이닝 스캔 기반 단면 변화 추적 등이 도입되고 있다.

[그림 22] 스마트 유지관리



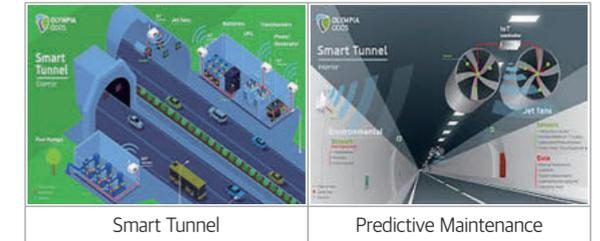
3D 스캔, AI 기반 이미지 분석, GPR, 자동계측을 활용해 균열·박락·누수·변형을 자동 탐지하고 유지관리 이력을 체계적으로 관리하는 기술이다. 기존 수동 점검 방식 대비 정확도와 속도가 매우 높다.

8.2 스마트 유지관리의 사례

유럽 고속철도 터널은 3D 스캐닝 장비가 일정 속도로 이동하며 터널 단면의 변형을 자동 기록한다. 일본 산악터널은 누수 패턴을 시가 자동 분석해 보수 시점을 판단한다. 국내

에서는 도시철도·상수도 터널에서 자동 계측 기반 유지관리 시스템이 점진적으로 확산되고 있다.

[그림 23] 스마트 유지관리 적용사례 - Athens Patras Pyrgos Highway



[그림 24] 스마트 유지관리 적용사례 - HS2 Project



8.3 스마트 유지관리의 과제와 전망

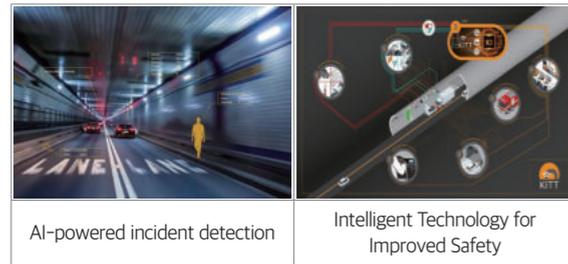
데이터 품질 편차, 결함 DB 부족, 전문 인력 부족이 현재 문제점이다. 하지만 장기적으로 자동화된 유지관리 체계가 정착되면 유지관리 비용 절감과 사고 방지 효과가 크게 증가할 전망이다.

9. 비상대응·재난안전 자동화

9.1 비상대응·재난안전 자동화의 특징

스마트 터널은 화재·사고 발생 시 즉각적인 자동 대응 기능을 갖춘다. 터널 내 센서가 위험을 감지하면 가변차로·차단기 자동 제어, 비상유도등 자동 점등, 구역별 환기·압력 제어, 인명 대피 경로 자동 안내, 관제센터 자동 알림이 동시에 실행된다. 디지털 트윈 플랫폼과 연동되는 경우, 화재·연기 확산 시뮬레이션 결과가 실시간으로 반영되며, 관제요원에게 최적의 대응 시나리오가 자동 제시된다.

[그림 25] 비상대응·재난안전 자동화

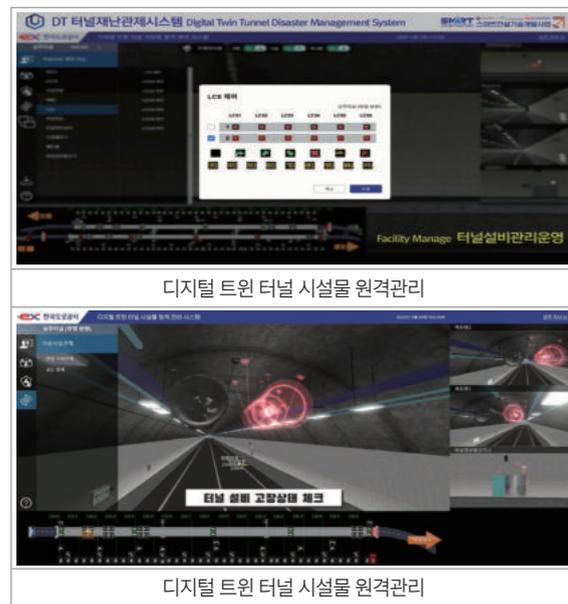


화재·사고·침수 발생 시 자동으로 위험을 감지하고, 환기·조명·차단기·비상 유도등·대피방향 등이 즉시 연동되는 자동화된 방재 체계이다. 기존의 '사고 발생 후 대응'이 아닌 '사고 발생 즉시 자동 대응' 방식이다.

