

알쓸재지  
알아두면 쓸모있고  
재미있는 지하도로  
이야기

Deep Going : Global Underground  
Roadways



김영근  
㈜건화 R&D센터 부사장  
공학박사 / 기술사

## 알쓸재지\*를 시작하면서

\*알아두면 쓸모있고 재미있는 지하도로 이야기

최근 들어 도심 공간제약의 문제를 해결할 대안으로 지하 공간을 활용한 지하 도로(Underground Roadway)가 주목받고 있다. 특히 주요 도심 지하 고속도로 건설이나 기존 도로의 지하화와 같은 대규모 프로젝트들이 본격적으로 구체화되고 있다. 본 강좌는 이러한 흐름에 발맞추어 세계 각국의 주요 프로젝트 사례를 바탕으로 지하도로의 핵심 기술 정보를 정리하였다. [알쓸재지 : 알아두면 쓸모있고 재미있는 지하도로 이야기]라는 제목 아래, 지하도로와 관련된 주요 이슈들을 총 10강으로 구성하여 체계적으로 기술하였다.

[알쓸재지 : 알아두면 쓸모있고 재미있는 지하도로 이야기 10강]의 구성과 내용

내 용		핵심 이슈
1	미국 보스턴 BIG DIG 지하도로	침매공법+개착공법, 도심지 재생
2	일본 도쿄 외곽순환 지하도로	대단면 TBM 공법, 도심도 터널
3	싱가포르 NSC 지하도로	개착공법, 도심지 복합공사
4	호주 시드니 West Connex 지하도로	로드헤더 굴착공법, 민원/환경 이슈
5	스페인 마드리드 M30 지하도로	TBM 공법, 장대 지하고속도로
6	프랑스 파리 A86 지하도로	TBM 공법, 장대 지하고속도로
7	말레이시아 쿠알라룸푸르 SMART 터널	TBM 공법, 복합기능 목적
8	홍콩 Trunk Road T2 지하도로	TBM 공법, 지능형 제어시스템
9	국내 지하도로 현황과 이슈 분석	NATM 공법, 도심지 교통솔루션
10	글로벌 지하도로 개발 전망과 과제	복합공법 적용, 스마트 AI 기술

## 제1강 미국 보스턴 BIG DIG 지하도로 프로젝트

The Big Dig – Central Artery/Tunnel Project in Boston

미국 보스턴 Big Dig 프로젝트는 1991년부터 2007년까지 진행된 미국 역사상 가장 비싸고 복잡한 도심 기반시설 재개발 사업이다. 막명 높은 고가도로를 지하화하고 해저터널을 건설하여 도시 교통난을 해소하고, 지상 공간을 공원화하여 도시를 재탄생시킨 성공적 사례이다. 본 프로젝트는 보스턴 다운타운의 노후화된 고가도로(Central Artery)를 지하로 옮기고, 로건 국제공항과 해저 터널로 연결하는 메가 프로젝트로서 만성적인 교통 정체를 해소하고, 하루 20만 대 이상의 차량이 다니던 고가도로를 지하화하여 도심 교통 흐름을 획기적으로 개선하였다. 또한 철거된 고가도로 자리에 '로즈 케네디 그린웨이(Rose Kennedy Greenway)'라는 선형 공원을 조성하여 시민 휴식 공간과 보행자 중심의 환경을 제공하였다. 공사 규모는 약 12.5km 규모의 지하 도로 건설로 1,300만 톤의 흙 처리, 철거 및 신설 등 난이도가 매우 높은 토목 공사이다.

본 프로젝트는 단절되었던 도시와 해안가를 연결하고, 주변 지역 개발(부동산 가치 상승)을 유도하여 보스턴의 도시 경관을 획기적으로 향상하였지만, 당초 예상보다 훨씬 길어진 공사 기간과 수십억 달러의 예산 초과로 인해 대규모 토목 사업의 관리 부실 사례로도 자주 언급되었다. 이 프로젝트는 지하 공간 개발을 통해 도시의 문제를 해결한 대표적인 성공 사례로, 현재까지도 전 세계 도시 계획 및 토목 공사의 벤치마킹 대상이 되고 있다.

### 1. 프로젝트 개요

보스턴의 중앙 간선도로/터널 프로젝트(Central Artery/Tunnel Project, CA/T), 우리에게 Big Dig로 잘 알려진 이 사업은 단순한 도로 건설을 넘어선 도시의 재탄생 과정이었다.

