

광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 방안
- 3개 부두(GWCT, KIT, 테스트베드 3-2)를 중심으로 -

2026. 4. 22.

작성 : (주)심스리얼리티 AI융합원(RMH)



심스리얼리티
SIMS REALITY

※ 이 자료는 광양항 사업기획을 위한 내부 기초자료이며, 관계자외 유출을 금지함 ※

목 차

I. 광양항 컨테이너터미널의 현황 및 애로사항	6
1. 광양항 3개 컨테이너터미널(GWCT, KIT, 테스트베드 3-2) 개요	6
2. 광양항 컨테이너터미널의 문제점 및 한계	9
3. 광양항 컨테이너터미널의 애로사항 및 대응방안	11
II. 광양항 컨테이너터미널 운영의 페인포인트	13
1. 광양항 GWCT 컨테이너터미널 운영의 페인포인트	13
2. 광양항 KIT 컨테이너터미널 운영의 페인포인트	15
3. 광양항 테스트베드 3-2 컨테이너터미널의 예상 페인포인트	17
III. 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 필요성 및 로드맵	19
1. 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 필요성	19
2. 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 전환 비용(추정)	21
IV. 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 전략	25
1. GWCT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 전략	25
2. KIT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 전략	27
3. 광양항 3-2단계 테스트베드의 스마트항만 구축 전략	30
V. GWCT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축(안)	33
1. 광양항의 GWCT, KIT와 부산신항의 HJNC 비교	33
2. GWCT, KIT와 HJNC의 항만생산성 및 성과지표 비교	35
3. GWCT, KIT와 HJNC의 스마트항만 전환 방향	37
4. GWCT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 방안	39
5. HJNC 컨테이너터미널의 Meta K-Port 구축 현황	42
[부록] 광양항의 항만자동화 테스트베드 3-2단계 사업 현황	46
1. 광양항의 항만자동화 테스트베드(광양항 3-2단계) 사업 현황	46
2. 테스트베드(광양항 3-2단계) 사업의 차세대 스마트항만 필요성	48

요약

광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 방안[안]



광양항 컨테이너터미널의 현황 및 문제점

- 광양항의 3개 컨테이너터미널은 **물동량 정체 및 하역 생산성 한계**라는 공통된 도전에 직면해 있으며, 기존 터미널인 GWCT와 KIT는 **물리적 자동화 및 데이터 가시성 부족**이 주된 애로 사항이고, 국가 주도로 신규 구축 중인 테스트베드 3-2단계는 하드웨어 무인화를 탑재하지만 **예측형 AI 및 인지(Cognitive) 최적화 알고리즘의 부재**로 인한 구조적 한계 예상
- GWCT(광양항서부컨테이너터미널): 광양항 내에 최대 규모이나 유인 타이어식 야드 크레인(RTGC) 및 재래식 야드 트랙터(YT)에 의존하고 있어 **장비 노후화와 하역 생산성 편차**가 크며, 특히 수평형 야드 구조에서 내부 트랙터와 외부 트럭의 동선이 겹쳐 **외부 트럭 턴타임(TAT) 지연**이 발생하고, 플래너의 직감에 의존하는 수동 적치 계획으로 인해 **재조작(Rehandling) 비율이 높은 편임**
- KIT(한국국제터미널): 글로벌 운영사가 운영하는 중형 터미널로서 **운영 대비 부지가 협소한 편이며**, 고밀도 장치 운영으로 인해 목표 화물을 찾기 위한 **재조작이 GWCT 대비 구조적으로 높게 발생**하고, 글로벌 레거시 운영시스템(TOS)의 **예측 기능 결여**로 돌발 변수에 대한 실시간 동적 대응 능력이 떨어짐
- 테스트베드 3-2단계(신규 구축): 안벽부터 야드까지 완전 자동화(Full-Automation)를 목표로 2029년 개장 예정인 사업이지만, 정해진 규칙 기반(Rule-based) 이동으로 인해 좁은 공간에서 무인 이송 장비(L-AGV) 간 엉킴이 발생하는 **교착(Deadlock) 리스크**가 존재하며, 초대형 무인 안벽 크레인(STS)의 미세 **흔들림(Micro-Sway)**을 통제할 물리적 AI(Physical AI) 제어기의 부재 등 최신 AI 기술은 미흡함



광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 전환 필요성 및 효과

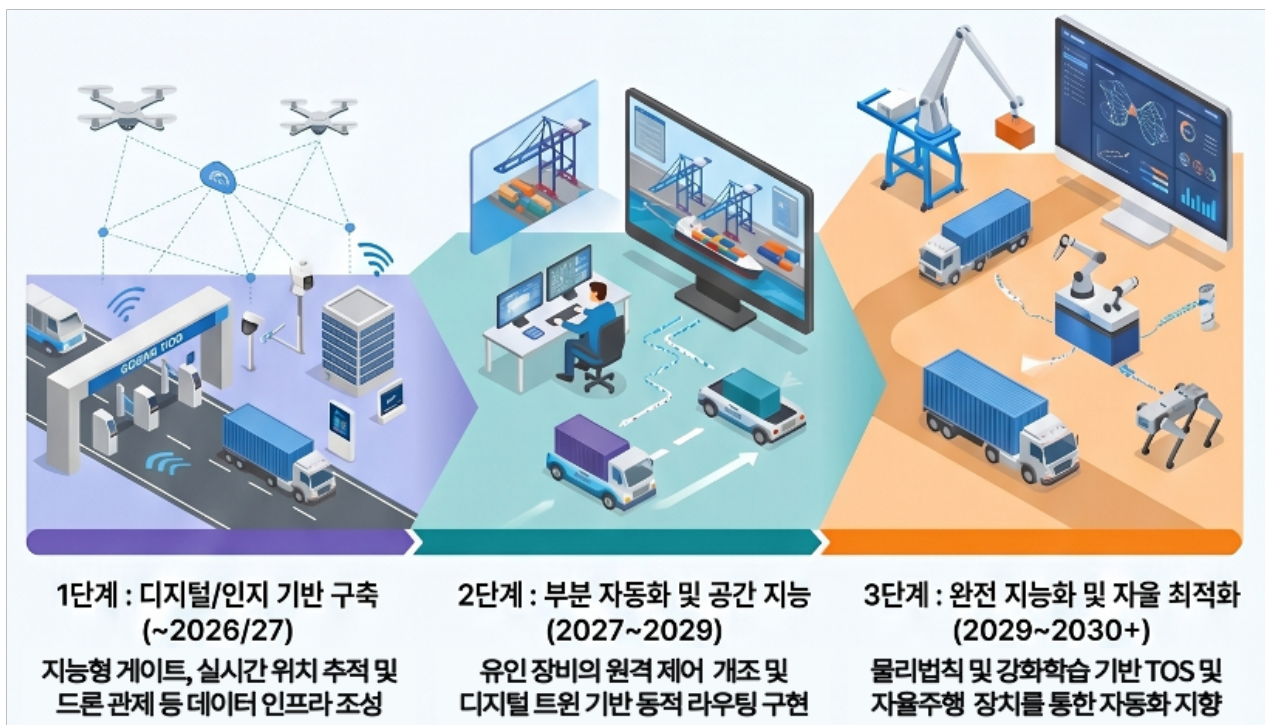
- 광양항 컨테이너터미널은 단순한 물리적 무인화/자동화를 넘어, 인공지능이 스스로 판단하고 제어하는 '**차세대 인지형 스마트항만(Cognitive Smart Port)**'으로의 전환이 필수적이며, 이를 통해 야드 생산성의 극한 도달, 운영 효율의 극대화, 중대재해 원천 차단(Zero Accident) 등의 효과를 기대할 수 있음
- GWCT: 유인 중심의 한계 도달, 중대재해처벌법 등 안전 규제 강화, 하역 인력 고령화 문제에 직면하여 기존 운영을 중단할 수 없는 환경에 부합되도록 **개조 중심의 지능화 전환이 필요**
 - 스마트항만을 도입하면 물리 AI 최적화 라우팅으로 외부 트럭 턴타임을 평균 15분 이내로 단축하고 재조작 비율을 30% 이상 절감하며, 위험 현장에서 인력을 분리하여 **안전사고를 원천 차단**할 수 있음

- KIT: 글로벌 선사들의 까다로운 하역 생산성 요구에 대응하고, 좁은 부지의 물리적 제약을 공간과 시간의 지능적 활용(소프트웨어 중심 전환)으로 극복
 - 스마트항만 구축을 통해 재조작을 줄여 **동일 면적에서 20% 이상의 추가 물동량을 안정적으로 처리**할 수 있도록 추진하고, 전 세계 중소형 브라운필드형 컨테이너터미널들이 도입할 수 있는 가장 경제적인 모듈형 스마트항만 수출 모델이 될 수 있음
- 테스트베드 3-2단계: 현재 구축 중인 시스템에 AI 지능을 이식하여 완전 무인 구역 내에서의 사각지대 관리와 하드웨어 성능을 100% 끌어올리기 위한 **소프트웨어 주권(인지형 두뇌 이식) 확보**가 필수(사업 초기 대비 AI 등 신기술이 고도화되었으나 테스트베드에는 반영이 미흡)
 - 스마트항만 고도화를 통해 기계적 대기 시간을 제로에 가깝게 수렴시켜 **이론상 최대 하역 생산성을 달성**하고, AI TOS 및 디지털 트윈 통합 소프트웨어 스택 완성으로 '한국형 스마트항만 두뇌'의 해외 수출 기반을 마련할 수 있음

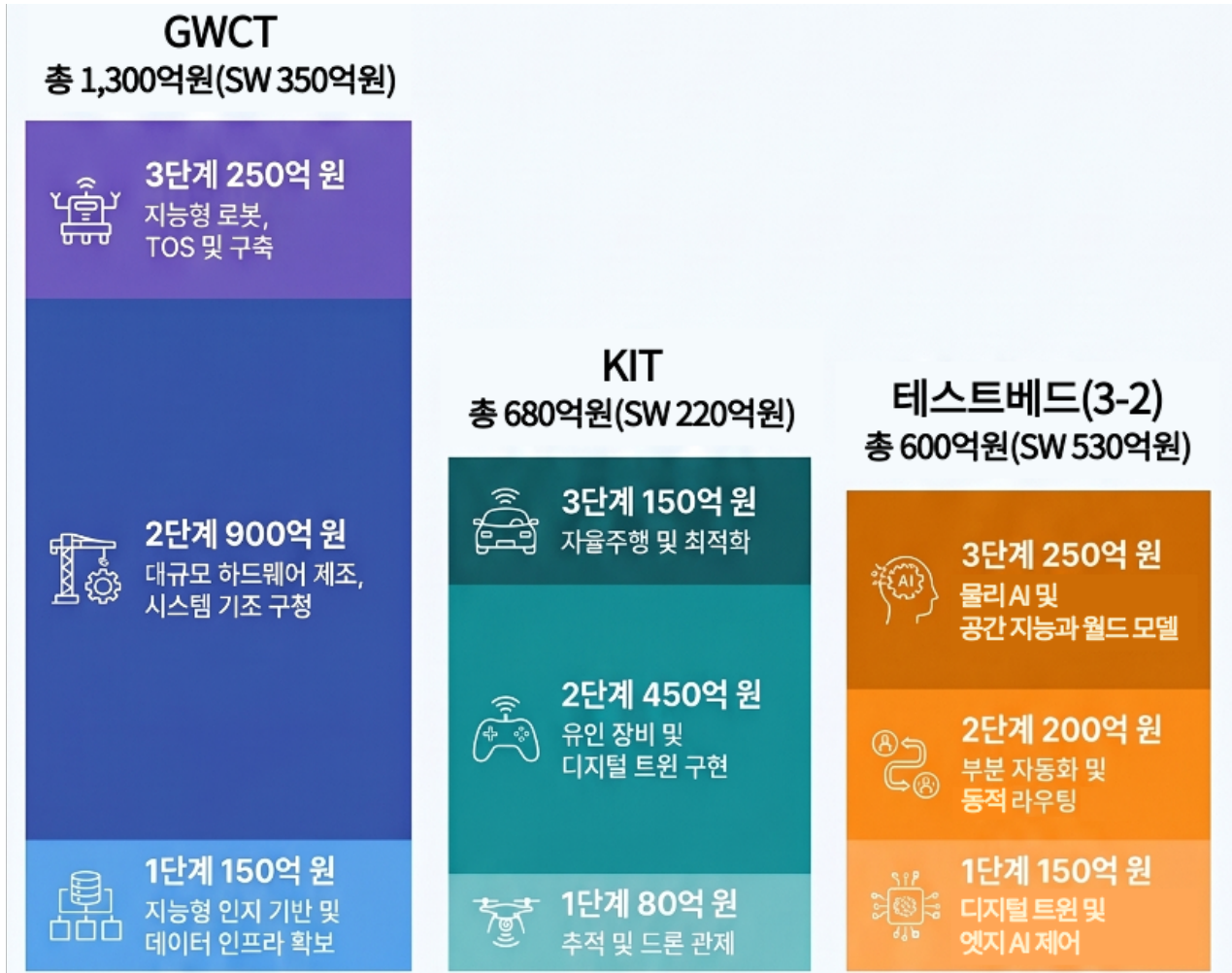
광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 방향

- 광양항의 스마트항만 전환은 각 터미널의 현재 인프라 상태에 따라 '투트랙(Two-Track)' 전략으로 진행하며, 즉 기존 운영 중인 GWCT와 KIT는 운영 중단 없이 물리적 설비 개조와 AI 고도화를 결합하는 '브라운필드(Brownfield) 맞춤형 하이브리드 개조(Retrofit)' 전략을 취하고, 신규 구축 중인 테스트베드 3-2단계는 자동화 하드웨어 위에 AI 지능을 이식하는 '그린필드(Greenfield) 자율형 운영' 전략으로 추진

○ 광양항 컨테이너터미널의 단계별 스마트항만 구축 방향



- 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 비용은 HW, SW를 포함하여 GWCT는 총 1,300억원, KIT는 총 680억원, 테스트베드 3-2단계는 총 600억원으로 추정되며, 일시에 추진하는 것이 아니고, 필요에 따라 SW 중심으로 구축할 수도 있으므로 예상은 탄력적임



- GWCT(데이터 기반 고도화 후 물리적 자율화)
 - 전면 재구축이 아닌 기존 항만 인프라를 활용하며, "Data First, Autonomy Next" 방향으로 선제적인 센서망(RFID/LiDAR/GPS) 구축을 통해 데이터를 축적
 - 이후 3D 디지털 트윈 상에서 유무인 장비가 혼재(MUM-T)하는 상황의 충돌 리스크를 가상 환경에서 먼저 검증(Sim-to-Real)한 후, 고비용의 하드웨어 개조(RTGC 원격제어, ARMGC 신규 도입 등)를 실행하여 리스크를 통제하고 투자수익률(ROI)을 조기에 확보
- KIT(중형 터미널 맞춤형 고효율 개조 및 무중단 전환)
 - 좁은 부지의 한계를 극복하기 위해 가성비 높은 센서와 기존 장비 원격화 개조에 집중 투자 (Cost-Effective Retrofit) 전략
 - 항만 운영을 멈추지 않아야 하므로, 3D 디지털 트윈을 통한 '가상 검증 기반 무중단 전환 (Zero-Downtime Migration)'을 핵심 방법론으로 채택하여 글로벌 표준(Hutchison IT 표준)과 한국의 첨단 AI 기술을 매끄럽게 연동

○ 테스트베드 3-2(소프트웨어 정의 항만, SDP)

- 이미 자동화 하드웨어가 구축되는 환경이므로, AI가 하드웨어의 성능을 재정의하는 '소프트웨어 정의 항만(Software-Defined Port)' 아키텍처를 지향
- 옛지 AI가 크레인 흔들림 등 단말의 즉각적 반응을 통제하고, 클라우드의 초거대 월드 모델이 전체 항만의 자율 배치를 담당하는 'Edge-to-Cloud 분산 제어 및 Sim-to-Real' 파이프라인 구축하여 지능형 최적화 항만 구현

광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 방안 및 추진 내용

- 스마트항만으로 전환하기 위해서는 각각 항만의 특성에 적합한 3D 디지털 트윈 시뮬레이션 (Sim-to-Real), 물리 AI(Physical AI), 공간 지능(Spatial Intelligence), 드론 및 LiDAR 기반 무인 감시 시스템을 지능형 터미널운영시스템(TOS)에 빈틈없이 통합하는 방식으로 추진

○ GWCT(브라운필드 맞춤형 개조 전략): "데이터 기반 고도화 후 물리적 자율화" 방향으로 전면 교체가 아닌 기존 시설 개조에 집중

- 1단계(~2026): 3D 디지털 트윈 구축, 지능형 게이트 구축 및 모든 장비에 RTLS(위치추적) 장착, LiDAR 드론 기반 공간 인지망 등 100% 디지털화 수행
- 2단계(2027~2028): 기존 유인 크레인(RTGC)을 원격 제어용으로 전면 개조하고 부분적으로 자동화 장비(ARMGC)를 신규 도입하며, 디지털 트윈과 TOS 연계 및 Sim-to-Real 검증
- 3단계(2029~): 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 도입 및 물리 AI 기반 차세대 지능형 TOS 적용

○ KIT(가성비 기반 중형 터미널 고효율 개조): 터미널 운영 중단 없는 "가상 검증 무중단 전환 (Zero-Downtime Migration)"을 목표로 추진

- 1단계(~2026): 3D 디지털 트윈 구축, 지능형 게이트 구축, 실시간 위치 추적 도입, 사각지대 없는 재고 관리를 위한 드론 관제 시스템 기초 도입
- 2단계(2027~2028): 비용 효율적인 기존 유인 RTGC의 원격 제어화 개조 및 특정 블록에 부분적 ARMGC 도입, 3D 디지털 트윈과 TOS 연계
- 3단계(2029~): A-YT 연동 최적화 및 중앙 원격통제센터(ROC) 구축, 글로벌 표준 TOS와의 지능화 연동 설계

○ 테스트베드 3-2(소프트웨어 정의 항만(SDP) 지향): 기존 구축 중인 자동화 하드웨어에 초거대 AI 컴퓨팅과 소프트웨어 역량을 강화

- 1단계(~2027): 안벽 크레인 미세 제어를 위한 물리 정보 신경망(PINN) 옛지 AI 도입 및 정밀 디지털 트윈의 TOS 연동 및 Sim-to-Real 검증
- 2단계(2028~2029): L-AGV 교차 방지를 위한 공간 지능 기반 동적 라우팅 엔진 구축 및 다목적 LiDAR 드론 기반 무인 안전망 확충
- 3단계(2030~): 터미널 스스로 사전 배치(Pre-staging)하는 월드 모델(World Model) 기반 자율 최적화 TOS 완성 및 4족 보행의 안전점검 로봇 도입

컨테이너터미널의 스마트항만 구축 우선순위 및 논리적 근거

- 광양항 컨테이너터미널 전체(GWCT, KIT, 테스트베드 3-2단계)를 일시에 스마트항만으로 전환하는 것은 인프라, 예산, 지배구조 등 제약요인이 있으며, 핵심 평가지표(시급성, 기술성, 경제성, 유연성)로 분석한 결과, **GWCT, 테스트베드 3-2단계, KIT 순으로 스마트항만 전환의 우선순위를 설정**(단, 장기적으로는 순차적으로 모두 추진하는 것이 바람직함)

- **GWCT가 1순위 이유:** GWCT는 광양항 물동량의 핵심을 담당하는 **최대 주력 터미널**이지만, **재래식 장비 노후화와 인력 의존으로 인한 생산성 저하와 안전 리스크가 한계에 달해 가장 높은 시급성**을 가지며, 또한 물류기업들의 지배구조는 정부의 스마트항만 기조에 맞춰 유연한 의사결정이 가능하고, 터미널 환경은 적용하기에 기술적, 경제적 파급효과(ROI)가 가장 우수
- **테스트베드 3-2가 2순위 이유:** 기술 구현의 용이성(Greenfield)이나 지배구조의 유연성(국가 주도) 면에서는 압도적으로 유리하며, 즉 이미 **정부 예산이 투입되어 자동화 하드웨어가 진행되고 있어 신기술 적용이 가능**하고, 다만, 운영 중인 브라운필드 항만의 누적된 문제를 해결하는 것이 아니며 **2029년 개장이지만 조속한 개발 필요**
- **KIT가 3순위 이유:** KIT는 협소한 공간에서 고밀도 운영을 해야 하는 기술적 난이도가 높으며, 무엇보다 **글로벌 운영사(Hutchison)의 외국계 지배구조**를 가지고 있어, 글로벌 본사의 보수적인 표준 TOS 정책으로 인해 최신 한국형 AI 기술 및 물리적 개조를 동적으로 도입하는 데 의사결정(유연성)의 한계가 존재하므로 우선순위를 가장 후순위로 설정

