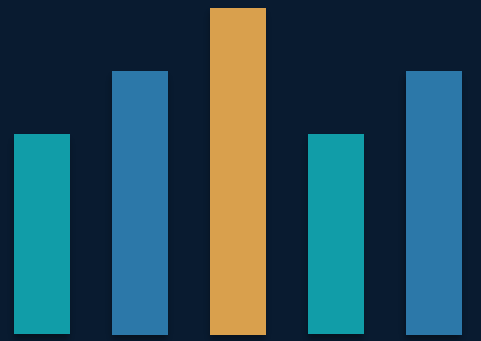
META PORT / 전문 운영 교재 시리즈

진해신항 / 컨테이너터미널

디지털 트윈 · 이산사건 시뮬레이션 · 선석·QC·AGV·야드·게이트 운영



한국어 전문 교재판 | 티투엘(주) / LOGI AI 연구소 | 2026

핵심 개요

하나의 운영 시스템, 서로 연결된 여섯 가지 의사결정

터미널 전체의 성능은 현재의 병목에 좌우됩니다. 부분 최적화가 전체 최적화는 아닙니다.

선석·선박

어느 선박을 어떤 선석에, 언제 배정할 것인가?

QC 배정

설치된 안벽크레인 중 몇 대를 어느 선박에 배정할 수 있는가?

AGV·수평 운송

이동·인계·대기가 안벽 생산성에 미치는 영향은?

야드·슬롯

향후 재취급을 최소화하면서 적합한 슬롯에 어떻게 적치할 것인가?

게이트·외부 트럭

트럭 도착·차로·LSTP 배정은 혼잡을 어떻게 바꾸는가?

통합 KPI

안전·물리적 제약을 지키면서 처리량을 높일 수 있는가?

엔지니어링 약속 | 병목 원인 설명 → 개선안 실험 → 결과 감사

적용 범위와 경계

본 자료는 컨테이너터미널 운영만 다룹니다

진해신항 시연 모델을 참조하며 다른 항만 서비스는 의도적으로 제외합니다.

포함 범위

선박 기항, 선석 배정, QC 작업, AGV·트랙터 경로, 적치 슬롯, 야드 운송, 외부 트럭과 게이트.

제외 범위

탱커터미널, 액체화물 이송, 저장탱크, 급유 시설, 신규 항만개발 투자 타당성.

근거 원칙

Stage의 배치·크레인·경로 시험은 사례의 근거일 뿐입니다. 미검증 설정이나 시험 결과를 운영 실적으로 표현하지 않습니다.

시스템 경계

진해 시연: 물리적 운영 모델

모델 검증용 참조 설정입니다. 실제 현장의 마스터 데이터가 우선합니다.

안벽 시스템

참조 배치에는 선석 위치 3개가 있습니다. 정확한 형상과 운영 한계는 CAD로 확인해야 합니다.

안벽크레인

QC 총 12대 상한을 모델 검수 기준으로 사용합니다. QC13~QC15를 배정 대수에 포함하면 안 됩니다.

내부 인계

AGV 동선은 QC ↔ WSTP입니다. 경로 노드와 허용된 연결이 실제로 존재하는지 확인합니다.

외부 연계

외부 트럭은 주·보조 게이트 ↔ LSTP로 이동하며, AGV 전용 경로를 사용하지 않습니다.

적치 구역

일반·공컨·냉동·위험물·유해물·비규격(OOG)은 슬롯 적합성을 각각 검증해야 합니다.

검증 책임

화면이 정상 재생된다고 이벤트 수·인과 경로·적치 가능성이 입증되는 것은 아닙니다.

참조 설정에 한정 | 운영 성능을 주장하기 전에 장비 마스터와 승인된 CAD 형상을 검증합니다.

통합 운영 논리

전체 운영을 연결하는 이벤트 체인

한 지점의 장애는 연결된 하위 시스템 전체에 전파되어야 합니다.

01	02	03	04	05
선박	**QC**	**AGV**	**야드**	**게이트**
ETA, 선석 적합성, 작업 시작·종료	작업조 배정, 이동 횟수, 크레인 간섭	배차, 이동, 인계, 대기	WSTP, 블록·슬롯, 재취급·반출	LSTP, 트럭 대기열, 출차, 서비스 목표

각 이벤트에는 고유 ID, 시각, 자원, 선행 이벤트, 시나리오 버전을 기록합니다.

01

디지털 트윈의 공학적 구조

터미널은 단순 영상이 아니라 상태가 변하는 실제 물리 시스템입니다.

개념 모델 · 운영 규칙 · 재현 가능한 시뮬레이션

참조 모델

신뢰할 수 있는 터미널 트윈의 여섯 계층

각 계층은 독립적인 검증 근거를 갖추어야 합니다.

형상 계층

CAD 기반 선석·야드 블록·도로·게이트 ·WSTP·LSTP 좌표와 좌표변환 정의.

개체 계층

선박·기항 순서·컨테이너·적부·QC·AGV·야드 장비·트럭·슬롯 식별정보.

이벤트 엔진

도착·선석 배정·QC 양적하·인계·적치·재취급 ·반출·게이트 처리.

제약조건 엔진

물리적 능력, 안전 분리 적치, 시간, 인접성, 장비 자원 상한.

