RESEARCH / EXECUTIVE BRIEFING

BUNKERING DEMAND INTELLIGENCE

전국 항만 잠재 수요에서 저장탱크·급유선 투자까지

2023–2025 전국 외항+내항(540,741건) 통합 관측 · 2026 울산항 실증 보정 · 3-Stage 디지털 트윈

38 SLIDES / 28-PAGE CORE REPORT + 10-SLIDE DIGITAL TWIN MASTER EXTENSION

META Integrated AI Platform • Research & Executive Education

경영진이 알아야 할 세 가지 질문

입항 숫자는 출발점이고, 투자 판단은 수요·저장·서비스 능력을 함께 보아야 합니다.

01

어디에 수요가 있나?

항만별 입항·급유 가능성

→

02

누가 급유 고객인가?

선종·GT·항행 특성

→

03

시설은 얼마나 필요한가?

수요 → 탱크 → 선대·CAPEX

핵심 원칙 관측 입항 · 모델 예상 급유 · 실제 판매량은 서로 다른 데이터입니다.

급유 목적 입항만 세면 시장을 놓칩니다

화물 작업이나 경유 중에도 급유할 수 있으므로 모든 입항을 모집단으로 봅니다.

현실

화물 양적하·수리·경유를 위해 입항한 선박도 급유 고객이 될 수 있습니다.

관측 자료

항만·일자·선종·GT·신고 목적은 기록하지만 실제 판매량을 직접 보여주지 않습니다.

분석 목표

선박별 거래 실적이 없을 때 시장 기회를 비교할 확률 기반 기준선을 제공합니다.

구분	급유 목적 입항 건수 ≠ 실제 급유 완료 건수

실제 관측한 것은 무엇입니까?

전국 31개 관할 항만의 전체 선박 입항(외항선 + 내항선 통합) 관측 기록과 모델 가정을 명확히 분리합니다.

540,741건

3개년 외항(21.8만)+내항(32.3만) 입항

31개

항만청 · 관할 코드

21개

입항 · 내외항 · 선종 필드

OBSERVED · 관측

항만 · 날짜 · 선종 · GT · 운항구분(외항선+내항선) · 입항목적

ASSUMED · 모델 가정

선종·내외항별 급유확률 · 1회 공급량 · 시나리오 가중치

원칙 전국 모든 항만에서 외항선과 내항선 전체 입항 모집단을 통합 적용하되, 관측값과 추정값은 엄격히 분리합니다.

3년간 전국 외항+내항 관측 입항 540,741건

외항선(217,578건)과 내항선(323,163건)을 모두 포함하며, 기항 1건이 곧 급유 1건은 아닙니다.



읽는 법 2025년 기준 외항 70,867건 + 내항 107,406건 · 항내 예부선·급유선은 별도 저확률 보조계정 분리

연구는 여섯 단계로 진행했습니다

원본은 보존하고 모델 가정은 별도 계산 계층에서 적용합니다.

01

입항 수집

02

정제·검증

03

선박군 분류

04

급유확률 설정

05

기대 수요 산출

06

시나리오 제공

MODEL FLOW SOURCE → CLASSIFICATION → PROBABILITY → EXPECTED MT → LOW / BASE / HIGH

숫자마다 신뢰 등급을 붙입니다

관측·기댓값·모델 시나리오·외부 참고값을 별도 관리합니다.

종류	설명	등급
입항 기록	공공 원본 관측	FACT
예상 급유 횟수	입항별 확률의 합	ESTIMATE
잠재 공급 수요	확률 × 회당 가정 수량	SCENARIO
외부 에너지통계	규모·집계범위 참고	REFERENCE

사용 규칙 추정치에 ACTUAL 또는 OFFICIAL의 명칭을 붙이지 않습니다.

핵심 계산 원리는 의외로 간단합니다

급유할 가능성과 급유할 때 넣는 양을 곱합니다.

