

건설기술 **쌍용**

CONSTRUCTION TECHNOLOGY REVIEW SSANGYONG

2026 Vol. 83



건설기술 쌍용

CONSTRUCTION TECHNOLOGY REVIEW SSANGYONG

2026 Vol. 83



COVER STORY

고속국도 제14호선 함양-창녕간 건설공사 제11공구
(Hamyang-Changyeoung Expressway Line 14, Pkg.11)

- 의령낙동대교 '2026 올해의 토목 구조물' 국내부문 대상 수상 (대한토목학회)
- 2023 한국도로공사 건설현장 동반성장 평가 최우수상 (한국도로공사 사장)
- 2021 한국도로공사 건설안전 혁신대상 우수상 (한국도로공사 사장)
- 경상남도 의령군에서 창녕군을 연결하는 연장 6.44km의 4차로 신설 구간으로 교량 7개소, 터널 6개소를 포함한 대형 인프라 사업
- 핵심 구조물인 의령낙동대교(연장 1km)는 국내 최초로 '경사 고저주탑 사장교'를 적용함으로써 주탑 형상과 케이블 배치를 차별화해 높은 기술 완성도와 우수한 시공 안정성을 구현

CONTENTS

준공리뷰/수주리뷰

특집기획

도심항공교통(UAM) 인프라 핵심 버티포트(Vertiport)	주봉철	10
신모빌리티를 고려한 차세대 자율주행협력 도로 인프라	박범진	18
지상·지하 입체도시 건설을 위한 기술 혁신의 도전과 과제	서민호	26

기술정보

토목

사장교 경사 주탑의 시공 및 가시설 적용	김승규	40
하이브리드 아치교의 계획 및 설계	현정환	47

건축

저온 환경에서 콘크리트 품질기준강도 확보방안 검증 연구	박태일	52
전기차 화재예방 기술동향 및 당사 설계 표준 가이드라인	이완희	62
건축물 인증제도 종류 및 상호 연관성 분석	박철용	66

설비

누수 최소화 공법	송현준	76
-----------	-----	----

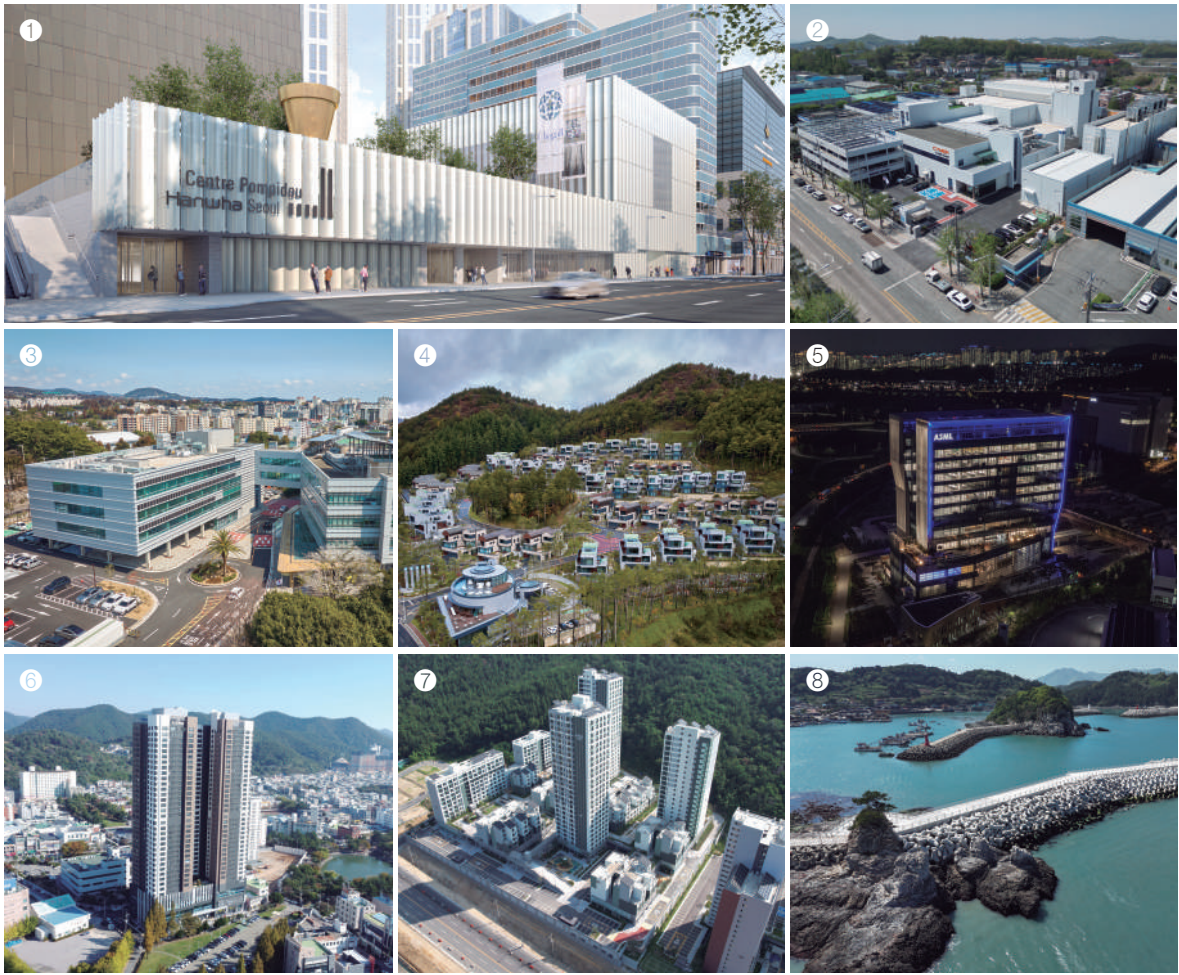
현장기술 소개

제주 서귀포의료원 급성기 병상 증축사업 현장 소개 및 주요 공법	이춘재	84
보성~임성리 철도사업에 적용된 연약지반 개량공법 소개	현재형	88
저토피 구간에서의 발파설계	이용주	97

현장탐방

두바이 크릭워터스 레지던스 타워 A009, A011 (Creek Waters A009, A011)	104
여의도 63빌딩 별관 및 지하 리모델링 (풍피두센터 한화 서울)	108

기술논문	112
녹색기술	115
기술뉴스	118
그룹사소개	122
편집후기	126



준공리뷰

COMPLETION

❶ 여의도 63빌딩 별관 및 지하 리모델링

- 준 공 일 : 2026.02.27(예정)
- 공사위치 : 서울 영등포구 여의도동 60
- 발 주 처 : 한화생명, 한화문화재단
- 공사금액 : 1,121억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적 : 31,153㎡ (9,440평)
 - 지하3층 ~ 지상4층, 1개동 / 문화집회(미술관), 근생

❷ 평택 싸이머코리아 증축공사

- 준 공 일 : 2025.03.31
- 공사위치 : 경기도 평택시 청북읍 한산길61
- 발 주 처 : 싸이머코리아
- 공사금액 : 510억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적 : 14,044㎡ (4,248평) / 증축분 11,294㎡ (3,416평)
 - 증축공장 1동, 기계실 1동, 전기실 1동, 주차타워 1동

❸ 제주 서귀포의료원 급성기병상 증축공사

- 공사위치 : 제주특별자치도 서귀포시 장수로47(동홍동)
- 발 주 처 : 조달청
- 공사금액 : 390억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적 : 45,731㎡ (13,834평)
 - 지하2층 ~ 지상4층 / 119병상 증축공사

❹ 루송채(10차) 콘도 신축공사(용평 10차 콘도)

- 준 공 일 : 2025.06.26
- 공사위치 : 강원도 평창군 대관령면 용산리 687번지
- 발 주 처 : 모나오펜㈜
- 공사금액 : 1,772억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적 : 33,255㎡ (10,059평)
 - 지상3층 콘도 60개동, 지하층 지상3층 커뮤니티 1개동

❺ ASML 화성 뉴캠퍼스

- 준 공 일 : 2025.06.23
- 공사위치 : 경기도 화성시 송동 동탄2지구 지원시설
- 발 주 처 : ASML코리아㈜
- 공사금액 : 2,789억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적(P1/P2) : 41,975㎡ (12,697평) / 32,446㎡ (9,815평)
 - P1 : 지하4층, 지상11층(58m) / P2 : 지하4층, 지상5층(48m)

❻ 여수 학동 74 주상복합 신축공사

- 준 공 일 : 2025.09.24
- 공사위치 : 전라남도 여수시 학동 74번지 일원
- 발 주 처 : ㈜제이비플러스
- 공사금액 : 859억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적 : 43,584㎡ (13,184평)
 - 244세대, 지하1~5층, 근린생활시설1~3층, 아파트4~35층

❼ 울산다운2 A-5BL 아파트 1공구

- 준 공 일 : 2025.06.12
- 공사위치 : 울산광역시 중구 다운동 울산다운2지구 내 A-5BL
- 발 주 처 : LH공사
- 공사금액 : 704억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 연면적 : 68,580㎡ (20,745평)
 - 701세대, 지하2층~지상25층 9개동

❽ 사산항 보강공사

- 준 공 일 : 2025.05.11
- 공사위치 : 평안남도 고흥군 도양읍 사산석금길 13-10 사산항 일원
- 발 주 처 : 여수지방해양수산청
- 공사금액 : 323억원
- 공사개요 및 규모 :
 - 남방파제 보강 : 93m / 신설 : 70m
 - 중방파제 보강 : 277m - 도제 보강 : 161m



⑨ 청주지역 전기공급시설 전력구공사(신청주분기)

- 준 공 일 : 2025.04.30
- 공사위치 : 충청북도 청주시 흥덕구 외북동 산2-3 ~ 지동동507, 508번지
- 발 주 처 : 한국전력공사 공사금액 : 546억원
- 공사개요 및 규모 : - SHIELD TBM : 2,551m - C/H분기구 : 46m
- 개착식 전력구 103m (시점부 67m, 종점부 36m)
- 수직구 2개소 (발진 : H=66m, D=11m, 도달 : H=48m, D=8m)

⑩ 화성동탄(2) 택지개발사업조성공사(3-1공구) 관리공사

- 준 공 일 : 2025.09.30
- 공사위치 : 경기도 화성시 오산동 일원
- 발 주 처 : 한국토지주택공사 공사금액 : 583억원
- 공사개요 및 규모 : - 총면적 : 3-1공구(78만평), 4-2공구(76만평)
- 자전거도로 : 자전거교량 8개소

⑪ 흑산도항 개발사업

- 준 공 일 : 2025.12.31
- 공사위치 : 전라남도 신안군 흑산면 흑산도항 일원
- 발 주 처 : 목포지방해양수산청 공사금액 : 583억원
- 공사개요 및 규모 : - 해경부두 : 안벽 260m (5,000톤급 : 190m, 100톤급 : 70m)
- 어업지도선부두 : 안벽 100m (1,600톤급), 마무리호안 58m (사석경사제)

⑫ 보성-임성리 철도건설 제6공구 노반공사

- 준 공 일 : 2025.12.31
- 공사위치 : 전라남도 영암군 미암면 남산리 ~ 학산면 매월리 일원
- 발 주 처 : 국가철도공단 공사금액 : 1,314억원
- 공사개요 및 규모 : - 토공 : 9,071m - 터널공 : 2,159m(9개소)
- 정거장 1개소 - 교량공 : 2,490m(9개소)

⑬ 증산가천간도로건설공사

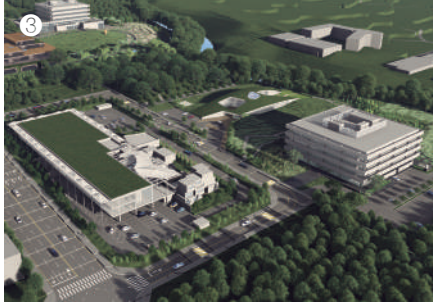
- 준 공 일 : 2026.01.08
- 공사위치 : 경상북도 성주군 가천면 신계리 ~ 김천시 증산면 장전리
- 발 주 처 : 경상북도
- 공사금액 : 353억원
- 공사개요 및 규모 : - 도로 : L=4.5km, B=9.5m
- 교량 3개소 (함성형 라멘교 20m, 함성형 거더교 60.2m, 콘크리트 거더교 48.3m)
- 터널 1개소 1,181m

⑭ 세종지사 5, 6생활권 열수송관 공사

- 준 공 일 : 2026.01.06
- 공사위치 : 세종특별자치시
- 발 주 처 : 한국지역난방공사
- 공사금액 : 541억
- 공사개요 및 규모 : - 공동구 (6Km*2열) 및 신규사용자 55개소
- 세미월드 2개소(0.69km x 2열)

⑮ 평택기차-오산 제1공구 천연가스 공급시설

- 준 공 일 : 2026.01.13
- 공사위치 : 경기도 화성시 일원
- 발 주 처 : 한국가스공사
- 공사금액 : 미확정
- 공사개요 및 규모 : - 고압가스배관 30" x 18.14km
- 공급관리소 2개소 신설
- 세미월드 2개소(420m) 및 압입 10개소(589m)



수주리뷰

NEW ORDER

① SANDRA The Redevelopment of Alexandra Hospital - Outpatient only

- 기 간 : 2025-12-15 ~ 2029-01-14
- 공사위치 : Queenstown In Singapore
- 발 주 처 : MOH
- 공사금액 : 3,320억원
- 외래병동 1개동 (B3 + 12F + RF / 진료실, 상담실, 사무실, 상업시설, 주차장)

② DUKIA-4 Kifaf Development Phase 5 Plot 1

- 기 간 : 2025-10-09 ~ 2028-10-22
- 공사위치 : Al Kifaf Development, DUBAI, UAE
- 발 주 처 : WASL LLC
- 공사금액 : 3,381억원
- 주거/업무 복합시설 (2개동, Tower A GF~42F, Tower B GF~36F)

③ 제주 카카오 본사부지 개발사업

- 기 간 : 2026.02 ~ 2028.04
- 공사위치 : 제주특별자치도 제주시 영평동 2181의 2필지
- 발 주 처 : (주)카카오
- 공사금액 : 622억원
- - 지하1층 ~ 지상4층, 5층(2개동) / 연면적 6,129평
- 지식산업센터(카카오 및 스타트업 오피스)

④ 아현동 NICE 크레디트센터 리모델링

- 기 간 : 2025.08 ~ 2026.12
- 공사위치 : 서울 마포구 아현동 686번지
- 발 주 처 : 나이스프라퍼티(나이스그룹 계열사)
- 공사금액 : 348억원
- 지하4층 ~ 지상16층 / 연면적 4,604평

⑤ 부산 반안트리 해운대 대수선 공사

- 기 간 : 2026.02 ~ 2026.10
- 공사위치 : 부산 기장군 기장읍 연화리 445
- 발 주 처 : 루펜티스 주식회사
- 공사금액 : 618억원
- 지하3층 ~ 지상12층 / 연면적 28,998평

⑥ 구로 한국SGI 창가국제우호센터 신축공사

- 기 간 : 2026.03 ~ 2028.08
- 공사위치 : 서울시 구로구 구로동 45-8외 2필지
- 발 주 처 : (재)한국에스지.아이
- 공사금액 : 619억원
- - 지하5층 ~ 9층 / 연면적 23581㎡ (7,133평)
- 종교시설(종교집회장) 및 근린생활시설(휴게음식점)

⑦ 광양 덕례2지구 장기민간임대 아파트 신축공사

- 기 간 : 2026.06 ~ 2029.09
- 공사위치 : 전라남도 광양시 광양읍 덕례리 산242-2번지 일원
- 발 주 처 : (주)엔개발, (주)에코빌드산업개발
- 공사금액 : 2,140억원
- - 지하2층 ~ 지상25층, 11개동 791세대 / 장기민간임대



⑧ 남양주 왕숙 A-17BL 민간참여 공공주택사업

- 기 간 : 2026.04 ~ 2029.04
- 공사위치 : 경기도 남양주시 진접읍/진건읍일원
남양주왕숙 공공주택지구내 A-17BL
- 발 주 처 : 한국토지주택공사(LH)
- 공사금액 : 1,045억원
- 지하2층 ~ 지상29층, 4개동 379세대 / 뉴·홈 나눔형

⑨ 남양주왕숙 S-18BL 민간참여 공공주택사업

- 기 간 : 2026.06 ~ 2029.01
- 공사위치 : 경기도 남양주시 진접읍/진건읍
일원 남양주왕숙 공공주택지구내 S-18BL
- 발 주 처 : 한국토지주택공사(LH)
- 공사금액 : 2,077억원
- 지하2층 ~ 지상29층, 8개동 965세대 / 통합공공임대

⑩ 광주 계림동 공동주택 신축공사

- 기 간 : 2026.02~2029.08
- 공사위치 : 광주광역시 동구 계림동 505- 900
- 발 주 처 : 한국투자부동산신탁 • 공사금액 : 771억원
- 지하1층 ~ 지상28층 공동주택 4개동 (213세대) 및 근생시설

⑪ 시흥동 모아타운 2구역

- 기 간 : 2028.02 예정(착공후 32개월)
- 공사위치 : 서울특별시 금천구 시흥5동 922번지 일원
- 발 주 처 : 시흥동 922일대 가로주택정비사업조합
- 공사금액 : 874억원
- 지하2층 ~ 지상15층 공동주택 및 부대복리시설 / 연면적 11,289평

⑫ 부산 구서1구역 재개발

- 기 간 : 2028.04 예정(착공 후 36개월)
- 공사위치 : 부산광역시 금정구 구서동 735-1번지 일원
- 발 주 처 : 구서1 재개발정비사업조합
- 공사금액 : 1,770억원
- 지하3층 ~ 지상29층 공동주택 및 부대복리시설 / 연면적 25,474평

⑬ 천호동 225-16 가로주택

- 기 간 : 2028.12예정(착공 후 32개월)
- 공사위치 : 서울시 강동구 천호동 225-16번지 일원
- 발 주 처 : 천호동 225-16번지 일원 가로주택정비사업조합
- 공사금액 : 835억원
- 지하2층 ~ 지상20층 공동주택 및 부대복리시설 / 연면적 10,964평



수주리뷰

NEW ORDER

14 안흥외항 계류시설 등 확충공사

- 기 간 : 2025.10.15 ~ 2028.12.12
- 공사위치 : 충남 태안군 근흥면 신진도리 안흥항 일원
- 발 주 처 : 대산지방해양수산청
- 공사금액 : 275억원
- 소형선부두 325m, 준설 75,000m³, 양육부두 및 휴식부두(부잔교) 1식

15 동해항 남부두(단계) 13번선석 개선사업

- 기 간 : 2026.01.19 ~ 2029.05.02
- 공사위치 : 강원특별자치도 동해시 대동로 동해항 남부두 12번 및 13번 선석 일원
- 발 주 처 : 동해지방해양수산청
- 공사금액 : 300억원
- 접안시설 개축 320m (12번선석 100m, 13번선석 220m) 등 1식

16 남양주왕숙 공공주택지구 조성공사 4공구

- 기 간 : 2026.02.23 ~ 2031.12.22
- 공사위치 : 경기도 남양주시 진접읍 내곡리 등 일원
- 발 주 처 : 한국토지주택공사
- 공사금액 : 1,578억원
- 단지조성 1,933,547m²

17 남부내륙철도(김천~거제)건설사업

제5-2공구 노반신설 기타공사

- 기 간 : 2026.01.20 ~ 2031.12.31
- 공사위치 : 경상남도 합천군 용주면 일원 ~ 경상남도 합천군 삼가면 일원
- 발 주 처 : 국가철도공단
- 공사금액 : 2,111억원
- 철도 노반 신설 11.935km

18 남부내륙철도(김천~거제)건설사업

제8-2공구 노반신설 기타공사

- 기 간 : 2026.01.20 ~ 2031.12.31
- 공사위치 : 경상남도 고성군 대가면 일원 ~ 경상남도 고성군 고서읍 일원
- 발 주 처 : 국가철도공단
- 공사금액 : 1,918억원
- 철도 노반 신설 8.027km



특집기획

Special Feature

- 10 도심항공교통(UAM) 인프라 핵심 버티포트(Vertiport)
- 18 新모빌리티를 고려한 차세대 자율주행협력 도로 인프라
- 26 지상·지하 입체도시 건설을 위한 기술 혁신의 도전과 과제

도심항공교통(UAM) 인프라 핵심 버티포트(Vertiport)



글 주봉철 / 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원
전화 031-910-0138 E-mail bcjoo@kict.re.kr

01 시작하며

철도가 지역 간 거리를 좁혔고, 공항이 국가 간 거리를 좁혔다면, 도심항공교통 UAM은 도시 내 시간을 좁히고, '버티포트'는 부동산과 물류, 그리고 도시 경제 지도를 다시 그릴 것으로 기대됩니다. 글로벌 UAM 시장은 2040년까지 약 1조 달러 규모^①로 성장하고 그중 인프라 분야도 수 백조 원 규모^②로 성장할 것으로 전망되는 가운데, 세계 주요 도시들은 이미 도심 하늘길의 '허브'를 선점하기 위한 보이지 않는 전쟁을 이미 시작하였습니다.

2026년 올해는 미국 연방항공청(FAA) 형식 인증을 완료한 UAM 기체를 볼 수 있을 것으로 예상됩니다. UAM 기체 개발에서 가장 앞서가는 기업은 미국 Joby Aviation(이하 조비)과 Archer Aviation(이하 아처)으로 조비의 S4(5인승) 기체와 아처의 Midnight(5인승) 기체는 형식 인증 최종 단계에 진입했으며, 2026년 UAE에서 상업 운항을 시작할 예정입니다. 현대자동차그룹의 미국 독립 법인인 슈퍼널(Supernal)은 2028년 상용화를 목표로 현재 유인 비행 테스트를 위한 시제기 제작 중입니다. 중국 이항(EHang)의 2인승 기체 EH216-S는 2023년 세계 최초로 중국 항공청(CAAC)으로부터 형식 인증(TC)을 받았고, 2024년에는 생산 인증(PC)까지 획득하여, 현재 상하이, 허페이 등 중국 내 주요 도시에서 관광용으로 상업 서비스를 준비 중입니다. 독일 볼로콥터(Volocopter)의 2인승 기체 Volocity도 2026년 말까지 유럽항공안전청(EASA) 형식 인증을 완료하고, 2027년부터 상업 운항을 계획하고 있습니다. 2026년 올해부터 국제적으로 UAM 상용 서비스가 시작될 것으로 예상됩니다.

[그림 1] Archer aviation Midnight 기체



[그림 2] Joby aviation S4 기체



UAM 기체 개발이 완료되면 이제 시선은 인프라로 향하게 될 것입니다. UAM 생태계의 신경망이자 지상과 하늘을 잇는 물리적 인터페이스인 '버티포트(Vertiport)'는 단순한 이착륙장을 넘어섭니다. 초고속 충

① Morgan Stanley (2019.1.23.) <https://www.morganstanley.com/ideas/autonomous-aircraft>

② 한국항공협회 UAM 전망 <https://www.airportal.go.kr/airplane/uamProspect.do>

02 도심항공교통 인프라의 핵심 버티포트

전, 정밀 이착륙 제어, 그리고 기존 교통망과 끊김이 없는(Seamless) 연동을 구현하기 위한 첨단 공학의 집약체로서, 버티포트는 미래 스마트 시티의 새로운 중심축이 될 것으로 기대됩니다. UAM 시대를 현실로 만드는 가장 강력한 열쇠, 버티포트의 핵심 기술과 도심 진입 전략에 주목해야 하는 이유입니다.

버티포트(Vertiport)란 수직이착륙 항공기(Vertical takeoff and landing aircraft) 전용 공항(Airport)을 의미합니다. 버티포트에는 활주로가 없고 기체가 이착륙하는 이착륙장(TLOF^③ & FATO^④)과 주기장(Parking Stand), 여객터미널 그리고 충전 및 관제, 통선설비 등 지원시설(Support Infrastructure)로 구성됩니다.

[그림 3] 현대건설 버티포트 (현대건설, 2022)

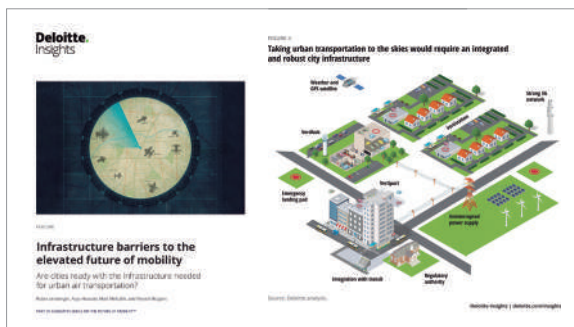


[그림 4] GS건설 버티포트 (GS건설, 2024)



지금도 고층빌딩이나 병원 옥상에는 헬리콥터(Helicopter) 이착륙장인 헬기장(Heliport)이 있습니다만 헬기장은 응급이나 VIP 위주의 간헐적 운영인 데 반해 버티포트는 대중교통으로서 정기적으로 운영하는 방식입니다. 충전설비도 항공유 공급 방식에서 전기 충전 방식으로 변경되고, 소음 수준도 헬리콥터는 도심에 운용하기 어려울 정도의 큰 소음이 발생하지만 UAM 기체의 소음은 주간 주거지역 소음 규제 기준^⑤에 만족하는 65dB 이하로 도심에서도 충분히 비행이 가능한 수준으로 예상됩니다.

[그림 5] 버티포트 종류 (Deloitte, 2019)^⑥



버티포트는 규모와 용도에 따라 크게 버티허브, 버티포트, 버티스테이션(버티스탑)으로 구분할 수 있습니다^⑦. [그림 5] 참조. 가장 큰 규모인 버티허브는 다수의 이착륙장과 대규모 주기장을 갖추고 있으며, 중정비와 장기주차(격납) 및 대규모 배터리 충전과 교체할 수 있는 UAM 네트워크의 심장이라고 할 수 있습니다.

③ Morgan Stanley (2019.1.23.) <https://www.morganstanley.com/ideas/autonomous-aircraft>

④ FATO(최종접근 및 이륙구역): Final Approach and Take Off area

⑤ 소음 진동관리법 시행규칙 (별표 8) 생활소음 진도의 규제기준

⑥ Deloitte Insights (2019.5.30.), Infrastructure barriers to the elevated future of mobility, <https://www.deloitte.com/us/en/insights/topics/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html>

[그림 6] 버티허브 예시
(한국공항공사, 2020)^⑨



[그림 7] 버티스테이션(버티스탑) 예시
(Volocopter & GRAFT)^⑩



그리고 가장 작은 규모인 버티스테이션(버티스탑)은 단일 이착륙장과 작은 터미널로 구성되어 승객 승하차 정도만 가능한 최소 기능의 버티포트로 빌딩 옥상이나 좁은 유휴부지에 설치할 수 있습니다. 그리고 여기서 말하는 버티포트는 2개 이상의 이착륙장과 일상적인 충전과 경정비가 가능하며, 터미널 시설이 잘 갖추어져 있고 환승이 편리한 지역 거점 역할을 하는 일정 규모 이상의 버티포트를 의미합니다.

우리나라는 버티포트의 시설 확충 정도에 따라 1~4등급^⑪으로 구분하고 있습니다. 4등급은 이착륙장과 터미널 등 필수시설만 갖춘 버티포트를 의미하며, 3등급은 필수시설과 함께 필수 지원시설 중 유도로, 계류장, 충전시설을 갖춘 버티포트를, 2등급은 3등급에 해당하는 시설을 갖추고 필수 지원시설 중 정비시설을 갖춘 버티포트, 그리고 필수시설과 필수 지원시설을 모두 갖춘 버티포트를 1등급으로 구분합니다.

03 버티포트 구축 현황

‘The Global Vertiport Market Map and Forecast 2025-2029’^⑫에 따르면 현재 세계적으로 약 1,500개 정도의 버티포트가 개발 중이거나 계획 단계에 있으며, 이 중 50% 이상을 중국이 추진하고 있습니다. 광둥성에만 2027년까지 100개 이상의 버티포트를 구축할 예정입니다.

미국 조비는 미국 전역에 25개 버티포트 구축 중입니다^⑬. 특히 공항 및 도심 내 대형 주차장을 이용하여, 항공교통과 지상교통이 자연스럽게 환승 될 수 있도록 버티포트를 구축하고 있습니다. UAE(아랍에미리트) 두바이는 두바이 국제공항, 팜 주메이라, 두바이 마리나, 다운타운 두바이 등 4개의 버티포트를 구축하고 있으며, 두바이 국제공항에는 2개의 이착륙장을 갖춘 3,100m² 규모의 대형 버티포트를 2026년 1분기 완공할 예정입니다^⑭.

프랑스는 2024년 파리올림픽 기간에 시범 운영하고자 5개의 버티포트를 구축한 바 있고, 영국도 최근 옥스포드시 인근에 버티포트를 구축하였습니다^⑮. 우리나라도 고흥과 김포 아라뱃길 인근에 버티포트를 구축하고 시범 운영하고 있으며, 2026년에는 울산광역시와 경기도 고양특례시에 버티포트가 추가로 구축될 예정입니다.

⑨ 도심항공교통 활용 촉진 및 지원에 관한 법률 시행령 (별표 3)

⑩ Deloitte Insights (2019.5.30.), Infrastructure barriers to the elevated future of mobility, <https://www.deloitte.com/us/en/insights/topics/future-of-mobility/infrastructure-barriers-to-urban-air-mobility-with-VTOL.html>

⑪ 연합뉴스 (2020.11.11.), 한화시스템, 김포공항에 '버티허브' 추진...세계 최초 실제 공항에 UAM 인프라, <https://www.yna.co.kr/view/PYH20201111059400003>

⑫ GRAFT Architects, <https://graftlab.com/en/projects/voloport-system>

⑬ 인천투데이 (2025.3.9.), '에어택시 정거장' 버티포트 세계 1504곳 예정 ... 중국이 절반, <https://www.incheontoday.com/news/articleView.html?idxno=264122>

⑭ IT Daily (2026.1.8.), 조비 에어비에이션-메트로폴리스, 미 전역에 에어택시 버티포트 25곳 구축, <http://www.itdaily.kr/news/articleView.html?idxno=237327>

⑮ Advanced Air Mobility International (2025.11.25.), First Commercial Vertiport Tops Out in Dubai & Targets 2026 Launch, <https://www.aaminternational.com/2025/11/first-commercial-vertiport-tops-out-in-dubai-targets-2026-launch/>

⑯ Skyports Infrastructure (2025.12.24.), Skyports Infrastructure: 2025 Wrapped, <https://skyports.net/skyports-infrastructure-2025-wrapped/>

[그림 8] 아랍에미리트 두바이 UAM 버티포트 위치와 두바이 국제공항 버티포트 조감도^⑮



[그림 9] 프랑스 퐁투아즈 공항 버티포트^⑯



[그림 10] 영국 옥스포드 인근 버티포트 조감도^⑰



04 버티포트 설계기준

미국(FAA)과 유럽(EASA)은 국제 항공 표준을 주도하는 양대 산맥입니다. 두 기관의 버티포트 설계기준은 안전이라는 본질은 같지만, 접근 방식과 세부 규정은 다소 차이가 있습니다.

미국 연방항공청(FAA, Federal Aviation Administration)은 2022년 기존 헬기장(Heliport) 기준을 바탕으로 eVTOL의 특성을 반영한 보완 지침 형태로 Vertiport Design(Engineering Brief No.105)^⑱을 공개하고 2024년 일부 개정^⑲하였습니다.

유럽항공안전청(EASA, European Union Aviation Safety Agency)은 2022년 세계 최초로 UAM 전용으로 설계된 프로토타입의 버티포트 설계 규격인 Vertiports^⑳(Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports)를 공개하였습니다.

전반적으로 EASA가 eVTOL의 성능을 높이 평가하고 개방적인 반면, FAA는 EASA에 비해 보수적으로 설계기준을 설정하였습니다. 예를 들면 이착륙장 최소 크기도 미국 FAA가 더 크게 확보할 것을 요구하고, 이착륙장 주변 장애물 제한 구역도 FAA는 기존 항공기와 유사하게 평면적인 데 반해, EASA는 깔때기 모양의 입체적 개념을 도입하였습니다. 우리나라 버티포트 설계기준은 앞서 두 기준을 참고하고 국내 실정에 맞는 독자적인 “K-UAM 버티포트 설계기준”이 조만간 공개될 예정입니다.

^⑮ The GURU (2024.11.14.), 美 에어택시 조비, UAE 두바이 UAM 버티포트 착공, <https://theguru.co.kr/news/article.html?no=79761>

^⑯ 세계일보 (2024.7.20.), 파리 올림픽에 '하늘 나는 택시'... 에어택시 1위 전쟁 시작됐다, <https://www.segye.com/newsView/20240719512045>

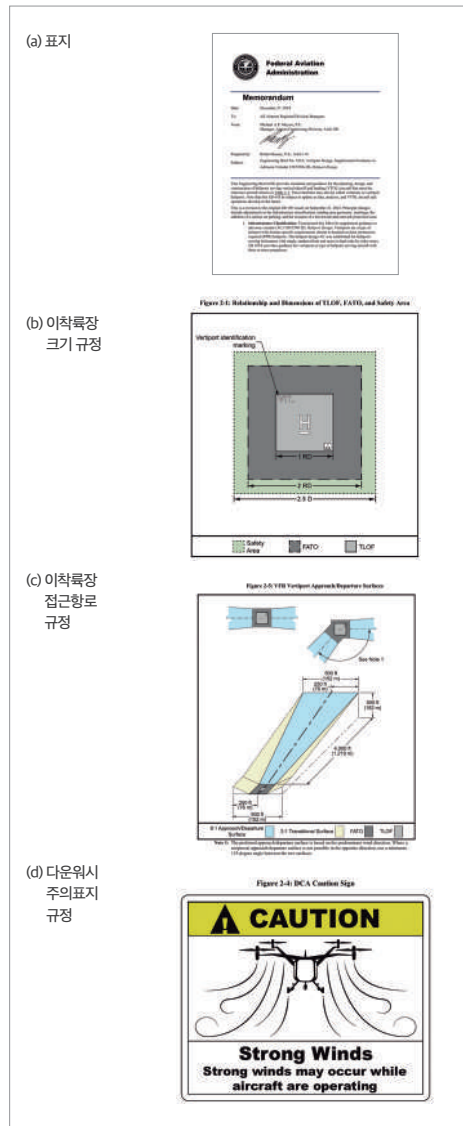
^⑰ 더드라이브 (2024.12.16.), eVTOL가 현실로...영국 최초 버티포트 테스트베드 모습 공개, <https://v.daum.net/v/3QKy35aV4v>

^⑱ Federal Aviation Administration (FAA) (2022.9.21.), Vertiport Design, Engineering Brief No. 105

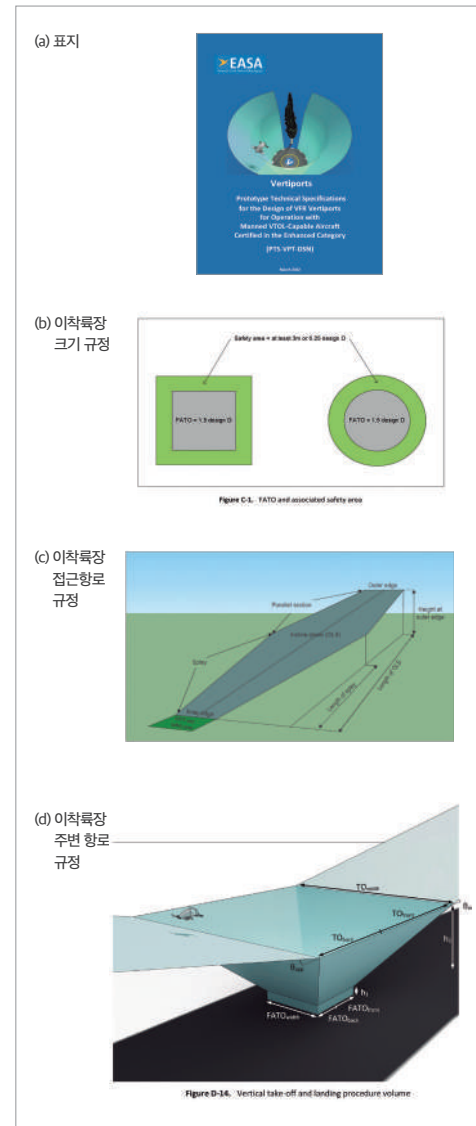
^⑲ Federal Aviation Administration (FAA) (2024.12.27.), Vertiport Design, Engineering Brief No. 105a

^⑳ European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2022. 3.), Vertiports Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)

[그림 11] 미국 FAA 버티포트 설계기준^{②)}



[그림 12] 유럽 EASA 버티포트 설계기준^{③)}



05 도심 버티포트 구축시 고려사항

도심항공교통은 이름에 알 수 있듯이 도심 교통 문제를 해결하는 획기적인 방안으로 도입되고 있습니다. 따라서 도심에서 UAM 서비스를 이용할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 도심 버티포트 구축이 필수적입니다. 또한 효율적인 환승을 위해서는 주요 환승역이나 터미널 주변에 버티포트가 있어야 합니다. 그러나 이러한 주요 환승역이나 터미널 주변에는 버티포트를 건설할 만한 넓은 유휴부지가 부족하고, 만약 있어도 토지 비용이 많이 들어 사업성을 확보하기 어렵습니다. 또한 고층 빌딩이 많은 도심 환경은 안전한 이착륙 항로가 확보된 위치를 찾기가 어렵습니다. 그리고 경제성을 위해 빠른 재이륙(Turn-around) 시간을

② Federal Aviation Administration (FAA) (2024.12.27.), Vertiport Design, Engineering Brief No. 105a

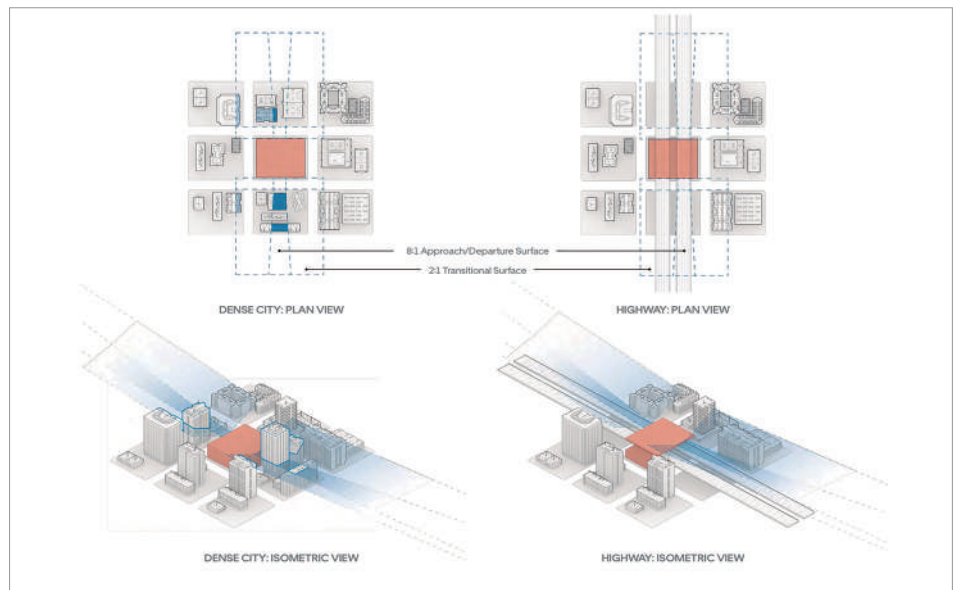
③ European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2022. 3.), Vertiports Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)

06 대안 및 연구 현황

확보하려면 충전 시간을 최소화해야 하며, 이를 위해서는 고출력 충전시스템이 필요합니다. 최근 배터리 전용 방식보다 수소 에너지 하이브리드방식의 UAM 기체²⁸⁾가 개발되고 있어 이를 위해서는 수소 충전시스템까지 갖추어야 합니다. 그러나 도심에서 대규모 충전설비와 수소 충전시설까지 구축하는 것은 기술적인 문제를 넘어 사회적 수용성이 필요한 사항입니다.

고층 빌딩이 많은 도심에서 안전한 접근항로를 확보하기 위해서는 가급적 버티포트 위치를 높여야 합니다. 그리고 비싼 토지 비용을 고려할 때 기존 고층 건물 옥상에 버티포트를 구축하는 것이 효과적입니다. 다만 일반적인 건물 옥상 크기를 고려할 때, 2개 이상 이착륙장을 갖춘 대형 버티포트를 구축하기 어려운 환경이며, 그리고 옥상 버티포트 규모가 크면 사용 중인 기존 건물을 보강해야 하므로 규모를 제한할 수밖에 없는 한계가 있습니다.

[그림 13] 도심 버티포트 위치 검토 예시 (Uber, 2019)²⁹⁾



도심에서 대형 버티포트를 구축할 수 있는 좋은 방안은 도심 하천이나 해안 위에 부유식 버티포트를 구축하는 방법입니다. 공유수면을 활용하기 때문에 토지 비용이 절감되고, 공간을 충분히 사용할 수 있어 대형 버티포트 구축이 가능합니다. 특히 사회적 기피시설로 인식되고 있는 고출력 충전설비와 수소 충전시스템을 하천이나 해안에 설치하면 사회적 수용성도 확보할 수 있습니다. 다만 지하철이나 버스 등과 같은 대중교통 환승 효율과 접근성이 부족하지만 차량 접근과 주차가 편리한 장점이 있습니다.

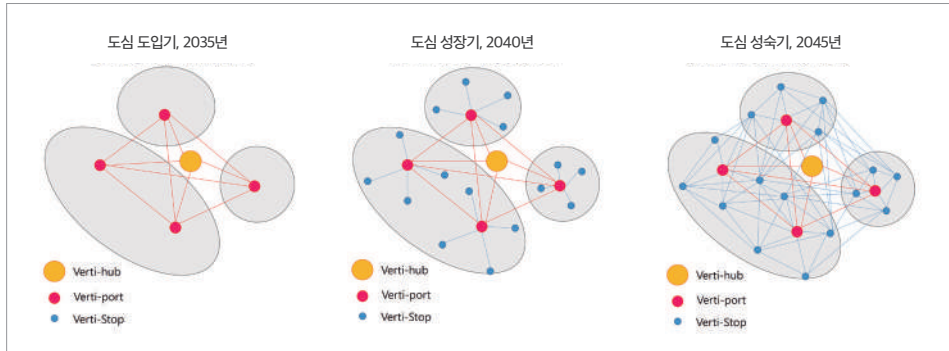
UAM 도심 네트워크는 허브 & 스포크 방식으로 구축될 것이라 필자는 예측합니다. 우리는 도심에서 가장 가까운 건물 옥상 버티포트에서 탑승하여 도심 환승 버티포트로 이동하고 신속하게 환승하여 목적지 건물 옥상 버티포트로 이동할 것으로 예상됩니다. 이때 도심 빌딩 옥상 버티포트는 승객의 승하차만 담당하

²⁸⁾ Popular Science (2024.7.12.), 수소로 나는 '에어택시', 841km 비행 성공,
<https://www.popsci.co.kr/newsarticleView.html?idxn=21633>

²⁹⁾ Uber Elevate (2019), Connect Evolved by Uber Elevate

는 버티스테이션(버티스탑)으로서, 부유식 버티포트는 도심 환승 및 충전 버티포트로서, 공항이나 도시 외곽의 대형 버티포트는 야간 주기 및 정비까지 담당하는 버티허브로서 상호 보완적이고 유기적인 역할을 할 것으로 예상합니다.

[그림 14] UAM 도심 진입 단계별 버티포트 네트워크 예상도 (한국건설기술연구원)



빌딩으로 가득한 도심 상공은 개활지에 위치한 기존 공항과 달리 난류가 많고, 특히 건물 옥상에는 빌딩 풍으로 인하여 이착륙하는 항공기에 위험한 기류가 발생할 확률이 높습니다. 최근 수직이착륙기가 실속할 수 있는 위험성(VRS, Vortex Ring State)에 대한 보고^㉔가 있어 이에 대한 연구가 필요하며, 기체 배터리 화재에 대한 소화 설비 기준 마련 등 많은 연구 개발이 필요한 시점입니다.

한국건설기술연구원은 2024년부터 “UAM 도심지 도입 및 활성화를 위한 이착륙장 구축 운영 건축물 설계 및 시공 기술 개발 기획 연구(연구책임자 주봉철)”를 하였으며, 2025년부터 “UAM 부유식 버티포트(이착륙장) 설계 시공 기술 개발 연구(연구책임자 주봉철)”를 하고 있습니다.

[그림 15] KICT 부유식 버티포트 조감도 (한국건설기술연구원)



㉔ Richard E Brown (2020), Are eVTOL Aircraft Inherently More Susceptible to the Vortex Ring State than Conventional Helicopters? The Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display

국토교통부도 2024년 UAM국가전략기술사업단(단장 국토교통과학기술진흥원 김민기)을 출범시키면서, 2026년까지 약 1,000억 원 규모의 국가R&D 사업(1단계)을 진행하고 있습니다. 2026년 인프라 분야 연구 성과로서 울산광역시 R&D 실증단지에 세계 최초 UAM 기체 엘리베이터를 갖춘 한국형 버티포트(연구책임자 현대엘리베이터 김현구)가 구축될 예정입니다.

항공선진국인 미국과 유럽은 UAM 기체 개발에 많은 역량을 투입하고 있으나 UAM 도심 진입 전략이나 도심 버티포트 구축 방안은 이제 고민을 시작하고 있어, 도심 UAM 인프라 분야는 우리나라가 선도하고 국제 표준을 리딩할 수 있을 것으로 기대하고 있습니다.

07 마치며

커피 한 잔을 손에 든 직장인이 삼성역 빌딩 옥상 엘리베이터에서 내리자 매끄러운 유선형의 기체가 조용히 내려왔고, 체크인부터 탑승까지 걸린 시간은 단 2분. 꽉 막힌 테헤란로를 발아래 두고, 10분 뒤 여의도 빌딩 옥상 버티포트에 도착해 바로 회의실로 향하는 모습은 영화의 한 장면이 아니라, 도시의 '점'과 '점'을 '직선'으로 잇는 시작과 끝, 버티포트(Vertiport)가 열어갈 머지않은 일상입니다.

※ 참고문헌

1. Deloitte Insights (2019), Infrastructure barriers to the elevated future of mobility
2. European Union Aviation Safety Agency (EASA) (2022), Vertiports Prototype Technical Specifications for the Design of VFR Vertiports for Operation with Manned VTOL-Capable Aircraft Certified in the Enhanced Category (PTS-VPT-DSN)
3. Federal Aviation Administration (FAA) (2022), Vertiport Design, Engineering Brief No. 105
4. Federal Aviation Administration (FAA) (2024), Vertiport Design, Engineering Brief No. 105a
5. Philip Butterworth-Hayes (2025), The global vertiport market map and forecast 2025-2029, Unmanned Publications Ltd
6. Richard E Brown (2020), Are eVTOL Aircraft Inherently More Susceptible to the Vortex Ring State than Conventional Helicopters?, The Vertical Flight Society's 76th Annual Forum & Technology Display
7. Uber Elevate (2019), Connect Evolved by Uber Elevate

新모빌리티를 고려한 차세대 자율주행협력 도로 인프라



글 박범진 / 한국건설기술연구원 도로교통연구본부 본부장
전화 031-910-0198 E-mail park_bumjin@kict.re.kr

01 배경

역사적으로 이동수단(모빌리티)과 도로(인프라)는 항상 상리 공생하는 관계였다. 새로운 이동수단의 등장은 도로의 발전을 야기하고, 도로의 발전은 다시금 이동수단의 혁신을 가져오는 협력적 관계였다. 최초의 인류는 사냥과 채집의 효율성을 위해 자연발생적으로 길을 조성하였고, 초원길의 발달은 가축을 활용한 지역 간 물류의 이동을 가능하게 하였다. 한 번에 많은 물류이동이 가능한 마차의 등장에 발맞추어 길은 점차 넓은 자갈도로로 변모되었고, 이는 더 많이, 더 빠른 물류의 이동을 가능하게 했다. 이러한 양(+)의 피드백은 규모의 경제를 활성화시키고 자본 기반의 기술혁신을 촉진하였으며, 기술혁신의 산물인 내연기관 모빌리티를 안전하게 이동시키기 위해 현 시대에는 아스팔트 도로가 보편적으로 자리잡게 되었다.

[그림 1] 新모빌리티 공존을 위한 도로의 미래와 역할^①



최근 자율주행차량을 위시한 이른바 新모빌리티의 등장과 더불어, AI(Artificial Intelligence), 지구온난화, 저출산·고령화, 도심 집중화, 자동화 로봇 확산 등 복합적인 글로벌 환경 변화가 동시에 진행되고 있다. 이러한 변화는 이동수단의 기술 혁신을 넘어, 이를 수용하는 기존 도로 인프라의 역할 및 기능에 대한 근본적 재정의의를 요구하고 있다. 특히 자율주행차량은 물리적 공간에서 인공지능이 직접 판단하고 행동하는 이른바 'Physical AI'의 대표적 사례로서, 기존 체계와는 현격히 다른 수준의 정보 처리 및 환경 인식 능력을 요구한다. 그러나 Physical AI를 대표하는 자율주행차량이 상용 서비스 단계에 진입하고, SDR(Software Defined Road)과 결합되는 등 대규모의 투자와 연구개발이 진행되고 있는 반면, 자율주행

① 한국건설기술연구원, 2025, 「모빌리티 혁신 Software Defined Road 전략연구단 제안서」.

02 Physical AI 자율주행차량 시즌 2의 현황과 전망

차량을 수용하고 지원하게 될 도로 인프라에는 이렇다할 변화가 없는 실정이다. 국내 공공부문 자율주행 연구개발 투자 금액은 약 2조^❷원 규모이며 글로벌 투자 금액은 수천 조에 이르는 현황이나, 이 중 자율주행차량을 위한 도로 인프라 관련 투자 금액은 총 투자금액의 10%에도 미치지 않는다.

이러한 투자 구조는 이동수단(모빌리티)과 도로(인프라)가 본질적으로 협력적 진화 관계에 있음에도 불구하고, 최소한 연구개발 측면에서는 그 균형에 균열이 생겼음을 시사한다. 자율주행차량 단독의 기술 향상만으로는 교통 시스템 전반의 안정성 및 사회적 수용성 확보를 담보하기 어렵다. 이에 따라 차량과 상호 소통이 가능하고, 자율주행 기능을 보조 및 확장할 수 있는 협력형 도로 인프라 구축의 필요성이 대두되는 시점이다. 이에 본 고에서는 자율주행차량으로 대표되는 新모빌리티와 공존하기 위한 도로의 미래상과 역할을 모빌리티와 인프라 간 협력이라는 관점에서 고찰하고자 한다. 이를 통해 향후 자율주행 시대에 요구되는 도로 인프라의 방향성과 정책적·기술적 시사점을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2.1 Physical AI

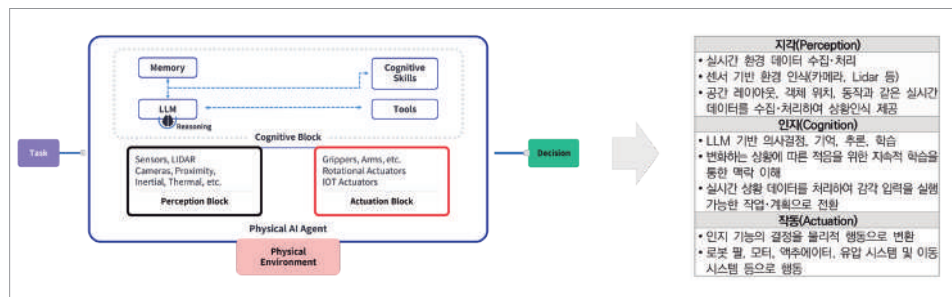
최근 대부분의 기술개발 분야에서 AI가 포함되지 않은 사례를 찾기 어려울 정도로 AI는 산업과 일상 전반에 깊숙이 활용되고 있다. 개인은 일상에서 AI 기반 서비스를 사용하고, 민간과 공공은 이를 보다 효과적으로 활용하기 위한 기술적·제도적 노력을 지속하고 있다. 이렇듯 최근 AI 기술의 급격한 성장 및 활용으로 인해 AI라는 개념은 최신 기술로 인식되기 쉽지만, 그 연구의 기원은 1956년 미국 다트머스 대학에서 열린 워크숍까지 거슬러 올라간다. 당시 연구는 인간의 사고 과정을 기계적으로 구현할 수 있다는 문제제기에서 출발하였으나, 제한적인 연산 능력 및 환경의 제약으로 인해 오랜 기간 실생활과는 거리가 먼 기술로 치부되었다. 그러나 최근 대규모 데이터 처리 능력과 컴퓨팅 성능의 비약적인 향상을 계기로 이러한 한계는 점차 극복되기 시작하였으며, 2016년 구글 딥마인드(Google DeepMind)의 인공지능 알파고(AlphaGo)가 세계 최고의 바둑 기사인 이세돌 9단을 상대로 승리를 거둔 사건은 AI가 특정 영역에서 인간을 능가할 수 있음을 대중에게 각인시켰다. 이후 ChatGPT의 등장과 함께 자연어 처리와 이미지 생성 기술을 중심으로 한 생성형 AI(Generative AI)가 빠르게 확산되었으며, 현재에 이르러 AI는 연구의 영역을 넘어 일상생활과 사회 전반에 직·간접적 관여하는 단계로 진입하게 되었다. 그러나 생성형 AI는 디지털 환경에서의 정보 생성 및 분석에 강점을 가지는 반면, 실제 물리적 환경과 직접적인 상호작용이 필요한 영역에서 한계를 드러낸다. 현실 세계는 예외 상황과 불확실성이 상시적으로 발생하며, 사전에 정의되지 않은 변수들이 복합적으로 작용한다. 이로 인해 단순히 데이터 학습과 알고리즘 개선만으로는 물리적 환경에서의 안정적인 판단과 행동을 지속적으로 보장하기 어렵다는 인식이 확산되었다. 이러한 배경 속에서 등장한 개념이 Physical AI이다.

기존의 로봇 시스템은 반복적인 작업을 자동화하기 위해 설계되었으며, 사전에 정의된 규칙과 절차에 따라 부여된 임무를 수행하는데 그쳤다. 여기에 AI 기술이 접목되면서 주어진 규칙 범위 내에서 보다 효율적인 방법을 탐색하거나 작업 순서를 최적화하는 방향의 성능 향상이 이루어졌다. 다만, 이는 여전히 정의된 규칙과 환경 조건에 의존하며, 예상치 못한 환경 변화나 예외 상황에 정상 동작을 유지하기 어렵다는 구조적 제약을 가지고 있었다. Physical AI는 여기서 더 나아가 인간이 모든 상황을 사전에 정의하지 않

❷ 한국교통연구원, 2020, 「월간교통 10월호, 특집2」 「자율주행 기술개발 혁신사업」 주요 내용 및 향후 추진계획.

더라도 목표를 중심으로 스스로 판단하고 행동을 조정할 수 있는 시스템을 지향한다. 즉, 실패 상황을 스스로 복구하거나 대안을 탐색할 수 있으며, 환경 변화에 능동적으로 적응하는 특성을 가진다. 디지털 공간에 국한되어 있던 기존 AI와 달리, 센서를 통해 현실 세계를 인지하고 액추에이터를 통해 물리적 환경과 직접 상호작용할 수 있는 새로운 형태의 AI라 할 수 있다. 이러한 Physical AI의 개념은 2025년 CES에서 NVIDIA의 Jensen Huang이 ‘Cosmos’를 Physical AI의 본격적인 시작으로 선언하며 대중적으로 주목받기 시작하였다. NVIDIA^㉒는 Physical AI를 “세상을 관찰할 수 있는 센서와 세상과 상호작용할 수 있는 액추에이터가 통합된 AI 시스템”으로 정의하고 있으며, Nature^㉓는 “로봇의 몸과 두뇌가 결합하여 환경과 상호작용하는 AI”로 설명하고 있다.

[그림 2] Physical AI의 핵심 구성요소^㉔



2.2 Physical AI와 자율주행

Physical AI의 등장은 자율주행에 있어 중요한 전환점을 형성하였다. 기존의 자율주행기술은 구조적으로 로봇 시스템의 특성을 지니고 있었다. 즉, 도로교통법에 의해 규정된 통행규칙과 인간이 운전하는 과정에서 판단하였던 로직을 정형화하여 자율주행차의 운행 규칙으로 입력하고, 입력된 규칙에 따라 차량이 주행하도록 설계된 방식이었다. 다양한 센서를 통해 수집된 환경 정보 역시 미리 정의된 규칙 집합 내에서 주행방식을 결정하는 보조 수단으로 활용되는데 그쳤다.