KPI 엔진

시간가중 점유율, 대기시간, 선박 완료시간, QC·차량 가동률, 처리량.

근거 관리 엔진

입력값, 해시, 시나리오, 실행 ID, 오류, 버전 , 난수 시드, 검토자 의사결정.

시뮬레이션 계산식

이산사건 상태 전이

$$S(t+) = F[S(t-), e, R(t), C]$$

변수 및 단위

S = 시스템 상태, e = 이벤트, R(t) = 시점별 자원 가용성, C = 고정·동적 운영 제약.

의사결정에 미치는 영향

QC 작업 지연·슬롯 차단·AGV 부족이 대기열과 후속 자원 수요를 연쇄적으로 바꿉니다.

모델 적용 경계 | 실제 배포 엔진의 스케줄러와 상태 스키마는 소스코드 수준에서 검증해야 합니다.

이벤트 제어

시뮬레이션 시계의 진행 원리

영상 프레임 수가 아니라 다음 실행 가능 이벤트가 작업을 진행시킵니다.

01	02	03	04	05
이벤트 추출	**제약 검사**	**자원 배정**	**상태 갱신**	**기록**
실행 가능한 가장 이른 이벤트 시각 선택.	자원 가용성과 물리적 적합성 검증.	배정 자원과 위치를 선점 처리.	대기열·재고·자원 상태 변경.	이벤트 저장 및 시간가중 KPI 누적.

동일 입력 스냅샷·설정·난수 시드·코드 버전에서는 결정론적 재현이 가능해야 합니다.

시뮬레이션 계산식

시간가중 야드 점유율

$$U_y = (1/T) \int_{[0,T]} N_{occupied}(t)/C_{effective}(t)\, dt$$

변수 및 단위

N_occupied(t) = 적합한 슬롯의 점유 수, C_effective = 운영상 가용 슬롯 수, T = 분석시간(시간).

의사결정에 미치는 영향

화면의 한 장면을 전체 시뮬레이션 기간 평균 야드 점유율로 오해하지 않도록 합니다.

모델 적용 경계 | 분모에서 사용 중지·부적합 슬롯을 제외하고 적용한 정의를 밝혀야 합니다.

모델 입력·출력 계약

감사 가능한 실행에 반드시 남겨야 할 정보

결과를 내보낼 때 최소한의 근거 정보를 함께 보존합니다.

입력 계약

스냅샷 ID, 출처 기준일, 단위, 레코드 수, 공식값과 추정값의 구분.

배치도 계약

CAD 파일 해시, 승인된 변환, 노드 좌표, 연결 가능한 경로.

운영 규칙 계약

슬롯 적합성, QC 대수 상한, 자원 일정, 이동 선후관계.

산출물 계약

이벤트 로그, 거부 사유, 최종 상태, 단위가 명시된 KPI 시계열.

움직이는 아이콘은 물리적 경로와 이벤트 정합성의 증거를 대신할 수 없습니다.

02

선석 및 안벽크레인 계획

실행 가능한 선석 사용 시간대, 크레인 배정, 선박 작업 완료를 함께 모델링합니다.

운영 절차

선박 도착부터 출항까지의 표준 절차

운영 관리자가 각 상태 전이를 재현할 수 있어야 합니다.

01	02	03	04	05
기초 검토	**선석 배정**	**자원 배정**	**시뮬레이션**	**결과 검토**
ETA, 전장, 흘수, 선석 여유, 화물량 확인.	부적합 선석 제외 후 실행 가능한 작업 시작시간 산정.	장비 대수 한도 내에서 QC와 작업조 배정.	양적하·인계·작업 중단·완료 이벤트 진행.	지연 선박, QC 병목 및 판단 근거 확인.

예외 기록: QC 고장, 선석 충돌, 선박 길이 초과, 조석 시간대 위반, 작업 순서 오류.

선석 계산식

적합 선석의 이용률

$$U_b = \Sigma_i T_{berth,i} / \Sigma_b H_{available,b}$$

변수 및 단위

T_berth,i = 선박 i의 선석 점유시간, H_available,b = 선석 b의 실제 가용시간.

의사결정에 미치는 영향

이용률이 높으면 지연 회복 여력이 작을 수 있으므로 선박 대기 분포와 충돌을 함께 봅니다.

예시 | 동일한 선석 3개 × 168시간 = 주당 명목 가용시간 504선석·시간. / 모델 적용 경계 | 동일한 기간과 적합 선석만 묶어 계산해야 합니다.

선석 계산식

선박 대기시간과 항만 체류시간

$$W_i = \max(0,\ t_{berth,i} - t_{arrival,i})\ ;\ TAT_i = t_{departure,i} - t_{arrival,i}$$

변수 및 단위

W = 투묘지 또는 선석 대기시간[시간], TAT = 정의된 항만 총 체류시간[시간]. 이벤트 기준시각을 통일합니다.

의사결정에 미치는 영향

출항 지연이 선석 충돌, QC 처리능력, 야드 적체 중 어디서 발생했는지 구분합니다.

예시 | 도착 08:00, 선석 작업 시작 13:30 → 5.5시간 대기. / 모델 적용 경계 | 항만 도착시각, 도선점 도착시각, 예정 ETA를 구별합니다.