예상 수요(MT) = Σ [입항건수 × 급유확률 × 회당 공급량]

Σ는 각 선종·항만군을 따로 계산한 뒤 모두 더한다는 뜻입니다.

100건

입항

40%

급유확률

500 MT

회당 공급량

NUMERIC CHECK 100건 × 40% × 500 MT = 20,000 MT

급유확률은 모델 가정에서 출발합니다

기존 분석의 목적별 규칙은 실측 정답이 아닌 연구용 가정입니다.

A · 급유 목적 신고

연구용 고정확률 100%
2025년 5개 항만군 6,251건
※ 실제 급유 완료를 뜻하지 않음

B · 기타 입항 목적

기준확률 × 항만효과 × 선종효과 × GT효과 × 입항목적 효과
실제 거래 라벨을 학습한 모델은 아님

한계 급유목적 100% 가정은 검증된 예측 정확도가 아닙니다.

왜 선종·총톤수(GT)를 나누어 계산합니까?

선박의 규모와 운항 목적에 따라 급유 가능성과 공급량이 달라집니다.

항만

부산·울산·여수/광양 등 입항 구조

선종

컨테이너·벌크·탱커 등 소비 성향

GT

선박 크기의 보조 지표

입항목적

급유·화물·수리·경유 등

주의 GT만으로 엔진출력·탱크용량·실제 급유량을 확정할 수 없습니다.

선박이 쓰는 연료와 항만에서 사는 연료는 다릅니다

소비량·필요 급유량·항만 시장수요는 각각 다른 단계의 값입니다.

01

기관 연료 소비

MT / day 또는 MT / voyage

→

02

1회 급유 필요량

필요량 - 현재 ROB

→

03

항만 잠재 수요

입항 × 선택확률 × 회당량

경계 원본 연구는 ③ 잠재 수요에 집중합니다. ①·② 물리엔진 구현은 별도 검증 대상입니다.

연료소모·잔량을 계산하는 물리적 검산 틀

아래는 일반적인 공학식이며 실제 제품 코드 구현 여부는 별도 검증합니다.

일일 연료소비(MT) = 출력(kW) × 부하율 × SFOC × 24 ÷ 1,000,000

SFOC 단위는 g/kWh입니다. 주기관·보조기관·보일러를 각각 계산해 합산합니다.

항차 소모량

해상 일일소모 × 항해일수 + 정박/대기 소모

필요 급유량

max(0, 다음 구간 수요 + 안전재고 - ROB)

해석 거리·속력·엔진출력·ROB 미확보 시 시나리오 추정으로 표시합니다.

1회 평균 급유량은 실적입니까, 가정입니까?

실제 소비량 계산기와 항만 기준량에서 역산한 값은 구분해야 합니다.

보고서 내용 내용

기대 공급량 = 급유확률 × 회당 공급량
부산 통합 평균 약 444 MT/회 (외항 ~602 MT · 내항 연안선 ~68–145 MT 결합)

코드 확인이 필요한 사항

선종×GT별 회당량 테이블·산식
SFOC·ROB·선박 제원 입력 여부
LOW/BASE/HIGH 수량 가정의 출처

검증 Stage 1–3 디지털 트윈에서 선종×국적별 보정 모수와 다종연료 물성·대기행렬 엔진으로 확장 구현됩니다.

LOW / BASE / HIGH는 정답 세 개가 아닙니다

가정을 바꿔 수요 변화 범위를 보는 민감도 실험입니다.

LOW

보수적 수요

BASE

기준 시나리오

HIGH

확대 가능성

엄밀성 LOW/HIGH는 통계적 95% 신뢰구간이 아니라 가정의 민감도입니다.

2025년 전국 외항+내항 통합 잠재 수요 규모

전국 31개 관할 항만의 외항선+내항선 전체 관측 입항에 선종·내외항 사전모수를 적용한 값입니다.