자율주행을 위해 필요한 구성요소를 지각(Perception), 인지(Cognition) 및 작동(Actuation)으로 구분할 때, 기존 자율주행은 인간이 사전에 입력한 규칙에 의해 인지하고, 그 결과에 의해 지정된 작동만을 실행하는 방식이라 할 수 있다. 이에 따라 사전에 규정되지 않은 형태의 지각 정보가 입력되거나, 인지 단계에서 학습되지 않은 복합적인 상황이 발생할 경우 이를 적절히 해석하지 못하고 작동이 정지되었다. 이로 인해 자율주행 기능이 중단되고 인간 운전자에게 제어 권한을 넘기는 상황을 “Hand over”라 한다. Physical AI와의 결합은 이러한 제어권 전환이 발생하지 않도록 하는 것을 목표로 한다는 점에서 기존 방식과의 근본적인 차별점을 가진다. 특히 End-to-End, 일명 E2E 학습 방식이 결합되면서 Physical AI 기반 자율주행의 성능은 급속히 고도화되고 있다. E2E 학습은 지각, 판단, 제어 과정을 개별 모듈로 분리하지 않고, 하나의 신경망이 입력부터 출력까지 모든 과정을 통합적으로 학습하여 외부 환경 변화에 보다 빠르고 유연한 대응이 가능하게 한다. 이는 사전에 모든 행동 규칙을 정의하지 않더라도, 다양한 주행 상황에

㉒ NVIDIA, 2025, “Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI.”

㉓ Nature, 2020, “Skills for Physical Artificial Intelligence,” Nature, 2020년 11월호.

㉔ Boussetouane, F., 2025, “Physical AI Agents: Integrating Cognitive Intelligence with Real-World Action,” arXiv preprint.

서의 판단과 행동을 데이터 기반으로 스스로 학습 및 개선할 수 있는 구조를 의미한다.

이와 같은 학습 구조가 Physical AI와 결합함으로써, 자율주행기술은 단순한 규칙 실행 시스템을 넘어 실제 물리적 환경과 상호작용하며 주행 전략을 지속적으로 조정 및 발전시키는 방향으로 진화되고 있다. 이러한 변화는 자율주행기술이 보다 복잡하고 예외적인 실도로 환경에서도 안정적으로 작동할 수 있는 가능성을 확장하고 있으며, 기존의 자동화 수준을 넘어 완전 자동화 수준의 도달을 도모하고 있다. 이러한 맥락에서 Physical AI 구현을 위한 데이터 활용 전략은 자율주행 기술의 성격과 발전 방향을 결정하는 핵심 요소로 작용한다. 가상 데이터를 활용한 Physical AI와 실제 주행 데이터 기반 Physical AI를 선택한 대표적인 사례로는 각각 NVIDIA와 Tesla를 들 수 있으며, 두 접근 방식은 데이터 수집 및 학습 전략 수립 측면에서 뚜렷한 차이를 보인다. 그 차이는 다음 [표 1]과 같다.

[표 1] Physical AI의 핵심 요소 데이터^⑥

구분		NVIDIA (가상 데이터 기반 Physical AI)	Tesla (실물 데이터 기반 Physical AI)
기술명		COSMOS	FSD (Full Self Driving)
데이터 이미지			
정의		생성형 AI를 활용한 가상 환경 학습 플랫폼	현실 도로 데이터 학습 기반 자율주행 AI
데이터	유형	기존 데이터 기반 생성형 AI가 생성한 가상 영상	실제 도로 주행 영상 비디오, 센서 데이터 (운전자 행동, 날씨, 도로 구조 등 반영)
	학습방식	물리법칙을 반영한 시뮬레이션 환경에서의 AI 학습 (데이터 합성으로 더욱 다양한 상황 경험)	실시간 도로 데이터를 신경망 학습을 통해 FSD 알고리즘에 갱신
	규모	약 20만 시간의 시뮬레이션 데이터 학습	매분 2,380분의 실제 주행 영상 수집
장단점	강점	대규모 시뮬레이션으로 AI 모델 빠르게 학습 (자동차뿐만 아니라 다양한 산업 적용 가능)	현실에서 발생하는 다양한 예외 상황 학습 가능 (도로 주행에 최적화된 데이터셋 구축)
	한계	가상 환경이 현실을 완벽히 대체할 수 없음	데이터 수집에 시간과 비용 소요 (악천후 상황 등 특정 환경의 데이터 부족 등)

03

자율주행 차량과의 협력하는 도로 인프라

3.1 자율주행협력 인프라의 중요성

Physical AI와 E2E 학습의 결합을 통해 자율주행차량은 과거에 비해 보다 효율적이고 편리한 주행 성능을 구현할 수 있는 기술적 환경을 갖추었다. 그럼에도 불구하고 보다 안전한 주행환경을 확보하기 위해서는 차량 자체의 기술 발전만으로 충분하지 않으며, 차량이 실제로 주행하는 공간인 도로 인프라의 역할 변화도 반드시 동반되어야 한다. 즉, 자율주행 시스템의 고도화는 차량 중심의 기술 발전을 넘어 이를 수용하고 지원하는 인프라의 역할과 적절히 결합될 때, 그 효과를 극대화할 수 있다.

자율주행차량이 구동하는 과정의 가장 첫 단계인 '인식'은 차량에 부착된 각종 센서가 도로와 주변 사물을 감

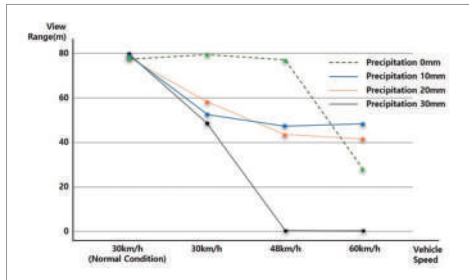
⑥ 정보통신기획평가원(IITP), 2025, 「ICT Brief(2025-06gh)」, 2025년 2월.

지하고 정보를 수집하는 과정이다. 이 때 차량이 이동하는 인프라인 도로는 그 자체만으로도 차량의 거동 가능 여부와 주행 안정성을 결정할 수 있을 만큼 차량 제어의 핵심 요소로 작용한다. 차량이 목적지까지 안전하게 이동하기 위해서는 통로에 해당하는 도로가 물리적·정보적 측면에서 충분한 지원 기능을 수행해야만 한다. 또한 도로에는 도로표지판, 노면표시를 포함한 각종 도로·교통 시설이 설치되어 있으며, 이들 시설은 도로의 통행 규칙과 질서를 설명하는 역할을 수행하여 그 무엇보다 차량 제어에 직접적인 영향을 미친다.

AI는 인간의 두뇌와 같은 역할을 수행하는 방향으로 진화하고 있다. 이는 인간이 판단하기 어려운 상황이라면 AI 또한 동일한 한계에 직면할 수 있다는 말과 같다. 비록 AI가 인간보다 빠른 추론과 일관된 판단을 수행할 수 있지만, 사람과 마찬가지로 자율주행차량 역시 시야가 제한되는 상황, 즉 센서의 인식 성능이 제한되는 환경에서는 올바른 판단이 이루어지지 못하거나 판단 자체가 불가능한 상황이 발생할 수 있다. 이러한 경우 잘못된 판단은 사고로 이어질 수 있으며, 판단이 불가능한 경우에는 자율주행 기능이 중단되고 제어권 전환이 발생하여 차량이 도로 한 가운데 정차하는 상황이 초래될 수도 있다.

이와 같은 문제가 가장 빈번히 발생할 수 있는 상황 중 하나가 바로 악천후 환경이다. 상기 언급한 Tesla의 사례에서도 드러나듯이, 악천후 등 특정 환경의 데이터는 일반적인 주행 상황과는 달리 학습에 필요한 충분한 데이터 구득이 어렵기 때문에 인지 및 판단 성능에 제약이 발생한다. 아래 [그림 3]과 같이 영상센서를 활용한 객체 인식의 경우 강우량과 차량 주행속도에 따라 가시거리가 급격히 감소하며, 강우량이 증가할수록 그 거리가 극단적으로 짧아져 정상적인 차량 제어가 어려운 수준에 이를 수 있다. 이러한 문제를 차량 단독의 성능 향상만으로 해결하기 위해서는 대규모 추가 데이터 확보와 장기간의 학습, 센서 고도화가 요구되며, 인프라의 도움 없이 이를 해결하기 위해서는 시간과 비용, 기술 측면에서 상당한 부담이 발생한다.

[그림 3] 강우량에 따른 영상센서의 인식거리 변화⁷⁾



이러한 자율주행차량의 구조적·환경적 제약을 극복할 수 있는 방안이 바로 자율주행협력 인프라의 구축이다. 자율주행협력 인프라는 자율주행차량과 도로 인프라가 상호 협력함으로써, 차량 단독으로는 극복하기 어려운 인식 및 판단의 한계를 보다 단기간에 보완하거나, 주행 안전성을 확보 가능한 신뢰도 높은 정보를 제공하는 것을 목표로 하는 도로 인프라이다. 쉽게는 예를 들어 악천후 상황에서도

강우량과 주행속도에 무관하게 영상센서가 일정 수준 이상의 객체 인식 성능을 유지할 수 있도록 인프라 차원에서 보조 정보를 제공한다면, 고가의 센서 추가 또는 대규모 학습 데이터의 추가 수집 없이도 다양한 차량과 환경에서 안전한 자율 주행을 보장할 수 있을 것이다.

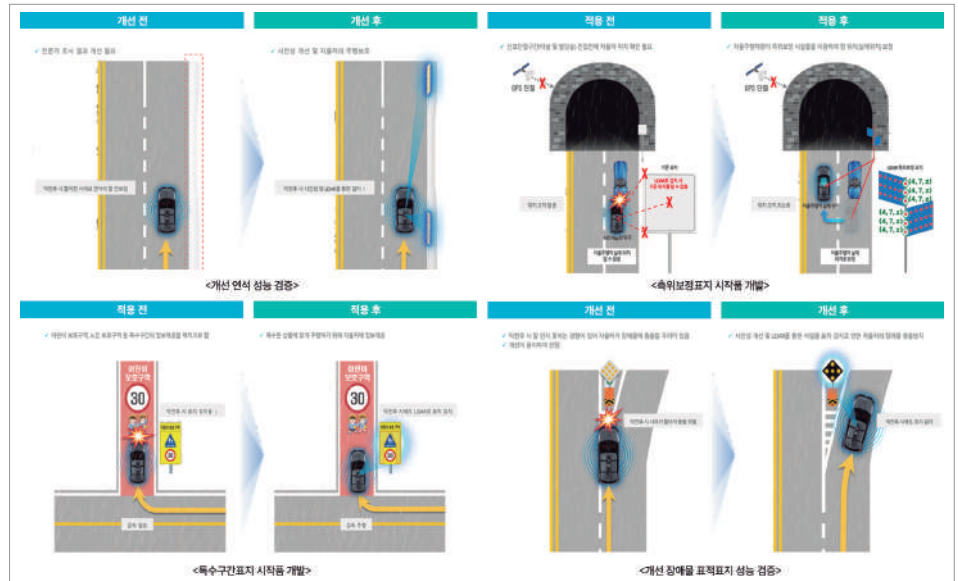
이러한 역할을 수행하는 협력 인프라는 자율주행전용 도로와 차로, 도로에 설치·운영되는 표지판 및 시설물을 포함한 물리적 도로 인프라와, 통신을 통해 차량에 정보를 제공하는 디지털 도로 인프라로 구분할 수 있다. 이러한 협력 인프라는 도로 자체가 차량 주행을 적극적으로 지원하는 ‘똑똑한 도로’로 진화하는 기반이 되며, 이를 통해 보다 안전하고 신뢰성 높은 도로 환경을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

7) Rho, C. et al., 2020, “Analysis of Impact of Rain Conditions on ADAS,” Sensors, Vol. 20, No. 6720.

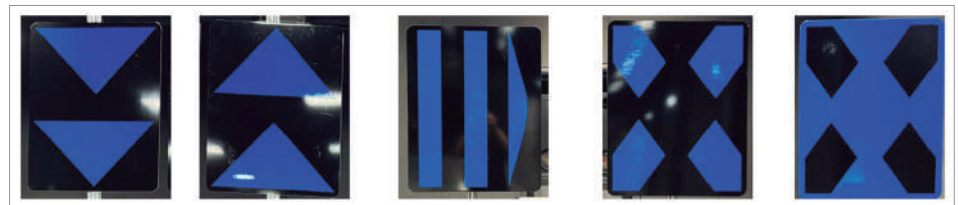
3.2 자율주행협력 인프라 사례

물리적 시설물을 이용한 자율주행협력 인프라는 크게 도로 연석 등 도로 기하 구조 관련 인프라, 장애물 표적표지 및 어린이보호구역과 같은 특수구간 표지 등 도로표지, 그리고 차량의 위치 정확도를 향상시키기 위한 측위 보정 표지 등으로 구분할 수 있으며, 현재 다양한 시설물의 개발 및 실증 연구가 진행되고 있다.

[그림 4] 자율협력주행 지원 물리 인프라^⑤



[그림 5] 자율협력주행 지원 물리 인프라 센서 전용 시설물^⑥



이러한 센서 전용 물리 시설물은 사람의 육안 식별을 목적으로 하는 기존의 도로 시설물과 달리, 자율주행 차량에 탑재된 센서, 특히 가장 보편적으로 사용되는 LiDAR(Light Detection and Ranging)의 인식률을 높 이는데 목적이 있다. 이에 따라 상기 [그림 4], [그림 5]와 같이 기존 도로 시설물과는 차별화된 패턴 형 태 로 구성되며, 센서의 인식 강도(Intensity)가 높은 영역이 최대한 많이 관측될 수 있도록 설계되었다.

실도로 환경에서 자율주행협력 인프라의 성능을 검증한 결과, 측위보정 표지의 경우 83.09%의 위치 오차 감소 효과를 확인하였으며, 타 물리 인프라 역시 해당 시설이 부재한 상황에 비해 차량이 사전에 도로 상황 을 빠르게 인식하고 보다 안정적으로 주행 제어를 수행하는 효과가 확인되었다. 이와 함께 자율주행차의 현재 위치 확인과 경로 유도 과정에서 발생 가능한 오류를 최소화하기 위한 LDM(Local Dynamic Map) 등 의 디지털 도로 인프라는 차량 센서의 인식 성능을 보완하고, 보다 안전한 자율주행 기술 구현을 지원하는 대표적인 자율주행협력 인프라 사례로 평가할 수 있다.

⑤ 한국건설기술연구원, 2024, 「클라우드 소싱 기반의 디지털 도로·교통 인프라 융합 플랫폼 기술 개발 2단계 보고서」.

04 미래도로 현황과 전망

미래도로는 자율주행차와 일반차량이 혼재된 환경으로 운행되는 과도기를 거칠 것이며, 이후 기술과 인프라의 발전, 충분한 정책적 뒷받침과 사회적 합의를 거쳐 궁극적으로는 자율주행차만이 도로 위를 질주하는 '완전 자동화 시대'로 나아갈 것이다. 이를 위해서는 혼재류에서의 교통류 관리와 에너지 최적화, 교통사고 제로화 등 주요 교통 시스템 목표 달성을 위한 노력이 지속적으로 요구되며, 이는 단순히 자율주행차의 보급만으로는 해결되기 어렵다. 진화된 도로 인프라와 자율주행차가 상호 협력함으로써 이러한 사회적 목표 달성에 한 걸음 다가갈 수 있으며, 진정한 미래도로의 전환은 바로 이러한 협력형 자율주행 지원 기술, 즉 시스템 관점에서 인프라 가이던스가 실현될 때 비로소 시작될 수 있다.

[그림 6]은 인프라 가이던스가 실도로 환경에서 어떻게 기능할 수 있는지를 나타낸다. 이 개념도는 다양한 도로 구간과 상황에 대해 도로 인프라와 차량이 실시간으로 통신하며, 교통 흐름을 더 안전하고 효율적으로 유도하는 여러 가이던스 서비스를 표현한다. 예를 들어 교차로 진입 시 안전하고 소통이 원활한 진입 궤적을 안내하는 신호 교차로 가이던스, 비상 상황에서 차량의 위험을 최소화하고 혼잡 유발을 사전에 방지하는 돌발상황 가이던스, 이면도로 환경의 정보를 제공하여 보행자와 차량 모두의 안전을 제고하는 VRU (Vulnerable Road User) 안전 가이던스, 특정 구간에서 교통 흐름을 원활히 유지하도록 돕는 전방 저속차량 추월 가이던스 등이 포함된다. 이러한 서비스는 도로 시설물, 센서, 통신 장치 등 물리·디지털 협력 인프라 요소가 유기적으로 결합되어 파악된 정보를 차량에 실시간으로 제공함으로써 실현된다. 이는 단순히 도로상 안내시설을 넘어 도로와 차량, 보행자 등 실도로 환경의 구성 요소가 통합적으로 상호작용하고, 미래도로가 진정한 지능형 시스템으로 동작할 수 있는 청사진을 제시한다.

이러한 미래도로 청사진이 실도로 환경에서 적용되기 위해서는, 기술 구현을 넘어 차량과 인프라 간의 협력 범위를 명확히 규정하고 공통된 기준으로 운영 가능한 제도적, 기술적 틀이 필수적이다. 이러한 역할을 수행하는 것이 바로 국제 표준이며, 대표적으로 자율주행 기술의 기능적 범위를 설명하는 SAE J3016^⑩ 표준은 운전자 개입 수준과 자동화 기능에 따라 자율주행 기술 단계를 정의하고 있다. 이를 기반으로 최근 발표된 SAE J3216^⑪ 표준은 체계화된 협력주행 자동화 관련 용어와 개념을 제시하며, 차량과 차량, 차량과 인프라 사이의 협력 등급을 정의하고 있다. 이는 향후 '협력형 자율주행' 기술이 교통 안전과

[그림 6] 인프라 가이던스 서비스 최종 목표 및 개념도^⑨



⑨ 한국건설기술연구원, 2025, 「인프라 가이던스를 통한 자율차 주행지원 기술 개발 연차보고서」.

⑩ SAE International, 2016, 「Taxonomy and Definition for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles」, 2021년 개정판.

⑪ SAE International, 2021, 「Taxonomy and Definition for Terms Related to Cooperative Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles」, 2025년 개정판.

지속 가능한 시스템 형성을 위한 방향성으로 자리잡고 있음을 시사한다. 인프라와 차량의 협력 주행은 현재 자율주행 기술의 수준을 한 단계 넘어설 수 있도록 발판을 제공하는 핵심 요소이며, 인프라 가이드는 이러한 요소들을 통합적인 시스템으로 구현하여 실제로 이용자들에게 정보 형태로 제공한다. 이는 자율주행 수준의 향상뿐만 아니라, 교통 시스템 전반의 이동성, 안전성, 환경성을 개선하여 지속 가능한 시스템으로 나아가는 밑거름이 될 것으로 기대된다.

05 맺음말

자율주행차량을 비롯한 新모빌리티의 등장은 단순히 교통수단의 혁신을 넘어, 도로 인프라와의 새로운 협력 관계를 근본적으로 재정의할 것을 요구하고 있다. 역사적으로 도로와 이동수단은 상호 진화하여 교통 체계의 발전을 이끌어왔으며, 자율주행 시대 역시 이러한 진화의 연장선상에 놓여 있다. 다만 앞으로의 도로는 단순한 물리적 통행 공간을 넘어 차량과 정보를 교환하고 주행을 지원하는 지능적 인프라로의 진화가 요구된다. Physical AI와 E2E 학습을 통해 차량 자체의 성능은 비약적으로 향상되고 있지만, 악천후·복잡 교통 상황 등 차량 단독으로는 극복하기 어려운 한계는 여전히 존재한다. 이를 보완하고 시스템의 안정성을 뒷받침하는 핵심 요소가 바로 자율주행협력 인프라로, 물리·디지털 인프라의 결합을 통해 차량과 도로가 함께 학습하고 대응하는 새로운 패러다임을 제시하고 있다.

미래 도로는 자율주행차와 일반차량이 공존하는 과도기를 거쳐 점진적으로 완전 자동화 시대에 도달할 것이다. 이 과정에서 교통사고 제로화, 에너지 최적화, 교통류 효율화라는 사회적 목표를 달성하기 위해서는 차량 자체의 기술 고도화와 더불어 협력형 도로 체계 구축이 필수적이다. 결국 미래의 도로는 단순한 이동의 통로가 아니라, 자율주행차와 함께 판단하고 대응하는 지능적 파트너로서 지속가능한 교통 생태계를 만들어가는 핵심 주체가 되어야 한다. 이러한 전환은 기술 발전과 사회적 수용성 확보, 정책적 지원, 단계적 인프라 투자 전략이 병행될 때 비로소 실현 가능하며, 궁극적으로 인류의 이동 경험을 한 단계 진화시키는 미래 교통 시스템을 향한 중요한 이정표가 될 것으로 기대된다.

※ 참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 2025, 「모빌리티 혁신 Software Defined Road 전략연구단 제안서」.
2. 한국교통연구원, 2020, 「월간교통 10월호, 특집2] 자율주행 기술개발 혁신사업 주요 내용 및 향후 추진계획」.
3. NVIDIA, 2025, “Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI.”
4. Nature, 2020, “Skills for Physical Artificial Intelligence,” Nature, 2020년 11월호.
5. Boussetouane, F., 2025, “Physical AI Agents: Integrating Cognitive Intelligence with Real-World Action,” arXiv preprint.
6. 정보통신기획평가원(IITP), 2025, 「ICT Brief(2025-06gh)」, 2025년 2월.
7. Rho, C. et al., 2020, “Analysis of Impact of Rain Conditions on ADAS,” Sensors, Vol. 20, No. 6720.
8. 한국건설기술연구원, 2024, 「클라우드 소싱 기반의 디지털 도로·교통 인프라 융합 플랫폼 기술 개발 2단계 보고서」.
9. 한국건설기술연구원, 2025, 「인프라 가이드를 통한 자율차 주행지원 기술 개발 연차보고서」.
10. SAE International, 2016, 「Taxonomy and Definition for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles」, 2021년 개정판.
11. SAE International, 2021, 「Taxonomy and Definition for Terms Related to Cooperative Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles」, 2025년 개정판.

지상·지하 입체도시 건설을 위한 기술 혁신의 도전과 과제



글 서민호 / 국토연구원 연구위원
전화 044-960-0379 E-mail mhseo@krihs.re.kr

01 들어가며: 국토·도시의 시·공간 압축과 입체도시의 도래

21세기 메가시티(Mega-City)는 수평적 확산(Sprawl)의 한계를 극복하고 수직적 통합(Vertical Integration)으로 나아가는 진화의 변곡점에 서 있다. 과거 산업화 시대의 도시는 기능적 구획화(Zoning)에 의존하여 주거, 업무, 상업 공간을 평면적으로 분리하고, 이를 도로와 철도망으로 연결하는 방식을 채택했다. 그러나 인구의 과밀화와 가용 토지의 고갈은 이러한 평면적 확장의 종말을 고하고 있으며, 도시는 이제 지하 심층부부터 지상 초고층까지 가용한 모든 공간을 입체적으로 활용해야 하는 필연적 과제에 직면했다.

그간 철도와 도로 등 거대 인프라는 도시의 혈관 역할을 수행해왔으나, 동시에 생활권을 단절시키거나 소음과 분진을 유발하며 지역 간 불균형을 심화시키는 이중적 영향도 끼쳐왔다. 도시의 성장에 따라 철도 인근까지 상업·주거지가 확장됨으로 인해, 지상 철도가 '도심 속의 섬'처럼 남아 도시 조직의 유기적 연결을 저해하는 상황이 발생하고 있는 것이다. 이러한 변화로 인해 철도나 도로 등 인프라를 지하화하여 단절된 도시 공간을 연결하고, 상부 공간에 녹지와 공공·문화시설 등으로 기능을 복합화하여 도시의 어메니티(Amenity)를 회복하려는 '도시공간 재구조화'가 새로운 도시계획 아젠다로 부상하고 있다. 이는 단순한 토목·건축공사를 넘어, 도시의 물리적 형상과 사회적 기능을 근본적으로 재편하는 도시계획적 혁명으로 볼 수 있다.

입체도시 논의를 가속화하는 핵심 동력은 고속철도(KTX·SRT)나 수도권 광역급행철도(GTX)로 대표되는 고속 광역 교통망의 확충이다. 데이비드 하비(David Harvey)가 주창한 '시·공간 압축' 개념은 현대 도시에 서 물리적 거리가 교통 기술의 발달로 인해 시간적 거리를 단축시키면서 발생하는 사회·경제적 변화를 설명한다. 시·공간 압축으로 지역 간 접근성과 연결성이 개선될 경우, 메칼프의 법칙(Metcalf's law)에서 설명하는 네트워크 효과로 경제·사회적 효용은 단순히 교류의 규모만큼 증대되는 것이 아닌 승수배 커질 가능성이 있다.^① 이미 KTX와 SRT는 전국을 반나절 생활권으로 연결하고 있고 GTX는 수도권 외곽에서 서울 도심까지의 이동 시간을 획기적으로 단축시키고 있다. 이 연결의 효과가 본격 창출되기 시작하면, 우리 국토와 도시는 물리적으로는 떨어져 있으나 기능적으로는 하나의 거대 도시권으로 연계·통합되는 '초광역 메가시티'로 발전할 가능성이 높다.

작년 우리 고속철도는 한해 역대 최고수준인 1억 1,870만명의 승객이 이용하고 있다. 그 영향으로 주요 경제권을 연결하는 핵심 거점인 고속철도역은 그 어느 때보다 더 단순 승하차 공간을 넘어 주거, 업무, 상업, 문화가 집약된 고밀도 복합환승공간으로의 전환을 요구 받고 있다. 여기에 최근 국가적 정책사업으로 추

① 서민호. 2025. "도심융합특구를 통한 초광역권의 성장과 공간혁신 플랫폼 형성". 월간 <국토> 제525호. 국토연구원. 2025.7.

진되고 있는 철도지하화통합개발로 인해 그간 도시공간을 물리·기능적으로 지상 철도 지하화가 본격화 될 경우, 주요 철도역은 지상과 지하를 결합한 입체도시로 확장되면서 제한된 토지 자원 위에서 시공간 압축 효과를 극대화하는 대표적 도시계획적 수단이 될 수 있다. 관건은 지하 40~50m 깊이의 대심도 공간과 지상 공간을 수직으로 연결하고, 다양한 교통 수단 간의 환승 저항을 최소화하며, 상부의 도시 기능을 지지할 수 있는 입체도시 건설의 고도화된 엔지니어링 기술이 준비되었느냐는 점이다.

입체도시 건설은 토목, 건축, 플랜트, 환경, IT 기술이 총체적으로 융합되어야 하는 '건설 기술의 총아'이다. 기존에 운영 중인 철도나 도로의 기능을 유지하면서 하부를 굴착하는 언더피닝(Underpinning) 기술, 지하 수십 미터 아래의 엄청난 토압과 수압을 견디는 흙막이 기술, 그리고 복잡한 도심지에서의 소음 및 진동 제어 기술, 복잡한 교통체계를 서로 입체적으로 연결하면서 도시의 여러 기능을 복합화하는 환승센터를 지상과 지하에 일체적으로 건설하는 기술은 프로젝트의 성패를 좌우하는 핵심 요소이다.

이러한 맥락에서 쌍용건설과 같은 고도의 기술력을 보유한 건설사의 역할은 그 어느 때보다 중요하다 할 수 있다. 본고는 지상-지하 입체도시 건설을 위한 4대 핵심 기술 과제를 도출하고, 국내외 선진 사례를 비교 분석함으로써, 미래 건설 산업이 나아가야 할 방향과 기술적 도전·혁신과제들을 심층적으로 조망하고자 한다.

2.1 철도지하화와 철도부지 통합개발로의 정책 대전환

도심 지상철도를 지하화 하고자 하는 노력은 근 십 수년간 지속되어 왔다. 급속한 도시화에 따라 철도가 도심에 입지하게 되면서 도시공간적으로 물리·기능적 단절이 야기되고 있고, 철도부지 주변의 노후화로 인해 주민들의 피해가 커지고 도시의 균형발전이 어려워졌기 때문이다. 또한 최근 철도역이 새로운 성장거점으로 각광받으면서 도시의 신(新)산업 도입과 지역간 연결을 통한 새로운 도시혁신의 동력으로 주목받으면서 도심에 자리잡은 대규모 철도부지를 활용하여 경제·사회적 도약을 꾀할 수 있는 개발이 시급하는 지적이 계속 제기되어 왔다. 그 과정에서 2024년 1월 제정된 '철도지하화 및 철도부지 통합개발에 관한 특별법'(이하 철도지하화통합개발법)은 그동안 막대한 재정 부담과 복잡한 이해관계로 인해 답보 상태에 머물렀던 철도지하화 사업에 획기적인 전기를 마련했다. 그리고 이 법이 사회적으로 합의되어 마련된 배경에는 '선(先) 지하화, 후(後) 개발'의 환수^❷라는 재정 모델의 법제화에 있다.

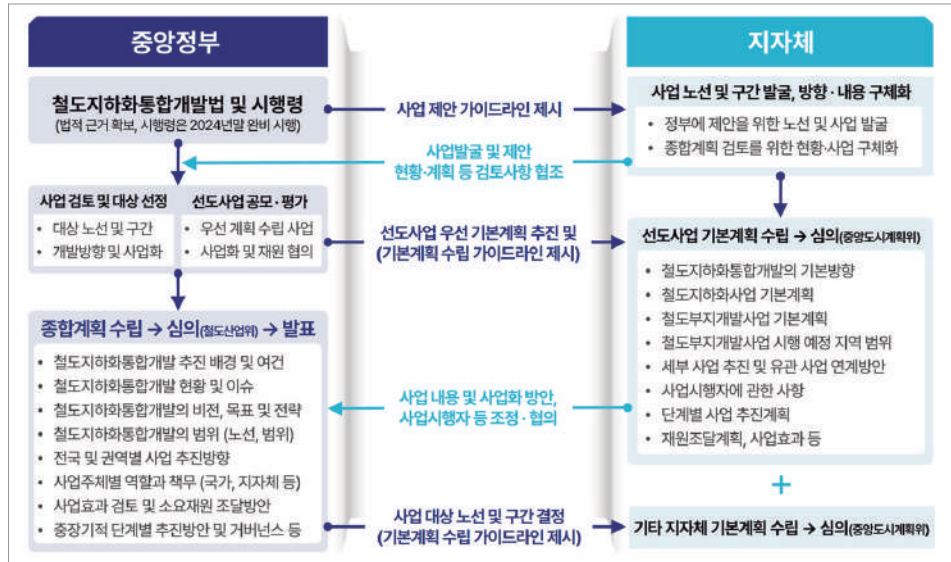
그간 철도 지하화 논의가 실패했던 주된 원인은 막대한 건설 비용 대비 편익(B/C) 확보가 어려워 예비타당성 조사의 경제성 분석 통과가 어렵다는 것이 주된 문제 중 하나로 꼽혔다. 그러나 특별법은 정부는 사업시행자에게 국유재산인 철도 부지를 출자할 수 있게 하였고, 상부 부지의 개발 이익을 통해 지하화 비용을 충당하는 구조를 채택함으로써 예비타당성 조사 면제의 길을 열었다. 이 외 용적률 및 건폐율 완화, 부담금 감면 등 인센티브를 제공하고 사업 부족분이 발생할 경우 지자체의 지원을 통해 충당하는 체계를 제도화함으로써 사업성과 사업안정성을 강화하고 있다.^❸

❷ 서민호. 2024. "국토·도시공간 재구조화를 위한 철도 지하화의 의미와 과제". 월간 <교통> 제314호. 한국교통연구원. 2024.4.

[표 1] 기존 철도 건설사업과 철도지하화통합개발 사업 비교

구분	기존 철도 건설 사업	철도지하화통합개발 사업
재원조달	국가 및 지자체 재정	국가의 사업시행자 국유지 출자 + 사업시행자 채권 발행(선투입) + 상부 개발이익(후상환)
개발방식	철도 노선 위주 선형 공사	철도 지하화 + 철도역·부지 및 주변지역 개발
규제적용	기존 법상 규제 적용	용적률 완화, 부담금 감면 등 특례 적용
추진주체	공공(국가철도공단 등)	공공사업시행자 또는 컨소시엄 (토지분양 후 민간참여)

[그림 1] 철도지하화통합개발 종합계획(정부)와 기본계획(철도 : 국가, 상부 : 지자체) 수립의 틀



자료 : 서민호 2024. 성공적 철도지하화 통합개발을 위한 사업 추진 고려 사항. 철도지하화 통합개발 추진 협의체 출범식. 국토교통부. 2024.4.4.

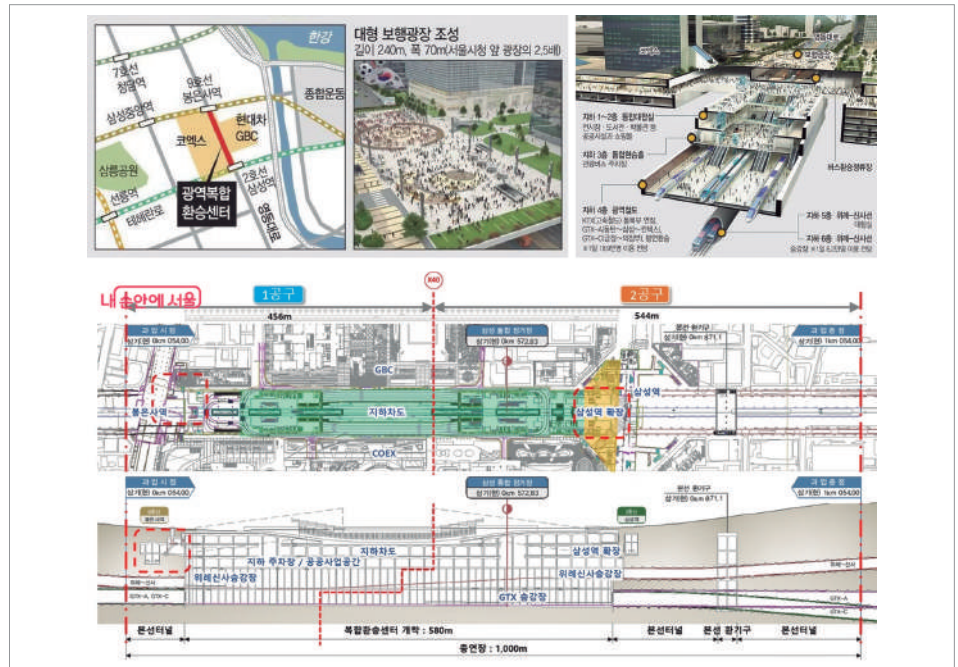
이 법의 시행으로 서울, 부산, 대전, 광주, 경기도 일원의 주요 도시들이 도심 통과 구간에 대한 지하화 계획을 구체화하여 제안하고 있고, 정부가 마련하고 있는 <철도지하화통합개발 종합계획>에서는 사업 대상노선·구간과 사업방향 및 방식 등을 구체화 할 전망이다. 그러나 이러한 장밋빛 전망 이면에는 여전히 해결해야 할 난제들이 존재한다. 개발 이익이 확실시되는 핵심 요지를 제외한 구간, 특히 사업성이 낮은 선형 구간에서의 자원 마련 방안이 불투명하다는 지적이 있다. 또한, 상부 개발이익을 극대화하기 위해 과도한 고밀도 개발이 이루어질 경우 발생할 수 있는 교통 혼잡과 건설 및 철도운영 안전 문제, 장기간의 사업기간 소요와 이에 따른 재원조달의 불안정성 등에 대한 우려도 제기된다. 따라서 국가의 종합계획 이후 추진될 지자체는 노선별 기본계획 수립 시에는 환경적, 사회적, 도시계획적 측면 뿐 아니라 실제 건설단계별로 예상되는 난제들을 어떻게 해결할 것인가에 대한 심도 있는 기술적 검토와 대응방안을 종합적으로 고려한 정교한 마스터플랜을 수립할 필요가 있다.

2.2 도시 입체화의 새로운 도전 : 삼성역 영동대로 복합환승센터

서울 강남구 삼성역과 봉은사역 사이의 영동대로 하부는 국내 최대의 도시 입체화가 추진되고 있다. '삼

성역 광역복합환승센터'는 국내 입체도시 건설 기술의 집약체이자 시험대로 평가받고 있는데, 이 프로젝트는 지하 6~7층(약 50m) 깊이까지 굴착하여 GTX-A, GTX-C, 위례신사선 등 5개 철도 노선과 버스 환승 정류장, 공공 상업 시설을 통합하는 거대 지하 도시를 건설하는 것이다. 복합환승센터는 연장 597m, 폭 63m, 깊이 53m 지하공간으로 건설되는데, 사업비는 기본계획 기준으로 1조 759억원으로 추산되고 있다.

[그림 2] 삼성역 복합환승센터 조성 계획(안)



자료 : 서울시. 2016. 영동대로 지하에 광역복합환승센터 조성 및 서울시(내 손안에 서울). 2025.
영동대로 지하공간 복합개발 착착! 2호선 삼성역은 어떻게 달라지나. 2025.5.13.

복합환승센터는 2009년 <국가통합교통체계효율화법>의 전면 개정 과정에서 도입된 사업으로, 개별 교통시설 이용 관점에서 추진되어 왔던 단순 교통시설 개발을 넘어 도시와 교통의 연계 및 기능 효율 개선, 시너지 효과 창출을 위한 지역·사회 거점을 활성화하고자 하는 목적을 갖는다. 따라서 교통환승시설 중심으로 설치하는 환승센터와는 달리, 상업·업무·문화·숙박·주거 등 각종 환승지원시설을 환승시설과 상호 연계하여 복합개발하는 일종의 복합개발사업으로 볼 수 있다.

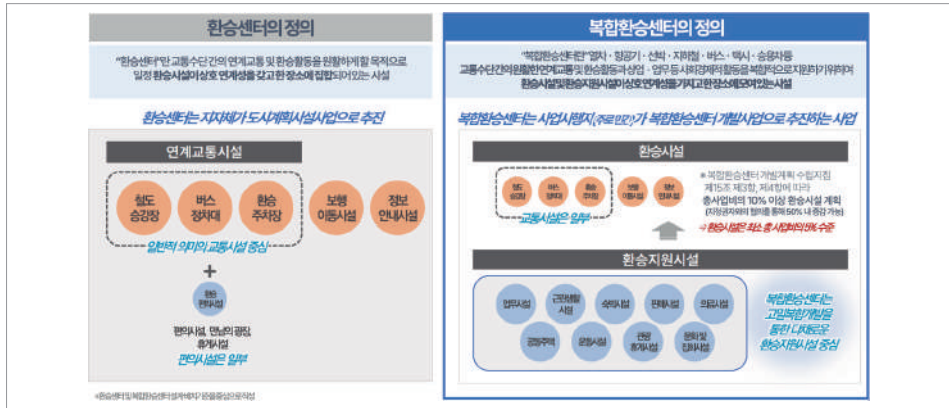
복합환승센터를 추진하게 된 저변에는 기존의 교통결절점 또는 역세권 개발사업들이 교통시설 중심의 추진과 도시개발로 괴리 추진되어 공간구성 및 사업연계가 어려웠던 측면의 단점을 극복하고, 민간과의 협업을 통해 환승시설을 건설·운영하는 지자체 등 공공의 재정적 부담 감소와 많은 유동인구를 활용하여 새로운 사업기회를 모색하고자 하는 민간의 수요를 최대한 활용하고자 하는 의도가 일부 있기도 하다.^③ 대표적 추진사례로는 2010년부터 추진이 시작되어 2016년 완공하였고, 2024년 기준으로 유동인구 연 2440만명(전국 2위)과 연매출 1조 5,744억원을 기록하고 있는 동대구역 복합환승센터가 있다.^④

③ 서민호. 2025. 복합환승센터 추진 활성화 방안. 대도시권광역교통위원회 제3차 환승혁신포럼. 2025.11.13

④ 이데일리(김형환 기자). 2026. "지방 유일 성공 동대구역 환승센터...도심입지에 기차역 터미널 통합 주요".

2026년 1월 14일자 및 경북매일(장은희 기자). 2025. "전국 6위" 신세계百貨 대구점 동대구역 상권 호황 이끈다". 2025년 2월 19일자

[그림 3] 환승센터 및 복합환승센터의 정의



자료 : 서민호, 2025. 복합환승센터 추진 활성화 방안. 대도시권광역교통위원회 제3차 환승혁신포럼, 2025.11.13.

삼성역 복합환승센터로 논의를 되돌리면, 현재 국내 최대의 입체도시 개발사업이라고 불릴 만큼 여러 극한의 조건에서 추진되고 있다. 먼저 초대형 도심지 굴착을 들 수 있는데, 길이 약 1km, 폭 70m 규모의 대규모 굴착이 도심 한복판에서 이루어지며, 이는 잠실 야구장 30배 규모의 흙을 파내는 것과 맞먹는다. 또한 지상에는 일일 통행량이 엄청난 왕복 14차선의 영동대교가 존재하며, 공사 중에도 차량 흐름을 유지하기 위해 복공판(Decking Plate)을 설치하고 단계별 교통 전환(Traffic Diversion)을 수행해야 한다. 그리고 인접한 코엑스, GBC(글로벌 비즈니스 센터) 등 대형 건물과 지하철 2호선 삼성역, 9호선 봉은사역이 인접해 있어, 굴착에 따른 지반 침하와 인접 구조물의 변위를 굉장히 미세한 범위(밀리미터 또는 마이크로미터) 단위로 제어해야 한다.

때문에 총 사업비가 1조 원을 상회하는 이 사업은 당초 2027년 완공을 목표로 했으나, 잦은 설계 변경과 유찰, 공사비 급등으로 인해 일정이 2028년 이후로 지연되고 있다. 특히 GTX-A 노선의 부분 개통(수서~동탄)과 삼성역 정차 무정차 통과 등의 파행 운영은 복합 공정 관리(Interface Management)의 중요성을 역설적으로 보여준다. 그리고 지하 공간에 자연광을 유입시키는 '라이트 빔(Light Beam)' 설계 등 혁신적인 시도가 포함되어 있으나, 이를 구현하기 위한 구조적 안전성과 방수, 단열 기술의 확보가 시급히 안정성을 검증해야 할 이슈로 보인다.

그리고 대심도로 연결되는 GTX 사업까지 논의를 확대하면, 대심도 굴착 시 지하수 유출에 따른 지반 함몰(싱크홀) 우려가 크다. 이를 방지하기 위해 차수 그라우팅(Grouting) 효율을 높이고 지하수위 변화를 실시간 모니터링하는 기술이 필수적이다. 무엇보다 서울 은마아파트 등 주거 밀집 지역 하부를 통과할 때 발생하는 발파 진동과 소음 문제로 인한 주민들의 반발이 거세다. 이는 입체도시 및 연계 대심도 철도망 건설이 단순한 기술적 문제를 넘어 사회적 갈등 관리의 영역으로 확장되고 있음을 보여준다.

03 지상과 지하를 통합하는 입체 도시 건설의 4대 핵심 기술 과제

상기에서 살펴본 바와 같이 지상과 지하를 수직으로 관통하며 다양한 기능을 적층하는 입체도시 건설은 기존의 평면적 건설 방식과는 근본적으로 다른 접근을 요구한다. 성공적인 프로젝트 수행을 위해서는 추진상 쟁점이 될 4대 핵심 기술 과제가 있다고 판단되는 데, 본 고에서는 ①N차원 기반의 가상 건설 기반 설계와 기획, ②도심 내 대심도 굴착 및 인공지반 조성 기술, ③건물과 구조물, 지반간 구조적 전이 및 환경 제어, ④실시간 복합 공정 관리 및 리스크 매니지먼트로 보았다. 그 각각에 대해 어떤 기술적 과제가 있는지 세부 내용을 보겠다.

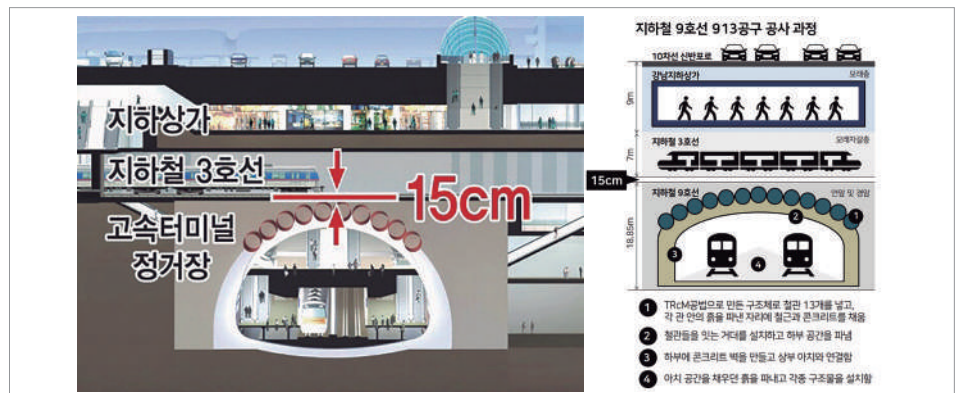
3.1 설계 및 기획: N차원 기반의 가상 건설

입체도시 프로젝트는 토목(터널, 흙막이), 건축(역사, 상부 건물), 기계/전기/통신(MEP) 등 수많은 공종이 좁은 공간 내에서 복잡하게 얹혀 있다. 2차원 도면(CAD)만으로는 수천 개의 간섭 지점을 찾아내고 시공 순서를 계획하는 것이 불가능하다. 따라서 3D 형상 정보에 시간(Time, 4D)과 비용(Cost, 5D) 정보를 결합한 다차원 BIM 모델링이 필수적이다. 4D 시뮬레이션을 통해 가상 공간에서 시공 과정을 리허설(Rehearsal)함으로써, 공정 간의 충돌을 사전에 감지하고 최적의 시공 순서를 도출하는 4D/5D BIM 체계 마련이 중요하다.^⑤ 이를 위해서는 공통 데이터 환경(CDF) 구축이 선행되어야 한다. 발주처, 설계사, 시공사 등 수많은 참여자가 실시간으로 정보를 공유하고 협업할 수 있는 클라우드 기반의 CDE(Common Data Environment) 구축은 정보의 불일치로 인한 재시공을 막는 핵심 플랫폼으로 기능할 수 있다. 이러한 체계에 기반하여 설계 단계에서 구축된 BIM 모델을 활용하여, 지하 공간 내의 공기 흐름, 화재 시 연기 확산, 유동 인구의 대피 시뮬레이션 등을 수행하여 방재 및 환경 성능을 검증하는 디지털 트윈 시뮬레이션이 가능할 수 있다.

3.2 시공: 도심 내 도심도 굴착 및 인공지반 조성 기술

도시지 한복판에서 기존 인프라를 유지하며 새로운 공간을 창출하는 시공 기술은 극한의 정밀도와 안전성을 요구한다. 때문에 탑다운(Top-Down) 공법의 고도화가 필수적인데, 지상에서부터 지하로 굴착해 내려가면서 슬래브와 기둥을 시공하는 탑다운 공법은 상부 도로 교통을 조기에 복구하고, 흙막이 벽체의 변위를 억제하는 데 효과적이다. 이를 위해 고강도 강관 기둥(CFT)의 수직 정밀 시공 기술이 요구된다. 탑다운 공법의 가장 큰 난제는 이미 타설된 슬래브 하부에서 굴착과 콘크리트 타설을 진행해야 하므로 작업 공간이 협소하고 환기가 어렵다는 점이다. 또한, 기둥 역할을 하는 뜯기둥(King Post/Plunge Column)의 수직도를 정밀하게 확보하는 것이 구조적 안전성의 핵심이다. 최근에는 RCD(Reverse Circulation Drill) 공법과 정밀 계측기를 활용하여 기둥의 수직 오차를 수 밀리미터 단위로 제어할 수 있다. 쌍용건설이 세계를 놀라킨 서울시 지하철 9호선 건설(913공구, TrcM-CRM 조합 공법)이나 런던의 패딩턴 역사 건설에서도 이 공법이 적용되어 도심 기능을 유지한 채 대규모 지하 공간을 창출했다.

[그림 4] 서울시 지하철 9호선 913공구 쌍용건설 TrcM-CRM 조합공법 추진 사례



자료: 조선일보(이지은 기자). 2022. 3호선과의 간격 고작 15cm...역대급 극악 난도였다는 9호선 공사. 2022년 12월 11일

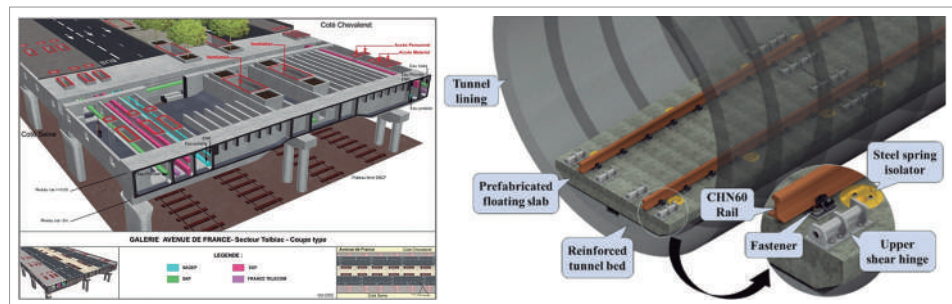
⑤ Joosung Lee & Jaejun Kim, 2017. "BIM-Based 4D Simulation to Improve Module Manufacturing Productivity for Sustainable Building Projects," Sustainability, MDPI, vol. 9(3), pp. 1-23.

특수 흙막이 및 지반 개량도 요구될 것으로 보여지는데, 지하수위가 높고 지반이 연약한 지역에서는 다이어프램 월(Diaphragm Wall)과 같은 강성 높은 흙막이 벽체를 시공하고, 틈새 누수를 차단하는 조인트 시공 기술이 중요하다. 또한, 연약지반을 콘크리트처럼 단단하게 만드는 DCM(Deep Cement Mixing) 등의 개량 공법이 적용되어야 하겠다. 이 기술은 쌍용건설이 싱가포르 등 사례를 통해 기술력을 입증하고 있는 것으로 보이기 때문에 국내 시공환경에 적합한 기술로 고도화가 어렵지 않을 것으로 보인다.^⑥

3.3 간섭 관리 : 건물과 구조물, 지반간 구조적 전이 및 환경 제어

지상과 지하를 연결하는 입체도시 건설은 서로 다른 기능을 가진 상부와 하부 구조물이 만나는 접점에서 물리적, 환경적 간섭을 해결하는 것이 안전과 이용 편의성에 있어 매우 중요하다. 먼저 상부 초고층 건물의 촘촘한 기둥 하중을 하부의 넓은 철도 공간이나 환승시설을 피해 지반으로 전달하기 위해, 두께 수 미터의 거대 전이 플레이트(Transfer Plate)나 전이 보(Transfer Girder)를 설계하고 시공하는 기술이 핵심이다. 이 과정에서 수화열 제어를 위한 콘크리트 배합 및 양생 기술이 뒷받침되어야 한다.^⑦ 그리고 구조물간 진동 및 소음 절연도 중요하다. 하부에서 운행되는 고속 열차의 진동이 상부의 주거 및 업무 시설로 전달되지 않도록 구조적으로 분리해야 하기 때문이다. 이를 위해 건물 기초 하단에 고무나 스프링 소재 방진패드 또는 복합 댐퍼층을 설치하거나, 철도 궤도 자체를 띄우는 플로팅 슬래브(Floating Slab) 공법 적용을 고려할 수 있다.^⑧ 무엇보다 지하공간의 방재·제연 처리도 도시공간 이용과 철도 등 교통 이용 행태를 모두 고려하는 차원으로 복합화 되어야 한다. 현재 지하 터널이나 피난 안전구역은 교통이용 행태에 맞춰져 있는데, 대규모 지하 도시공간 이용행태를 고려하여 고도화되어야 한다.

[그림 5] 인공지반 댐퍼층(좌, 파리 리브고슈(Rive-gauche)) 및 철로 플로팅 슬래브(우) 예시



자료 : Benoît Ernek. 2023. 국토연구원-SEMAFA 협력 세미나 발표자료. SEMAFA 및 Lu, Y., Shen, D., Shao, H. et al. 2024. Investigation of Concrete Damage on a Prefabricated Steel Spring Floating Slab Track by Finite Element Modelling. Urban Rail Transit 10, 376-393

3.4 사업 관리 : 복합 공정 관리 및 리스크 매니지먼트

입체도시 건설에는 기술적 난이도만큼이나 중요한 것이 사업 관리(Project Management) 역량이 중요할 전망이다. 우리의 경우를 예로 들자면 공공/민간의 철도 운영사와 국가 및 지자체 뿐 아니라 각종 유틸리티 사업자(가스, 통신, 전력), 인근 주민 등 복잡한 이해관계자들의 요구사항을 조율하고, 공사 중 발생

⑥ 서울경제. 2012. 건설도 하이테크. 쌍용건설. 2012년 8월 2일자

⑦ Raymond Wang. 2020. Construction of Transfer Plate - from various case studies (HK). Const-Infobank.org

⑧ Stephany Y. Xu; Changyong Jiang; Lixi Huang. 2019. Public health impacts from subway noise: Case study Hong Kong. The Journal of the Acoustical Society of America 145(3):1867-1867.

할 수 있는 민원을 선제적으로 관리하는 PM 역량이 필요하다. 이해관계자간 조정 과정에서 갈등이 발생하고 사업이 지연되면 대규모이면서 복합적인 사업 전반에 지연 등 복합적 리스크가 발생하게 되고 사업비 증가로 이어져 사업의 완수 여부가 불투명해 질 수 도 있다. 따라서 기술적 이슈 해결만큼이나 체계적 갈등 관리가 중요하다. 기술적 차원에서는 지상과 지하를 아우르고 워낙 연관되는 시설이 많은 사업이니 만큼 스마트 안전 관제가 요구된다. 이를 위해서는 GPS가 닿지 않는 지하 공간에서 작업자의 위치를 실시간으로 추적하고, AI CCTV를 통해 불안정한 행동을 감지하며, 유해가스 농도를 모니터링하는 IoT 기반 스마트 안전 시스템의 도입이 필수적으로 보여 진다.

04 해외 사례를 통해 살펴본 건설기술의 도전과 혁신

앞선 지상-지하 입체도시 건설의 도전과제 해결을 위해서 해외에서는 이미 유사한 난관을 극복하기 위한 여러 도전과 혁신을 이어가고 있다. 성공적으로 입체도시를 구현한 해외의 벤치마킹 사례를 기술 과제별로 심층 분석해 본다.

4.1 설계 및 기획 : 영국 크로스레일(Crossrail)의 디지털 트윈과 4D 혁신^⑨

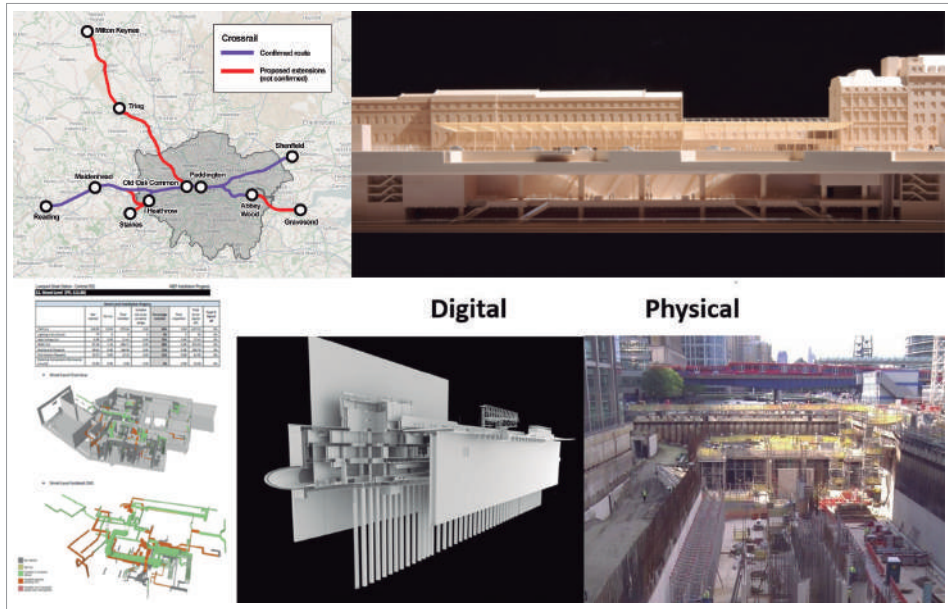
영국 크로스레일은 런던 도심 지하를 동서로 관통하여 기존 철도와 연결하는 유럽 최대의 인프라 프로젝트이며, 완공 후 당시 국왕이었던 엘리자베스 2세 이름을 따서 엘리자베스 라인(Elizabeth Line)으로 명칭이 변경되었다. 총 길이 118km(신설구간 42km 포함)로 총 41개(신설 10개 역 포함)으로, 2009년 5월부터 착공을 시작했으며 2023년 전 구간 통합 운영되었다. 당초 예산은 148억 파운드(한화 약 20조원)로 예상되었으나 설계변경과 사업지연 등으로 최종 약 190억 파운드(한화 약 26조원)가 투입되었다.^⑩

영국 크로스레일에서 주목할 부분은 건설 산업의 디지털 전환(Digital Transformation)을 선도한 사례라는 점이다. 크로스레일은 프로젝트 초기부터 BIM Level 2를 의무화하고, '공동 데이터 환경(CDE)'을 구축하여 25만 개 이상의 모델 파일과 300만 장 이상의 문서를 단일 소스(Single Source of Truth)로 통합 관리했다. 이를 통해 설계 오류와 정보 누락을 획기적으로 줄였다. 그 과정에서 벤틀리 시스템즈(Bentley Systems)의 Synchro 4D 등을 활용하여 복잡한 환승역 구간의 시공 순서를 가상으로 시뮬레이션했다. 특히 기존 지하철과 역사적 건물이 밀집한 패딩턴(Farringdon) 역과 패딩턴(Paddington) 역 공사에서, 시공 단계별 간섭을 사전에 발견하고 최적의 공정을 도출함으로써 약 800만 파운드(약 130억 원) 이상의 리스크 비용을 절감하는 성과를 거두었다. 그리고 건설 단계에서 생성된 풍부한 BIM 데이터는 운영 단계의 자산 관리 시스템(Asset Management System)으로 이관되어, 유지보수 효율을 극대화하는 '디지털 철도(Digital Railway)'의 기반이 되었다.