선석 제약조건

선석 중복 점유 금지와 선박 적합성

$$x_{ib} \in \{0,1\};\ \Sigma_b x_{ib}=1;\ \ [s_i,e_i] \cap [s_j,e_j]=\emptyset$$

변수 및 단위

x_ib = 선박 i의 선석 b 배정 여부, s·e = 동일 공간을 쓰는 선박의 점유 시작·종료 시각.

의사결정에 미치는 영향

선박 체류시간을 비교하기 전에 물리적으로 불가능한 선석 후보를 제거합니다.

모델 적용 경계 | 연속 안벽에서 선박을 나란히 배치한다면 단순 1선박·1선석 모델 대신 공간 구간 모델이 필요합니다.

QC 계산식

안벽크레인 작업 소요시간

$$T_{QC} \approx M_{total} / (n_{QC} \times P_{net}) + T_{nonproductive}$$

변수 및 단위

M_total = 총 이동 횟수, n_QC = 상호 간섭 없이 가용한 QC 수, P_net = QC 1대당 실효 시간당 처리량.

의사결정에 미치는 영향

QC 대수·고장·작업순서 변경이 선박 완료시간에 미치는 영향을 평가합니다.

예시 | 1,800회 ÷ (QC 6대 × 시간당 25회) = 부대시간 제외 12시간. / 모델 적용 경계 | 크레인 간섭이나 작업량 불균형 시 생산성이 대수에 정비례하지 않습니다.

QC 계산식

실효 크레인 생산성

$$P_{net} = M_{completed} / \Sigma_q H_{working,q}$$

변수 및 단위

M_completed = 완료된 실제 양적하 횟수, H_working,q = 정의된 기준에 따른 QC별 작업시간.

의사결정에 미치는 영향

개선책을 고르기 위해 생산시간, AGV·야드 대기, 고장, 교대시간을 구분합니다.

모델 적용 경계 | 선박 전체의 시간당 처리량과 QC 한 대의 시간당 실효 생산성은 다릅니다.

QC 제약조건

장비 대수 및 동시 배정 보존

$$\Sigma_v x_{(q,v,t)} \le 1; \quad \Sigma_q \mathrm{Active}(q,t) \le 12$$

변수 및 단위

x_(q,v,t) = 시각 t에 QC q가 선박 v를 작업하면 1. 12대는 진해 참조 시험의 QC 상한입니다.

의사결정에 미치는 영향

계획 대안을 평가하기 전에 존재하지 않는 QC 사용과 중복 배정을 찾아냅니다.

모델 적용 경계 | QC 12대 한도는 본 프로젝트의 검수 기준이며 다른 설치 환경까지 일반화하지 않습니다.

QC 시뮬레이션

동일 조건의 네 가지 QC 배정 전략 실험

화물량·선박순서·장비 구성·난수 시드를 통일합니다.

최소 대기

물리적 적합성을 전제로 선박의 작업 시작 지연을 최소화합니다.

최대 처리량

분석 기간 내 전체 이동 횟수를 최대화하도록 QC를 배정합니다.

균형 배정

장비 유휴시간과 야드·AGV 혼잡을 동시에 줄입니다.

복원력 우선

장애·고장 상황에서도 장시간 대기를 제한하고 서비스를 회복합니다.

실제 배포된 전략과 최적화 솔버는 최신 소스코드로 검증해야 합니다.

선석·QC 사례

가상 시나리오: QC 한 대가 사용 불가능해진다면?

대안	운영상 영향	승인 전 확인
기준: QC 6대	6대 기준으로 예상 작업시간 계산	QC 간섭 및 AGV 지원 확인
장애: QC 5대	명목 작업시간 증가	야드·작업조 반응 검증
QC 재배치	다른 선박의 배정 QC 감소	터미널 전체 선박 대기 비교
선석 순서 변경	도착·작업 시간대 변경	선석 실행 가능성 검토

설명용 예시일 뿐, 진해의 실측 시간·생산성 결과가 아닙니다.

03

AGV 및 내부 운송

안벽에서 야드로 가는 경로는 실제 도로 형상, 인계능력, 배차 규칙을 따라야 합니다.

AGV 표준 절차

QC ↔ WSTP 왕복 사이클

모든 운행은 허용된 목적지와 인계 기록을 가져야 합니다.

01	02	03	04	05
작업 준비	**픽업**	**이동**	**인계**	**복귀**
컨테이너 출고 지시와 적합 차량 여부 검증.	QC까지 이동, 대기 및 적재.	연결된 합법 경로 노드를 따라 WSTP로 이동.	인계 장비를 기다린 후 하차·인도.	다음 배차 지점으로 안전하게 이동.

AGV의 QC↔WSTP 동선과 외부 트럭의 Gate↔LSTP 동선은 구별합니다.

AGV 계산식

운송 사이클타임

$$T_{cycle} = T_{empty} + T_{QCwait} + T_{load} + T_{loaded} + T_{WSTPwait} + T_{unload}$$

변수 및 단위

모든 시간의 단위는 분/회. 재배치·회복 시간이 포함되는지 명시합니다.

의사결정에 미치는 영향

QC 대기가 길어지는 원인은 QC 자체보다 차량 부족이나 WSTP 혼잡일 수 있습니다.