178,273건

전체 관측 입항 (외항+내항)

약 48,760건

통합 예상 급유횟수

약 1,485만 MT

통합 잠재 공급량 (BASE)

외항 70,867건(1,290만 MT) + 내항 107,406건(195만 MT) 통합 · 전체 평균 급유율 27.4% · 회당 304.5 MT

해석 수치는 실제 벙커 판매량이 아닌 모델 가정에 따른 잠재 수요입니다.

2025년 항만군별 외항+내항 통합 잠재 수요

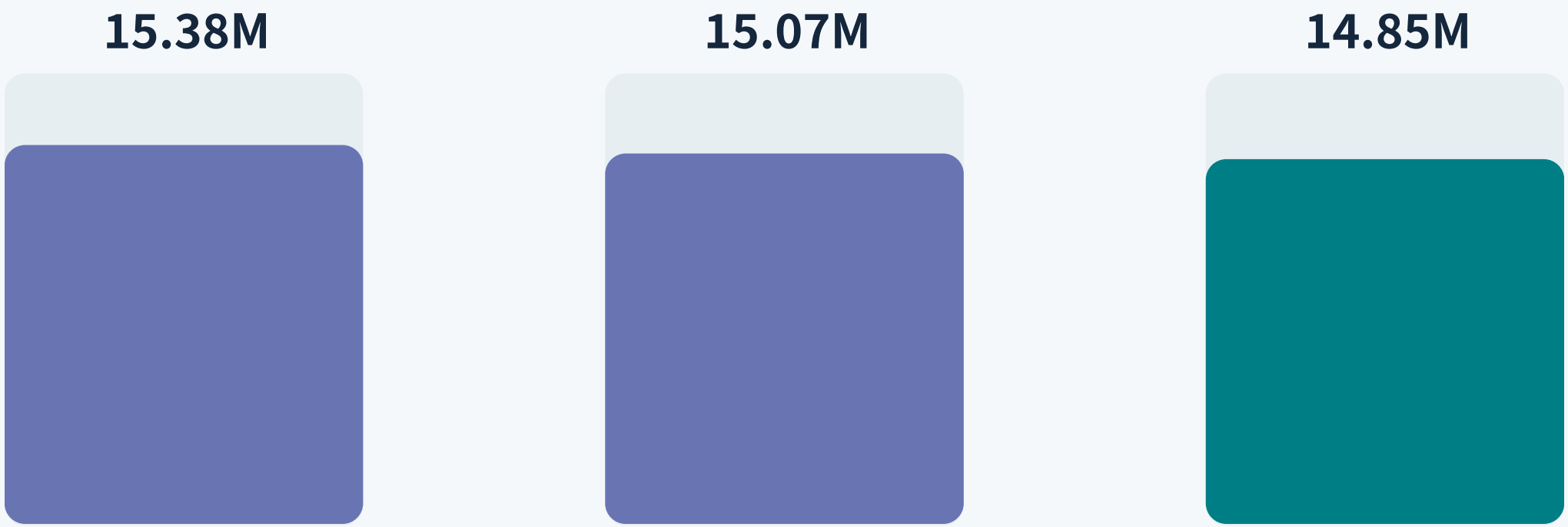
내항 탱커·연안화물선 급유 수요까지 반영한 5대 항만군 BASE 시나리오입니다 (총 14.85M MT).



원칙 내항선 통합으로 대산(0.18M)·제주(0.17M)·마산(0.13M) 등 연안 거점항 수요가 현실화되었습니다.

3년간 전국 외항+내항 통합 잠재 수요 추이

입항 감소와 모델상 기준수요 변화를 함께 읽습니다.



통합 입항 183,116

통합 입항 179,352

통합 입항 178,273

주의 2023~2025 모델 수요량 추이를 실제 매출 추세로 사용하지 않습니다.

부산항 사례로 본 외항+내항 통합 산출 구조

2025년 부산항 전체 입항 45,132척(외항 22,435 + 내항 22,702)에서 통합 급유수요를 도출합니다.