1950년대 건설된 고가도로(Central Artery)는 보스턴 도심을 가로지르며 경제 성장을 견인했지만, 시간이 흐르며 하루 19만 대의 교통량을 감당하지 못해 거대한 주차장으로 변했다. 더욱이 흉물스러운 고가도로는 도심과 아름다운 보스턴 항구(Waterfront)를 물리적으로 단절시키는 장벽이 되었다.

이를 해결하기 위해 보스턴시는 기존 고가도로를 철거하는 동시에 그 바로 아래에 8~10차로의 대규모 지하 도로를 건설하고, 항만 하부를 통과해 공항으로 연결되는 터널을 구축하는 대 계획을 세웠다. 1991년 착공하여 2007년 공식 완공되기까지 약 16년 동안 투입된 연인원은 수만 명에 달하며, 미국 토목 역사상 가장 비싸고 복잡한 프로젝트로 기록되었다.



[그림 1] 보스턴 Big Dig 프로젝트

## 2. 프로젝트의 주요 특성

### ■ Urban Regeneration(도시 재생의 정점)

Big Dig은 도시의 흉물이었던 고가 고속도로를 지하화 하여 도시의 맥락을 회복한 현대적 도시 재생의 상징적인 사례이다. 과거 소음과 매연으로 가득했던 고가도로 부지는 약 2.4km 길이의 Rose Kennedy Greenway라는 선형 공원으로 탈바꿈했다. 단절되었던 도심과 바다가 다시 만나며 주변 지가가 상승하고 상권이 부활하는 '도시 융합'의 전형을 보여주었다.



[그림 2] Urban Regeneration

### ■ Infrastructure Complexity(복합 인프라의 극치)

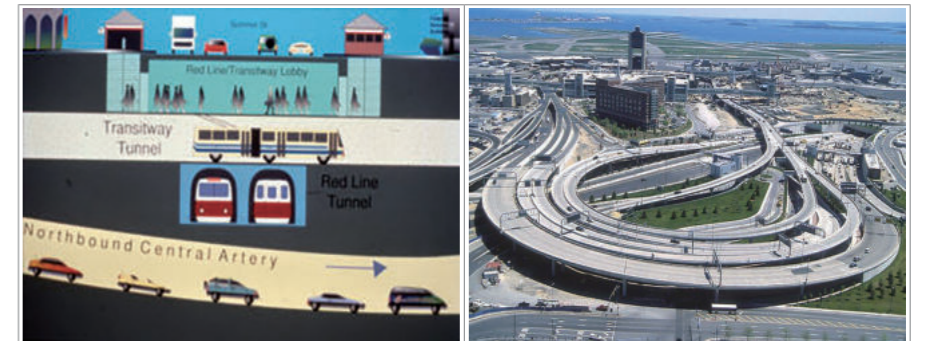
Big Dig은 미국 역사상 가장 거대하고 복잡하며 기술적으로 까다로웠던 도로 프로젝트로 평가받는다. 이 프로젝트는 단순히 터널을 뚫는 수준을 넘어 대도시의 심장부를 정지시키지 않은 채 지하를 완전히 재구성해야 했던 고도의 인프라 복합체였다. 보스턴의 오래된 지장물을 47km 이상 재배치해야 했으며, 운행 중인 3개의 지하철 노선과 수많은 고층 빌딩 아래를 불과 수 미터 간격으로 지나가는 초고난도 공사였다.



[그림 3] Infra structure Complexity

### ■ Multimodal Connectivity(입체적 교통망 구축)

Big Dig은 단순한 도로 지하화를 넘어 도시의 입체적 연결성(Multimodal Connectivity)을 획기적으로 개선한 사례로 평가받는다. 도심 정체 해소는 기본이며, 보스턴 로건 국제공항으로의 접근성을 획기적으로 개선했다. 또한, 세계 최장 사장교 중 하나인 레너드 P. 자킴 브리지를 통해 도로와 교량, 터널이 유기적으로 결합된 입체 교통망을 완성했다.