모델 적용 경계 | 직선거리가 아니라 그래프의 경로 거리와 관측 속력으로 이동시간을 계산합니다.

AGV 계산식

AGV 선단 수송능력

$$Q_{AGV} \le 60 \times N_{eff} / E[T_{cycle}]$$

변수 및 단위

Q_AGV = 시간당 이송 횟수, N_eff = 가용 차량 수, E[T_cycle] = 평균 사이클타임(분).

의사결정에 미치는 영향

배정된 QC 생산성을 유지하려면 AGV가 몇 대 필요한지 검증합니다.

예시 | AGV 24대, 평균 15분/회 → 명목 상한 96회/시간. / 모델 적용 경계 | 상한 근사치이며 방향 충돌·배차 변동성은 이산사건 시뮬레이션으로 검증합니다.

경로 계산식

허용 경로 중 최단 이동거리

$$d^*(u,v) = \min_{p \in P_{legal}} \sum_{(a,b) \in p} d_{ab}$$

변수 및 단위

P_legal = 일방통행·통행금지·터미널 도로 제한을 준수하는 그래프 경로의 집합.

의사결정에 미치는 영향

차량을 추가하기 전에 실제 이동거리와 통행량이 집중되는 교차점을 찾습니다.

모델 적용 경계 | 미매칭 경로 노드는 오류로 표시해야 하며 임의의 직선으로 연결할 수 없습니다.

교통 계산식

도로 수요/처리능력 비율

$$v/c = q_{vehicles} / q_{sustainable}$$

변수 및 단위

q_vehicles = 시간당 차량 수요, q_sustainable = 교차 충돌을 고려한 지속 가능 통과량.

의사결정에 미치는 영향

병목 지점을 찾아 차량 추가보다 동선 통제가 더 효과적인지 판단합니다.

모델 적용 경계 | 지속 가능한 도로 처리능력은 실제 배치 기준으로 추정하거나 보정해야 합니다.

공간 정합성 검수

CAD 정합성은 필수 엔지니어링 승인 관문입니다

표시된 경로는 등록·승인된 좌표계와 일치해야 합니다.

원본 형상

CAD 원본과 파일 해시를 보존하고 임의로 변경하지 않습니다.

좌표 변환

축척, 회전, 평행이동, 정합 잔차를 문서화합니다.

그래프 커버리지

모든 AGV 운행 경로가 허용 노드와 연결된 간선으로 구성되는지 확인합니다.

충돌 검사

물리적 충돌, 회전반경, 보행자·운영구역 제한을 검토합니다.

현재 로컬 좌표↔CAD 중첩도는 승인·등록 전까지 QA 후보입니다.

AGV 예외 처리

실행 전에 경로 결함을 분류합니다

발견 사항	의미	필요 조치
미매칭 노드	배치도에 대응하는 등록 노드 없음	경로 유효성 보류, 매핑 점검
연결 단절	출발·도착 노드가 그래프로 연결되지 않음	그래프 또는 입력 계약 수정
금지 구간	진행 방향 또는 통행 제한 위반	운행 거부 또는 다른 경로 탐색
비정상 이동	속력·거리·시간의 불일치	좌표·단위·이벤트 시각 대조
교차 혼잡 과다	안전 또는 혼잡 위험 증가	수정된 통행 통제안 실험

이전 Stage의 미매칭 경로 수치는 진단 정보일 뿐, 누락 경로를 임의 보간해도 된다는 뜻이 아닙니다.

04

야드 적치와 재취급

우선 슬롯 실행 가능성을 검증하고, 그다음 접근성·재취급·야드 장비를 평가합니다.

적치 정책

여섯 적치 화물군을 반드시 구분합니다

화물 분리 적치와 운영 제한을 무시한 최적화는 허용하지 않습니다.

일반

표준 컨테이너의 적재·중량·접근 규칙.

공컨

공컨 전용 블록과 최대 적층 높이 규칙.

냉동

전원 가용성, 감시, 플러그 용량.

위험물

규제 분리 적치, 혼재 적합성, 금지구역.

유해물

별도 화물 분류와 검증된 터미널별 제한.

비규격(OOG)

돌출 여유공간, 장비 작업 범위, 특수 장비.

야드 계산식

명목·실효 적치능력

$$C_{eff} = \Sigma_b C_{design,b} \times \eta_{usable,b}$$

변수 및 단위

C_design,b = 블록 b의 설계 슬롯 수, η_usable,b = 제외 사항 반영 후 운영 가용계수.

의사결정에 미치는 영향

기하학상 슬롯 수와 실제 사용 가능·적합·접근 가능한 슬롯 수를 구별합니다.

모델 적용 경계 | 유효 슬롯 마스터에 이미 반영된 계수를 중복 적용하지 않습니다.

야드 계산식

블록 점유율과 국지적 병목

$$U_{b(t)} = N_{occupied,b(t)} / C_{effective,b(t)}$$

변수 및 단위

b = 야드 블록, N_occupied = 가용·적합 슬롯에 적치된 컨테이너 수
.

의사결정에 미치는 영향

전체 야드 평균은 냉동·위험물·일반 블록의 국지적 만차를 숨길 수 있습니다.