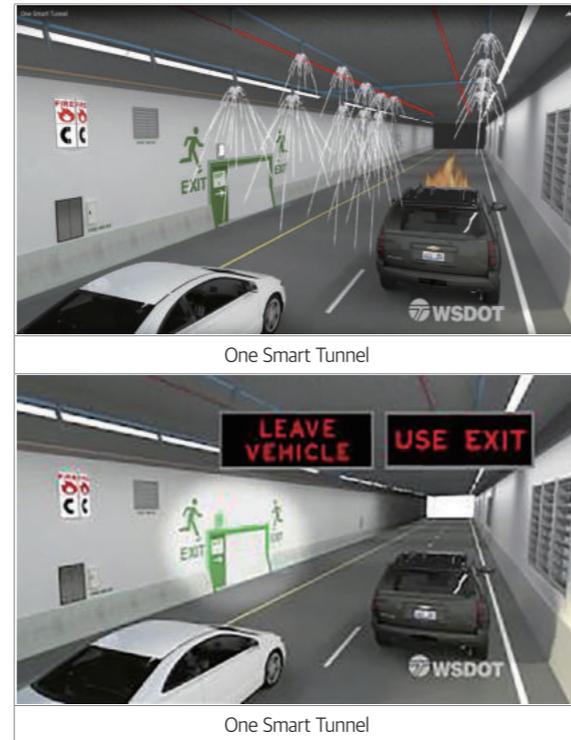
9.2 비상대응·재난안전 자동화의 사례

SMART Tunnel은 홍수시 교통터널 기능을 차단하고, 터널을 배수 시설로 자동 전환한다. 싱가포르 도로터널은 구역별 압력 제어 기반 배연 시스템을 통해 화재 발생 시 연기 이동을 최소화한다. 국내 방재센터도 점차 자동 대피유도 기능을 강화하고 있다.

[그림 26] DT 터널재난 안전관제시스템



[그림 27] 비상대응·재난안전 자동화 적용사례 - SR99 Project



9.3 비상대응·재난안전 자동화의 과제와 전망

센서 오류 시 오작동 가능성, 실시간 판단 알고리즘 개선, 운영자와 AI 간 의사결정 체계 정립이 필요하다. 미래에는 디지털 트윈 기반 시나리오 연동으로 재난 상황마다 최적 대응 전략이 자동 제공되는 단계로 발전할 것이다.

10. 초미래 “Hyper-Smart Tunnel”

10.1 초미래 Hyper-Smart Tunnel의 특징

스마트 터널은 화재·사고 발생 시 즉각적인 자동 대응 기능을 갖춘다. 터널 내 센서가 위험을 감지하면 가변차로·차단기 자동 제어, 비상유도등 자동 점등, 구역별 환기·압력 제어, 인명 대피 경로 자동 안내, 관제센터 자동 알림이 동시에 실행된다. 디지털 트윈 플랫폼과 연동되는 경우, 화재·연기 확산 시뮬레이션 결과가 실시간으로 반영되며, 관제요원에게 최적의 대응 시나리오가 자동 제시된다.

[그림 28] 초미래 Hyper-Smart Tunnel



Hyper-Smart Tunnel은 5-Hyper·5-High 개념(초단면·초장대·스마트화·안전화 등)을 스마트 운영기술로 확장한 미래형 터널 모델이다. 센서·AI·DT·BIM·로봇·ITS가 모두 통합된 형태로, 자율주행차 시대에 완전히 대응할 수 있는 터널이다.