입항 구조

외항선 22,435척 → 기대 급유 12,700건
내항선 22,702척 → 기대 급유 5,380건
= 통합 급유호출 약 18,080건

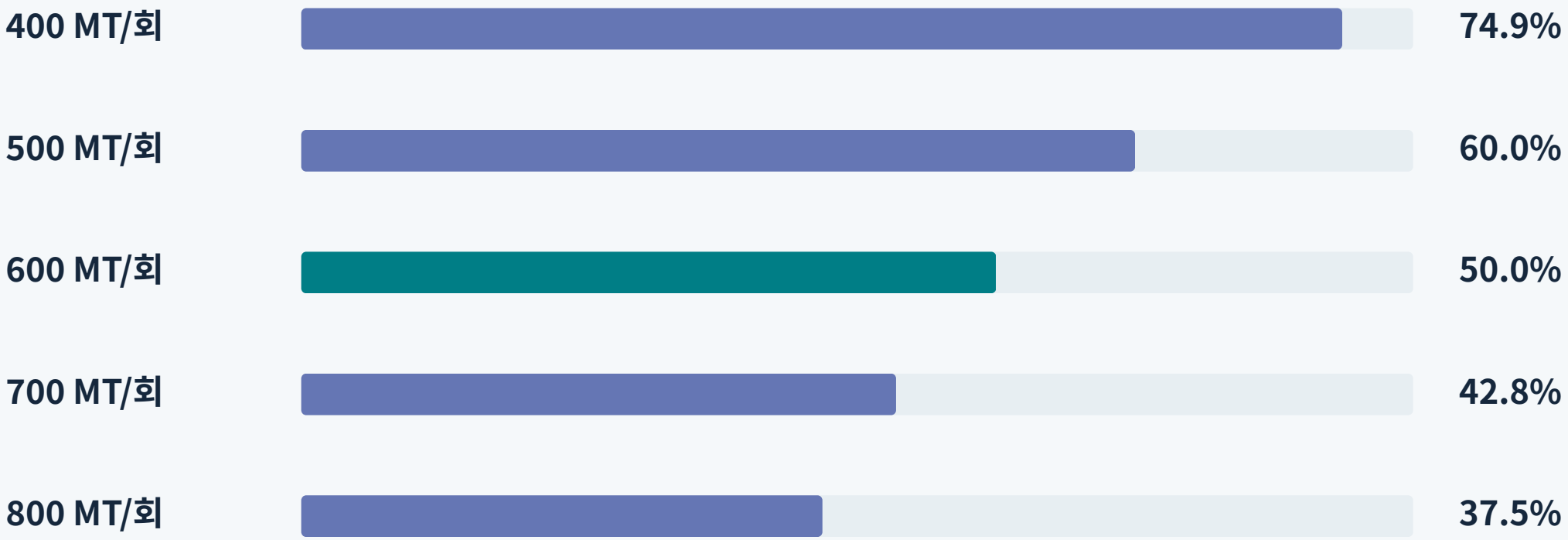
수요 기준량 가정

외항 수요 7,650,000 MT + 내항 371,349 MT
= 통합 기준량 8,021,349 MT
(통합 평균 약 443.7 MT/회)

핵심 항내 예선·부선은 저확률 분리 처리하고 내항 상선(석유제품·컨테이너·일반화물) 수요를 정밀 합산했습니다.

부산 가정 공급량을 바꾸면 필요한 확률도 달라집니다

총 765만 MT를 고정할 때 기타 목적 선박의 급유확률 민감도.



가정 급유 목적 입항 분량은 별도 고정한 시나리오입니다.

외부 통계는 규모 확인용으로 활용합니다

집계 대상과 유종이 다르면 직접 검증 자료가 아닙니다.

KESIS 잠정 통계

2025 국제해운 중유
59,911천 배럴
약 893만 MT 환산(0.149 MT/bbl 가정)

당사 BASE 모델

외항+내항 통합 잠재 수요
약 1,485만 MT (외항 1,290만+내항 195만)
내항 연안해운 경유·중유 수요 포괄

주의 공식 중유 통계와 전체 잠재 벙커링 수요는 동일 집계 범위가 아닙니다.