⑨ Malcolm Taylor. 2018. Crossrail Project: Application of BIM (Building Information Modelling) and Lessons Learned. Crossrail.의 주요 내용을 요약

⑩ National Audit Office (NAO, UK). 2021. Crossrail - a progress update (Summary). HC 299: 2-3

[그림 6] 영국 크로스레일(Crossrail) 개요 및 대형 지상-지하 통합공간 설계(상, 패딩턴역) 및 4D BIM 및 디지털 트윈 시뮬레이션 활용(하) 예시



자료 : Alison Furuto 2012. Paddington Crossrail / Weston Williamson Architects. ArchDaily (9월 4일자) 및 Malcolm Taylor. 2018. Crossrail Project: Application of BIM (Building Information Modelling) and Lessons Learned. Crossrail.

4.2 시공 및 간섭 관리 : 미국 허드슨 야드(Hudson Yards)의 철도 운영 중 인공대지 조성 도전^①

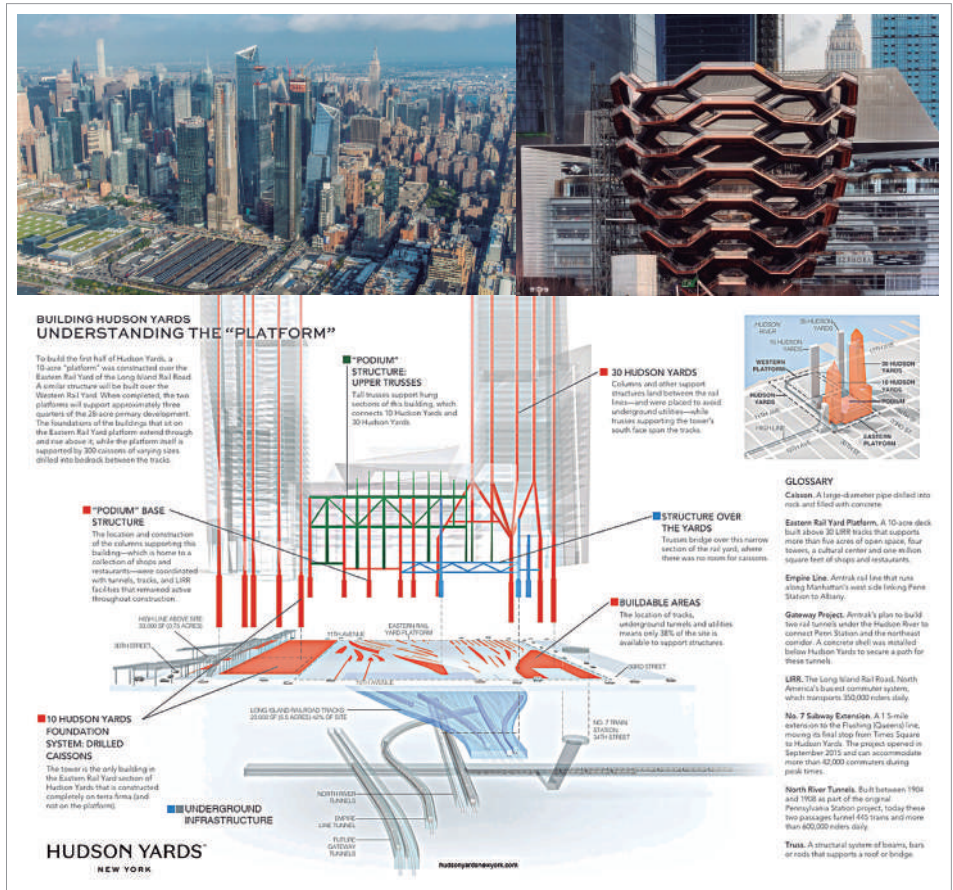
미국 허드슨 야드 프로젝트는 뉴욕 맨해튼 서쪽의 철도 차량기지(West Side Yard) 상부에 28에이커(약 11만㎡) 규모의 거대 인공 대지(Platform)를 조성하고, 그 위에 마천루 숲을 건설한 '불가능한 엔지니어링'을 실현한 사례이다. '도시 속의 도시'를 표방하는 허드슨 야드는 미국 역사상 최대의 부동산 개발 프로젝트 중 하나로 총 사업비 약 250억달러(한화 약 350조원)이 투입되었고, 2012년 착공하여 2019년 1단계(East Yard) 개장하고 2025년 거의 완공되었고 2028년 7 Hudson Yard를 마지막으로 마무리 될 전망이다.^②

허드슨야드에 입지한 10 Hudson Yards를 제외한 대부분의 건물은 인공 지반 위에 건설되었다. 허드슨 야드는 하루 수백 대의 LIRR(Long Island Rail Road) 열차가 운행되는 상황에서 열차 운행을 중단하지 않고 공사를 진행했다. 이를 위해 철로 사이의 좁은 공간을 찾아 300여 개의 대규모 케이슨(Caisson)을 암반까지 박아 넣어 인공 지반을 지지했다. 철로 배치로 인해 기둥을 세울 수 없는 구간에는 거대한 강철 트러스(Truss)를 설치하여 상부 건물의 하중을 케이슨으로 전달했다. 또한, 열차에서 발생하는 약 65°C에 달하는 열기가 상부의 식재(조경) 뿌리를 손상시키지 않도록, 데크 하부에 거대한 제트 팬 환기 시스템과 냉각수 순환 시스템을 구축하여 '토양 냉각'을 구현했다. 그리고 열차 진동이 상부의 고급 호텔과 주거지로 전달되는 것을 막기 위해, 데크와 건물 구조체 사이에 특수 설계된 진동 격리 패드(Isolation Pad)를 설치하여 쾌적한 거주 환경을 확보했다.

① HudsonyardsNewYork의 구조 소개 문건(Understanding the Platform)과 Langham Engineering 소개 자료 (<https://www.langan.com/portfolio/hudson-yards-redevelopment-2>) 참고하여 주요 내용 요약

② 조선일보(이지은 기자). 2019. 초고층 빌딩이 공중에 우뚝...전세계가 놀란 랜드마크. 2019년 6월 18일자

[그림 7] 허드슨 야드 전경(상) 및 철도부지 상부 인공지반 및 건축물 구축 개념도(하)



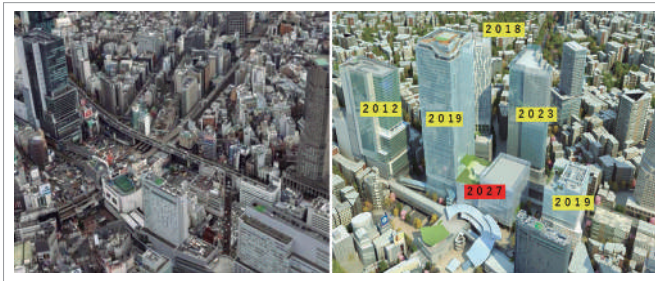
자료 : Dan Howarth. 2019. Dezeen's guide to Hudson Yards phase one in New York 및 HudsonyardsNewYork. 2019. Understanding the Platform.

4.3 시공 및 간섭 관리 : 철도운영 유지를 위한 극한의 시공 추진과 기술개발

시부야역세권 재개발(Shibuya Station Redevelopment, Greater SHIBUYA)은 일본에서 '100년 만의 대 개조'라 불릴 만큼 그 규모와 난이도 면에서 세계적인 주목을 받고 있다. 이 프로젝트는 도쿄그룹(Tokyu Corp.)이 중심이 된 시부야역 일대에 다수의 프로젝트가 복합적으로 구성되어 있으며 2012년 본격 착공 되어 2027년 완공을 전망하고 있다.¹⁸⁾ 프로젝트의 주요 도전은 하루 300만 명이 이용하는 거대 터미널의 기능을 단 하루도 멈추지 않으면서, 복잡하게 얽힌 철도 노선을 이설하고, 지하를 흐르는 하천의 물길을 바꾸며, 그 위에 초고층 빌딩을 올리는 것이었다. 특히 재개발의 가장 큰 걸림돌인 지하를 관통하는 시부야 하천 이전도 난제였지만, 이에 못지 않게 도쿄 메트로 긴자선의 시부야-다이칸야마의 철도 지하화가 가장 큰 난제였다고 할 수 있다.

¹⁸⁾ Tokyu Corporation. 2024. Shibuya Redevelopment Projects: Creating the Future of Shibuya

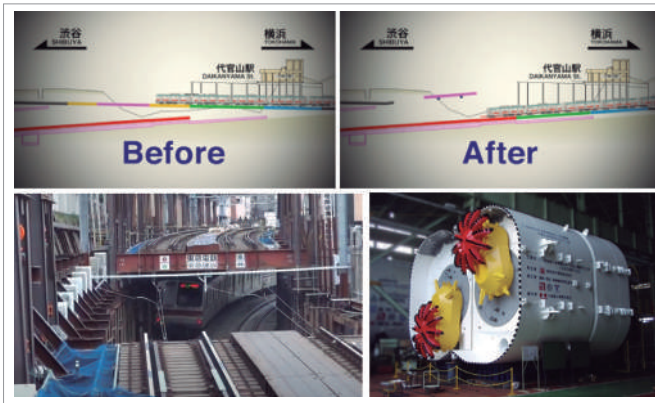
[그림 8] 시부야역세권 재개발 초기와 완공 후 비교 : 2015년(좌) 및 2027년(우, 예상)



자료 : 서민호 외. 2024.
국외출장 결과보고서 -
대만 타이베이(臺北)·가오슝(高雄)
및 일본 도쿄(東京). 국토연구원

시부야-다이칸야마 철도 지하화(약 1.4km)는 상부부지 개발을 위해 추진되었고, 기존 철도 운영을 중단하지 않으면서 지하 철도와 연결하는 것이 해결과제였다. STRUM 공법을 활용한 시공과 연결 당일 3.5시간에 1200명의 작업자 집중 투입 끝에 지상 철로를 하룻밤 사이에 지하로 연결할 수 있었다. 시공은 가설 준비, 운행 중단 및 슬라이드, 초정밀 시공의 단계로 진행되었는데, 먼저 새로운 역사를 도로 상부에 먼저 건설하되, 기존 선로의 운행을 방해하지 않는 위치에 구조물을 세웠다. 그리고 총 3회의 대규모 선로 절체 공사가 수행되었다. 주말이나 연휴를 이용해 운행을 일시 중단하고, 미리 조립해 둔 새로운 선로와 분기기를 유압 잭을 이용해 밀어 넣는(Slide) 방식으로 궤도를 변경했다. 기존 구조물과 신설 구조물의 접속 오차는 밀리미터(mm) 단위로 관리되었고, 제한된 시간(새벽 1시~5시) 내에 시중점을 연결하고, 토목, 궤도, 신호, 전력 시스템을 동시에 연결하는 극한의 프로젝트 관리가 수행되었다.^⑭

[그림 9] 시부야-다이칸야마 철도 지하화 개념(상), 시공 현장 및 기술개발(다단면 TBM 굴진기) 사례(하)



자료 : 渋谷文化プロジェクト
Shibuya. 2014.
さよなら地上駅舎 東横線渋谷駅 -
2013.3.15-3.16 및 鹿島建設
(Kajima Corporation). 2026.
アポロカッター®工法.

시부야-다이칸야마 지하화 사례는 입체도시 건설이 단순히 구조물의 구축 뿐 아니라 철도 등 교통시설의 운영 중단이 가져오는 사회적 혼란과 비용 최소화까지를 고려해야 함을 보여주었고 그 과정에서 건설기술의 혁신이 창출될 수 있다는 것을 보여주는 사례라 말할 수 있다.

4.4 구조 및 사업 관리 : 홍콩 유니언 스퀘어(Union Square)의 전이 플레이트와 R+P 개발 사업모델

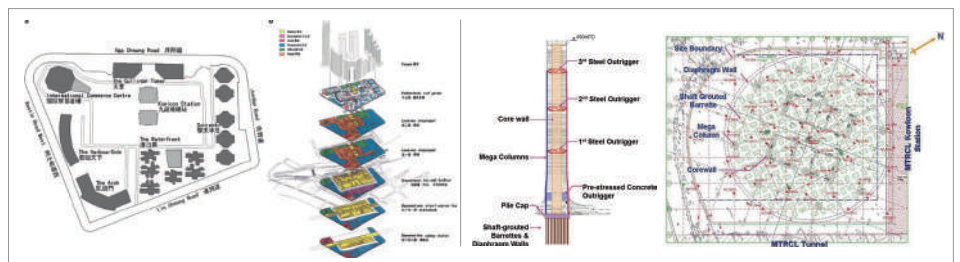
홍콩 구룡역(Kowloon Station) 상부에 건설된 유니언 스퀘어는 세계 최고 수준의 고밀도 철도 상부 복합

⑭ 서민호 외. 2024. 국외출장 결과보고서 - 대만 타이베이(臺北)·가오슝(高雄) 및 일본 도쿄(東京). 국토연구원

개발 사례로, 약 13.5ha 면적에 109만m² 연면적의 초고층 건축물이 자리잡고 있다. 또한 MTR(홍콩철도 공사)의 'Rail and Property(R+P)' 사업모델의 대표적 예시라 할 수 있다.^⑤

홍콩 구룡역은 중국 본토의 고속철도와 연결된 홍콩의 거점역으로 역할을 수행하는데, 세계적으로 거대한 경제권을 연계하는 거점으로 기능하기 위해서 구룡역세권 및 철도역사 상부에 대규모 복합개발이 필요했고, 그 과정에서 하부의 지하철 역사와 철로 공간을 확보하기 위해 기둥 간격을 넓게(Mega Column) 배치해야 했다. 그러나 상부에 초고층 주거 및 호텔 타워를 건축해야 했기 때문에 촘촘한 기둥 간격이 요구되었다. 이를 해결하기 위해 포디움 상부에 두께 2.5m~3.5m, 무게 수천 톤에 달하는 거대한 철근 콘크리트 전이판(Transfer Plate)을 설치했고, 이 전이판은 상부의 복잡한 하중을 받아 하부의 소수 기둥으로 분산 전달하는 기능을 수행하였다.

[그림 10] 홍콩 구룡역 유니온스퀘어 입체복합개발 개념(좌) 및 전이 플레이트 설치 개념도(우)



자료: Xue, C., Zhai, H. & Roberts, J. 2010. An urban island floating on the MTR station: A case study of the West Kowloon development in Hong Kong. Urban Des Int 15, 191-207 및 Angela TAM. 2010. Lofty aspirations at destination West Kowloon. The Hong Kong Institution of Engineers.

상부에 초고층의 복합 건축물이 구축될 수 밖에 없었던 이유는, 홍콩 MTRC의 R+P라고 하는 독특한 개발 모델 때문인데, 홍콩의 MTRC는 정부로부터 철도부지 개발권을 부여받아 민간 개발사와 수익을 공유함으로써, 정부의 보조금 없이도 철도 건설 및 운영 비용을 충당하는 재정 자립 모델을 확립하고 있다. 이러한 사업모델에 따라 대규모 자본이 투입되는 복잡한 입체 구조물을 건립하면서도 안정적인 사업비 조달이 가능했다. 이러한 사업추진전략은 대규모 입체복합개발을 추진해야 하는 우리에게 있어서도 롤모델로서 시사점을 제공한다 할 수 있다.

05 맺음말: 미래 입체도시 건설을 위한 제언

대한민국의 입체도시 건설은 이제 막 첫발을 내디뎠다. 철도지하화통합개발법의 제정, GTX 사업의 본격화와 주요 거점을 중심으로 추진되는 복합환승센터 사업은 한국 도시 계획의 패러다임을 바꿀 거대한 흐름이다. 그러나 삼성역 복합환승센터의 지연 사례에서 보듯, 단순히 토목 기술만으로는 복잡한 도심지 입체 개발을 성공시킬 수 없다. 성공적인 입체도시 구현을 위해서는 '기술 혁신'과 '제도적 유연성'이 톱니바퀴처럼 맞물려야 한다. 영국의 크로스레일처럼 데이터 기반의 통합 관리(BIM/CDE)가 공공 발주 사업의 표준으로 정착되어야 하며, 미국의 허드슨 야드처럼 과감한 공학적 도전을 허용하는 열린 사고가 필요하다. 또한 홍콩과 일본처럼 민간의 창의적 제안을 수용하고 이를 건설기술 혁신의 디딤돌로 삼아야 하며, 그 과정에서 단순한 건설을 넘어 사업 전체를 관통하는 부문간 연계와 사업 매니지먼트를 통해 건설기술

⑤ R+P 모델은 철도 건설과 노선 주변의 토지 개발권을 결합한 형태로, 철도 건설로 인해 발생하는 토지 가치 상승분(Value Capture)을 철도 운영사가 직접 회수하여 철도건설 및 운영비에 충당하는 것을 의미함 (Tang, B. S., Chiang, Y. H., Baldwin, A. N., & Yeung, C. W. 2004. Study of the Integrated Rail-Property Development Model in Hong Kong. Research Report, The Hong Kong Polytechnic University)

혁신이 공기 단축과 갈등관리, 사업성 확보 등에 기여할 수 있어야 한다.

글로벌 건설시장에서 독보적 기술력과 세계적 혁신으로 인정받고 있는 쌍용건설을 비롯한 우리의 많은 건설사들 역시 이제 한국형 입체도시 건설의 핵심 파트너가 될 준비를 해야 할 때이다. 단순한 시공사를 넘어, 기획 단계부터 참여하여 기술적 난제에 대한 솔루션을 제공하고, 시공 중 리스크를 선제적으로 관리하며, 운영 단계의 효율성까지 고려하는 '솔루션 프로바이더(Solution Provider)'로서 역할 수행이 중요하다.

지상·지하 입체도시 건설은 좁은 국토의 한계를 극복하고 도시 경쟁력을 극대화할 수 있는 21세기 대한민국의 핵심 생존 전략이다. “남들이 짓지 못하는 것을 짓는다”라는 쌍용건설의 도전적 철학이 지상과 지하를 아우르는 입체도시 건설에 있어 혁신을 통해 새롭게 빛을 발해야 하는 시점이다.

※ 참고문헌

1. 경복매일(장은희 기자). 2025. “전국 6위” 신세계백 대구점 동대구역 상권 호황 이끈다”. 2025년 2월 19일자
2. 서민호. 2024. 성공적 철도지하화 통합개발을 위한 사업 추진 고려 사항.
철도지하화 통합개발 추진 협의체 출범식. 국토교통부. 2024.4.4.
3. 서민호. 2025. “도심융합특구를 통한 초광역권의 성장과 공간혁신 플랫폼 형성”. 월간 <국토> 제525호. 국토연구원. 2025.7.
4. 서민호. 2025. 복합환승센터 추진 활성화 방안. 대도시권광역교통위원회 제3차 환승혁신포럼. 2025.11.13
5. 서민호 외. 2024. 국외출장 결과보고서 - 대만 타이베이(臺北)-가오슝(高雄) 및 일본 도쿄(東京). 국토연구원
6. 서울경제. 2012. 건설도 하이테크. 쌍용건설. 2012년 8월 2일자
7. 서울시(보도자료). 2016. 영동대로 지하에 광역복합환승센터 조성
8. 서울시(내 손안에 서울). 2025. 영동대로 지하공간 복합개발 착착! 2호선 삼성역은 어떻게 달라지나. 2025.5.13
9. 이데일리(김형환 기자). 2026. “지방 유일 성공 동대구역 환승센터…도심입지에
기차역·터미널 통합 주효”. 2026년 1월 14일자
10. 조선일보(이지은 기자). 2019. 초고층 빌딩이 공중에 우뚝…전세계가 놀란 랜드마크. 2019년 6월 18일자
11. 조선일보(이지은 기자). 2022. 3호선과의 간격 고작 15cm…역대급 극약 난도였다는 9호선 공사. 2022년 12월 11일
12. Alison Furuto 2012. Paddington Crossrail / Weston Williamson Architects. ArchDaily (9월 4일자)
13. Angela TAM. 2010. Lofty aspirations at destination West Kowloon. The Hong Kong Institution of Engineers.
14. Benoît Ernek. 2023. 국토연구원-SEMAFA 협력 세미나 발표자료. SEMAFA.
15. Dan Howarth. 2019. Dezeen's guide to Hudson Yards phase one in New York 및
HudsonyardsNewYork. 2019. Understanding the Platform.
16. Joosung Lee & Jaejun Kim, 2017. "BIM-Based 4D Simulation to Improve Module Manufacturing Productivity for Sustainable Building Projects," Sustainability, MDPI, vol. 9(3), pp. 1-23.
17. Lu, Y., Shen, D., Shao, H. et al. 2024. Investigation of Concrete Damage on a Prefabricated Steel Spring Floating Slab Track by Finite Element Modelling. Urban Rail Transit 10, 376-393
18. Malcolm Taylor. 2018. Crossrail Project: Application of BIM (Building Information Modelling) and Lessons Learned. Crossrail.
19. National Audit Office (NAO). 2021. Crossrail - a progress update (Summary). HC 299: 2-3
20. Raymond Wang. 2020. Construction of Transfer Plate - from various case studies (HK).
Const-Infobank.org
21. Stephany Y. Xu; Changyong Jiang; Lixi Huang. 2019. Public health impacts from subway noise: Case study Hong Kong. The Journal of the Acoustical Society of America 145(3):1867-1867.
22. Tang, B. S., Chiang, Y. H., Baldwin, A. N., & Yeung, C. W. 2004. Study of the Integrated Rail-Property Development Model in Hong Kong. Research Report, The Hong Kong Polytechnic University
23. Tokyu Corporation. 2024. Shibuya Redevelopment Projects: Creating the Future of Shibuya
24. Xue, C., Zhai, H. & Roberts, J. 2010. An urban island floating on the MTR station:
A case study of the West Kowloon development in Hong Kong. Urban Des Int 15, 191-207
25. 東急軌道工業. 2020. 東横線渋谷～代官山間地下化工事に伴う軌道工事
26. 渋谷文化プロジェクト Shibuya. 2014. さよなら地上駅舎 東横線渋谷駅 - 2013.3.15-3.16
(<https://youtu.be/wlbZqqLra9k?si=KvldBGoS79ID68b5>)
27. 鹿島建設(Kajima Corporation). 2026. アポロカツター®工法.



기술정보

Technical information

- 40 사장교 경사 주탑의 시공 및 가시설 적용
- 47 하이브리드 아치교의 계획 및 설계
- 52 저온 환경에서 콘크리트 품질기준강도 확보방안 검증 연구
- 62 전기차 화재예방 기술동향 및 당사 설계 표준 가이드라인
- 66 건축물 인증제도 종류 및 상호 연관성 분석
- 76 누수 최소화 공법

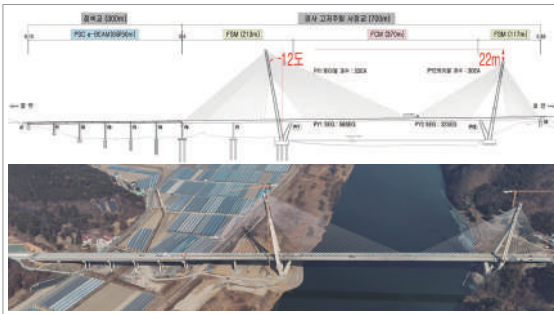


글 김승규 / 토목기술팀 과장
전화 02-3391-7771 E-mail sgkim89@ssyenc.com

01. 시작하며

의령낙동대교는 고속국도 제14호선 함양-창녕 간 건설공사 11 공구에 위치한 핵심교량으로 낙동강을 횡단하는 콘크리트 사장교이다. 본 교량은 주경간 370m(88SEG+KEY SEG)의 대형 사장교로 일반적인 수직주탑 사장교와 달리 양쪽 주탑이 12° 경사를 가지고 1번주탑(150m)과 2번주탑(128m)이 22m 높이 차이를 갖는 경사고저주탑 구조를 갖는다[그림 1].

[그림 1] 의령낙동대교 경간구성 및 전경사진



경사주탑의 가장 큰 특징은 주탑 높이가 증가할수록 자중에 의한 교축 방향 변위와 응력이 급격히 증가하여 수직주탑에 비해 시공 중 구조 안전성의 확보가 매우 어렵다는 점이다. 따라서 의령낙동대교에서는 경사주탑 시공을 위해 현장 조건과 시공계획을 반영한 가설엔지니어링을 수행하고 이에 따른 가시설 계획이 필수적이다.

본 기술정보기사에서는 의령낙동대교에 적용된 경사고저주탑 사장교 주탑의 시공 공법과 시공 중 구조 안전성 확보를 위해 적용한 임시 타이 케이블, 임시 강재 가로보 및 임시 강재 스트럿 등의 가시설 공법을 소개하여 향후 유사 사장교 건설 사업에 참고할 수 있는 기술정보를 제공하고자 한다.

의령낙동대교의 주요 제원

- 교량 형식: 경사고저주탑 콘크리트 사장교
- 총연장: 1,000m (접속교300m+사장교700m)
- 주경간: 370m (88SEG+KEY SEG)
- 측경간(좌측) : 213m
- 측경간(우측) : 117m
- PY1 주탑 높이(경사) : 150m (12°)
- PY2 주탑 높이(경사) : 128m (12°)

02. 의령낙동대교 주탑 시공

2.1 주탑 제원 및 구분

의령낙동대교 주탑은 역 Y형 경사고저 주탑형식으로 PY1과 PY2의 일반도는 [그림 2]와 같다. 주탑의 콘크리트 강도는 50MPa의 고강도 콘크리트를 사용하였고 시공 시 검토의 편의를 위해 다음과 같이 주탑을 세구간으로 구분하였다.

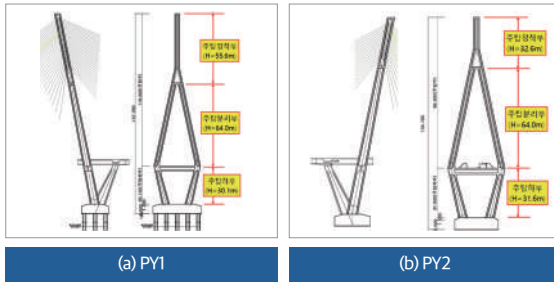
의령낙동대교 주탑 주요 제원

- 형식: 역Y형 경사고저 주탑
- 콘크리트 강도(주탑부) : $f_{ck}=50\text{MPa}$
- 주탑 하부 : 30.1m(PY1), 31.6m(PY2)
- 주탑 분리부 : 64.0m(PY1), 64.0m(PY2)
- 주탑 정착부 : 55.6m(PY1), 32.6m(PY2)

의령낙동대교 주탑의 구분

- 주탑 하부 : 기초상면 ~ 가로보상단
- 주탑 분리부 : 가로보상단 ~ 병합부하단
- 주탑 정착부(케이블 정착 구간) : 병합부하단 ~ 탑정부

[그림 2] 의령낙동대교 주탑 일반도



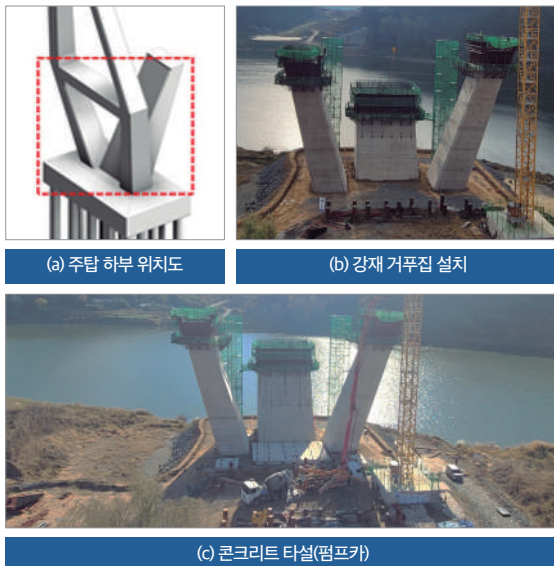
2.2 주탑 시공 방법

2.2.1 주탑 하부

주탑 하부(PY1: 30.1m, PY2: 31.6m) 구간은 [그림 3]과 같이 강재 거푸집을 설치한 후 펌프카를 이용하여 LOT당 2.0~4.0m씩 분할 타설하였다. PY1은 9LOT, PY2는 10LOT로 나누어 타설하였고 각 LOT마다 약 20일의 공정(Cycle time)이 소요되었다.

타설하중과 거푸집하중에 대한 주탑의 구조 안전성 검토결과 주탑 하부 높이까지는 주탑의 안전성이 확보되는 것으로 확인되었다. 이에 따라 이 구간에서는 별도의 가시설없이 시공하였다.

[그림 3] 주탑 하부 시공



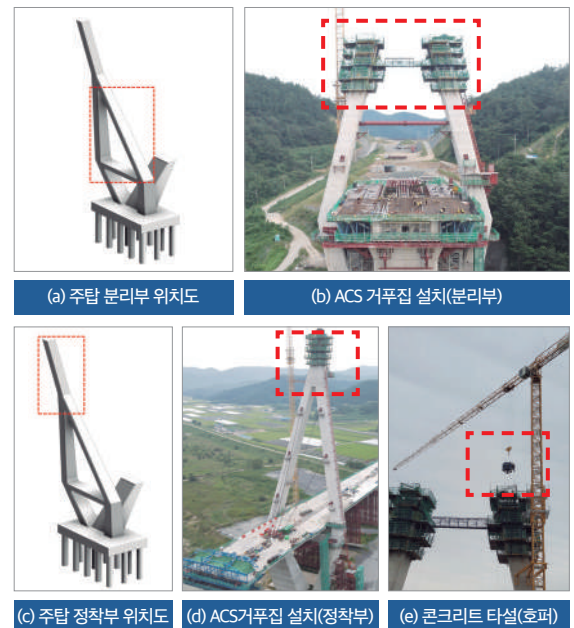
2.2.2 주탑 분리부 및 정착부

주탑 분리부(PY1: 64m, PY2: 64m)와 주탑 정착부(PY1:55.6m, PY2:32.6m) 구간은 [그림 4]와 같이 ACS(Auto Climbing System) 거푸집을 사용하여 시공하였다. ACS 거푸집을 세팅

하고 타워크레인을 활용하여 호퍼(Hopper)로 LOT당 4.0m씩 분할 타설하였다. 이 구간을 ACS거푸집에 호퍼 타설(LOT별 4.0m)로 적용한 이유는 구조 안정성, 시공성 및 경제성 이렇게 3가지 측면을 종합적으로 고려한 결과이다.

- ① 구조 안전성의 측면 : ACS거푸집이 저항할 수 있는 적정 타설 하중을 고려함과 동시에 LOT 분할횟수를 적정 수준으로 확보하여 주탑의 형상오차를 보정할 수 있는 기회를 충분히 확보하기 위함이었다.
- ② 시공성 측면 : 슬립폼과 달리 ACS 거푸집은 폼 세팅을 통해 주탑 선형을 단계별로 보정할 수 있고 호퍼타설 시 4m정도의 타설량이 전체 타설횟수 및 타설시간을 고려할 때 이 어치기 기준을 만족하는데 유리하기 때문이었다.
- ③ 경제적 측면 : 주탑 타설량의 규모를 고려할 때 고압 콘크리트 압송을 위한 배관 설비를 설치하는 것보다 타워크레인 + 호퍼 타설 방식이 보다 경제적인 것으로 판단되었기 때문이다.

[그림 4] 주탑 분리부 및 정착부 시공

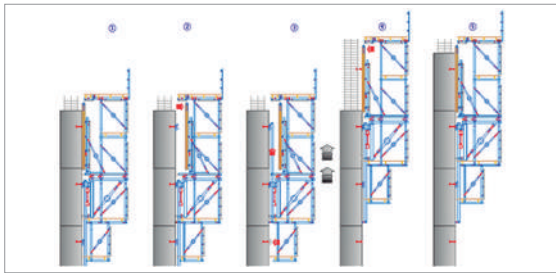


ACS 거푸집 공법의 기본적인 개념은 N번째 LOT의 주탑타설을 위해서 직전 LOT(N-1번째)에 기(既)타설된 콘크리트 구조물을 지지점으로 활용하고 거푸집과 작업 발판을 유압으로 상승시켜 거푸집을 세팅하여 동바리없이 타설하는 방법이다. 시

공 순서는 [그림 5]와 같이 ①전(前)LOT 콘크리트 타설 및 양생→②거푸집 이격→③ACS거푸집 유압상승→④거푸집 세팅→⑤콘크리트 타설의 단계로 반복된다.

PY1과 PY2 주탑은 높이 차이로 각각 31LOT, 26LOT로 분할하여 시공하였다. 따라서 주탑하부를 포함하여 각각 전체 LOT는 40LOT, 36LOT로 구성하였다. 주탑 분리부 및 정착부 역시 각 LOT마다 평균 약 20일의 공정이 소요되었다.

[그림 5] ACS거푸집의 시공순서 개념도



03. 경사고저주탑 가시설 적용

앞 절에서 소개한 주탑 시공 공법은 사장교 및 현수교 등 특수교에서 널리 사용되는 일반적인 공법으로 수직주탑 및 경사주탑에 모두 적용가능한 시공방법이다. 그러나 경사 주탑의 경우 시공 중 특정구간에서 구조 안전성이 확보되지 않을 수 있으므로 현장조건과 시공계획을 반영한 가설엔지니어링을 통해 가시설의 적용 여부와 공법 등을 결정해야 한다.

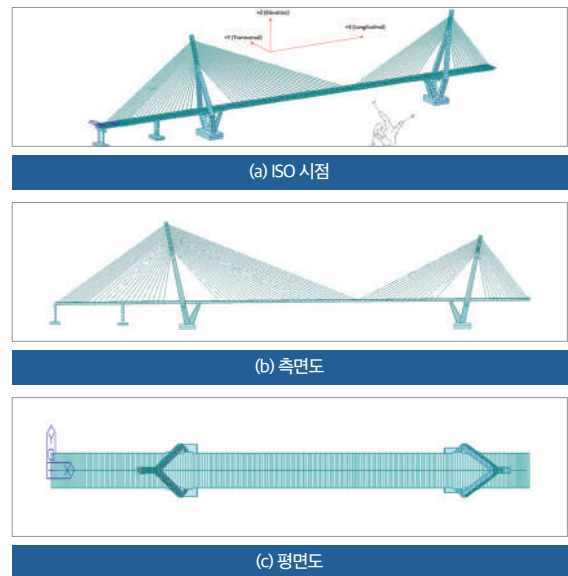
가설엔지니어링 결과 의령낙동대교의 경우 주탑하부는 구조적으로 자립 높이가 확보되어 별도의 가시설없이 시공하였다. 그러나 주탑 분리부 및 정착부 구간에서는 시공 중 구조 안전성을 확보하기 위해서 임시 타이 케이블, 임시 강재 가로보 및 임시 강재 스트럿을 적용하였다. 이 장에서는 의령낙동대교에 적용된 가시설들의 역할과 시공 방법, 그리고 각 가시설에 대한 가설엔지니어링 결과를 함께 서술하였다.

3.1 가설엔지니어링

가설엔지니어링은 원설계의 설계 조건에 추가적으로 현장조건 및 시공조건을 고려하여 시공 단계를 실제와 같이 세분화하여 이때 발생하는 구조적 문제점들을 해결하는 일련의 과정이라 할 수 있다.

의령낙동대교 현장의 현장조건 및 시공순서 등을 고려하여 가설엔지니어링을 수행하였다. 범용 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS CIVIL을 활용하여 [그림 6]과 같이 의령낙동대교를 3차원으로 모델링하고 시공 단계를 구분하여 단계별 구조 안전성 검토를 수행하였다. 좌표계는 오른손 좌표계를 기준으로 교축 방향을 X축, 수직 방향(Elevation)을 Z방향, 교축 직각 방향을 Y축으로 각각 설정하였다.

[그림 6] 의령낙동대교 해석프로그램 모델링

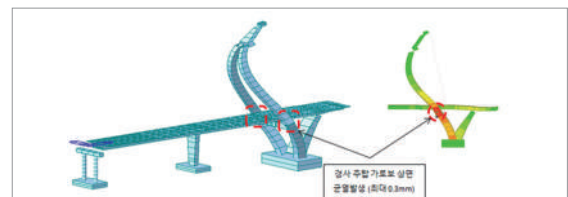


3.2 임시 타이 케이블

3.2.1 가설엔지니어링 결과 및 필요성

가설엔지니어링 결과 주탑 가로보 상면에서는 경사 주탑 자중에 의해 교축 방향으로 허용 균열폭(0.2mm)을 초과하는 균열이 발생하였다. [그림 7]과 같이 PY1의 경우 약 0.30mm, PY2의 경우 약 0.25mm의 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 이 균열은 최종 구조물 완성 후에는 닫히는 균열로 주탑 시공 중 발생하는 균열인 점을 고려하여 가시설인 임시 타이 케이블을 통해 균열을 제어하기로 계획하였다.

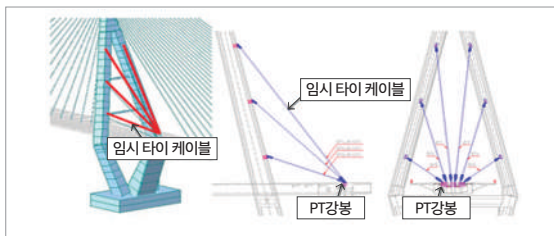
[그림 7] 주탑 가로보 상면 균열검토 결과



3.2.2 설계개념

균열 제어를 위한 임시 타이 케이블은 [그림 8]과 같이 보강형의 상면 기준 L1(9.64m), L2(29.64m), L3(49.64m) 높이에 각각 2본씩 총 6본의 케이블을 설치하였다. 설치 위치를 5LOT(20m) 간격으로 3단으로 나눈 이유는 케이블의 설치위치에서 임시 타이 케이블로 인한 주탑의 응력집중을 피하고 거동을 균형있게 제어하기 위함이었다. 또한 케이블의 설치 위치는 주탑의 분할 타설계획을 함께 고려하여 구조안전성 및 시공성을 동시에 고려하였다.

[그림 8] 임시 타이 케이블 설치위치 및 모델링



케이블은 7연선(KSD 7002 SWPC 7B, $\phi 15.2\text{mm}$, $f_{pu}=1,860\text{MPa}$) 27가닥(Strands)을 1본으로 구성하고 1가닥 당 약 130kN, 케이블 1본 당 약 3500kN을 도입하였다. 긴장력의 크기는 가로보 상면 균열부분의 응력을 균열 발생응력 이하로 낮추기 위한 최소 긴장력으로 산정하여 케이블 설치 및 제거 시의 구조물 영향을 최소화할 수 있도록 고려하였다. 보강형 상면으로부터의 설치높이와 도입 긴장력을 정리하면 [표 1]과 같았다.

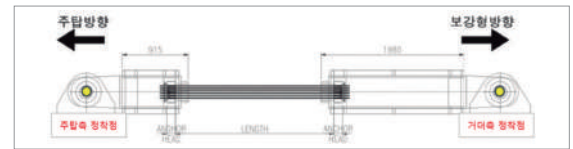
[표 1] 임시 타이 케이블 도입긴장력 및 규격

구분	보강형 상면에서 설치높이(m)	긴장력(kN)	규격
L1	9.64	3,489	KSD 7002 SWPC 7B ($\phi 15.2\text{mm}$)
L2	29.64	3,459	
L3	49.64	3,488	

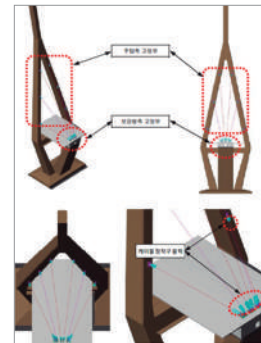
3.2.3 시공계획

임시 타이 케이블의 시공 시에는 해석 모델과 동일하게 케이블 부재에 인장력만 작용하도록 하는 것이 중요하였다. 이를 위해 [그림 9](a)와 같이 주탑 및 보강형측 정착부에는 회전 가능한 핀 구조의 정착 블록을 설치하여 케이블에 인장력만 구조물에 전달되도록 시공하였다.

[그림 9] 임시 타이 케이블 설치계획



(a) 임시 타이 케이블 개요도



(b) BIM모델링 결과

케이블은 1단 긴장하고 고정 단인 주탑측에는 정착 헤드 설치를 위해 약 915mm 크기의 러그(Lug)를 적용하고 인장단인 보강형 측에는 인장기의 삽입공간을 확보하기 위해 약 1,980mm 크기의 러그를 각각 적용하였다. 정착 블록의 형상과 고정방식은 [그림 9](b)와 같이 BIM모델

링을 통해 시공성을 검토하여 PT강봉을 활용하는 방식으로 결정하였다. 주탑 및 보강형측 고정부의 PT강봉 정착 방법을 수립하고 PT강봉에 작용하는 인장 및 전단 하중에 대해 구조 검토를 수행하여 안전성을 확보하는 강봉의 개수를 산정하였다.

해석결과와 BIM 모델링을 통해 결정한 정착블록은 주탑부와 보강형부에 L1~L3 순서로 주탑의 시공단계에 맞게 설치하였다. [그림 10](a)는 주탑부의 정착블록이고 [그림 10](b)는 보강형부의 정착블록이다. 케이블의 설치각도에 따라 블록 각도를 조정하였고 각 고정부의 지점은 핀 구조로 회전이 가능하도록 시공하였다. 최종 임시 타이 케이블의 설치전경은 [그림 10](c)와 같았다.

[그림 10] 임시 타이 케이블 설치



(a) 주탑부 정착 블록 (L1, L2, L3)



(b) 보강형부 정착 블록 (L1, L2, L3)



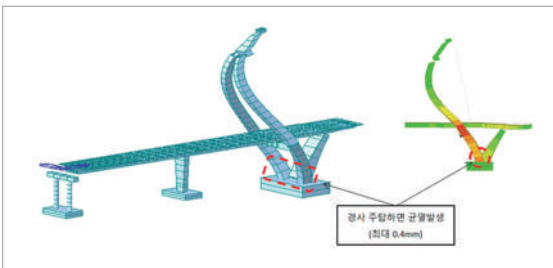
(c) 임시 타이 케이블 설치 전경

3.3 임시 강재 가로보

3.3.1 구조검토 결과 및 필요성

가설엔지니어링 결과 주탑 하부와 기초 상면 부근에서도 허용 균열폭 0.2mm를 초과하는 균열이 발생하였다. [그림 11]과 같이 PY1에서 약 0.40mm, PY2에서 약 0.35mm의 균열이 발생하는 것으로 검토되었다. 이 균열 역시 주탑 가로보 상면에서 발생하는 균열과 마찬가지로 시공 단계에서 발생하여 최종 구조물 완성 후에는 닫히는 균열이나 시공 중 균열 제어를 위해 임시 강재 가로보를 적용하였다.

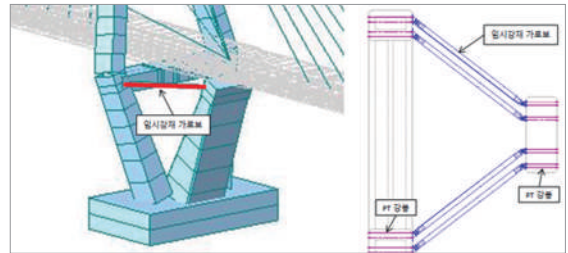
[그림 11] 주탑하부 하면 균열검토 결과



3.3.2 설계개념

임시 강재 가로보는 [그림 12]와 같이 주탑과 중앙기둥을 연결하는 형식으로 계획하였다. 해당 위치에서는 시공 단계에 따라 압축력과 인장력이 모두 발생하기 때문에 한 주탑 당 SM355강종의 $\Phi 812.8 \times 14t$ 의 강관 4분을 적용하여 양방향 축력을 모두 전달할 수 있도록 계획하였다. 임시 강재 가로보 설치 후 해석 결과 개소 당 최대 인장력은 1,900 kN, 최대 압축력은 3,600 kN로 강관의 허용 응력 범위 내에 있음을 확인하여 구조 안전성을 확보하였다.

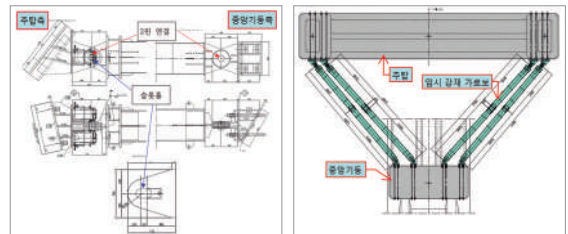
[그림 12] 임시 강재 가로보 설치위치 및 모델링



3.3.3 시공계획

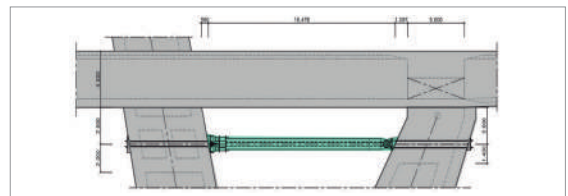
임시 강재 가로보의 경우 축력(압축력 및 인장력)만을 전달하도록 양단 핀구조로 [그림 13](a)와 같이 계획하였다. 설치계획에 따라 임시 강재 가로보의 도면을 [그림 13](b) 및 [그림 13](c)와 같이 작성하였다. 수직위치는 보강형 하단에서 2.6m 이격한 거리에 설치하였고 타워크레인의 인양능력에 따라 강재 가로보에 이음부를 추가하여 [그림 13](d)와 같이 현장이음을 계획하였다. 최종 임시 강재 가로보의 설치 전경은 [그림 14]와 같다.

[그림 13] 임시 강재 가로보 설치계획



(a) 양단 핀구조 상세도

(b) 평면도



(c) 측면도



(d) 분할시공

[그림 14] 임시 강재 가로보 설치 전경



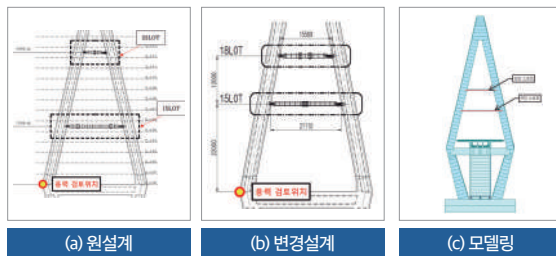
3.4 임시 강재 스트럿

3.4.1 구조검토 결과 및 위치 최적화

의령낙동대교 주탑 분리부 구간은 원설계에서부터 역Y형 경사 주탑 형식에 따라 시공 중 교축 직각 방향으로 발생하는 변위와 비틀림을 줄이기 위해 임시 강재 스트럿의 설치가 계획되어 있었다. 다만 공사비 산출을 위해 별도의 해석없이 통상적인 수량(2개소)만이 고려되어 있었다. 이에 가설엔지니어링을 통해서 [그림 15](a)의 하단(15LOT), 상단(22LOT)에서 [그림 15](b)의 하단(15LOT), 상단(18LOT) 과 같이 임시 강재 스트럿의 위치를 최적위치로 변경하였다. 최적위치의 선정 방법은 응력 검토위치에서의 시공중 응력을 검토하여 시공중 발생하는 최대 및 최소 응력의 절대값이 가장 많이 감소하는 위치로 결정하였다.

[그림 15](c)와 같이 변경설계된 위치에 임시 강재 스트럿을 모델링하여 가설엔지니어링을 수행하였다. [표 2]에 변경된 위치에 대하여 정리하였다.

[그림 15] 임시 강재 스트럿 위치 변경 및 모델링



[표 2] 임시 강재 스트럿 변경 설치위치

구분		설치위치(LOT)	가로보상면에서 설치높이(m)
PY1	상단	18	34
	하단	15	22
PY2	상단	19	34
	하단	16	22

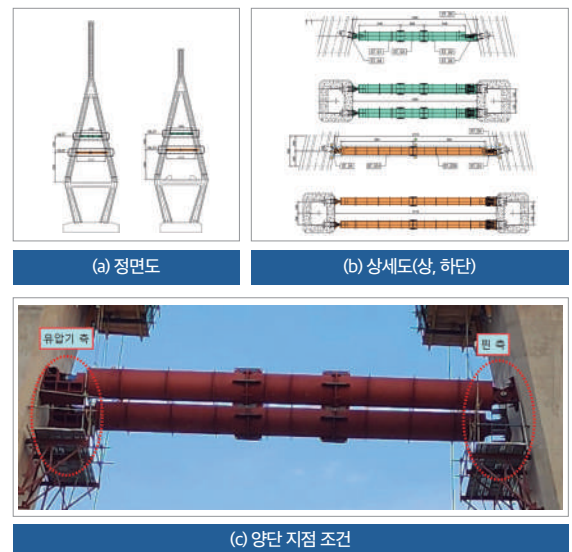
3.4.2 시공계획

[그림 16](a)와 같이 임시 강재 스트럿을 설치하였다. 상단 스트럿은 $\Phi 1,016 \times 12t$, 하단 스트럿은 $\Phi 812.8 \times 12t$ 의 규격을 적용하여 단면 성능과 시공 여건을 고려하여 계획하였다.

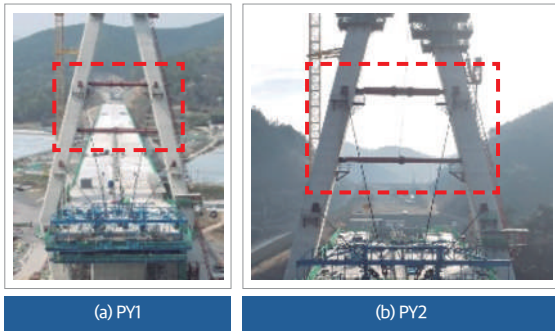
지점 조건은 [그림 16](b)의 상세도와 같이 한쪽은 핀으로 고정하고 반대쪽은 유압기를 설치하는 방식으로 계획하였다. 이는 스트럿에 초기 압축력을 도입하여 이후 해체 시에 압축력을 제어하기 위함이다. 스트럿 설치후에 [그림 16](c)와 같이 유압기를 이용하여 스트럿에 초기 압축력을 미리 도입하였다.

임시 강재 스트럿은 시공 단계가 진행될수록 압축력이 점진적으로 증가하는 부재이다. 따라서 해체 시점에 압축력의 제어가 중요하다. 이에 따라 주탑이 병합부에서 폐합된 이후 타워크레인으로 스트럿을 지지한 상태에서 유압기를 통해 압축력을 단계적으로 제거하도록 계획하였다. 유압기의 유압을 감소시키면 스트럿에 도입되어 있던 압축력이 순차적으로 해제되므로 스트럿에 급격한 하중 변화없이 안전하게 해체할 수 있도록 시공성을 확보하였다. 최종 임시 강재 스트럿의 PY1과 PY2의 설치 전경은 [그림 17]과 같다.

[그림 16] 임시 강재 스트럿 설치 계획



[그림 17] 임시 강재 스트럿 설치 전경

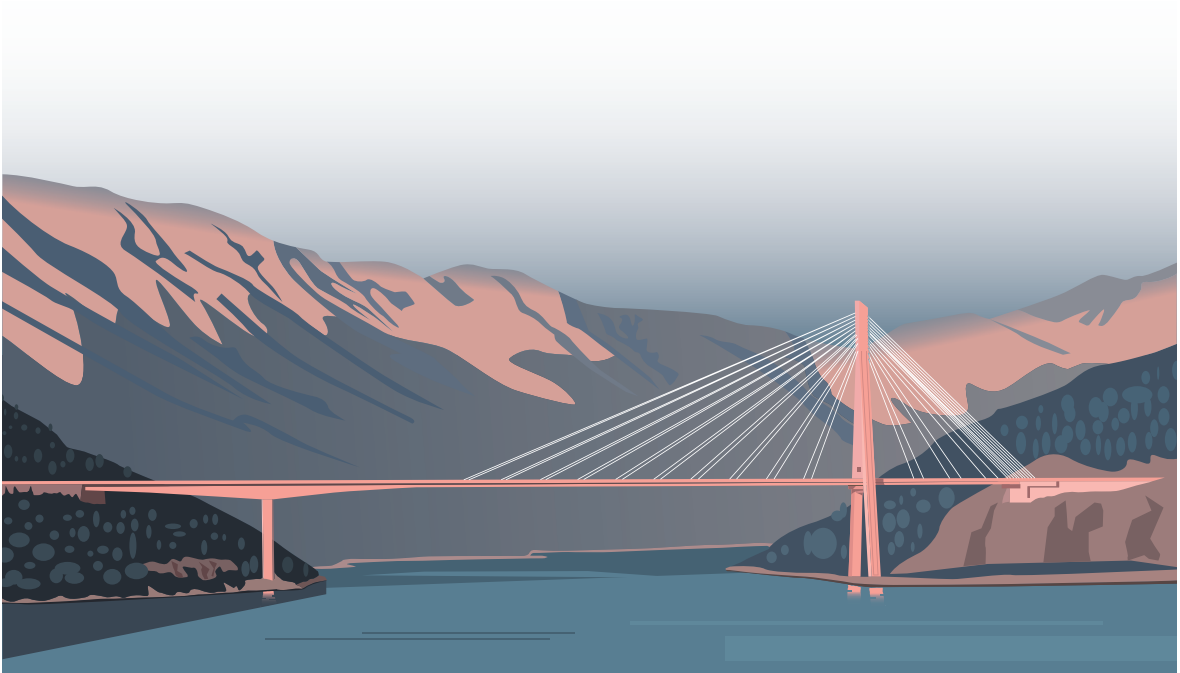


04. 결론

의령낙동대교는 역Y형 경사주탑으로 교축방향과 교축직각방향으로 모두 기울어져 시공되기 때문에 시공상 구조 안전성 확보가 핵심과제였다. 본 기사에서는 이러한 경사주탑의 시공 중 구조 안전성을 확보하기 위해 적용된 가설엔지니어링과 가시설 공법의 사례를 간단히 소개하였다. 소개한 가시설 공법이 향후 유사 사장교의 설계 및 시공 의사 결정과정에 참고가 되길 바란다.

본 기사의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주탑 하부는 가시설없이 시공하였으나 분리부와 정착부에서는 임시 타이 케이블, 임시 강재 가로보, 임시 강재 스트럿을 적용하여 구조 안전성을 확보하였다.
- 2) 임시 타이 케이블로 가로보 상면 교축방향 균열을 제어할 수 있었고 임시 강재 가로보로 주탑 하부 및 기초 상면 균열을 제어할 수 있었다. 임시 강재 스트럿은 교축직각방향 변위와 비틀림을 줄이면서 시공 안전성을 높일 수 있었다.
- 3) 가설엔지니어링으로 시공단계별 시공중 발생할 수 있는 구조 안전성 문제들을 선제적으로 대응하고 각 가시설의 설치 위치, 부재 단면 및 시공계획을 최적화할 수 있었다.



하이브리드 아치교의 계획 및 설계

글 현정환 / 토목기술팀 과장

전화 02-3433-7775 E-mail hyun686@ssyenc.com

글 백도준 / 반디컨설팅 구조부 전무

전화 02-6956-4188 E-mail back99@bandiconsult.com



01. 서론

터키 방식으로 발주된 광주송정~순천 철도건설 제1공구 건설 공사는 전라남도 나주시 삼도동에서 다도면 덕림리를 연결하는 총연장 19.387km의 신설 철도 건설사업이다. 본 사업은 경전선의 유일한 비전철구간(광주~순천)에 대한 전철화 등 선로 개량으로 고속화 서비스 확대 및 영·호남 지역간 철도 네트워크 구축으로 호남권 경제활성화 및 남해안 문화·관광 활성화를 위한 사업을 목적으로 발주되었다.