평가 지표	GWCT (우선순위 1위)	테스트베드 3-2 (우선순위 2위)	KIT (우선순위 3위)
시급성 (생산성, 안전성, 효율성)	[최상] 광양항 최대 규모의 터미널이지만 유인/재래식 중심, 병목현상, 하역 한계, 중대재해 리스크도 크므로 조속히 개조 필요	[상] 2029년 개장 예정이므로 당장의 하역 차질은 없으나, AI 두뇌 이식 지연 시 개장 후 L-AGV 교차 등 운영 혼란 우려	[중] 협소한 부지와 재조작 급증 문제가 있으나, 중형 규모의 글로벌 GTO의 레거시 시스템으로 당장의 운영은 유지됨
기술성 (시스템, 장비 구현 유리성)	[상] 부지가 넓고 장치율이 낮아(50~60%) 단계적 개조 작업 및 유무인 혼재(MUM-T) 테스트와 디지털 트윈 적용에 유리	[최상] 신규 구축중으로 레거시 제약이 없으며, 국산 완전 무인 하드웨어가 도입되어 AI/SW만 이식하기에 가장 최적의 환경	[하] 부지가 협소하고 고밀도로 쌓여 물리적 개조의 공간적 여유가 부족하며, 글로벌 표준 TOS 사용으로 로컬 AI 연동 제약 존재
경제성 (비용 대비 투자 효율성)	[최상] 약 1,300억 투자, 국내 최대 물동량 처리 항만 이므로 하역/턴타임 단축 시 발생하는 ROI(경제적 이익) 규모 매우 큼	[상] 약 600억(SW 중심) 추가 투자, 기존 7,846억 규모 하드웨어 성능을 100% 끌어내 '한국형 스마트항만 수출' 가치 창출	[중] 약 680억 투자, 투자액 대비 처리물동량 한계(중형)와 물리적 부지 제약으로 절대적인 수익 극대화 폭은 상대적으로 작음
유연성 (지배구조/ 의사결정)	[상] 국내 물류/선사 연합(SM, CJ 등) 지배구조로 국내 기술 실증 및 의사결정이 빠르고 여수광양항만 공사(YGPA) 협조 용이	[최상] 해수부 및 YGPA 50:50 분담 국책사업으로, 국가 핵심정책 추진 및 예산 지원에 있어 가장 유연하고 강력한 추진력 보유	[하] 외국계 자본(홍콩 허치슨 계열), 글로벌 본사의 정책과 시스템 표준을 따르므로 국내 독자기술 이식과 신속한 의사결정에 불리

I

광양항 컨테이너터미널의 현황 및 애로사항

1. 광양항 3개 컨테이너터미널(GWCT, KIT, 테스트베드 3-2) 개요

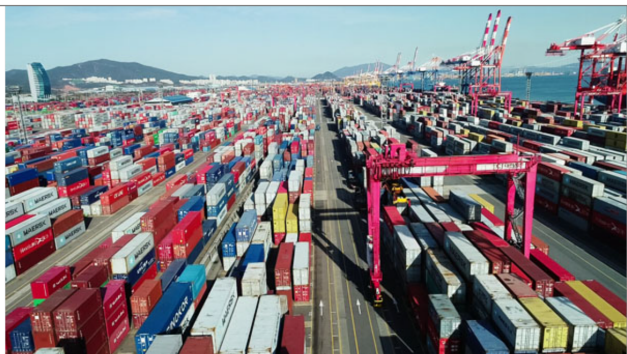
가. 광양항 3개 컨테이너터미널 종합 비교

- 광양항의 컨테이너터미널은 현재 GWCT와 KIT가 운영중이고, 스마트항만을 지향하는 테스트 베드 3-2단계는 신규로 구축 중(실질 운영은 2029년 예상)

구분	GWCT (광양항서부컨테이너터미널)	KIT (한국국제터미널)	테스트베드 3-2단계 (신규 구축)
운영/개발 형태	국내 물류/선사 연합 운영 (Brownfield)	글로벌 터미널 운영사 (Brownfield)	국가 주도 자동화부두 구축 (Greenfield)
설립일 /연혁	2006년 10월 법인 설립 (2007년 3월 부두 개장)	2001년 11월 9일 설립	2022년 구축 본격 착수 (2029년 전면 개장 목표)
위치 /주소	전남 광양시 항만대로 1230 (3-1단계)	전남 광양시 도이동 844 (2-2단계)	전남 광양시 도이동 일원 (3-2단계)
종업원 수	약 150~200명 (SMGT 통합후 규모 유지)	100명 내외 (2024년 기준)	해당 없음 (현재 인프라구축 공사중)
재무/예산 현황	비상장 대형 통합 터미널 (정확한 수치는 비공개이나 광양항 최대 규모)	매출액: 약 404억원 (2024.12 기준) 영업이익: 약 1.8억원	[총 사업비]약 7,846억원 (※ 세부 특이사항 참조)
지배 구조 (지분)	국내 선사 및 물류기업 (장금상선, CJ대한통운 등) 컨소시엄	Hutchison Ports (홍콩 허치슨) 계열의 100% 외국계 자본	정부(해양수산부) 50%, YGPA 50% 분담

나. 터미널별 현황 및 여수광양항만공사(YGPA)와의 관계

① GWCT(광양항서부컨테이너터미널)

	
Gate work GATE업무 RFID와 BARCODE를 통한 자동화 및 On-dock 전용 GATE 운영으로 효율적인 반출입 작업 등 고객 우선 서비스 제공하고 있습니다.	Yard work 야드 업무 국내 유일의 멀티 포트 운영과 충분한 야드 공간을 활용한 효율적인 야드 운영 및 야드 생산성 향상과 최상의 물류 서비스를 제공합니다.

- 개요 및 연혁: 2006년 10월 법인이 설립되어 2007년 3월 광양항 3-1단계 컨테이너 터미널로 공식 개장했으며, 광양항 내에서 가장 큰 선석 규모(4선석, 길이 1,400m)를 운영하는 주력 터미널(게이트 10개, 일시장치능력 51,192TEU)
- 지배 구조: 특정 단일기업이 아닌 국내 주요 해운·물류 기업들이 지분을 나누어 가진 컨소시엄 형태이며, 최대 주주는 장금상선 그룹이고 CJ대한통운과 전략적 파트너십 구축
- YGPA와의 관계 및 특이사항(통합 이슈)
 - 2020년 12월 2일, 광양항의 경쟁력 강화를 위해 인접한 SM상선광양터미널(SMGT)의 지분 97.86%를 인수하며 성공적으로 통합(이후 GWCT는 SMGT 선석을 YGPA에 반납)
 - 이 과정에서 여수광양항만공사(YGPA)는 두 회사의 일자리 상실 없는 통합을 지원하기 위해 약 279억원 규모의 임대료 유예 및 지원을 제공한 바 있으며, 2024년에는 YGPA 주도로 KIT와 함께 '하역장비 공동사용 협약'을 체결하여 장비운영 효율을 재고

② KIT(한국국제터미널)



- 개요 및 재무: 2001년 11월에 설립된 광양항 2-2단계 부두 운영사이며, 최근 공개된 2024년 재무 데이터 기준으로 약 404억 원의 매출액과 1.8억원의 영업이익을 기록
- 지배 구조: 세계 최대의 항만 네트워크를 보유한 홍콩 '허치슨 포트 홀딩스(Hutchison Ports)'가 운영하는 광양항 유일의 글로벌 터미널 운영사(GTO)이며, 글로벌 선사들과 네트워크 공유
 - KIT(한국국제터미널)은 한국의 법인 이름이며, 국제적으로는 Hutchison Ports Gwangyang 명칭을 사용
- YGPA와의 관계: YGPA로부터 부두를 임대받아 운영하는 임대 운영사이고, YGPA의 스마트 항만 전환 정책에 협조하며, 제한된 중형 터미널 부지 내에서 자동화 장비 및 하역 장비 공동 사용 등 생산성을 끌어올리기 위한 협업 체계를 유지

③ 항만자동화 테스트베드(광양항 3-2단계)



- **사업 개요:** 국내 기술 기반의 자동화역장비를 도입하고 한국형 스마트항만(K-스마트항만) 구축을 촉진하기 위한 국가 핵심 정책 사업으로, 총 4개 선석(4,000TEU급 3선석, 2,000TEU급 1선석) 규모로, 안벽부터 야드까지 완전 자동화 시스템을 갖출 예정
- **지배 구조 및 YGPA와의 관계:** 이 사업은 일반 민간 법인이 아닌, 정부(해양수산부)와 여수광양항만공사(YGPA)가 사업비를 각각 50%씩 분담하여 직접 주도하고 개발하는 공공 인프라 확충 사업이며, 완공 후 운영사 모집을 통해 정상 가동될 예정
- **국내 최초의 완전 자동화(Full-Automation) 부두:** 야드 크레인뿐만 아니라 컨테이너 크레인(안벽), 이송 장비(AGV)까지 무인으로 운영되는 최고 수준의 자동화 부두를 구축하며, 국내 기술로 개발된 자동화 장비 및 운영 시스템을 실제 항만 환경에서 검증하고 기술 이전
- **사업비 및 일정 변경**
 - **예산 증액:** 2021년 예비타당성 조사 당시 총 사업비는 6,915 억원이었으나, 이후 물가 상승 및 설비 국산화 등의 이유로 2024년에 7,464 억원으로 증액되었고, 2025년 보도에 따르면 최종 7,846 억원이 투입되는 규모로 재산정
 - **개장 시기:** 초기에는 2026~2027년 개장을 목표로 했으나, 완전 자동화 설비(HD현대삼호 등에서 제작하는 안벽 크레인 8기 및 야드 크레인 32기 등)의 안정적인 테스트와 시스템 최적화 기간을 거쳐 현재는 2029년 전면 개장으로 목표 연도 조정

2. 광양항 컨테이너터미널의 문제점 및 한계

- 현재 광양항의 컨테이너터미널(GWCT, KIT)은 ‘물리적 자동화 및 데이터 가시성 부족’이 주된 원인이며, 테스트베드(3-2단계)는 계획대로 완공되더라도 ‘예측형 AI 및 인지(Cognitive) 최적화의 부재’로 인해 구조적 한계가 있음
- 수출입 업무 프로세스 전반을 분석한 결과, 기존 항만(GWCT, KIT)은 사람의 감(경험)과 유인 하드웨어 노후화에서 오는 ‘물리적 병목 현상’이 가장 큰 애로사항이며, 반면, 최신 자동화 하드웨어가 장착되는 3-2단계의 테스트베드 사업은 스스로 예측하고 기계적 한계를 극복하는 ‘지능형 인지(Cognitive) 알고리즘의 결핍’이 가장 큰 숙제임
- 따라서 광양항 컨테이너터미널이 진정한 스마트항만으로 가기 위해서는, 각자의 현황에 맞게 디지털 트윈 시뮬레이션(Sim-to-Real), 물리 AI, 공간 지능, 그리고 드론/LiDAR 기반 무인 감시 시스템을 TOS에 어떻게 빈틈없이 통합(Integration)하느냐가 성공의 열쇠가 될 것임

가. 게이트(Gate) 측면: 트럭 반출입 및 육상 연계

○ GWCT & KIT(기존 항만)

- 반출입 집중(Peak-time) 시 병목 현상: 외부 트럭 예약 시스템(VBS)의 참여율이 저조하거나 연동이 미흡하여, 특정 시간대에 트럭이 몰릴 경우 게이트 앞 대기열이 길어짐
- OCR 인식 오류 및 수동 처리: 광학문자인식(OCR) 카메라가 컨테이너 번호나 씰(Seal) 파손 여부를 오인식할 경우, 게이트 직원이 수동으로 개입해야 하므로 무정차(Free-flow) 통과율이 저하

○ 테스트베드 3-2단계(추진중인 스마트항만)

- 수동적 게이트 운영: 자동화 게이트는 구축되지만, 항만 외부의 배후단지 교통량이나 배차 플랫폼 데이터를 분석해 트럭의 실제 도착시간(ETA)을 능동적으로 예측(World Model 적용)하여 게이트를 사전 할당하는 기능이 부족

나. 야드(Yard) 측면: TAT, CDT, 리핸들링 및 배치 계획

○ GWCT & KIT(기존 항만)

- 높은 리핸들링(재조작) 비율: 플래너의 경험에 의존한 수동 컨테이너 적치 계획으로 인해, 밑에 깔린 수출 화물을 꺼내기 위해 위쪽 화물을 여러 번 옮겨야 합니다. 이는 장비 가동률을 잡아먹는 최대 원인
- 외부 트럭 턴타임(TAT) 지연: 수평형 야드 구조에서 외부 트럭과 내부 야드 트랙터(YT)의 동선이 겹치고, 유인 RTGC의 작업 대기 시간이 길어져 TAT가 20~30분 이상 지연되는 경우가 발생(컨테이너 체류시간인 CDT 관리의 어려움 가중)

○ 테스트베드 3-2단계(AI 스마트항만 관점의 한계)

- 동적 라우팅의 교착(Deadlock) 리스크: 44대의 무인 이송 장비(L-AGV)가 정해진 규칙(Rule-based)으로만 움직일 경우, 예기치 않은 장애물이나 작업 지연 발생 시 장비들이 서로 엉키는 '데드락'에 빠질 수 있음

- 컨테이너 야드의 객체 궤적을 예측하는 공간 지능(Spatial Intelligence) 알고리즘이 부재하면 전체 야드 운영이 일시 정지 등 곤란한 상황이 나타날 수도 있음

다. 선석(Berth) 측면: 선박 ETA, 선석 배정, STS 크레인 할당

○ GWCT & KIT(기존 항만)

- 부정확한 선박 ETA 대응: 기상 악화나 이전 기항지에서의 지연으로 선박 도착 시간(ETA)이 수시로 변동될 때, 수동으로 선석(Berth)과 하역 장비 일정을 재조정해야 하므로 연쇄적인 대기 시간(Idle Time)이 발생
- STS 크레인 생산성(GCR) 편차: 유인 크레인의 특성상 기사의 숙련도와 피로도에 따라 하역 속도의 편차가 큼

○ 테스트베드 3-2단계(AI 스마트항만 관점의 한계)

- 자원 할당의 경직성(Static Pooling): 자동화 STS가 도입되더라도, 특정 선박에 크레인을 고정 할당하는 기존 방식을 답습할 우려가 있음
- AI 기반의 시뮬레이션을 통해 터미널 전체의 물동량 흐름을 파악하고, 가장 작업이 급한 선석으로 STS와 L-AGV를 유연하게 집중 투입하는 동적 리소스 풀링(Dynamic Pooling)이 부족

라. 시설(Facility) 측면: TOS, 관제, 위험물, CCTV 모니터링

○ GWCT & KIT(기존 항만)

- 데이터 파편화 및 맹점(Blind Spot): 기본적인 TOS 기능에 머물러 있어 야드 내 화물 추적이 완벽하지 않으며, 고정형 CCTV에만 의존하여 컨테이너 틈새나 냉동/위험물 장치장의 실시간 온도 이상, 결함 등을 파악하기 곤란

○ 테스트베드 3-2단계(AI 스마트항만 관점의 한계)

- 단순 모니터링 수준의 디지털 트윈: 3D 디지털 트윈이 구축되더라도, 이는 현재 상황을 보여주는 '거울' 역할에 그치며, 수만 번의 강화학습을 거쳐 최적의 운영안을 실제 현장에 반영하는 'Sim-to-Real' 기반 예측 통제 엔진으로 작동하지 못함
- 통제 구역(Restricted Area) 내 무인 감시망 부재: 100% 무인화된 야드 내에 화재나 결함이 발생했을 때 사람이 진입할 수 없으며, 따라서 사용자의 제안처럼 RFID/LiDAR를 장착한 자동화 드론이나 Vision AI가 적용된 지능형 CCTV망이 없으면 사고 초동 대응이 불가능

마. 장비(Equipment) 측면: 하역 크레인, 트럭/트랙터 등 이동 장비

○ GWCT & KIT(기존 항만)

- 인력 운영 리스크 및 탄소 배출: 디젤 구동 기반의 야드 트랙터(YT)와 타이어식 크레인(RTGC)으로 인한 탄소/미세먼지 배출 문제, 그리고 작업자의 근골격계 질환 등 중대재해 발생 리스크가 상존하며, 노후 장비의 잦은 고장은 작업 스케줄에 치명적인 한계

○ 테스트베드 3-2단계(AI 스마트항만 관점의 한계)

- 기계적 제어의 물리적 한계(Micro-Sway): 초대형 무인 안벽 크레인(STS)은 돌풍이나 화물

무게 중심의 편차에 매우 취약하고, 단순 PID 제어로는 미세한 흔들림을 잡는 데 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해서는 크레인 단말에 물리 정보 신경망(PINN) 기반의 피지컬 AI(Physical AI) 엣지 제어가 필수적으로 연동되어야 함

- 예지보전(PdM) 시스템 결여: 무인 장비(L-AGV, ARMGC)의 부품 마모도나 진동 데이터를 실시간 학습하여 "3일 뒤 고장이 예상되니 사전 정비하라"고 지시하는 AI 기반 예방 정비 알고리즘이 없다면, 운영 중단으로 인한 막대한 손실을 감수해야 함

3. 광양항 컨테이너터미널의 애로사항 및 대응방안

- 광양항은 물동량 정체 및 하역 생산성 한계라는 도전에 직면해 있으며, 특히 GWCT, KIT 등 기존 부두는 재래식 하역 장비의 노후화로 인한 병목 현상을 겪고 있으며, 국가 주도로 구축 중인 3-2단계 테스트베드(2029년 개장 목표)조차 초기 설계상의 한계로 인해 완전한 지능화를 달성하기 위한 추가적인 고도화가 절실히 요구되고 있음

가. GWCT(광양항서부컨테이너터미널)

[현재의 문제점 및 애로사항]

- 유인 장비 노후화 및 생산성 정체: 광양항 내에 최대의 시설/장비를 구축하였지만, 작업자가 직접 탑승하는 유인 RTGC(타이어식 야드 크레인) 및 재래식 야드 트랙터에 의존하고 있어 작업자의 피로도 및 숙련도에 따라 하역 생산성(GCR) 편차가 발생
- 디지털 가시성 및 시뮬레이션 플랫폼 부재: 터미널 부지가 방대하여 화물과 트럭의 병목 지점을 실시간으로 파악하기 어려우며, 또한 운영을 중단할 수 없는 브라운필드(Brownfield) 특성상 장비 교체나 동선 변경 시 발생할 리스크를 사전에 모니터링하거나 예측할 3D 디지털 트윈 기반 통제 플랫폼이 미비

[해결을 위한 대응방안]

- TRL 6~8 범위의 디지털 트윈 시뮬레이션 선행: 하드웨어의 일괄 교체가 불가능하므로, 장비 개조 전 가상 공간에서 유·무인 장비의 작업 동선을 최적화하는 3D 디지털 트윈의 실증 환경을 기술성숙도(TRL) 6단계(유사 환경 검증)부터 8단계(실제 환경 실증)까지 체계적으로 구축하여 실제 시스템에 매끄럽게 이식(Sim-to-Real)하는 방식으로 접근
- RFID/LiDAR 기반 무인 야간 순찰 및 재고 관리: 넓은 야드의 시야 확보 한계를 극복하기 위해, 비전(Vision) 기술의 제약을 보완하는 RFID/LiDAR 장착 다목적 드론을 도입해야 하며, 이를 통해 주야간 사각지대 없는 컨테이너 재고 전수 조사와 무인 시설 순찰을 동시에 수행하는 촘촘한 안전망을 확보

나. KIT(한국국제터미널)

[현재의 문제점 및 애로사항]

- **부지 협소로 인한 재조작(Rehandling) 증가:** 4개 선석의 중형 터미널로서 야드 부지가 상대적으로 제한적이며, 처리 물동량이 늘어 장치율이 높아질수록 목표 화물을 찾기 위해 다른 화물을 여러번 옮겨야 하는 재조작이 빈번해지며, 이는 외부 트럭의 턴타임(TAT) 지연으로 직결
- **AI 없는 레거시 시스템의 동적 대응 한계:** 기존 GTO(글로벌 터미널 운영사)의 레거시 운영 시스템(TOS)은 사전에 짜인 규칙 기반(Rule-based)으로 작동하는데, 이는 기상 악화나 선박 입항 지연과 같은 돌발 변수 발생 시 실시간으로 장비를 유연하게 재배치하는 동적 최적화 능력이 떨어짐