모델 적용 경계 | TEU, 컨테이너 대수, 슬롯 위치 수의 분모를 통일하여 비교합니다.

야드 계산식

재취급 이동 비율

$$R_{move} = N_{rehandle_moves} / N_{target_retrievals}$$

변수 및 단위

N_rehandle_moves = 실제 추가 재배치 이동 횟수,
N_target_retrievals = 목표 반출 요청 횟수.

의사결정에 미치는 영향

적치 효율을 평가하되, 재취급된 컨테이너 수를 재취급 총 이동 횟수로 혼동하지 않습니다.

모델 적용 경계 | 출발·도착 슬롯과 이벤트 시각이 추적되는 물리적 이동만 집계합니다.

야드 계산식

예상 장치량: 리틀의 법칙

$$E[N] = \lambda \times E[W]$$

변수 및 단위

λ = 도착률[대/일], E[W] = 평균 장치일수[일], E[N] = 평균 장치 대수.

의사결정에 미치는 영향

기준 야드 수요를 추정하고 체류시간 감소와 시설 확장을 비교합니다.

예시 | 하루 1,200대 × 5일 = 평균 장치량 6,000대. / 모델 적용 경계 | 정상상태 관계식이며 피크 재고와 화물군별 블록은 확률적 시뮬레이션이 필요합니다.

슬롯 적합성

물리적 슬롯 배정 제약조건

$$Eligible(c,s) = Size \wedge Class \wedge Weight \wedge Height \wedge Access \wedge Safety$$

변수 및 단위

c = 컨테이너, s = 슬롯. 모든 조건을 동시에 충족해야 적합으로 판정합니다.

의사결정에 미치는 영향

물리적·운영상 적합한 슬롯만 후보 순위 평가에 참여합니다.

모델 적용 경계 | 슬롯 능력이 미확인이라면 안전하거나 가용하다고 간주하지 않습니다.

재고 정합성

모든 적치 작업에 적용할 상태 불변조건

이벤트 기록과 최종 슬롯 상태를 모두 증명할 수 있어야 합니다.

정확히 한 위치

컨테이너는 한 개의 유효 현재 슬롯 또는 명시적 이송 중 상태에만 존재합니다.

중복 점유 금지

같은 시간대에 두 컨테이너가 같은 슬롯을 점유해서는 안 됩니다.

재취급 연결 체인

각 재취급에 출발·도착·시각·유발 반출·이동 컨테이너 ID를 기록합니다.

마스터 규칙

사용 중지 슬롯과 부적합 화물군은 적합 판정을 통과해서는 안 됩니다.

화물 규칙 충돌과 물리적 비활성·미확인 슬롯을 명확히 구분합니다.

야드 검수

적치 결과의 검수 매트릭스

상태	해석	처리
PRIMARY_SLOT_MATCH	적합한 계획 최종 슬롯 선택	이벤트 추적 후 통과
CARGO_RULE_CONFLICT	화물군 또는 슬롯 규칙 위반	배정 보류
PHYSICAL_DISABLED_OR_UNKNOWN	슬롯 사용 중지·접근 불가·미확인	용량 주장 보류
REHANDLE_EVENT	반출 요구와 연결된 유효 이동	횟수·최종 상태 감사

이 상태 코드는 Stage 분류 논리이며 실제 운영 경로는 별도 검증해야 합니다.

05

외부 트럭 및 게이트 통제

LSTP 배정, 예약 피크, 도로 제약이 육상측 서비스 신뢰도를 결정합니다.

육상 운영 절차

게이트 ↔ LSTP 트럭 처리 흐름

외부 트럭을 AGV 전용 QC/WSTP 동선으로 보내지 않습니다.

01	02	03	04	05
도착	**게이트 처리**	**이동**	**인계**	**출차**
외부 트럭 요청의 시각과 유효성 확인.	운영 중인 차로 선택, 서류 및 예약 확인.	게이트에서 LSTP까지 허용 도로 그래프를 따라 이동.	야드 장비를 기다린 뒤 반출입 작업 완료.	출차 시각·회전시간·예외 기록.

회전시간과 서비스시간을 보정할 때 독립적으로 측정된 트럭 기록을 사용합니다.

대기행렬 계산식

게이트 차로 이용률

$$\rho_{gate} = \lambda / (c \times \mu)$$

변수 및 단위

λ = 트럭 도착률[대/시간], c = 가용 차로 수, μ = 차로별 처리율[대/시간].

의사결정에 미치는 영향

ρ가 1에 가까울 때 차로 한두 개의 장애만으로 대기열이 급증하는 이유를 보여줍니다.

예시 | 시간당 220대, 차로 5개×55대/시간 → ρ=0.80. / 모델 적용 경계 | 동일한 병렬 차로를 가정합니다. 예약·피크·유한용량은 이산사건 시뮬레이션이 필요합니다.

대기행렬 계산식

트럭 대기시간과 회전시간

$$W_{q,i} = t_{service_start,i} - t_{arrival,i}$$

변수 및 단위

$W_{q,i}$ = 트럭 i의 대기시간[분]. 게이트·터미널 회전시간은 합의된 모든 체류 구간을 포함합니다.

의사결정에 미치는 영향

게이트 앞 대기, 문서 처리, 내부 이동, LSTP 작업시간을 구분합니다.