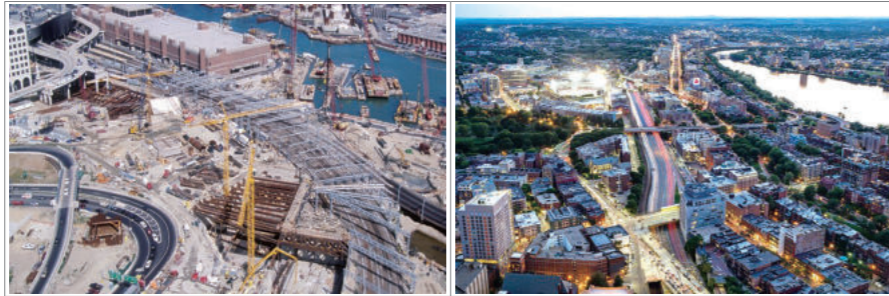


[그림 4] Multimodal Connectivity

### ■ Mega-Project Scale(대규모 메가 교통인프라 프로젝트)

Big Dig은 미국 역사상 가장 규모가 크고 기술적으로 복잡하며 비용이 많이 든 도시 도로 건설 사업이다. 투입된 콘크리트 양만 290만 m³에 달하며, 굴착된 토사량은 축구장을 15m

높이를 쌓았을 때 수백 개를 채울 수 있는 양이었다. 이는 단일 프로젝트로서 경제적, 사회적 파급력이 국가적 수준이었음을 의미한다. 이 프로젝트는 현재까지도 대규모 인프라 사업의 비용 관리 실패 사례이자, 동시에 고도의 공학적 성취를 보여 주는 대표적인 메가 프로젝트로 꼽힌다.



[그림 5] Mega-Project Scale

### 3. 지하공사 핵심 기술

#### ■ Slurry Wall Innovation(영구 벽체로서의 슬러리 월)

인접 건물의 침하를 방지하기 위해 대규모 Slurry Wall 공법을 적용하여 토목 공학의 혁신을 이루었다. 특히, 가시설로 설치한 Slurry Wall을 터널 본체의 영구 벽체로 활용하는 'Post-tensioned Slurry Wall' 기술을 적극 도입하여 공기를 단축하고 구조적 안정성을 극대화했으며, 이 기술은 대규모 도심 지하화 프로젝트의 표준 모델이 되었으며, FHWA 등을 통해 다양한 기술 전파가 이루어졌다.



[그림 6] Slurry Wall Innovation

#### ■ Ground Freezing(지반동결공법의 신기원)

지반 동결공법(Ground Freezing)은 Fort Point Channel 아래에 터널을 건설하기 위해 사용된 혁신적인 공법으로 South Station 하부를 지날 때, 상부 지하철과 철도 노선의 침하를 '제로'에 가깝게 제어해야 했다. 이를 위해 지반에 수천 개의 파이프를 박고 냉매를 순환시켜 지반을 얼린 후 굴착하는 공법을 적용, 단 한 차례의 운행 중단 없이 통과했다.



[그림 7] Ground Freezing

#### ■ Advanced Tunnel Jacking(초대형 터널 재킹)

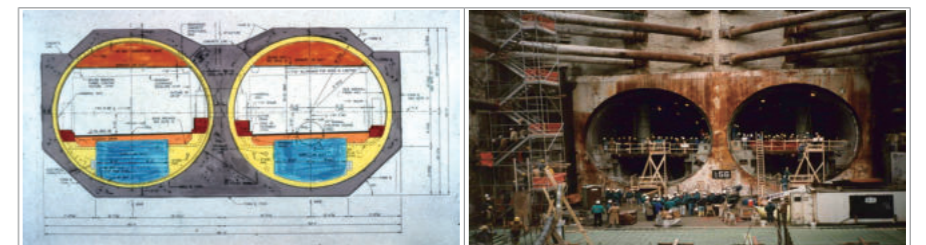
Tunnel Jacking은 세계 최대 규모이자 가장 복잡한 공학적 시도로, 이 공법은 지상 교통을 중단하지 않고 대형 콘크리트 터널 박스를 지반 아래로 밀어 넣는 방식이다. 90번 고속도로 연장 구간에서는 철도 선로 하부로 거대한 콘크리트 박스(길이 약 115m)를 유압잭으로 밀어넣어 선로의 미세한 변위까지 실시간으로 계측하며 정밀 시공을 달성한 사례이다.