[해결을 위한 대응방안]

- **유인 장비의 원격 제어(Remote Control) 개조:** 고비용의 전면적인 하드웨어 교체 대신, 기존 유인 RTGC에 센서와 통신모듈을 부착하여 원격 제어용으로 개조하는 가성비 높은 투자 전략 필요
- **AI 기반 동적 리소스 할당(Dynamic Pooling):** 제한된 공간에서 교차 간섭을 줄이기 위해, AI가 터미널 전체의 흐름을 읽고 가장 혼잡한 블록에 크레인과 트랙터를 실시간으로 집중 배치하는 차세대 지능형 TOS 아키텍처 연동이 요구

다. 항만자동화 테스트베드(광양항 3-2단계)

[현재의 문제점 및 애로사항]

- **규칙 기반(Rule-based) 무인화의 교착(Deadlock) 리스크:** 현재 전 영역 무인화를 목표로 구축 중이나, 초기 설계는 하드웨어의 자율 주행(L-AGV) 자체에 맞춰져 있으며, 수십 대의 무인 장비가 좁은 공간에서 얹힐 때 AI가 아닌 단순 로직으로 제어할 경우, 예기치 않은 장애물 발생 시 우회 경로를 찾지 못해 터미널 전체가 마비되는 치명적 한계가 존재
- **물리적 환경 요인을 통제할 피지컬 AI(Physical AI) 부재:** 강한 해풍이나 화물의 불균형 등 물리적 변수 상황에서 초대형 안벽 크레인(STS)의 미세한 흔들림(Sway)을 0.1초 단위로 보정하는 정밀한 물리 제어 시스템의 고도화가 아직 미흡

[해결을 위한 대응방안]

- **월드 모델(World Model) 및 피지컬 AI 엡지 제어기 도입:** 외부 변수를 스스로 학습하여 내일의 터미널 혼잡도를 예측하고 장비를 사전 배치하는 초거대 AI(월드 모델) 기반 TOS를 이식해야 하며, 안벽 크레인에는 기계적 한계를 극복하기 위해 물리 법칙(물리 정보 신경망, PINN)을 학습한 엡지 AI를 탑재하여 제어 정밀도를 극한으로 끌어올려야 함
- **공간 지능(Spatial Intelligence) 라우팅 엔진 탑재:** 단순히 현재 위치를 파악하는 것을 넘어, 컨테이너터미널 내 모든 동적 객체의 위치를 예측하여 수십 대의 L-AGV 간 궤적 영킹을 원천 차단하는 공간 지능 알고리즘을 적용하는 것이 바람직함

II

광양항 컨테이너터미널 운영의 페인포인트

1. 광양항 GWCT 컨테이너터미널 운영의 페인포인트

- 광양항의 주력 터미널인 GWCT(광양항서부컨테이너터미널)는 컨테이너 정보를 관리하는 솔루션(IGS)이 있으나, 유인 하역 장비와 재래식 야드 구조를 기반으로 운영되는 전형적인 브라운 필드(Brownfield) 항만으로 수출입 물류 프로세스(반출입-장치-하역)의 흐름에 따라, 항만 생산성과 운영 효율성을 저해하는 구체적인 문제점(Pain Point)을 가지고 있음

가. 게이트(Gate) 측면: 외부 화물차 반출입 프로세스

- 피크타임(Peak-time) 병목 및 VBS(차량예약시스템) 한계: 특정 시간대(주로 오전 및 점심시간 직후)에 외부트럭이 집중될 경우, 게이트 진입 대기열이 항만 외부도로까지 이어지는 병목 현상이 발생하며, 외부 트럭의 도착 예정시간(ETA)을 능동적으로 통제할 수 있는 시스템 연동이 부족
- 광학문자인식(OCR) 오류에 따른 수동 개입: 컨테이너 번호, 차량 번호, 씰(Seal) 상태 등을 인식하는 IGS(Intelligent Gate Solution)의 게이트 OCR 카메라가 악천후나 오염된 컨테이너를 오인식할 경우, 게이트 직원이 직접 확인하고 수동으로 시스템에 입력해야 하므로 무정차(Free-flow) 반출입 효율이 급감함
- 위험물/냉동 컨테이너 사전 검수 지연: 특수 컨테이너의 경우 서류 확인 및 물리적 상태 점검에 시간이 추가로 소요되어 일반 화물차의 흐름까지 방해하는 요인으로 작용함

나. 야드(Yard) 측면: 장치장 적치 및 내부 물류 흐름

- 높은 재조작(Rehandling) 비율과 배치 계획의 한계: 야드 플래너의 경험에 의존하여 장치 계획을 수립하다 보니, 선박 입항 스케줄이 조금만 변경되어도 밑에 깔린 수출 화물을 꺼내기 위해 위쪽 컨테이너를 여러 번 들어 옮겨야 하는(Shifting) 비효율이 발생하며, 이는 장비 가동률을 떨어뜨리는 가장 큰 원인
- TAT(외부 트럭 턴타임) 지연 및 동선 혼재: 유인 RTGC(타이어식 크레인)가 작업하는 수평형 야드 블록 내에서 외부 트럭(반출입)과 내부 야드 트랙터(양적하)의 작업 동선이 겹치며, 내부 트랙터 작업이 우선시될 경우 외부 트럭의 대기 시간이 20~30분 이상으로 길어지며 TAT 관리에 치명적인 약점
- 장기 체류 화물(CDT) 통제력 부족: 넓은 야드 부지를 활용해 화주에게 여유 있는 프리타임(Free-time)을 제공하는 편이나, 이로 인해 장기 체류 화물이 블록 하단에 누적되어 야드 운영의 유연성을 해치고 있음

다. 선석(Berth) 측면: 안벽 하역 및 선박 연계

- 부정확한 선박 ETA에 따른 대기 시간(Idle Time): 기상 악화나 이전 기항지(부산항, 중국 항만 등)에서의 작업 지연으로 선박의 실제 입항 시간이 수시로 변동됩니다. 이를 실시간으로 예측하여 선석 배정을 자동 조정하는 기능이 부족해 하역 갱(Gang, 작업조)과 크레인이 빈 상태로 대기하는 손실 발생
- 고정적 STS 할당 및 자원 경직성: 특정 선박에 안벽 크레인(STS)과 내부 트랙터를 고정적으로 할당하는 방식을 주로 사용하며, 터미널 전체의 상황을 파악하여 작업이 지연되는 선석으로 크레인이나 야드 트랙터를 즉각 전환 배치(Dynamic Pooling)하는 유연성이 떨어짐
- 작업자 의존형 하역 생산성(GCR): 100% 유인 STS 크레인에 의존하므로, 기사의 숙련도, 야간/악천후에 따른 시야 확보 문제, 교대시간에 따른 작업 단절 등으로 인해 시간당 하역 생산성에 편차 발생

라. 시설(Facility) 측면: 인프라 및 관제 시스템

- 데이터가 단절된 레거시 TOS: 현재의 터미널 운영 시스템(TOS)은 수집된 데이터를 바탕으로 현재 상황을 보여주는 데 그치며, SI를 활용하여 내일의 혼잡도를 예측하거나 최적의 장비 이동 경로를 스스로 생성하는 시뮬레이션 기능이 부재
- 야드 맹점(Blind Spot) 및 수동 재고 파악: 야드가 넓어 고정형 CCTV만으로는 컨테이너 틈새나 블록 이면의 사각지대를 모두 감시할 수 없으며, GPS 오차나 작업자의 단말기 입력 누락으로 인해 전산상 위치와 실제 컨테이너 위치가 다른 경우, 사람이 직접 차량을 타고 돌아다니며 재고를 파악해야 함
- 특수 구역 모니터링 한계: 냉동 컨테이너 플러그 연결 상태나 위험물 장치장의 온도 이상 등을 중앙에서 실시간 3D로 감지하고 즉각 알람을 띄워주는 지능형 관제 시설이 부족

마. 장비(Equipment) 측면: 크레인 및 이동 장비 운용

- 디젤 장비 노후화 및 잦은 고장: 초기 도입된 유인 RTGC와 디젤 구동 야드트랙터(YT)의 노후화가 진행됨에 따라 고장(Breakdown) 빈도가 증가하고 있으며, 부품 마모도를 센서로 측정해 사전 정비하는 예지보전(PdM) 시스템이 없어, 작업 도중 장비가 멈추는 돌발 상황에 취약
- 탄소 배출 및 친환경 규제 부담: 디젤 야드 트랙터의 비중이 높아 글로벌 해운업계의 강력한 탄소 배출 저감(Net-Zero) 요구에 부응하기 위한 전동화(e-YT 등) 전환 압박이 커지고 있음
- 인력 안전 리스크(Human Error): 야드 내 좁은 통로를 대형 트랙터와 트럭이 수동으로 교행하고, 크레인 아래에서 컨테이너 코너 캐스팅을 체결/해제하는 과정에서 작업자의 피로 누적 및 휴먼 에러로 인한 안전사고(중대재해) 발생 리스크가 상존
- 결론적으로 현재 GWCT의 운영 프로세스는 '사람의 경험(수동 플래닝)'과 '유인 하드웨어의 물리적 한계'에 깊이 의존하고 있으며, 이는 터미널의 물동량 처리 규모가 커질수록 기하급수적인 비효율(병목, 대기, 재조작)을 양산하는 구조적 원인이 되고 있음

2. 광양항 KIT 컨테이너터미널 운영의 페인포인트

- 글로벌 터미널 운영사(Hutchison Ports)가 운영하는 KIT(한국국제터미널)는 4개 선석을 보유한 중형 터미널로 GWCT 대비 상대적으로 협소한 야드 부지에서 높은 물동량을 처리해야 하는 구조적 특성을 가지고 있어, '공간의 제약'에서 비롯되는 병목 현상이 주요 애로요인으로 작용

가. 게이트(Gate) 측면: 외부 트럭 반출입 및 육상 연계

- 공간 제약에 따른 게이트 대기열 심화: 야드 부지가 한정되어 있어 터미널 내부의 트럭 수용 능력이 제한적이며, 특정 피크타임(오전 및 점심시간 직후)에 외부 트럭이 몰릴 경우, 터미널 밖 배후 도로까지 심각한 대기열(Queue)이 발생하여 물류 흐름을 단절시킴
- 글로벌-로컬 시스템 연동의 한계: 글로벌 표준 TOS를 사용하여, 국내 육상 운송사들의 배차 시스템이나 화물차주의 모바일 앱(로컬 플랫폼)과의 실시간 양방향 데이터 연동(예: 동적 반출입 예약 시스템)이 매끄럽지 않아 트럭의 실제 도착 시간(ETA)을 선제적으로 통제하기 어려움
- 수동 예외 처리로 인한 무정차 통과율 저하: 게이트의 광학문자인식(OCR) 장비가 쉼(Seal) 파손, 컨테이너 번호 오염 등을 인식하지 못할 경우, 작업자가 직접 확인해야 하므로 차단기가 열리지 않아 뒤따르는 트럭들의 지연이 연쇄적으로 발생

나. 야드(Yard) 측면: TAT, CDT, 장치장 고밀도 운영의 한계

- 고밀도 장치(High Stacking)로 인한 리핸들링(재조작) 급증: 좁은 부지에서 많은 화물을 처리하기 위해 컨테이너를 높게 쌓아야 하며(장치율 상승), 이로 인해 밑에 깔린 수출 화물을 꺼내거나, 수입 화물을 외부 트럭에 실어줄 때 위쪽 화물을 치워야 하는 재조작 비율이 GWCT 대비 구조적으로 높게 나타남
- 외부 트럭 턴타임(TAT)의 변동성 확대: 유인 RTGC(타이어식 크레인) 1대가 특정 블록에서 내부 야드 트랙터(본선 하역)와 외부 트럭(반출입)을 동시에 상대해야 하며, 하역 작업(본선)이 우선시될 경우 외부 트럭은 하역없이 대기해야 하며, TAT가 30분 이상 지연되는 등 통제력을 상실하는 구간이 발생
- 정적인 배치 계획(Static Yard Planning): 플래너의 경험에 의존한 수동 배치 계획으로는 실시간으로 변하는 선박 스케줄과 트럭 도착 현황을 야드 블록별 최적화 방정식에 즉각 반영하지 못해 특정 블록에만 부하가 집중

다. 선석(Berth) 측면: 선박 하역 및 자원 할당

- 대형 선사 스케줄 변동에 따른 자원 낭비: 대형 해운 얼라이언스 선박들의 입항 시간(ETA)은 기상 상황이나 이전 기항지 사정에 따라 수시로 바뀌며, 입항이 지연될 경우, 해당 선석에 미리 배정해 둔 하역 갱(Gang, 작업조)과 안벽 크레인(STS)이 유휴 상태로 방치되는 비효율 발생

- **경직된 STS 및 장비 할당(Static Pooling)**: 특정 선박에 STS와 야드 트랙터를 고정적으로 할당하여 운영하며, 터미널 전체를 조망하여, 작업이 지연되는 크레인 쪽으로 야드 트랙터를 집중 투입하거나 유휴 크레인을 다른 선석 작업에 즉시 투입하는 **동적 리소스 풀링(Dynamic Pooling)**능력이 부족
- **유인 크레인의 하역 생산성(GCR) 한계**: 작업자의 피로도, 야간 시야 확보의 어려움 등으로 인해 탠덤(Tandem, 2개 동시 하역) 작업 등의 고난도 하역에서 시간당 처리량(Moves)이 일정하게 유지되지 않음

라. 시설(Facility) 측면: 관제, TOS, 사각지대 모니터링

- **레거시 TOS의 예측(Simulation) 기능 부재**: 현재 사용 중인 글로벌 표준 TOS는 안정성은 높으나, 발생한 데이터를 기록하고 지시하는 '수동적 시스템'에 가깝으며, 3D 디지털 트윈을 통해 1~2시간 뒤의 야드 혼잡도를 시뮬레이션하고 장비를 사전 배치(Pre-staging)하는 AI 예측 기능이 결여되어 있음
- **야드 재고(Inventory)의 맹점(Blind Spot)**: 유인 RTGC 작업자가 단말기 조작을 실수하거나 GPS 음영 지역이 발생하면, 전산 시스템의 위치와 실제 컨테이너 위치가 어긋나며, 이를 즉시 바로잡을 자동화된 3D 재고 스캐닝 인프라가 없어 재고 조사에 인력과 시간이 낭비됨
- **위험물/냉동 컨테이너 관제 제약**: 냉동 창고 플러그 상태나 위험물 장치장의 이상 발열 등을 중앙에서 실시간으로 모니터링하고 알람을 주는 지능형 IoT 센서망 및 Vision AI CCTV 연동이 부족하여 사고 초동 대응이 지연될 우려가 발생

마. 장비(Equipment) 측면: 크레인 및 이동 장비

- **장비 노후화 및 돌발 고장(Breakdown)**: 지속적으로 사용된 디젤 기반 야드 트랙터(YT)와 RTGC의 잦은 고장은 하역 흐름을 끊는 치명적 요인이며, 진동이나 오일 상태를 분석해 고장 전 사전 정비를 지시하는 **예지보전(Predictive Maintenance)** 시스템이 없어 사후 수리에 의존
- **인력 중심 운용에 따른 중대재해 리스크**: 야드 트랙터와 외부 트럭이 좁은 갱웨이를 함께 질주하고, 크레인 아래에서 체결 작업자가 직접 움직이는 환경은 휴먼 에러에 의한 충돌/협착 사고 리스크를 상시 내포하고 있음
- **탄소 배출 감축 압박**: 글로벌 터미널 운영사로서 강력한 친환경(ESG) 요구를 받고 있으나, 기존 디젤 장비를 전동화(e-RTGC, e-YT)하거나 자율주행으로 개조하기 위한 대규모 자본 지출(CAPEX)과 충전 인프라 부지가 부족한 현실적 제약이 있음
- KIT의 가장 큰 맹점은 "제한된 부지(공간) × 유인 장비의 한계 × 수동적 TOS"의 결합이며, 이를 해결하기 위해서는 무리한 부지 확장이나 전면 자동화 장비 교체보다는, 기존 RTGC를 **원격 제어(Remote Control)**로 개조하여 하역의 안정성을 높이고, **AI 기반의 동적 라우팅 TOS**를 이식하여 좁은 야드 내의 재조작(Rehandling)과 트럭 대기시간(TAT)을 최소화하는 '소프트웨어 중심의 스마트 전환'이 가장 시급

3. 광양항 테스트베드 3-2 컨테이너터미널의 예상 페인포인트

- 광양항 3-2단계 테스트베드의 컨테이너터미널은 안벽부터 야드까지 전 영역에 걸쳐 **완전 무인 자동화 장비(L-AGV, ARMGC, 원격/자동 STS)**를 도입하는 그린필드(Greenfield) 사업으로 2029년 개장을 목표로 하고 있음
- 그러나 기존 계획이 '**하드웨어의 무인화(Unmanned) 및 규칙 기반(Rule-based) 자동화**'에 치중되어, 진정한 의미의 '**AI 기반 인지형 스마트항만(Cognitive Smart Port)**' 관점에서 여전히 구조적인 한계가 있으며, 계획대로 구축이 완료되더라도 디지털트윈 통제와 피지컬 AI 부분이 미흡하여 항만 생산성 및 운영 효율성에 한계가 있을 것으로 예상

가. 게이트(Gate) 측면: 예측 기반의 육상 연계 부재

- **수동적 게이트 운영의 한계:** 광학문자인식(OCR)과 RFID를 통한 무정차 통과(Free-flow) 시스템은 구축되지만, 이는 트럭이 도착했을 때 신속하게 '처리'하는 수동적 자동화에 불과
- **AI 연계 VBS(차량예약시스템) 결여:** 터미널 외부의 배후단지 교통량이나 국가 물류망 데이터를 분석해 트럭의 실제 도착 시간(ETA)을 AI가 능동적으로 예측하고 게이트를 사전 할당(Active Scheduling)하는 기능이 부족하며, 결국 외부 요인으로 트럭이 특정 시간에 집중되면, 게이트 자동화와 무관하게 진입 대기열(병목 현상)이 발생할 수밖에 없음

나. 야드(Yard) 측면: 규칙 기반 라우팅의 교착 리스크

- **L-AGV의 '데드락(Deadlock)' 리스크:** 40여 대의 무인 이송 장비(L-AGV)가 정해진 궤도와 단순 제어 로직에 의해서만 움직일 경우, 예기치 않은 장애물(낙하물 등)이나 교차로 지연 발생 시 장비들이 서로 엉켜 터미널 전체가 마비되는 교착 상태에 빠지기 쉬움
 - 객체 궤적을 예측하여 동적으로 경로를 재생성하는 공간 지능(Spatial Intelligence)이 필수적임
- **정적 장치 계획과 사전 정리(Pre-staging) 한계:** ARMGC가 야드를 무인으로 정리하더라도, 단순 알고리즘에 의존하면 재조작(Rehandling)을 최소화하는 데 한계가 있음
 - 항만의 과거 데이터와 실시간 기상을 바탕으로 내일의 블록별 혼잡도를 예측하여 스스로 컨테이너를 사전 배치하는 **월드 모델(World Model) 기반 강화학습 AI**가 적용되지 않으면 완벽한 TAT 통제가 어려움

다. 선석(Berth) 측면: 자원 할당의 경직성(Static Pooling)

- **선석 간 자원의 동적 융통성(Dynamic Pooling) 부족:** 자동화 안벽 크레인(STS)과 L-AGV가 도입되더라도, 특정 선박(선석)에 장비를 고정적으로 할당하여 운영하는 기존의 경직된 방식을 답습할 우려가 있음
- **스케줄 변동 시 유휴 자원 발생:** 대형 선박의 입항이 지연되거나 특정 선석의 작업이 예상보다 지연될 때, 딥러닝 기반의 최적화 엔진이 터미널 전체 흐름을 실시간으로 분석하여 유휴 상태인 타 선석의 L-AGV나 STS 크레인을 즉각 전환 투입하는 유연성이 확보되지 않으면 막대한 기회비용(Idle Time)이 발생