본 공사에는 토공, 교량, 터널, 개착 Box 등 각종 노반 구조물과 함께 혁신도시정거장 1개소가 포함되어 있다. 교량은 연장 6.589km의 영산고가(하)를 포함하여 총 6개소가 계획되었다.

특히 연장 6.589km의 영산고가는 가설 위치 및 주변 조건에 따라 라멘교, WPC T-거더교, Edge 거더교, Precom, 랭거아치교, 하이브리드 아치교 등 다양한 상부 구조 형식이 적용되었다.

본 기고에서는 터키 방식으로 당선되어 현재 실시설계가 진행 중인 제1공구 교량 구간 중, 영산고가 내 국가하천 영산강을 횡단하는 9경간 연속 아치교를 대상으로, 그 계획 개념과 주요 설계 내용을 중심으로 기술하고자 한다.

02. 입찰조건 및 기본계획

기본계획에 따르면 영산강 횡단교량은 총연장 800m로 계획되었으며, 주경간 10m와 측경간 80m로 구성된 3경간 Extradosed교 형식이 적용되었다. 해당 교량에 접속하는 구간에는 경간장 80m 및 45m의 FCM 교량이 계획되었다.

또한 시점측 제방을 통과하는 구간에는 경간장 40m의 PF

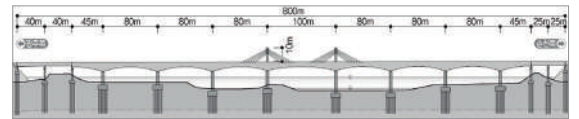
개량형 교량이 적용되었으며, 종점측 제방을 통과하는 구간에는 경간장 25m의 PSC 개량형 빔교가 적용되었다.

주경간교인 Extradosed교 및 FCM 접속교에는 PSC 박스형 상부구조가 적용되었고, 하부구조로는 관관말뚝 기초가 계획되었다. 반면, 시·종점부 제방 통과 교량에는 PSC 빔 계열 거더가 적용되었으며, 기초 형식으로는 PHC 말뚝이 채택되었다.

[그림 1] 광주송정~순천 철도건설 제1공구 사업개요



[그림 2] 영산강 횡단교량 (기본계획)



[그림 3] 영산강 횡단교량 야간CG

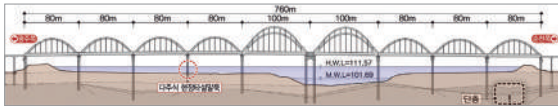


03. 하이브리드 아치교의 계획과 설계

3.1 교량계획

영산강 횡단교량은 입찰안내서 및 설계기준에 따라 최소 80m 경간장과 최대 100m 이상의 경간장 계획이 필요했고, 경관성 및 교량안전성 측면을 고려하여 경간 구성을 $4 \times 80 + 2 \times 100 + 3 \times 80 = 760\text{m}$ 의 9경간 하이브리드 아치교로 계획하였다.

[그림 4] 영산강 횡단교량



유심부에 위치한 주경간 100m의 하이브리드 아치교는 시공성 및 강성확보를 위해 강재 더블아치리브로 계획하였으며 소음 및 진동저감 및 사용성 증가를 위해 U형 콘크리트 하로형 거더가 적용되었다. 강성이 큰 강재행어를 적용으로 거더 처짐의 최소화와 와류진동 방지에 효과적이다.

독창적인 U형 콘크리트 거더 및 강재 더블리브 아치리브 적용으로 강아치교에 비해 소음 및 진동 저감에 유리하며, 열차 하중에 의한 처짐을 대폭 감소시켰다.

100m 하이브리드 아치교에 접속하는 주경간장 80m의 복합 랭거 아치교는 거더는 하이브리드 아치교와 동일한 U형 콘크리트 하로형 거더가 적용되었고, 아치리브는 60MPa의 고강도 콘크리트가 적용되었다. 복합랭거 아치교의 행어 및 스트럿은 시공성 향상을 위해 강재가 적용되었다.

하부 기초는 영산강 점유기간 및 환경훼손을 최소화하기 위해 가시시설이 필요 없는 직경 3.0m의 2주식 현장타설말뚝을 적용하였으며, 100m 주경간부는 하부 강성 확대를 위해 직경 2.5m의 4주식 현장타설말뚝 교각이 적용되었다. 거대 확대기초 및 기초 가시시설을 배제하는 다주식 현장타설말뚝 기초형식 적용은 영산강 환경훼손을 최소화하고, 빠른 가설이 가능하게 계획하였다.

[그림 5] 세부구조계획을 통한 고강성 확보계획



3.2 설계기준

철도교량은 2023년 1월부터 기존 허용응력설계법 대신 한계상태설계법이 적용되고 있다.

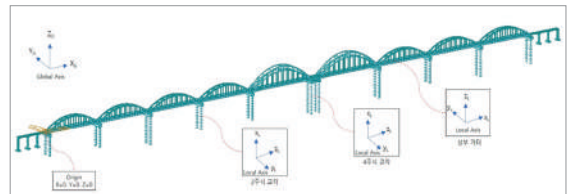
하이브리드 아치교인 영산강 횡단교량은 철도교로서는 비교적 장경간인 100m를 적용한 구조물이다. 이러한 구조적 특성과 국내 최초로 도입되는 하이브리드 철도 아치교의 중요성을 고려하여, 지반종류를 S2에서 S4로 상향 적용하였으며, 이를 통해 내진 단면력을 약 44% 증대하는 강화된 내진설계 기준을 수립하였다.

또한 풍하중은 재현주기 100년에서 200년을 적용하였으며, 주요 콘크리트 부재의 노출등급과 환경조건에 따른 기준압축강도 및 피복두께를 선정하고, 신뢰도기반 염해내구성 설계기준을 적용하여 목표내구수명 200년 이상을 확보할 수 있도록 하였다. 이 외에도, ISO 834에서 정의한 표준 온도 시간 곡선을 적용한 최신 내화능성 평가기준을 반영하여, 화재 등 재해발생시 충분한 안전성을 확보할 수 있도록 설계기준을 수립하였다.

3.3 구조해석

영산강 횡단교량의 구조 요소별 내력 및 변위를 실구조물의 거동을 합리적으로 반영할 수 있도록 상부구조와 지반 스프링을 고려한 3차원 격자 해석모델을 구축하였다. 모든 부재는 도심에 절점을 갖도록 모델링하였으며, 행어 및 스트럿은 거더와 아치리브에 정의된 Working Point(WP)에 연결하였고 아치교와 접속고 일부를 통합하여 모델링함으로써 풍하중 및 지진하중 작용시 구조 거동을 보다 정밀하게 평가하였다. 열차하중을 포함한 완성계 해석을 비롯하여 좌굴해석, 고유치해석, 응답스펙트럼해석, 그리고 지반-구조물 상호작용 (SSI)을 고려한 시간이력해석 등 다양한 구조해석을 수행하여 부재별 설계 단면력을 산정하였다.

[그림 6] 전체계 구조해석모델



[그림 7] 좌굴해석

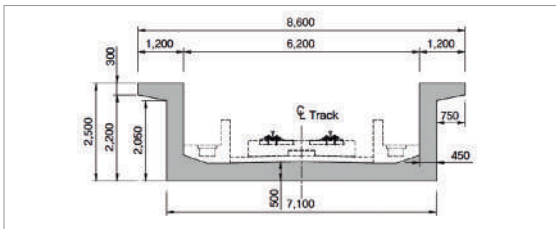


또한, 철도교량은 열차 주행에 따른 반복하중과 동적 효과를 받는 구조물로서, 교량의 동적 안정성과 궤도-교량 상호작용에 따른 거동을 종합적으로 검토하여야 한다. 이에 본 교량은 열차 주행 시 발생하는 진동 특성, 공진 가능성 및 변위 응답을 평가하기 위한 동적 해석을 수행하였고, 레일과 교량의 상호 거동으로 인해 발생하는 종방향 부가력과 변형을 합리적으로 산정하기 위하여, 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 수행하였으며, 이를 통해 교량 및 궤도 구조의 안전성과 사용성을 함께 검증하였다.

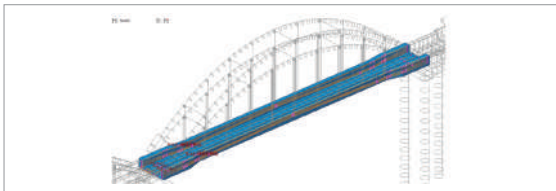
3.4 거더

아치교의 거더는 행어를 통해 지지되며 대부분의 아치교의 거더는 강재가 적용되었으나, 본 교량은 철도교의 동특성 향상, 소음·진동 저감 및 경제성 확보를 위해 45MPa의 콘크리트 거더가 적용되었다. 보강거더의 폭은 중앙부 8.6m에서 단부 9.8m까지 변하게 되며, 횡방향 강연선 및 종방향 강연선이 배치가 되었다.

[그림 8] 하이브리드 아치교 거더



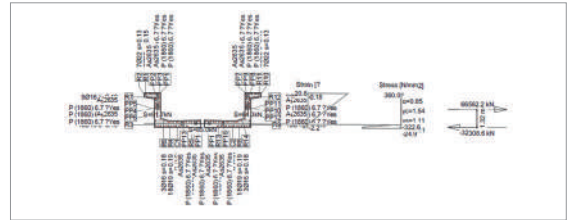
[그림 9] 강연선 모델링



거더 구조의 거동과 설계 적정성을 평가하기 위하여, 전반적인 횡방향 거동 및 국부 응력 분포를 고려한 구조 해석과 상세

유한요소해석(FEM)을 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 철근콘크리트 부재와 PSC 부재에 대해서는 단면 거동을 정밀하게 반영할 수 있는 단면해석 프로그램인 Fagus를 적용하여 단면의 안전성을 검토하였다.

[그림 10] 거더 휨강도 검토 (Fagus)



거더는 행어에 의해 연속적으로 지지되는 구조적 특성을 가지므로, 영향선 해석을 통해 등가 지간을 산정하고 이를 기반으로 유혹폭을 합리적으로 결정하였다. 이후 축력과 이축 힘이 동시에 작용하는 조건을 고려하여 부재의 휨 내력을 평가하였으며, 콘크리트의 무인장 상태(영응력), 압축응력 제한, 균열 폭 등 사용성 및 내구성 요구사항을 포함한 모든 한계상태에 대해 설계기준 적합 여부를 종합적으로 검토하였다.

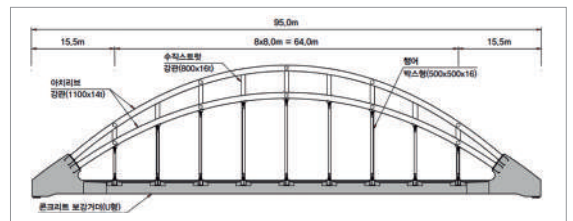
또한, 정적 및 동적 처짐에 대해 검토를 수행하여 열차의 주행 안전성 및 승차감 기준에 만족함을 확인하였다.

3.5 아치리브

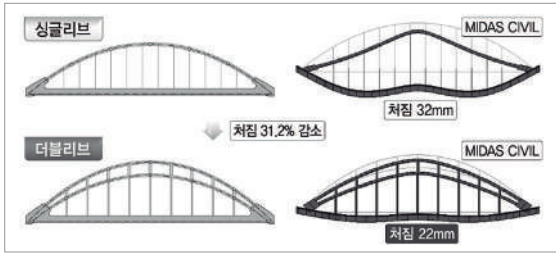
아치리브는 행어를 통해 보강거더를 지지하는 주구조로서 연직하중을 단면의 압축강도로 저항하는 축력부재이다.

아치리브는 HSB380의 1100mm 강관을 적용했으며 일반부는 14mm, 행어정착부는 26mm 단부는 18mm 두께가 적용되었다. 교량의 열차하중에 대한 처짐을 저감하기 위해 2개의 아치리브가 있는 더블 아치리브가 적용되었는데, 싱글 아치리브에 비해 처짐이 31.2% 저감됨을 확인하였다. 더블리브는 800mm의 수직 스트럿으로 연결하는 구조로 계획되었다.

[그림 11] 하이브리드 아치교 - 아치리브

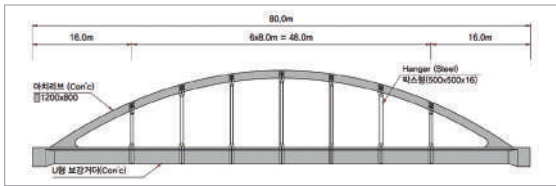


[그림 12] 아치교의 처짐비교

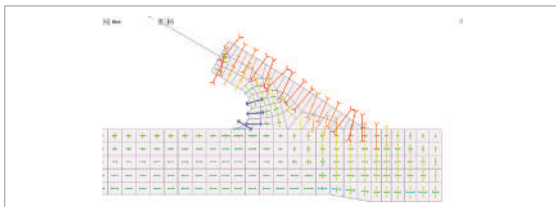


이에 반해 복합 랭거 아치교의 아치리브는 폭 1,200mm, 높이 800mm의 고강도 콘크리트($f_{ck} = 60 \text{ MPa}$) 단면으로 계획하였다. 하이브리드 아치교는 강재 아치리브가 주 구조부재로 작용하고 보강거더가 이를 보조하는 구조인 반면, 랭거 아치교는 거더가 주 구조부재로 작용하며 아치리브는 거더의 거동을 보조하는 역할을 수행하도록 계획하였다. 이와 같은 구조 시스템의 차이에 따라, 랭거 아치교에는 하이브리드 아치교에 비해 상대적으로 작은 새그비를 적용하였다.

[그림 13] 복합 랭거아치교 - 아치리브



[그림 14] 복합 랭거아치교 지점부 - 주응력벡터



강재 아치리브와 콘크리트 아치리브는 각각의 구조 거동과 재료 특성을 고려하여 설계하였으며, 강도 한계상태와 사용 한계상태를 포함한 모든 한계상태에 대해 설계기준을 만족함을 확인하였다. 이를 통해 두 아치리브 모두 구조적 안전성과 사용성을 충분히 확보하였다.

3.6 행어

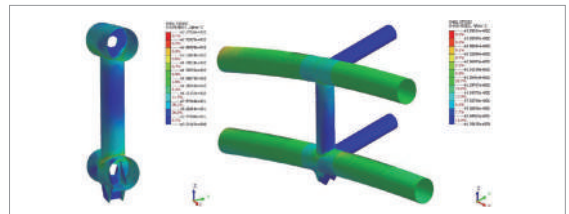
하이브리드 아치교와 복합 랭거 아치교에는 모두 케이블 행어 대신 강재 행어를 적용하였다. 하이브리드 아치교의 경우 크레인 시공성을 고려하여 볼트 연결 방식의 강재 행어를 적

용하였으며, 복합 랭거 아치교는 현장타설 공정을 반영하여 행어와 스트럿을 일체화한 구조 형식으로 계획하였다.

이와 같은 강재 행어의 적용으로 구조물의 진동 저항성이 향상되어 처짐이 효과적으로 억제되며, 또한 박스형 강재 단면을 적용함으로써 와류 진동 발생을 방지하는 데에도 유리한 구조적 특성을 확보하였다.

인장력과 힘을 받는 행어는 1축 및 2축 부재에 대해 각 한계상태별 조합력 검토를 수행하여 구조적 안전성을 확보하였다.

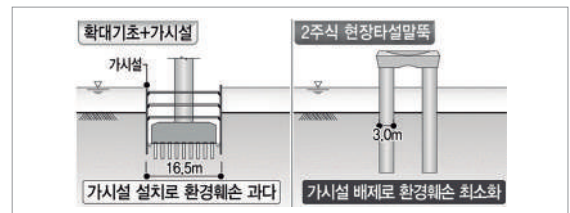
[그림 15] 행어 및 격점부 FEM해석



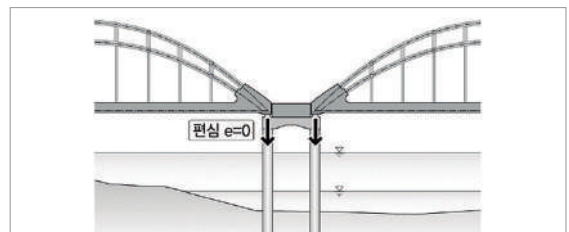
3.7 하부 및 기초형식

영산강 점유기간 및 환경훼손을 최소화하기 위해 가시설이 필요 없는 직경 3.0m의 2주식 현장타설말뚝을 적용하였으며, 100m 주경간부는 편심없는 상부하중 전달 및 하부 강성 확대를 위해 직경 2.5m의 4주식 현장타설말뚝 교각이 적용되었다.

[그림 16] 2주식 현장타설말뚝



[그림 17] 4주식 현장타설말뚝

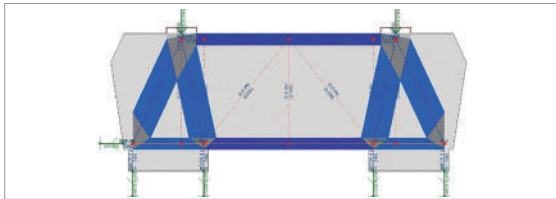


거대 확대기초 및 기초 가시설을 배제한 다주식 현장타설말뚝 기초형식을 적용하여 영산강에 대한 환경 훼손을 최소화하였으며, 신속한 가설이 가능하도록 계획하였다.

교각 및 기초는 상·하부 구조를 포함한 3차원 모델을 이용하여 시공단계와 P-Δ 효과를 고려한 기하비선형 해석 및 내진

설계를 수행하였고, 전체계 해석 결과로부터 도출된 한계상태별 조합 부재력을 적용하여 극한한계상태 및 극단상황한계상태에 대해 휨강도, 전단강도 및 비틀림강도 검토를 수행하였다. 또한 사용한계상태에 대해서는 응력 한계 및 균열 검토를 수행하였다.

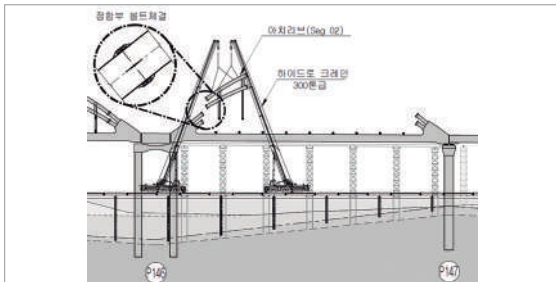
[그림 18] 코핑 Strut-Tie 모델



3.8 가설공법

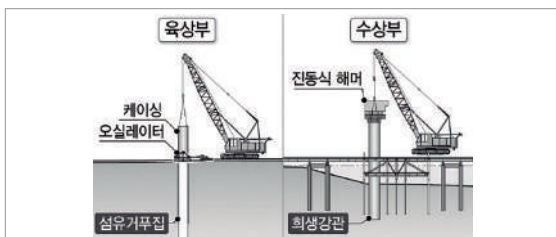
국가하천인 영산강은 우기철에 자연재난 대책기간으로 1년 중 5개월동안 공사를 중지하여야 한다. 따라서 다경간 아치교에 적합하고, 빠른 가설 및 영산강 점유기간 최소화가 가능한 FSM(Full Staging Method)가설 공법을 적용하였다. 강재 더블 아치리브 가설시 가교 위에서 작업해야 한다는 것을 고려해서, 아치리브를 5등분하여 300톤급 크롤러 크레인을 이용한 일괄 인양을 하도록 계획하였다.

[그림 19] 크레인을 활용한 아치리브 가설



기초는 말뚝 공벽 유지를 위해 수상부는 희생강관을 적용하였고, 고수부지부인 육상부는 섬유거푸집을 적용하여 영산강 구간 공벽붕괴 방지공법을 적용하였다.

[그림 20] 현장타설말뚝 - 공벽붕괴 방지공법



04. 맺음말

본 기사에서는 광주송정~순천 철도건설공사 제1공구 중 영산강을 횡단하는 교량을 대상으로, 9경간 하이브리드 아치교의 계획 및 설계 과정에 대해 기술하였다. 본 교량은 철도교량으로서 국내 적용 사례가 없는 하이브리드 아치교 형식을 채택한 사례로, 설계 단계에서 구조적 안전성 확보는 물론 시공성 및 경제성까지 종합적으로 고려하여 계획되었다.

일반적인 강재 아치교는 가설이 비교적 용이하다는 장점이 있으나, 전 부재에 강재를 적용할 경우 유지관리 측면에서 부담이 크고 경제성 확보에도 한계가 있다. 또한 철도교량에 강재를 적용하는 경우 소음·진동 및 사용성 측면에서 불리하게 작용할 수 있다. 반면, 본 교량에 적용된 하이브리드 아치교 형식은 이러한 기존 강재 아치교의 한계를 보완하기 위해 콘크리트 거더와 강재 아치의 장점을 효과적으로 결합한 구조형식으로, 각 재료의 특성을 합리적으로 활용함으로써 구조적 효율성과 사용성을 동시에 향상시킬 수 있었다.

특히, 콘크리트 거더의 강성과 질량에 의한 사용성 개선 효과와 강재 아치의 경량화 및 형상 자유도를 결합함으로써, 철도교량으로 요구되는 구조적 안정성, 진동 성능 및 경제성을 균형 있게 만족하는 해법을 제시하였다는 점에서 그 의의가 있다.

이러한 하이브리드 아치교의 적용은 향후 철도교량 설계에 있어 새로운 대안 구조형식으로서의 가능성을 보여주는 사례라 할 수 있다.

끝으로, 본 교량의 성공적인 계획 및 건설이 국내 철도교량 분야에서의 구조형식 다양화와 설계기술 발전에 기여할 수 있기를 기대하며, 향후 유사 조건의 교량 설계 및 적용에 있어 유용한 참고 사례로 활용되기를 바란다.

※ 참고문헌

01. 국토교통부(2021), 설계기준코드(KDS)
02. 국가철도공단, 광주송정~순천 제1공구 건설공사, 입찰안내서
03. 쌍용건설(2024), 광주송정~순천 제1공구 건설공사, 기본설계보고서
04. 쌍용건설(2024), 광주송정~순천 제1공구 건설공사, 구조 및 수리계산서

저온 환경에서 콘크리트 품질기준강도 확보방안 검증 연구



글 박태일 / 건축기술팀 차장 전화 02-3433-7712 E-mail teri0121@ssyenc.com

01. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

최근 개정된 콘크리트 표준시방서에서는 저온 환경에서 구조체의 품질기준강도를 확보하기 위한 방안으로 예상 평균기온을 토대로 기존 레미콘 호칭강도에 '기온보정강도'를 더하여 타설하도록 기준을 개정하였다.

- KCS 14 20 40 동절기 4°C미만 기온보정강도 + 6MPa

[표 1.1] 한중콘크리트 강도의 기온에 따른 보정 값(Tn)

원료명	재령(일)	콘크리트 타설일로부터 재령(n)일 까지의 예상평균기온의 범위(°C)		
보통포틀랜드시멘트 플라이 애시 시멘트 1종 고로 슬래그 시멘트 1종 플라이 애시 시멘트 2종 고로 슬래그 시멘트 2종	28	-	-	0이상 ~ 4미만 ¹⁾
	42	-	-	0이상 ~ 4미만
	56	-	0이상 ~ 4미만	-
	91	0이상 ~ 4미만	-	-
콘크리트 강도의 기온보정값 Tn(MPa)		0	3	6

1) 재령 28일 이내에 품질기준강도가 발현될 수 있도록 초기 및 계속 보온 양생 계획을 수립하여 책임 기술자의 승인을 받은 경우에 한함.

단, 구성재료나 양생방법의 개선 등 새로운 기술을 적용하여 신뢰할 수 있는 실험에 의해 입증된 경우 책임기술자의 승인을 통해 기온보정값을 적용하지 않을 수 있음을 예외 조항으로 명시하였다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 초기 수화반응 촉진을 위한 기능성 재료 사용 및 배합설계, 양생 온도 및 현장 관리 방안을 통해 저온 환경에서도 안정적으로 콘크리트의 품질기준강도를 확보하기 위한 연구를 진행하고자 하였다.

1.2 연구 범위 및 방법

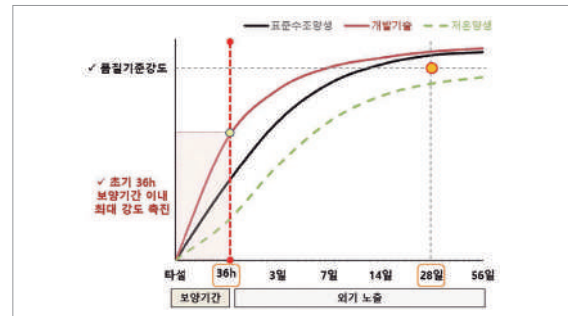
본 연구에서는 콘크리트 품질기준강도를 확보하기 위해 ① 기능성 재료 및 배합설계, ② 양생 관리 방법을 복합하여, 저온 환경에서 콘크리트의 초기동해를 예방하고 안전한 구조체를 구현하고자 하였다.

1	콘크리트 규격*	27, 30, 33, 36MPa
2	기능성 재료	조강형 시멘트, 기능성 (조강+내구성 강화) 혼화제
3	배합설계	배합설계 기준 제안
4	양생 방법	초기 36시간 10°C양생

* 현장에서 주로 사용하는 규격에 한함

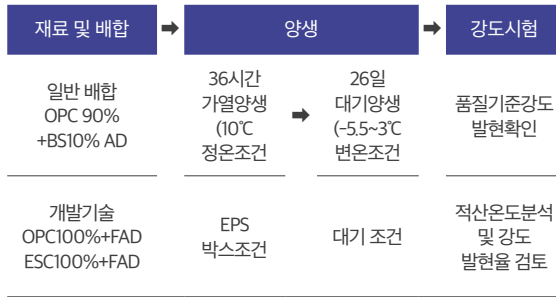
양생 조건은 콘크리트 초기동해 예방 및 실제 현장 여건을 반영하기 위해 최초 36시간 가열 양생 후 대기 양생으로 계획하였으며, 이를 위해 Lab 테스트 진행 시 양생 챔버를 통해 정온 및 변온 양생을 실시하기로 하였다.

[그림 1.1] 36시간 집중 가열양생(현장 여건 고려)



가열양생 종료 후 변온 양생 시에는 국내 권역별 동절기 기간(12월~2월) 동안 기상청 10년(2014년~2024년) 평균기온 Data를 분석하여, 가장 낮은 기온을 나타낸 강원 영서권을 기준으로 최고, 최저 온도를 선정하였다.

[그림 1.2] 콘크리트 품질기준강도 검증 방안



* OPC : Ordinary Portland Cemen
BS : Blast furnace Slag (2종)
ESC : Early strength Slag Cement (1종)
AD : Admixture
FAD : Functional Admixture

적산온도(Degree Day) 분석을 통한 품질기준강도 확보 기준 수립 및 시험 결과에 대한 공인기관 성적서 발급으로 데이터 신뢰성 확보하고자 하였다.

02. 이론적 고찰

2.1 한중콘크리트 표준시방서 개정 사항

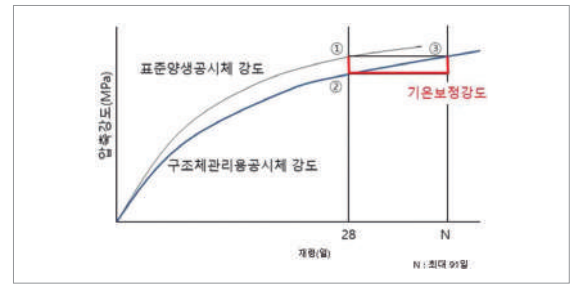
한중콘크리트는 타설일의 일평균기온이 4℃이하로 예상되는 등 저온 환경에서 시공되는 콘크리트를 지칭하며, 2024년 12월에 개정된 KCS 14 20 40 한중 콘크리트 시방서 중 가장 핵심적인 개정 사항은 기온보정값(T)의 재도입이고, 개정된 시방서는 재령 28일 예상평균기온이 0℃이상 4℃미만일 경우, 시멘트 종류에 따라 3MPa, 6MPa의 기온보정값을 더하여 호칭강도를 정하도록 명시하였다.

2.2 기온보정강도 개념

한중 및 한랭기에서 타설되는 콘크리트의 경우 콘크리트 타설 후 28일간의 평균기온에 따라 표준양생 조건에서의 강도 발현이 지연된다.

여기서 일정 재령 내에 소요 강도를 확보할 수 있도록 하기 위해서는 배합설계 강도 결정 시 그 차이만큼 상향 보정이 필요하다. 이것이 기온보정강도의 개념이며, 구조체 관리용 공시체 강도 증진의 ②점에서 강도를 표준양생 공시체의 강도 증진의 ①점 강도만큼 발휘되도록 ③점만큼 기간을 연장하는 방법을 관리 재령 연장이라고 한다.

[그림 2.1] 콘크리트 강도와 양생온도 및 관리재령간의 관계 개념도



2.3 조강형 재료

2.3.1 조강형 시멘트

조강형 시멘트는 일반적인 포틀랜드 시멘트에 비해 초기 재령에서 매우 빠른 강도 발현을 목적으로 제조된 시멘트를 의미하며, 이는 거꾸집의 조기 탈형, 동절기 공사에서의 초기 동해 방지, 프리캐스트 콘크리트 제품의 생산성 향상 등 공사기간 단축 및 공사비용 절감이 요구되는 현대 건설 환경에서 그 중요성이 증대되고 있다.

이러한 조기강도 발현 특성은 주로 시멘트의 화학적 조성과 물리적 특성을 조절함으로써 구현된다.

화학적으로는 초기강도 발현에 가장 큰 영향을 미치는 규산삼칼슘(C₃S)의 비율을 높이고, 장기강도를 담당하는 규산이칼슘(C₂S)의 비율을 상대적으로 낮추는 방식으로 클링커 조성을 변경하고 있다. 물리적으로는 시멘트의 분말도를 높이는 것이 가장 대표적인 방법이며, 초기 수화물의 생성을 가속화하여 재령 1일 이내의 극초기 강도를 크게 향상시키는 결과를 가져온다.

2.3.2 기능성 혼화제(FAD : Functional Admixture)

콘크리트의 조기강도 발현은 조강형 시멘트를 사용하는 방법 외에도 시멘트의 수화반응을 화학적으로 촉진하는 기능성 혼화제를 사용하여 구현할 수 있다.

이러한 혼화제들은 콘크리트 배합 시 소량 첨가되어 응결 및 경화 과정을 가속함으로써, 초기 재령에서의 강도 증진을 목표로 하며, 대표적인 기능성 혼화제로는 질산, 아질산칼슘 및 트리메탄올아민계 혼화제 등이 있다.

폴리카르본산계 혼화제의 분산작용으로 W/C를 낮춰 조강 및 고강도를 발휘할 수 있는데, 그 원리는 정전기적 반발력 및

측쇄에 의한 물리적인 입체장애작용의 상호작용에 의해 분산된다.

한편, 조기강도 개선제는 대표적으로 유기염계인 아민류와 무기염계인 칼슘계 두가지 물질이 있다.

유기염계인 아민류의 경우 석고와의 반응을 통해서 에트린 가이트(Ettringite)를 형성하고 생성된 수화물 중 Ettringite가 mono sulfate로의 반응 진행을 촉진시켜 수화촉진 작용을 한다.

무기염계인 칼슘계는 C3S의 수화반응을 촉진시켜 시멘트 겔(C-H-S Gel)등의 수화생성물의 석출을 매우 활발하게 촉진시킨다.

기능성 혼화제는 위의 아민류와 칼슘계를 혼합한 형식으로 시멘트 수화 시 생성되는 수산화칼슘 (Ca(OH)2) 및 석고(CaSO4)와 빠르게 반응하여 다량의 에트린가이트(Ettringite)라는 침상결정을 생성시키고, 시멘트 겔(C-H-S Gel) 수화생성물이 초기 공극을 조밀하게 채우고 얹히면서 조직을 치밀하게 만들어 조기 강도를 발현시킨다.

[표 2.1] 기능성 혼화제(FAD)의 특징

구분		기존 조강혼화제	신규 조강혼화제
감수율(%)		21	23
응결 시간	초결(min)	-20	-25
	종결(min)	-25	-35
조강PC (평균분자량 g/mol)		기존 조강PC (3,000~3,300)	신규 조강PC (3,600~4,200)

03. 저온 환경에서 콘크리트 강도 발현성 검증

3.1 서 언

저온 환경에서 개발기술의 콘크리트 강도 발현성을 확인 및 검증하기 위하여 일련의 실험을 실시하였다.

실제 현장 DB를 근거로 저온 조건을 모사하고, 주요 규격별 Plain 대비 개발기술의 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트 특성을 검토하였으며, 도출된 실험 결과를 기반으로 동절기 저온 조건에서 안정적으로 구조체 품질기준 강도를 확보할 수 있는 최적 방안을 도출하고자 하였다.

3.2 실험계획 및 방법

3.2.1 양생온도 조건

초기 가열양생에 따른 정온조건과 가열양생 종료 후 권역별 최고, 최저 변온조건을 선정하여 실험을 진행하였다.

먼저, 콘크리트 타설 후 초기 가열양생은 지난 동절기(24년 12월~25년 2월) 골조공사를 진행한 현장의 콘크리트 양생온도 및 강도 데이터를 분석하여 실험요인으로 설정하였다. [표 3.1]

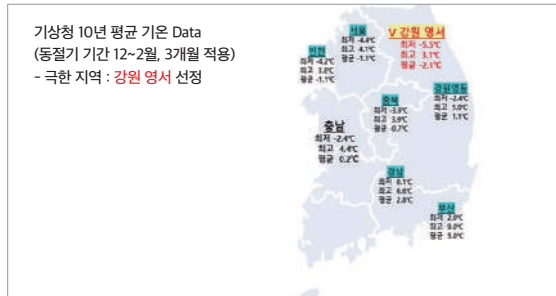
[표 3.1] 현장별 콘크리트 양생온도(24년 12월~25년 2월)

현장	타설일	규격	평균 온도 (°C)	압축강도 (MPa)		압축강도 발현율(%)	
				7일	28일	7일	28일
경기	25.1.9	25-27-180	8.2	23.2	27.5	86	102
	25.1.10	25-27-180	9.2	23.0	27.8	85	103
	25.1.13	25-27-180	9.5	22.7	28.3	84	105
	25.1.15	25-27-180	9.8	23.0	28.1	85	104
	평균		9.2	23.0	27.9	85	103
서울1	24.12.20	25-30-180	11.5	30.3	35.4	101	118
	24.12.23	25-30-180	12.0	30.6	36.0	102	120
	25.1.8	25-35-180	10.2	36.1	42.4	103	121
	25.1.14	25-35-180	10.5	36.1	42.0	103	120
	평균		11.1	33.3	38.9	102	120
서울2	25.1.20	25-27-180	11.0	27.5	32.1	102	119
	25.1.22	25-27-180	10.8	27.8	32.7	103	121
	25.2.4	25-30-180	11.1	30.6	34.8	102	116
	25.2.6	25-30-180	12.5	30.9	36.6	103	122
	평균		11.4	34.1	34.1	103	120
양생막 내부 평균 온도			10.5	-	-	-	-

평균 양생온도에 따른 압축강도 및 발현율 분석 결과, 양생막 내부 온도가 10°C 이상으로 관리될 경우 재령 28일 품질기준 강도가 110~120 % 수준으로 안정적으로 확보가 가능함에 따라 초기 36시간 동안 양생온도는 10°C로 설정하였다.

다음으로 가열양생 종료 후 변온조건에의 경우 국내 권역별 동절기 기간(12월~2월) 동안 기상청 10년(2014년~2024년) 평균기온 Data를 분석한 결과, 가장 낮은 기온을 보인 곳은 강원 영서권으로 나타남에 따라 해당 지역 최고, 최저 기온을 양생 온도로 선정하였다. [그림 3.1]

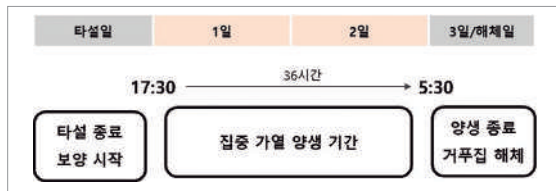
[그림 3.1] 국내 권역별 10년(2014~2024년)간 기온 데이터



3.2.2 양생기간 조건

초기 가열 양생은 [그림 3.2]와 같이 일반적인 동절기 현장 레미콘 타설 종료 시점을 고려하여 보양 개시 후 36시간으로 계획하였으며, 이는 기 개발기술, 사전 예비 실험 및 현장 공정 운영 등을 고려하여 선정하였다.

[그림 3.2] 양생조건



3.2.3 실험계획 및 배합 사항

실험계획 및 배합은 [표 3.2] 및 [표 3.3]과 같다.

[표 3.2] 실험계획

구분		수준	내용	비고
배합 사항	강도(MPa)	4	27, 30, 33, 36	
	분체 조합	Plain	1	OPC 90%, BS 10% + AD
		개발 배합	4	OPC(100%) + FAD ESC(A)(100%) + FAD ESC(B)(100%) + FAD ESC(C)(100%) + FAD
	목표슬럼프 및 공기량	1	180±25(mm), 4.5±1.5(%)	
	콘크리트 생산온도	1	13°C	
양생 조건	표준	1	20°C	온도일정조건 / 수중양생
	저온	초기36H	1	10°C
		36H이후 (26일)	1	-5.5 ~ 3°C
실험 사항	굳지않은 콘크리트	2	슬럼프, 공기량	
	경화 콘크리트	2	표준 : 36시간, 3, 7, 28, 42, 56일 저온 : 36시간, 3, 7, 28, 56일	
	온도측정	4	굳지않은 콘크리트 경화 콘크리트 양생함 내부(EPS 박스) 양생 챔버	

[표 3.3] 배합사항

규격 (MPa)	배합	W/B (%)	S/a (%)	배합사항(kg/m³)					
				W	B	OPC	BS	ESC	AD
27	Plain	47.4	53.5	185	390	351	39	-	3.51
	OPC + *	46.2	53.5	180	390	390	-	-	4.29
	ESC(A) + *	44.9	53.5	175	390	-	-	390	4.29
	ESC(B) + *	44.9	53.5	175	390	-	-	390	4.29
	ESC(C) + *	44.9	53.5	175	390	-	-	390	4.29
30	Plain	45.1	52.0	185	410	369	41	-	3.69
	OPC + *	43.9	52.0	180	410	410	-	-	4.51
	ESC(A) + *	42.7	52.0	175	410	-	-	410	4.51
	ESC(B) + *	42.7	52.0	175	410	-	-	410	4.51
	ESC(C) + *	42.7	52.0	175	410	-	-	410	4.51
33	Plain	43.0	51.0	185	430	387	43	-	3.87
	OPC + *	41.9	51.0	180	430	430	-	-	4.73
	ESC(A) + *	40.7	51.0	175	430	-	-	430	4.73
	ESC(B) + *	40.7	51.0	175	430	-	-	430	4.73
	ESC(C) + *	40.7	51.0	175	430	-	-	430	4.73
36	Plain	40.2	50.0	185	460	414	46	-	4.14
	OPC + *	39.1	50.0	180	460	460	-	-	5.06
	ESC(A) + *	38.0	50.0	175	460	-	-	460	5.06
	ESC(B) + *	38.0	50.0	175	460	-	-	460	5.06
	ESC(C) + *	38.0	50.0	175	460	-	-	460	5.06

* : FAD

3.2.4 실험 방법

[사진 3.1]과 같이 저온 환경 구현을 위해 재료 보관 및 초기 36시간 양생은 정온 기능의 컨테이너 챔버(8~10°C)에서 진행하였으며, 36시간 이후는 변온 설정이 가능한 양생 챔버에서 계획한 온도(-5.5~3°C)로 12시간 주기를 두고 최저, 최고 온도로 양생을 실시하였다.

공시체 양생의 경우 초기 36시간 동안은 공시체 수화열 보존을 위해 “KCI-CT 118”에 명시된 양생함(165L, EPS 박스)에 보관하였으며, 공시체 개수는 [표 3.4]에 따라 18개로 설정하였다.

[표 3.4] 양생함(EPS-box) 공시체 개수 설정

봉합 양생	용량	용도	공시체 개수
EPS 박스	165L	수직부재 해체용	3
		수평부재 해체용	3
		예비	3
		현장양생 공시체 평가용	9
합계			18개

이는 [그림 3.3]과 같이 지난 동절기 수도권 도심 현장에서 실측한 구조체 콘크리트 온도 및 양생막 공간온도, 165 L EPS 박스 내부 온도 분석 결과, 구조체 콘크리트 온도와 양생함(EPS

박스) 내부 온도가 유사한 경향을 보임에 따라, 본 연구에서는 EPS-box 양생 방법을 채택하였다.

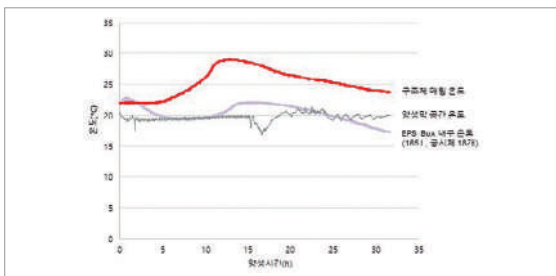
공시체 보관은 양생함(EPS 박스)에서 36시간 양생하고, 이후에는 현장의 양생막 해체 및 거푸집, 갱폼 인양 조건을 고려하여 기건 노출 상태로 양생하였다.

[사진 3.1] 콘크리트 실험 내부

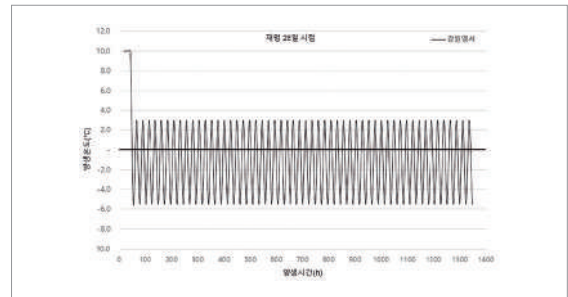


변온 챔버 내 양생온도 적용은 실무에서 갱폼 양생막 해체 후 외기 온도에 노출되는 조건을 고려하여 강원 영서권 10년 평균 기온을 적용하였으며, [그림 3.5]와 같이 변온조건으로 1일 사이클 기준 최저 -5.5℃ 12시간, 최고 3.0℃ 12시간을 적용하여 재령 56일까지 실시하였다.

[그림 3.3] 동절기 구조체 양생온도



[그림 3.4] 정온 챔버 온도이력 Data(12시간 주기)



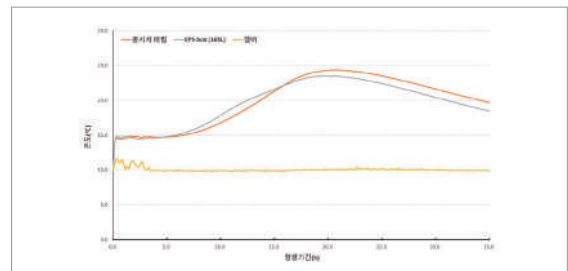
3.3 실험결과 및 분석

3.3.1 양생 온도 측정 결과

초기동해 억제 및 콘크리트 강도발현에 중요한 초기 36시간 동안 설정된 온도에 맞게 양생이 이루어지는 것을 확인하기 위해 열전대를 설치하여 온도데이터를 측정하였다.

데이터 측정 결과 초기 36시간 정온 조건에 맞게 양생이 이루어진 것을 확인하였으며, 공시체 온도, 양생함(EPS 박스) 내부 및 양생 챔버 온도 측정 결과는 [그림 3.5]와 같이 컨테이너 챔버 내부 온도는 10℃ 수준으로 측정되었으며, 양생함 내부 온도와 공시체 매립 온도는 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

[그림 3.5] 초기 36시간, 부위별 온도측정 결과



3.3.2 압축강도 시험 결과

저온 조건에서 양생한 콘크리트의 압축강도 측정(표준 및 저온 양생) 결과는 [그림 3.6]과 같으며, 배합 종류에 관계없이 표준 양생(20℃ 수중양생)이 저온 조건(36시간 10℃ 양생 후 26일간 -5.5 ~ 3℃ 양생)에서 양생을 실시한 콘크리트의 압축강도보다 낮게 나타났다.

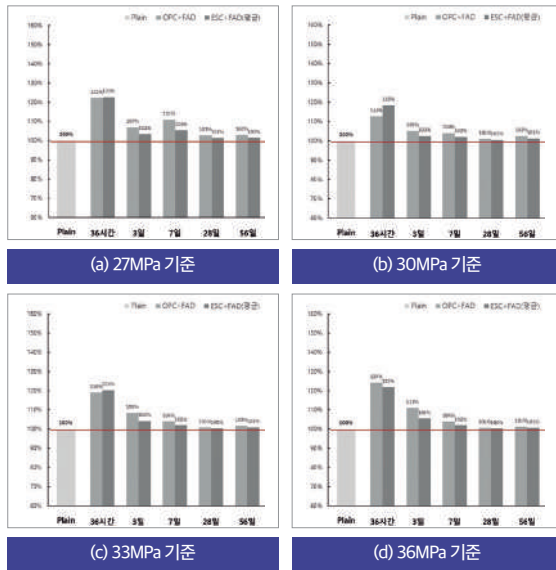
표준양생을 실시한 Plain 대비 저온 조건에서 양생한 개발기술의 경우 열악한 양생조건에도 불구하고 Plain 대비 재령 36시간에서는 약 15~25 %, 재령 28일에서는 약 5 % 가량 높은

강도발현율이 나타났다.

ESC를 사용한 배합의 경우 제조사에 관계없이 재령 36시간 및 28일 경과 시 표준 양생을 실시한 Plain 대비 높은 강도발현율이 나타났다.

한편, 동일한 저온조건에서 품질기준강도 30 MPa의 Plain 배합은 재령 28일에서 32.8 MPa를 발현하였으며, 개발기술의 경우 평균 압축강도는 39.6 MPa로 나타났다. 이는 ESC 및 FAD의 수화반응 촉진 영향으로 판단되며, 호칭강도 30 MPa에 기온보정을 반영한 36 MPa보다 약 10 % 높은 강도 발현율이 나타났다.

[그림 3.6] 콘크리트 압축강도 발현율(개발기술 평균)



데이터 신뢰성 검증을 위해 저온 조건에서 30 MPa 규격에 대해 공인기관(한국SGS)에서 콘크리트 압축강도를 측정된 결과는 [표 3.5]와 같으며, 이때, ESC 배합기술은 3개사(A~C) 압축강도 편차가 5 % 이내임을 고려하여 임의의 1개 사 제품으로 의뢰 시험을 진행하였다.

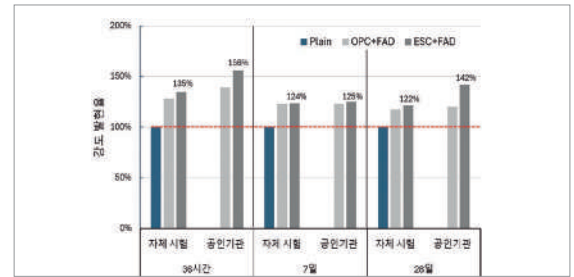
콘크리트 압축강도 시험에 따른 강도 발현율 확인 결과 재령 36시간, 7일, 28일 모두 Plain 대비 높은 강도 발현율이 나타났다. [그림 3.7]

[표 3.5] 콘크리트 압축강도 결과(공인기관 측정)

규격 (MPa)	배합	압축강도(MPa)									
		자체 시험					공인기관(한국 SGS)				
		36H	3일	7일	28일	56일	36H	3일	7일	28일	56일
30	Plain	17.3	19.1	24.6	32.8	35.1	14.6	15.5	21.5	29.5	34.0
	OPC+FAD	22.2	26.2	30.3	38.5	39.7	20.3	21.0	26.5	35.5	36.7
	ESC+FAD*	23.3	26.3	30.4	39.9	41.3	22.8	23.0	26.9	41.9	44.1

*: 자체 시험에서 ESC 배합은 3개 제조사 평균값

[그림 3.7] 콘크리트 압축강도 발현율(30 MPa 기준)

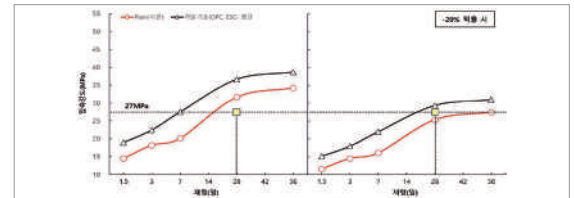


3.3.3 레미콘 생산에 따른 강도 편차 검토

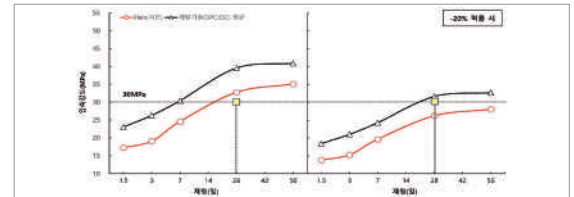
[그림 3.8]~[그림 3.11]은 실제 레미콘 생산 여건(외기 영향, 설비조건, 원재료 품질 및 레미콘 트럭잔수 영향 등)을 고려하여, 저온조건에서 실제 콘크리트 압축강도 대비 강도 편차 (-20 %)에 따른 결과를 나타냈다.

전반적으로 레미콘 생산 여건을 고려한 -20 % 강도 조정 시 Plain의 경우 강도 발현 지연으로 재령 28일에 목표 품질기준 강도를 만족하지 못하는 것으로 나타난 반면, 개발기술의 경우 보안을 통해 저온 환경에서도 구조체의 품질기준 강도를 만족할 수 있는 대안으로 판단된다.

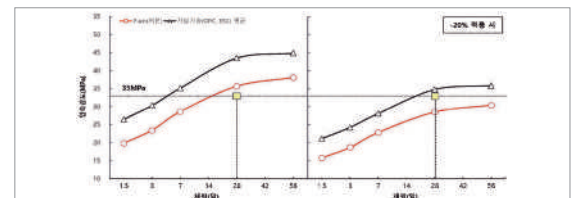
[그림 3.8] 콘크리트 압축강도(27 MPa)



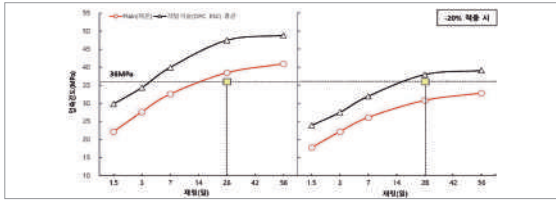
[그림 3.9] 콘크리트 압축강도(30 MPa)



[그림 3.10] 콘크리트 압축강도(33 MPa)



[그림 3.11] 콘크리트 압축강도(36 MPa)



3.4 소결

저온 환경에서 개발기술의 콘크리트 강도 발현성을 확인 및 검증하기 위하여 일련의 실험을 진행하였으며, 실제 현장 조건을 모사하여 저온 환경에서 콘크리트의 강도 발현성을 검토한 결과 개발기술 적용 시 콘크리트 초기동해 억제 및 수화 반응 촉진을 통해 목표 재령일에 안정적으로 콘크리트의 품질 기준강도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

04. 현장 적용성 검증

4.1 서언

개발기술의 재현성 검증과 현장 적용성 등을 평가하기 위해 모의 부재를 제작하여 Mock-up Test를 진행하였다.

부재의 연속성과 콘크리트 수화열 영향 등을 고려하여 부재 사이지를 선정하였으며 변온 양생 챔버를 이용하여 실험과 동일한 온도 사이클 조건으로 양생하였다.

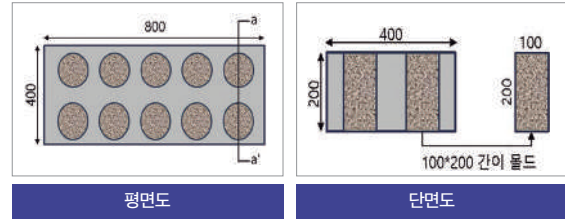
4.2 실험계획 및 방법

Mock-up Test 실험 계획은 [표 4.1], 부재 규격은 [그림 4.1]과 같다.

[표 4.1] Mock-up 계획

구분	구분		수준	내용
	강도(MPa)		4	30
배합 사항	분체조합	Plain	4	OPC 90%, BS 10% + AD
		개발 배합	3	OPC(100%) + FAD ESC(100%) + FAD
	목표 슬럼프 및 공기량		1	180±25(mm), 4.5±1.5(%)
	콘크리트 생산 온도		1	13℃
양생 조건	초기 36시간		1	10℃ 기건 양생
	36시간 이후		1	-5.5 ~ 3℃ 기건 양생
실험 사항	굳지않은 콘크리트		3	슬럼프, 공기량, 염화물
	압축 강도		4	36시간, 3일, 7일, 28일
	온도측정		3	굳지 않은 콘크리트 경화 콘크리트 양생 챔버

[그림 4.1] Mock-up 부재 규격(단위 : mm)



[사진 4.1] Mock-up 전경



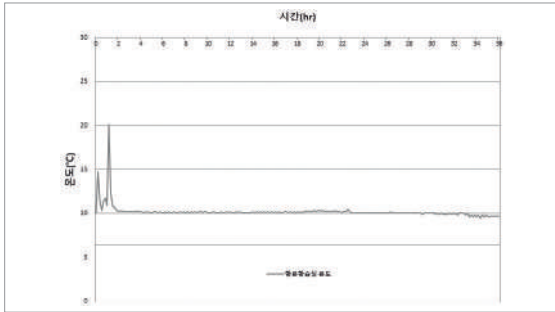
4.3 실험 결과 및 분석

4.3.1 양생온도 측정 결과

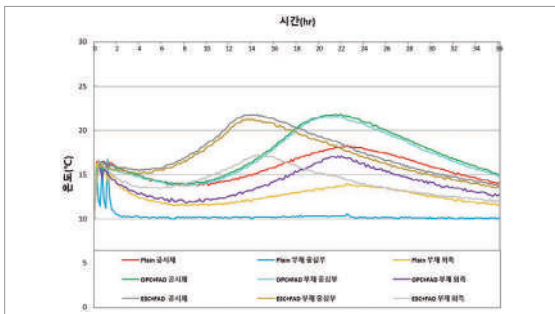
모의 부재 Mock-up에 따른 콘크리트 및 양생 챔버 내 온도 측정 결과는 [그림 4.2]와 같다.

초기 36시간(10℃, 온도 일정 조건)과 이후 계획 재령(-5.5 ~ 3℃, 온도 변화 조건) 기간 동안 양생 온도가 변화하고 있는지 확인하기 위하여 양생 챔버 내 열전대를 설치하여 온도 데이터를 측정하였으며, 이에 따른 콘크리트 수화열 발현 성상을 알아보기 위해 Mock-up 부재에도 열전대를 매립하여 수화열 데이터를 측정하였다. [그림 4.3] 데이터 측정 결과 초기 36시간은 정온 조건, 재령 28일은 변온 조건에 맞게 양생이 이루어진 것을 확인하였다.

[그림 4.2] 챔버 양생 온도 측정 결과



[그림 4.3] 공시체 및 부재 온도 측정 결과



4.3.2 압축강도 시험 결과

동절기 기후 조건 중 가장 불리한 강원 영서(-5.5 ~ 3 °C) 조건으로 양생을 실시한 콘크리트의 압축강도 측정 결과를 [표 4.2]에 나타냈다.

특히, 재령 36시간에서 Plain 배합은 13.5 MPa, 개발기술은 20.4 MPa로 나타났는데, 개발기술의 경우 “KCS 14 20 00 콘크리트공사 표준시방서”에 명시된 수평 거푸집해체가 가능한 최소 강도 14 MPa 대비 40% 이상 높은 압축강도 발현율을 나타내었다.

[표 4.2] 콘크리트 압축강도

구분	압축강도(MPa)			
	36시간	3일	7일	28일
Plain	13.5	17.1	21.3	31.4
OPC+FAD	20.4	22.6	25.1	37.0
ESC+FAD	20.4	22.8	26.8	38.5

4.4 소 결

개발 기술의 재현성 검증과 현장 적용성 등을 평가하기 위해 모의 부재를 제작하여 Mock-up Test를 진행하였으며, Test

결과 기존 일반 배합 대비 목표 재령일에 안정적으로 콘크리트 품질기준강도 확보가 가능할 것으로 판단된다.