모델 적용 경계 | 모든 트럭 기록에 동일한 시간 기준과 부호 규칙을 적용합니다.

대기행렬 계산식

백분위 서비스 수준

$$SLA_{95} = percentile_{95}(T_{turnaround,i})$$

변수 및 단위

T_turnaround = 게이트 입차→출차 또는 사전 합의한 터미널 처리 구간[분].

의사결정에 미치는 영향

평균 회전시간뿐 아니라 장시간 지연되는 상위 꼬리구간을 관리합니다.

모델 적용 경계 | 표본 수, 분석 시간대, 트럭 구성, 백분위 산출법을 명시합니다.

게이트 예외

육상 경로·처리 실패 통제

오류 유형	발견 방법	필요 조치
LSTP 매핑 누락	요청에 맞는 유효 인계지점 없음	처리 보류
게이트 유형 불일치	트럭이 부적합 경로로 진입	거부 또는 경로 재지정
피크 포화	대기열이 합의 한계를 초과	예약·인력배치 대안 시뮬레이션
회전시간 불명	입차 또는 출차 시각 누락	검증된 SLA에서 제외

실제 운영 지연과 데이터 누락을 구별하고, 기록 누락 차량을 KPI 분모에서 숨기지 않습니다.

06

통합 시나리오 실험

동일 수요, 동일 제약, 투명한 목적함수, 비교 가능한 불확실성.

실험 설계

각 시나리오는 정의된 변수만 변경합니다

비교 가능한 기준 시나리오 없이는 개선이라고 주장할 수 없습니다.

기준 시나리오

확인된 선박 작업량·배치·장비 가용성·배차 규칙을 재현합니다.

선석·QC

선석 순서, 허용 시작시간, QC 수 또는 우선순위 변경.

AGV

배차 우선순위, 합법 경로, 가용 차량 수 변경.

야드

적합 적치 규칙, 접근 순서, 점유 블록 변경.

게이트

예약 도착 분포 또는 차로 운영인력 변경.

복원력

동일 조건에서 지연·장비 고장·수요 집중을 가정합니다.

시나리오 비교

같은 난수 조건의 시나리오 차이

$$\Delta KPI_r = KPI_{option,r} - KPI_{baseline,r}$$

변수 및 단위

r = 동일 초기 상태와 공통 난수를 사용한 대응 반복실험 번호.

의사결정에 미치는 영향

확률적 도착 편차의 잡음을 줄이면서 특정 운영 결정의 효과를 추정합니다.

모델 적용 경계 | 지표마다 Δ의 방향을 정의합니다. 대기시간 감소, 처리량 증가는 통상 유리합니다.

모델 검증

관측 실적 대비 평균 절대오차

$$MAE = (1/n)\ \Sigma_i\ |y_{sim,i} - y_{obs,i}|$$

변수 및 단위

n = 대응되는 관측 건수, y = 시간대와 단위가 동일한 KPI 값.

의사결정에 미치는 영향

권고 전에 과거 재현으로 대기·회전시간·물량·장비 가동을 보정합니다.

모델 적용 경계 | MAE 하나만으로 인과적 타당성이나 이벤트 순서의 정확성을 입증할 수 없습니다.

불확실성

평균 KPI의 신뢰구간

$$CI_{95} \approx \bar{x} \pm t_{(0.975,R-1)} \times s/\sqrt{R}$$

변수 및 단위

R = 독립 반복실험 수, s = 반복실험 결과의 표준편차.

의사결정에 미치는 영향

실제 시나리오 효과와 무작위 시뮬레이션 변동을 구분합니다.

모델 적용 경계 | 작은 표본과 비대칭 긴 꼬리 분포에는 강건한 구간추정법이 필요합니다.

위험 통제

제약조건 위반율

$$P_{violation} = N_{failed_replications} / R$$

변수 및 단위

실패 반복실험 = 부적합 슬롯이나 서비스 SLA 위반 등 명확히 정의된 위반 사건이 발생한 실행.

의사결정에 미치는 영향

물리적으로 가능한 대안만 평가하고 피크 상황의 서비스 신뢰도를 보고합니다.

모델 적용 경계 | 물리적으로 불가능한 대안은 작은 벌점으로 처리하지 말고 즉시 거부해야 합니다.

운영 사례(설명용)

선박이 6시간 지연되면 무엇이 먼저 변할까?

시연용 사례이며 진해 실측 결과가 아닙니다.

01 도착

A 선박이 6시간 지연, B·C 선박은 예정 도착시각 유지.

02 선석 계획

선석 점유시간, 적합한 대체 선석, 후속 충돌을 계산합니다.

03 QC 선단

가용 교대조 범위에서 승인된 QC01~QC12만 재배정합니다.

04 차량·야드

AGV의 WSTP 대기, 적합 슬롯 수요, 재취급 연쇄를 재계산합니다.

05 게이트

야드 반출과 외부 트럭의 LSTP 대기 변화 추적.

06 의사결정

선박 지연, QC 작업시간, 야드 충돌, 전체 서비스 신뢰도를 비교합니다.

모든 대안에 대해 이벤트 로그, 재현성, 실행 가능성 근거를 확보합니다.