라. 시설(Facility) 측면: 사각지대 및 단방향 디지털 트윈

- 단방향 모니터링용 디지털 트윈: 3D 디지털 트윈이 구축되더라도, 현장 데이터를 단순히 3D 화면에 표출하는 '거울(Mirror)' 역할에 머무를 가능성이 크며, 가상 환경에서 수만 번의 시뮬레이션을 거쳐 최적의 운영안을 도출하고, 이를 실제 차세대 TOS에 즉각 명령으로 하달하는 'Sim-to-Real' 기반 예측 통제 엔진으로 진화해야 함
- 무인 통제 구역(Restricted Area) 내 맹점(Blind Spot): 100% 무인화된 야드는 사람이 직접 들어가 점검할 수 없으며, 화재, 냉동 컨테이너 플러그 탈락, 위험물 누출 등이 발생했을 때 고정형 CCTV만으로는 틈새 파악이 불가능하고, 이를 해결할 LiDAR 및 Vision AI 탑재 다목적 드론 편대(Swarm)나 자율 보행 로봇(AMR) 순찰망이 기본 계획에 깊이 있게 반영되지 않음

마. 장비(Equipment) 측면: 물리적 동역학 제어의 한계

- 피지컬 AI(Physical AI) 부재로 인한 미세 흔들림(Micro-Sway): 초대형 무인 STS 크레인엔 강한 해풍이나 컨테이너 내 화물 편중 현상에 매우 취약하며, 단순한 기계적 제어(PID 제어 등)로는 바람에 의한 스프레더의 미세한 흔들림을 빠르게 잡기 어려움
 - 크레인 엣지(Edge) 단에 항만의 물리 법칙을 학습한 물리 정보 신경망(PINN) 제어기가 적용되어야 극한의 하역 속도를 유지할 수 있음
- 돌발 고장 대응(PdM) 결여: 무인 장비 특성상 작업자가 탑승하지 않으므로 현장에서 느끼는 장비의 미세한 진동이나 소음 이상을 감지하기 어려움
 - 장비에서 쏟아지는 센서 데이터를 AI가 실시간 분석하여 "특정 ARMGC 모터가 3일 뒤 고장 날 확률이 높다"고 경고하는 예지보전(Predictive Maintenance)시스템이 없다면, 운영 도중 하드웨어가 멈추는 대형 사고로 이어질 수 있음
- 광양항 3-2단계 테스트베드는 "사람이 없는 항만"이라는 1차적 목표는 달성할 수 있으나, "생각하고 예측하는 항만"이라는 2차적 목표에는 소프트웨어 아키텍처의 한계가 존재
- 기계적인 하드웨어 성능을 100% 끌어올리기 위해서는 현재 구축 중인 인프라 위에 공간 지능(Spatial Intelligence), Sim-to-Real 디지털 트윈, 피지컬 AI 제어기, 드론/LiDAR 융합 관제망이라는 '인지형 두뇌'를 서둘러 이식하는 것이 가장 시급한 과제

III 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 필요성 및 로드맵

1. 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 필요성

- 광양항을 구성하는 3개 컨테이너터미널(GWCT, KIT, 3-2단계 테스트베드)은 현재 보유하고 있는 인프라의 구조가 다르며, 따라서 '차세대 인지형 스마트 항만(Cognitive Smart Port)'이라는 궁극적인 목표를 달성하기 위해 접근방식과 연도별/단계별 로드맵을 차별화
- GWCT와 KIT는 하드웨어 자동화와 데이터 수집망 확보를 병행해야 하는 '지능형 전환'으로 접근하며, 3-2단계 테스트베드 사업은 이미 구축 중인 자동화 하드웨어 기반 위에 피지컬 시와 월드 모델을 덧입히고 지능화와 최적화가 포함된 '자율형 운영'으로 추진

가. GWCT & KIT: "재래식 인프라의 스마트화 및 무인화 체계 이식"

- 이 두 터미널은 현재 유인 기반의 재래식 장비(RTGC, 일반 YT)를 운영 중이므로, 물리적인 야드 개조와 기초적인 디지털 데이터 수집망을 선제적으로 구축한 뒤 자동화 장비를 도입하는 단계적 접근 필요

[도입 필요 요소]

- 장치장/센서: 개별 컨테이너와 장비의 위치를 오차 없이 추적하기 위한 RFID, GPS(RTK), 라이다(LiDAR) 센서의 전면적인 인프라 매설
- 자동화 장비: 기존 유인 RTGC를 ARMGC(자동화 야드 크레인)로 순차적 개조·교체. 이송 장비는 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 또는 AMR 도입
- 드론/CCTV: 비전(Vision)의 한계를 극복하기 위해 RFID/LiDAR가 탑재된 드론을 활용한 실시간 재고 전수 조사 시스템
- 시스템 개조: 수동 기획 위주의 기존 TOS를 AI 기반 지능형 TOS로 업그레이드하고, 야드 블록을 수직형으로 재배치하는 물리적 개조

[단계별 추진 로드맵]

- 1단계(디지털화 및 인지 기반 확보, ~2026년)
 - 게이트 및 센서망: 지능형 무정차 게이트(OCR+RFID 연동) 구축 및 야드 장비 RTLS(실시간 위치 추적) 도입
 - 지능형 감시: 야드 내 사각지대 해소 및 야간 보안 강화를 위한 RFID/LiDAR 기반 무인 드론 야간 순찰 체계 현장 실증 완료
- 2단계(부분 자동화 및 시뮬레이션 적용, 2027~2028년)

- **장비 개조:** 선석 및 야드 하역 장비(STS, RTGC)의 원격 제어(Remote Control) 개조 및 A-YT(자율주행 YT) 혼재 운영 시작
- **디지털 트윈:** 기초적인 3D 디지털 트윈을 구축하여, 유·무인 장비가 혼재(MUM-T, 유무인 복합 체계)하는 상황에서의 작업 동선 시뮬레이션(TRL 3~5 수준 검증) 실행

○ 3단계(완전 지능화, 2029년 이후)

- **시스템 고도화:** 물리 기반 지능(Physical AI)이 적용된 TOS가 날씨, 화물 중량 등을 계산하여 AMR 및 원격 STS를 자율적으로 통제하는 완전한 '인지형 터미널' 완성

나. 광양항 3-2단계 테스트베드: "하드웨어 자동화를 넘어선 '인지형(Cognitive)' 스마트 항만 완성"

- 테스트베드는 현재 L-AGV, ARMGC 등 전 영역 원격/자동화 하드웨어를 성공적으로 구축(TRL 7~8 단계 진입 중)하고 있으며, 따라서 향후 로드맵은 이 장비들이 사람의 개입 없이 '스스로 판단하고 최적화'할 수 있도록 **공간 지능(Spatial Intelligence)**과 **예측형 AI 최적화 솔루션**을 이식하는 데 집중해야 함

[도입 필요 요소]

- **고도화된 시스템(월드 모델 기반 Sim-to-Real):** 단순 모니터링용 3D 트윈을 넘어, 항만의 모든 물리적 법칙과 과거 데이터를 학습한 **월드 모델(World Model)** 기반의 **시뮬레이션 최적화 엔진**
- **피지컬 AI(Physical AI):** 바람의 세기, 화물의 무게 중심 등을 AI가 실시간으로 계산하여 STS 크레인의 흔들림(Sway)을 0.1초 단위로 미세 제어하는 엣지(Edge) AI 제어기 도입
- **공간 지능 및 보안:** 지능형 CCTV와 LiDAR 센서가 융합된 **공간 지능 아키텍처**로 구성하고 AGV 궤적 예측을 통한 교착(Deadlock) 원천 차단
- **자동화 장비(유지보수):** 고장 예측(PdM) 및 무인 구역 내 시설 점검을 위한 자율 보행 로봇(4족 보행) 및 다목적 드론 투입

[단계별 추진 로드맵]

○ 1단계(운영 안정화 및 피지컬 AI 검증, ~2027년)

- **시스템 연동:** 구축 완료된 L-AGV 및 자동화 장비와 차세대 지능형 TOS 간의 데이터 지연(Latency) 최소화 및 5G/6G 전용망 안정화
- **디지털 트윈 검증:** TRL 6~8 수준의 현장 적용형 디지털 트윈 환경을 구성하고, 장비 제어 알고리즘(예: 크레인 물리 제어 모델)을 가상 환경에서 먼저 검증(Sim-to-Real) 후 실제 장비에 배포

○ 2단계(예측 운영 및 공간 지능 통합, 2028~2029년)

- **상황/통제 시스템:** 3D 디지털 트윈 상황판에 공간 지능(Spatial Intelligence)을 부여하고 L-AGV의 경로가 실시간 영킹 없이 동적으로(Dynamic Routing) 수정되는 체계 완성
- **드론 기반 안전망:** 무인화된 야드 내에서 발생할 수 있는 결함 감지 및 인가되지 않은 접근을

통제하기 위해, LiDAR 센서를 장착한 자율 비행 드론의 24시간 상시 야간 순찰 및 시설 점검 통합 연동

○ 3단계(자율 최적화 항만 모델 확립, 2030년 이후)

- 월드 모델 TOS: 항만 운영 시스템이 단순한 '명령어 하달'이 아닌, 강화학습을 통해 스스로 내일의 터미널 혼잡도를 예측하고 장비를 사전 배치(Pre-staging)하는 자율 최적화 솔루션 완성하고, 국내 타 항만(부산, 인천 등)으로의 표준 아키텍처 수출 모델 확보

2. 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 전환 비용(추정)

○ 광양항 3개 컨테이너터미널(GWCT, KIT, 테스트베드(광양항 3-2단계))이 스마트항만으로 전환하기 위한 비용은 어느 정도인지 추정

- 물리적 구조 변경이 제한적인 기존 항만(Brownfield)과 이미 인프라 투자가 확정된 신규 자동화 항만(Greenfield)의 스마트화는 투자 비용의 성격(하드웨어 중심 vs 소프트웨어 중심)이 완전히 다르게 나타남

○ 업계 표준 스마트 항만 전환 벤치마크 및 관련 기술 단위 단가를 적용하여, 전면적인 야드 구조 변경을 피하면서 효율을 극대화하는 '현실적 개조(Retrofit) 및 지능화 덧씌우기' 관점에서의 단계별 제반 비용을 추정

가. 스마트 항만 전환 단계별 투자 비용(추정) 종합

○ 기존 항만(GWCT, KIT)은 야드 크레인 개조라는 물리적 제약으로 인해 2단계 구간에서 자본 지출(CAPEX)이 급증하는 구조를 보이며, 반면, 테스트베드 항만은 하드웨어가 이미 구축된 상태이므로 단계가 거듭될수록 시스템 고도화 및 초거대 AI 컴퓨팅 파워 확보에 예산이 집중되는 소프트웨어(OPEX 및 SW CAPEX) 중심의 투자 곡선을 나타냄

○ 광양항 3개 컨테이너터미널(GWCT, KIT, 3-2단계 테스트베드)의 스마트항만 전환을 위한 단계별 핵심 추진 항목과 추정 소요 비용을 정리

○ 기존 인프라를 활용해야 하는 Brownfield(GWCT, KIT)의 하드웨어 개조 비용과, 이미 구축 중인 하드웨어 위에 지능을 더하는 Greenfield(테스트베드)의 소프트웨어/AI 고도화 추가 비용을 구분하여 작성

구분		1단계 (디지털/인지 기반)		2단계 (부분 자동화/AI)		3단계 (AI TOS)		총 추정액 (전체 단계 완료)	
GWCT(기존)		약 150억원		약 900억원		약 250억원		약 1,300억원	
HW	SW	100	50	800	100	50	200	950억원	350억원
KIT(기존)		약 80억원		약 450억원		약 150억원		약 680억원	
HW	SW	50	30	400	50	30	120	480	200
3-2단계 (추가)		약 150억원		약 200억원		약 250억원		약 600억원 (+기존 6,915억원)	
HW	SW	-	150	20	180	50	200	70	530

○ 광양항 3개(GWCT, KIT, 테스트베드 3-2)의 스마트항만 구축 비용 추정(안)

터미널 구분	추진 단계 (Phase)	세부 주요 추진 및 도입 항목 (시설/장비/시스템)	주요 비용 성격	추정 예산
GWCT (총 1,300억원) *SW 중심으로 구축하면 350억원	1단계 디지털/인지 기반 (~2026)	- 무정차 지능형 게이트 구축(OCR, RFID 연동) - 야드 트랙터 및 외부 트럭 실시간 위치추적(RTLS/GPS) - RFID/LiDAR 드론 관제 시스템 및 충전 스테이션 기초 도입	HW(100억) + SW(50억)	150억원
	2단계 부분 자동화 (2027~2028)	- 기존 유인 RTGC 원격 제어(Remote Control) 전면 개조 - 특정 블록에 자동형 ARMGC 부분 신규 도입 - TRL 7~8 수준의 작업 동선 시뮬레이션용 3D 디지털 트윈 구축	HW(800억) + SW(100억) 디지털 트윈, ICT 인프라	900억원
	3단계 완전 지능화 (2029~)	- 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 연동 최적화 - 물리 AI 기반 차세대 지능형 TOS 도입 - 중앙 원격통제센터(ROC) 통합 구축	센서(50억) + SW(200억)	250억원
KIT (총 680억원) *SW 중심으로 구축하면 200억원	1단계 디지털/인지 기반 (~2026)	- 무정차 지능형 게이트 구축(OCR, RFID 연동) - 야드 트랙터 및 외부 트럭 실시간 위치추적(RTLS/GPS) - RFID/LiDAR 드론 관제 시스템 및 충전 스테이션 기초 도입	HW(50억) + SW(30억)	80억원
	2단계 부분 자동화 (2027~2028)	- 기존 유인 RTGC 원격 제어(Remote Control) 전면 개조 - 특정 블록에 자동형 ARMGC 부분 신규 도입 - TRL 7~8 수준의 작업 동선 시뮬레이션용 3D 디지털 트윈 구축	HW(400억) + SW(50억) 디지털 트윈, ICT 인프라	450억원
	3단계 완전 지능화 (2029~)	- 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 연동 최적화 - 물리 AI 기반 차세대 지능형 TOS 도입 - 중앙 원격통제센터(ROC) 통합 구축	센서(30억) + SW(120억)	150억원
테스트베드 (3-2단계) (총 600억원) *SW 중심으로 구축하면 530억원	1단계 피지컬 AI 검증 (~2027)	- TRL 6~8 수준의 현장 적용형 초정밀 디지털 트윈 시뮬레이터(Sim-to-Real) 구축 - 안벽 크레인 흔들림 미세 제어용 물리 정보 기반 신경망(PINN) 엣지 AI 제어기 도입	SW 중심 (150억)	150억원
	2단계 공간 지능/보안 (2028~2029)	- L-AGV 교차 방지를 위한 공간 지능(Spatial Intelligence) 기반 동적 라우팅 엔진 - 다목적 LiDAR 자율 비행 드론 편대(Swarm) 및 지능형 CCTV 분석망(Vision AI) 구축	HW(20억) + SW(180억) AI 솔루션	200억원
	3단계 자율 최적화 (2030~)	- 스스로 터미널 혼잡도를 예측·사전 배치하는 월드 모델(World Model) 기반 강화학습 TOS 아키텍처 완성 - 무인 통제 구역 시설 점검용 4족 보행 로봇(AMR) 솔루션 도입	HW(50억) + SW(200억) AI 솔루션	250억원

○ 광양항의 스마트항만 구축은 자동화 장비 기반의 HW와 플랫폼 및 AI 솔루션 기반의 SW를 함께 추진하는 것이 바람직하지만, 가용 예산에 따라 차선으로 SW 중심으로 진행해도 가능

나. GWCT & KIT: 부분 개조 및 지능화 전환 비용(Brownfield)

- 이 두개 터미널은 기존의 수평형 야드 배치와 하역 인프라를 전면 철거하기 곤란하므로, 기존 RTGC의 원격 제어(Remote Control) 개조, 게이트/트랙터의 디지털화, 그리고 지능형 TOS 도입에 집중하는 하이브리드 전략을 취할 때의 추정 비용(규모 차이: GWCT 8선석, KIT 4선석 기준 반영)

[1단계] 디지털화 및 인지 기반 확보(약 1~2년)

- 주요 내역: 항만의 무정차 지능형 게이트(OCR+RFID), 야드 트랙터 및 외부 트럭 위치 추적(RTLS/GPS) 단말기 장착, 실시간 재고 전수 조사를 위한 RFID/LiDAR 드론 관제 시스템 및 충전 스테이션 기초 도입
- 추정 비용: GWCT: 약 150억원, KIT: 약 80억원

[2단계] 하드웨어 부분 자동화 및 디지털 트윈 검증(약 2~3년)

- 주요 내역: 야드 전면 개조 대신, 기존 유인 RTGC에 센서 및 카메라를 부착하여 원격 제어(Remote RTGC)로 개조(대당 약 5억~8억 원 소요) 기준이며, 특정 고밀도 장치 블록 2~4개에 한해 부분적으로 캔틸레버형 ARMGC 신규 도입. TRL 3~5 수준의 작업 동선 시뮬레이션을 위한 기초 3D 디지털 트윈 환경 구축
- 추정 비용: GWCT: 약 900억원(장비 개조 및 부분 ARMGC 도입 비중이 큼), KIT: 약 450억원

[3단계] 완전 지능화 및 인지형 TOS 도입(약 2년)

- 주요 내역: 수집된 데이터를 바탕으로 원격 장비와 자율주행 야드 트랙터(A-YT)를 통제하는 AI 기반 차세대 TOS 도입하고 ROC(원격통제센터) 구축 및 시스템 통합
- 추정 비용: GWCT: 약 250억원, KIT: 약 150억원

다. 테스트베드(광양항 3-2단계): 지능화 추가 도입 비용(Greenfield)

- 이 터미널은 L-AGV, 자동화 크레인 등 기초적인 물리적 자동화 환경 구축에 이미 6,915억원(기존 예산)이 투입되고 있으며, 따라서 아래 비용은 이를 '인지형 스마트 항만'으로 업그레이드하기 위해 추가로 투입되어야 하는 소프트웨어 및 첨단 센서(AI, World Model, 드론 등) 중심의 예산

[1단계] 피지컬 AI 및 Sim-to-Real 고도화 추가 비용

- 주요 내역: 단순 3D 모니터링을 넘어선 TRL 6~8 단계 수준의 초정밀 디지털 트윈 시뮬레이터 구축과 안벽 크레인(STS)의 흔들림을 0.1초 단위로 미세 제어하기 위한 물리 정보 기반 신경망(PINN) 엣지 AI 제어기 라이선스 및 통합
- 추가 추정 비용: 약 150억원(대부분 소프트웨어 개발, 클라우드 인프라 및 Edge 컴퓨팅 하드웨어)