05. 콘크리트 품질기준강도 확보를 위한 기준 제시

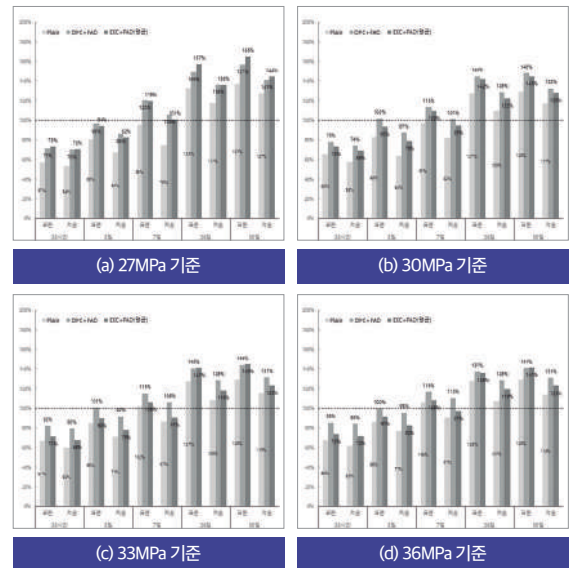
5.1 서 언

본 장에서는 앞선 실험 결과를 토대로 콘크리트 품질기준강도를 확보할 수 있는 재령별 최소강도 발현율 및 배합 조건을 산출하고 이를 종합하여 저온 환경에서 콘크리트 품질기준강도 확보를 위한 배합설계기준을 제시하고자 하였다.

5.2 재령별 콘크리트 강도발현율 기준

[그림 5.1]은 표준 및 저온 양생 조건에서 Plain 및 개발기술(OPC+FAD, ESC+FAD)의 품질기준강도 대비 압축강도 발현율로서, 전반적으로 Plain 대비 개발기술 적용 시 저온 조건에서 우수한 강도 발현율을 나타냈다.

[그림 5.1] 콘크리트 압축강도 발현율(개발기술 평균)



[표 5.1]은 도출된 압축강도 값을 바탕으로 저온 조건에서 재령 28일 품질기준강도의 상호관계를 바탕으로 회귀분석을 실시하였고, 품질기준강도를 안정적으로 확보할 수 있는 재령별 강도 발현율 기준을 도출하였다.

이때 발현율 기준 설정은 안전율을 고려하여 27~36 MPa 구역에서 최고 발현율 값으로 설정하였다.

즉, 최초 승인배합 시 표준양생 조건에서는 재령 28일 품질기준강도 대비 110% 이상 발현율 기준으로 36시간은 41% 이상, 3일에서 60% 이상, 7일에서 78% 이상 발현율을 나타낼 경우, 저온 환경에서도 안정적으로 콘크리트 품질기준강도를 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

[표 5.1] 품질기준강도 확보를 위한 최소 강도발현율 기준 도출 (사전 승인배합조건 : 표준양생)

구분		산출식	재령 28일 품질기준 강도(MPa)				발현율 목표
			27	30	33	36	
재령 28일 압축강도 및 발현율 기준산정		$y(\text{표준}) = 1.206x(\text{저온}) - 2.902$	29.6 (110%)	33.3 (111%)	36.9 (112%)	40.5 (112%)	110%
재령 28일 품질기준강도 110%에 만족하는 재령별 최소 압축강도 발현율 기준산정	36H	$y(28\text{일}) = 1.02x(36\text{시간}) + 22.11$	8.0 (30%)	11.3 (38%)	14.6 (44%)	17.9 (50%)	41%
	3일	$y(28\text{일}) = 1.026x(3\text{일}) + 15.71$	14.2 (52%)	17.4 (58%)	20.7 (63%)	24.0 (67%)	60%
	7일	$y(28\text{일}) = 0.943x(7\text{일}) + 12.22$	19.1 (71%)	22.7 (76%)	26.2 (80%)	29.8 (83%)	78%

[표 5.2] 품질기준강도 확보를 위한 최소 강도발현율 기준 도출 (사전 승인배합조건 : 저온양생)

구분		산출식	재령 28일 품질기준 강도(MPa)				발현율 목표
			27	30	33	36	
재령 28일 품질기준강도에 만족하는 재령별 최소 압축강도 발현율 기준산정	36H	$y(28\text{일}) = 0.988x(36\text{시간}) + 17.51$	9.6 (36%)	12.6 (42%)	15.7 (47%)	18.7 (42%)	44%
	3일	$y(28\text{일}) = 0.898x(36\text{시간}) + 16.33$	11.9 (44%)	15.2 (51%)	18.6 (56%)	21.9 (61%)	53%
	7일	$y(28\text{일}) = 0.864x(36\text{시간}) + 13.09$	16.1 (60%)	19.6 (65%)	23.1 (70%)	26.5 (74%)	67%

5.3 적산온도 분석

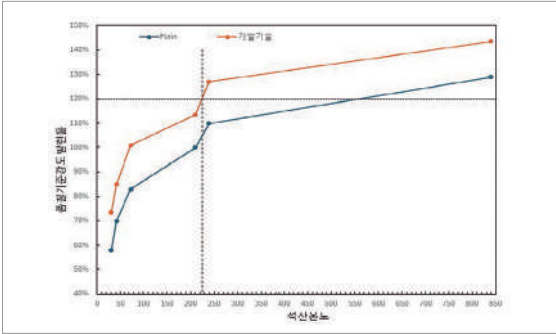
[표 5.3]은 동절기 저온 환경에서 타설 후 가열양생 36시간 동안 양생막 내부 온도 10℃, 이후 26일간 강원 영서 지방의 12~2월 3개월간 10년 일평균 기온인 -2.1℃를 적용한 결과, 36시간 적산온도는 30.0 °D·D, 재령 28일 적산온도는 239.4 °D·D로 산출되었다.

[표 5.3] 저온양생 시 구역 및 배합별 적산온도에 따른 압축강도 결과

타설 후 36시간동안 양생막 온도(℃)	36시간 이후 목표 재령까지 일평균 기온(℃)	적산온도 (°D·D)				
		36H	3일	7일	28일	56일
10	-2.1	30.0	41.9	73.5	239.4	460.6

[그림 5.2]는 적산온도에 따른 Plain 및 개발기술 (OPC+FAD, ESC+FAD) 평균을 품질기준강도 발현율로 나타낸 것이다. 즉, Plain보다 개발 기술의 품질기준강도 발현율이 높게 나타났으며, 개발 기술의 레미콘 생산 편차를 고려한 품질기준 강도 대비 120% 기준으로 적산온도를 도출한 결과 225 °D·D에서 만족하는 것으로 도출되었다.

[그림 5.2] 콘크리트 압축강도 발현율(개발기술 평균)



5.4 콘크리트 배합 기준

본 실험에서 도출된 압축강도 측정결과를 바탕으로 표준 및 저온 조건에서의 물결합재비 및 단위결합재량 상호관계에 따른 회귀분석에 의한 추정식을 도출하였으며, 아래 추정식을 바탕으로 저온 조건에서 재령 28일에서의 품질기준강도 확보가 가능한 배합 기준(물결합재비 및 단위결합재량)을 [표 5.4]에 제시하였다.

[표 5.4] 저온 환경에서 품질기준강도 충족을 위한 배합기준 도출

재령 28일 목표 품질기준 강도(MPa)	물결합재비(%) 도출		단위결합재량(kg/m³) 도출	
	회귀식	산출값	회귀식	산출값
27	$y = -109.54x + 78.785$	47.3	$y = 0.1257x - 20.51$	378.0
30		44.5		401.8
33		41.8		425.7
36		39.1		449.6

5.5 소결

본 장에서는 개발기술의 현장 운용 및 실효성 검증을 위해, 도출된 압축강도 결과를 활용하여 콘크리트 강도 발현 범위 및 배합기준을 제시하였으며, 그 결과 콘크리트 품질기준강도 확보를 위한 최소 강도 발현율 및 배합기준을 적용할 경우 동절기 저온 환경에서도 안정적으로 콘크리트 품질 확보가 가능할 것으로 판단된다.

저온환경시 기온보정강도 미적용을 위해서는 다음과 같은 양생온도 관리와 강도발현율 및 배합에 준하여 관리가 필요하다.

양생온도	초기 36시간 10℃ 이상 양생	
강도발현율 (승인배합 기준)	재령 36시간 41 %, 재령 7일 78 % 이상 발현 (품질기준강도 대비)	
강도발현율 (현장운영 기준)	재령 36시간 44 %, 재령 7일 67 % 이상 발현 (품질기준강도 대비)	
물결합재비	27MPa : 47.3 % 이하	30MPa : 44.5 % 이하
	33MPa : 41.8 % 이하	36MPa : 39.1 % 이하
단위 결합재량	27MPa : 378 kg/m ³ 이상	30MPa : 401 kg/m ³ 이상
	33MPa : 425 kg/m ³ 이상	36MPa : 449 kg/m ³ 이상

06. 결론

본 연구에서는 조강형 재료(조강형시멘트, 기능성 혼화제) 복합 사용, 배합 및 온도 관리를 통해 저온 환경에서 콘크리트 품질기준강도를 확보하기 위한 일련의 검증 연구를 진행하였다.

그 결과, 본 연구에서 사용한 조강형 재료 및 배합설계 기준 적용과 적절한 시공 관리가 이루어진다면, 저온 환경에서도 콘크리트 품질기준 강도를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

이는 KCS 14 20 40 한중콘크리트 2.2.2 (6)항에 명시된 “새로운 기술을 적용하여 목표 강도를 확보할 수 있음이 신뢰할 수 있는 실험으로 입증된 경우”에 부합하며, 이를 바탕으로 기온보정강도를 미적용하여도 구조체 품질 성능에 이상이 없을 것으로 판단된다.

(단, 현장 적용 시 사전 승인배합 실험을 통해 본 연구에서 제시한 기준에 따라 콘크리트의 강도 발현성능 확인 필요)



전기차 화재예방 기술동향 및 당사 설계 표준 가이드라인

글 이완희 / 쌍용건설 건축기술팀 과장
전화 02-3433-7760 E-mail lwh6293@ssyenc.com



01. 시작하며

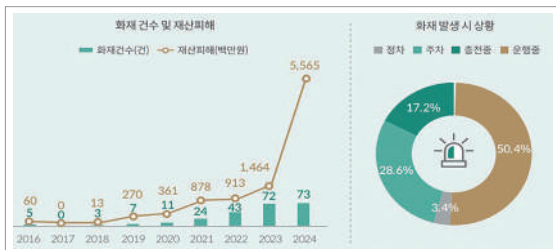
최근 전기차 시장은 일반 자동차 대비 높은 효율성과 정부의 보조금 지원 정책에 힘입어 대중화 단계에 진입하였다. 실제 전기자동차 등록 대수는 2010년 66대에 불과했으나, 2025년 5월 기준 75만 대를 돌파하며 가파른 성장세를 보이고 있다. 이에 발맞추어 정부는 2026년까지 약 5,500억 원의 예산을 투입하여 7만여 대의 충전기를 추가 보급하는 등 인프라 확충에 박차를 가하고 있다.

[그림 1] 전기차 등록 및 충전시설 설치 추이



이러한 양적 성장 이면에는 새로운 유형의 안전 리스크가 공존하고 있다. 전기차 화재는 발생 시 1,000도 이상의 열폭주 현상을 동반하여 진입이 매우 어렵고, 특히 충전 시설의 약 70% 이상이 지하주차장에 집중되어 있어 화재 시 대형 재난으로 이어질 가능성이 높다. 소방청 통계에 따르면 전기차 화재는 통계 집계 이후 총 238건이 발생하였으며, 이중 절반에 가까운 49.2%가 정차·주차·충전 중에 발생하여 일상적인 주거 공간에서의 안전 대책 마련이 시급함을 보여준다.

[그림 2] 전기자동차 화재 통계



최근 발생한 인천 청라 아파트 사례에서 보듯, 지하주차장 화재는 단순히 차량 소실을 넘어 단지 전체의 전기·통신·수도 배관을 소손시켜 정전 및 단수에 따른 주거 기능의 전면 마비를 초래한다. 또한 유독가스의 수직 확산으로 인한 인명 피해와 고열에 의한 상부 슬래브 등 건축 구조물 안전성 저하는 입주민들에게 실질적인 생존권 및 자산 가치 하락의 공포인 '전기차 포비아'를 확산시키고 있다.

따라서 이제는 법적 최소 기준을 충족하는 수동적 설계를 넘어, 화재 징후를 초기에 포착하고 확산을 물리적으로 차단하는 능동적 방재 시스템 구축이 건설사의 핵심 역량으로 부상하고 있다. 본고에서는 프로젝트별 특성에 맞춰 반드시 확보해야 할 최소한의 필수 방재 항목과 선택적 적용 기준을 정리하여 공유하고자 한다.

02. 전기차 화재 특성과 설계 주안점

전기차 화재는 일반 내연기관 차량과 달리 고전압 배터리 팩 내부에서 발생하는 연쇄 열폭주(Thermal Runaway) 현상을 수반한다는 점에서 근본적인 차이가 있다. 이는 배터리 셀 내부의 단락 등으로 인해 온도가 급격히 상승하며 인접 셀로 에너지가 연쇄적으로 전이되는 현상으로, 일단 시작되면 자체적으로 산소를 발생시키며 연소하기 때문에 산소 차단을 목적으로 하는 일반적인 소화 약제로는 냉각이 극히 어렵다. 특히 배터리 팩이 견고한 금속 케이스로 보호되어 있어 소화수가 발화 지점에 직접 도달하기 어렵다는 점은 냉각 소화를 지연시키는 핵심 요인이 된다.

또한 배터리 내부의 가연성 가스가 고압으로 압축되어 특정 방향으로 분출되는 지향성 화염(Jet Flame)은 인접 차량으로의 화재 전이를 가속화할 뿐만 아니라, 1,000도 이상의 고열

을 장시간 유지하여 지하주차장 상부 슬래브 등 건축 구조물에 심각한 영향을 미친다. 이러한 고열은 콘크리트 피복재를 탈락시키고 철근의 강도를 저하시키는 등 건축물의 구조적 안전성 및 내구성을 위협하는 중대한 리스크를 내포하고 있다.

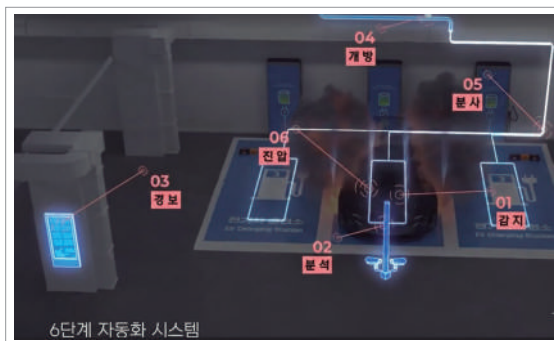
진압 과정에서의 환경적, 인적 위험성 역시 간과할 수 없는 대목이다. 배터리 전해질과 물이 반응하여 발생하는 불산(HF) 등 치명적인 유해가스는 대량으로 분출되어 소방대원의 진입을 방해하고 입주민의 피난 골든타임을 단축시킨다. 아울러 배터리 팩 심부까지 냉각시키기 위해 막대한 양의 소화수가 투입되어야 한다는 점은 기존 소방 설계의 용량적 한계를 여실히 보여준다. 진압 후 발생하는 중금속 함유 오염수의 처리 문제 역시 지하층 배수 설계에서 반드시 해결해야 할 중대한 환경적 과제로 부상하고 있다.

따라서 이제는 단순한 법적 설치 기준 준수의 단계를 넘어, 화재 징후를 실시간으로 포착하는 감지 시스템 고도화와 화염 확산을 차단하는 물리적 방어 체계, 그리고 배터리를 직접 냉각시키는 적극적인 수냉식 진압 체계를 유기적으로 결합한 통합 방재 엔지니어링 적용이 필수적인 시점이다.

03. 전기차 화재예방 기술 동향

전기차 화재의 치명성이 확인됨에 따라, 최근 기술 트렌드는 단순히 불을 끄는 '소화'의 개념을 넘어 화재의 징후를 초기에 포착하고 확산을 물리적으로 저지하는 '능동적 예방 체계'로 빠르게 진화하고 있다. 특히 국내외의 주요 기업들이 선보이는 기술은 다음의 네 가지 핵심축을 중심으로 고도화되고 있다.

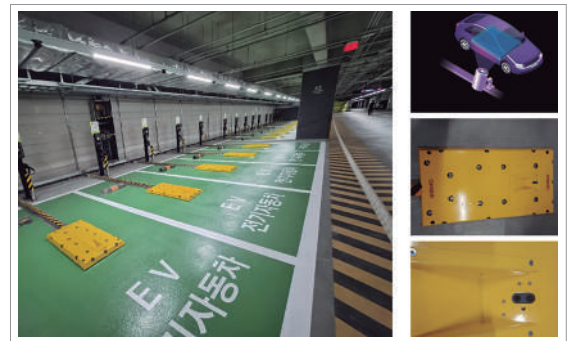
[그림 3] 육송 6단계 화재예방 자동화 시스템



첫째, AI 기반의 지능형 화재 감지 및 자동 진압 시스템의 도입

에 있다. 과거의 감지기가 연기나 열에 의존했다면, 최근에는 '육송'의 사례처럼 AI 복합 영상 감지 기술을 활용하고 있다. 이는 불꽃의 파장과 연기의 패턴을 실시간으로 분석하여 오작동을 최소화하며, 화재 발생 시 배터리 팩이 위치한 차량 하부로 소화수를 집중 살수하는 상향식 직분사 시스템과 연동된다. 이러한 무인 자동 진압 체계는 소방대원 진입 전 '골든타임' 내에 열폭주를 억제하는 핵심 솔루션으로 자리 잡고 있다.

[그림 4] 시티아이랩 전기차 화재 감지 솔루션



둘째, 배터리 상태 정보를 활용한 전조 징후 포착 기술에 있다. 화재 발생 전 단계에서 이상 신호를 감지하려는 시도가 활발하게 전개되고 있다. '시티아이랩' 등에서 선보인 솔루션은 열화상 센서와 AI 분석을 결합하여 배터리 온도의 미세한 이상 상승이나 전해질 누출로 인한 미세 먼지 농도 변화를 감지한다. 이는 '전기차 배터리 관리 시스템(BMS)'의 데이터를 외부 충전 인프라와 실시간 공유함으로써, 위험 징후 포착 즉시 전력을 차단하고 관리자에게 경보를 발령하는 선제적 방어막을 형성하고 있다.

셋째, PLC(전력선 통신) 기반의 '화재 예방형 스마트 충전기' 보급에 있다. 정부는 2026년까지 스마트 제어 충전기 보급에 정책적 역량을 집중하고 있다. 기존 충전기가 단순 전력 공급에 그쳤다면, 최신 스마트 완속충전기는 차량과의 PLC 통신을 통해 배터리의 충전 상태(SoC)를 실시간 모니터링한다. 과충전 위험이 감지되거나 배터리 셀의 전압 불균형 등 이상이 확인되면 충전기가 스스로 판단하여 전류를 차단함으로써, 화재의 주요 원인인 충전 중 사고를 원천 봉쇄하고 있다.

04. 주요 건설사 전기차 화재예방 기술 동향

국내 주요 건설사들은 전기차 화재를 단순한 사고를 넘어 사

회적 재난으로 인식하고, 각 사의 엔지니어링 역량을 집결한 특화 솔루션을 적용하고 있다.

첫째, 공간 효율과 안전을 결합한 통합 충전 인프라 설계에 있다. 건설 단계에서의 구조적 혁신도 가속화되고 있다. '㈜한화 건설부문'이 선보인 천장형 충전 시스템(EV Air Station)은 충전 커넥터를 상단에 배치하여 주차 공간의 제약을 해소함과 동시에, 천장에 설치된 각종 센서(가스, 열, 영상)가 차량 전체를 부감(High-angle)하여 사각지대 없는 감시망을 제공한다. 이는 물리적 충격에 취약한 스탠드형 충전기의 단점을 보완하고, 화재 시 연기 배출 및 소화 설비 가동 효율을 극대화하는 설계 트렌드를 반영하고 있다.

결국 미래의 공동주택 소방 설계는 이러한 개별 기술들을 하나의 플랫폼으로 묶어, 감지-보고-차단-진압이 유기적으로 작동하는 '통합 안전 거버넌스'를 구축하는 방향으로 나아가고 있다.

[그림 5] 한화 천장형 충전시스템 및 화재안전 감시망 시스템



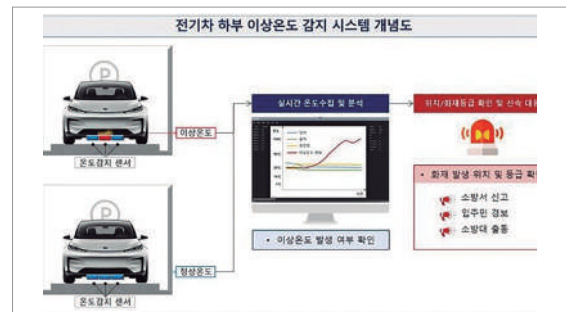
둘째, DL이앤씨의 '직접 관통 진압 시스템' 상용화에 있다. DL이앤씨는 부산소방재난본부 및 특수장비 업체와 긴밀히 협업하여 건축물 내부 주차장에서 화재를 직접 진압할 수 있는 고도화된 시스템을 구축하였다. 이 기술의 핵심은 화재 차량 하부의 배터리 팩을 물리적으로 관통하는 '드릴 관창' 기술에 있다. 화재 감지 시 시스템이 위치를 추적하여 차량 하부 배터리 케이스를 순식간에 천공한 뒤 냉각수를 직접 주수한다. 이를 통해 기존 소방 전술로는 수 시간이 소요되던 진압 시간을 10분 내외로 획기적으로 단축시켜, 지하층 건축물의 구조적 안전성을 확보하는 데 기여하고 있다.

[그림 6] DL이앤씨 전기차 화재진압 시스템개발



셋째, GS건설의 '하부 특화 온도 감지 및 조기 경보 시스템'에 있다. GS건설은 광학기기 전문 기업인 LK삼양과 협력하여 배터리 하부의 미세한 변화를 읽어내는 '전기차 하부 온도 감지 시스템'을 고도화하고 있다. 주차장 바닥면에 매립되거나 하부를 지향하는 특수 센서를 활용하여, 화염이 외부로 분출되기 전 단계인 배터리 셀의 이상 과열 현상을 정밀하게 측정한다. 이는 열폭주의 전조 현상을 데이터로 조기에 포착함으로써 질식소화포 덮기 등 초동 조치를 골든타임 내에 수행할 수 있도록 돕는다. 이러한 데이터 기반의 대응 체계는 대형 화재로의 확산을 미연에 방지하는 핵심적인 안전 고리 역할을 수행하고 있다.

[그림 7] GS건설 하부 특화 온도 감지 및 조기 경보 시스템



05. 당사 전기차 주차구역 설계표준 가이드 라인 검토

5-1. 당사는 부산광역시 소방재난본부의 '공동주택 전기차 소방안전 가이드'를 참조하여, 당사 실무에 적용할 설계 가이드 라인을 검토 중이다. 본 가이드는 공간 계획부터 진압, 사후 처리까지 아우르는 통합 방재 시스템 구축을 목표로 검토를 진행하고 있다.

[표 1] 전기차 주차구역 화재대응 통합 설계 표준안

항목	구분	상세 설계 지침 및 내용	비고
1	건축	방화구획 및 제연경계벽 설치 - 내화구조 또는 불연재료로 된 600mm이상의 제연경계벽을 설치하여 연기 확산을 방지함.	기본
2	설비	스프링클러헤드 살수밀도 상향 - 수원: 바닥면적 1㎡당 18.4 L/min 이상, 30분 이상 방수 확보. - 헤드: K-factor 115 이상 적용 또는 분당 18.4L 이상 살수 가능 헤드 배치.	기본
3	설비	소화 질식포 설치 - 초기 소화 및 연소확대 방지를 위해 전용주차구역 인근 식별 용이한 위치에 '전기차 소화질식포' 표지와 보관함 비치.	기본
4	전기	전용 CCTV(열화상, 불꽃감지 등) 설치 - 열 또는 영상 등을 지능적으로 인식하여 화재 발생 시 즉시 경보를 발할 수 있는 장비 설치.	기본
5	건축	주차구역 위치 선정 및 이격 배치 - 외기 개방 지상 설치 우선, 지하 설치 시 최상층 램프 인근 집중 배치 및 창고·폐기를 보관소와 이격. - 직통계단과 이격하되 불가피할 경우 출입문과 직접 면하지 않도록 배치.	선택
6	건축/설비	연기배출설비 설치 - 화재감지기 연동형 배출설비 구축. - DA 인근 설치로 골목효과에 의한 자연배출 유도 또는 강제 배출용 팬 설치.	선택
7	건축/설비	물막이판 및 급수설비 설치 - 구획별 600mm 이상 물막이판 (수동/자동) 설치. - 배터리 냉각을 위해 구획 또는 방화구획 전체에 조립식 소화수조 충수 가능 구조 반영.	선택
8	설비	전용 방수기구함 및 방수구 설치 - 전기차 전용주차구역 전용의 연결 송수관설비 방수구와 방수기구함을 추가 설치하여 신속한 초동 진압 지원.	선택
9	건축/설비	오염수(폐수) 배출설비 설치 - 소화 오염수 처리를 위한 전용 집수정 설치 또는 차수관 내부 오염수를 전문 폐기물 업체에 직접 처리 가능한 시스템 구축.	선택

5-2. 당사는 프로젝트의 입지 조건, 인허가 강도, 그리고 건축물의 상징성을 고려하여 위 9개 방재 항목을 체계적으로 적용하기 위한 등급별 분류 방안을 검토 중이다.

[표 2] 화재대응 등급별 적용 기준

구분	적용	비고
A 등급	8~9개	부산 지역 현장 및 소방성능위주설계 적용 현장
B 등급	5~7개	인허가권자(소방서) 요청 지역 및 강화 설계 필요 현장
C 등급	4개(기본)	당사 표준 설계 적용 일반 현장 및 부산 외 기타 지역

06. 마무리: 기술 트렌드 수용 및 당사 설계의 실무적 고도화

전기차 화재 대응 기술은 현재 급격한 변곡점에 있으며, AI 감지부터 물리적 진압 설비에 이르기까지 그 범위가 빠르게 확장되고 있다. 본고를 통해 확인한 타사의 선제적 기술 도입 사례와 지자체의 강화된 가이드라인은 향후 당사 소방 설계가 나아가야 할 명확한 이정표를 제시하고 있다.

당사는 이번에 검토 중인 가이드라인 기점으로, 다음과 같은 방향성을 가지고 설계 역량을 강화하는 데 집중할 방침이다.

첫째, 최신 기술 동향의 유연한 수용에 있다. '육송'의 AI 진압 시스템이나 '시티아이랩'의 전조 감지 솔루션 등 업계에서 검증되고 있는 최신 트렌드를 지속적으로 모니터링하고 있다. 이를 당사 현장 여건에 최적화된 형태로 설계에 반영할 수 있도록 기술적 검토를 병행할 계획이다.

둘째, 실무 중심의 방재 솔루션 고도화에 있다. 부산시 소방안전 가이드를 기반으로 검토 중인 가이드라인으로 현장 적용 타당성을 우선 검토하되, 시공 과정의 피드백과 타 건설사의 우수 사례를 지속적으로 벤치마킹하고 있다. 이를 통해 더욱 정교하고 실효성 있는 당사만의 설계 지침을 정립해 나가는 데 주력하고 있다.

셋째, 선제적 대응을 통한 리스크 관리에 있다. 강화되는 소방 법규와 지자체별 심의 기준을 선제적으로 파악하여 설계에 반영함으로써 인허가 리스크를 최소화하고 있다. 이는 입주민이 실질적으로 체감할 수 있는 주거 안전성을 확보하는 데 그 목적이 있다.

안전 설계는 완성된 결과물이 아니라 기술 발전에 발맞추어 끊임없이 진화해야 하는 과정에 있다. 소방설계 담당자로서 대외적인 기술 변화에 귀를 기울이고, 당사의 설계가 최신 트렌드에서 뒤처지지 않도록 지속적인 연구와 제도 개선 노력을 경주할 계획이다.

※ 참고문헌

1. 부산광역시 소방안전가이드로 2022.05
2. 국회예산정책처 전기자동차 화재 대응을 위한입법 동향 및 향후과제 보도자료 2025.11
3. 쌍용 더 플레티넘 통합 설계 가이드 2026.01

건축물 인증제도 종류 및 상호 연관성 분석



글 박철웅 / 건축기술팀 차장
전화 02-3433-7731 E-mail cypark@ssyenc.com

01 서론

건축물의 에너지 절약설계에 대한 요구는 1970년대 후반 오일쇼크로 알려진 전세계적인 에너지 위기로 인해 에너지 절약의 중요성이 부각되었으며, 국내에서도 에너지 효율 정책을 도입하게 되었다. 법적 기반은 1977년 건축물의 에너지 절약을 위한 의무적인 건축 법규를 제정하면서 마련되었으며, 2001년 시방기준의 한계를 넘어 성능기준인 「건축물 에너지효율등급 인증제도」(현재 「제로에너지 건축물 인증제도」와 통합)가 시행되었고, 2008년 시방기준은 「건축물의 에너지절약설계기준」으로 별도 독립적으로 제정되었으며, 사업계획승인을 받는 30세대 이상 공동주택을 대상으로 하는 「에너지 절약형 친환경 주택의 건설기준」이 2009년 분리 제정되어 현재에 이르고 있다.

이러한 에너지 관점 뿐 아니라 건축물의 친환경 성능에 대한 요구는 1992년 브라질 리우데자네이루 지구 정상회의에서 채택된 선언(리우 선언 : 환경 보호와 경제 개발을 조화시키는 지속가능한 개발)이 기폭제가 되었으며, 영국의 BREEAM 인증, 미국의 LEED 인증 등 세계 각국에서는 자국의 기후조건 및 역사적, 사회적, 경제적 조건 등에 따른 친환경 건축물 인증제도를 개발하게 되었으며, 국내에서도 2002년 「친환경 건축물 인증제도」(현재 「녹색건축 인증제도」로 변경)를 개발하게 되었다.

이 후 공동주택의 성능을 평가해서 입주자의 알 권리를 충족시키자는 취지에서 2006년 주택성능등급 표시제도(현재 공동주택성능등급을 표시하는 것으로 녹색건축 인증제도와 통합 운영)가 제정되었고, 최근 탄소중립건축 인증 및 로봇 친화형 건축물 인증 등까지 등장하였다.

이처럼 다양한 건축물의 에너지 및 친환경 성능 등을 평가하는 기준 및 인증제도는 정부의 온실가스 감축 목표에 따른 로드맵과 연계하여 단계적으로 의무화되고 있는 상황에서 그 종류는 어떻게 되고, 각 기준 및 인증제도는 어떤 특징이 있고, 각 기준 및 인증제도 간 상관관계는 어떻게 되는지에 대해서 종합적으로 다룬 연구는 없어 본 고에서는 기준 및 인증제도에 대한 간략한 소개, 각 기준 및 인증제도 간 상관관계 분석 등을 실시하여 각 기준 및 인증제도에 대한 이해 향상 뿐 아니라 나아가 각 기준 및 제도의 합리적 운영에 대하여 의견을 제시하고자 한다.

02 건축물 인증제도의 종류

2.1 건축물의 에너지절약설계기준 (에너지)

「건축물의 설비기준 등에 관한 규칙」(1992.06.01.)이 제정되면서 건축설비의 설치에 관한 기술적 기준과 건축물의 열손실 방지 및 에너지의 합리적 이용 등에 관한 사항을 통합적으로 정비되었고, 본 제도는 2008년 1월 11일, 건축법 제59조 및 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제21조, 제22조의 규정에 의한 건

축물의 효율적인 에너지 관리를 위한 에너지절약설계기준, 에너지절약계획서 작성기준 및 단열재의 두께 기준을 정하기 위해 제정되었다.

본 제도는 연면적 합계 500㎡ 이상인 건축물을 대상으로 하며, 총직, 에너지절약 설계에 관한 기준(건축 부문, 기계설비부문, 전기설비부문, 신재생에너지설비부문 각각에 대한 의무사항과 권장사항), 에너지절약계획서 및 설계 검토서 작성기준, 건축기준의 완화 적용, 건축물 에너지 소비 총량제 등으로 구성되어 있으며, 지역별 건축물 부위의 열관류율, 창 및 문의 단열성능, 외피 열교부위별 선형 열관류율 기준 등을 구체적으로 규정하고 있고, 에너지절약계획 설계 검토서는 의무사항과 권장사항에 해당하는 에너지성능지표로 구성되어 있는데, 의무사항은 전 항목 채택시 적합한 것으로 보고, 에너지성능지표는 평점 합계 65점 이상일 경우 적합한 것으로 평가하는데, 다만, 공공기관이 신축하는 건축물은 74점 이상일 경우 적합한 것으로 평가한다.

2.2 에너지 절약형 친환경 주택의 건설기준 (친주)

본 제도는 사업계획승인을 받아야 하는 공동주택만을 대상으로 건축물의 에너지절약설계기준을 벤치마킹하여 별도로 제정되었다(2009.10.20). 초기에는 최상층, 최하층 및 층간바닥에 대한 요구조건이 없어 기존 법규를 따르는 이중적인 형태로 운영되다가 2018년 12월 26일 개정을 통하여 건축물의 에너지절약설계기준과의 정합성을 맞추면서 현재에 이르고 있다.

평가방법은 ECO2-OD 프로그램을 이용하여 단지 내의 단위면적당 1차에너지소요량을 100kWh/(㎡.yr) 미만으로 설계하거나 또는 창의 단열, 벽체 등 단열, 열원설비, 고단열 고기밀 강재문, 조명밀도, 신재생에너지설비 설치 등과 의무사항을 모두 이행할 경우 적합한 것으로 평가한다.

2.3 제로에너지 건축물 인증 (제로)

본 제도는 기후변화협약에 따른 건축물에서의 에너지 사용량을 최대한 절감하기 위해 2017년 1월 20일 시행하게 되었다. 2-1절에서 소개한 “건축물의 에너지절약설계기준”의 고도화된 성능기준이라고 할 수 있으며, 성능평가를 위한 프로그램(ECO2)을 이용하여 건축물의 단열설계 수준에 따른 에너지 요구량이 계산되며, 이를 바탕으로 적정 실내환경조건을 지속적으로 유지하기 위한 냉난방 및 급탕 기계설비, 환기 설비, 조명밀도 및 신재생에너지 설비 등의 에너지 소요량이 계산되고, 이를 1차에너지소요량으로 환산한 평가결과가 90kWh/(㎡.ya) 이하(주거용), 130kWh/(㎡.ya) 이하(비주거용) 또는 에너지 자립률 20% 이상을 만족시켜야 한다.

2.4 녹색건축 인증 (녹색)

본 제도는 설계와 시공, 유지관리 등 전과정에 걸쳐 에너지 절약 및 환경오염 저감에 기여한 건축물에 대해 인증을 부여하는 제도이며, 지속 가능한 개발의 실현을 목표로 인간과 자연이 서로 친화하며 공생할 수 있도록 토지이용 및 교통, 에너지 및 환경오염, 재료 및 자원, 물순환관리, 유지관리, 생태환경, 실내환경의 7개 전문분야와 추가로 혁신적인 설계 분야의 평가항목별 점수를 합산하여 4개 등급(최우수, 우수, 우량, 일반)으로 등급을 부여하는 제도이다.

2.5 공동주택성능등급의 표시 (주택성능)

본 제도는 공동주택 소비자가 입주하고자 하는 공동주택의 품질과 성능에 대한 객관적인 정보를 파악한 후 선택할 수 있도록 하고, 공동주택 건설사업자에 대해서는 포상 등을 통해 우수한 자재를 자발적으로 사용하게 하여 신기술 개발 및 양질의 공동주택 생산을 유도하려는 목적을 가지고 1,000세대 이상 공동주택을 대상으로 2006년 1월 6일 제정 및 시행하게 되었는데, 2013년 녹색건축 인증제도와 대상 및 인증기준이 중복된 부분이 많아 건축주의 이중 부담 해소 차원에서 통합하여 녹색건축 인증제도로 새롭게 시행하게 되었으며, 2018년 주택건설기준 등에 관한 규정 제58조 개정을 통하여 500세대 이상으로 세대수를 강화하여 현재에 이르고 있다.

따라서, 현재는 주택건설기준 등에 관한 규칙 제12조의2 별지 제1호 서식에서 규정하고 있는 공동주택성능등급 인증서의 소음, 구조, 환경, 생활환경, 화재소방 관련 이상 5개 대분류에 대한 성능등급을 인정 받은 후 주택법 제39조에 근거하여 입주자 모집공고에 표시하여야 한다.

2.6 건강친화형 주택 건설기준 (건친)

본 제도는 새집증후군 문제를 개선하여 거주자에게 건강하고 쾌적한 실내환경을 제공할 수 있도록 일정 수준 이상의 실내공기질과 환기 성능을 확보한 공동주택으로서 의무기준을 모두 충족하고 권장기준 1호 중 2개 이상, 2호 중 1개 이상의 항목에 적합하도록 규정하고 있으며, 2010년 12월, 1,000세대 이상 공동주택을 대상으로 시행된 청정건강주택 건설기준이 모태이며, 2013년 12월, 현재의 건강친화형 주택 건설기준으로 명칭이 변경되었으며, 2014년 5월 7일, 전면 개정을 통하여 적용 대상을 500세대 이상으로 강화하여 현재에 이르고 있다.

의무기준은 친환경 건축자재의 적용, 플러쉬아웃 또는 베이크아웃 실시, 환기설비 설치 및 성능검증 실시, 친환경 생활제품(빌트-인 가전제품 및 붙박이가구 등) 적용, 건축자재, 접착제 등 시공 및 관리기준 준수 이상 6개 항목이며, 권장기준 1호는 흡방습 건축자재, 흡착 건축자재, 항곰팡이 건축자재, 항균 건축자재 이상 4종을 일정 면적 이상 적용하는 것이고, 권장기준 2호는 실내에서 발생하는 미세먼지를 제거하기 위한 조치로서 주방 레인지후드 성능 확보, 레인지후드 배기효율 향상을 위해 환기설비 또는 보조급기와 연동 제어 이상 2개 항목이다.

2.7 공동주택 결로 방지를 위한 설계기준 (결로)

본 제도는 하자분쟁의 가장 큰 원인 중 하나인 결로현상을 막기 위해 2013년 12월 제정 후 2014년 5월 7일부터 500세대 이상 공동주택을 대상으로 시행하게 되었다.

실내는 25°C, 상대습도 50% 조건과 외기온도 -15°C(지역 II) 조건을 기준으로 출입문(현관문, 대피공간 방화문), 벽체 접합부, 외기에 직접 접하는 창을 대상으로 규정된 온도차이비율(TDR) 이하를 만족하여야 하는데, 이 때 벽체 접합부는 일반적으로 국토교통부에서 제시한 공동주택 결로방지를 위한 상세도 가이드 라인을 따르고, 출입문 및 창은 경우 KS F 2295 등의 시험방법으로 국가공인기관(KOLAS)에서 측정한 시험성적서를 이용하고 있으며, ISO 15099에 적합한 컴퓨터 프로그램(PHYSIBEL 등)을 활용한 시뮬레이션을 통해 평가할 수 있지만 특별한 경우가 아니면 활용하지 않고 있다.

2.8 장수명 주택 건설·인증기준 (장수명)

본 제도는 공동주택이 구조적으로 오래 유지 및 관리될 수 있는 내구성을 갖추고, 입주자의 필요에 따라 내부 구조를 쉽게 변경할 수 있는 가변성과 수리 용이성 등 공동주택의 성능을 확인하여 인증하는 제도로 2014년 12월 24일 제정되어 1,000세대 이상의 공동주택에 적용한다.

내구성은 철근의 피복두께와 콘크리트 품질, 가변성은 구조방식, 건식벽체 비율 및 시공방법, 당해층 배관, 층고, 이중바닥, 욕실 및 부엌의 이동성, 외벽의 가변성 및 공업화 공법, 수리용이성은 전용부분과 공용부분을 구분하여 배관 또는 배선의 개보수 및 점검의 용이성과 세대 수평 분리 계획 등을 평가하여 일반, 양호, 우수, 최우수 4개 등급을 부여한다.

2.9 지능형 건축물 인증기준 (지능형)

본 제도는 건축물을 이루고 있는 건축, 설비, 각종 시스템들이 용도와 목적에 맞게끔 최적화되어 사용자가 편리하고 편안한 상태에서 거주할 수 있도록 하고, 또한 건축물의 모든 요소들이 유기적으로 통합되고 연동되어 불필요한 에너지 소비를 줄이고 건축물의 유지관리비용을 절감하여 건축물의 효용 가치가 지속가능하게 유지될 수 있도록 하기 위해 2006년 9월 1일부터 인증 신청을 시행하게 되었다.

인증 대상은 주거시설(건축법 시행령 별표1 제1호에 따른 단독주택 및 제2호에 따른 공동주택)과 비주거 시설(건축법 시행령 별표1 제3호부터 제28호까지의 건축물) 및 복합 건축물이며, 건축계획 및 환경, 기계 설비, 전기설비, 정보통신, 시스템 통합, 시설경영관리 이상 6개 분야에 대해 평가한 후 1등급부터 5등급 까지 5개 등급으로 인증을 부여한다.

2.10 스마트정보통신건물 인증 (정보통신)

(초고속정보통신 분야, 지능형홈네트워크 분야)

본 제도는 초고속정보통신서비스를 편리하게 이용할 수 있도록 일정 기준 이상의 구내정보통신 설비를 갖춘 건축물에 대해 인증을 해주는 제도로써 지능형 서비스 수용 기반 마련을 위해 구내정보통신설비의 고도화 촉진을 위한 초고속정보통신 분야와 홈네트워크 설비의 안정적인 운영 환경 제고를 위한 지능형 홈네트워크 분야로 구분되어 있으며, 1999년 4월, 초고속정보통신건물 인증제도를 시행하였고, 2007년 1월, 홈네트워크건물 인증제도를 도입하였으며, 2025년 12월 1일, 이 두 제도를 통합하여 본 제도로 전면 개정을 하였다.

인증 대상은 건축법 제2조제2항제호의 공동주택, 제2조제2항제14호의 업무시설 또는 준주택오피스텔 (방송통신설비의 기술기준에 관한 규정 제3조제1항제16호)이며, 최근 개정을 통하여 특등급, 1등급, 2등급 이상 3개 등급으로 평가하게 되며, 특히 본인증을 취득하려면 IoT 기기와 해당 기기를 제어하는 앱 등의 보안기능을 점검해 이를 충족할 경우 점검기관이 발급하는 보안점검성적서 및 지능형 홈네트워크 설비 설치 및 기술기준에 해당하는 홈네트워크 설비의 보안기능을 점검해 이를 충족할 경우 점검기관이 발급하는 보안점검결과서를 발급받아 제출하도록 한 것이 특징이다.

2.11 탄소중립건축 인증 (ZCB)

본 제도는 건축물을 대상으로 건물부문 전과정에서 발생하는 탄소배출량 뿐만 아니라 다양한 탄소감축 활동을 통한 탄소중립 성능에 대한 탄소감축량을 정량적으로 평가하여 탄소중립지수를 도출하는 전과정 탄소 중점 인증제도로써 2023년 9월 1일 개시되었다.

건축물, 상업, 건설현장을 대상으로 인증 용도에 따라 설정된 시스템 경계에서 발생하는 전과정 탄소배출량 대비 다양한 탄소 감축 활동을 통해 감축되는 탄소감축량의 비율(탄소중립건축지수, ZCBi)을 도출하여 1등급부터 5등급까지 5개 등급으로 평가하게 된다. 이 때 시스템 경계는 다음 그림과 같이 ISO 14040s에 기반하여 생산단계-시공단계-운영단계-폐기단계를 유지하면서 사업 유형 및 특성에 따라 구분된 ZCB 인증 용도에 따라 생애주기 이전단계 및 이후단계에 대한 시스템 경계를 확장 제시하여 초 6개 단계로 구성되는 특징이 있으며, 생산단계에서 폐기단계인 Cradle to Grave에 대하여는 필수적으로 평가하도록 하고 있다.

[그림 1] ZCB 인증에서의 시스템 경계



2.12 로봇 친화형 건축물 인증 (REEC-B)

본 제도는 서비스 로봇이 건물 내에서 엘리베이터 호출, 자동문 통과 등 제약 없이 자유롭게 이동하며 사람과 공존할 수 있도록 설계 및 시공된 건축물을 인증하는 제도로써 2021년 스마트도시협회에서 연세대학교와 네이버와 공동으로 인증기준 초안을 마련한 후 2022년 최초로 네이버 1784 건물을 대상으로 인증을 부여하였으며, 2025년 기준을 개정하면서 다수 건축물 용도에 맞는 지표를 현행화 하게 되었다.

평가항목은 건축물 및 도시 공간의 물리적 구조와 설비가 로봇의 이동성과 업무 수행에 적합하게 계획되고 조성되었는지를 평가하는 건축 및 시설물 환경, 데이터, 네트워크, 보안시스템 등 디지털 인프라가 로봇의 연계 운용 및 실시간 제어를 위해 도시 및 건축 단위에서 체계적으로 구축되어 있는지를 평가하는 네트워크 및 시스템 인프라, 공공 또는 민간 공간에서의 로봇 운영계획, 관계체계, 위기 대응 시스템 등을

중심으로 로봇 활용의 지속 가능성과 안정성을 평가하는 로봇 운영 관리 체계, 그리고 건축물 또는 도시 공간 내에서의 로봇 서비스 시나리오의 수립, 운영 실적을 바탕으로 사용자 편의성과 서비스 체감도를 평가하는 로봇 서비스 구현 수준 이상 4개 영역을 평가한 후 우수 또는 최우수 2개 등급을 부여하게 된다.

2.13 장애물 없는 생활환경 인증 (Barrier Free, BF)

본 제도는 어린이, 노인, 장애인, 임산부 뿐만 아니라 일시적 장애인 등이 개별 시설물 또는 지역을 접근하고 이용하고 이동함에 있어 불편을 느끼지 않도록 계획, 설계, 시공, 관리 여부를 평가하여 인증하는 제도로 2007년 제도 도입 및 시범 운영을 시작으로 2010년 7월 장애물 없는 생활환경 인증에 관한 규칙이 제정되어 현재에 이르고 있다.

인증 대상은 장애인등편의법 제7조에 따른 대상시설(공원, 공공건물 및 공공이용시설, 공동주택, 통신시설 등)과 교통약자법 제9조에 따른 교통수단, 여객시설, 도로와 같은 개별시설과 교통약자법 시행령 제15조의2에 따른 지역 등이며, 평가항목은 건축물의 경우 매개시설, 내부시설, 위생시설, 안내시설, 기타시설, 기타설비 등을 평가한 후 일반, 우수, 최우수 3개 등급을 부여하게 된다.

앞에서 살펴본 13가지 인증제도는 분석의 편의를 위해 우선 에너지 성능, 친환경 성능, 기타 성능 이상 3가지 분류로 구분하여 분류한 후 각 성능별 연관성을 분석하는 방식을 이용하였다.

3.1 에너지 성능

이 범주에 해당하는 직접적인 제도는 ①에절, ②친주, ③제로이며, 간접적으로 에너지 평가결과를 활용하거나 에너지 성능에 기여하는 요소기술을 포함하고 있는 제도로는 ④녹색, ⑤주택성능, ⑦결로, ⑨지능형, ⑩ZCB 이다.

“에절”은 연면적 500㎡ 이상의 비주거시설을 대상으로 의무사항을 모두 이행하고, 건축부문, 기계설비부문, 전기설비부문, 신재생에너지설비부문 이상 4개 부문의 제시된 요소기술 적용 여부를 평가하여 65점 이상(공공 74점 이상)일 경우 적합한 것으로 평가하며, 연면적의 합계가 3,000㎡ 이상인 업무시설과 교육연구시설은 에너지소비총량제 대상으로 국토교통부에서 배포한 에너지해석프로그램(ECO2-OD)을 이용한 에너지소요량 평가서를 제출해야 하며, 단위면적당 1차 에너지소요량의 합계가 150kWh/(㎡·yr) 미만(공공기관 건축물은 130 미만)일 경우 적합한 것으로 평가한다.

“친주”는 30세대 이상 공동주택을 대상으로 국토교통부에서 배포한 에너지해석프로그램(ECO2-OD)을 이용한 평가결과 단위면적당 1차 에너지소요량을 100kWh/(㎡·yr) 미만으로 설계하거나 또는 제7조제1항 제2호의 설계조건을 모두 만족하고 제2항의 의무사항을 모두 이행하도록 하고 있다. 다만, 공동주택 단지에 부속으로 계획되는 부대시설 및 근린생활시설 등은 제2항의 의무사항을 모두 이행하여야 하고, 상기 “에절”에 따른 에너지성능지표(EPI) 65점 이상도 만족하여야 한다.

“제로”는 녹색건축물 조성지원법 시행령 제12조 및 [별표 1]에 따른 인증 의무 대상 건축물에 해당할 경우 국토교통부에서 배포한 에너지해석프로그램(ECO2)을 이용하여 난방, 냉방, 급탕, 환기, 조명 이상 5대 에너지 용도별 사용량과 신재생에너지설비 설치 등을 평가하여 에너지자립률에 따라 또는 단위면적당 1차

에너지소요량에 따라 5등급부터 1등급, 그리고 +등급까지 인증을 받을 수 있다.

[표 1] 에너지 성능 제도 비교

구분	에절	친주	제로
의무 적용 대상	연면적 500㎡ 이상	30세대 이상 공동주택	시행자가 공공기관인 경우
기준의 성격	시방기준 (EPI) (일부 용도 성능기준 (ECO2-OD) 의무)	성능기준 (ECO2-OD) 또는 시방기준(의무 + 설계조건)	성능기준 (ECO2)
평가기준 (1차에너지소요량)	의무 + EPI 65점 이상 (공공 74점 이상)	100kWh/(㎡.yr) 미만	신재생에너지 자립률 20% 이상 또는 주거 90kWh/(㎡.yr) 미만, 비주거 130 미만
통합 제언	단순화된 의무사항 + (제로) 인증 의무		

※ 단순화된 의무사항이란 (에절)과 (친주)의 의무사항 및 EPI, 설계조건 중 (제로) 인증을 위한 최소한 조건을 말함.

이와 같이 “에절”, “친주”, “제로”를 상호 비교해 보면, 제도의 도입 시기에 기인할 경우 “에절”의 의무사항과 EPI를 기본으로 “친주”의 의무사항과 설계조건이 만들어졌고, 평가방법적 측면으로는 “제로” 인증의 평가방법을 준용하여 “에절”의 에너지소비총량제와 “친주”의 성능기준이 개정되었다고 할 수 있다. 따라서, 적용 대상이 명확하게 다르지만 정부의 로드맵에 따르면, “제로” 인증이 모든 신축 건축물을 대상으로 의무화될 것이므로 “제로” 인증을 기본으로 하고, “에절” 및 “친주”의 의무사항 및 설계조건을 분석하여 “제로” 인증을 받기 위한 최소 조건으로 단순화하여 의무사항으로 규정하는 것을 제안해 본다.

한편, 이러한 직접적으로 에너지와 관련된 제도를 평가에 이용하거나 또는 에너지 성능에 영향을 미치는 기술요소를 포함하고 있는 제도들을 간략히 살펴보면 다음과 같다.

“녹색”에서는 에너지 및 환경오염 범주에서 “에절”의 EPI 배점, “친주”의 절감률, 현재는 “제로”와 통합된 “건축물 에너지효율등급 인증제도(에효)”의 1차에너지소요량을 이용하여 평가하고 있으며, 추가로 혁신적인 설계 범주에서는 “제로” 인증의 등급을 평가에 이용하고 있다. “주택성능”에서도 환경성능 범주에서 에너지 성능을 같은 방법으로 평가하고 있다. “결로”에서는 패시브 설계요소에 해당하는 벽체 접합부, 문, 창을 대상으로 직접적인 열성능은 아니지만 온도차이비율(TDR)을 이용하여 에너지 기준에서는 다루지 않는 각 부재의 국부적 단열성능을 일정 수준 이상 확보하도록 요구하고 있으며, “지능형”에서는 신재생 에너지 적용 외피계획, 기계설비분야, 전기설비분야, 에너지 데이터 표시 및 정보 조회기능 등에서 에너지 기술요소들을 간접적으로 평가하고 있으며, “ZCB”에서는 운영에너지 사용단계에서 에너지 사용량을 평가하고 있다.

3.2 친환경 성능

이 범주에 해당하는 제도는 ④녹색, ⑤주택성능, ⑥건친, ⑦결로이며, 간접적으로 평가항목으로 이용하고 있는 제도로는 ⑨지능형이 있다.

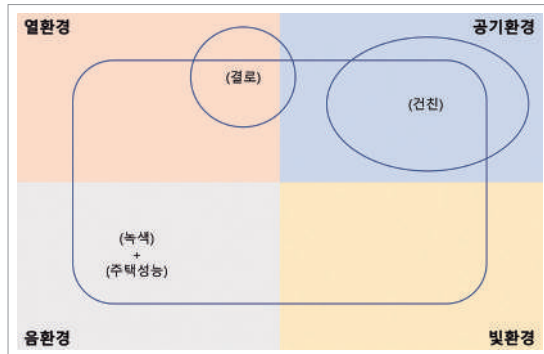
“녹색”은 “주택성능”과 동시에 평가되는 특성상 500세대 이상 공동주택은 의무적으로 인증을 받아야 하고, 토지이용 및 교통, 에너지 및 환경오염, 재료 및 자원, 물순환관리, 유지관리, 생태환경, 실내환경 등 건축물의 외부공간과 내부공간, 그 경계에 해당하는 건축자재까지 아우르는 평가를 하는 제도이다.

“건친”은 500세대 이상의 공동주택을 대상으로 실내공기질을 개선할 목적으로 친환경 건축자재의 사용,

적절한 환기 등은 의무적으로 이행하도록 하고, 항곰팡이, 항균 등 특수 목적 자재도 사용하도록 권장하는 제도이다.

“결로”는 실내외 온도차 및 실내의 높은 습도 등으로 발생하는 결로로 인하여 곰팡이 발생까지 유발하여 거주자의 건강을 해치는 등 문제를 해결하기 위해 500세대 이상의 공동주택을 대상으로 문, 벽체접합부, 창을 대상으로 각 부재별 국부적 단열성능에 해당하는 온도차이비율(TDR)을 규정하고 이를 해석 또는 실험을 통해 확인하도록 하는 제도로써 벽체접합부의 경우에는 가이드라인의 상세를 따를 수 있도록 하고 있다.

[그림 2] 친환경 성능을 평가하는 제도들의 범주



이와 같이 “녹색”, “주택성능”, “건천”, “결로”는 모두 500세대 이상 공동주택을 대상으로 의무적으로 인증을 받거나 준수해야 하는 제도임을 감안할 때 우선, “녹색”과 “주택성능”은 동시에 평가하고 서로 다른 결과서를 발행하고 있는 상황인데, 실질적 통합을 이루어 1개 제도로 거듭 나길 기대해 본다. 다음으로 상기 [그림 2]에서 직관적으로 표현한 바와 같이 “녹색”의 평가항목으로 “건천”과 “결로”를 포함시

켜 평가하는 것도 제안해 본다. 다만, 이 때 “건천”과 “결로”를 평가함에서 있어 등급 구분이 아니라 의무항목으로 규정하여 현재의 평가방법 및 기준을 그대로 이용하는 방식으로 정리가 되었으면 한다.

한편, “지능형”에서는 기계설비분야에서 거주자의 쾌적성 및 편의성(주거시설) 또는 외기도입과 제어(비주거시설) 등의 평가항목에서 친환경 성능을 일부 평가하고 있다.

3.3 기타 성능

이 외에 에너지 성능과 친환경 성능은 아니지만 다른 특수 목적으로 운영되고 있는 제도로는 ⑧장수명, ⑨지능형, ⑩정보통신, ⑪ZCB, ⑫REEC-B, ⑬BF 등이 있다.

“장수명”은 1,000세대 이상 공동주택을 대상으로 내구성, 가변성, 수리용이성을 평가하는 제도로써 “주택성능”에서도 동일한 평가항목을 다루고 있는데, 평가기준이 차이가 있어 통일성이 요구된다.

“지능형”은 의무적으로 규정된 대상은 없으며, 건축계획 및 환경, 기계설비, 전기설비, 정보통신, 시스템통합, 시설경영관리를 평가하는 제도로써 최적의 시스템을 건물의 기능과 용도에 적합하게 구축하고 시스템간의 통합을 구현하는 것을 목적으로 하고 있다.

“정보통신”도 의무적으로 규정된 대상은 없으며, 초고속정보통신 분야와 지능형 홈네트워크 분야(공동주택에 한함)를 평가하는 제도로써 구내정보통신설비의 고도화를 촉진시키고 관련 서비스를 활성화하는 것을 목적으로 하고 있다.