KPI 대시보드

경영진 권장 지표표

지표	정의	해석
선석 이용률	점유 선석시간 / 가용 선석시간	선박 도착·대기 맥락 필요
QC 가동률	QC 생산시간 / 정의된 가용시간	유휴와 대기를 구별
평균 선박 대기	유효 선석 시작시각−도착시각의 평균	95백분위도 제시
야드 점유율	적합 슬롯 점유 수 / 실효 슬롯 수	화물군·블록별로 분리
게이트 처리량	시간당 완료된 트럭 처리 건수	처리 종료 기준 통일
AGV 사이클	운행당 이동+대기+처리 시간	합법 경로 그래프 사용

미검증 애니메이션이나 단일 평균 비율로 터미널 성능을 단정하지 않습니다.

07

교대조 운영 지침서

일상 계획·모니터링·예외 대응·승인을 위한 반복 가능한 관제실 절차.

일일 통제

오전 교대조 시작 전

운영자에게 또 다른 대시보드가 아니라 실행 가능한 점검표를 제공합니다.

01	02	03	04	05
입력 동결	**정합성 대조**	**유효성 검증**	**실행**	**검토·승인**
선박 기항·이동 횟수·야드 재고·장비 가용성 스냅샷 생성.	Shipment 중복, 이벤트 키·시각, 슬롯 용량 확인.	CAD 그래프, QC 대수, 화물군 규칙, 게이트 서비스 일정을 확인.	버전 관리된 설정으로 기준선과 대안을 실행.	담당자가 의사결정을 승인하고 예외 내역을 보관.

모든 실행에는 시나리오 ID, 데이터 해시, 소프트웨어 버전, 난수 시드, 검토자 정보를 남깁니다.

경보 정책

운영 경보는 원인을 설명할 수 있어야 합니다

경보는 조치 가능한 발견사항이며 원인과 담당자가 명확해야 합니다.

즉시 보류

물리적 불가능, 슬롯 중복 점유, 불법 경로, 중요 형상 누락, QC 대수 초과.

데이터 품질 경고

추정 단가, 불완전한 트럭 기록, 미확인 화물군, 불확실한 시각.

성능 경고

선박 대기 증가, QC 작업 공백, AGV 혼잡, 야드 포화, 게이트 P95 악화.

운영 승인

운영 검토자가 배차 전 적용 범위·예외·서비스 위험의 상충관계를 확인합니다.

누락값은 0이 아닙니다. 미확인 경로는 직선이 아닙니다. 추정 KPI는 실측 성과가 아닙니다.

표준 운영 절차

업무별 책임과 보존해야 할 증빙

담당 역할	일일 책임	기록 증빙
선석 계획자	선박·선석 시간대 승인	선석 계획·충돌 내역
QC 배정자	크레인·교대조 배정 실행	가용 QC 대수·이동 횟수
야드 관리자	구역·슬롯 계획 수락	슬롯 적합성·이벤트 체인
AGV 관리자	허용 경로·배차 유효성 검증	경로 그래프·차량 사이클
게이트 관리자	차로·트럭 흐름 규칙 설정	회전시간·대기열 기록
모델 검토자	KPI·정합도·가정 검토	시나리오 보고·승인 기록

실제 역할별 접근·승인 권한은 터미널 운영자가 정의해야 합니다.

예외 대응

5단계 이상상황 처리 절차

제약조건 위반을 평균 KPI 속에 숨기지 않습니다.

01	02	03	04	05
탐지	**분류**	**격리**	**수정**	**재실행**
부적합 상태·건수·이벤트·출처를 식별.	안전·물리적 보류와 데이터 누락·지표 경고를 구분.	원본을 보존하고 실행 불가능한 후보의 순위 평가 중단.	권한을 받은 담당자가 분리된 Stage에서 원본·마스터·규칙을 통제된 방식으로 수정.	같은 시나리오를 다시 실행해 정합성 회복을 기록.

검수 통과 전에는 운영 코드·마스터 데이터·공개 시연을 변경하지 않습니다.

검수 기준

진해 파일럿의 엔지니어링 검수 관문 예시

검수 항목	검증 근거	통과/보류 기준
QC 장비 상한	QC 식별자가 설정 대수 이내	참조 사례 QC12 초과 시 보류
AGV 경로 검증	모든 경로 노드가 승인 그래프와 일치	미매칭·금지 경로 시 보류
야드 안전	컨테이너·슬롯 화물군 오류 없음	충돌 후보 보류
슬롯 재고	이동 이벤트와 최종 슬롯 상태가 일치	설명 불가 차이 보류
게이트·LSTP 계약	모든 트럭 거래가 정확히 연결	참조 누락 시 보류
재현성	동일 시나리오의 KPI가 규칙 범위 안에서 재현	차이 원인 조사

이 기준들은 제안된 검증 관문이며 현재 플랫폼의 전체 통과 인증을 뜻하지 않습니다.

데이터 입력

신뢰할 수 있는 도입을 위한 최소 데이터

파일럿은 영업 약속이 아니라 데이터 소유권 확인에서 시작합니다.

선박

ETA/ATA, 선석 시간대, 전장·흘수, 화물 이동, 작업조, 완료 기록.

장비

QC·AGV·야드 장비 마스터, 일정, 고장, 속력, 생산성 로그.