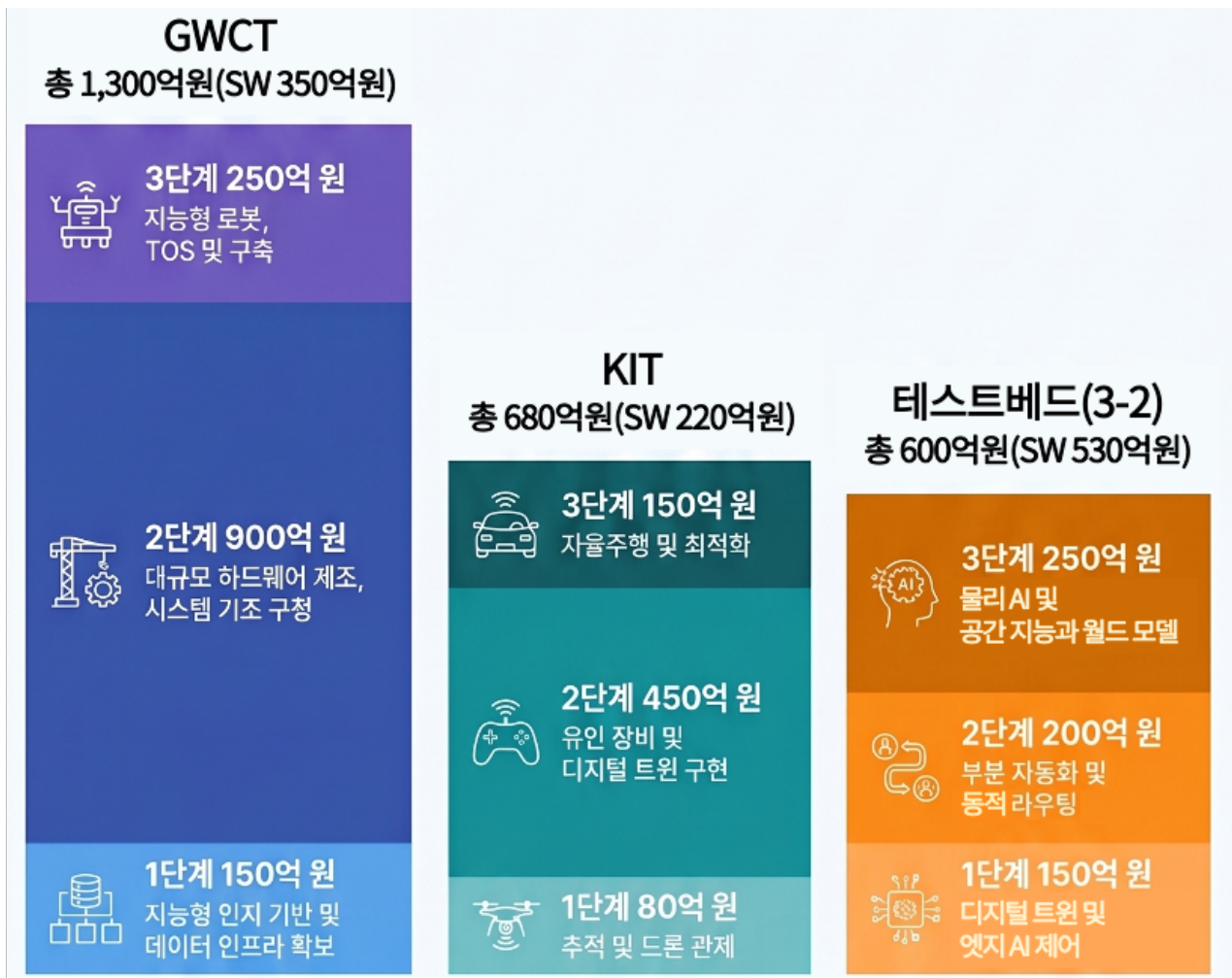
[2단계] 공간 지능 및 무인 야드 안전망 확충 추가 비용

- 주요 내역: 44대의 L-AGV 동선 교착을 막는 공간 지능(Spatial Intelligence) 기반 동적 라우팅 엔진 개발과 무인 통제 구역 내 안전 확보 및 정밀 야간 순찰을 위한 다목적 LiDAR 자율 비행 드론 편대(Swarm) 및 지능형 CCTV 분석망(Vision AI) 전면 구축
- 추가 추정 비용: 약 200억원(센서 융합 시스템 및 다중 드론 통합 관제 솔루션)

[3단계] 월드 모델 자율 최적화 항만 완성 추가 비용

- 주요 내역: 수년간 누적된 항만 운영 데이터와 기상, 선박 스케줄을 융합하여 터미널 스스로 사전 의사결정(Pre-staging)을 내리는 월드 모델(World Model) 기반 강화학습 TOS 아키텍처 고도화와 무인 시설 점검을 위한 4족 보행 로봇(AMR) 도입
- 추가 추정 비용: 약 250억원(초거대 AI 모델 학습 및 라이선스, 자율 점검 로봇 시스템)

라. 광양항 3개 컨테이너터미널의 스마트 항만 구축 비용(추정) 요약



IV 광양항 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 전략

1. GWCT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 전략

- 광양항 서부컨테이너터미널(GWCT)은 기존 운영을 유지하면서 점진적으로 스마트화를 이뤄내야 하는 전형적인 '브라운필드(Brownfield) 항만'이며, 따라서 전면적 재구축이 아닌, 기존 인프라를 최대한 활용하며 물리적 설비 개조와 AI 소프트웨어 고도화를 결합하는 하이브리드 전략

가. 필요성 및 추진 배경

- 물리적 인프라의 한계 도달: 현재 GWCT는 유인 타이어식 야드 크레인(RTGC)과 재래식 야드 트랙터(YT)를 중심으로 운영되고 있으며, 장비 노후화와 수동 하역에 따른 피로도로 인해 항만 생산성(GCR, TAT)이 한계에 직면했으며, 초대형 선박의 신속한 하역 요구를 충족하기 어려워지고 있음
- 안전 규제 강화 및 노동력 부족: 중대재해처벌법 시행 등으로 인해 항만 내 작업자 안전 확보가 최우선 과제로 부상했으며, 또한, 24시간 교대 근무를 수행할 숙련된 항만 하역 인력의 고령화 및 구인 난이 심화
- 브라운필드(Brownfield) 제약: 부두 운영을 전면 중단하고 하드웨어를 일괄 교체하는 것은 물동량 이탈을 초래하므로 불가능하며, 따라서 운영 차질을 최소화하면서 단계적으로 무인화 및 지능화를 이식하는 '개조(Retrofit)' 중심의 전환 논리가 필요

나. 목적 및 목표

- 궁극적 목적: 유인 중심의 재래식 터미널을 데이터와 AI 기반의 '차세대 인지형 스마트 터미널(Cognitive Smart Terminal)'로 전환하여 글로벌 경쟁력을 확보하고 무재해·친환경 항만을 구현
- 단계별 목표
 - 1단계(가시성 확보): 터미널 내 모든 자산(장비, 화물, 차량)의 실시간 위치 및 상태를 100% 디지털화하여 병목 현상을 식별
 - 2단계(작업 무인화): 위험하고 반복적인 하역 작업을 원격 제어 및 부분 자동화로 전환하여 작업자를 현장에서 분리(Decoupling)
 - 3단계(자율 최적화): 물리 AI와 시뮬레이션 기반의 운영 최적화를 통해 재조작(Rehandling)을 최소화하고 장비 가동률 극대화

다. 추진 방향 및 추진 방법

- 추진 방향: "데이터 기반 고도화 후 물리적 자율화(Data First, Autonomy Next)"
 - 초기에는 거액의 하드웨어 교체보다 센서망(RFID, LiDAR, GPS) 구축에 집중하여 데이터를 축적하고, 이를 바탕으로 정확한 시뮬레이션을 거친 후 고비용 장비(원격 RTGC, ARMGC) 개조에 투자

○ 추진 방법: "Sim-to-Real 기반의 유무인 복합 체계(MUM-T) 운영 검증"

- 기존 유인 장비와 신규 원격/자율 장비가 혼재되는 과도기(2단계)의 충돌 리스크를 해결하기 위해, 3D 디지털 트윈 상에서 TRL 3~5 수준의 작업 동선 시뮬레이션을 선행하고, 이후 가상 공간에서 검증된 최적의 경로 제어 알고리즘을 실제 운영 환경에 배포(Sim-to-Real)하는 방식으로 리스크를 통제

라. 추진 내용(시설/장비 및 시스템/솔루션)

[1단계] 디지털 및 인지 기반 구축(~2026)

○ 시설/장비

- 게이트 무정차 통과를 위한 지능형 게이트(OCR 및 RFID 다중 인식) 개조
- 모든 야드 트랙터(YT)와 외부 트럭에 고정밀 실시간 위치추적(RTLS/GPS) 단말기 장착

○ 시스템/솔루션

- 3D 디지털 트윈 항만 구축: 컨테이너터미널(TOS 연동)을 고정밀 3D 디지털 트윈으로 구축하고, 게이트-야드-선석에서 발생하는 모든 이벤트의 시뮬레이션과 항만 관제/통제의 최적화 구현
- 드론 기반 공간 인지망 구축: 야드 내 재고(Inventory) 오차를 줄이고 야간 보안을 강화하기 위해 RFID/LiDAR 센서를 탑재한 다목적 드론 관제 시스템 및 자동 충전 스테이션을 구축하며, 이를 통해 비전(Vision) 기반 검수의 한계를 극복하고 3D 재고 맵을 완성

[2단계] 하드웨어 개조 및 부분 자동화(2027~2028) - 핵심 투자 구간

○ 시설/장비

- RTGC 원격 제어(Remote Control) 개조: 야드 부지 전체를 공사할 수 없으므로, 기존 RTGC에 카메라와 센서, 통신 모듈을 부착하여 원격 조종 크레인으로 전면 개조
- 부분 자동화 도입: 신규 조성이 가능한 특정 고밀도 장치 블록에 한해 캔틸레버형 ARMGC를 제한적으로 신규 도입

○ 시스템/솔루션

- 운영 시뮬레이션 디지털 트윈: 설비 개조로 인해 발생하는 유·무인 장비 혼재 상황을 통제하기 위해, 물리적 제약 조건을 반영한 3D 디지털 트윈 기초 모델을 구축하고 충돌 방지 및 동선 시뮬레이션을 수행

[3단계] 완전 지능화 및 인지형 아키텍처 완성(2029~)

○ 시설/장비

- 기존 유인 트랙터를 자율주행 야드 트랙터(A-YT)로 전환 및 연동
- 중앙 집중형 원격통제센터(ROC) 구축 완료 및 전 현장의 완전 무인화 뷰(View) 확보

○ 시스템/솔루션

- 물리 AI 기반 차세대 TOS 도입: 단순 배차 로직을 넘어, 장비의 물리적 동역학(Dynamics)과

공간 지능(Spatial Intelligence)을 이해하는 지능형 TOS를 가동하며, 외부 트럭의 도착 시간, 선박 스케줄을 종합 분석하여 자율적으로 화물을 사전 정리(Pre-staging)

마. 추진 전략 및 추진 체계

○ 추진 전략(전략적 예산 집행)

- GWCT 스마트화에 추정되는 약 1,300억 원의 비용 중 리스크가 높은 전면 ARMGC 도입 대신, '기존 장비 개조(Retrofit) + AI 소프트웨어 효율화'에 예산을 집중 분배하여 투자 대비 수익률(ROI)을 조기에 확보

○ 추진 체계(거버넌스)

- **인프라 및 예산 지원:** 여수광양항만공사(YGPA)가 스마트 항만 인프라(5G 통신망, 전기 충전 시설 등)를 국책 사업과 연계하여 지원
- **운영 및 개조 주체:** 터미널 운영사(GWCT)가 주도하여 기존 운영의 중단 없이 블록별 순차적 개조 공정을 기획 및 실행
- **기술 파트너십:** 차세대 TOS, 디지털 트윈, 드론/LiDAR 네트워크 구축을 위해 민간 AI/로보틱스 전문 기업 및 국책 연구기관(KIOST 등)과의 조인트 벤처(JV) 또는 오픈 이노베이션 체계를 가동

바. 기대 효과

○ 생산성 및 운영 효율 극대화

- 물리 AI가 접목된 최적화 라우팅을 통해 외부 트럭의 턴타임(TAT)을 평균 15분 이내로 단축하고, 야드 내 크레인의 공차 이동 및 재조작(Rehandling) 비율을 기존 대비 30% 이상 절감

○ 안전성 제고(Zero Accident)

- 위험한 하역 현장(안벽 및 야드)에서 인력을 완전히 분리하고 원격통제센터(ROC)로 이전함으로써 중대재해 발생 가능성을 원천 차단하며, 또한, LiDAR 드론의 야간 순찰을 통해 사각지대 보안을 100% 확보

○ 브라운필드 스마트화의 글로벌 표준 제시

- 전면 재구축이 어려운 전 세계 수많은 재래식 항만들에게, GWCT의 '개조 기반 점진적 디지털 트윈 및 자율화 도입' 모델은 가장 현실적이고 경제적인 스마트 항만 수출 모델(Standard Reference)로 자리매김할 수 있음

2. KIT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 전략

- 한국국제터미널(KIT)은 글로벌 터미널 운영사(Hutchison Ports)가 운영하는 중형 규모(4개 선석)의 터미널로, GWCT와 마찬가지로 기존 인프라를 유지하면서 스마트화를 추진해야 하는 브라운필드(Brownfield) 환경

가. 필요성 및 추진 배경

- **글로벌 터미널 운영 기준의 상향:** 글로벌 해운·물류 시장에서 선사들은 기항지 터미널에 더욱 빠르고 예측 가능한 하역 서비스(신속한 Port Time)를 요구하고 있으며, 유인 RTGC 중심의 현재 하역 체계로는 대형 얼라이언스들의 까다로운 하역 생산성 KPI를 지속적으로 맞추기 곤란
- **비용 구조 혁신 및 안전망 확보:** 중형 터미널의 특성상 인건비 상승에 따른 운영비(OPEX)의 부담이 상대적으로 크게 작용하고, 또한, 강화되는 중대재해처벌법 등 국내외 안전 규제에 대응하기 위해 현장 인력을 위험 구역에서 배제하는 물리적 안전망 확보가 시급
- **제한된 부지 내 처리량 극대화:** 부지 확장이 제한적인 브라운필드 환경에서 물동량 처리 한계를 극복하려면, 하드웨어 확장이 아닌 '공간과 시간의 지능적 활용(야드 고밀도화 및 재조직 최소화)'을 가능케 하는 스마트 전환이 필수

나. 목적 및 목표

- **궁극적 목적:** 글로벌 표준 운영 노하우와 한국의 첨단 AI/자동화 기술을 융합하여, 중형 브라운필드 터미널의 '고효율·무재해 인지형 스마트 터미널 표준 모델'을 완성
- **단계별 목표**
 - 1단계(디지털/인지 기반): 야드 내 화물 및 장비의 이동을 데이터화하고 실시간 추적 체계를 확보하여 터미널 내 '블랙박스(사각지대)'를 제거
 - 2단계(부분 자동화): 핵심 하역 장비의 원격 제어 개조를 통해 사람과 기계를 분리하고, 야드 운영의 유연성을 확보
 - 3단계(완전 지능화): AI 시스템이 원격 및 자율주행 장비를 통합 통제하는 자율 최적화 운영 체계를 확립

다. 추진 방향 및 추진 방법

- **추진 방향: "중형 터미널 맞춤형 고효율 개조(Cost-Effective Retrofit)"**
 - 전면적인 인프라 재구축이 어려운 점을 감안하여, 가성비가 높은 센서(RFID, GPS)와 기존 장비(RTGC)의 원격화 개조에 집중 투자하여 투자 회수 기간을 단축
- **추진 방법: "가상 검증을 통한 무중단 전환(Zero-Downtime Migration)"**
 - 터미널 운영을 멈추지 않고 시스템을 전환해야 하므로, 3D 디지털 트윈을 선제적으로 구축하며, 신규 도입되는 장비와 기존 장비의 혼재 상황(MUM-T)을 가상 공간에서 먼저 시뮬레이션하여 운영 리스크를 완벽히 통제한 후 실제 현장에 적용

라. 추진 내용(시설/장비 및 시스템/솔루션)

[1단계] 디지털 및 인지 기반 구축(~2026) / 80억원

- **시설/장비**
 - 외부 트럭의 병목 해소를 위한 무정차 지능형 게이트 구축(OCR, RFID 연동)
 - 동적 라우팅의 기초 데이터 수집을 위해 야드 트랙터 및 외부 트럭의 실시간 위치추적(RTLS/GPS) 단말기 도입

○ 시스템/솔루션

- 사람의 시야(Vision)에 의존하던 검수 방식을 혁신하기 위해 RFID/LIDAR 드론 관제 시스템 및 충전 스테이션 기초 도입하며, 이를 통해 심야 시간대 사각지대 없는 재고 전수 조사 및 보안 순찰을 수행

[2단계] 하드웨어 개조 및 부분 자동화(2027~2028) / 450억원

○ 시설/장비

- 기존 유인 RTGC 원격 제어(Remote Control) 전면 개조.(야드 구조 변경 최소화 및 하역 생산성 균질화 달성)
- 화물 처리 밀도를 높여야 하는 특정 블록에 자동형 ARMGC 부분 신규 도입

○ 시스템/솔루션

- 하드웨어 개조에 따른 운영 차질을 막기 위해 TRL 3~5 수준의 작업 동선 시뮬레이션용 3D 디지털 트윈 구축

[3단계] 완전 지능화(2029~) / 150억원

○ 시설/장비

- 통제된 야드 경로 내에서 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 연동 최적화
- 현장 작업자를 100% 흡수하는 중앙 원격통제센터(ROC) 통합 구축

○ 시스템/솔루션

- 디지털 트윈 데이터를 학습하여 터미널 스스로 사전 배치(Pre-staging) 및 동선을 계획하는 물리 AI 기반 차세대 지능형 TOS 도입. 글로벌 운영사(Hutchison)의 레거시 시스템과 API를 통해 매끄럽게 연동되도록 아키텍처를 설계

마. 추진 전략 및 추진 체계

○ 추진 전략(글로벌 표준 연계)

- 중형 터미널에 맞는 680억 원의 예산을 가장 ROI가 높은 '원격제어 개조'와 '드론 관제망'에 집중하며, Hutchison Ports의 글로벌 IT 표준(Global Standard) 규격을 준수하면서도, 한국의 앞선 5G, 물리 AI, 드론 기술을 접목하는 테스트베드 역할을 수행

○ 추진 체계(민관 및 글로벌 협력)

- 인프라 지원: 여수광양항만공사(YGPA)가 스마트 항만 인프라(항만 내 전용 통신망, 친환경 전력망)를 구축 지원
- 실행 주체: KIT(운영사)가 단계별 무중단 개조 프로젝트를 총괄 리딩
- 기술 융합: 국내 우수 AI 플랫폼 기업 및 자율비행 드론/디지털 트윈 솔루션 기업 컨소시엄이 기술 공급 파트너로 참여하여 시스템을 통합(Integration)

바. 기대 효과

○ 안전하고 쾌적한 항만 일자리 창출(Zero Accident)

- 유인 장비의 원격 제어화와 ROC 통합 구축을 통해 크레인 기사의 근골격계 질환 및 중대 재해 리스크를 완전히 해소하도록 추진하며, 현장 노무직이 AI 운영을 감시하는 '원격 통제 관리자'로 전환

○ 야드 밀도 및 생산성 극대화

- AI TOS와 디지털 트윈 시뮬레이션을 통해 재조작(Rehandling)을 획기적으로 줄여, 기존과 동일한 야드 면적에서도 20% 이상의 추가 물동량을 안정적으로 처리할 수 있는 고밀도 운영 체계를 완성

○ 글로벌 브라운필드 스마트화의 롤모델 확립

- GWCT와 같은 대형 연합 터미널뿐만 아니라, KIT 모델의 성공은 전 세계 중소형 브라운필드 터미널들이 적은 예산(680억 원 규모)으로도 도입할 수 있는 가장 경제적이고 확실한 '모듈형 스마트 항만 전환 솔루션'으로 수출될 수 있음

3. 광양항 3-2단계 테스트베드의 스마트항만 구축 전략

- 광양항 3-2단계 테스트베드는 이미 국가 예산(당초 약 6,915억 원)이 투입되어 **안벽부터 야드** 까지 전 영역에 국산 무인 하역 장비(L-AGV, ARMGC 등)가 구축되는 그린필드 프로젝트
- 따라서 본 전략은 하드웨어 인프라가 갖춰진 상태에서, 이를 세계 최고 수준의 '인지형 자율 최적화 항만'으로 도약시키기 위해 **추가로 투입되는 600억 원 규모의 소프트웨어/AI 고도화**에 초점을 맞춘 3단계 논리로 접근

가. 필요성 및 추진 배경

- **규칙 기반(Rule-based) 자동화의 한계 돌파:** 초기의 자동화 항만들은 사전에 입력된 규칙과 궤도에 따라 장비가 움직이며, 그러나 기상 악화, 장비 고장, 예기치 못한 선박 스케줄 지연 등 동적인 변수가 발생하면 L-AGV 간의 교착 상태(Deadlock)나 병목 현상이 발생하여 전체 시스템이 정지할 위험이 있음
- **하드웨어 국산화를 넘어선 '소프트웨어 주권' 확보:** 국산 하드웨어를 제어하는 두뇌(TOS 및 시뮬레이션)가 해외 기술에 종속된다면 진정한 기술 자립을 이룰 수 없으며, 차세대 항만 경쟁력은 물리적 장비가 아닌 '알고리즘과 데이터 처리 능력'에서 결정
- **완전 무인 구역(Restricted Area)의 안전망 부재 극복:** 장비가 100% 무인화됨에 따라 작업 구역 내 사람의 출입이 철저히 통제되며, 화물 위치 인식 오류, 설비 결함, 비인가 침입 등을 사람 대신 24시간 감시하고 즉각 대응할 수 있는 '무인 지능형 감시 체계'가 필수적으로 요구

나. 목적 및 목표

- **궁극적 목적:** 구축된 국산 자동화 하드웨어 인프라 위에 물리 AI, 공간 지능, 월드 모델(World Model) 기반의 지능형 아키텍처를 덮어씌워, 외부 개입 없이 스스로 진화하는 '완전 자율형 차세대 스마트항만(Fully Autonomous Smart Port)'을 완성