“ZCB”도 의무적으로 규정된 대상은 없으며, 시스템 경계 내에서 생산단계, 시공단계, 운영단계, 폐기단계에 대한 전과정에서 탄소감축활동을 탄소저감량, 탄소흡수량, 탄소포집량, 탄소상쇄량으로 구분하여 정

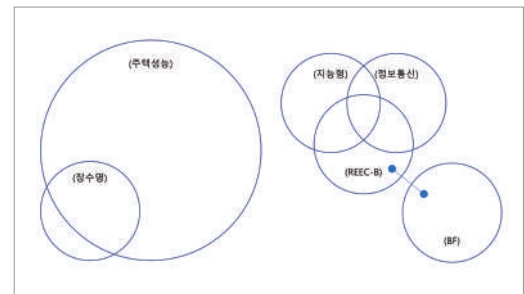
량적인 탄소감축량을 산출하는 제도로서 건물부문 탄소중립 목표 실현에 기여하는 것으로 목적으로 하고 있다.

“REEC-B”도 의무적으로 규정된 대상은 없으며, 건축 및 시설 설계, 네트워크 및 시스템, 건축운영관리, 로봇 지원 및 기타 서비스를 평가하는 제도로서 로봇과 인간이 효율적으로 공존할 수 있도록 이동성, 접근성, 안전성, 운영효율성 등의 측면에서 로봇 적용에 적합한 공간 구성과 기술 인프라를 종합적으로 검증하는 것으로 목적으로 하고 있다.

“BF”는 장애인등편의법 제7조에 따른 대상시설(공원, 공공건물 및 공공이용시설, 공동주택, 통신시설 등)과 교통약자법 제9조에 따른 교통수단, 여객시설, 도로를 대상으로 매개시설, 내부시설, 위생시설, 안내시설, 기타시설, 기타설비 등을 평가하는 제도로서 어린이, 노인, 장애인, 임산부 뿐 아니라 일시적 장애인 등이 개별시설을 접근, 이용, 이동함에 있어 불편을 느끼지 않도록 계획, 설계, 시공, 관리되도록 하는 것을 목적으로 하고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 “장수명”은 추가로 더 많은 항목을 평가하는 “주택성능”으로 통합시키거나 또는 “주택성능”에서 “장수명” 평가항목을 독립시키는 것을 고려할 필요가 있다. “지능형”과 “정보통신”, “REEC-B”는 시스템 측면에서 통합을 고려할 수 있을 것이며, “ZCB”의 경우 “녹색”에서 전과정평가 항목과의 연계성을 고려할 수 있을 것이고, “REEC-B”와 “BF”는 로봇과 인간이라는 두 객체의 접근, 이동 등을 포괄적으로 통합하는 것에 대해서도 고려해 볼 수 있을 것이다.

[그림 3] 기타 성능 제도들의 상관성



04 결론

이상과 같이 13개 인증제도에 대하여 간략하게 살펴보았으며, 각 인증제도간 상관성을 에너지 성능, 친환경 성능, 기타 성능으로 구분하여 비교 분석해 보았다.

- (1) 에너지 성능을 평가하는 제도는 “에너지”, “친주”, “제로”가 있으며, 이 제도들은 “녹색”, “주택성능”에서 직접적으로 활용하고 있고, “결로”, “지능형”, “ZCB”에서는 간접적으로 에너지 성능을 평가하고 있는 것으로 파악되었다.
- (2) 친환경 성능을 평가하는 제도는 “녹색”, “주택성능”, “친친”, “결로”가 있으며, “지능형”에서는 실내환경 제어를 평가에 활용하고 있다.
- (3) 기타 성능을 평가하는 제도는 “장수명”, “지능형”, “정보통신”, “ZCB”, “REEC-B”, “BF”가 있으며, “장수명”은 “주택성능”에서도 평가하고 있다.
- (4) 에너지 성능을 평가하는 제도는 정부의 로드맵에 근거하여 “제로”를 기본으로 하고, “에너지”와 “친주”의 의무사항 및 EPI, 설계조건과 같은 시방기준을 최소한으로 제시하는 방향으로 정리하여 통합 운영하는 것을 고려해 볼 것을 제안해 본다.

(5) 친환경 성능을 평가하는 제도는 “녹색”을 기본으로 하고, 실내환경 중 공기환경을 평가하는 “건친”과 열환경 평가에 해당하는 “결로”는 등급을 구분하는 평가방법이 아닌 의무기준으로써 최소 기준을 제시하여 통합 운영하는 것을 고려해 볼 것을 제안해 본다.

(6) 기타 성능을 평가하는 제도는 “장수명”은 “주택성능”과 통합 또는 완전 독립적 운영을 고려할 수 있을 것이고, “ZCB”는 “녹색”과의 통합 또는 활용성을 고려할 수 있을 것이고, “지능형”과 “정보통신”, “REEC-B”는 시스템적 통합 운영을 고려할 수 있을 것이며, “REEC-B”와 “BF”는 로봇과 인간이라는 두 객체의 접근, 이동 등을 포괄적으로 통합하는 것도 고려할 수 있을 것이다.

본 고에서 살펴본 13개 인증제도는 각 제도별 제정 이유와 목적이 명확함은 말할 필요도 없을 것이다. 다만, 본 고에서 살펴본 바와 같이 각 인증제도는 상호 연관성이 있는 것으로 파악되어 유사한 제도를 동시에 받아야 하는 번거로움과 비용 투입 등을 고려할 때 연관성 정도에 대한 심도깊은 연구를 통하여 제도가 정비되길 기대해 본다.



누수 최소화 공법



글 송현준 / 설비팀 대리
전화 02-3433-7428 E-mail songhj777@ssyenc.com

01 개요

공동주택 설비공사에서 발생하는 누수 하자는 입주자 민원과 직결되는 대표적인 품질 저해 요소로, 최근에는 단순한 설비 보수 비용을 넘어 민원 처리에 따른 보상 비용 증가로까지 이어지고 있다. 누수 하자는 프로젝트 원가에 직접적인 손실을 발생시키는 요인으로 작용하며, 하자 처리 과정에서 추가 공사와 민원 대응 인력 투입 등 간접 비용도 지속적으로 증가하는 추세다.

누수는 배관 손상, 방수 불량, 구조적 손상 등 다양한 원인으로 발생하며, 초기에는 미세 누수 형태로 나타나는 경우가 많아 육안으로 인지하기 어렵다. 이로 인해 주방, 세대 내 배수구, 입상배관 이음부 및 말단부, 소방 배관 등에서 발생한 누수가 장기간 방치되어 하부 세대로 피해가 확대되거나 구조체 손상, 곰팡이 발생 등 2차 피해로 이어지는 사례가 반복되고 있다.

최근 3년간 누수 하자 처리 현황을 살펴보면, 누수 보수 비용뿐만 아니라 민원 보상 비용도 지속적으로 발생하고 있다. 누수 하자는 주거 공간 안전성과 거주 환경에 중대한 영향을 미치는 하자로 인식되고 있으며, 재산상 손해를 넘어 정신적 손해에 대한 위자료 배상까지 인정되는 사례도 증가하고 있다.

이러한 배경에서 누수 하자는 발생 이후 사후 보수보다 발생 원인을 구조적으로 최소화하고, 누수 발생 시 초기에 발견해 신속히 대응하는 체계 구축이 무엇보다 중요하다. 단일 공법이나 일회성 개선만으로는 누수 하자를 근본적으로 줄이기 어렵기 때문에, 설계·시공·점검·운영 전 단계에 걸친 종합적인 누수 저감 대책이 필요하다.

본 기술지는 누수 취약 구간을 중심으로 원격검침을 활용한 조기 감지 기술, 세대 내 주요 설비 접속부 개선, 점검성을 고려한 시공 공법, 운영 단계 관리 기준을 종합적으로 적용한 누수 최소화 공법을 정리했다. 이를 통해 누수 하자 발생 가능성을 사전에 저감하고, 발생 시 피해 확산을 최소화함으로써 설비공사 품질 향상과 유지관리 효율 증대를 도모하고자 한다.

02 원격검침 기반 누수 조기 감지 시스템

1) 누수 하자의 문제점

공동주택에서 발생하는 누수는 초기 단계에서 사용자가 인지하기 어려운 미세 유량 형태로 발생하는 경우가 많다. 특히 미입주·미분양 세대 또는 장기 외출 세대의 경우 정상적인 급수 사용이 거의 발생하지 않기 때문에, 소량의 누수가 발생하더라도 이를 즉시 확인하기 어렵다. 이로 인해 누수가 장기간 방치되어 하부 세대로 피해가 확대되거나, 구조체 손상과 같은 2차 피해로 이어지는 사례가 반복되고 있다.

기존 누수 확인 방식은 사용자의 신고나 육안 점검에 의존하는 경우가 많아, 누수 발생 시점을 정확히 파악하기 어렵고 전 세대를 대상으로 한 반복 점검이 불가피하다. 이 과정에서 점검 인력과 시간이 과다하게 소요되며, 실제 누수가 발생한 세대를 특정하는 데에도 한계가 있다. 또한 미세 누수의 경우 육

안으로는 확인이 곤란하여, 누수 발생 이후 상당 시간이 경과한 뒤에야 문제를 인지하는 경우가 많다.

이와 같은 관리 방식은 누수 하자를 사후적으로 처리하는 데 그치며, 누수 발생 자체를 조기에 차단하거나 피해 확산을 최소화하는 데에는 한계가 있다. 따라서 누수 발생 여부를 객관적인 기준으로 판단하고, 관리자가 선제적으로 대응할 수 있는 체계 구축이 필요하다.

[그림 1] 원격검침 시스템



2) 원격검침 기반 누수 조기 감지 시스템

원격검침 시스템은 세대별 수도 계량기 사용량 데이터를 유·무선 통신을 통해 서버로 수집하고, 이를 실시간으로 분석하는 방식이다. 본 공법에서는 해당 데이터를 누수 감지 목적으로 활용하여, 일정 시간 동안 연속적인 급수 사용이 발생하는 세대를 누수 의심 세대로 자동 추출하도록 하였다.

누수 판단 기준은 시간당 사용량과 연속 사용 시간으로 설정하였다. 예를 들어 매시간 일정 유량(10L/h 또는 계량기 소수점 넷째 자리 기준 100mL)이 12시간 이상 연속적으로 발생할 경우 누수 의심 세대로 분류할 수 있으며, 4시간·8시간·12시간·24시간 등 복수 조건을 동시에 적용함으로써 단기 사용과 누수를 구분할 수 있다. 특히 야간 시간대와 같이 정상 사용 가능성이 낮은 시간 구간을 기준으로 설정할 경우 누수 판단 정확도를 더욱 높일 수 있다.

원격검침 시스템을 통해 누수 의심 세대가 자동으로 표시되면, 관리자는 해당 세대를 중심으로 현장 점검과 보수 조치를 신속히 수행할 수 있다. 이를 통해 전수 점검을 최소화하고, 누수 발생 초기 단계에서 대응이 가능해 하부 세대 피해와 하자 확대를 효과적으로 방지할 수 있다. 또한 해당 시스템은 준공 이후 관리 단계에서도 동일한 기준으로 활용이 가능해, 사후 대응 중심 관리에서 사전 예방 중심 유지관리 체계로 전환하는 데 기여한다.

[그림 2] 원격검침 누수감지 화면

원격검침

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

수압감시

수온감시

원격검침

누수감지

수질감시

수위감시

수압감시

수온감시

수위감시

03 온수분배기 누수경보 및 싱크 멀티 배수구

1) 주방 싱크, 온수분배기 주변 누수 문제점

세대 내 누수는 발생 지점보다 이후 피해가 확대되는 과정에서 더 큰 하자로 이어지는 경우가 많다. 특히 온수분배기 하부와 주방 싱크 하부는 다수의 배관과 기기가 집중되는 구조로, 접속부 미세 누수가 발생하더라도 초기 인지가 어렵다. 이로 인해 누수가 바닥 마감재 하부로 스며들어 하부 세대 천장 누수로 확대되는 사례가 반복되고 있다.

기존 구조에서는 누수 발생 시 물이 세대 내부에 고이거나 마감재 하부에 체류하게 되어, 누수 인지 시

점에는 이미 피해 범위가 확대된 경우가 많다. 또한 주방 싱크 하부 배수 구조는 단일 배수구 적용이 일반적이어서, 다수 배수 기기 연결 시 체결부 틈새 누수나 배수 역류가 발생할 가능성이 있다.

2) 누수경보 시스템

온수분배기 하부에는 누수 감지 장치를 설치하여 미세 누수가 발생하더라도 즉각적인 경보가 가능하도록 하였다. 이를 통해 누수 발생 초기 단계에서 이상을 인지하고, 하부 세대로 피해가 확대되기 전에 신속한 조치가 가능하다.

[그림 3] 누수경보시스템의 종류



3) 주방 싱크 멀티배수구

주방 싱크 하부에 다구 연결이 가능한 배수 구조를 적용하여 다수 배수 기기 연결 시에도 배수관 체결부의 밀착성을 확보하였다. 이를 통해 배수 중 발생할 수 있는 틈새 누수와 역류를 방지한다.

본 공법은 세대 내 대표적인 누수 취약 구간을 대상으로 누수 조기 인지와 피해 확산 차단을 동시에 달성할 수 있으며, 누수 발생 이후 하부 세대까지 확대되던 기존 하자 유형을 구조적으로 개선하는 효과를 가진다.

[그림 4] 배수구 캡의 종류



04 보일러 하부 PB관 접합

1) 보일러 하부 배관 누수의 문제점

보일러 하부 배관 구간은 세대 내에서도 누수 발생 빈도가 높은 대표적인 취약 구간이다. 보일러 설치 위치와 현장 여건에 따라 배관 배치 및 접속 방식이 상이하게 적용되는 경우가 많아, 시공자별 작업 편차가 발생하기 쉽다. 이로 인해 PB관 접속부에서 체결 불량이나 미세 누수가 발생하고, 입주 이후 반복적인 하자로 이어지는 사례가 다수 발생하고 있다.

특히 보일러 하부는 다수의 배관이 집중되는 구조로, 접속부 수가 많아질수록 누수 발생 가능성도 함께 증가한다. 기존 방식에서는 현장별 임의 접속이나 자재 조합이 적용되는 경우가 있어 시공 품질의 균일성 확보에 한계가 있었으며, 누수 발생 시에도 정확한 원인 파악과 보수가 어려운 구조였다. 이러한 문제는 보일러 하부 누수를 반복적인 하자 유형으로 만드는 주요 요인으로 작용한다.

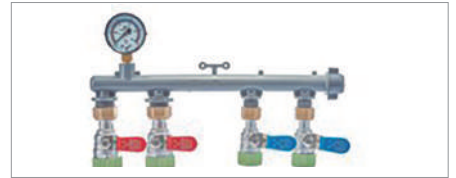
05 지하주차장 오배수 배관 점검용 투명부속

2) 보일러 하부 PB관 + 유니온 볼밸브

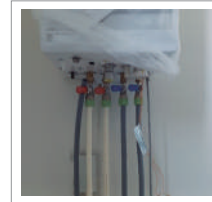
PB관과 유니온 볼밸브를 활용한 접속 구조를 기 준화함으로써 접속부 수를 최소화하고, 불필요 한 이중 연결을 배제하였다. 이를 통해 체결 불량 가능성을 줄이고, 시공자에 따른 작업 품질 편차 를 효과적으로 저감하였다.

표준화된 접속 방식 적용으로 보일러 하부 배관의 시공 품질을 균일하게 확보할 수 있으며, 누수 발생 가능성을 구조적으로 감소시키는 효과를 가진다. 또한 접속 구조가 단순화됨에 따라 향후 유지관리 및 보수 작업 시에도 원인 확인과 조치가 용이해진 다. 본 공법은 보일러 하부 누수를 사전에 차단하는 예방 중심 시공 공법으로서 활용성이 높다.

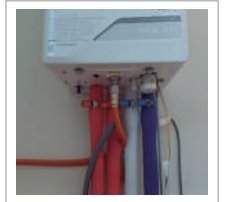
[그림 5] 시공 사진



PB+유니온 볼밸브+수압용 거치대 혼용



시공 사진 (보은 전)



시공 사진 (보은 후)

1) 지하주차장 횡주배관 점검의 문제점

지하주차장 오·배수 횡주배관은 건축 구조상 마감 이후 육안 확인이 어려운 구간으로, 배관 내부 상태 점검에 많은 제약이 따른다. 이로 인해 배관 내부 이물질 유입, 배수 장애 등이 발생하더라도 초기 단계 에서 이를 인지하기 어렵고, 문제가 확대된 이후에야 확인되는 사례가 반복되고 있다.

기존 구조에서는 배관 이상 발생 시 철거 후 점검 이 불가피하여, 보수 범위가 확대되고 공사 비용 과 시간이 증가하는 문제가 있다. 또한 배관 내부 상태를 사전에 확인할 수 있는 수단이 부족해, 입 주 전 단계에서 잠재적인 하자를 완전히 제거하 는 데 한계가 있었다. 이러한 점검 한계는 지하주 차장 누수 하자를 장기화시키는 주요 원인이다.

[그림 6] 투명부속

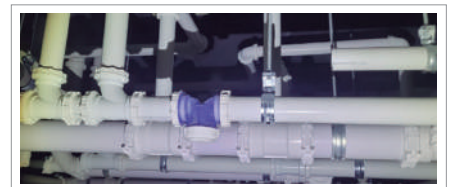


2) 지하주차장 횡주배관 점검용 투명부속

투명부속을 통해 배관 내부 상태를 육안으로 확인할 수 있도록 함으로써, 이물질 잔존 여부, 배수 상태 를 마감 이전 단계에서 사전에 점검할 수 있도록 하였다.

점검용 투명관 적용으로 배관 이상 여부를 신속 히 판단할 수 있으며, 입주 전 하자 제거가 용이 해지고, 유지관리 단계에서도 점검 효율이 크게 향상된다. 지하주차장 배관의 점검성을 개선하 여 누수 및 배수 하자를 예방하는 실효성 높은 공법이다.

[그림 7] 시공 사진



06 내시경 검사

1) 배관 내부 점검의 한계

세대 및 공용부 배관은 마감 이후 내부 상태를 육안으로 확인하기 어려워, 시공 과정에서 발생한 이물질 잔존, 배관 변형, 접속부 미세 손상이 입주 후 누수 하자로 이어지는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 특히 배수 배관 내부 막힘이나 부분 파손은 외부로 명확한 증상이 나타나기 전까지 인지가 어려워, 누수 발생 시 피해 범위가 확대되는 특성을 가진다. 또한 누수 피해 발생 시 정확한 누수지점 발견이 불가능하다. 기존 점검 방식은 통수 시험이나 외관 확인에 의존하는 경우가 많아, 배관 내부 상태를 정확히 확인하는 데 한계가 있다. 이상 발생 시에는 마감재를 철거한 후 점검이 필요해 보수 범위가 확대되고, 공사 비용 증가와 입주자 불편으로 이어지는 문제가 있었다. 이러한 구조는 배관 내부 결함을 사전에 제거하기보다, 하자 발생 이후 대응하는 방식에 머무르게 한다.

[그림 8] 내시경 검사 사진



배관 내부 크랙

배관 내부 이물질

배관 내부 이물질

고무패킹 누출

2) 내시경 검사

내시경 장비를 배관 내부에 삽입하여 배관 내부 상태를 직접 확인함으로써, 배관 파손 부위, 균열 발생 위치, 이물질 적체 구간 등 누수 원인을 육안으로 정확히 확인할 수 있도록 하였다. 이를 통해 단순한 누수 발생 여부 확인을 넘어, 정확한 누수 발생 지점을 특정하는 것이 가능하다.

배관 내부 상태를 시각적으로 확인할 수 있기 때문에, 누수 발생 시에도 추정에 의존한 마감 철거가 아닌 필요 최소 범위의 선택적 보수가 가능하다. 특히 마감이 완료된 이후에도 내시경 검사를 통해 파손 위치를 사전에 확인함으로써, 불필요한 마감 철거를 최소화하고 하자 조치 범위를 효율적으로 제한할 수 있다.

[그림 9] 내시경 장비 및 검사 사진



내시경 장비

내시경 검사중 사진

본 공법은 배관 내부 결함을 사전에 제거함과 동시에, 하자 발생 시에도 정확한 원인 파악과 최소 범위 보수가 가능하다는 점에서 누수 하자 대응 효율을 크게 향상시키는 공법이다.

07 과압 방지 장치 시스템

1) 과압 발생에 따른 문제점

소방 설비 계통에서는 펌프 기동 및 정지 등 다양한 조건에 의해 일시적인 압력 상승이 발생할 수 있다. 이러한 과압은 배관 및 기기 접속부에 반복적인 부담을 주어 접속부 손상이나 미세 균열을 유발하고, 장기적으로 누수 하자로 이어질 가능성이 있다.

기존 구조에서는 과압 발생 여부를 사전에 제어하거나 완충하는 장치가 충분히 적용되지 않는 경우가 많아, 누수 발생 이후에야 원인을 파악하는 사례가 반복되고 있다. 특히 스프링클러 설비계통과 같이 압력 변

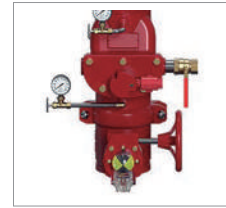
등이 잦은 구간에서는 과압에 의한 누수 위험이 상존하며, 하자 발생 시 보수 범위가 확대되는 문제가 있다.

2) 과압 방지 장치 시스템

설비 계통에 과압 방지 장치를 설치하여 설정 압력 이상 발생 시 자동으로 압력을 배출 또는 완화함으로써, 배관 및 기기 접속부에 가해지는 부담을 줄였다.

과압 방지 장치 적용을 통해 반복적인 압력 충격으로 인한 배관 손상과 누수 발생 가능성을 사전에 차단할 수 있으며, 설비 계통의 안정적인 운영이 가능하다. 본 공법은 누수 발생 이후의 사후 보수 중심 대응에서 벗어나, 압력 관리 측면에서 누수 원인을 사전에 제거하는 예방 중심 공법으로서 활용 가치가 높다.

[그림 10] 과압 방지 장치



기존



과압 방지 장치

08 PB이음관 연결구 개선

1) PB이음관 연결부 문제점

PB이음관 연결부는 세대 내 급수·급탕 배관에서 누수 발생 빈도가 높은 취약 구간이다. 기존 연결구 구조에서는 배관 삽입이 불완전한 상태에서도 오링에 의해 일시적으로 밀폐가 유지되어, 수압시험 시 누수 여부를 즉시 확인하기 어려운 문제가 있었다. 이로 인해 불완전 삽입 상태가 시공 단계에서 발견되지 못하고, 입주 이후 누수 하자로 이어지는 사례가 반복적으로 발생하였다.

또한 기존 구조는 편심 결합이 발생할 경우 그래프 링 손상 가능성이 높아, 연결구 및 배관 손상에 따른 누수 위험이 상존하였다. 이러한 문제는 시공 품질 편차를 키우고, 하자 발생 시 원인 파악과 보수 작업을 어렵게 만드는 요인으로 작용한다.

[그림 11] 기존 구조



기존 (Body+그래프링+와셔+오링+캡)

2) PB이음관 연결구 개선

그래프링과 오링의 설치 순서를 변경하거나, 그래프링 보호형(GP-Ring) 또는 퍼스트 그래프링 구조를 적용함으로써 불완전 삽입 상태에서도 수압시험 시 누수 여부를 쉽게 확인할 수 있도록 하였다.

이를 통해 배관 미삽입 또는 1단 삽입 상태를 시공 단계에서 조기에 발견할 수 있으며, 그래프링 보호 구조 적용으로 역배관 시공이나 분해·재조립 과정에서도 연결구 손상을 최소화할 수 있다. 본 공법은 PB배관 연결부의 누수 발생 가능성을 구조적으로 저감하고, 시공 품질과 유지관리 효율을 동시에 향상시키는 누수 최소화 공법이다.

[그림 12] 개선 구조



개선 (Body+오링+와셔+그래프링+캡)

09 급수·급탕 분배기 개선

1) 분배기 배관 연결부 누수의 문제점

급수·급탕 분배기는 다수의 PB배관이 집중 연결되는 구조로, 배관 삽입 상태가 불완전할 경우 누수 발생 가능성이 높은 구간이다. 기존 분배기 구조에서는 배관 완전 삽입 여부를 육안으로 명확히 확인하기 어려워, 시공 과정에서 불완전 삽입 상태가 간과되는 사례가 발생하였다.

[그림 13] 급수·급탕 분배기



특히 기존 구조에서는 분배기 내부에서 배관 삽입 깊이 확인이 어려워 색상 차이를 활용한 육안 식별이 제한적이었다. 이로 인해 배관이 일부만 삽입된 상태에서도 시공 완료로 오인될 가능성이 있으며, 수압이 가해진 이후 누수로 이어지는 사례가 반복적으로 발생하였다. 이러한 불완전 연결은 분배기 특성상 세대 전체로 피해가 확산될 수 있어 주요 누수 하자 원인으로 작용한다.

2) 급수·급탕 분배기 개선 공법

이를 개선하기 위해 본 공법에서는 PB배관 삽입 상태를 색상으로 육안 확인할 수 있는 분배기 구조를 적용하였다. 배관이 완전히 삽입될 경우 투명 플라스틱에 슬리브 색상이 노출되도록 구성함으로써, 시공 단계에서 완전 삽입 여부를 즉시 확인할 수 있도록 하였다.

[그림 14] PB배관 삽입 여부 확인



10 결론

공동주택 설비공사에서 발생하는 누수 하자는 단순한 시공 불량을 넘어, 입주자 민원과 보상 비용 증가로 이어지며 프로젝트 전반의 품질 신뢰도를 저하시키는 주요 요인으로 작용한다. 특히 누수 하자는 발생 시 점보다 발견 지연과 피해 확산으로 인해 하자 규모가 확대되는 특성을 가지며, 이에 따라 사후 보수 중심 대응 방식에는 명확한 한계가 존재한다.

이에 본 기술지에서는 누수 최소화 공법을 체계적으로 정리하였다. 원격검침을 통한 누수 조기 감지 기술을 통해 미세 누수를 사전에 인지하고, 세대 내 누수 취약 구간에는 누수경보 및 배수 구조 개선을 적용하여 피해 확산을 차단하였다. 또한 보일러 하부 PB관 접속 방식, PB이음관 및 급수·급탕 분배기 구조 개선을 통해 시공 품질 편차를 줄이고 누수 발생 가능성을 구조적으로 저감하였다.

아울러 지하주차장 오·배수 횡주배관 점검용 투명부속 적용을 통해 점검성을 확보하였으며, 배관 내시경 검사와 슬리브를 통해 배관 내부 결함과 시공 누락을 사전에 제거하였다. 과압 방지 장치 적용을 통해 압력 변동에 따른 배관 손상 가능성 또한 함께 저감하였다.

본 누수 최소화 공법은 단일 기술 적용이 아닌, 누수 발생 가능성을 다각도로 관리하는 종합적인 접근 방식으로, 누수 하자의 사전 예방과 피해 최소화를 동시에 달성할 수 있다. 이를 통해 하자 보수 비용과 민원 발생을 줄이고, 설비공사의 품질 안정성과 유지관리 효율을 향상시킬 수 있다.

또한 본 공법은 특정 공정이나 구간에 국한되지 않고, 설비공사 전반에 적용 가능한 공법으로 현장 여건에 따라 단계적 적용이 가능하다는 장점을 가진다. 이는 현장 관리 효율 향상과 함께 품질 관리의 일관성을 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.



마리나 해안 고속도로
싱가포르

현장기술 소개

On-site Technical Introduction

- 84 제주 서귀포의료원 급성기 병상 증축사업 현장 소개 및 주요 공법
- 88 보성~임성리 철도사업에 적용된 연약지반 개량공법 소개
- 97 저토피 구간에서의 발파설계

제주 서귀포의료원 급성기 병상 증축사업 현장 소개 및 주요 공법

글 박철용 / 건축기술팀 차장
전화 02-3433-7731 E-mail cypark@ssyenc.com
글 이춘재 / 제주 서귀포 의료원 급성기 병상 증축사업 현장소장
E-mail cnswws@ssyenc.com



01. 현장 소개

제주특별자치도 서귀포의료원은 1964년 1월에 제주도립 제 주병원 서귀분원으로 처음 개원한 이래 지역민의 보건위생에 필요한 의료서비스 제공과 진료와 질병 등에 대한 임상연구 및 의료요원의 훈련을 통하여 지역민의 보건 향상에 기여하고 지역으로 발전을 도모함을 목적으로 제주특별자치도가 설립 한 산남지역의 지역거점 공공의료기관이다.

서귀포의료원은 총 23,538.3m²의 부지에 지하2층, 지상4층 규모의 신축병원을 2013년 10월에 완공하여 총 300병상의 병실과 응급센터를 갖추고 있으며, 최신시설의 장례식장 등을 운영하고 있었으며, 2024년 12월에 119병상 규모의 급성기 병상을 당사가 시공사로 참여하여 증축 시공함으로써 지역 필 수의료 기반을 확충하고, 지역민에게 보다 포괄적이고 질 높은 의료를 제공할 수 있게 되었다.

[표 1] 공사 개요

설계사	(주)종합건축사사무소 선건축, 우건축 건축사사무소
시공사	쌍용건설(주) 외 1
사업관리	(주)도팩엔지니어링
규모	지하2층, 지상4층 / 철근콘크리트 구조
공사기간	2022년 12월 ~ 2024년 12월 (착공 후 총 24개월)

[그림 1] 현장 위치도



[그림 2] 대상 현장 전경

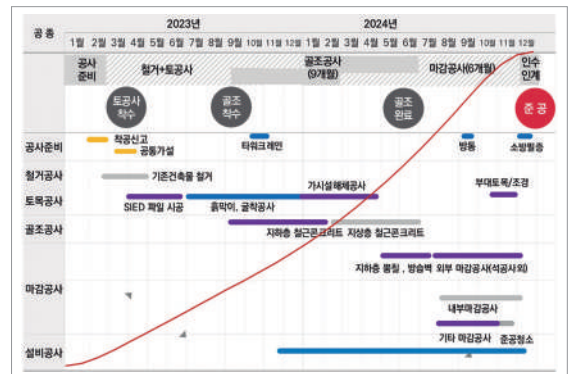


02. 주요 공종별 공법

대상 현장은 기존 건축물 철거 → 토공사 → 골조공사 → 마감공사 등의 순서로 아래와 같은 공정계획에 의거 2024년 12월 준 공을 목표로 하였으며, 난관이 있었지만 적기 준공을 하였다.

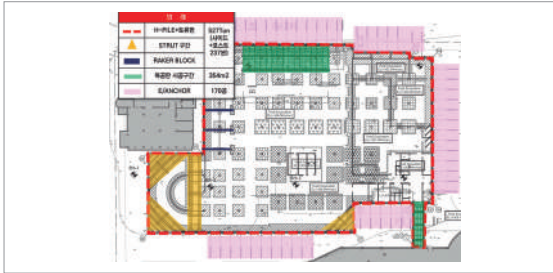
기존 건축물 철거는 당사 공사범위가 아니었기에 본 고에서는 철거작업에 대한 내용은 생략하고, 토공사, 골조공사, 친환경 계획 등을 위주로 주요 공법에 대해 기술하고자 한다.

[그림 3] 주요 공정계획



2.1 토공사

[그림 4] 흙막이 가시설 평면도



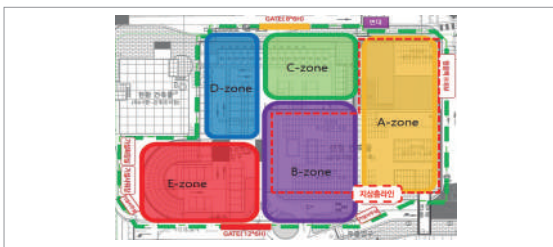
대상 현장은 지하2층으로 소규모 굴착작업으로 흙막이 벽체는 H-Pile + 토류판을 이용하였고, 흙막이 벽체의 구조적 안정성을 확보하기 위해 지보 공법으로는 가용 대지가 넓은 상태였기 때문에 기초 작업 등 본시공을 수월하게 하기 위해 3면은 제거식 Earth Anchor 공법을 적용하였고, 일부 구간에 한해 Strut 공법과 Raker 공법을 복합적으로 이용하였다.[그림 4]

흙막이 가시설 공사에서 주요 관리사항으로는 인접 건물에 대한 사전조사를 실시하고, 주기적 계측관리를 통하여 이상징후를 관찰하는 것이었으며, 공사를 마무리하는 시기까지 별다른 이상징후는 발견되지 않았다.

2.2 골조공사

토공사 및 골조공사는 아래 그림과 같이 5개 구역으로 구분하여 토공사와 골조공사를 병행 시공하는 것으로 계획함으로써 공사기간 단축 및 효율성을 최대화하였다. 이 때 급성기병상 구간에 해당하는 A-zone과 B-zone은 주요 공정으로 설정하여 공기 지연이 발생하지 않도록 계획 및 시공하였다.

[그림 5] 토공사 및 골조공사 조닝계획



특히, 대상 현장은 기존 본관동과 신축동과의 연결 브릿지가 계획되어 있을 뿐 아니라 연결 브릿지 공사를 하는 중이라도 본관동 이용자들의 왕래가 있는 상황이기에 보행자 안전을 위해 가급적 주말 작업으로 진행하였으며, 기존 본관동의 레벨을

계측하여 추후 마감레벨이 동일할 수 있도록 관리하였으며, 신축준비(EJ)의 누수 방지를 위한 시공상세도 및 유도 배관 등을 검토하여 시공계획 수립 후 시공에 만전을 기하였으며, 보행자가 안전하게 통행할 수 있도록 안전통로 및 낙하물 방지망 등을 꼼꼼하게 계획하고 설치하여 안전관리에 최선을 다하였다.

[그림 6] 기존 본관동과의 연결 브릿지 개념도



2.3 녹색건축 인증 및 제로에너지건축물 인증

대상 현장은 제주특별자치도 녹색건축물 설계기준에 의거 그린4등급, 건축물 에너지효율등급 2등급 이상을 인증 받아야 할 뿐 아니라 제로에너지건축물(ZEB) 로드맵에 의거 공공기관으로서 ZEB 5등급도 인증 받아야 하는 프로젝트이다.

2.3.1 녹색건축 인증

녹색건축 인증은 (1)토지이용 및 교통, (2)에너지 및 환경오염, (3)재료 및 자원, (4)물순환관리, (5)유지관리, (6)생태환경, (7)실내환경 이상 7개 범주와 혁신적인 설계(ID)를 추가 범주로 평가하여 그린1등급부터 그린4등급까지 4개 등급으로 구분하여 등급을 부여하는 제도이다.

대상 현장은 (1)토지이용 및 교통 범주에서는 기존 대지를 재사용, 토공사 절성토량의 최소화(45.6%), 일조권 간섭방지 대책의 타당성(최대 양각 33.36°), 대중교통의 근접성(버스정류장 300m 미만 거리), 자전거 주차장 설치(법정 자동차 주차대수의 45% 설치) 등 평가항목에서 배점을 획득하였다. (2)에너지 및 환경오염 범주에서는 건축물 에너지효율등급 1++등급, 에너지 모니터링 및 관리지원 장치 설치(에너지원별 모니터링 및 데이터 분석 기능), 오존층 보호를 위한 냉방기기 냉매의 오존층 파괴지수(ODP)가 0 이며, 지구온난화지수(GWP)가 3,000 이하인 R-410A(ODP=0, GWP=2,088) 사용 등 평가항목에서 배점을 획득하였다. 다만, TAB는 설비공사 후 기본적인 실시하는 사항이었지만 배점 계획에서는 제외하였고, 신재생

에너지 이용 항목도 ZEB 5등급 인증을 위해 자립률 20% 이상 확보해야 하기 때문에 의무적으로 설치되는 사항이지만 설치 용량과 설치 시기 등의 이슈로 녹색건축 인증 시기와 다소 차이가 발생하는 상황이었기에 배점 계획에서는 제외하였다. (3) 재료 및 자원 범주에서는 환경성 선언 제품(EPD), 저탄소 자재, 자원순환 자재, 유해물질 저감 자재의 사용과 재활용 분리수거 용기(4종 이상) 설치 등 평가항목에서 배점을 획득하였다. 다만, 최종 그린4등급 인증을 위한 배점이 어느 정도 확보된 상태였기에 녹색건축 자재의 적용 비율 항목에서 배점을 받지 않은 것은 아쉬움이 있다. (4)물순환관리 범주에서는 빗물 직접 이용(2층 옥상녹화)과 빗물 저수조를 건축면적의 4% 이상 확보하였고, 연계되는 면적 비율은 93.4%를 계획 및 시공하였고, 절수형 수도꼭지, 샤워헤드 및 수도꼭지 절수 부속, 절수형 양변기, 환경표지인증 소변기 및 연간 물 사용량의 10% 이상 절감하는 것으로 계획 및 시공하였으며, 건축물 전체 설치된 물 사용량 측정 계량기를 환경표지인증 받은 제품을 적용하였다. (5)유지관리 범주에서는 건설현장의 환경관리계획, 운영 및 유지관리 문서 및 지침 제공, 녹색건축 인증 관련 정보 제공 전체 항목에서 만점 획득을 계획 및 실현하였다. (6)생태환경 범주에서는 자연지반녹지율 6.33% 확보만 배점 계획을 수립하였다. 증축이라는 사업의 한계도 있었거니와 건폐율이 42.2% 정도로 높고, 조정면적은 법정 15% 이상을 겨우 만족하는 17.8% 수준으로 생태면적률은 배점을 받기 어려운 환경이었으며 비오톱 조성은 더욱 불가능한 상황이었다. (7)실내환경 범주에서는 실내공기 오염물질 저방출 제품의 적용, 자동온도 조절장치 설치 이상 2개 항목에서 배점을 획득하였다. 교통소음에 대한 실내외 소음도 항목은 외곽에 위치하는 특성상 충분히 배점을 획득할 수 있었지만, 그린4등급 획득에 문제가 없는 상황이라 측정 용역비가 투입되어야 하는 항목이라 고려하지 않았다. (8)혁신적인 설계 항목에서는 전기자동차 주차구역 21대(5.1%) 계획 및 시공에서만 배점을 획득하였다. 다만, 녹색건축전문가의 설계 참여 항목에서 배점을 받지 못했음은 건축설계사무소 인원의 녹색건축 전문교육 이슈가 전반적으로 확산되지 않았음이 아쉬움이 있고, ZEB 5등급 인증을 획득하였음에도 가산점을 받지 못했음은 인증 시기에 따른 이슈로 아쉬움이 있고, 중수도가 설치되어 있음에도 배점 계획을 하지 않음도 아쉬움으로 남는다.

이상과 같이 녹색건축 인증에서는 최종 50.65점을 획득하여

그린4등급 인증을 획득하였으며, 최대 배점을 고려하더라도 그린3등급에 해당하는 60점 이상을 획득하는 것이 어려워 서류 준비의 수월성, 최소 비용 투입, 현장 작업의 효율성 등을 고려한 배점 계획을 통하여 목표로 하는 등급을 획득하게 되었다.

2.3.2 제로에너지건축물 인증

제로에너지건축물 인증은 건축물 에너지효율등급 1++등급을 인증 받은 후 신재생에너지를 이용한 자립률을 평가하여 ZEB 1등급(자립률 100% 이상)부터 ZEB 5등급(자립률 20% 이상)까지 등급을 부여하는 제도이다.

대상 현장에서는 외피 단열성능은 법적 요구사항 대비 60% 수준의 고단열 성능을 갖도록 단열재 및 창호가 적용되었다.[표 2] 주요 열원시스템으로는 난방(흡수식냉온수기, 효율 88%), 급탕(증기보일러, 효율 97%), 냉방(흡수식냉온수기, COP 1.359)을 적용하였고, 냉난방 시스템으로는 중앙식 AHU+FCU를 적용하였다.[표 3] 신재생에너지는 태양광 발전시스템과 열병합 시스템이 적용되었다.[표 4]

[표 2] 주요 외피 단열 성능

구분	U-Value(W/m²K)		비고
	제출사항	법적기준	
외벽	0.235	0.410	페놀릭폼단열재 80mm
지붕	0.147	0.250	페놀릭폼단열재 130mm
바닥	0.191	0.330	페놀릭폼단열재 100mm
외부창	1.197	2.200	24mm 로이복층유리(아르곤주입), AL

[표 3] 주요 기계설비시스템 적용 현황

· 주요 열원 시스템

구분		적용기기	용량 (kW)	정격COP/효율	비고
온열원 시스템	난방	흡수식냉온수기	926.000	88.015%	-
	급탕	증기보일러	1,457.234	97.200%	-
냉열원 시스템		흡수식냉온수기	1,054.884	1.359	-

· 주요 냉난방 시스템

구분	적용기기	공급방식	형식	비고
난방 시스템	AHU + FCU	중앙식	천장카세트	-
냉방 시스템	AHU + FCU	중앙식	천장카세트	-

· 기타 주요 시스템

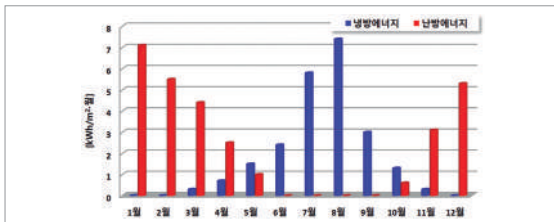
구분	적용 사항
전기히트펌프	난방 용량 : 452.9 kW, 냉방 용량 : 404.1 kW
공기조화기	급기 풍량 : 12,000 CMH, 회기 풍량 : 5,500 CMH (AHU101)

[표 4] 신재생에너지 및 열병합 시스템 적용 현황

구분	태양광 시스템		열병합 시스템	
	면적(m ²)	2,708.697	용량(kW)	20.000
적용 사항	기종기	수평, 수직	발전효율	35%
	모듈방위	남,서	종합효율	90.0%
	모듈종류	단결정		

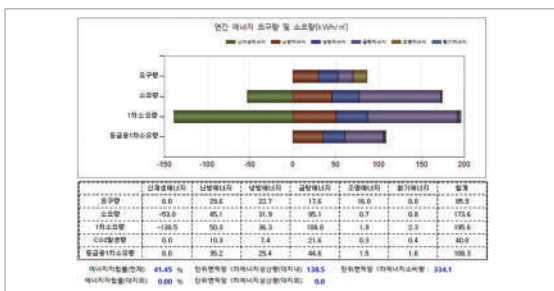
ECO2 프로그램을 이용한 해석결과 냉난방 요구량은 다음 그림과 같이 10월부터 5월까지의 난방 요구량이, 3월부터 11월까지의 냉방 요구량이 발생함을 확인할 수 있다.

[그림 7] 월별 냉난방 에너지 요구량



이러한 냉난방 에너지 요구량과 급탕, 조명, 환기 등 5대 에너지 요소에 대한 1차에너지소요량은 108.3 kWh/(m².yr) 수준으로 평가되어 80 이상 140 미만에 해당되어 1++ 등급을 획득하게 되었으며, 이 때 에너지 자립률은 41.45% 수준으로 확인되어 ZEB 4등급을 인증 받았다.

[그림 8] 연간 에너지 요구량, 소요량 및 자립률



03. 준공을 하고 난 후...

대상 현장은 첫단추부터 난관이었다. 전체 터파기를 해야 했는데, 북쪽으로 2차선 왕복차선, 동서남으로 기존 의료원 운영에 따른 앰블런스, 외래 환자 동선 등으로 복잡한 상황이라 시정에서는 보행자 안전 확보가 명확하게 될 때까지 공사 중지하라는 명령을 받은 것이다.

다음으로 절대 공기부족 이슈도 있었다. 초기 예정된 계약공기는 20개월인데, 공기산정 용역업체를 통해 재산정한 적정 공기는 30개월이었는데, 발주처에서는 입찰시 검토된 사항이라며 공기 연장은 없다는 입장이었기에 공기내 준공이 최고 목표였다고 할 수 있다.

그리고 부딪힌 또다른 난관, 제주도라는 섬의 특성상 3m만 굴착해도 암이 나오는 것이었다.

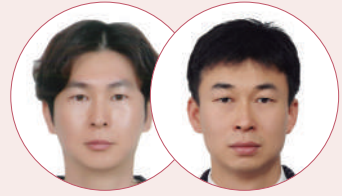
이러한 난관을 극복할 수 있었던 주요 전략으로는 (1)공사기간 연장 협의, (2)암파쇄공법 VE 시도 및 골조공사와 복합 공정 고려, (3)포장공사 분할 시공 등을 들 수 있다.

계약공기 20개월은 도저히 불가하여 26개월로 정리한 수정 공정표를 제시하였으나 제주도 공약사업으로 준공식 일정을 맞추어야 한다고 발주처에서 난색을 표했으며, 이에 2개월 추가 단축한 24개월로 재정리한 공격적인 최종 공정표를 제출하여 승인을 얻을 수 있었다.[그림 3] 다음으로 암파쇄공법으로 할암+브레이커 공법으로 되어 있던 것을 진동 브레이커 공법으로 변경하려고 시도하였으나, 본관동 입원 환자들과 인접 건물 등에서의 진동 민원을 이유로 거부당했고, 이에 지상층 골조가 있는 구역을 먼저 굴착하고, 지상층 골조가 없는 지하주차장 구역은 차순위로 변경하여 작업을 진행하였는데, 이것이 신의 한수였다고 생각한다. 결과적으로 해당 협력업체의 적극적인 지원과 제주도의 번덕스러운 날씨 조차 도와주어서 골조 목표 공기를 적절히 완수할 수 있었다. [그림 5] 마지막으로 이러한 고비들을 겪고 부대토목공사를 진행하려는데 뜻밖의 복병이 발생하였다. 대상 현장의 포장공사로 인하여 기존 본관동 동선과 장례식장 이용객의 동선이 끊어져 이용할 수 없는 상황이 발생하는 것이었다. 도면 검토시 7일 정도면 포장공사가 마무리될 것으로 예상했는데, 병원 및 장례식장 운영에 문제가 발생하지 않도록 지역토목업체와 협의하여 포장 면적을 분할 시공하게 되면서 21일 정도 소요되었지만 별다른 문제 없이 공사를 완료할 수 있었다.

마지막으로 가족과 멀리 떨어져 근무하는 직원들을 보면서 애뜻하더라는 감정을 가질 수 밖에 없는 상황이었음에도 직원들간의 화합과 기술자의 마인드로 적극적이고 능동적으로 업무를 해 준 현장 직원들의 노고에 다시 한번 감사드리며, 현장소장으로서 4번째 현장을 가장 많은 원가 개선으로 우수 준공현장 포상 수상과 우수한 안전 관리로 한국산업안전보건공단 감사패 및 성공적인 준공으로 제주도 지사 표창장을 수상하게 되었는데, 현장소장을 맡고 묵묵히 일해 온 현장 직원들에게 이 글을 빌어 감사한 마음을 전하는 바이다.

보성~임성리 철도사업에 적용된 연약지반 개량공법 소개

글 김갑석 / 보성~임성리 철도건설 제6공구 노반신설 기타공사 공무팀장
전화 061-463-6630 E-mail discard007@ssyenc.com
글 현재형 / 보성~임성리 철도건설 제6공구 노반신설 기타공사 현장소장
전화 061-463-6630 E-mail itakeyou@ssyenc.com



01. 사업개요

보성~임성리간 철도는 서쪽 호남선과 동쪽 경부선을 남해안을 따라 연결하여, 동서축 간선철도망을 구축함으로써 전라도 남해안 지역개발 촉진 및 철도이용 수요창출을 목적으로 추진된 사업이다.

[그림 1] 철도 간선망도



보성~임성리(무안군)간 단선철도를 건설하는데, 총연장 L=82.5km, 정거장 7개소이며, 사업시행 중 노선의 전철화가 결정되어 전력설비 공사까지 추가 시행되었다. 당초 목포에서 출발한 열차가 광주를 거쳐 보성까지 2시간20분 소요되던 노선을 개통하여 1시간3분으로 77분 단축하게 되었다.

[그림 2] 남해안 철도망 현황



2025.9.27일 개통하여, 시종점 기준으로 목포역에서 부전역(부산)까지 새마을호 4시간36분, 무궁화호 5시간37분 운행 중이다.

[그림 3] 열차 시운전 (ITX-새마을)



현재 착공을 앞둔 광주송정~순천 사업에 포함된 일부 비전철화 구간이 예정대로 전철화가 된다면 EMU-260(KTX-이음)을 타고 목포~부산까지 더욱 빠르고 편리하게 이동할 수 있겠다.

[그림 4] 보성~임성리 노선도 (목포~보성선)



보성~임성리 철도건설 사업은 2000년 기본계획이 수립되었고 2003년 턴키구간(2, 7공구) 노반공사부터 착공하여, 2015년 보완설계를 거쳐 나머지 기타공사(1, 3, 4, 5, 6공구)가 착공되었다.

이번에 소개할 당사 시공한 6공구는 전남 영암군 미암면~영암군 학산면 일원에 위치하며 총 연장 13.7km이다. 연약지반을 포함한 토공 9km구간과 교량 9개소, 터널 9개소 (NATM터널 6개소, 개착터널 3개소)가 있으며, 정거장 1개소 (영암역)이 공사범위에 포함된다.

[그림 5] 위치도 (6공구 과업구간)



02. 현장 여건

보성~임성리 6공구는 전남 영암군 일원에 있는데, 이곳은 서해안의 해수가 영산강에 합류되는 지류들을 따라 만조시 역류하는 갯벌지역이었는데, 목포시 옥암동과 영암군 삼호읍을 잇는 영산강 하구둑을 건설 후 형성된 영산호 주변을 매립하여 농지를 조성하는 간척사업이 진행된 지역이다.

[그림 6] 영산강 하구둑, 매립 후 영산호



이 매립지를 통과하는 구간은 설계시 이탄질 및 점성토 지반에

표준관입시험 N값을 이용하여 연약지반으로 판단되었다.

[표 1] 연약지반 판정기준 (실시설계보고서)

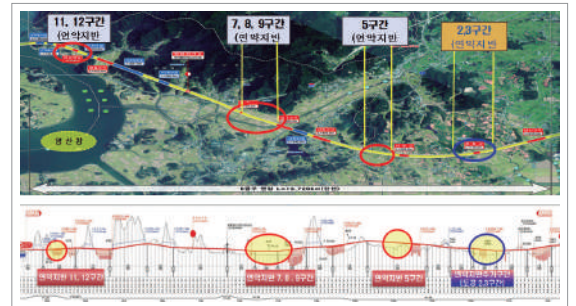
구분	이탄질 및 점성토 지반	사질토지반	비고
층두께	10m 미만	10m 이상	-
N치	4 이하	6 이하	10 이하
q_u (kN/m ²)	60 이하	100 이하	-
			일축압축강도

03. 연약지반

연약지반으로 확인된 총 1.7km 구간에 대한 시공안전성 확보를 위한 연약지반 처리공법이 검토 후 적용되었다.

성토구간, 교량구간, 횡단 통로박스(암거)이 복잡하게 얹혀 배치되어 있으므로 입체적인 시공이 요구되는 실정이다.

[그림 8] 연약지반 현황 (6공구)



구분	토공2, 3구간 (연약지반 발생)	토공5구간 (공법변경)	토공7, 8, 9구간 (공법변경)	토공11, 12구간 (공법변경)
연장 (1,727m)	L=700m	L=260m	L=986m	L=61m
계획 성토고	- 2구간: 8.5m, 560m - 3구간: 10m, 140m 과재쌓기: 263m	10.7~12.3m 과재쌓기: 264m	- 7구간: 9.7m, 465m - 8구간: 9.1m, 200m - 9구간: 6.8m, 321m 과재쌓기: 264m	- 11구간: 11.8m, 47m - 12구간: 10.9m, 14m 과재쌓기: 264m
	전체성토: 9.8~12.9m	전체성토: 14.9m	전체성토: 9.4~12.3m	전체성토: 14.4m
연약층	점성토 18~4.2m (N=0~7)	점성토 26~5.7m (N=6~7)	점성토 26~8.8m (N=0~7)	점성토 3.4~6.0m (N=0~4)

연약지반이 확인되면, 배수축진, 고결, 다짐, 치환, 지중구조물 보강 등 다양한 공법들과 시공성, 안정성, 경제성을 비교검토한 후 연약지반 처리공법을 결정하여야 한다.

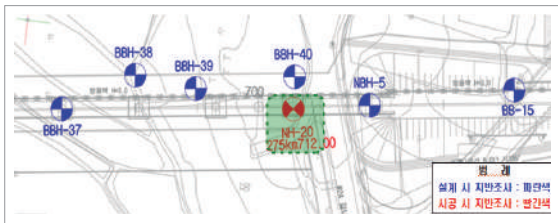
04. 연약지반 확인 (시추조사)

연약지반 현황과 개량에 대한 설계가 있다고 하더라도 이를 맹신하면 안된다. 보성~임성리 철도건설 사업은 2000년 기본설계하고 다시 선형을 변경하여 2004년 실시설계 후에 이를 다시 2015년 보완 설계하는 등 여러 차례 설계가 변경되었는데다가, 막상 실시공은 용지보상 문제로 2018년 이후가 되어서야 시행되었는데, 여러 차례의 추가 설계시 비용절감을 위하여 이전의 시추조사(보링)자료를 유사위치라는 명목으로 상당부분 활용하다보니 신뢰하기가 어렵다.

시공전 지반 확인을 위한 추가 시추조사가 필요한데 그 대표적인 사유는 아래와 같다.

- ① 그간의 지하수위나 퇴적층의 변화 주변에서 시행된 다른 공사들의 영향이 있을 수 있음.
- ② 기본·실시설계 당시에는 수동식 장비를 사용하여 직접 조작하는 현장 작업자에 따라 오류와 편차가 있으나, 현재는 기술발전에 따른 시추장비의 자동화로 보다 정확한 조사와 시험이 가능하게 되었음.
- ③ 기존 설계자료 활용기준 벗어남 (설계가 변경되면서 구조물 위치 변경되고 시추위치와 지반확인 위치가 이격거리가 큼)
- ④ 민원 및 장비진입 불가능 (설계당시 시추 위치가 경작중인 농경지거나 진입로 없어서 제 위치에서 시추를 하지 못함)

[그림 9] 시추조사 위치도 (기존/추가)



[그림 10] 지반조사보고서 및 검토결과

1.7 시공 시 조사개략 [7Page] · 계획노선 일대의 기존자료를 수집·분석하고 지질조사 및 시험을 수행하여 설계에 반영함으로써 합리적이고 경제적인 설계가 되도록 하였음 · 그러나 설계 시 지반조사를 수행하지 못한 구간, 기존자료 활용기준에 벗어났지만 민원 및 장비진입 불가능으로 인해 시추조사 불가능한 경우, 지질 이상대를 비롯한 지층의 다양한 변화와 같은 현장여건과 조사 및 시험의 한계성을 고려할 때 시공 시 필요한 사항에 대하여는 확인조사를 실시하여 최적인 시공이 이루어 질 수 있도록 조치하여야 함	
검토결과 [8Page] · 본 과업의 시공시 추가조사는 총 28공으로, 기존자료 활용기준에 벗어난 시추공은 13공, 민원 및 장비진입 불가능으로 미시행한 시추공은 15공임. · 시공 시에는 반드시 시추조사를 통하여 구조물 하부의 지층분포 현황을 확인 하고 이를 반영한 구조물 안정성을 재검토하여야 함.	

시공 중 추가 시추조사를 통해 아래와 같은 효과를 얻을 수 있다.

- ① 교량 터파기 시, 적정 공법 선정을 통한 안전한 시공
- ② 연약지반 설계 변경 (쇄석매트, 치환 등) 기초 자료 확보
- ③ 관급자재 (강관, PHC-Pile) Loss감소 및 신속한 공정 추진
- ④ 교대 측방유동 발생 사전 제어
- ⑤ 연속적인 시공

[그림 11] 추가시추조사(보링) 시행결과

시행 사진	보고서	조사 및 시험범위
		① 시추조사 ② 표준관입 시험 ③ 지하수위 측정 ④ 실내 시험 - 흙분류, 함수비, - 액성한계, 소성지수 - 밀도, 입도시험 - 재질비 비율 조사 - 일축압축강도시험 - 삼축압축강도시험 - 압밀시험 - 투수계수 측정

05. 토공사 시공

5.1 노반 (상부, 하부) 쌓기

철도 성토(쌓기)구간은 상부와 하부노반으로 구분되는데, 상부노반은 시공기면(F.L)로부터 1.5m 범위를 말하며 하부노반은 상부노반 아래서부터 원지반면까지의 쌓기 영역을 말한다. 시방서 기준상, 하부노반 재료는 300mm이하 입경이므로 현장내 터널 공사 중 발생한 발파암을 소할 후 유용하였으며, 연약지반은 하부노반 하부에 위치하므로 지반조건이 만족하는 깊이까지 치환하거나 연약지반 처리를 먼저 시행하여야 한다.