[그림 8] Advanced Tunnel Jacking

#### ■ Steel-Shell Immersed Tubes(강재 침매터널 공법)

Ted Williams Tunnel 건설에 강철 셸 침매 튜브(Steel-Shell Immersed Tubes) 공법이 핵심적으로 사용되었다. 본 터널은 I-90 고속도로를 로건 국제공항까지 연장하는 약 2.6km 길이의 터널로, 이 중 약 0.75마일 구간이 12개의 침매 튜브로 구성되었다. 거대한 강재 함체를 바다 위에 띄워 운반한 후, 정확한 위치에 침설시켜 연결했다. 해저 지반의 불균일한 침하와 강력한 조류를 극복하기 위한 고도의 해상 제어기술이 투입되었다.

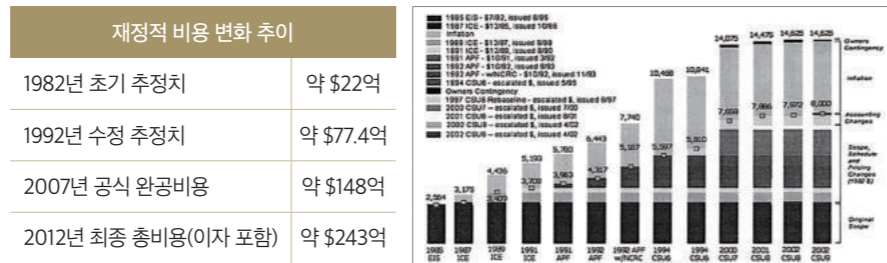


[그림 9] Steel-Shell Immersed Tubes

#### 4. 주요 이슈사항

##### ■ Financial Escalation(공사비 폭증)

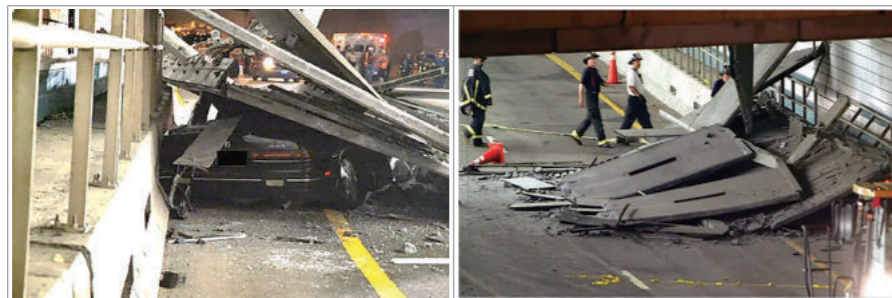
Big Dig 프로젝트는 미국 역사상 가장 극적인 재정적 비용 상승을 기록한 공공사업 중 하나이다. 초기 28억 달러였던 예산은 공기 연장과 설계 변경을 거치며 146억 달러(이자 포함 시 240억 달러 초과)로 1000% 가까운 최종 비용 증가를 가져왔다. 이는 단순한 예산 오차를 넘어 여러 구조적, 환경적 요인이 복합적으로 작용한 것으로 공공 프로젝트의 예산 관리체계에 문제점을 알리는 계기가 되었다.



[그림 10] Financial Escalation

##### ■ The 2006 Ceiling Collapse(천장 붕락 사고)

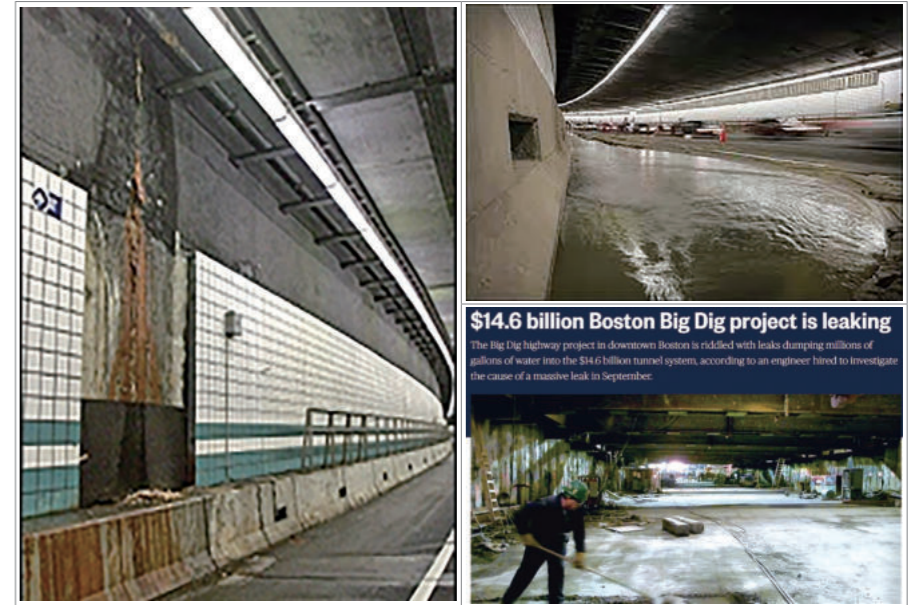
완공 직전 2006년 7월 10일에 터널 천장의 콘크리트 패널이 떨어져 인명 사고가 발생했다. 조사 결과, 천장을 지지하던 에폭시 앵커의 장기 하중 설계 오류와 시공 불량에 원인으로 밝혀져 큰 충격을 주었다. 이 사고는 공공 인프라 건설에서 재료 선택의 중요성과 장기적인 유지 보수/검사의 필요성을 일깨워 준 대표적인 공학적 실패 사례로 기록되고 있다.