야드

블록·베이·열·단, 용량, 화물군, 적부·이동 이력.

도로·게이트

CAD 배치, 노드, 경로 허가, 트럭 예약, 차로·시각 기록.

데이터 출처 통제

단위 체계, 파일 해시, 개인정보 승인, 추정 표시, 데이터 담당자.

운영 목표

선박 대기 SLA, 회전시간, 혼잡, 안전 및 승인 기준.

08

엔지니어링 검증 및 교육 사례

어떤 버튼을 눌렀는지가 아니라 관리자가 운영 원리를 설명할 수 있는지를 평가합니다.

모델 신뢰성

과거 운항·운영 실적에 의한 모델 검증

코드 검증과 실제 운영실적에 대한 타당성 검증을 구분합니다.

01	02	03	04	05
규칙 검증	**과거 재현**	**실적 대조**	**모델 보정**	**미사용 자료 검증**
물량 보존, 실행 가능성, 이벤트 선후관계의 불변조건 확인.	정해진 과거 선박·게이트 기간을 재구성.	동일 KPI 정의로 오차 계산.	편향 원인을 분석하고 문서화된 가정만 변경.	의사결정 근거 제시 전 미학습 이벤트에 대한 검증.

허용 오차는 항만 운영자와 합의해야 하며 검증되지 않은 정확도를 주장하지 않습니다.

실습 과제

압박 상황에서 세 가지 운영 결정 실습

상황	교육생 조치	평가 사항
QC 고장	QC 12대 한도 내에서 재배정	자원 실행 가능성
야드 블록 포화	적합한 대체 슬롯 탐색	안전·접근성
트럭 피크 집중	예약·차로 운영 대안 비교	긴 대기시간·거래 정합성
AGV 경로 단절	보류 및 원인 보고	물리 경로 정합성
선박 지연	기존·수정 선석 순서 비교	전체 KPI 상충관계

토의 질문: 어느 개입이 일부 수치가 아니라 터미널 전체 성능을 개선합니까?

시연 원칙

항만당국을 위한 시스템 설명 순서

시연은 작동 원리와 증거를 함께 보여주어야 합니다.

물리적 환경 제시

먼저 선석·야드 형상, 차량, 화면에 표시된 이동의 데이터 출처를 설명합니다.

하나의 운영 결정 변경

QC 대수, 선석 순서, 배차 또는 야드 규칙 중 한 가지만 바꿉니다.

인과적 반응 표시

동일 조건에서 대기열·이동·점유율·완료시간을 재생합니다.

의사결정 기록 제시

KPI 비교, 물리적 제약, 가정, 불확실성, 검토 상태를 보고합니다.

부드러운 GIF는 홍보에 유용하지만 실제 실행 가능한 시뮬레이션 증거를 대신하지 못합니다.

고객 시연

운영자 중심의 30분 실시간 시연

검증 완료된 모듈을 선택하고 사전 실행 리플레이를 대안으로 준비합니다.

01	02	03	04	05
0~5분	**5~11분**	**11~19분**	**19~25분**	**25~30분**
업무 과제와 진해 참조 배치도 소개.	선박 → QC → AGV → 야드 → 게이트 통합 모델.	QC·선석 시나리오를 바꾸고 이벤트와 KPI 비교.	계산식, 제약, 충돌, 감사 추적 표시.	파일럿 데이터 범위, 성공 기준, 담당자 합의.

현재 화면이 실시간 실행인지, 과거 재생인지, 설명용 결과인지 반드시 밝힙니다.

컨설팅 참여

터미널당국이 발주할 수 있는 파일럿 성과물

검증 가능한 한정된 과업이 막연한 생산성 보장보다 신뢰를 줍니다.

디지털 참조 모델

CAD·장비 그래프, 선박·컨테이너·차량 개체와 출처 연결 명세.

재현 가능한 기준선

과거 이벤트 재현, 보정 요약, 미확보 출처 목록.

시나리오 실험 패키지

동일 작업량·난수 조건에서 선석·QC·AGV·야드·게이트 대안을 비교.

운영 의사결정 보고서

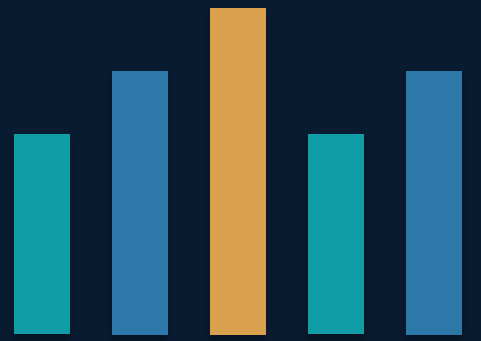
KPI 정의, 불확실성 구간, 제약, 권고안의 상충관계, 검토자 승인.

계약 및 최종 운영 전환은 고객 데이터 접근, 기술 검증, 검수에 따릅니다.

META PORT / 전문 운영 교재 시리즈

계획을 바꾸기 전에 / 실제 터미널을 검증하십시오

신뢰할 수 있는 디지털 트윈은 물리적 제약, 이벤트 인과관계, 설명 가능한 운영 의사결정을 결합합니다.



META PORT / 진해신항 컨테이너터미널 | 티투엘(주) / LOGI AI 연구소