[그림 12] 쌓기 형상, 재료요건 (실시설계보고서)

구분	자갈재료		콘크리트 재료	
	상부노반	하부노반	상부노반	하부노반
최대입경	100mm이하	300mm이하	100mm이하	300mm이하
수정CBR	10이상	2.5이상	10이상	2.5이상
5mm제(4번제) 통과율	25~100%	-	25~100%	25~100%
0.075mm제(200번제) 통과율	0~25%	-	0~25%	0~25%
소결지수	10이하	-	10이하	10이하

하부 및 상부노반 시공 시, 층별 다짐두께를 준수하고 재료시험과 다짐 후 지지력 시험 (들밀도, 평판재하)을 통하여 다짐도를 확보한다.

[그림 13] 하부노반 시공 (터널 발파암 유용)



[그림 14] 하부노반 시공 (토사)

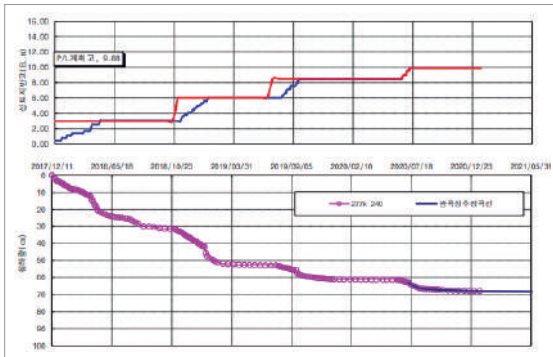


[그림 15] 상부노반 완료, 표면보호 (Seed-Spray)



하부노반 시공시, 연약지반구간에서의 쌓고 방치하기를 반복 하며 압밀축진을 시행하였는데, 이때 압밀시간과 잔류침하량 평가를 주기적으로 시행하고, 구간별로 지반 강도특성을 고려하여 한계쌓기고 검토하며 활동을 방지하고자 쌓기속도를 5cm/일=1.5m/월에 맞추어 시공하였다. 실제 유용할 수 있는 쌓기 재료의 반입 어려움, 기상여건에 따른 다짐 장비운용 제한 등으로 이를 초월하기는 어렵다.

[그림 16] 단계별 성토고, 침하량



5.2 강화노반

강화노반은 도상(자갈도상 또는 콘크리트도상)이 깔리기 전 노반분야 최종 시공기면이고, 궤도를 충분히 견고하게 지지하는 것과 함께 궤도에 대하여 적당한 탄성을 부여하고, 강화노반 하부의 노반 연약화를 방지하는 역할을 한다. 열차 운행 중에는 상부노반이 사용하중을 견딜 수 있을 정도로 하중을 분산시킴과 함께 상부노반에 대한 우수의 침입을 방지하기 위해 차수의 기능을 갖도록 해야 하는데, 따라서 충분히 다짐되어 도상자갈의 관입이 발생하지 않도록 필터층 역할도 하여야 한다. 시공 후 강화노반은 암석 원지반의 강도 만큼 단단하고 치밀하다. 일반 기타공사에서 노반 계약자의 시공범위는 이 강화노반까지이며, 시공완료 후 후속공정 분야로 인계한다.

[그림 17] 강화노반 완료 후 궤도분야로 인계



[그림 18] 인계후 궤도 (자갈도상, 침목, 레일)시공

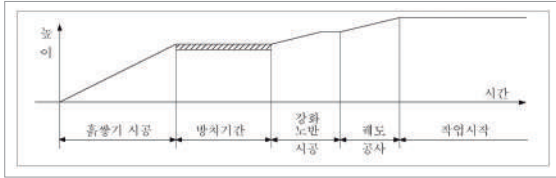


강화노반이 충분히 다짐작업이 되지 않았거나, 노반분야 시공 후 후속 분야 (전기, 통신, 전차선 등 인터페이스 분야)에서 전철주, 핸드홀, 횡단전선관 등의 각 분야 시설물 기초설치를 위하여 강화노반을 다시 굴착하는 경우 그 부위는 취약해져 우기에 비탈면 유실지점이 되는 경우가 많은데, 책임소재가 불분명하며 분야간 다툼이 발생할 수 있고, 거적덮기나 녹색토와 같은 식생형 표면보호나, 계비온이나 격자블럭 등의 추가 보강공사가 요구된다.

5.3 단계별 성토

강화노반이나 궤도가 쌓기부의 침하에 의하여 받는 영향을 줄이기 위하여 방치기간을 설정해야 하는데, 재료에 따라 최소 1개월~6개월 이상이 필요하고, 방치기간을 획일적으로 관리하지 않고 토공 유동계획과 후속 궤도분야로의 공사부지 인계 순서를 감안하여 구간별 세분화하여 방치기간을 설정 관리한다면 갑작스런 전구간 공정 멈춤도 예방하고 인터페이스 인계 일정 준수도 원활해진다.

[그림 19] 쌓기구간 토공 개념도



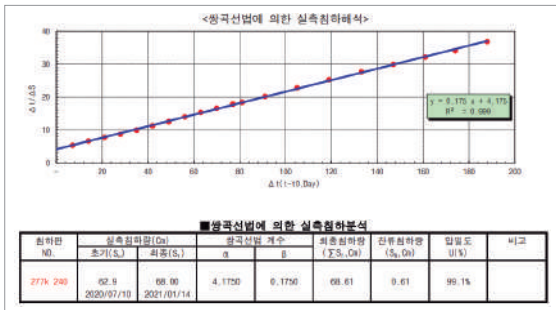
[그림 20] 비탈면 유실 (매트리스 게비온 보강)



5.4 계측 관리

연약지반이 위치한 토공구간은 설계시 단순화시킨 추정치의 불확실성을 보충하고, 침하특성 및 변형 특성을 파악하고자 계측기를 설치하여 침하량과 압밀도 분석을 통해 경과를 관리하고, 단계별 침하가 완료단계에 들어섰다고 판단된 이후에는 최종 단계(4단계) 성토압밀분석보고서를 비상주감리원의 확인을 받고 침하 완료를 선언하고, 강화노반을 시공한다.

[그림 21] 성토 압밀분석 검토보고서 (4단계)



계측기는 층별침하계, 간극수압계, 지하수위계, 지표침하판, 지중경사계 총5종을 설치하여 시공에 맞춰 주2회 > 주1회 > 2주 1회 간격으로 변위를 관찰한다.

[그림 22] 계측기 설치 (토공8구간)



06. 연약지반 처리

지반정수 오류 및 지반정보 부족에 따른 안정성이 부족하다고 판단되어 재검토가 필요했고, 특히 연약지반으로 판정되지 않았던 구간에서 통로박스 기초 공사를 하면서 터파기 면이 측방유동으로 붕괴되고 장비투입이 어려운 상황이 발생하여 추가 보링 후 다양한 연약지반 처리 공법이 추가 적용되었다.

보성~임성리 6공구 총연장 13.7km구간 중 연약지반이 2.1km에 달하여, 거의 모든 공종이 연약지반 위에서 시작하였다고 해도 지나치지 않는다.

[그림 23] 연약지반 크레인 장비 진입



[그림 24] 연약지반 구간 교량 기초 굴착



6.1 토목섬유

충분한 인장강도를 가진 PET 매트를 부설하여, 원지반과 상부 쌓기 토사를 분리시키고, 여과막의 기능을 하여 토사 입자의 유실을 막으면서 침출수를 배수시키고, 상부 중장비 통행이 용이하도록 하는 연약지반 개량 초기 단계 공정이다.

[그림 25] PET 매트 (토공 쌓기 구간)



[그림 26] PET 매트 부설 (통로박스 연결부)



6.2 고화제

교량 교각부는 쌓기부와 달리 넓은 범위의 지반개량공법 적용이 어렵다. 슈트파일 가시설 작업을 위하여 파일 항타장비의 진입도 어려운 여건이므로, 슬래그나 플라이애쉬 등의 산업부산물을 활용한 시멘트 대체재로 점성토를 굳히는 고화제를 살포하여 안정화 시킨 후 연약지반 구간으로의 장비진입을 용이하게 하였다.

[그림 27] 고화제 살포 (교량 교각부)



[그림 28] 연약지반 고화작업 중 전경



6.3 GCP

쇄석다짐말뚝 (GCP, Gravel Compaction Pile)을 시공하여 강성이 큰 쇄석자갈을 지중에 압입하여 말뚝을 형성하여 줌으로써 강성 증대, 다짐 효과, 투수층 형성하여 지중수 배출을 원활히 하는 등 효과가 있어서 널리 활용되고 있으나, 타 현장들도 살펴보면 역시 GCP 시공 시 소음 민원이 거세다. 가설방음벽이나 에어매트 설치 등 사전 조치와 주변 가옥이나 정온시설 협의가 필요하다. 특히 임신한 가축 사육농가는 유의하자.

[그림 29] GCP 전용장비



[그림 30] GCP 골재 투입 (페이로다)



6.4 PBD

얇은 플라스틱 재질의 배수판(Plastic Board Drain)을 지반 내에 일정 간격으로 수직 삽입하여, 지반 내부의 물이 이 배수판

을 따라 빠져나올 수 있도록 물길을 형성해 주는 공법이며, 흙
층이 설치하여 다수의 인공 배수로로 따라 흙속의 간극수가 단
기간 외부로 배출시켜 지반을 압밀하는 연약지반 개량 방식이
다. 수직도가 중요하므로 전용장비를 사용하여 정밀하게 시공
하고 배수판이 끊어지거나 휘는 것에 주의하여야 한다.

[그림 31] PBD 드레인 삽입



[그림 32] PBD 시공 후 상단부 노출 전경



07. 연약지반 구간의 문제점, 위험성

7.1 대형 장비 운용

연약지반은 장비에게는 지뢰밭이다. 현장에 장비 진입시 장
비의 특성이 맞는 주행성(Trafficability)을 확보 후 작업의 안
정성과 효율성을 높여야 하는데. 습지도저 → 도저 → 덤프트
럭 → 기타 순서 정도는 지켜야 하는데, 연약지반개량공사를
이해 투입되는 전용장비들(GCP, PBD)이 무게 중심이 불안한
키 큰 장비들이라 보니 이동 중이나 작업 중 전도사고가 종종
일어난다. 충분한 골재층 포설과 궤도 트랙 지지 강판 외에
배수에 유의하여야 한다.

[그림 33] 장비 전도 (GCP장비, 토공구간)



[그림 34] 장비 전도 (GCP장비, 토공구간)



7.2 축방유동

연약지반 구간에 위치한 교량에서는 고성토(8m 이상), 긴 말뚝
길이, 시간 경과에 따른 크리프 변위 등 복합적인 영향으로 변위
가 발생할 수 있다. 교대와 교각의 거동을 주의깊게 관찰하고 신
속한 보고와 대응조치가 필요하다. 변위는 교좌장치와 교대 벽
체와 슬래브 사이 (신축이음부) 유간을 살펴보면 확인할 수 있다.

[그림 35] 교대와 슬래브 사이 유간 협착



[그림 36] 교좌장치 변위



원인에 대한 설계시공 분야 검토 후, 추가 앵커블럭 설치 및 영구앵커 설치, 슬래브 DWS 절단, 교좌장치 수정 등 조치로 문제 해결하였다.

[그림 37] 신축이음 횡단 궤도, 시스템시설 이설



[그림 38] 영구앵커, 콘크리트 블럭 설치



[그림 39] 슬래브 절단 (다이아몬드와이어쏘우)



7.3 궤도 처짐

개통 전 열차 시운전을 하면서, 다수의 지점에서 궤도 처짐이 발생되는데, 주로 토공부와 구조물 접속부, 통로박스 횡단 저토피 구간 등에서 발생한다.

주된 원인은 대부분 노반 토목공사에서 기인하므로, 성토체가 안정화단계에 머무르고 있는지 성토부 측면에 침하의 흔적이나 하부 횡단 박스구조물 신축이음부에 토사 노출 등 파괴

양상은 없는지 조사하여, 필요시 성토체 재시공이나 그라우팅 주입과 교반 등 지반보강 시행하여야 하며, 침하량이 설계기준 이하인 경미한 수준일 경우에는 궤도분야에서 자갈보충 및 개통 전 최종 궤도인상 작업을 통하여 운행 기능을 회복시키고 관찰한다.

[그림 40] 궤도 처짐 (토공~통로박스 접속부)



[그림 41] 잔류침하량 설계허용값(철도설계기준)

구분	설계허용값	비고
자갈도상	10.0cm	-철도설계기준에 의거 잔류침하량 10cm 이내로 규정
콘크리트도상	2.5cm	-철도설계기준 및 호남고속철도설계지침에 의거 원지반의 잔류침하량 2.5cm로 규정 -열차하중에 의한 침하 제외 (5mm) 포함시 침하량 3.0cm

08. 맺음말

보성~임성리 6공구는 영산강 하구 매립지 연약지반을 관통하고, 연약지반 처리 후 쌓기와 방치를 여러 차례 반복하며, 성토체는 터널 발파암이 많은 인근공구로부터 유용암을 반입해서 쌓기 하는 등 복합적이고, 여기 연약지반 구간은 여유시간이 없는 곧 CP(Critical Pass)가 되었고, 현장과 설계가 상이한 부분이 많아서 광범위한 설계변경까지 시행되는 등 현장관리의 어려움이 컸다.

[그림 42] 연약지반 시공완료, 궤도부설



이번 연약지반 처리과정 소개시에는 단순하게 공법에 집중하기보다는 공사준비, 지반확인, 설계검토, 계측관리, 사고 및 민원예방, 하자보수, 타분야 인계까지 일련의 과정을 직원들이 촬영한 현장 사진과 함께 생동감 있게 전달하여 유사한 공정을 앞둔 동료들에게 향후 발생할 리스크들을 미리 살펴볼 수 있도록 하여 도움이 되고자 하였다.

선배들로부터 “현장은 살아 움직이는 동물”이라는 말을 자주 들었고 요즘은 후배들에게 표현한다. 가만히 있지 않고 끊임 없이 변화하여, 예측 불가능한 생명체라 보고 관찰하고 다독여서 길들여야 하는 것이 현장이다. 18km 박찬 현장을 뛰어 다니면서 확인, 검토, 협의, 보고, 판단, 조치, 기록, 피드백하며 무사개통 준공까지 이끈 직원들 노고에 감사드리며, 우리 가족들이 안전하고 쾌적하게 이용할 또 하나의 철도노선 신설에 참여할 수 있어서 영광스럽다.



글 허남태 / 토목기술팀 부장 전화 02-3433-7530 E-mail abhnt@ssyenc.com
 글 이용주 / 토목기술팀 차장 전화 02-3433-7779 E-mail yjlee@ssyenc.com
 글 김지해 / 토목기술팀 대리 전화 02-3433-7388 E-mail kim.jh@ssyenc.com
 글 유지완 / 성보지오텍 전무 전화 02-2215-9793 E-mail yoojw@sbgeo.co.kr

01. 머리말

최근 터널 계획 및 설계 단계에서는 용지 매입 비용 절감과 자연환경 훼손 최소화를 목적으로 터널 간 이격거리를 매우 근접하게 설정하는 사례가 증가하고 있다. 이와 같은 근접 터널 시공 조건에서는 굴착 과정 중 낙석 발생, 절리 운동 등에 따른 안정성 문제가 빈번히 제기되고 있으며, 이를 예방하기 위하여 발파로 인한 피해가 발생하지 않는 수준의 발파진동 허용기준을 설정한 후 발파 설계가 수행되고 있다.

그러나 지하 구조물은 구속되지 않은 지상 구조물에 비해 진동에 대한 저항성이 상대적으로 우수하므로, 발파진동 자체의 영향보다는 발파로 인해 형성되는 굴착손상영역(Excavation Damage Zone, EDZ)을 검토하고 이를 최소화할 수 있는 발파 설계가 보다 중요하다. 터널 굴착 시 암반손상을 최소화하기 위한 대표적인 조절발파 공법으로는 Smooth Blasting 및 Line Drilling 공법이 일반적으로 적용되고 있다.

따라서 본 고에서는 암반 높이 10m 조건의 박층 암반 구간을 대상으로 상호 근접 발파에 따른 굴착손상영역을 이론적 검토와 수치해석을 통해 분석하고, 이를 바탕으로 암반손상을 최소화할 수 있는 최적의 발파공법을 제시하고자 한다.

02. 암반손상 최소화 발파공법

2.1 Smooth Blasting 공법

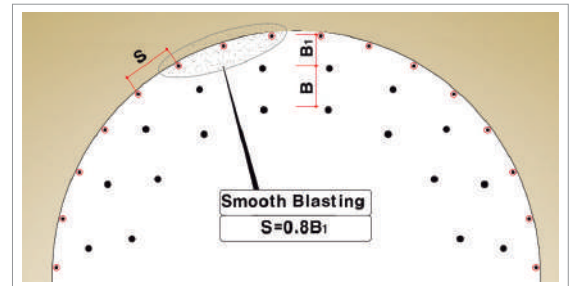
Smooth Blasting 공법은 1950~1960년대 스웨덴에서 개발된 조절발파 기법으로, 기존 재래식 발파에서 굴착 설계선 외측으로 발생하는 여굴(Backbreak) 및 불필요한 균열을 억제하기 위해 고안되었다. 재래식 발파는 굴착면 외측 암반의 지지

력을 약화시켜 추가적인 보강공사를 유발함으로써 경제성 및 안전성 측면에서 불리한 결과를 초래하였다.

Smooth Blasting은 최종 굴착선 인접부에 소량의 폭약을 장전한 발파공을 설치하고, 최소 지연 시간으로 기폭함으로써 암반 손상 및 이완영역을 최소화하는 공법이다. 이때 발파공에는 단위 길이당 장약량을 의도적으로 감소시키고, 폭약과 공벽 사이에 공간을 두는 디커플링(decoupling) 방식을 적용하여 폭발압력을 제어한다. 또한 발파공 간격을 일반 발파보다 좁게 설정하여 폭발 에너지가 굴착선 전체에 균일하게 전달되도록 한다.

Smooth Blasting에서 공간격(Spacing, S)과 저항선(Burden, B)의 비율은 일반적으로 0.8 이하로 설정하며, 저항선은 공간격보다 크게 설정하는 것이 원칙이다. 적용 폭약은 디커플링 효과를 극대화하기 위하여 정밀폭약을 사용한다. [그림 1]은 터널 굴착 시 적용되는 Smooth Blasting 발파패턴을 나타낸 것이다.

[그림 1] Smooth Blasting 발파패턴



한편, 본 공법은 천공 위치 및 방향에 대한 정밀한 시공 관리가 요구되며, 천공 오차 발생 시 발파 효과가 크게 저하될 수 있다. 또한 정밀폭약 사용으로 인한 공사비 증가와 함께, 절리 및 균열이 발달한 연약한 암반 조건에서는 폭발 에너지가 균열을 따라 소산되어 기대한 효과를 확보하기 어려운 단점이 있다.

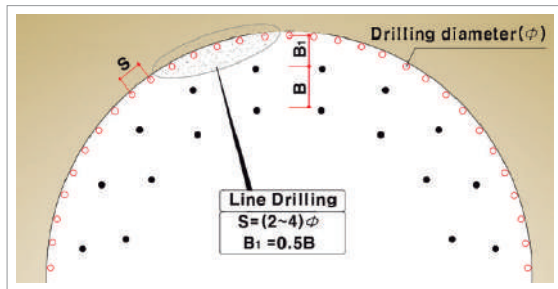
2.2 Line Drilling 공법

Line Drilling 공법은 발파 시 파괴가 예상되는 굴착면을 따라 소구경 빈공들을 좁은 간격으로 배열하여 인위적인 약대(weak plane)를 형성함으로써 과굴착을 제어하는 기법이다. 본 공법은 1933년 미국 Howard에 의해 uncharged hole을 이용한 과굴착 제어 가능성이 처음 제시되었으며, 이후 1940년대 U.S. Bureau of Mines 기술보고서를 통해 석회석 채석장에서 적용 사례가 보고되었다.

1952년 스웨덴 Vattenfall은 Harsprånget 및 Stornorrforss 수력발전소 건설 프로젝트에서 Line Drilling을 체계화하였으며, 이후 'Swedish method'로 알려지게 되었다. Ash(1955)는 노천광산 절개면 안정화를 위한 조절발파 기법으로 Line Drilling의 활용 가능성을 제시하였다. 이처럼 Line Drilling은 초기에는 여굴 제어를 목적으로 적용되었으나, 이후 발파진동 제어 측면에서도 활용되고 있다.

Line Drilling에서 천공 직경은 일반적으로 75 mm 이하로 적용되며, 공간격은 천공 직경의 약 2~4배로 설정한다. 대구경 천공은 효과는 우수하나 시공비 증가 요인이 된다. 본 공법은 천공 정밀도에 따라 효과 차이가 크게 나타나며, 절리가 발달한 암반 조건에서는 Smooth Blasting보다 우수한 결과를 보이는 경우도 있다. [그림 2]는 터널 굴착 시 적용되는 Line Drilling 발파패턴을 나타낸 것이다.

[그림 2] Line Drilling 발파패턴



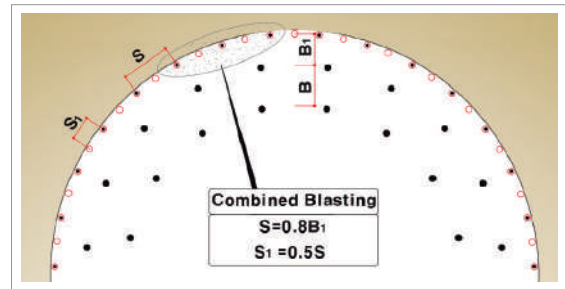
반면, 균질한 암반 조건을 제외하고는 결과 예측이 어렵고, 천공 간격이 좁아 천공 수량 증가에 따른 공사비 및 공기 증가가 단점으로 지적된다. 또한 소규모 천공 오차에도 발파 결과가 민감하게 변화하는 한계가 있다.

2.3 Combined Blasting 공법

Combined Blasting 공법은 Smooth Blasting과 Line Drilling의 단점 및 적용 한계를 보완하기 위한 조합형 조절발파 공법으로, 굴착 예정선을 따라 연속적인 균열층을 형성하여 암반 손상을 최소화하는 것을 목표로 한다.

장약 방식은 Smooth Blasting과 동일하게 정밀폭약을 이용한 디커플링 장약을 적용하며, 절리가 발달한 암반 조건에서의 적용성을 향상시키기 위해 Smooth Blasting 발파공 사이에 라인드릴링공(균열유도공)을 추가로 설치한다. 균열유도공은 발파시 암반에 일정한 방향성을 가진 균열을 유도함으로써 매끄러운 파괴면을 형성시키며, 동시에 주발파로부터 전달되는 충격에너지를 일부 흡수하여 발파진동 저감 효과를 제공한다. [그림 3]은 터널 굴착 시 Combined Blasting 발파패턴을 나타낸 것이다.

[그림 3] Combined Blasting 발파패턴



본 공법의 단점으로는 천공 수량 증가에 따른 공사비 상승과 더불어, 장약 작업 시 외곽부 장약공과 균열유도공을 혼동할 경우 국부적인 과장약으로 인한 과굴착 발생 가능성이 있다는 점이 있다.

03. 암반손상범위 검토

3.1 암반손상 범위의 정의

굴착에 의해 영향을 받는 터널 주변 암반은 모암과 상이한 역학적 특성을 나타내며, 일반적으로 파괴영역(failure zone), 손상영역(damage zone), 교란영역(disturbed zone)으로 구분된다.

발파에 의한 암반 거동은 크게 세 단계로 구분된다. 첫 번째 단계에서는 폭약의 폭력에 의해 고온·고압이 발생하여 발파공 벽면 암석이 파쇄되며 발파공이 팽창한다. 두 번째 단계에서

는 압축응력파가 발파공을 중심으로 방사형으로 전파되며, 이 응력파가 막장 자유면에서 반사될 경우 발파공과 자유면 사이의 암반에는 인장응력이 발생한다. 이 인장응력이 암석의 인장강도를 초과하면 자유면 부근 암석이 파괴된다. 이를 홉킨스효과(Hopkinson effect)라고 한다. 세 번째 단계에서는 폭발 후 방출된 고압 가스가 균열 내부로 침투하여 균열을 확장시키며, 이로 인해 발파공과 자유면 사이의 암석이 파괴·분출된다. 이때 자유면 방향으로 발생하는 인장파괴 및 가스압에 의한 분출 영역을 파괴영역이라 정의한다.

손상영역은 자유면 반대 방향의 무자유면에서 미소 균열이 발생하여 변형계수 감소, 투수계수 증가 등 암반 물성의 영구적인 변화가 발생하는 영역을 의미한다. 교란영역은 굴착에 따른 응력 재분배로 인해 응력 상태 또는 수리적 특성의 변화가 발생하는 영역으로, 암반 물성 변화가 상대적으로 미미하거나 시간이 경과함에 따라 회복될 수 있는 영역으로 정의된다.

3.2 이론적 검토

발파에 따른 암반손상 범위는 단순히 발파공 인근의 근거리 진동속도만으로 결정되는 것이 아니라, 변형률 손상모델에서 제시하는 손상 발생 임계속도(V_d)를 초과하는 영역에서 형성되는 것으로 판단된다. 손상임계 진동속도 V_d 는 [식 1]과 같이 정의된다.

[식 1] 손상임계 진동속도

$$V_d = 0.1 \times UCS \times \frac{V_p}{E}$$

여기서, V_d : 손상임계 진동속도(m/sec)

UCS : 일축압축강도(MPa)

E : 탄성계수(MPa)

V_p : 암반의 탄성파 속도(m/sec)

본 검토에서 적용한 안산암 경암 구간의 물성치 및 손상 발생 임계속도는 [표 1]에 제시하였다.

[표 1] 물성치 및 임계속도

일축압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	탄성파속도 (m/sec)	손상임계 진동속도 (mm/sec)
125	11,988	2,507	2,614

암반 손상 범위를 산정하기 위한 근거리 진동속도는 SVEDEFO 제안식을 적용하였다. SVEDEFO는 다양한 거리 및 장약밀도 조건에서 발생하는 진동속도를 추정하기 위한 경험식을 제시하였으며, 근거리 진동속도 V 는 [식 2]와 같이 정의되며 차원은 없다.

[식 2] 근거리 진동속도

$$V = 700 \times \frac{Q^{0.7}}{R^{1.5}}$$

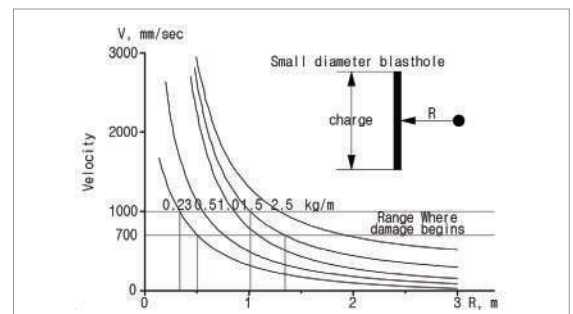
여기서, V : 진동속도(mm/sec)

Q : 장약밀도(kg/m)

R : 거리(m)

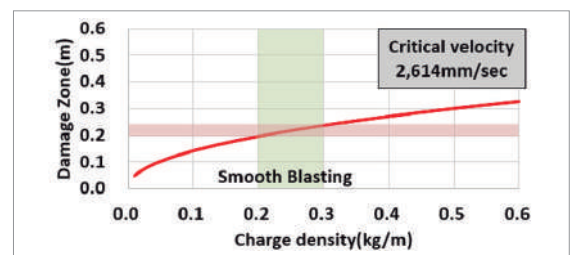
SVEDEFO 제안식에 의해 산정된 진동속도 V 가 손상임계 진동속도 V_d 이상일 경우 해당 영역에서 암반손상이 발생하는 것으로 판단하였다. [그림 4]는 장약밀도별 진동속도와 거리의 관계를 나타낸 것이다.

[그림 4] 장약밀도별 진동속도와 거리의 관계



일반적인 Smooth Blasting의 장약밀도는 0.2~0.3kg/m 범위로 적용되며, 임계속도 2,614mm/sec 조건에서 암반손상범위는 [그림 5]에 나타난 바와 같이 약 0.20~0.24m로 분석되었다.

[그림 5] 장약밀도별 손상범위



3.3 수치해석을 통한 검토

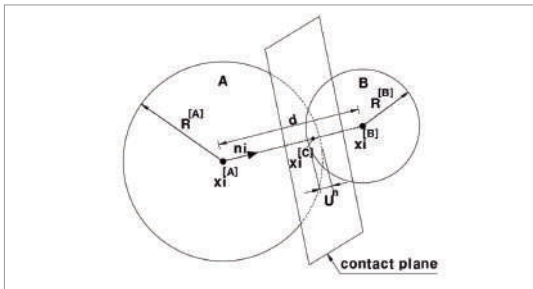
발파에 따른 암반 파괴 메커니즘을 정밀하게 규명하기 위해서는 실험적 연구가 요구되나, 이는 시간·비용·안전성 측면에서 많은 제약이 따른다. 이러한 한계를 보완하기 위해 본 고에서는 DEM(Distinct Element Method) 기반의 동적 해석 프로그램인 PFC2D(Particle Flow Code 2-Dimension)를 적용하여 발파 거동을 수치적으로 모사하였다.

1) 수치해석 개요

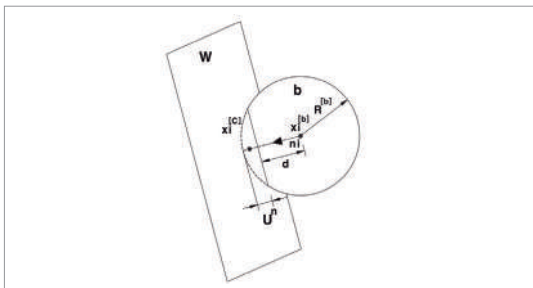
PFC2D는 Cundall & Strack(1979)이 개발한 프로그램으로, Ball과 Wall 요소를 기본 구성 요소로 한다. Ball 요소는 운동 방정식을 따르며 Ball-Ball 또는 Ball-Wall 간 접촉을 통해 상호작용한다. 변위 크기에 제한이 없고, 블록 분리 및 파괴 모델링이 가능하여 발파 해석에 유리하다.

각 Ball은 강성체로 가정되며, 접촉 발생 시 법선 및 전단 방향의 스프링 강성과 결합강도가 발현되어 운동방정식에 따라 거동한다. Wall 요소는 운동방정식과 무관하며, 속도 경계조건을 부여하고 Ball과의 접촉 작용만 고려된다. [그림 6]은 PFC2D에서의 기본 요소 접촉 개념을 나타낸 것이다.

[그림 6] 장약밀도별 손상범위



(a) ball-ball 사이의 접촉 형태 및 접촉력



(b) ball-wall 사이의 접촉 형태 및 접촉력

2) 발파압력 산출

최대 발파압력은 보어홀 압력 산정을 위한 경험식 중 Sanchidrián 등의 제안식을 적용하여 산정하였다. 본 해석에서는 천공 직경과 폭약 직경 차이에 따른 디커플링 효과를 고려하였다. 발파압력 이력은 감쇠함수(decay function)를 이용하여 시간 이력 형태로 모델링하였으며, 최대압력 도달시간은 0.0003361sec로 설정하였다. 발파압력 산정식은 [표 2]에 제시하였다.

[표 2] 발파압력 모사를 위한 식

구분	추정식
보어홀압력 (Borehole pressure)	$Pb = \frac{228}{1 + 0.8\rho_e} \rho_e v_e^2$
디커플링 효과 (Decoupling)	$Pb, dc = Pb \left(\sqrt{\frac{Le \cdot re}{Lb \cdot rb}} \right)^\alpha$
감쇠함수 (Decay function)	$Fd = \frac{t}{tr} \exp \left(1 - \frac{t}{tr} \right)$

여기서, Pb : 최대폭공압력

ρ_e : 화약밀도 (g/cm³)

v_e : 폭발속도 (m/sec)

Pb, dc : 디커플링 장약시의 보어홀 압력(MPa)

Le : 장약부분의 길이 (m)

Lb : 발파공의 길이 (m)

re : 폭약의 직경 (mm)

rb : 발파공의 직경 (mm)

t : 시간(sec)

tr : 최대압력 도달시간(sec)

3) 해석모델링

PFC2D는 ball과 wall로 구성되며, 암반손상을 분석하기 위해 ball 배열 방식은 2가지를 고려하였다. 첫째 충격파 전파에 따른 입자의 동적 응답을 왜곡 없이 표현할 수 있는 배열이어야 한다. 둘째 암반의 물리 역학적 특성(Density, Young's modulus, Poisson's ratio, Uniaxial compressive strength)을 잘 재연하는 배열이어야 한다. Hexagonal(Shifted rows) and Grid 배열은 볼 중심이 규칙적으로 정렬되어 있어, 발파 충격파가 특정 방향으로만 빠

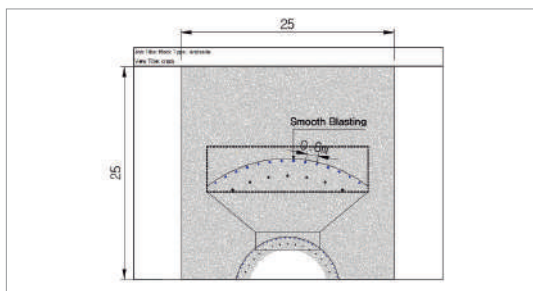
르게 전파되는 인위적인 이방성(anisotropy)을 발생시킨다. 반면 Random 배열은 입자 간 접촉 방향이 통계적으로 등방(isotropic)이므로, 충격파 및 균열 전파가 모든 방향으로 자연스럽게 분산된다. 또한, 볼 간 결합(bond) 파괴를 통한 손상 모델링 시, Grid 배열에서는 특정 균열 경로(preferred path)가 형성될 가능성이 높아 실험 결과와 괴리가 발생할 수 있다. Random 배열에서는 균열이 통계적으로 분산되어 형성되므로, 손상 분포(damage zone) 및 균열 밀도(crack density)를 더 현실적으로 재현할 수 있다.

실제 암반은 서로 다른 크기의 입자들이 혼재하며, 공극률도 일관되지 않는다. Random 배열 방식은 반경(radius)을 일정 비율로 분포시키거나, 정규분포/로그정규분포를 적용한 크기 분포를 주어 생성된 무작위 밀집체는, 실제 암반의 물리 역학적 특성을 보다 잘 모사할 수 있다.

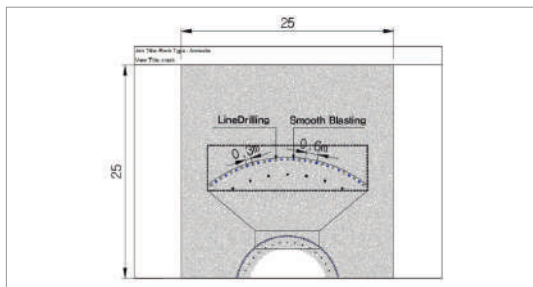
해석 모델은 암반내 터널을 굴착하는 것을 모델링하였으며, 해석을 단순화 하기 위해 터널 천단부를 기준으로 하였다.

해석 모델링은 직사각형으로 하였으며 가로 25m, 세로 25m로 하였고, [그림 7]은 터널발파시 모델링이며, [그림 8]은 터널 상부 노천발파시 모델링을 나타낸 것이다.

[그림 7] 터널발파 모델링

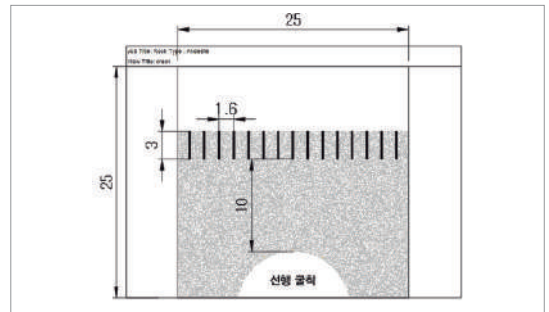


(a) Smooth Blasting

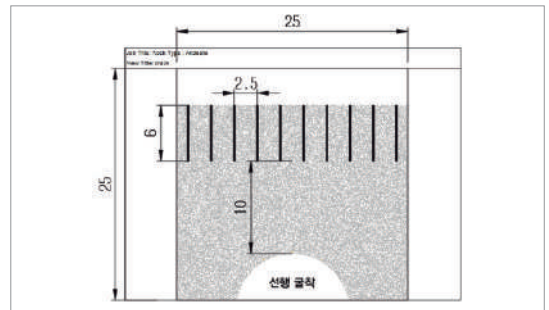


(b) Combined Blasting

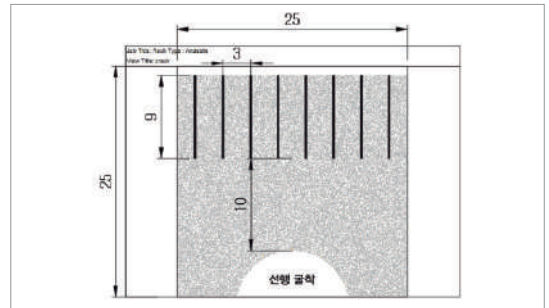
[그림 8] 노천발파 모델링



(a) Z=3.0m, 중규모진동제어발파



(b) Z=6.0m, 대발파(2)

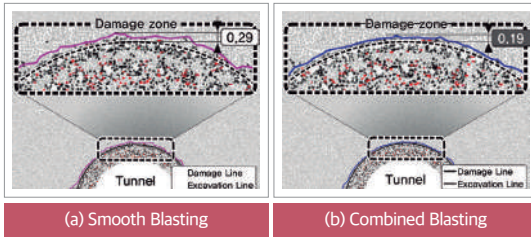


(c) Z=9.0m, 대발파(1)

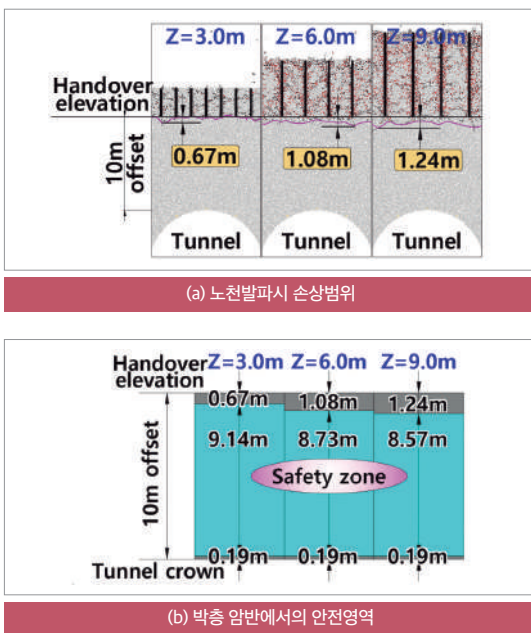
4) 해석결과

[그림 9]는 터널 발파 공법별 손상 영역을 비교한 결과를, [그림 10]은 상부 노천발파 공법별 손상 영역과 암반 높이 10m 조건에서의 안전 영역을 나타낸 것이다. 해석 결과, 터널 발파 시 균열유도공을 이용한 Combined Blasting공법은 일반적인 Smooth Blasting 대비 손상 영역이 약 35% 감소한 0.19m로 분석되었다. 또한 노천발파의 경우 손상 영역은 0.67~1.24m로 나타났다. 결과적으로 암반 높이가 10m인 박층암반에서의 안전영역은 0.857~0.914m이다.

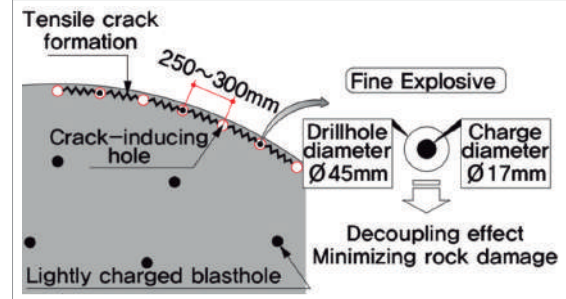
[그림 9] 터널발파시 손상범위



[그림 10] 노천발파시 손상범위 및
박층 암반에서의 안전영역안전영역



[그림 11] Combined Blasting 효과



05. 맺음말

본 고에서는 암반 높이 10m의 저토피 박층 암반 구간을 대상으로 상호 근접 발파 시 발생하는 굴착손상영역을 이론적 검토와 수치해석을 통해 분석하였다. SVEDEFO 제안식을 적용한 이론적 검토 결과, Smooth Blasting 적용 시 암반손상 범위는 약 0.20~0.24m로 산정되었다.

PFC2D를 이용한 수치해석 결과, 터널 발파 시 균열유도공을 병행한 Combined Blasting 공법은 기존 Smooth Blasting 대비 손상 영역을 약 35% 저감하는 것으로 분석되었다. 또한 노천발파 조건에서는 손상 범위가 0.67~1.24m로 나타났으며, Combined Blasting 적용 시 암반 높이 10m 조건에서의 안전 영역은 0.857~0.914m로 평가되었다.

이상의 결과를 종합할 때, Combined Blasting 공법은 근접 굴착 조건에서 암반 손상을 효과적으로 억제할 수 있는 최적의 발파공법으로 제안될 수 있다.

04. 발파공법 검토

터널 발파 시 암반 손상을 최소화하기 위한 일반적인 공법은 Smooth Blasting이나, 균열유도공을 병행한 Combined Blasting이 보다 효과적인 것으로 평가된다. 이 공법은 디커플링 효과를 활용하면서 균열유도공을 설치하여 인장파괴로 인한 균열 발생을 효과적으로 제어한다. [그림 11]은 Combined Blasting의 적용 효과를 나타낸 것으로, 발파 후 발생한 응력파가 균열유도공을 통해 전달되며 흠킨스 효과에 의해 균열이 형성되어 모암의 손상을 억제하는 메커니즘을 보여준다.

※ 참고문헌

01. 응용발파기술, Stig O.Olofsson, 1995
02. 발파공학, 기경철외, 2002
03. PFC2D에서의 발파에 의한 파괴 메커니즘의 수치적 모델링, 정용훈외, 2006
04. Analysis of blasting efficiency using crack-inducing holes and pre-splitting method in blasting, 유지원외, 2025
05. 가덕도신공항 접근철도 제2공구 건설공사(T/K) 지반조사 보고서, 2025



현장탐방

On-site Interview

- 104 | 두바이 크릭워터스 레지던스 타워 A009, A011 (Creek Waters A009, A011)
- 108 | 여의도 63빌딩 별관 및 지하 리모델링 (풍피두센터 한화 서울)

해외 현장탐방

두바이 크릭워터스 레지던스 타워 A009, A011 (Creek Waters A009, A011)



두바이 도심의 새로운 성장축으로 주목받는 Creek Harbour 지역. 이곳은 현재 두바이 다운타운보다 약 두 배 넓은 규모로 조성 중인 대형 워터프런트 커뮤니티로, 향후 Creek Tower를 중심으로 한 차세대 랜드마크 개발이 진행되고 있다. 쌍용건설이 시공을 맡은 크릭워터스 레지던스 타워 (Creek Waters A009 & A011) 프로젝트는 이 Creek Harbour 내 Creek Island에 위치한 마지막 주거 타워로, 지역 개발의 완성을 상징하는 핵심 프로젝트다.

당 현장은 지하 및 지상 고층 주거 타워로 구성된 고급 주거시설로, Creek Harbour가 지향하는 미래형 럭셔리 라이프스타일을 구현하는 상징적 건축물이다. 특히 본 프로젝트는 UAE 최대 부동산 개발사이자 세계적인 디벨로퍼인 EMAAR가 발주한 사업으로, 쌍용건설이 2015년 두바이 재진출 이후 처음으로 EMAAR와 체결한 프로젝트라는 점에서 의미가 크다.

그동안 다수의 EMAAR 프로젝트 입찰에 참여하며 축적한 경험과 기술력을 바탕으로 이뤄낸 이번 수주는, 당사의 중동 시장 내 신

뢰도와 시공 경쟁력을 다시 한번 입증한 사례로 평가된다. 또한 Creek Harbour 전체 개발이 단계적으로 진행되는 가운데, 크릭워터스 레지던스 타워 프로젝트의 성공적인 수행은 향후 EMAAR 발주 추가 프로젝트 참여 가능성을 여는 중요한 교두보가 될 것으로 기대된다.

이러한 전략적 의미와 상징성을 지닌 당 현장이 어떤 기술적 접근과 현장 운영을 통해 진행되고 있는지, 이어지는 Q&A를 통해 자세히 살펴본다.

두바이 크릭워터스 A009, A011 (Creek Waters A009, A011)

- 발주처 : The Lagoons Phase One LLC (Emaar의 SPV)
- 규모 : A009(지하 2층~지상 50층, 450세대),
A011(지하 2층~지상 50층, 455세대)
- 위치 : Creek Harbour
- 완공일 : 2024년 2월~2027년 1월

기술을 말하다!

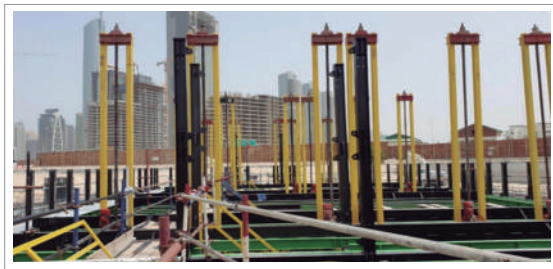
직원 인터뷰 Q&A

Q.

Core wall 형틀 시스템으로 TURIIM사의 Jumpform system 을 적용했는데, 장/단점 등을 소개 바랍니다.

▶ 김진영 부장(공무팀장) : 현장 초기 현지의 다양한 형틀 시스템을 검토하던 중 골조공사의 적기 완료 및 목표 Cycle 달성을 위해 core wall 및 shear wall을 포함하는 수직부재 전체를 일괄로 타설하며 상승할 수 있는 TURIIM사의 Jumpform 시스템을 선정했습니다. 기본적으로 거푸집과 작업 발판을 일체화해 크레인 없이 스스로 상승시키는 형틀 공법으로 최근 현지의 고층 건축물 현장에서 널리 사용되고 있습니다.

[그림 1] Jack 설치 모습

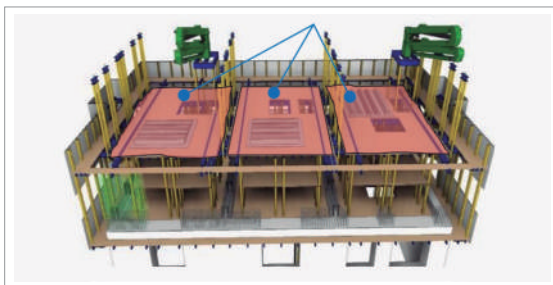


유압을 이용하여 상승시키는 Jumpform system과는 다르게 전기모터로 jack의 screw를 회전시키며 상승하는 방식이 특징입니다.

TURIIM Jumpform system의 주요 장단점은 아래와 같습니다.

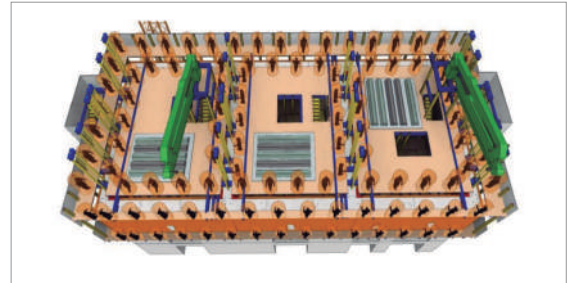
장점

[그림 2] Storage Area



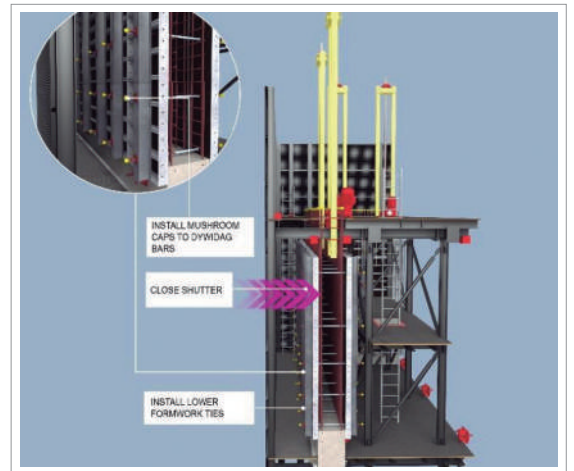
1) 공정 관리 : 형틀 시스템 상승 시 크레인이 불필요하고 top platform을 자재 storage로 사용이 가능해 기상 조건의 영향을 덜 받아 공정 관리가 용이함.

[그림 3] Overall Working Platform



2) 안전성 향상 : 거푸집, 철근 배근, 콘크리트 타설, 마감 작업을 위한 다단 작업대가 일체형으로 완전히 폐쇄된 Cage 구조로 설계되어 있어 추락/낙하물 사고 등의 안전 위험을 최소화.

[그림 4] Overall Working Platform



3) 생산성 향상 : 거푸집의 해체와 재설치 과정이 단순해 생산성이 향상됨.

단점

1) 높은 초기 비용 : 시스템 설계 및 장비 임대/구매 비용이 일반 거푸집에 비해 다소 고가.
2) 설치 전문성 : 초기 설치 단계에서 전문 인력과 정밀한 Setting 시간이 필요.
3) 유연성 부족 : 구조물의 형태가 총별로 급격하게 변하는 디자인의 경우 적용이 어려움.

4) 수직도 관리 : Core wall을 포함한 수직 부재 전체 일괄 타설 방식이므로 초기 Alignment 관리가 중요하며, 정기적인 수직도 모니터링이 필요.

당 현장은 TURIM Jumpform system을 사용하여 골조공사 기준층 평균 6일 cycle을 달성하였고, core 및 수직부재 골조 공사를 Baseline 계획 대비 1개월 이상 조기 완료했습니다. 당사가 추후 수주할 고층 프로젝트의 기준층 Core 및 수직부재의 변형이 적을 경우 해당 형틀 시스템 적용을 충분히 고려해 볼 수 있다고 생각합니다.

Q.

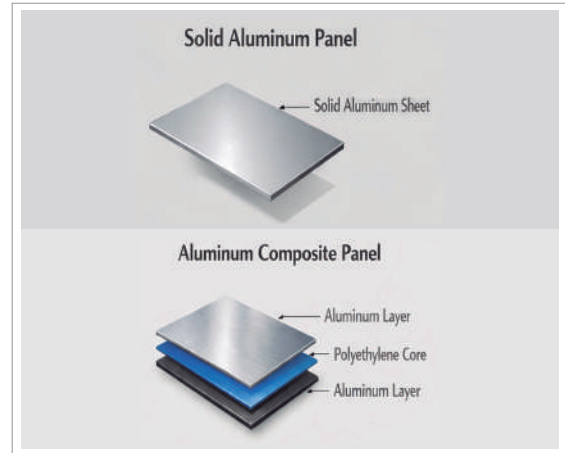
외벽 파사드 마감이 당초 Solid Aluminum 패널로 설계되어 있었으나, 알루미늄 복합패널 (ACP)로 설계변경을 진행했는데, 변경된 사유 및 변경으로 인한 개선사항은 무엇인가요?

▶ 권철우 차장(공무) : 골조공사와 더불어 Façade 공사가 현장 공기에 결정적인 영향을 주기 때문에 Façade 공사의 시공성을 향상하기 위해 디자인 검토를 진행했습니다.

최근 두바이 건설경기 활황에 따른 자재 공급의 어려움 및 원자재 단가 상승 등이 우려되어 IFC(Issued for construction)상 Façade cladding 자재 중 Solid Aluminum panel을 ACP로 변경하는 것이 적합하다는 판단을 하였고, 아래의 사유로 발주처를 설득하여 설계변경을 진행했습니다.

- 1) 평활도 : 솔리드 패널은 두께가 얇을 경우 처짐(울렁임) 현상이 발생하기 쉽지만, ACP는 샌드위치 구조 덕분에 대형 면적에서도 표면이 매우 평평하게 유지되어 품질 관리에 용이.
- 2) 경량성 : 동일한 강성을 유지하면서도 솔리드 패널보다 경량으로 시공 효율을 높여 시공 속도가 향상되어 목표 공정을 달성에 유리.
- 3) 가공성 : ACP의 제작 기간이 상대적으로 짧아 생산량 관리가 용이하며, 변형에 유연하게 대처가 가능해 현장 자재부족(shortage) 방지.
- 4) 단열 및 차음 효과 :中间的 심재가 진동을 흡수하고 열전도를 차단하여, 단일 금속판인 솔리드 패널보다 소음 차단 및 단열 성능이 우수.

[그림 5] Solid Aluminum Panel vs. Aluminum Composite Panel



5) 경제성 : 고가의 알루미늄 사용량을 줄이고 심재를 채우는 방식이므로, 대규모 물량 투입시 자재비 절감 효과 (발주처에 cost saving 제안)

위 설계변경으로 당 현장은 현재까지 Façade 공사를 원활하게 진행 중이며, 준공 약 11개월이 남은 '26년 2월 기준 ACP공사의 약 80% 공정률을 달성했습니다.

Q.

EMAAR는 Handover 절차가 어려운 것으로 알려져 있는데, 어떠한 특이점 및 차이점이 있는 건지요?

▶ 안대호 부장(현장소장) : EMAAR 프로젝트는 Handover 절차가 여러 단계로 나뉘어 있으며, 각 단계별 점검 수준이 높은 것으로 정평이 나 있습니다.

현재까지 당사가 준공했던 두바이의 발주처 Handover 절차는 Consultant 주관으로 진행되었으며, Consultant의 inspection 이후 List of outstanding work 및 List of defects 등과 함께 발주처의 Taking Over certificate (이하 TOC)이 발급이 되었습니다.

Emaar 프로젝트는 1차 Consultant의 inspection 이후 두 번째 단계로 Emaar의 자체 PQA (Property Quality Assurance) 팀이 주관해 inspection이 진행됩니다. PQA inspection 점수가 90점 이상이 되면 세 번째 단계인 CHO (Customer Home Orientation, 입주자 점검) 절차가 진행됩니다. CHO는 입주자가 발주처의 CHO 담당자와 동반하여 진행되며 점

검 이후 CHO팀은 점검 List를 시공사에 전달해 처리 점수가 90점 이상이 되면 비로소 최종 Handover가 진행됩니다.

작년 5월부터 진행했던 Mock-up unit PQA 점검 때, 승인 기준점수인 90점을 달성하기 위해 상당한 시간과 노력을 들여야 했던 경험이 있습니다. 이 경험을 바탕으로 본공사 PQA 및 CHO inspection의 기간을 최소화하기 위해 마감공사 품질관리를 하고 있습니다.

Handover 과정에 따른 소요 시간을 고려하여, PQA는 준공 8개월 전('26년 6월)부터, CHO는 준공 4개월 전('26년 10월)부터 시작할 수 있도록 공정관리 중이며, TOC 발급이 지연되지 않도록 집중 관리할 예정입니다.



국내 현장탐방

여의도 63빌딩 별관 및 지하 리모델링 (풍피두센터 한화 서울)



여의도 한강변에 자리한 63빌딩은 오랜 시간 서울을 대표하는 랜드마크로 자리해왔다. 2024년, 이 상징적인 공간에 세계적인 문화 아이콘인 프랑스 풍피두센터의 국내 첫 분관이 들어서는 대규모 리모델링 프로젝트가 본격화됐다.

「여의도 63빌딩 별관 및 지하 리모델링(풍피두센터 한화 서울)」은 1985년 개관 이후 39년간 약 9천만 명이 찾은 아쿠아리움을 철거하고 추진하는 대규모 리모델링 공사로, 공간의 상징성과 기술적 난이도를 동시에 갖춘 의미 있는 프로젝트다.

‘풍피두센터 한화 서울’은 스페인 말라가, 중국 상하이에 이어 세 번째로 개관하는 풍피두센터 해외 분관으로, 피카소·샤갈·미로 등 20세기 거장들의 주요 작품을 국내에서 직접 만날 수 있는 문화 공간으로 조성된다. 설계는 루브르 박물관과 오르세 미술관, 인천국제공항 프로젝트를 수행한 장 미셸 빌모트가 담당했으며, 조경은 뉴욕 하이라인 파크를 설계한 피에트 우돌프가 참여해 건축·조경 전반에 걸쳐 높은 완성도가 요구됐다.

외관은 한국 전통미를 현대적으로 재해석한 백색 입면과 대형 곡면 유리를 적용해 구현됐으며, 기존 구조물과의 연계, 제한된 공사 여건 속 시공성 확보, 품질 관리 측면에서 다각도의 기술 검토가 필요했다. 당사는 짧은 공기와 높은 설계 완성도 요구 속에서도 다수의 리모델링 수행 경험과 기술력을 바탕으로 프로젝트를 안정적으로 수행했다.

세계적인 설계진과 까다로운 발주 조건 속에서 완성도를 확보하기까지, 현장에는 수많은 기술적 고민과 선택의 순간들이 있었다. 현장을 이끈 담당자들의 이야기를 통해 프로젝트 수행 과정과 주요 기술적 특징을 짚어본다.