[그림 11] The 2006 Ceiling Collapse

##### ■ Extensive Water Leaks(지속적인 누수)

Big Dig 프로젝트는 수백 건의 심각한 누수 사고를 겪었으며, 이러한 문제는 2001년부터 발생하여 2004~2005년 초기 완공 이후에도 계속되었다. 분당 300갤런에 달하는 상당한 양의 지하수가 분출되는 것을 포함하여 이러한 누수는 불량한 슬러리 벽, 저품질 콘크리트 및 방수 실패로 인해 발생한 것으로 광범위하고 장기적인 보수가 요구되었다.



[그림 12] Extensive Water Leaks

##### ■ Political & Public Distrust(신뢰의 위기)

대규모 인프라에 대한 정치적, 대중적 신뢰가 무너지는 현상을 보여 주는 대표적인 사례로 널리 알려져 있다. 반복되는 예산 증액과 안전사고는 'Big Dig'를 '빅 픽(Big Pig, 돈 먹는 하마)'이라 비꼬는 여론을 형성했고, 이는 엔지니어링 집단에 대한 사회적 신뢰 문제로 번졌다. 해당 프로젝트의 관리 문제로 인한 Big Dig 증후군은 공무원들이 새로운 메가 프로젝트에 대한 지지를 얻는 것을 훨씬 더 어렵게 만들었다.