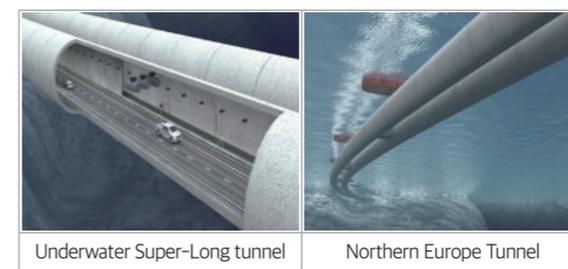
10.2 초미래 Hyper-Smart Tunnel의 사례

유럽의 지하 스마트 시티 구상에서는 도시 전체를 Digital Twin 기반으로 운영하는 모델을 제시하고 있다. 중동 국가들은 자율주행 터널을 건설 중이며, 국내에서도 대심도 복합터널 사업에서 Hyper-Smart Tunnel 개념이 검토되고 있다.

[그림 29] 초미래 Hyper-Smart Tunnel 사례 - Transatlantic tunnel



[그림 30] 초미래 Hyper-Smart Tunnel 사례 - Underwater floating tunnel



10.3 초미래 Hyper-Smart Tunnel의 과제와 전망

Hyper-Smart Tunnel 구축에는 대규모 초기 투자, 고난도의 기술 통합, 전문 인력 부족 등 복합적 과제가 있다. 그러나 도심지 지하공간의 확대와 대심도·초장대 터널 증가 추세를 감안하면 장기적으로 Hyper-Smart Tunnel은 '지하도시 핵심 인프라'로 발전할 것으로 전망된다.

◎ 스마트 터널의 과제와 전망

최근 대심도·초장대·복합 터널의 건설이 증가하고, 도심지의 교통량과 지하공간 활용도가 급격히 높아지면서 기존의 아날로그 기반 터널 관리 방식은 한계에 직면하고 있다. 위험은 더욱 복잡해지고, 안전 기준은 더욱 엄격해졌으며, 운영비 절감과 에너지 효율화 또한 필수 과제가 되었다. 이러한 환경 변화 속에서 터널의 설계·시공·운영 전주기를 디지털화하는 스마트 터널(Smart Tunnel)은 선택이 아니라 필연적 흐름이 되었다. 스마트 터널은 단순한 기술 도입이 아니라, 운영 철학의 전환을 의미한다. 사람의 경험과 직관 중심 관리에서 데이터 기반·AI 기반의 정량적 위험관리의 변화, 수동 점검 중심 운영에서 예측·진단·선제 대응 체계로의 변화가 핵심이라 할 수 있다.

◎ 스마트 터널 구현의 주요 과제

- **센서·계측 신뢰성 확보** : 스마트 터널의 출발점은 정밀한 센싱과 계측이다. 그러나 실제 현장에서는 센서 오작동, 노후화로 인한 정확도 저하, 열악한 환경(고온·고습·먼지·진동)으로 인한 고장 등이 빈번하게 발생한다. 센서 신뢰성이 확보되지 않으면 디지털 트윈과 AI 분석도의 미를 잃게 되므로, 고신뢰도 센서, 이중화 설계, 정기 캘리브레이션 체계 구축이 필수적이다.
- **데이터 통합·표준화의 부족** : 국내 터널은 프로젝트별로 서로 다른 계측 시스템, 관제 소프트웨어, 시설 관리 방

식을 사용해 왔다. 이로 인해 데이터 구조가 상이하고 통합이 어려워 스마트 터널 구축의 장애 요인이 된다. 이를 해결하기 위해서는 터널 운영 데이터 표준, BIM·DT 속성 값 표준, 국가 단위의 스마트 인프라 통합 프로토콜이 마련되어야 한다.