모형의 한계를 숨기지 않습니다

계산의 정교함과 실제 거래 검증은 별개입니다.

실제 공급기록 부족

BDN·거래별 최종 인도량 미연계

입항 ≠ 급유

입항목적 신고는 판매 완료 증빙 아님

모수의 불확실성

GT·선종 가중치 실측 학습 미완

회당량의 한계

선박 ROB·실제 탱크 한도 미확보

순환 검증 위험

사전 기준량 재현은 외부 검증 아님

범위 변화

연도·항만·연료종류 변화 주의

연구 윤리 검증된 예측 정확도·통계적 신뢰구간으로 오해할 수 있는 표기를 금지합니다.

사용을 권장하는 영역과 금지할 해석

실적 보고서의 대체재가 아니라 의사결정 지원 도구입니다.

권장 활용

항만별 잠재 시장 비교
선종·GT별 타깃 그룹
영업 지역 및 공급망 계획
확률·수량 민감도 실험

금지할 해석

실제 벙커 판매량 확정
선박별 급유 사실의 단정
매출·시장점유율의 실적 대용
검증된 예측 정확도 주장

대시보드는 이렇게 읽으시면 됩니다

연도·항만·선종·GT 선택에 따라 모수와 시나리오가 바뀝니다.

01

필터 선택

연도·항만·선종·GT

→

02

OBSERVED / MODEL

관측 입항과 추정 호출 분리

→

03

시나리오 비교

LOW·BASE·HIGH를 비교

45,132

부산 통합입항(외+내)

18,080

통합 급유호출

802만

통합 기준 MT

핵심 결론 결론

관측 자료와 확률 가정을 결합하여 시장 우선순위를 설명합니다.

- 2023~2025 전국 외항+내항 540,741건 및 2026 울산 실증(7,295척)을 단일 체계로 분석했습니다.
- 2025년 전국 통합 잠재 수요는 BASE 약 1,485만 MT(외항 1,290만 + 내항 195만 MT)입니다.
- 관측 입항수와 모델상 급유횟수·수요량을 구분합니다.
- 새로운 실증 자료로 보정하더라도 가정과 데이터 이력을 보존합니다.

한 문장	Bunkering Demand Intelligence = 관측 데이터 + 확률 가정 + 투명한 시나리오

출처·재현성을 남깁니다

관측자료, 가정 워크북, 외부 통계의 역할을 구분합니다.

내부 연구 산출물

STEP384E · 2023~2025 내·외항 통합원장(540,741건)
STEP365/399 · 외항 기준선 및 내항 전이 결합
STEP385E/F · 2026 울산항 공식 실적 이중차원 보정
STEP401 · 전국 31개 관할 통합 랭킹·민감도

외부 자료 및 용어

KESIS 「에너지통계월보」 2026.06
GT: 선박 총톤수 지표
MT: 중량 톤
BDN: 실제 급유 인도 증빙

출처 KESIS 표 5.4.7 · 지표·통화·유종·연도의 범위를 확인해야 합니다.

울산항 2026 보정 기준선

기존 사전 시나리오 체계 위에 2026년 울산항 전체 입항(외항선+내항선, 7,295척) 공식 실적을 결합해 보정을 완료했습니다.

7,295척
전체 입항(외항+내항)

2,912건
급유건수

958,087 MT
공급량

39.92%
급유율

내·외항 및 국적별 급유 성향 (전체 통합)

내항·국적권 36.04% (1,906척) · 외항·외적권 41.29% (5,389척)

분류 경계

분류 2,727건 + 미분류 185건 = 2,912건
미분류 공급량 중복 계상 금지

출처경계 2023~2025 전국 prior 시나리오와 2026 울산 보정 수치는 다른 증거 계층입니다.