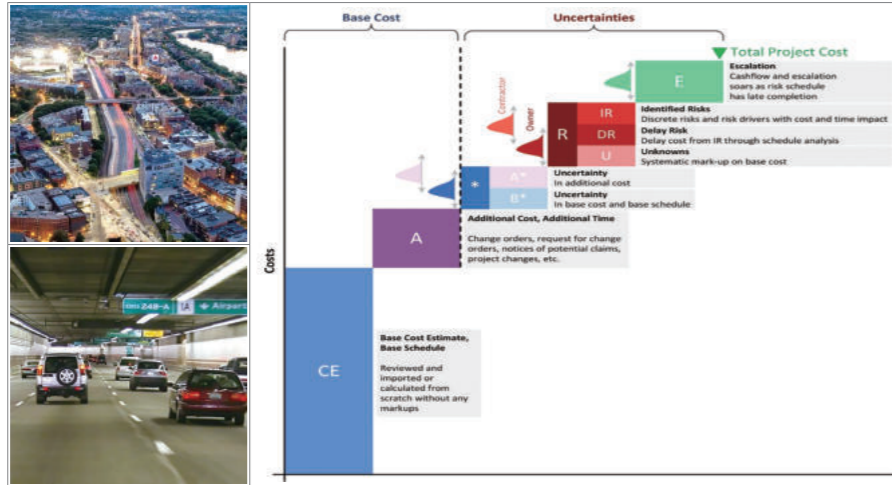


[그림 13] Political & Public Distrust

## 5. 교훈 (Lessons Learned)

### ■ Rigorous Risk Management(선제적 리스크 관리)

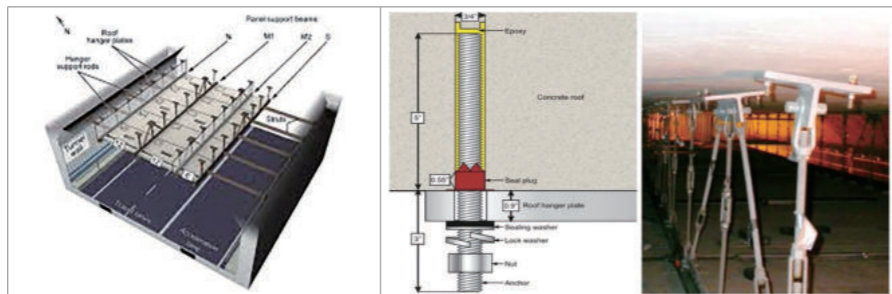
Big Dig 프로젝트는 미국 역사상 가장 복잡하고 비용이 많이 든 프로젝트로, 리스크 관리 측면에서 많은 교훈을 남겼다. 도심지 도심도 공사에서 '불확실성'은 상수가 아닌 변수이다. 예산과 공기를 산정할 때 결정론적 방식이 아닌 확률론적 리스크 분석이 반드시 수반되어야 함을 증명했다. 메가 프로젝트는 초기 단계에서부터 강력한 지배 구조와 투명한 리스크 평가 체계를 갖춰야 한다.



[그림 14] Rigorous Risk Management

### ■ Safety-Critical QA/QC(안전 중심 품질 관리)

Big Dig 프로젝트는 미국 역사상 가장 복잡한 도로 공사였으나, 동시에 안전 중심의 품질 관리 실패 사례이다. 특히 에폭시 앵커 사례는 아무리 작은 부품이라도 구조적 안전과 직결된다면 독립적인 검증과 장기 거동 테스트가 필수적임을 교훈으로 남겼다. 메가 프로젝트에서 설계 명세 준수 확인, 자재 품질에 대한 엄격한 검증, 현장의 안전 경고에 대한 즉각적인 대응이 얼마나 중요한지를 보여 준다.



[그림 15] Safety-Critical QA/QC

### ■ Data-Driven Decision Making(데이터 기반 의사결정)

보스턴의 복잡한 지하 인프라를 보호하기 위해 40km에 달하는 유틸리티 라인을 이전하는 과정에서 최신 애플리케이션과 데이터를 활용했다. 이를 통해 1996년에서 2000년 사이 유틸리티 손상을 86% 감소시켰으며 약 5,000만 달러의 비용을 절감했다. 또한 수만 개의 센서를 이용한 지반 예측데이터가 어떻게 공사 중 사고를 예방하고 공법을 최적화하는지 보여준 데이터 엔지니어링의 시초였다.



[그림 16] Data-Driven Decision Making

### ■ Stakeholder Collaboration(통합적 협업 체계)

Big Dig 프로젝트는 메가 프로젝트에서 이해관계자 관리와 신뢰 유지가 얼마나 중요한지를 보여주는 사례이다. 발주처, 설계사, 시공사 간의 유기적인 협력을 넘어, 시민들과 투명하게 정보를 공유하고 불편을 관리하는 '사회적 엔지니어링'의 중요성을 일깨워주었다. 특히 Partnering 프로그램은 발주처와 시공사 간의 적대적 관계를 해소하고 공동의 목표를 설정하여 분쟁을 줄이는 데 기여했다. 전례 없는 안전 프로그램과 통합 감사 시스템을 통해 비용 초과와 지연을 모니터링하고, 소송 비용을 피하기 위한 분쟁 해결 절차를 수립했다.



[그림 17] Stakeholder Collaboration

## 6. 핵심 정리

보스턴 Big Dig 프로젝트는 건설 과정에서의 수많은 시행착오를 통해 전 세계 대도시 대심도 지하화 사업의 기술적 가이드라인을 정립했다. 우리가 주목해야 할 본 프로젝트의 실질적인 내용은 다음과 같다.

### ① 지질 불확실성 대응: 하이브리드 지반 제어 기술의 고도화

Big Dig 프로젝트는 초연약지반부터 암반에 이르기까지 변화무쌍한 보스턴의 지질 조건에 대응하기 위해 다양한 공법을 복합적으로 운용했다.