○ 단계별 목표

- 1단계(피지컬 AI 검증): 가상과 현실을 오차 없이 동기화(Sim-to-Real)하고, 단위 장비(STS 등)의 물리적 제어 한계를 AI로 극복
- 2단계(공간 지능/보안): 터미널 내 모든 동적 객체(장비, 화물)의 궤적을 실시간으로 예측하여 교착 상태 발생률을 0%로 만들고, 항공(드론) 기반 무인 감시망을 완성
- 3단계(자율 최적화): 과거 데이터와 실시간 환경 변수를 학습하여 다가올 터미널 혼잡도를 미리 예측하고 선제 대응하는 능동형 TOS 체계를 달성

다. 추진 방향 및 추진 방법

○ 추진 방향: "소프트웨어 정의 항만(SDP: Software-Defined Port)"

- 기존 항만이 하드웨어 중심이었다면, 테스트베드는 AI 소프트웨어가 하드웨어의 성능과 역할을 재정의하고 실시간으로 업그레이드할 수 있는 유연한 아키텍처를 지향

○ 추진 방법: "Sim-to-Real 및 Edge-to-Cloud 분산 제어"

- 새로운 알고리즘은 반드시 초정밀 디지털 트윈에서 수만 번의 강화학습을 거친 후 실제 현장에 배포(Sim-to-Real)되며, 장비 단말의 즉각적인 반응(크레인 흔들림 제어 등)은 엣지 AI (Edge AI)가 담당하고, 전체 항만의 자율 배치(TOS)는 클라우드의 초거대 월드 모델이 담당하는 하이브리드 제어망을 구축

라. 추진 내용(시스템/솔루션 및 지능형 플랫폼 도입)

[1단계] 피지컬 AI 검증(~2027) / 150억원

- 시스템/솔루션(Sim-to-Real 고도화): 단순 3D 가시화를 넘어 장비의 동역학적 특성(무게 중심, 가속도 등)까지 반영한 TRL 6~8 수준의 현장 적용형 초정밀 디지털 트윈 시뮬레이터를 구축
- 시스템/솔루션(장비 제어): 해풍이나 화물 편중 현상에도 흔들림 없이 하역할 수 있도록, 안벽 크레인(STS)에 물리 정보 기반 신경망(PINN)이 적용된 엣지 AI 제어기를 도입하여 미세 흔들림 (Micro-Sway)을 0.1초 단위로 제어

[2단계] 공간 지능 및 보안(2028~2029) / 200억원

- 플랫폼 구축(공간 지능): 44대의 L-AGV와 수십 대의 크레인이 동시에 움직일 때, 몇초 뒤의 위치를 예측하여 궤적 엉킴을 원천 차단하는 공간 지능(Spatial Intelligence) 기반 동적 라우팅 엔진을 차세대 TOS에 통합
- 설비/기기 도입(무인 안전망): 인력 투입이 불가능한 무인 통제 구역의 사각지대 관리를 위해, 다목적 LiDAR 자율 비행 드론 편대(Swarm)를 구축하고, 이를 지능형 CCTV 분석망(Vision AI)과 연동하여 야간 재고 조사 및 비인가 요소 감지를 자동화

[3단계] 자율 최적화(2030~) / 250억원

- 시스템/플랫폼(월드 모델 TOS): 항만의 과거 10년 치 데이터, 기상청 실시간 데이터, 선사 스케줄을 종합하여 "내일 오후 3시의 블록별 혼잡도"를 스스로 예측하고 ARMGC를 선제적으로 배치(Pre-staging)하는 월드 모델(World Model) 기반 강화학습 TOS 아키텍처를 완성
- 설비/기기 도입(자율 유지보수): 고전압 케이블 점검, 크레인 레일 균열 탐지 등을 위해 야드 내에 4족 보행 로봇(AMR) 솔루션을 도입하여 예지보전(Predictive Maintenance) 체계를 구축

마. 추진 전략 및 추진 체계

- 추진 전략(오픈 이노베이션 및 API 생태계 조성)
 - 테스트베드를 폐쇄적인 시스템으로 만들지 않고, 국내 우수 AI 스타트업이나 연구기관이 자신들의 최적화 알고리즘을 디지털 트윈 환경에서 테스트해 볼 수 있도록 플랫폼 API를 개방하는 '항만형 앱스토어' 전략을 구사
- 추진 체계(산·학·연 초협력)
 - 인프라/실증 지원: 여수광양항만공사(YGPA) 및 해양수산부가 실증 공간과 국비를 지속 지원
 - 지능망 개발: IT 대기업(SI) 및 AI 딥테크 기업이 컨소시엄을 구성하여 월드 모델 및 공간 지능 알고리즘을 공동 개발
 - 표준화 및 검증: 선박해양플랜트연구소(KRISO), KIOST 등 국책 연구기관이 안전성, 보안성 및 항만 성능(KPI) 향상률을 제3자 관점에서 객관적으로 검증하고 국제 표준화를 추진

바. 기대 효과

- 하드웨어 생산성의 극한 도달
 - 물리적 제약으로 여겨졌던 기계적 대기 시간을 공간 지능 라우팅과 예측 배치를 통해 제로(0)에 가깝게 수렴시키며, 이를 통해 이론상 최대 하역 생산성(BMPH 130 이상)을 안정적으로 유지
- 지능형 예방 안전(Proactive Safety) 구현
 - 드론과 보행 로봇, Vision AI가 결합하여 사고 발생 '이후'가 아닌, 크레인 와이어 마모나 화물 쏠림 등 사고 발생 '이전'의 징후를 선제적으로 파악하여 중대재해 발생률 0%를 영구적으로 달성
- 'K-스마트항만' 소프트웨어 패키지 수출의 요람
 - 하드웨어 인프라 위에서 구동되는 "AI TOS + 디지털 트윈 + 로봇 제어망"의 통합 소프트웨어 스택이 완성되면, 하드웨어 수주에 의존하지 않고 라이선스(SaaS) 형태로 전 세계 항만에 한국형 스마트항만 두뇌를 수출하는 초격차 경쟁력 확보

V

GWCT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축(안)

1. 광양항의 GWCT, KIT와 부산신항의 HJNC 비교

- 광양항의 GWCT(광양항서부컨테이너터미널), KIT(한국국제터미널)와 부산신항의 HJNC(한진부산 컨테이너터미널)는 인프라 규모, 자동화 수준, 그리고 적용된 운영 시스템(TOS) 및 AI/디지털 트윈 기술의 성숙도 측면에서 명확한 차이를 보임

가. 3개 터미널 핵심 제원 및 물동량 비교

구분	GWCT(광양항)	KIT(광양항)	HJNC(부산신항 3부두)
운영사 특징	국내 선사 연합 (SM상선터미널 통합·반납)	글로벌 터미널 운영사 (Hutchison Ports)	국적 선사(HMM 등) 및 얼라이언스 중심
선석 규모	4개 선석 (안벽 길이 약 1.4km)	4개 선석 (안벽 길이 1.4km)	3개 선석 (안벽 길이 1.1km)
연간 물동량	약 133만 TEU (2023년 기준)	약 72만 TEU (2023년 기준)	약 280만 ~ 300만 TEU (선석당 처리량 극대화)
야드/ 게이트	재래식(Conventional) 중심 야드 운영	재래식 중심 야드 운영	반자동화(Semi-automated) 야드 블록(21개)
자동화 수준	유인 하역 및 재래식 하역 중심	유인 하역 및 재래식 하역 중심	수평형 안벽 배치 + 야드 자동화(ARMGC)

나. 시설 및 하역 장비(물리적 AI 및 하드웨어 아키텍처)

1) GWCT & KIT(광양항)

- 두 터미널은 기본적으로 유인 기반의 재래식 터미널(Conventional Terminal) 구조를 가짐
 - STS(Ship-to-Shore Crane): 주로 싱글 스프레더 방식의 일반적인 유인 갠트리 크레인이 주축을 이루며, 초대형 선박 대응을 위해 일부 24열 크레인이 투입되어 있으나, 장비 노후화와 하역 생산성 한계가 존재
 - 야드 장비(RTGC/RMGC): 타이어식 야드 크레인(RTGC)과 일부 궤도식 크레인(RMGC)을 혼용하며, 모두 작업자가 직접 탑승하여 운전하는 유인 장비이며, 화물 재조작(Rehandling) 비율이 수동 작업자의 숙련도에 크게 의존
 - 운반 차량: 부두 내 이송 장비로 유인 야드 트랙터(YT, Yard Tractor)를 사용하며, AGV(무인 이송 장비)는 적용되어 있지 않음

2) HJNC(부산신항)

- HJNC는 높은 하역 생산성(KPI)을 달성하기 위해 반자동화(Semi-automated) 시스템을 채택
 - STS(안벽 크레인): 40ft 컨테이너 2개 또는 20ft 컨테이너 4개를 동시에 양/적하할 수 있는 탠덤 스프레더(Tandem Spreader) 방식의 크레인 12기를 운영해 선석당 생산성이 매우 높음

- **야드 장비(ARMGC):** 총 42기의 레일형 자동화 야드 크레인(ARMGC)이 야드 21개 블록에 배치되어 있으며, 특히 **캔틸레버(Cantilever)** 형식을 채택하여, 내부 YT와 외부 트럭의 작업 동선을 물리적으로 분리함으로써 교차 간섭을 줄이고 높은 처리 속도를 유지
- **운반 차량:** 안벽과 야드 간의 이송은 유인 야드 트랙터(YT)가 담당하지만, 야드 블록 내에서 양적하 및 정리는 무인으로 작동하는 ARMGC가 수행(자동화 터미널의 AGV 도입 직전 단계)

다. 운영 시스템(TOS, RFID, 디지털 트윈, AI 등)

- 터미널의 두뇌 역할을 하는 IT 아키텍처에서 부산신항과 광양항 터미널 간의 세대 차이가 명확하게 나타남

1) GWCT & KIT의 IT 인프라

- **기본형 TOS 운영:** 화물 추적, 게이트 반출입 제어, 선석 계획 등 기본적인 TOS 기능에 충실 (KIT의 경우 Hutchison의 글로벌 표준 시스템을 현지화하여 사용)
- **제한적 센서망(RFID/LiDAR)**
 - RFID는 주로 게이트 자동화 및 보안 통제를 위한 출입증 인식 등 제한적인 범위에서 사용되며, HJNC 수준의 전면적인 실시간 야드 장비 위치 추적 및 동적 할당 체계로의 진입은 아직 진행 중이거나 향후 스마트 항만 전환 프로젝트(예: 광양항 자동화 테스트베드)에 의존하고 있음
- **AI 및 시뮬레이션 적용의 한계**
 - 물리적 AI(Physical AI)나 공간 지능(Spatial Intelligence)이 개입할 수 있는 자동화 하드웨어(ARMGC, AGV)의 부재로 인해, TOS 기반의 예측 및 시뮬레이션보다는 숙련된 플래너의 경험 기반 최적화에 여전히 많은 비중을 두고 있음

2) HJNC의 첨단 IT 인프라

- **지능형 TOS(Terminal Operating System):** 최근 글로벌 해운 데이터 플랫폼인 Portchain Connect와 연동하여 선석 배정 및 선박 스케줄링을 디지털화했으며, 이는 API 기반으로 실시간 일정을 최적화하여 대기 시간(Turn-around Time)을 최소화
- **RFID 기반 실시간 위치 추적 시스템(RTLS)**
 - 게이트 반출입뿐만 아니라, 터미널 내 야드 트랙터 및 외부 트럭의 실시간 위치 정보(Location Tracking)를 모니터링
 - 이를 통해 외부 트럭의 턴타임(Turn-time)을 평균 8분 이하로 통제하며, 특정 블록의 병목 현상을 방지하는 동적 라우팅 알고리즘의 기초 데이터로 활용
- **데이터 기반 최적화(AI & Digital Twin 과도기)**
 - 센서 및 RFID를 통해 수집된 물동량 데이터는 TOS 내에서 재조작(Rehandling) 최소화 알고리즘을 구동하는 데 사용되며, 향후 디지털 트윈을 활용한 'Sim-to-Real' 터미널 운영 시뮬레이션을 구현하기 위한 훌륭한 데이터 레이어(Data Layer)를 이미 구축한 상태

라. 종합 비교 요약

○ 하역 생산성 및 장비 아키텍처

- HJNC는 탠덤 STS와 캔틸레버 ARMGC를 통한 '수평 배열 + 반자동화' 모델로 좁은 부지에서 막대한 물동량(선석당 약 100만 TEU 육박)을 처리
- 반면, GWCT와 KIT는 넓은 야드 면적을 보유하고 있으나 수동 RTGC 위주의 운영으로 장비 회전율 및 트럭 턴타임 제어에서 한계가 있음

○ 스마트 항만 요소 기술(RFID/TOS):

- HJNC는 실시간 RFID 추적 데이터와 지능형 선석 플래닝 시스템 연동을 통해 디지털 트윈을 적용하기 위한 최적의 데이터 스트림을 생산하고 있음
- 광양항의 터미널들은 현재의 재래식 인프라 위에서는 고도화된 AI 최적화 알고리즘을 적용하기 까다로워, 국가 차원의 자동화 부두 전환 프로젝트를 통한 일괄 업그레이드를 도모

2. GWCT, KIT와 HJNC의 항만생산성 및 성과지표 비교

- 광양항의 GWCT, KIT와 부산신항의 HJNC는 인프라 수준(재래식 vs 반자동화)과 물동량 처리 규모가 다르기 때문에, 항만 생산성 및 핵심 성과 지표(KPI)에서 명확한 차이를 보임
- 하드웨어 아키텍처와 운영 시스템(TOS)의 고도화 수준이 실제 항만 생산성 지표에 어떻게 반영되는지 객관적으로 비교 분석한 결과는 다음과 같음

가. 항만 핵심 KPI 종합 비교

- 아래 표는 터미널 설계 제원 및 업계 평균적인 운영 데이터를 기반으로 한 구조적 비교임

KPI 구분	GWCT(광양항)	KIT(광양항)	HJNC(부산신항 3부두)
운영 방식	재래식 (유인 RTGC 위주)	재래식 (유인 RTGC 위주)	반자동화 (수평배열, ARMGC)
TAT (외부 트럭 턴타임)	보통 (평균 15~25분 내외)	보통 (평균 15~25분 내외)	우수 (평균 10~15분 이내)
GCR (크레인 생산성)	시간당 25~28 Moves	시간당 25~28 Moves	시간당 30~35 Moves (탠덤 적용 시 증가)
BMPH (선석 생산성)	70~90 Moves (초대형선 기준)	60~80 Moves	100~130+ Moves (높은 하역 속도)
야드 장치율 (Occupancy)	50~60% (여유 공간 상대적 풍부)	50~60% (여유 공간 상대적 풍부)	70~80%+ (고밀도 장치 운영)
재조작률 (Rehandling)	상대적으로 높음 (수동 조작/플래닝)	상대적으로 높음 (수동 조작/플래닝)	낮음 (TOS 기반 최적화 플링)
CDT (컨테이너 체류시간)	깊 (화주 유치를 위한 프리타임 제공)	깊 (화주 유치를 위한 프리타임 제공)	얕음 (높은 회전율 요구로 엄격한 통제)

나. 영역별 항만 생산성 심층 분석

① 게이트 생산성(외부 트럭 처리 효율 및 TAT)

- GWCT & KIT(광양항): 유인 RTGC(타이어식 크레인)를 사용하므로, 야드 블록 내에서 내부 YT와 외부 트럭이 혼재되어 작업
 - 트럭이 야드 내에서 대기하는 시간이 발생하며, 특정 블록에 화물이 집중될 경우 병목 현상으로 인해 TAT가 20분 이상으로 지연될 리스크가 상존
- HJNC(부산신항): 구조적 우위: 캔틸레버(Cantilever) 타입의 ARMGC(자동화 야드 크레인)를 채택하여, 외부 트럭(반출입)과 내부 YT(양적하)의 작업 동선이 물리적으로 분리
 - 결과: 게이트 집중 시간대(Peak Time)에도 장비 간 교차 간섭이 없어 TAT(Turn-Around Time)를 10분대 초반으로 강력하게 통제하며, RFID 및 예약 시스템 연동을 통한 게이트 무정차 통과 비율이 매우 높음

② 야드 생산성(장치율, 재조작률, 이동장비 효율)

- GWCT & KIT(광양항)
 - 광양항의 특성상 야드 부지가 넓어 장치율은 비교적 낮게(여유 있게) 유지됨
 - 그러나 유인 장비의 특성상 작업자의 숙련도에 따라 편차가 발생하며, 야간이나 휴일의 사전 정리 작업에 인건비 제약이 따르므로 구조적으로 HJNC 대비 재조작률이 높게 나타남
- HJNC(부산신항)
 - 고밀도·고효율: 물동량이 많아 야드 장치율이 70~80% 이상으로 높게 유지되지만, ARMGC가 24시간 무인으로 사전 정리 작업(Housekeeping)을 수행함
 - TOS 기반 재조작 최소화: 지능형 TOS가 선박 입출항 스케줄과 화물 중량을 예측하여 최적의 위치에 컨테이너를 배치하므로 재조작률(Rehandling Rate)이 최소화되며, 실시간 위치 추적(RTLS)을 통해 내부 YT의 공차 이동 거리도 획기적으로 줄임

③ 선석 생산성(STS 크레인 효율 및 BMPH)

- GWCT & KIT(광양항)
 - 주로 싱글 스프레더를 사용하는 일반적인 STS 크레인이 배치되어 있습니다. GCR은 20 중 후반대로 준수하지만, HJNC의 탠덤 크레인과 비교하면 물리적인 하역 속도에 한계가 있음
 - 초대형 선박이 입항했을 때 처리 시간(Port Time)이 부산신항 대비 상대적으로 길어질 수밖에 없는 하드웨어적 제약이 있음
- HJNC(부산신항)
 - 탠덤(Tandem) 스프레더 장착 STS: 한 번에 40피트 컨테이너 2개를 동시에 들어 올릴 수 있는 장비를 운용하여 GCR(Gross Crane Rate, 크레인당 총 하역 생산성)이 압도적임
 - 여러 대의 고성능 STS가 한 선박에 동시 투입되어 BMPH(Berth Moves Per Hour, 선석당 시간당 총 하역량)를 극대화하며, 메가 캐리어(Mega Carrier)들의 짧은 정박 시간(Port Time) 요구를 충족함

다. 분석 요약

- HJNC는 좁은 공간에서 최대의 물동량을 빼내야 하는 환경적 요인으로 인해, 하드웨어 (ARMGC, 탠덤 STS)와 소프트웨어(TOS, RTLS)가 결합된 고밀도/고생산성 아키텍처를 완성했으며, 이는 향후 데이터 기반의 완전한 디지털 트윈을 구현하기 위한 최적의 'Sim-to-Real' 기반이 됨
- 반면 GWCT와 KIT는 비교적 넓은 배후 부지와 화주 유치를 위한 유연한 정책(긴 CDT 제공 등)을 강점으로 삼고 있으나, 유인 재래식 하역 장비의 물리적 한계로 인해 야드 기기 생산성과 게이트 TAT 통제력에서는 부산신항의 반자동화 터미널과 객관적인 지표 차이가 발생
 - 이를 극복하기 위해 광양항은 현재 항만 자동화 테스트베드 구축 등 AI와 로봇틱스를 도입 하는 차세대 스마트 항만 전환을 추진 중

3. GWCT, KIT와 HJNC의 스마트항만 전환 방향

- 광양항의 GWCT, KIT와 부산신항의 HJNC가 차세대 스마트항만으로 도약하기 위해서는 각 터미널의 현재 하역 모델(재래식 vs 반자동화)에서 발생하는 병목 지점을 해결하고, 물리적 장비와 지능형 시스템을 결합한 'Sim-to-Real(시뮬레이션-실제 적용)' 최적화 체계를 구축하는 것이 핵심
- 특히 RFID/LiDAR 기반 항만 재고 관리 및 야간 순찰과 같은 신기술이 실전 운영 환경에 통합 되기 위해 필요한 구체적인 기술적 요구사항을 중심으로 비교 분석