- **AI 의사결정의 검증체계 부족** : AI 기반 위험예측 기술은 초기 단계에서 전문가의 경험을 보완하는 수준이지만, 향후에는 현장 의사결정의 중요한 역할을 하게 된다. 그러나 AI 분석의 오류 가능성, 설명 가능성 부족 (Explainable AI, XAI) 등은 안전 분야에서 중요한 문제로 남아 있다. 따라서 AI 위험 예측 알고리즘의 검증 절차, 터널 운영자와 AI 간 역할분담 기준, 법·제도적 책임구조 정립이 필요하다.
- **구축 비용 및 경제성 확보** : 스마트 터널 구축에는 수천 개의 센서 설치, 데이터 플랫폼 구축, 네트워크 기반 확충, 디지털 트윈 운영센터 구축 등 상당한 초기 비용이 필요하다. 따라서 단기적 비용이 아닌 장기적 운영비 절감·사고 예방 효과를 포함한 LCC 관점의 경제성 평가 모델이 필요하다.
- **전문인력·운영조직의 역량 강화** : 스마트 터널은 데이터를 읽고 해석하고 통합적으로 판단할 수 있는 디지털 기반 운영 인력이 필수적이다. 운영자는 전통적 토목기술 뿐 아니라 데이터 분석, BIM/DT 운영, AI 이해, 네트워크·IoT 기술까지 복합적인 역량이 요구된다. 이를 위해 스마트 터널 전문 교육·자격 제도가 마련되어야 한다.

◎ 스마트 터널의 발전 방향과 미래 전망

- **Digital Twin 기반의 예측형 터널(Predictive Tunnel)로 진화** : 디지털 트윈 모델은 단순한 3D 시스템이 아니라, 실시간 계측 데이터와 시뮬레이션이 결합한 예측형

운영 플랫폼으로 발전하고 있다. 예를 들어, 라이닝 변형 → 붕괴 위험 시나리오 자동 예측 연기 센서 변화 → 연기 확산 경로 자동 계산, 지진 발생 → 라이닝 응력 변화 실시간 분석 등이 가능해져 운영 수준이 획기적으로 향상된다.

- **AI-TBM 및 스마트 시공으로 시공 단계부터 디지털화** : 터널 운영만이 아니라 시공 단계부터 디지털 플랫폼이 연계되는 방식으로 발전한다. AI-TBM, 자동 계측, 로봇 점검 등은 시공 데이터를 실시간으로 축적하고 이력 관리가 가능해지며, 이는 운영 단계에서의 위험예측 정확도를 높이는 기반이 된다.
- **초연결 인프라 기반의 자율주행 친화형 터널 구현** : 자율주행 교통체계가 본격화되면 터널은 V2T(Vehicle to Tunnel)이 가능한 고도의 통신 인프라를 필요로 한다. 터널 내부 조명·가변정보판·환기 설비 등이 차량과 실시간 통신하며 사고를 예방하는 스마트 교통통합 터널로 진화할 것이다.
- **환경·에너지 최적화를 위한 그린 스마트 터널** : 스마트 환기 시스템은 에너지 소비를 20% 이상 절감할 수 있으며, AI 기반 조명·환경 제어 기술을 통해 탄소 배출 저감형 터널 운영이 가능해진다. 향후에는 태양광 연계, 에너지 저장장치(ESS), 고효율 환기·배연 설비 등과 결합해 탄소중립 인프라형 터널로 발전할 것이다.
- **Hyper-Smart Tunnel로의 종합적 발전** : 앞서 제시한 10개 키워드는 최종적으로 Hyper-Smart Tunnel이라는 최적 모델로 귀결된다. 이는 Hyper-Sensing, Hyper-Intelligence, Hyper-Integration High-Safety, High-Efficiency 를 만족하는 미래 터널 운영체계이며, 자율주행·대심도 도시·초장대 터널 시대에 필수 요소로 자리 잡게 될 것이다. 