- 가설재의 구조화: Slurry Wall을 단순 가설재가 아닌 영구 구조체(Permanent Structure)로 활용하는 설계법을 표준화하여, 도심지 협소 공간에서의 단면 효율성을 극대화하는 '하이브리드 토류벽 설계'의 기틀을 마련했다.
- 비배수 터널 기술: 해수면 하부 굴착 시 발생하는 고수압에 대응하기 위해 지반 동결(Ground Freezing)과 고압 그라우팅을 병행하는 정밀 차수 공법은 현재 국내외 대심도 해저·저터널 설계의 핵심 참고 자료가 되고 있다.

### ② 안전 및 품질 관리의 패러다임 전환: 독립적 검증 체계(IV&V)의 도입

2006년 발생한 천장 붕락 사고는 전 세계 터널 엔지니어들에게 미세 부자재의 중요성을 각인시킨 뼈아픈 유산이었다.

- 앵커 설계 표준의 재정립: 사고 이후 AASHTO(미국도로교통협회) 등에서는 에폭시 앵커 등 접착식 앵커의 크리프(Creep) 시험과 장기 하중 설계 기준을 대폭 강화했다.
- 독립적 검증(Independent Verification & Validation): 시공사 자체 검수를 넘어, 구조 안전과 직결된 주요 공정에 대해서는 제3의 전문 기관이 검증하는 IV&V 체계가 의무화되는 결정적 계기가 되었다.

### ③ 메가 프로젝트 관리(MPM) 기법의 진화: 확률론적 예산 및 리스크 관리

천문학적인 공사비 증액(Cost Overrun)은 발주처와 엔지니어링사에게 사업 관리의 새로운 방향을 제시했다.

☞ CEVP(Cost Estimate Validation Process): 기존의 확정론적 예산 산정 방식에서 탈피하여, 리스크 요인을 확률(Monte Carlo Simulation 등)로 분석하여 예비비(Contingency)를 산정하는 기법이 이 프로젝트 이후 본격적으로 도입되었다.

- 공공 지불 시스템의 변화: 설계 변경과 지반 조건의 변화에 따른 비용 분담 모델이 정교화되었으며, 이는 현재의 대규모 민관협력사업(PPP)이나 턴키(Turn-key) 계약의 리스크 분담 구조에 큰 영향을 미쳤다.

### ④ 지속 가능한 도시 인프라(UUS)의 모델 제시: 융복합 엔지니어링

Big Dig 프로젝트는 지하도로가 단순한 교통 시설이 아닌 도시 재생의 핵심 엔진임을 증명했다.

- LCA(생애 주기 평가) 기반 설계: 건설 단계의 탄소 배출과 완공 후 지상의 녹지화에 따른 환경 이득을 종합적으로 고려하는 지속 가능 설계(Sustainable Design)의 초기 모델을 제시했다.
- 인프라의 다기능화: 터널 내 환기 시스템, 지상 공원의 배수 기능, 주변 빌딩과의 지하 연결성 등을 통합 관리하는 지하공간 통합 플랫폼의 개념을 실현하여 도시 가치를 극대화했다.

### 제1강을 마치면서 - Big Dig 프로젝트로부터 배운다.

Big Dig 프로젝트는 단순히 '역대 최악의 공사비 초과'나 '사고가 잦았던 난공사'로만 기억되어서는 안 될 것이다. 엔지니어들에게 이 프로젝트는 지하공간 개발의 기술적 한계가 어디까지인가를 극명하게 보여 준 사례이며, 동시에 아주 사소한 기술적 결함이 어떻게 사회적 신뢰를 무너뜨릴 수 있는지를 가르쳐 준 인프라 역사상 가장 가치 있는 '실패의 기록'이기도 하기 때문이다.

우리는 Big Dig이 남긴 데이터화된 실패와 성공을 밑거름 삼아야 한다. 이를 통해 현재 우리가 진행 중인 대심도 프로젝트들에서 더욱 안전하고 경제적인 최적의 솔루션을 찾아내는 것이 우리 엔지니어들의 숙명이다.

지하를 파는 행위는 단순히 땅을 파내는 토목 공사가 아니다. 그것은 도시의 새로운 미래를 조각하는 창조적 행위이다. 기술적 정교함(Precision)이라는 기초 위에 사회적 가치(Value)라는 영혼을 불어넣을 때, 비로소 엔지니어링은 단순한 기술을 넘어 '기술의 경지'에 도달할 수 있다. 우리가 설계하는 다음 세대의 지하도로는 시민들에게 가장 안전하고 쾌적하며 지속 가능한 도시의 새로운 대동맥이 될 것임을 확신한다. 🇰🇷