울산 2026 선종별 급유·공급 구조

8대 그룹 합계와 미분류 185건을 구분하는 보정표.

선종	입항 추정(척)	급유(건)	급유율	공급(MT)
원유탱커	337.8	94	27.82%	61,415
석유제품선	2,973.9	975	32.79%	295,647
케미컬선	1,122.1	679	60.51%	143,944
LPG선	402.7	192	47.68%	73,231
일반화물선	670.9	515	76.76%	258,491
벌크선	337.2	232	68.80%	111,867
기타선	706.6	40	5.66%	13,492
미분류 검토군	743.8	185	24.87%	총량 내 포함
총계	7,295	2,912	39.92%	958,087

대사 공급량 958,087 MT에 미분류 185건을 다시 더하지 않습니다.

데이터와 대시보드를 함께 검증합니다

연구 보고서의 CSV·대시보드 표시가 같은 기준의 수치를 보여야 합니다.

대시보드 확인

2026 울산 연도 전환
입항 7,295 / 급유 2,912
공급 958,087 MT / 평균 329.0 MT
국적별 급유율 별도 비교

검증할 연구 데이터

Master reconciliation
Vessel-type calibration
Nationality / operation projection
Annual ranking & sensitivity CSV

운영 통제 포털 통합 인증(SSO) 연동 대시보드에서 2023–2026 시계열 비교 및 3단계 인프라 디지털 트윈으로 직결됩니다.

전국 31개 항만 '외항선+내항선' 전면 통합 수리 체계 및 실증 보정

울산항뿐 아니라 부산·여수광양·인천·평택·대산 등 전국 모든 항만의 수요·시설 시뮬레이터를 외항+내항 통합 모집단으로 일원화했습니다.

UNIFIED FULL-PORT DEMAND EQUATION (외항선 + 내항선 통합 지배 방정식)

$$D^{Total}_p = \eta_p \cdot \Sigma_{v=1..8} \Sigma_{g \in \{FOREIGN, DOMESTIC\}} [N_{p,v,g} \times P^{o}_{p,v,g} \times S^{o}_{p,v}]$$

• p: 대상 무역항 • v: 8대 표준 선종 • g: 운항·국적 권역(외항·외적권 FOREIGN / 내항·국적권 DOMESTIC 통합) • η_p: 실증 보정 계수

01 · 전국 30개 무역항 — 외항+내항 통합 사전모수 (Prior Mode)

• 모집단 전면 확장: 2023–2025 전국 외항(217,578건) + 내항(323,163건) = 총 540,741건 반영
• 2025 주요항 통합 결과: 부산 45,132척(802만 MT) · 여수광양권 32,497척(296만 MT) · 인천평택 24,792척(118만 MT)
• 작업선 왜곡 차단: 항내 예선·부선·급유선은 울산항과 동일하게 저확률 별도 보조계정으로 분리
• 내항 상선 전이모수: 울산 실증 내항/외항 성향비(0.873) 및 연안 GT 체급별 회당 공급량(68~245 MT) 적용
• Stage 1–3 직결: 전 항만 DO 경유탱크·트럭출하대·바지선 산정 시 내항선 급유물량 자동 포함

02 · 2026 울산항 — 외항+내항 사후 실증 보정 (Calibrated Mode)

• 동일 수리 엔진: 타 항만과 100% 동일한 외항+내항 통합 방정식 위에 공식 BDN 확정치 영점 조준
• 상선·보정 기준선: 외항·외적권 5,389척(73.9%) + 내항·국적권 1,906척(26.1%) = 7,295척 대사
• 성향 격차 검증: 내항·국적권 급유율 36.04% vs 외항·외적권 41.29% (+5.25%p 실증 확인)
• 무오차 정합성: 총 2,912건 급유(상선 2,727 + 별도군 185) · 958,087 MT 공식 실적 100% 일치
• 순차 진화 표준: 향후 부산·여수광양 등도 공식 BDN 확보 시 η_p 보정만으로 즉시 정밀화 완료

모집단 일원화 전 항만 동일하게 [외항선 + 내항선 통합 모집단(540,741건)]으로 수요·탱크·선대를 산출하며, 공식 실적 확보 시 사후 보정(η_p)만 갱신됩니다.