여의도 63빌딩 별관 및 지하 리모델링 (풍피두센터 한화 서울)

- 발 주 처 : 한화생명, 한화문화재단
- 규 모 : 지하3층~지상4층, 문화집회 (미술관), 근생시설 등
- 위 치 : 서울 영등포구 여의도 (63빌딩 별관 및 지하)
- 공사기간 : 2024년 9월~2026년 2월

기술을 말하다!

직원 인터뷰 Q&A

Q.

운영 중인 63빌딩에서 진행되는 재실 리모델링 및 특수 전시 시설 공사로 알고 있는데 현장의 주요 특징과 어려웠던 점을 소개 바랍니다.

▶ **정영운 차장(공무)** : 당 현장은 운영 중인 63빌딩 별관에 풍 피두 미술관과 대형 상업시설을 조성하는 재실 리모델링 공사로, 초고가 내부 인테리어와 여의도를 넘어 대한민국을 대표할 랜드마크 외장 공사가 동시에 진행되는 복합 고난도 프로젝트입니다.

총 17개월 도급공사이나 순수 철거기간을 제외하면 약 12개월 내에 천억 원대 공사를 수행해야 하는 초단기 돌관공사로, '26년 4월 미술품 반입 및 '26년 6월 개관 일정이 확정되어 있어 공기 연장이 불가능한 상황이었습니다.

특히 공사 착수 당시 도서 완성도가 60% 미만이었으며, 2개 발주처 및 다수 유관부서, 프랑스 원설계사, 운영예정사, CM 등 8곳의 회사 및 부서 조직과 100여 명이 설계 의사결정에 관여하면서 협의와 조율에 상당한 노력이 요구되었습니다.

또한 63빌딩은 상주 인구 약 5,000 명, 일 유동 인구 약 10,000명에 달하는 운영 시설로, 본관 연결부 공사 및 기존 설비 개보수 과정에서 동선 통제, 소음·진동 관리, 민원 대응 등 운영 영향 최소화가 핵심 관리 요소였습니다.

Q.

리모델링 공사의 특수성과 기술적 대응 방안에 대해 설명해 주십시오.

▶ **송호준 차장(공사)** : 리모델링 공사의 특성상 기존 아쿠아리움, 외부 패널, 면세점 및 사무실 구간을 철거를 진행하면서 매 부위별 공사방향을 파악할 수 있었습니다. 이처럼 철거→설치→설계 확정→즉시 시공의 반복 구조로 공정이 진행되었으며, 의사결정 속도가 곧 공기와 직결되는 현장이었습니다.

옥상 방수 철거하는 모습



그 중에서도 가장 어려움이 컸던 것은 옥상 방수 공사로, 운영 중인 주요 설비 하부를 부분 해체한 후 기존 방수층을 전면 철거하고 신규 방수 시스템을 적용해야 했습니다. 기존 공법과 성능·내구성을 비교 검토한 결과, 장기 내구성과 시공성을 고려해 폴리우레아 계열 방수공법을 적용했습니다. 이 과정에서 설비 재가동 일정과 연계한 단계별 시공 계획을 수립해 운영 차질 없이 공사를 완료했습니다.

Q.

전시시설 공사의 특수 기준과 품질 확보 방안에 대해 설명해 주십시오.

▶ **정광수 부장(설비)** : 풍피두 미술관은 일반 건물과 달리 작품 보호를 위한 특수한 설비들이 적용되었습니다. 우선 미술 작품 및 장식품 보호를 위해 독립된 열원장비와 공조설비를 구축했으며, 365일 24시간 전시장내 실내온도 $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ / 상대습도 $50 \pm 5\%$ 로 항온항습을 유지했습니다.

또한 층고가 높은 대공간 특성상 바닥면까지의 충분한 도달거리를 확보하고, 전시품 위치에 직접 공조가 닿지 않도록 97개의 개별 제어할 수 있는 가변선회 디퓨저를 적용했습니다.

예를 들어 전시품 배치시 해당 위치의 디퓨저가 간섭되면 전시품까

지 공기가 도달하지 않도록 각각의 디퓨저를 제어할 수 있습니다.

소화설비의 경우, 전시품의 손상을 최소화하기 위해 전시실 1, 2 및 임시수장고 등 물을 사용하지 않는 소화가스계 설비를 채택해 소화수(물)로 인한 전시품의 손상을 미연에 방지하고 있으며, 소화가스의 성능 확보를 위해 벽체 등 틈새의 기밀을 유지했으며, Door Fan Test를 시행해 기밀 여부를 검증해 품질을 확보했습니다.

Q.

문화예술 공간에서는 조명의 중요도가 높을 터, 현장에서의 조명 관련 Key-point는 무엇이었으며, 그에 대한 관리는 어떤 것들이 있었을까요?

▶ **김성용 차장(전기)** : 해당 프로젝트의 인테리어 조명설비 공사는 100억원 이상의 규모입니다.

대부분의 자재는 고가의 수입품으로 도난 및 파손의 방지를 위해 별도의 전용 창고를 아산에 마련해 자재를 보관하고, 설치 시점 도래 시 현장 반입하는 것으로 초기계획을 수립했습니다.

미술관 전시실은 전시 대상물의 주기적인 변동이 일어나기에 준공 시점의 미술관 디자인만이 아닌, 향후의 전시실의 컨셉 또한 고려해야 했습니다. 이에 조명 위치를 조정할 수 있는 트랙 조명과 각도를 조절할 수 있는 자재의 적용, 그리고 조명제어를 통한 디밍 및 색온도 조절 등의 기술설계를 적용했습니다. 까다로운 발주처의 의사결정을 이끌어내기 위해 상주인력으로 조명 설계 TF를 구성했으며, 수차례 Mock-Up을 진행해 의사결정 지연에 따른 리스크를 줄여가며 설계를 확정했습니다.

조명제어를 위한 SMPS 설치 시 공간적 제약과 유지보수 용이성 확보 두가지를 고려해 불용공간의 활용, 점검구 위치 검토 등을 통해 품질을 확보했습니다.

Q.

미래의 랜드마크가 될 프로젝트라 특별한 외장 공사가 중요한 터인데, 기술적 특징과 시공상 어려움은 무엇입니까?

▶ **한두희 과장(공사)** : 본 프로젝트의 외장 공사는 장당 약 800만 원 규모의 저철복곡면 및 평면접합유리 약 799여 장이 적용되는 초고가 파사드 공사로, 여의도를 대표하는 랜드

마크 구현을 목표로 설계되었습니다. 곡면유리는 크레인, 스카이, 곤도라를 적절히 활용해 장비작업이 어려운 인접건물사에서 인양과 작업자 접근을 분리하는 방식으로 설치했으며, 도심지 특성을 고려해 구간별 도로점용 허가를 받아 단계적으로 시공했습니다.

또한 개방감을 최대화 하기위해 유리사이의 멀리언이 없는 두께 57.04mm의 미술관라운지 커튼월 유리(880KG/장)가 적용되었고, 삼각천창(39.52mm), 원형천창(33.52mm)의 유리가 적용되어, 접합부 방수 및 열교차단 디테일을 강화해 구조 안전성과 장기 내구성을 확보했습니다.

경관조명은 디밍 제어가 가능한 특수 조명 시스템을 적용했고, 유지관리용 점검 캐트를 병행 설치해 유지보수 및 접근성을 확보했습니다.



Q.

당 현장은 2025 BIM AWARDS에서 최우수상을 수상했습니다. BIM 적용 성과에 대해 말씀해주시오.

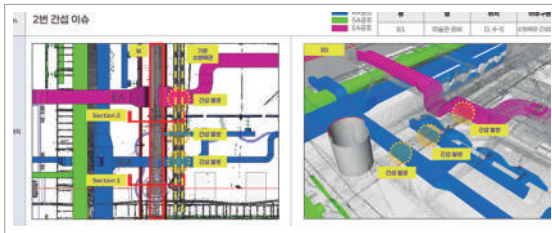
▶ **장석권 부장(설계)** : 당 현장은 지난 2025년 10월, 빌딩스마트협회와 한국건설기술연구원이 공동 주관한 「BIM AWARDS 2025」에 「BIM 기반 통합 코디네이션을 통한 리모델링 품질 극대화 전략」을 주제로 63빌딩 풍피두 미술관 리모델링 사례를 출품했으며, 그 결과 빌딩스마트협회장상(최우수상)을 수상했습니다.

본 프로젝트는 노후 건물을 리모델링하는 사업으로, 기존 구조체와 설계도서 간 불일치로 인한 오차 발생 가능성이 높았습니다. 이에 인테리어 공정 착수 이전 단계에서 레이저 스캐닝을 통해 현황을 정밀 계측하고, 이를 기반으로 BIM 모델을 구축해 구조 오차와 설비 간섭 요소를 사전에 분석·관리함으로써 시공 품질 확보를 목표로 했습니다. 특히 곡면 천장 구간은 mm 단위 정밀 모델링을 수행해 구조체 편차를 보정하고, 설비 간섭을 사전에 제거함으로써 설계 의도를 충실히 구현했습니다.

곡면 천장공사 구현을 위한 레이저스캐닝 및 BIM모델링 수행



레이저 스캐닝, 모델링으로 간섭검토 및 천장고 확보 및 서비스 계획



또한 BIM ROOM을 운영해 현장 직원과 인테리어·전기·설비·소방 협력사가 참여하는 정기 협업 체계를 구축했으며, 3D 스캔 데이터와 BIM 모델을 실시간으로 공유·분석해 의사결정의

정확도를 높였습니다. 회의 결과는 즉시 모델과 현장에 반영하는 선순환 피드백 체계를 확립해 문제 확인·조치·수정이 동시에 이루어지도록 했습니다.

현장주간 BIM 협업 회의(현장직원, 인테리어, 전기, 설비, 소방업체 참석, 주간 설계회의 : 발주처, 설계사, CM단, 현장직원 참석)



건축·구조·MEP 통합 모델을 기반으로 시공 가능성과 자재 물량을 사전 검증함으로써 공정을 최적화했으며, BIM 기반 자재 발주 및 데이터 관리 체계를 통해 재시공을 최소화하고 인테리어 품질 기준을 체계화했습니다. 운영 중인 건물에서 진행되는 고난도 리모델링이라는 제약 조건 속에서도 BIM과 스마트 건설기술을 적극 활용해 공정 안정성과 품질을 동시에 확보한 사례로 평가받고 있습니다.



RC옹벽 근접 보강토옹벽의 지오그리드 길이 단축이 안정성에 미치는 영향

글 유광섭 / 토목기술팀 과장 전화 02-3433-7715 E-mail geoksyu@ssyenc.com

Keywords : 보강토옹벽, RC옹벽, 내적/외적안정, 앵커검토

01. 서론

기존 구조물과의 간섭은 불가피한 설계상의 제약요인이다. 특히 보강토옹벽 시공에서 기존 콘크리트 옹벽과의 중첩으로 인해 그 리드 연장 확보가 어려운 경우가 빈번히 발생한다. 이러한 공간적 제약 조건에서 구조적 안정성을 확보하기 위한 대안공법으로 앵커를 이용한 기존 옹벽 연결방식이 제시되고 있으나, 이에 대한 체계적인 안정성 평가 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장조건을 반영한 수치해석과 구조계산을 통해 앵커 연결 보강토옹벽의 구조적 안정성을 정량적으로 검증하고자 한다.

02. 본론

2.1 보강재 그리드 앵커 연결검토

보강토 옹벽의 그리드와 기존 RC 옹벽을 앵커로 연결하는 방안의 타당성을 평가하였다. 구조계산서 상의 최대 인장력을 고려하여 앵커의 연결을 검토한 결과, 인장 강재, 인장 브레이크아웃, 전단 강재, 전단 브레이크아웃, 프라이아웃 등 모든 부재별 용력 및 작용 하중이 허용값을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 이는 소요 안전도를 충분히 확보하였음을 의미한다.

[표 1] 그리드앵커 연결검토결과

구분	저항력	작용력	결과
인장 강재	41,096N	19,089N	(O.K)
인장 브레이크아웃	29,652N	19,089N	(O.K)
전단 강재	39,800N	20,833N	(O.K)
전단 브레이크아웃	파괴영역	1 m	(O.K)
프라이아웃	75,478N	20,833N	(O.K)

2.2 수치해석을 통한 변위 및 상호작용 분석

기존 RC 옹벽과의 상호작용 거동을 정량적으로 파악하기 위해 FEM 해석을 수행하였다. 건설공사 보강토옹벽 설계·시공 및 유지관리 잠정지침(2013, 국토부)에 명시된 허용변위 기준(H/200)을 적용하였다. 해석 결과, 보강토 옹벽의 최대 변위는 14.9mm, 기존 RC 옹벽의 최대 변위는 11.4mm로, 두 옹벽 모두 허용변위 기준을 만족하였다. 이는 변위가 미미한 수준이며, 안정성 측면에서 적절함을 입증하였다.

2.3 기존 RC 옹벽의 안정성 검토

보강토 옹벽 그리드 연결로 인해 기존 RC 옹벽에 추가로 작용하

는 하중을 고려하여 옹벽의 전도, 활동, 지지력에 대한 안정성 검토를 진행하였다. 검토 결과, 상시 및 지진 시 모두 필요한 안전율을 확보한 것으로 확인되었다.

[표 2] 변위 검토 결과

구분	Sta.0+534	Sta.0+538	허용변위	결과
기존 옹벽	상부	10.6 mm	11.4 mm	20.0 (O.K)
	하부	9.9 mm	10.8 mm	20.0 (O.K)
보강토 옹벽	상부	12.0 mm	14.9 mm	31.5 (O.K)
	하부	12.0 mm	14.9 mm	31.5 (O.K)

[표 3] 기존옹벽 안정성 검토 결과(상시/지진시)

구분	발생력	저항력	안전율	허용안전율	결과
전도	상시	156.9	567.5	3.62	2.00 (O.K)
	지진시	276.9	494.7	1.79	1.50 (O.K)
활동	상시	91.0	352.6	3.88	1.50 (O.K)
	지진시	123.2	326.6	2.65	1.20 (O.K)

03. 결론

본 연구의 결과를 종합하면, 기존 RC 옹벽과 중첩되는 보강토 옹벽 구간에 앵커를 활용한 연결 공법은 모든 검토 항목에서 허용 안전율 및 허용 변위를 만족하였다. 이는 해당 공법이 구조적으로 안정하며, 현장 적용에 있어 기술적 타당성을 확보한 것으로 판단된다.

※ 참고문헌

01. Bathurst, R.J. and Hatami, K. (1998). "Seismic response analysis of a geosynthetic-reinforced soil retaining wall," Geosynthetic international, Vol.5, Nos.1-2, pp.127-166
02. Rowe, R.K. and Ho, S.K. (1997). "Continuous panel reinforced soil walls on rigid foundations," Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, Vol.123, No.10, pp.912-920
03. 유충식(2001). "유한요소해석에 의한 블록식 보강토 옹벽의 지진시 응답특성," 한국지반 공학회논문집, 제17권 4호, pp.15-25

아치슬래브 라멘교 시공성 개선을 위한 이동식 강재거푸집 개발

글 현정환 / 토목기술팀 과장 전화 02-3433-7775 E-mail hyun686@ssyenc.com

Keywords : 아치슬래브 라멘교, 이동식 강재거푸집, 시공성 개선, 안정성 검토

01. 서론

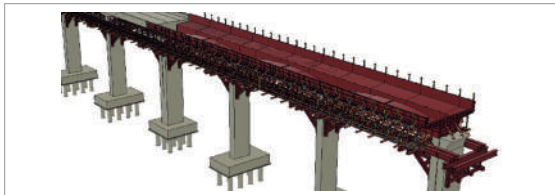
고속화(200km/h 이상)철도 노반공사 현장에서 연약지반 구간과 고성토 구간 등 노반 침하 발생이 우려되는 구간에는 경재성이 우수한 분할교각을 적용한 아치슬래브 라멘교를 계획하였다. 이를 통해 콘크리트 궤도의 침하 문제와 우량농지의 과다 점유를 해소하고 인근 주민의 조망권 훼손과 이동권 침해를 최소화하였다.

아치슬래브 라멘교는 슬래브와 벽체가 강결 연결되어 구조적 효율이 높고 회전 변형이 작아 콘크리트 궤도를 안정적으로 지지할 수 있으며, 교량받침을 배제하여 유지관리 부담을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나 교각 간 거리가 타 거더교량에 비해 짧아 슬래브 콘크리트 타설을 위해 전구간 동바리(FSM)와 비계를 설치해야 하며, 설치·해체 공정이 복잡하고 인력, 장비 투입이 많아 시공성이 저하되는 문제점이 있다. 이에 본 연구에서는 동일 경간이 반복되는 아치슬래브 라멘교 구간에 이동형 강재거푸집과 무빙시스템을 적용하여 시공성 개선과 구조적 안정성을 검토하였다.

02. 이동형 강재거푸집을 적용한 라멘교 시공

아치슬래브 라멘교는 주요 통과구간을 제외하고는 슬래브 연장을 3@15m=45m로 표준화하여 장대교량의 시공 효율성을 높인 형식이다.

[그림 1] 이동식 강재거푸집



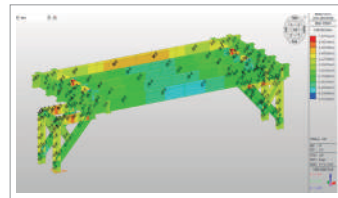
표준화된 강재거푸집과 동바리를 반복적으로 사용하고, 경간별로 이동·재설치하는 방식으로 공정을 계획함으로써 시공 효율성과 경제성을 개선하였다. 또한, 거푸집의 이동을 통해

설치·해체 작업을 단순화하여 시공성을 향상시켰다.

03. 강재거푸집 안정성 검토

본 강재거푸집 시스템의 주요 부재인 브라켓은 H300×300×10/15(SS275), 주빔·횡빔은 H488×300×11/18(SS275), 강봉은 Φ 65mm(SCM440) 단면을 적용하였다. 설계하중은 거푸집 자중, 슬래브 자중, 작업하중, 수평하중 및 풍하중을 조합하여 산정하였다.

[그림 2] 강재거푸집 안정성 검토



검토 결과, 모든 부재의 발생응력은 허용응력 이내로 검토되어 시공 단계에서의 안정성을 확보하였다.

04. 결론

본 연구에서는 동일 경간이 반복되는 아치슬래브 라멘교 구간에 적용 가능한 이동형 강재거푸집 및 무빙시스템을 개발하고, 이에 대한 시공성과 구조적 안정성을 검토하였다. 제안한 시스템은 거푸집과 하부 프레임을 모듈화하여 반복 사용이 가능하고, 설치, 해체 공정을 단순화하여 시공성이 개선되었다. 구조 검토 결과, 브라켓, 주거더, 횡거더, 강봉 등 주요 부재는 허용응력을 만족하여 시공 단계에서도 안정성이 확보되었다. 본 공법은 아치슬래브 라멘교의 시공 효율을 높이고 유지관리 부담을 줄일 수 있는 효과적인 시공 대안으로 판단된다.

※ 참고문헌

01. 박준철, et al. "고속화철도 콘크리트궤도 안정성 확보를 위한 아치슬래브 라멘교 적용성 검토." 한국철도학회 학술발표대회논문집 (2024): 122-123.

타설조건에 따른 박스구조물의 수화열 해석 사례

글 선우윤호 / 토목기술팀 과장 전화 02-3433-7787 E-mail layncenix@ssyenc.com

Keywords : 수화열, 박스구조물

01. 서론

본 연구에서는 타설 조건에 따라 수화열에 의하여 작용하는 온도응력의 영향을 평가하기 위하여, 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용한 박스구조물의 타설 주기, 타설 연장, 외기 온도를 변수로 고려하고 수화열 해석을 수행하여, 타설조건에 따른 온도응력의 영향을 분석하였다.

- 타설 주기 : 96시간, 120시간, 168시간
- 타설 연장 : 10m, 15m, 20m
- 외기 온도 : 20℃, 10℃, 0℃

02. 본론

대상 구조물인 박스구조물의 대칭성을 고려하여 1/4 구조물로 모델링하고, 거푸집(7kcal/m²hr℃)과 외기노출면(12kcal/m²hr℃)의 대류계수를 반영하여 경계조건을 설정하였으며, 온도균열지수에 의한 균열제어는 아래의 기준에 따라 평가하였다.

- 균열 발생을 방지하여야 할 경우 : 1.5 이상
- 균열 발생을 제한할 경우 : 1.2~1.5
- 유해한 균열 발생을 제한할 경우 : 0.7~1.2

박스구조물의 타설조건에 따라 수화열에 의한 온도응력의 영향을 확인한 결과는 다음과 같다.

1) 타설 주기

타설 주기에 따른 온도균열지수는 168시간인 경우 0.94, 120시간인 경우 1.04로 유해한 균열발생을 제한할 수 있는 수준이지만, 72시간인 경우 1.31로 균열발생을 제한할 수 있는 수준으로, 타설 주기가 짧을수록 균열 제어에 유리함이 확인되었다.

2) 타설 연장

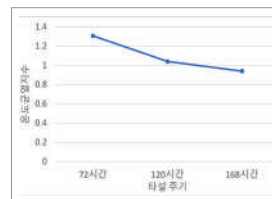
타설 연장에 따른 온도균열지수는 9m일 때 1.22로 균열발생을 제한할 수 있는 수준이지만, 15m일 때 0.94, 20m일

때 0.90으로 유해한 균열발생을 제한할 수 있는 수준으로, 타설 연장이 짧을수록 균열 제어에 유리하며, 타설 연장이 길어질수록 저발열 시멘트의 사용 등 수화열 제어에 유리한 재료의 활용이 필요함이 확인되었다.

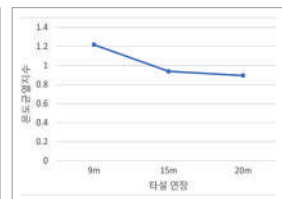
3) 외기 온도

외기 온도에 따른 온도균열지수는 20℃일 때 0.939이지만 0℃일 때 0.657로 유해한 균열이 발생할 가능성이 있어, 동절기 타설 시에는 양생 관리 및 한중 콘크리트 등 낮은 외기 온도 조건에 온도응력을 제어할 수단을 고려해야 함이 확인되었다.

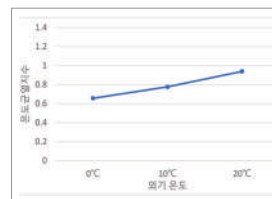
[그림 1] 타설 주기에 따른 온도균열 지수



[그림 2] 타설 연장에 따른 온도균열 지수



[그림 3] 외기 온도에 따른 온도균열 지수



03. 결론

타설조건에 따라 수화열에 의하여 작용하는 온도응력의 영향을 확인한 결과, 타설주기와 타설길이는 짧을수록, 외기온도가 타설온도에 가까울수록 온도균열지수가 높아 균열발생 제어에 유리함이 확인되었다. 또한, 타설길이가 길거나 동절기 타설의 경우 수화열에 의한 온도응력을 제어할 수 있도록 저발열 시멘트, 한중 콘크리트, 증기 양생과 같은 온도응력 관리 수단이 필요함이 확인되었다.

접합 및 수밀성능이 향상된 PC암거 기술

글 안동열 / 토목기술팀 차장 전화 02-3433-7763 E-mail prosperous@ssyenc.com

프리캐스트 콘크리트 암거 공법의 적용이 지속적으로 증가하고 있는 상황에서 기존 프리캐스트 콘크리트 암거 기술들은 접합부 벌어진짐과 이로 인한 접합부 누수 발생, 수밀성 확보를 위한 추가 외벽 방수 시행 필요 및 접합부 누수로 인한 강선 부식 등의 문제가 있으며, 부등침하, 지반변위, 교통 및 환경적 진동에 의한 품질 저하 및 하자 발생이 불가피하여 이를 보완할 수 있는 기술이 필요하게 되었다.

본 기술은 양방향, 단방향 강연선 정착 기능의 앵커콘과 누수 방지 주름형 폐합지수판을 이음부에 적용하여 조립식으로 연

결함으로써, 접합 및 수밀 성능에 있어서의 문제를 해결(보강)한 조립식 프리캐스트 콘크리트 암거(PC암거) 기술이다.

본 기술은 건설신기술 및 재난안전신기술을 지정받으며 기술 및 안전성을 인정받았으며, 기존 기술 대비 방수처리 공정이 생략되기 때문에 방수처리에 요구되는 건설자재 감량화 및 자원절약 등으로 온실가스(CO2 50%이상, Nox 80%이상) 저감, 오염물질(비산먼지 50%이상) 저감, 자원순환(빗물재활용) 등의 측면에서 녹색성장에 기여함으로써 녹색기술을 인정받게 되었다.

접합부 저항 성능 개선	접합부 벌어진짐에 저항할 수 있는 역쇄기형 홈과 강선정착장치 형태 고안 (앵커콘, 앵커기능 강선정착콘)
변위 발생시 수밀 성능 확보	부등침하등 접합부 변위 발생 시에도 수밀이 가능한 주름형 폐합지수판 개발
접합부의 구조적 안정성을 확보하고 부등침하 등 변위 발생 시에도 수밀성 유지 및 싱크홀을 해방하기 위해, PC 암거(프리캐스트 철근콘크리트 암거)의 접합부에 새로운 연결 시스템 개발	



현장타설 말뚝과 콘크리트 기성말뚝을 함께 이용한 흙막이 구조물 시공방법(Hi-PHC 공법)

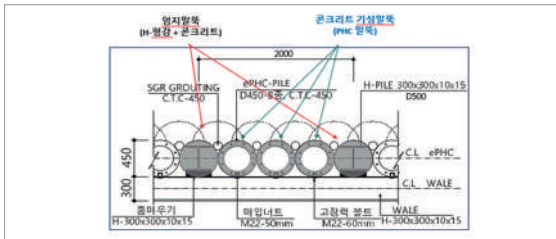
글 박철용 / 건축기술팀 차장 전화 02-3433-7731 E-mail cypark@ssyenc.com



흙막이 공법 중 H-형강이 삽입된 현장 타설 콘크리트 말뚝(엄지말뚝) 사이에 2개 또는 3개의 철근망이 삽입된 현장 타설 콘크리트 말뚝을 시공하는 CIP 공법은 시공성과 구조적 안정성이 우수하지만, 기상 조건과 시공 환경에 따라 품질이 크게 좌우될 수 있고, 자재 소모와 폐기물 발생이 많아 경제성과 환경성 측면에서 불리한 측면이 있다.

본 Hi-PHC 공법은 CIP 공법의 장점은 그대로 유지하면서 단점인 고품질 확보와 환경성 추구라는 성능을 구현하기 위하여 엄지말뚝은 그대로 이용하고, 그 사이에 현장 타설 콘크리트 말뚝 대신 공장 제작된 기성 콘크리트 말뚝(PHC 말뚝)으로 대체한 공법[그림 1]으로, ①휨 성능은 해석결과 기존 CIP 공법은 취성파괴, Hi-

[그림 1] 주요 구성도



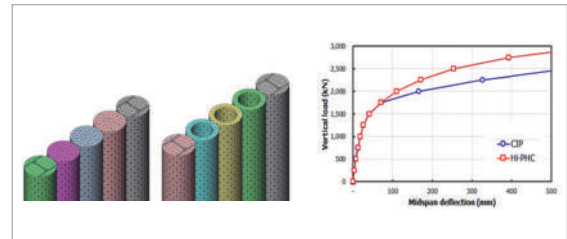
[표 1] 건설자재 감량화율

항목	기준	투입량(경간 기준)	
		기존기술 (Kg/m)	녹색기술 (Kg/m)
콘크리트	CIP 도면	1,463.19	365.79
H형강		94	94
철근		160.16	
PHC파일	KS F 4306		651
전체중량 (Kg/m)		1,717.35	1110.79
감량화율(%)		35.3	

PHC 공법은 연성거동을 보이는 것으로 나타났다.[그림 2] ②품질 측면에서는 기존 CIP 공법은 기온, 강우, 지하수위 등의 기상조건과 레미콘 수급, 콘크리트 타설 및 다짐 등에 따른 균열, 재료분리, 단면 결손 등 이슈가 있지만, Hi-PHC 공법의 경우 공장에서 제작되어 현장 설치만 하면 되므로 고품질 시공이 가능하다. ③건설자재 사용량에 있어서 현장 타설 콘크리트 말뚝 대비 PHC 말뚝은 가운뎃가 비어 있어 35% 정도 콘크리트량이 절감되는 것으로 나타나 철거시 건설폐기물이 그만큼 절감되는 것이라 할 수 있다.[표1] ④투입자재량과 시공단계 장비 사용에 따른 탄소배출량을 평가한 결과 기존 CIP 공법 대비 24% 정도 절감되는 것으로 나타났다.

이상과 같이 기존 CIP 공법과 All PHC 공법의 장점을 결합하여 개발된 Hi-PHC 공법은 정부의 탄소중립정책과 녹색기술 도입 확대 기조와 명확하게 부합하는 공법으로 구조적 안정성을 확보하면서 경제성을 갖춘 고품질 시공이 가능하기에 적용이 확대될 수 있길 기대한다.

[그림 2] 휨 성능 해석 모델링 및 해석 결과



[표 2] 탄소배출량 비교

구분	절감율	탄소배출량 (Kg-CO2eq)	
		녹색기술	CIP 공법
생산단계	-33%	1.37E+06	2.06E+06
시공단계	+12%	0.64E+06	0.57E+06
합계	-24%	2.02E+06	2.63E+06

(제835호) H형 단면과 U형 단면의 조합으로 이루어진 합성보(BESTOBEAM) 공법

글 박철용 / 건축기술팀 차장 전화 02-3433-7731 E-mail cypark@ssyenc.com

01. 신기술의 범위

보 단부의 H형 단면과 중앙부 U형 단면의 조합 및 U형 단면 상부에 전단 연결재 앵글로 이루어진 합성보 공법



02. 신기술의 내용

이 신기술은 철골구조 건축물의 보 부재의 설계, 제작, 시공에 대한 것으로, 보 단부의 H형 단면과 중앙부 U형 단면의 조합으로 구성된 시공개선형 합성보 공법으로 다음과 같은 이점을 갖는다.

- 기존 공법과 동일하면서도 쉽고 빠른 공사가 가능
- 중앙부 U형 단면의 최적 설계를 통해 충고 절감
- U형 단면 상부에 콘크리트와의 합성효과를 위하여 전단 연

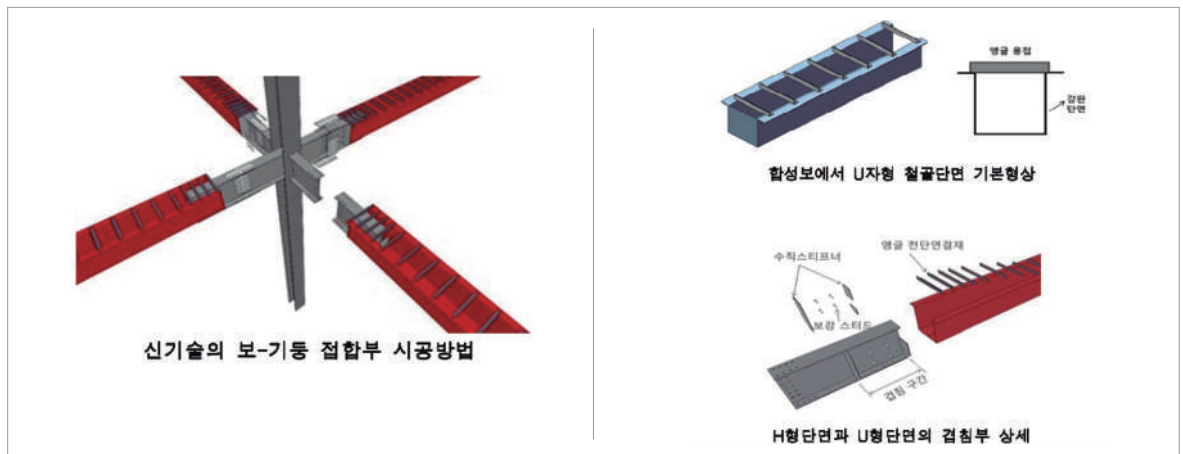
결재로 앵글을 사용으로 현장에서의 스티드 볼트 시공의 생략이 가능하여 시공성을 개선

03. 향후 활용전망

국내외 건설환경은 친환경적이면서 공사비 절감, 인력 노후화 대비 등과 같은 문제들을 극복하면서 발전해 왔다.

본 신기술은 기존의 철골공법이 적용되는 건축물이면 대안 공법으로 적용 가능한 공법이다. 철골공법과 비교하여 철골량 절감을 통한 이산화탄소 배출 절감을 이루어 친환경적이면서 공익성을 확보한 공법이며, 직접 공사비 측면에서도 기존 철골공사와 비교하여 약 8.4% 절감효과가 있기 때문에 경쟁 우위에 있다고 판단되며, 향후 시장 확대를 통한 활용 가능성이 높을 것으로 전망된다.

[그림 1] 개념도



TECHNOLOGY NEWS

싱가포르 Woodlands Health Campus 프로젝트 “MOHH Excellence Award 2025” 3개부문 수상

우리 회사가 수행 중인 싱가포르 Woodlands Health Campus(WHC) 프로젝트가 2025년 3월 17일 싱가포르 보건부 산하 MOHH(Ministry of Health Holdings)가 주관한 “MOHH Excellence Award 2025”에서 3개 부문 수상자로 선정되었다. 시상식은 JW Marriott Singapore South Beach에서 개최되었으며, 보건부 장관 Mr. Ong Ye Kung을 비롯한 정부 및 건설 관계자 약 300명이 참석하였다.

Woodlands Health Campus는 대지면적 76,600㎡, 연면적 386,830㎡ 규모의 의료 복합시설로 지하 4층·지상 7층, 10개동, 1,500병상 규모로 조성되는 대형 보건 인프라 프로젝트이다.

이번 시상에서 당사는 ▲Individual Excellence Award(김석준 회장), ▲Distinguished Award(WHC 현장), ▲Construction Excellence Award Platinum(쌍용 JV) 등 총 3개 부문을 수상하였다. 특히 Distinguished Award는 해당 연도 최고의 프로젝트에 수여되는 상으로 WHC 현장이 선정되었으며, Construction Excellence Award Platinum 수상을 통해 당사

JV의 시공 역량과 프로젝트 수행 능력을 인정받았다.

이번 수상은 싱가포르 의료 인프라 건설 분야에서 당사의 기술력과 사업 수행 경쟁력을 다시 한 번 입증하는 성과로 평가된다.



의령낙동대교 '2026 올해의 토목 구조물' 국내부문 대상 수상

대한토목학회가 주최하는 「2026 올해의 토목구조물」은 국내외 토목구조물의 기술 발전을 도모하기 위해 시행되는 공모전으로, 2024년 하반기 준공부터 2026년 준공 예정 구조물을 대상으로 심사·선정한다.

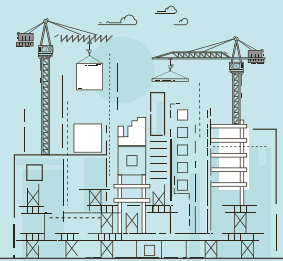
당사는 2026년 12월 준공 예정인 고속국도 제14호선 함양~창녕간 건설공사 제11공구 현장에서 시공 중인 국내 최초 비대칭 경사고저주탑 사장교 ‘의령낙동대교’를 출품하여 대상을 수상하였다.

본 공모에서는 설계 단계부터 시공까지의 전 과정을 대상으로 창의성, 친환경성, 친환경성, 편의성 등의 평가 항목에 따라 심사가 이루어졌으며, 설계 및 시공 과정에서의 기술적 완성도와 시공성이 종합적으로 평가되었다. 시상식은 「2026 토목의 날」 행사에서 진행되었으며, 설계부터 시공까지 전 과정에 걸친 기술력과 시공 수행 능력, 현장 안전관리 수준 등이 종합적으로 평가되어 대상 수상의 성과를 거두었다.



군장국가산단 인입철도 제1공구 ‘지경교’ ‘2025 올해의 토목구조물’ 동상 수상

대한토목학회가 주최하는 ‘2025 올해의 토목구조물’ 공모전에서 우리 회사가 시공한 **군장국가산단 인입철도 제1공구 현장의 철도교량 ‘지경교’가 동상을 수상하였다. 본 공모전은 국내



외 토목구조물의 기술 발전을 도모하기 위해 2023년 하반기 준공부터 2025년 준공 예정 구조물을 대상으로 기술성, 시공성, 안전성 및 경관성 등을 종합적으로 평가하여 선정한다.

수상 대상인 **지경교**는 연장 **1,610m**, 폭 **6.0m** 규모의 철도교량으로 국도 21호선(왕복 6차선, 폭 28m)을 횡단하는 구조물이다. 특히 80m 장경간 강아치 구간에 **트랜스포터 공법**을 적용하여 시공성을 확보하고 교통 영향 최소화와 안전한 가설을 동시에 달성한 것이 특징이다.

이번 공모에서는 지경교의 가설 과정과 현장 공사여건을 기반으로 장경간 아치교 시공 검토, 철저한 안전관리, 주변 환경과 조화를 고려한 경관성 등을 중심으로 발표가 이루어졌으며, 대한토목학회로부터 기술적 완성도와 시공 역량을 인정받아 동상을 수상하였다.



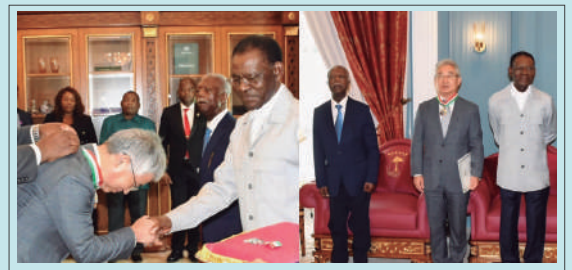
적도기니 대통령 훈장 수훈

우리 회사 적도기니 법인장인 안재영 부사장이 2025년 6월 14일 적도기니 대통령으로부터 COMENDADOR(사령관) 훈장을 수여받았다. 본 훈장은 외교 관련 공로자에게 수여되는 훈격으로, 민간 건설회사 소속 인물에게 수여된 첫 사례라는 점에서 의미가 있다. 또한 법인장 통역을 담당한 페르난도 과장도 CABALLERO(기사) 훈장을 수훈하였다.

이번 훈장 수여식은 당사가 지난해 준공한 말라보 대통령궁 내 대통령 오피스빌딩에서 정부 공식 의전 절차에 따라 진행되었으며, 대통령과 주요 정부 각료들이 참석한 가운데 엄수되었다.

대통령은 수여식에서 지난 14년간 적도기니 국가 발전과 인프라 구축에 기여한 공로에 감사를 표하며, 리더스 클럽을 시작으로 몽고모엔 국제공항, 바타 국제공항, EMWAC 상수도 사업 등 약 1조 1천억 원 규모의 프로젝트 수행 성과를 높이 평가하였다.

이번 훈장 수훈은 당사가 적도기니에서 수행한 주요 인프라 사업의 성과와 기술력을 공식적으로 인정받은 사례로 평가된다.



제16회 그린건설대상 국토부장관상 수상

우리 회사는 지난 12월 2일 서울 중구 한국프레스센터에서 열린 '제16회 서울신문 그린건설대상'에서 두바이 이머시브 타워(IMMERSIVE TOWER)가 글로벌건설 부문 국토부장관상을 수상했습니다.



이머시브 타워는 연면적 약 11만 4474㎡ 규모로, 지하 3층부터 지상 36층까지 조성된 프리미엄 오피스 빌딩입니다. 세계적인 친환경 인증 기준인 LEED 플래티넘(Platinum) 등급을 적용해 설계·시공된 만큼, 지속가능한 건축기술과 친환경 설계

TECHNOLOGY NEWS

역량을 갖춘 모범 사례로 높게 평가받았습니다.

서울신문 그린건설대상은 신성장 동력인 녹색건설산업 분야에서 환경보호에 앞장서고 녹색 기술을 실천하는 우수 건설사를 선정·시상하는 행사로, 정부 부처가 후원하는 명실상부한 국내 최고 권위의 건설부문 상입니다.

두바이 DUKIA-2(Kifaf Development Phase 3 - Plot 6) 현장 WASL 공식 표창 수상



우리 회사가 수행 중인 두바이 DUKIA-2(Kifaf Development Phase 3 - Plot 6) 현장이 누적 1,500만 인시 무재해를 달성하며 발주처 WASL LLC로부터 공식 표창을 수상하였다. 이번 표창은 2025년 11월 24일 WASL이 직접 수여한 것으로, 해외 건설현장에서의 안전관리 성과를 공식적으로 인정받았다는 점에서 의미가 크다.

DUKIA-2 프로젝트는 두바이 정부 산하 개발·관리기관인 WASL이 발주한 사업으로, 현장은 체계적인 안전관리와 현장 운영을 통해 장기간 무재해 기록을 달성하였다. 특히 두바이 건설시장은 직영 인력 비중이 높아 안전사고 위험이 상대적으로 높은 환경으로 알려져 있어 이번 성과는 더욱 높은 평가를 받고 있다.

이번 수상은 현장의 체계적인 안전관리 활동과 임직원 및 근로자들의 안전 의식이 결합된 결과로, 우리 회사의 글로벌 수준의

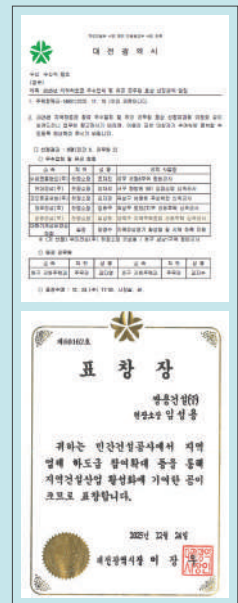
시공 및 안전관리 역량을 보여주는 사례로 평가된다. 앞으로도 당사는 “안전이 최우선”이라는 원칙 아래 모든 현장에서 지속적인 안전관리 활동을 통해 무재해 달성을 이어갈 계획이다.

대전 읍내동 지역주택조합아파트 현장

우리 회사 대전 읍내동 지역주택조합아파트 현장의 현장소장 임성용 부장이 2025년 12월 24일 대전광역시장 표창장을 수상하였다. 이번 표창은 민간 건설공사에서 지역업체 하도급 참여 확대와 지역건설산업 활성화에 기여한 공로를 인정받아 수여되었다.

당 현장은 도급관리팀과의 협의 및 마감공정에서의 지역업체 참여 확대 등 다양한 노력을 통해 지역건설업체와의 상생 협력을 추진해 왔으며, 이러한 현장과 본사의 협력적 노력이 이번 수상으로 이어졌다.

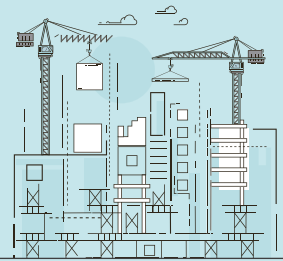
이번 수상은 지역 건설산업 발전에 기여한 성과를 대외적으로 인정받은 사례로, 현장은 준공 시까지 안전하고 안정적인 공사 수행을 위해 최선을 다할 계획이다.



2025년 협력사 간담회 개최

우리 회사는 지난 19일 본사 대회의실에서 '2025년 협력사 간담회'를 개최하였다. 이번 간담회는 고위험 공종별 주요 협력사를 초청하여 현장 위험요인 발굴과 개선 방안을 공유하고, 안전한 건설 현장 조성을 위한 상호 협력과 공동 책임의식을 강화하기 위해 마련되었다.

행사에서는 회사의 경영 현황과 비전을 공유하고 협력사의 애



로사항과 건의사항을 청취하는 질의응답 시간을 통해 상호 소통의 시간을 가졌다. 이를 통해 건설 환경 변화에 대응하고 협력사와의 공정한 협력 관계를 더욱 강화하는 계기가 되었다.

이날 행사에는 김인수 대표이사를 비롯한 임직원과 34개 주요 공종 협력사 대표 등 총 44명이 참석하였다. 앞으로도 당사는 협력사 간담회를 지속적으로 개최하여 상생 협력 기반을 더욱 공고히 해 나갈 계획이다.



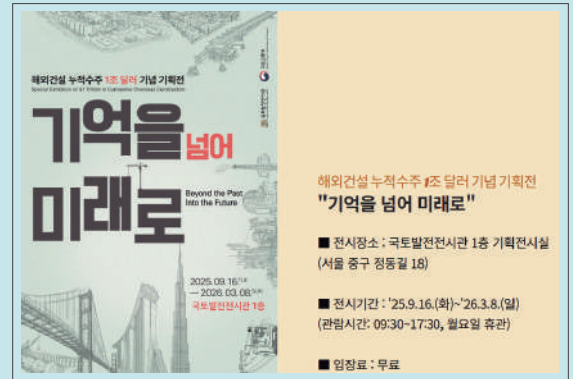
‘해외건설 10대 프로젝트’ 선정

우리 회사가 시공한 싱가포르 ‘마리나 베이 샌즈 호텔’이 국토교통부가 선정한 ‘해외건설 10대 프로젝트’에 포함되었다. 이번 선정은 해외건설 누적수주 1조 달러 달성을 기념해 개최된 기획전 **“기억을 넘어 미래로”**의 주요 전시 프로젝트로 발표되었다.

해당 기획전은 1965년 해외시장 개척 이후 약 60년간 이어진 우리나라 해외건설의 발전 과정과 성과를 조명하기 위해 마련되었으며, 해외건설 역사에서 의미 있는 대표 프로젝트들이 선정되었다.

마리나 베이 샌즈 호텔은 대국민 투표와 전문가 심사를 거쳐 선정된 10대 프로젝트 중 하나로, 당사의 글로벌 시공 기술력과 해외 프로젝트 수행 역량을 대표하는 사례로 평가받고 있다.

관련 자료와 기록은 서울 중구 국토발전전시관에서 개최된 해외건설 누적수주 1조 달러 기념 기획전에서 전시되었으며, 전시는 2026년 3월 8일까지 진행된다.



2025 우리회사 토목·건축 기술세미나 개최

우리회사 토목기술팀 및 건축기술팀 주관으로 기술의 공유와 숙지를 통한 분야별(영업/건설/공사/안전 등) 전문성 제고, 입찰견적능력 향상 및 수주경쟁력 강화를 목적으로 기술세미나를 개최하고 있다.

토목 분야의 경우 “스마트 건설·안전 기술 활용 방안”을 주제로 당사 스마트 건설·안전 기술 활용 현황과 관련 최신 기술 동향에 대한 발표가 진행되었으며, 건축 분야의 경우 “특수콘크리트 및 관련 기준”을 주제로 사내의 전문가의 발표가 이루어졌다.

본 기술세미나를 통해 건설 산업 전반의 최신 기술정보와 국내외 입찰견적 시 필요한 설계 및 시공 기술을 공유하는 등 업무 유관팀 임직원들의 업무역량과 기술 경쟁력을 강화함으로써 각 분야의 수주 경쟁력 제고에 기여하고 있다.



GLOBAL SAE-A BUSINESS

의류

 **SAE-A TRADING**

 **WIN TEXTILE**

 Future in Fashion
IN THE F ∴

 **TEGRA**
OUTPACED BY OUTPERFORM

 **SAE-A SPINNING**

 **S&A**

— GLOBAL SAE-A GROUP
SWISSTEX

건설 · 인프라 · 기술

— GLOBAL SAE-A GROUP
 **SSANGYONG**
Engineering & Construction Co., Ltd.

 **VALMAX**

종이 · 포장

 **TAILIM PAPER**

 **TAILIM PACKAGING**

 **JEONJU PAPER**

문화 · F&B

 **GOLF COURSE
ENTERPRISES**

 **TAEBUM**

MISSION

To Help People Experience
the Best in Life

고객이 최상의 삶을 경험할 수 있도록 최고의 제품과 서비스 제공

VALUES

도전정신

열정과 도전으로 변화를 이끄는
글로벌세아인

열정을 가지고 변화를 이끌어가는 도전정신은
글로벌세아의 과거, 현재 그리고 미래 정상의
밑거름입니다.

인재제일

부단한 역량강화와 협업의 마인드를 갖춘
글로벌세아인

열린 마음으로 끊임없이 자신의 역량을 높이고,
서로 협력하는 마음가짐을 가진 인재가
글로벌세아의 성장을 이끌어갑니다.

일터행복

행복한 글로벌세아인들이 만들어가는
행복한 글로벌세아

조직구성원 개인의 행복과 조직의 지속적 성장을
함께 추구하는 행복경영은 글로벌세아와
글로벌세아인 공동의 성공 방정식입니다.

상생추구

주변에 배려와 헌신을 실천하는
글로벌세아인

글로벌세아는 지구촌과 지역사회의 경제적·
사회적·환경적 책임 완수를 위해 배려와 헌신을
통한 사회공헌·환경보호를 실천합니다.

글로벌세아그룹의 성장은 계속됩니다!

1986년 설립된 세아상역(주)을 시작으로 혁신과 발전을 거듭해 온 글로벌세아그룹은 이제 의류 사업에서 신사업에 이르기까지, 분야와 경계를 허물고 새로운 라이프 스타일을 창조하며 스마트한 기술을 바탕으로 혁신과 성장을 계속하고 있습니다.

SAE-A TRADING (S&H GLOBAL)

(아이티)



TEGRA

(온두라스)



SAE-A SPINNING

(코스타리카)

Global Sae-A HQ

(대한민국 서울)



SSANGYONG E&C

(대한민국 서울)

TAILIM PACKAGING
(경기도 시흥)



JEONJU PAPER
(전라북도 전주)



SAE-A TRADING (Winners International)
(인도네시아)



Pauma Valley CC
(캘리포니아)



VALMAX
(충청남도 아산)



Gallery, S2A
(대한민국)



Cafe, CAFÉ CHEZNOUS
(대한민국)



IN THE F
(대한민국)

건설 기술인 여러분의 관심과 참여를 부탁드립니다.

국내·외 건설현장에서 땀 흘려 일하시는 건설 기술인 여러분의 건강과 행복을 기원합니다.

금번 83호 특집기획에서는 '차세대 도시 교통 시스템 전환을 위한 토목 인프라'를 주제로 도심항공교통(UAM) 인프라의 핵심 시설인 버티포트, 신모빌리티 시대를 대비한 차세대 자율주행 협력 도로 인프라, 그리고 지상·지하 입체도시 건설을 위한 기술 혁신의 도전과 과제 등 다양한 주제에 대하여 외부 전문가의 고견을 실었습니다.

그 밖에도 국내·외 현장에서 널리 활용할 수 있는 새로운 "기술정보", 주요 현장의 주요공법, 보유기술, 설계변경사례를 소개한 "현장기술소개", 현장 설계 및 시공 사례를 직원과의 인터뷰 형식으로 소개한 "현장탐방" 등을 게재하였습니다.

앞로도 건설분야 새로운 정보, 기술 및 공법 등 양질의 기술정보를 건설 기술인 여러분들과 공유하기 위해 더욱 매진하겠습니다.

여러분들의 많은 성원과 관심을 부탁드립니다.

『건설기술/쌍용』을 함께 만드는 편집·실무위원들

편집위원장	송재민 상무(02-3433-7088, ssysjm@ssyenc.com)
부위원장	최재호 부장(02-3433-7756, soilplug@ssyenc.com)
토목기술팀	허남태 부장(02-3433-7530, abhnt@ssyenc.com) 유광섭 과장(02-3433-7715, geoksyu@ssyenc.com) 현정환 과장(02-3433-7775, hyun686@ssyenc.com) 김지혜 대리(02-3433-7388, kim_jh@ssyenc.com)
건축기술팀	박철용 차장(02-3433-7731, cypark@ssyenc.com) 김혜미 과장(02-3433-7619 ddong7079@ssyenc.com)
플랜트사업팀	이호열 과장(02-3433-7813, hyhyhy@ssyenc.com)
전기팀	박광순 대리(02-3433-7423, ks.park@ssyenc.com)
설비팀	송현준 대리(02-3433-7428, songhj777@ssyenc.com)
홍보팀	김혜영 차장(02-3433-7757, hykim@ssyenc.com)

건설기술 **쌍용**

CONSTRUCTION TECHNOLOGY REVIEW SSANGYONG

2026년 통권 제83호(비매물)

발행인 김인수 / 발행일 2026년 3월 31일 / 발행처 쌍용건설(주) 서울특별시 송파구 올림픽로 299 / 홈페이지 www.ssyenc.com

※ 기 발간 기술지(1995년 Vol.1 ~ 2025년 Vol.82) 열람 : 쌍용건설 홈페이지 접속(www.ssyenc.com) → 혁신기술 메뉴 클릭 → 건설기술/쌍용 클릭



본사

① 서울 본사

주소 : 서울특별시 송파구 올림픽로 299
전화 : 02-3433-7114
팩스 : 02-3433-7111

해외 지사

② 두바이 지사

주소 : # 1001, One by Omniyat, Business Bay, Dubai, UAE /
P.O.Box 33189
전화 : +971-4-359-1931
팩스 : +971-4-359-1932

③ 싱가포르 지사

주소 : 20 Science Park Road #03-27/30 Teletch Park
Singapore Science Park II Singapore 117674
전화 : +65-6336-1255
팩스 : +65-6339-9590

④ 폴란드 지사

주소 : AddressKrochmalna 58/38, 00-864, Warsaw,
Poland
전화 : +48-571-364-835

⑤ 리야드 지사

주소 : Office No.1, 2nd Fl, Al-Audhali Building, King
Abdulla Road P.O.Box1453, Al-Khobar 31952,
Saudi Arabia
전화 : +966-13-864-8807
팩스 : +966-13-864-4379

⑥ 에르빌 지사

주소 : Land NO.29 / 101, Sector 7 in Aubara Dream Land,
Block D, 8th Floor, Apartment No.33,
Sulaymaniyah, Kurdistan Region of Iraq

⑦ 쿠알라룸푸르 지사

주소 : Suite 18.05, 18th Floor, Kenanga International,
Jalan Sultan Ismail 50250 Kuala Lumpur, Malaysia
전화 : +60-3-2145-4529/39
팩스 : +60-3-2145-4548

⑧ 자카르타 지사

주소 : Suite 2801, 28th Floor, Menara Batavia. Jl. K.H. Mas
Mansyur Kav. 126, Jakarta 10220, Indonesia
전화 : +62-21-5795-0377
팩스 : +62-21-5795-0379

⑨ 호치민 지사

주소 : Floor 5, Savimex Building, 194 Nguyen Cong Tru
Street, Nguyen Thai Binh Ward, District 1, Ho Chi
Minh City, Vietnam
전화 : +84-28-6686-8095

⑩ 하노이 지사

주소 : Floor 5, Sentinel Place Building, 41A Ly Thai To
Street, Hoan Kiem District, Ha Noi city, Vietnam
전화 : +84-28-3938-8819
팩스 : +84-28-3938-8737

⑪ 카라치 지사

주소 : Sarah Enclave Flat #1103, 11th Floor North
Nazimabad Block "H" Karachi

⑫ 뉴델리 지사

주소 : Unit No. 803, 8th Floor, BPTP "Park Centra",
NH-8, Sector-32, Village Silokhra, Gurgaon,
Haryana, India / PIN : 122002
전화 : +91-124-4102-5189
팩스 : +91-124-4836-409

⑬ 적도기니 지사

주소 : Mongomo Presidential Palace, Mongomo,
Equatorial Guinea
전화 : +82-70-5089-2737

해외법인

⑭ 적도기니 법인

SSangyong Engineering & Construction GE S.A.
주소 : Mongomo Presidential Palace, Mongomo,
Equatorial Guinea
전화 : +82-70-5089-2737

⑮ 미국 법인

**Ssangyong Engineering & Construction (America)
Inc.**
주소 : 763 Blairwood Ct San Jose, CA 95120
전화 : +1-408-483-5212

⑯ 사우디 아라비아 법인

Ssangyong Engineering & Construction Co.,Ltd
주소 : Office No.1, 2nd Fl, Al-Audhali Building,
King Abdulla Road P.O. Box 1453, Al-Khobar
31952, Saudi Arabia
전화 : +966-13-864-8807
팩스 : +966-13-864-4379

⑰ 인도네시아 법인

PT.Ssangyong Konstruksi Indonesia
주소 : Suite 2804, 28th Floor, Menara Batavia Jl.K.H.
Mas Mansyur Kav. 126 Jakarta 10220, Indonesia
전화 : +62-21-5795-0377
팩스 : +62-21-5795-0379

Who made it?

How Was It Built? Who Built It?
A Little Girl Holding Her Father's Hand,
Students With Their Backpacks
Taking Pictures For Fond Memories.
All Curious And Breathless At
The New Symbol Of Singapore
A World-Famous Landmark,
The Pride Of Korean Engineering And Construction.