가. GWCT & KIT(광양항): 재래식에서 스마트 터미널로의 근본적 전환

- 광양항의 두 터미널은 현재 유인 하역 장비(RTGC, YT) 중심의 수평 배치형 야드를 운영 중이며, 이를 스마트 항만으로 탈바꿈하기 위해서는 공간의 재구조화와 하드웨어의 전면적인 교체가 우선되어야 함
- 장비 자동화(Hardware Transformation)
 - 야드: 기존 유인 RTGC를 ARMGC(레일식 자동화 크레인)로 교체해야 합니다. 특히 유연한 운용을 위해 Cantilever형 ARMGC를 도입하여 트럭 동선을 분리하는 것이 필수적임
 - 이송: 유인 야드 트랙터(YT)를 AGV(무인 이송 장비)또는 AMR(자율주행 로봇)로 전환하기 위해, 바닥면의 트랜스폰더 매설 또는 LiDAR 기반 슬램(SLAM) 인프라 구축이 필요
- 시설 및 개조(Infrastructure Improvement)
 - 야드 배치: 현재의 수평형(Horizontal) 야드 배치를 자동화 장비가 원활히 작동할 수 있는 수직형(Vertical) 또는 고밀도 자동화 블록 구조로 재설계해야 함
 - 게이트: OCR(광학문자인식)과 RFID가 결합된 무정차 지능형 게이트를 도입하여 외부 트럭 진입 시 화물 정보를 자동 매칭해야 함
- 고도화 시스템(Software Architecture)
 - AI 기반 TOS: 수동 배정 방식에서 탈피하여, 물리적 AI(Physical AI)가 장비의 동선과 하역 순서를 실시간 최적화하는 차세대 TOS 도입이 필요

- 재고 관리: LiDAR 장착 드론 및 RFID 스캔을 통해 야드 내 컨테이너 위치를 실시간 전수 조사하고, 이를 TOS와 동기화하는 '실시간 재고 가시성' 확보가 최우선 과제임

나. HJNC(부산신항): "반자동에서 완전 자동화(Full-Auto)로의 진화"

- HJNC는 이미 반자동화된 야드 크레인(ARMGC)을 보유하고 있어, 스마트 항만의 기초 체력은 우수하며, 여기서는 **이송의 자율화와 지능형 예측 운영**이 핵심
- **완전 자동화 장비(Full-Automation)**
 - **선석**: 유인 안벽 크레인(STS)을 **원격 제어 및 완전 자동화 STS**로 개조해야 하며, 작업자가 지상 원격제어 센터(ROC)에서 다수의 크레인을 모니터링하는 체계로 전환이 필요
 - **이송**: 안벽과 야드 사이를 이동하는 유인 YT를 자율주행 AGV 또는 자율주행 YT(A-YT)로 전환하여, 터미널 전체에서 사람의 개입을 최소화하는 '무인화 영역'을 완성해야 함
- **고도화 시스템 및 지능형 기술**
 - **디지털 트윈 & 시뮬레이션**: 단순히 현황을 보여주고 운영하는 수준을 넘어, **월드 모델(World Model)** 기반의 시뮬레이션을 통해 1시간 뒤의 터미널 혼잡도를 예측하고 장비를 사전 배치(Pre-staging)하는 기술이 필요
 - **보안 및 안전**: 항만 내 사각지대를 해소하기 위해 **LiDAR 기반 야간 순찰 드론**을 도입하고, 물리적 사고 발생 시 AI가 즉각 하역을 중단하거나 우회 경로를 생성하는 **공간 지능(Spatial Intelligence)**이 적용되어야 함
- **네트워크 인프라**
 - 초저지연 데이터 전송을 위해 터미널 전역에 5G/6G 전용망(P-5G)을 구축하여 수천 개의 센서와 장비가 실시간으로 데이터를 주고받는 환경을 조성해야 함

다. 터미널별 스마트 항만 전환 로드맵 요약

- 이러한 전환을 통해 GWCT와 KIT는 운영 효율성을 극대화하여 물동량 처리 한계를 돌파할 수 있으며, HJNC는 글로벌 최고 수준의 생산성을 보유한 완전 무인 자동화 터미널로 완성될 수 있음

구분	GWCT / KIT (광양항)	HJNC (부산신항)
핵심 과제	인프라 재구조화 및 장비 전면 교체	이송 자율화 및 지능형 시뮬레이션 고도화
장비 요구사항	ARMGC 도입, 유인 장비의 원격/자동화	AGV/AMR 도입, STS 완전자동화 전환
시설 요구사항	야드 블록 수직화, 전용 통신망 구축	AI 인프라, 원격 제어센터 고도화
시스템 요구사항	AI 기반 차세대 TOS, 실시간 재고 관리 시스템	디지털 트윈 기반 'Sim-to-Real' 최적화 플랫폼 고도화 및 적용
신기술 융합	RFID/LiDAR 기반 재고 관리 및 보안 강화	물리 AI 기반 크레인 충돌 방지 및 경로 최적화

4. GWCT 컨테이너터미널의 스마트항만 구축 방안

○ 광양항 서부컨테이너터미널(GWCT)의 스마트항만 구축 필요성, 목적 및 주요 추진 내용

구분	주요 내용
필요성 및 추진 배경	• 물리적 인프라 한계: 유인 RTGC/YT 중심 운영으로 생산성(GCR, TAT) 향상 정체 및 초대형 선박 대응 어려움 • 안전 및 인력 문제: 중대재해처벌법 등 안전 규제 강화 및 숙련 하역 인력의 고령화·구인난 심화 • 브라운필드 제약: 운영 중단 없는 단계적 무인화 및 지능화 이식(개조 중심) 전략 필수
목적 및 목표	• 궁극적 목적: 데이터와 AI 기반의 '차세대 인지형 스마트 터미널(Cognitive Smart Terminal)'구현 및 무재해·친환경 항만 달성 • 단계별 목표: (1단계) 디지털화 100% 및 병목 식별, (2단계) 원격 제어 및 부분 자동화로 작업자 분리, (3단계) 물리 AI 기반 자율 최적화 운영
추진 방향 및 추진 방법	• 추진 방향: "데이터 기반 고도화 후 물리적 자율화"(센서망 구축으로 데이터 축적 후 시뮬레이션을 거쳐 고비용 하드웨어 개조 투자) • 추진 방법: "Sim-to-Real 기반의 유무인 복합 체계(MUM-T) 운영 검증"(3D 디지털 트윈 상에서 충돌 방지 및 동선 시뮬레이션 선행 후 실제 운영 환경 배포)
추진 내용 (시설/장비 및 시스템/솔루션)	[1단계] 디지털 및 인지 기반 구축(~2026) • 3D 디지털 트윈 항만 구축(TOS 연동), 게이트-야드-선석 최적화 구현 • 지능형 게이트(OCR, RFID 연동), 차량 RTLS/GPS 단말기 장착 • RFID/LiDAR 탑재 다목적 드론 관제 시스템 및 충전 스테이션 도입(재고 전수 조사 및 보안 순찰) [2단계] 하드웨어 개조 및 부분 자동화(2027~2028) • 기존 유인 RTGC 원격 제어(Remote Control) 전면 개조 • 특정 고밀도 장치 블록 캔틸레버형 ARMGC 부분 신규 도입 • 물리 정보 반영한 3D 디지털 트윈 구축 및 충돌 방지 시뮬레이션 수행 [3단계] 완전 지능화 및 인지형 아키텍처 완성(2029~) • 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 연동 최적화 • 물리 AI 기반 차세대 지능형 TOS 도입 및 동적 리소스 할당 • 중앙 원격통제센터(ROC) 통합 구축 완료 및 전 현장 무인화 뷰 확보
추진 전략 및 추진 체계	• 추진 전략: 약 1,300억 원 예산을 전면 ARMGC 도입 대신 '기존 장비 개조(Retrofit) + AI 소프트웨어 효율화'에 집중하여 ROI 조기 확보 • 추진 체계: YGPA(인프라 및 예산 지원), GWCT(운영 및 개조 주체), 민간 AI/로보틱스 전문 기업 및 국책 연구기관(기술 파트너십) 간의 초협력 가동
기대효과	• 운영 효율 극대화: 물리 AI 최적화로 외부 트럭 턴타임(TAT) 평균 15분 이내 단축 및 재조작(Rehandling) 비율 30% 이상 절감 • 안전성 제고: 하역 현장 인력 분리로 중대재해 원천 차단 및 LiDAR 드론 기반 사각지대 보안 100% 확보 • 글로벌 표준 제시: 전 세계 재래식 항만을 위한 현실적이고 경제적인 스마트 항만 수출 모델(Standard Reference) 확립

○ 광양항 서부컨테이너터미널(GWCT)의 스마트항만 구축의 기본 방향 및 단계별 로드맵

기본
방향



**Data First,
Autonomy Next**

초기에는 센서망을 통한
데이터 축적과 시뮬레이션 수행
이후에는 장비 자동화 추진



**Sim-to-Real
기반 검증**

3D 디지털 트윈 구축하여
Sim-to-Real 검증 및
유인/무인 장비의 리스크 차단



**브라운필드 맞춤형
하이브리드 전략**

기존 항만 시설을 유지한 채
일부 장치/장비를 개조하여
투자수익율(ROI) 확보

단계별
로드맵



**1단계: 디지털 및 인지 기반
(~2026)**

드론 기반 공간 인지망과
지능형 게이트 구축하여
자산 물류 상태를 100% 가시화



**2단계: 하드웨어 개조 및
부분 자동화 (2027~2028)**

기존 RTGC 크레인을 원격 제어
방식으로 전면 개조하고
디지털 트윈 연동하여 통제



**3단계: 완전 지능화 및
인지형 아키텍처 (2029~)**

자율주행 야드 트랙터(A-YT)
도입 및 플랫폼 연동과
물리 AI 기반 차세대 TOS 적용

기대
효과

외부 트럭 턴타임(TAT)



야드 내 재조작(Rehandling)



현장 안전사고



- GWCT 터미널의 스마트항만 3단계 구축 계획은 다음과 같이 데이터 기반 고도화 후 물리적 자율화(Data First, Autonomy Next) 전략에 따라 단계적으로 진행

(1단계) 디지털/인지 기반 구축(~2026)

- **필요성·배경:** 장비 노후화 및 수동 하역 생산성 한계, 안전 규제 강화, 하역 인력 구인난 심화에 대응
- **목적·목표:** 데이터 기반 가시성 확보 및 병목 현상 식별, 터미널 내 자산의 실시간 디지털화 100% 달성
- **추진 내용:** 3D 디지털 트윈 항만 구축(TOS 연동), 지능형 게이트 구축(OCR, RFID 연동), 차량 RTLS/GPS 단말기 장착, RFID/ LiDAR 탑재 다목적 드론 관제 시스템 도입
- **추진 전략:** 여수광양항만공사(YGPA) 주도의 인프라 및 예산 지원, 터미널 운영사(GWCT) 주도의 부분적 개조 공정
- **기대 효과:** 심야 시간대 사각지대 없는 재고 전수 조사 및 보안 순찰 체계 확보

(2단계) 부분 자동화 도입(2027~2028)

- **필요성·배경:** 기존 하역 체계로는 대형 얼라이언스의 생산성 요구 충족 한계, 작업 무인화를 통한 중대재해 차단 필요
- **목적·목표:** 핵심 하역 장비의 원격 제어 및 부분 자동화 전환, 유무인 장비 혼재 상황 (MUM-T)에서의 작업 동선 최적화
- **추진 내용:** 기존 유인 RTGC 원격 제어(Remote Control) 전면 개조, 특정 고밀도 장치 블록 캔틸레버형 ARMGC 부분 신규 도입, 물리 정보 반영한 3D 디지털 트윈 구축 및 충돌 방지 시뮬레이션
- **추진 전략:** 민간 AI/로보틱스, AI 기반 디지털트윈 전문 기업 및 국책 연구기관(KIOST 등)과 기술 파트너십 가동
- **기대 효과:** 하역 현장 인력 분리로 중대재해 원천 차단 및 재조작(Rehandling) 비율 절감

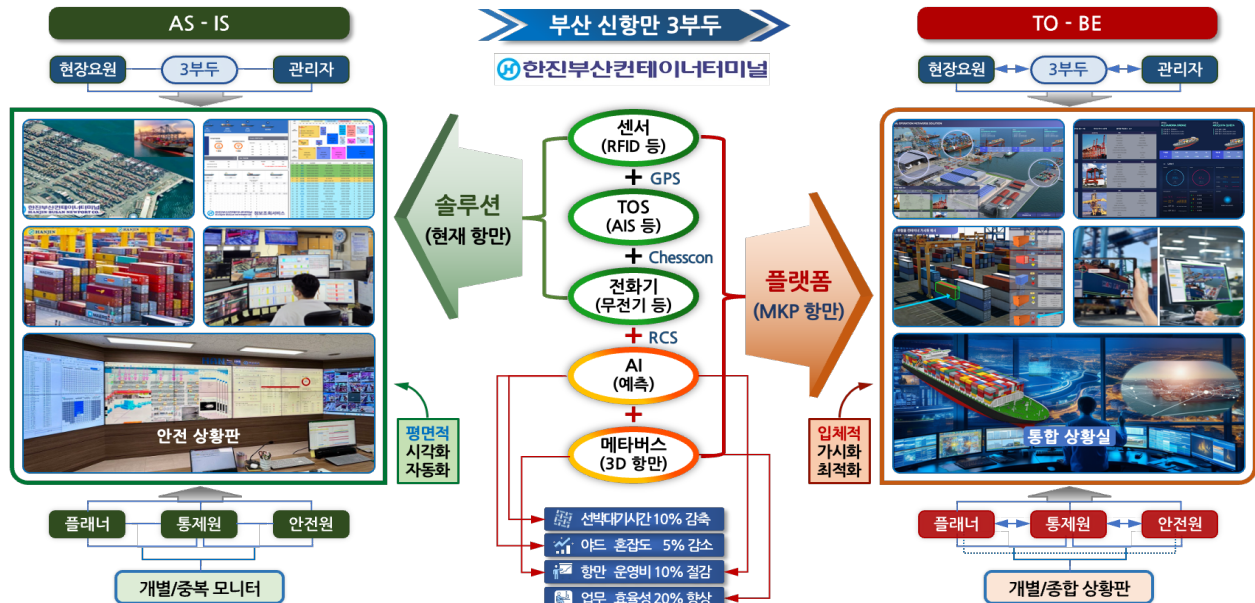
(3단계) 완전 지능화 완성(2029~)

- **필요성·배경:** 자율주행 및 물리 AI 접목 완전 자율 최적화 항만 아키텍처 완성 필요, 글로벌 표준 수출 모델 제시
- **목적·목표:** 데이터와 AI 기반의 '차세대 인지형 스마트 터미널' 완성, 자율 최적화 운영을 통한 생산성 및 효율성 달성
- **추진 내용:** 자율주행 야드 트랙터(A-YT) 연동 최적화, 물리 AI 기반 차세대 지능형 TOS 도입 및 동적 리소스 할당, 중앙 원격통제센터(ROC) 통합 구축 완료
- **추진 전략:** K-스마트항만 통합 소프트웨어 패키지 표준 아키텍처 및 수출 모델 확보
- **기대 효과:** 외부 트럭 턴타임(TAT) 평균 15분 이내 단축 및 무재해 운영 실현

5. HJNC 컨테이너터미널의 Meta K-Port 구축 현황

가. 플랫폼 개요

- Meta K-Port 지능화 물류 플랫폼은 항만 컨테이너터미널을 포함한 거대 플랜트/시스템의 운영 관리의 디지털트윈 수준을 넘어, 생산성 및 효율성 향상을 위해 AI 기반의 메타버스 플랫폼으로 전환되어 통제·관제까지 가능한 서비스 중심의 종합시스템
- Meta K-Port 지능화 물류 플랫폼은 부산 신항의 3부두(HJNC) 실증을 통해 시험 운영중



- 본 프로젝트의 주요 개발내용(중분류 기준)은 메타버스 물류관리 가상항만 플랫폼, AI 예측, 시뮬레이션 및 최적화 시스템, 메타 K-포트 물류관리 통합정보 시스템이며, 이 3가지를 통합한 최종 결과물의 명칭은 “Meta K-Port 지능화 물류 플랫폼”

구분	중분류(3종)	세부 시스템 및 솔루션
Meta K-Port 지능화 물류 플랫폼	① 메타버스 물류관리 가상항만 플랫폼	- 메타버스 가상항만 복합 공간 구축 - 메타버스 가상항만 동기화 시스템 - 메타버스 2D, 3D 가시화, 시각화 통합관제 시스템 - 메타버스 원격 협업 시스템(RCS) - 메타버스 3D 시뮬레이션 시스템
	② AI 예측, 시뮬레이션 및 최적화 시스템	- 선박(ETA) AI 예측 시스템 - 선석(Berth) AI 운영 예측 시스템 - 야드(Yard) AI 운영 예측 시스템 - AI 기반 예측 검증 시뮬레이션 시스템 - 메타버스 기반 예측 검증 시스템 - AI 운영 최적화 및 검증(CHESSCON 연동) 시스템 - AI 기반 작업 수행 요구시간(SRT) 예측 시스템
	③ 메타 K-포트 물류관리 통합정보 시스템	- 메타버스 물류 데이터 트윈 DB 구축 및 API 개발 - HJNC 터미널 운영 정보 Big DB 구축 - 선박 AIS 정보 Big DB 구축

나. 성능 지표

- (개요) 항만 컨테이너 운영사가 수출입 컨테이너 업무(게이트, 야드, 선석 등)를 효율적으로 운영할 수 있는 **AI와 3D 메타버스를 적용한 지능형 항만관계 플랫폼**을 개발하여 실증
 - 실제 운영중인 항만 컨테이너터미널을 실사 기반의 3D 복합공간으로 구축하고 현실 공간과 실제 데이터를 동기화하여, **운영요원(플래너, 통제원, 조작자 등) 및 관리자가 시뮬레이션을 수행하고 원격으로 협업**할 수 있는 환경을 조성
 - 실시간 가시화/시각화의 3D 메타버스 가상항만 플랫폼을 통해 운영요원은 선석, 야드 현장에 빈번하게 가지않고도 상황판 화면을 통해 업무를 진행하거나 지시하고, 신속하게 현황을 파악
- (성과) 항만 터미널의 **선석(Berth)과 야드(Yard)**에 입항 선박 수, 하역 컨테이너 량, 선박별 QC 크레인 할당 수, 접안시간, 게이트 반/출입 트럭 수, 최적 스테킹, 리핸들링 측정 등을 **AI 기반으로 예측 및 시뮬레이션을 통해 운영을 최적화하는 시스템**을 구현
 - **항만 운영비 절감** : AI 운영 예측 및 시뮬레이션 시스템으로 선박과 장비의 움직임에 대한 최적화를 통해 **항만 터미널의 혼잡도 5%, 리핸들링 3% 감소**
 - **업무 효율성 향상** : 컨테이너 터미널의 입항 선박 수, 장비/선석/야드 생산성, 컨테이너 체류 시간, 선석/야드 점유율, QC 가동율 등의 KPI 목표를 달성하고 **항만업무 효율성을 향상시켜 운영비용 10% 이상 절감**
- (비교) 글로벌 항만에서 운영되는 시스템/솔루션 중의 일부를 **고객 니즈(Pain Point) 기준**으로 **Meta K-Port™**플랫폼과 기능 서비스를 비교하면 다음과 같음