[업무 속 도로지식] 숫자와 그림으로 보는 터널 이야기

연재를 마치면서



지난 2022년 가을 한국도로협회지인 도로교통에 대한 원고 의뢰를 받아 시작된 [업무 속 도로지식- 숫자와 그림으로 보는 터널 이야기]에 대한 연재가 총 13강을 끝으로 대단원의 막을 내리게 되었다. 지난 13번의 강좌 내용을 정리하다 보니 나름 대단한 일을 해냈다는 생각과 함께 터널 기술자로서 보람을 느끼게 된다. 최근 대심도 지하도로 및 철도 지하화 사업 등으로 터널은 주요 현안으로 자리 잡게 되었다. 도로를 구축함에 있어 이제 터널은 반드시 요구되는 필수 구조물이 되었으며, 장대 및 초장대 도로 터널 설계 및 시공도 점차적으로 증가하고 있다. 하지만 현재까지의 터널 설계기준이나 시방서 그리고 전문서적 내용을 보았을 때, 도로 기술자들에게 있어 터널과 지하구조물에 대한 기술적 이해에는 한계가 있을 수밖에 없다고 생각한다. 이러한 관점에서 시작한 것이 바로 [업무 속 도로지식 - 숫자와 그림으로 보는 터널 이야기]이다. 이는 전문분야가 아닌 내용을 보다 알기 쉽고, 이해하기 편하게 설명하는 자료가 필요하며 이에 대한 가장 유효한 도구인 바로 숫자와 그림을 중심으로 터널에 대한 기술적인 내용을 기술하게 된 것이다. 총 13번의 강좌를 통해 기술된 [숫자와 그림으로 보는 터널 이야기]에 대한 이슈

는 도로분야 있어서 터널 및 지하공간분야에 대한 이해의 폭을 넓히고, 터널 분야에 대한 지식의 깊이를 심도 있게 하고자 하는 목적으로 터널 공법을 알기 쉽게 설명하고 터널관련 주요 이슈와 현안들을 중심으로 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 총 13강 연재가 진행되면서 3년이라는 시간이 훌쩍 지났다. 세월이 참 빠르기도 하다. 우리 일에 대한 열정과 우리 일에 대한 믿음으로 지난 시간 열심히 한 번도 거르지 않고 달려온 나 자신에게 고맙고, 본 [업무 속 도로지식 - 숫자와 그림으로 보는 터널 이야기] 연재 허락하고 게재해준 한국도로협회 관계자 모든 분들에게 진심으로 감사하다. 이번 [업무 속 도로지식 - 숫자와 그림으로 보는 터널 이야기] 연재가사가 도로기술자를 포함한 건설기술자들에게 많은 도움이 되었으면 하는 바람이다. 지난 30여 년 이상을 터널기술자로 살아오면서, 터널을 진정한 나의 업으로 생각하면서, 터널전문 엔지니어로 성장하고 발전하면서 가장 중요한 것은 바로 우리 일에 대한 자부심과 그 일을 통한 보람이 아닐까 생각한다. 그 보람 중에 하나가 전문지식을 공유하고 나눔으로써 작게는 터널 분야가 자리매김하고, 크게는 건설 분야가 더욱 발전하는 밑거름이 되기를 진심으로 기대해본다.

[업무 속 도로지식 - 숫자와 그림으로 보는 터널 이야기] 13강

구분	내용		공법	협회지
1강	터널 트랜드와 기술	Key word 10개	2022년 12월호	도로교통 169
2강	NATM 터널	Key word 10개	2023년 3월호	도로교통 170
3강	대심도 터널	Key word 10개	2023년 6월호	도로교통 171
4강	TBM 터널	Key word 10개	2023년 9월호	도로교통 172
5강	터널 붕괴사고	Case Review 11개	2023년 12월호	도로교통 173
6강	도심지 지하	Key word 10개	2024년 3월호	도로교통 174
7강	지하도로	Key word 10개	2024년 6월호	도로교통 175
8강	도심지 지하철도	Key word 10개	2024년 9월호	도로교통 176
9강	초장대 터널	Key word 10개	2024년 12월호	도로교통 177
10강	NATM 리스크와 안전관리	Risk 10개 / 안전 6개	2025년 3월호	도로교통 178
11강	TBM 리스크와 안전관리	Risk 10개 / 안전 6개	2025년 6월호	도로교통 179
12강	선진 터널공사 건설시스템	Key word 10개	2025년 9월호	도로교통 180
13강	스마트 터널	Key word 10개	2025년 12월호	도로교통 181