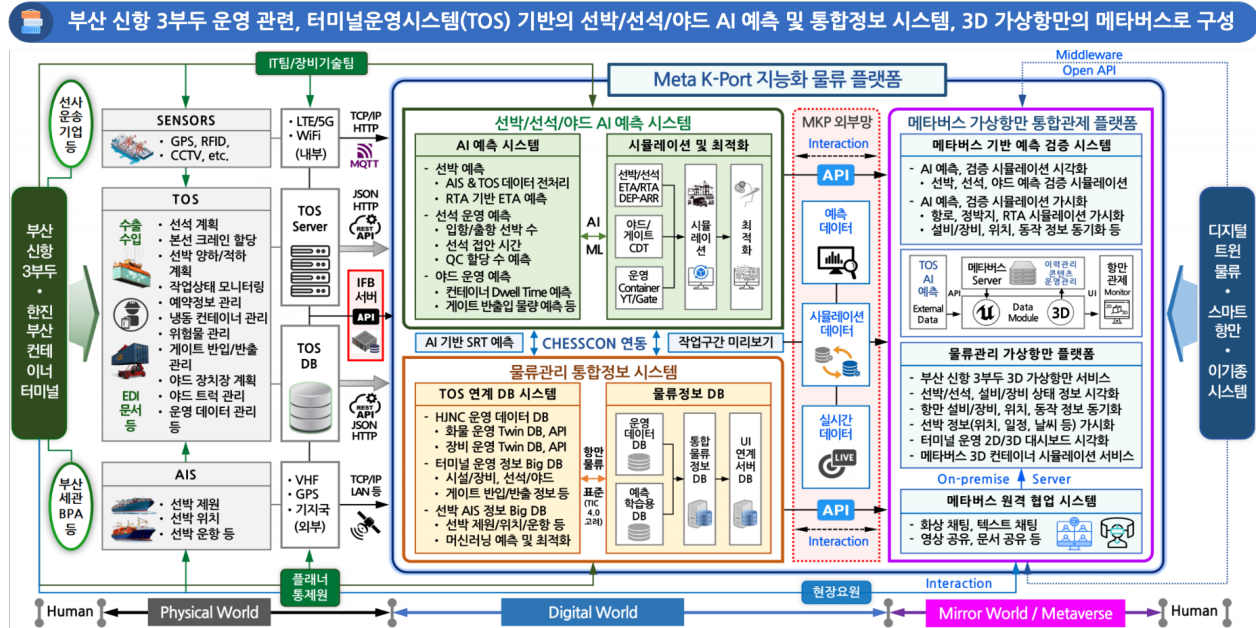
경쟁 기준	META K-PORT (한국)	NAVIS N4 (미국)	OPUS DigiPort (한국)	VARLOS (한국)	PORT Vision & AI Sea (핀란드)	Digital Twin Port (중국)	Smart Port (인도)
ETA 예측 정밀도	±3분 내외 신속하고 정교한 AI 기반 예측	±20분 수동 입력 또는 과거 분석 기반	±10분 기상 IoT 일부 반영	±7분 AI 위험 탐지 기반	±5분 해상 시각화 기반	±5분 디지털 트윈 시뮬레이션 기반	불명확 기능 미탑재
RCS 협업 수준	3D 메타버스 RCS 부서간, 실시간 협업	미흡 (보통방식 협업)	미흡 (보통방식 협업)	미흡 (보통방식 협업)	제한적 공유 동시 작업은 미흡	미흡 (보통방식 협업)	부분 적용 (PCS 1x 플랫폼)
시스템 통합성	모듈형 완전 통합: TOS, 선석, 야드, 트럭, 설비 포함	TOS 단일 시스템	TOS + IoT 부분 통합	모니터링 기능 중심 제한적 통합	단일 시각화 플랫폼	독립형 시뮬레이션 시스템	IoT 센서 개별 운영
시뮬레이션 가능성	예측 기반 시뮬레이션: AI 추천 시나리오 제공	미흡 (일반적 방식)	시뮬레이션 가능 (가상터미널 기능)	위험 예측 시뮬레이션 제공	시각화 중심 시뮬레이션	가상 항만 테스트 시뮬레이션	미흡 (일반적 방식)
AI/메타버스 기술력	AI + 메타버스 통합: 시각화, 가시화 우수	AI + 자동화	일부 IoT + 분석 (2D, 3D 지원)	AI + 위험 탐지 (Unreal 기반)	AI + 시각화 (Unity 기반)	디지털 트윈 항만 시각화	일부 AI + IoT 적용

○ MKP 프로젝트 성격 및 수행기관

- 본 프로젝트는 과기부(NIPA)의 **산업메타버스 사업(2024.5.1.~2025.12)**으로 추진되었으며, 주관기관은 (주)심스리얼리티, 참여기관은 티투엘, 토탈소프트뱅크, 부산대학교 산학협력단, 실증 및 수요처는 부산 신항 3부두, 한진부산컨테이너터미널(HJNC) 구성

다. 주요 산출물

○ Meta K-Port 플랫폼의 전체 아키텍처 구성도



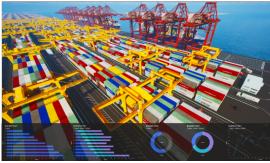
○ Meta K-Port 플랫폼의 전체 시스템 구성도



○ 실제 구축되어 운영중인 Meta K-Port 플랫폼의 상황판



○ 일반 항만, 스마트 항만, 메타버스 항만의 한계와 특징 비교

구분(비교)	일반 항만	스마트 항만	메타버스 항만
가시화 및 시각화 	실내에 근무하는 운영요원(플래너, 통제원 등)은 주로 CCTV와 2D 솔루션(TOS, 엑셀 등), 전화(무전기 포함)로 항만 컨테이너터미널 업무를 수행하기에 전반적으로 가시화 및 시각화 부족	실제 항만을 복제(미러월드)한 디지털트윈 방식의 스마트 항만은 모니터링, 관제 중심으로 현장에서 생성되는 작업/운영 데이터의 상호작용을 가시화 및 시각화하는데 한계	건물/설비/장비, 컨테이너 위치/적재/현황, 현장 작업/운영 상황 등 제반 사항을 실사 3D 가상항만으로 구축 및 연계/연동하여 관리자/작업자 화면, 각종 통계 등을 입체적으로 가시화 및 시각화 제공
자동화 및 효율성 	항만 컨테이너의 일부 영역/작업만 자동화되어 있기 때문에 공간/장치의 물리적 제약에 대해, 사람의 개입이 필요하며, 복잡하거나 예외적인 상황에서 체계적으로 대응하는데 한계	디지털 트윈과 설비 자동화를 통해 실제 환경을 모니터링하고 제어할 수 있지만, 센서 오작동, 데이터 불완전성, 운영요원 미숙 등으로 지속적인 효율성 증대에는 한계	가상 환경에서 시나리오를 설정하여 항만 플래닝할 수 있고, 실제 환경의 복잡성과 다양한 변수들을 반영하여 AI 기반의 예측과 시뮬레이션을 통해 사전에 검증함으로써 유연성과 효율성 향상
운영 최적화 및 실시간 대응 	자동화된 시스템이 일부 적용되었지만, 전체적인 운영 최적화와 신속한 의사결정에 어려움이 있으며, 특히 게이트, 야적장, 선석 간의 연계과정에 병목 현상이 발생할 가능성이 높음	자동화와 센서 기반의 운영시스템은 평상시 효율적이지만, 예상치 못한 변수나 비상 상황이 발생한 경우 센서 오류 및 데이터의 연계/연동이 취약할 수 있어 실시간 대응은 미흡	통합 메타버스 플랫폼에서 최적화 방안을 상시 모색할 수 있고, 예상되는 돌발 상황에 대비하여 시나리오 및 시뮬레이션을 통해 다양한 의사결정 대안을 제시하고 실시간 대응 가능
기술적 제약 및 비용 	기존 인프라와 시스템을 활용하여 비용이 적게 들지만, 자동화 범위 확대에 추가 투자가 필요하며, 일부 작업은 여전히 수작업으로 진행하여 항만 생산성 및 운영 효율성 향상에 한계	디지털 트윈, 센서, 자동화 장치/시스템 구축에 상당한 투자와 기술적 전문성이 필요하며, 항만 구조/특성에 따라 TOS 솔루션, 자동화 설비 등 기존 인프라와의 통합이 어려울 수도 있음	AI 솔루션, 3D 가상항만 구축 등의 첨단기술 도입과 유지에 비용이 소요되지만, 실제 항만과 연계/연동되는 메타버스 플랫폼 운영 효율성으로 투자 대비 실질적인 비용절감 효과 매우 높음
운영 및 인력 	기술발전에 따른 항만 설비/장비와 사람의 역할이 변화하면서 자동화와 수작업 간의 조화가 필요하며, 기술인력 재교육과 적응이 중요한 과제로 부각	새로운 자동화 설비/장치의 도입으로 고용감소에 대한 저항이 발생하거나 인력의 재교육이 필요하며, 해킹 및 데이터 유출 위험에 대한 운영관리 혁신 필요	사람이 수행하는 업무를 AI 기반 플랫폼이 빠르고 정확하게 처리, 운영/인력 관리를 유연하게 할 수 있고, AI TRISM 등을 통해 알고리즘 편향과 정보보호 구현 가능
종합 평가 	항만 설비/장치의 부분적 자동화와 TOS 솔루션 등으로 어느 정도 항만 효율성을 높이고 있지만, 전반적인 유연성과 신속한 대응력, 그리고 최적화, 생산성 측면에서는 다소 미흡	스마트 설비/장치, 센서로 현실 반영과 실시간 제어에 강점이 있지만, 자동화 설비의 공간적/기능적 제약, 센서 데이터의 신뢰성, 시스템의 유연성 등에 부분적으로 한계	AI 기반 메타버스 항만 플랫폼은 시뮬레이션과 최적화, 가시화, 지능화로 게이트, 선석, 야드 계획 및 운영에 강점이 있으며, 이로 통해 항만 컨테이너 생산성과 운영 효율성 증대

부록

광양항의 항만자동화 테스트베드 3-2단계 사업 현황

1. 광양항의 항만자동화 테스트베드(광양항 3-2단계) 사업 현황

- 광양항 항만자동화 테스트베드(3-2단계) 구축사업은 대한민국 해운·항만 산업의 스마트화를 이끌 핵심 국책 사업으로, 전 영역 자동화(Full-Automated) 항만을 국내 기술로 구현하고 검증하는 것을 목적으로 추진

가. 사업 개요

- 사업 명칭: 광양항 항만자동화 테스트베드(3-2단계) 구축사업
 - 사업 기간: 2022년 ~ 2026년(2027년 완전 개장 목표)
 - 총 사업비: 6,915억원(국비 50%, 여수광양항만공사 50% 분담), 변경 7,846억원(2025년)
 - 사업 규모: 컨테이너 부두 총 4선석(안벽 길이 총 1,400m, 연간 약 136만 TEU 처리 목표)
- 위치 장소: 전라남도 광양시 도이동 광양항 3-2단계 컨테이너부두 일원

나. 핵심 시설 및 하역 장비 구성

- 기존 수동 또는 반자동화 터미널과 달리, 선석(안벽)부터 야드까지 전 구간에 걸쳐 완전 무인 자동화 장비가 도입되며, 특히 핵심 하역 장비의 국산화에 초점을 맞추고 있음
- 안벽 크레인(C/C 또는 STS): 11대
 - 완전 자동화 및 원격 제어 기반의 컨테이너 크레인
- 자율 이송 장비(L-AGV): 44대
 - 안벽과 야드 사이의 수평 이송을 담당하며, 일반 AGV와 달리 화물을 스스로 들고 내릴 수 있는 리프트형(Lift-AGV)을 채택하여, 크레인과의 대기 시간을 없애고 작업 효율(Decoupling)을 극대화
- 자동 야드 크레인(ARMGC): 32대
 - 야드 내 컨테이너 양·적하 및 정리를 담당하는 궤도식 자동화 크레인
- 신기술 시험검증영역(9만㎡ 규모)
 - 부두 내 별도의 공간을 마련하여 R&D로 개발된 최신 항만 장비와 신기술(자율주행 야드 트랙터, 차세대 센서 등)을 실제 운영 환경에서 테스트할 수 있는 기반을 제공

다. 운영 시스템(TOS) 및 솔루션/서비스

- 하드웨어와 이를 통제하는 두뇌(소프트웨어) 영역에서도 최첨단 IT 기술이 통합 적용
 - 차세대 지능형 TOS(Terminal Operating System): 기존의 단순 배차/할당을 넘어, AI 알고

리즘을 통해 수십 대의 L-AGV와 ARMGC의 최적 동선을 실시간으로 계산하고 교착 상태(Deadlock)를 방지하는 고도화된 운영 시스템이 도입

- **디지털 트윈 및 시뮬레이션 최적화:** 가상의 항만 공간을 구축하여 화물 유입량 변화, 장비 고장 등 다양한 시나리오를 사전 시뮬레이션(Sim-to-Real)하고 최적의 대응 방안을 실제 시스템에 적용
- **5G/IoT 기반 통합 통신망:** 무인 장비 간의 초저지연 데이터 송수신을 위해 터미널 전역에 강력한 무선 통신 인프라(P-5G 등)가 구축

라. 운영 방식 및 기대 효과

- **운영 방식(전 영역 자동화):** 배가 접안하여 화물을 내리고, 야드로 이송 후 적치하며, 최종적으로 외부 트럭으로 반출되는 전 과정(Ship-to-Gate)이 무인화되어 운영되고, 작업자는 현장이 아닌 통제실(ROC)에서 모니터링 및 예외 상황에 대한 원격 제어만 수행
- **기대 효과**
 - **국산화 및 산업 생태계 육성:** 해외 기술에 의존하던 항만 자동화 장비와 시스템을 국산화하여 기술 종속을 탈피하고, 국내 스마트 항만 산업의 수출 기반을 마련
 - **생산성 증대:** 24시간 멈춤 없는 무인 하역 작업과 L-AGV를 통한 병목 현상 해소로 항만 하역 생산성이 획기적으로 향상
 - **안전성 및 친환경 제고:** 작업자가 위험한 하역 현장에서 배제되어 중대재해를 원천 차단하며, 디젤 장비 대신 전기 구동 장비를 전면 도입하여 탄소 배출을 최소화(Green Port)

마. 현재 추진 현황(2026년 기준)

- 광양항 3-2단계 테스트베드 사업은 당초 수립된 마스터플랜에 따라 차질 없이 진행 중
- **초기 단계(~2023년):** 2021년 예비타당성 조사 통과 후, 2022년 공식 착수 보고회를 가졌으며, 이후 기초 설계 및 국내 기술진(포스코플랜텍 등)과 함께 자동화 하역 장비 국산화 및 제작을 위한 업무 협약과 발주가 이루어졌음
- **구축 단계(2024년 ~ 2025년):** 항만 기반 시설(토목, 전기, 통신망) 공사가 본격화되었으며, 제작이 완료된 국산 L-AGV와 자동화 크레인 등 핵심 장비의 순차적인 현장 반입 및 조립이 진행되었음
- **시운전 및 안정화 단계(2026년 현재):** 물리적인 장비 인프라 구축이 마무리 단계에 접어들었으며, 현재는 하드웨어와 AI 기반 운영 시스템(TOS)을 연동하는 통합 시운전 및 테스트 단계에 돌입
- 이 기간 동안 시뮬레이션을 통한 버그 수정, 장비 간 동선 간섭 제어 등 실 가동을 위한 최적화 작업이 중점적으로 수행
- **향후 계획:** 2026년 내 통합 시운전을 성공적으로 마치고, 2027년에 한국형 완전 자동화 항만으로 공식 개장 및 상업 운영을 시작할 예정

2. 테스트베드(광양항 3-2단계) 사업의 차세대 스마트항만 필요성

- 광양항에 구축 중인 항만자동화 테스트베드(광양항 3-2단계) 사업은 2022년에 기획 및 착수 당시의 초기 청사진은 '장비의 무인화(Unmanned)'와 '하드웨어적 자동화(Automation)'에 초점이 맞추어져 있음
- 그러나 최근 1~2년 사이 급격히 발전한 Physical AI(물리적 인공지능), World Model 기반의 Sim-to-Real, 차세대 공간 지능(Spatial Intelligence) 등의 첨단 소프트웨어 아키텍처는 당시의 기본 설계(Basic Design)에 깊이 있게 반영되기 어려웠던 구조적 한계가 있음
- 테스트베드가 단순한 '자동화 항만 1.0'을 넘어 진정한 의미의 '차세대 인지형 스마트 항만 (Cognitive Smart Port 2.0)'으로 탈바꿈하기 위해 현재의 인프라 위에 반드시 융합되어야 할 핵심 기술요소와 요구사항을 반영하는 것이 바람직함

가. Physical AI 및 지능형 로봇 기술의 이식(장비 자율성 고도화)

- 현재 도입 중인 L-AGV(자율 이송 장비)와 자동화 크레인인 주로 트랜스폰더나 지정된 궤도, 규칙 기반(Rule-based) 알고리즘에 의존하는 '수동적 자율주행' 수준
- 필요 요소
 - 공간 지능(Spatial Intelligence) 및 동적 회피: 지정된 경로에 예기치 않은 장애물(낙하물, 유지보수 인력 등)이 발생했을 때, 시스템 정지(Deadlock) 없이 실시간으로 우회 경로를 생성하는 자율 주행(AMR 수준) 능력 필요
 - 물리 정보 기반 신경망(PINN) 적용: 돌풍이나 악천후 시 크레인의 스프레더 흔들림(Sway)을 제어하기 위해, 단순한 PID 제어를 넘어 물리 법칙을 학습한 AI 모델을 적용하여 미세 조정(Micro-control)을 수행

나. 3D 디지털 트윈 기반 'Sim-to-Real' 상황/통제 시스템

- 초기 설계된 관제 시스템은 센서 데이터를 3D 화면에 단순히 표출하는 '모니터링(거울)' 수준에 머물러 있을 가능성이 높으며, 차세대 항만은 이를 넘어 '예측 및 최적화 엔진'으로 기능해야 함
- 필요 요소
 - World Model 기반의 시뮬레이션 최적화: 가상의 항만 모델(Digital Twin)에서 수만 번의 강화학습(RL)을 통해 최적의 장비 배치 및 하역 시나리오를 도출하고, 이를 현실 세계의 TOS(Terminal Operating System)에 실시간으로 반영하는 Sim-to-Real 루프를 구현
 - TRL 3~8 단계의 체계적 검증 환경: 디지털 트윈 내에서 새로운 AI 알고리즘의 개념 검증(TRL 3)부터 시스템 프로토타입 성능 평가(TRL 5~6)를 거쳐, 실제 테스트베드에서의 실증(TRL 8)까지 이어지는 소프트웨어 중심의 검증 파이프라인을 구축

다. 무인 구역의 가시성 확보: RFID/LiDAR 탑재 드론 및 지능형 순찰

- 완전 자동화 터미널의 야드 장치장은 사람의 출입이 엄격히 통제되는 '통제 구역(Restricted Area)'이며, 화물 위치 인식 오류나 하역 사고 발생 시 사람이 직접 들어가 확인하는 것은 치명적인 안전 리스크를 수반

○ 필요 요소

- 비전(Vision) 제약 극복을 위한 비행 시스템: 컨테이너 틈새의 사각지대나 악천후/야간 상황에서도 작동할 수 있도록 LiDAR와 RFID 리더기를 장착한 자동화 드론 도입
- 실시간 재고 관리 및 야간 순찰: 드론이 자율 비행하며 야드 내 컨테이너의 RFID를 스캔하여 3D 디지털 트윈 상의 정보와 실제 적치 상태의 불일치를 찾아내고(재고 전수 조사), 야간에는 라이다 센서를 통해 비인가 침입자나 구조적 결함을 탐지하는 다목적 운영체계 필요

라. 공간 맥락을 이해하는 지능형 CCTV 및 Vision AI

- 기존의 CCTV망은 보안 및 사후 증거 수집용으로 설계되었는데, 차세대 스마트 항만에서는 카메라가 단순한 '눈'이 아닌 지능형 '뇌'의 역할을 수행

○ 필요 요소

- 객체 간 상호작용 분석: 단순한 화재 탐지나 침입 감지를 넘어, "AGV와 외부 트럭의 궤적이 3초 뒤 겹친다"거나 "크레인 작업 반경 내에 작업자가 진입했다"는 맥락을 실시간으로 파악하여 선제적으로 장비 작동을 중단시키는 예측형 안전 관제 알고리즘 필요
- OCR 및 결함 자동 탐지: 게이트 통과 시 컨테이너의 외관 손상이나 씰(Seal) 파손 여부를 AI가 즉각 판독하여 디지털 트윈에 기록하는 자동 검수 시스템이 연동

마. 차세대 AI 최적화 솔루션(인지형 TOS)

- 광양항 3-2단계 컨테이너터미널의 하드웨어는 세계적 수준으로 구축되더라도, 이를 통제하는 소프트웨어(TOS)가 과거의 로직에 머무르면 장비의 생산성을 100% 달성할 수 없음

○ 필요 요소

- 동적 리소스 할당(Dynamic Pooling): 정해진 장비를 특정 블록에 고정 할당하는 방식을 넘어, 터미널 전체의 물동량 흐름을 AI가 분석하여 ARMGC와 L-AGV를 가장 붐비는 곳으로 실시간 유연하게 재배치하는 알고리즘 최적화가 핵심
- 현재 광양항 3-2단계 사업이 '물리적 자동화 인프라(Hardware)'를 다지는 과정이라면, 차세대 스마트 항만으로의 도약을 위해서는 그 위에 Physical AI, Sim-to-Real 디지털 트윈, LiDAR 드론 기반 재고/안전 감시망이라는 '지능형 인지 계층(Cognitive Software Layer)'을 추가로 이식하는 시스템 고도화를 반드시 반영

광양항 컨테이너터미널의
스마트항만 구축 방안

발 행 처	(주)심스리얼리티
수행부서	AI융합원, 임명환
발 행 일	2026. 4. 22.

※ 본 자료는 사전 허가없이 무단 배포 및 복제를 금지합니다.