수요 예측에서 인프라 CAPEX까지: 3단계 연속 의사결정 파이프라인

"기름이 얼마나 팔릴까?"라는 시장 질문을 "탱크 몇 기, 급유선 몇 척, 투자비 얼마인가?"라는 공학적 해답으로 자동 변환합니다.

STAGE 01 · 시장·경제학 계층
항만 급유 수요 및 탄력성 트윈

- 입력 변수:
  - 선종×국적별 입항 척수 ($N_{p,v}$)
  - 싱가포르 대비 유가 스프레드 (ΔP)
  - 외적선 비중 및 항만 인센티브 (ρ)
- 핵심 연산:
  - 조건부 급유확률 탄력성 반응 함수
  - 몬테카를로 확률 게이트 분기
- Stage 2 인계 산출물:
  - ➜ 연간 기준 수요량 D_p (MT/yr)
  - ➜ 연간 급유 호출 건수 C_p (Calls/yr)

STAGE 02 · 열역학·저장공학 계층
다종연료 체적 팽창 및 탱크 트윈

- 입력 변수:
  - 4대 유종 에너지 분담률 (FO·DO·LNG·MeOH)
  - 안전 비축일수 (τ_{buf} = 10~14일)
  - 피크 계수(1.25) · 안전 충전율(85%)
- 핵심 연산:
  - 등가 추진열량 보존 질량·체적 변환
  - 유종별 완전 분리 모듈 탱크 올림 산정
- Stage 3 인계 산출물:
  - ➜ 유종별 실공급 중량 M_f 및 체적 V_f
  - ➜ 전용 표준탱크 기수 K^*_f (Units)

STAGE 03 · 대기행렬·재무투자 계층
Erlang-C 선대 최적화 및 CAPEX 트윈

- 입력 변수:
  - 연간 기상 작업가능일수 (D_{op} = 320일)
  - 유종별 1회 급유 점유시간 (4.2h~12.5h)
  - 목표 최대 선박 대기확률 (SLA ≤ 5%)
- 핵심 연산:
  - M/M/c Erlang-C 대기확률 변곡점 탐색
  - 온산·여수 메탄올 개조 할인(θ=0.45)
- 최종 경영진 의사결정 산출물:
  - ➜ 최적 바지선·LNGBV 척수 c^*_f
  - ➜ 항만 권역별 입지 및 총 투자비 ($M)

END-TO-END STATE TRANSITION MAPPING (연속 상태 전이 사상)

$$(N^{o}_{p,v},\ \Delta P_{sp},\ \phi_{FOR}) \xrightarrow{\text{[Stage 1]}} (D_p,\ C_p) \xrightarrow{\text{[Stage 2: } w_f,\ \tau_{buf}\text{]}} \{V^{req}_f,\ K^*_f\} \xrightarrow{\text{[Stage 3: } \alpha_{SLA}\text{]}} \{c^*_f,\ CAPEX_p\}$$

설계 핵심 Stage 1의 수요·호출 건수가 Stage 2의 유종별 탱크 설계로, 다시 Stage 3의 Erlang-C 선대 및 CAPEX 산출로 원클릭 자동 인계됩니다.

선종×내외항 이중차원 급유 수요 추정 및 몬테카를로 퍼널 원리

선종마다 급유 빈도(27.8%~76.8%)와 1회 급유량(212~653 MT)이 비대칭적이므로 선종별 분리 합산이 필수적입니다.

VESSEL-SEGMENT MICRO DEMAND FORMULA

$$C_p = \Sigma_v (N_{p,v} \cdot P_{p,v}), \quad D_p = \Sigma_v (N_{p,v} \cdot P_{p,v} \cdot S_{p,v})$$

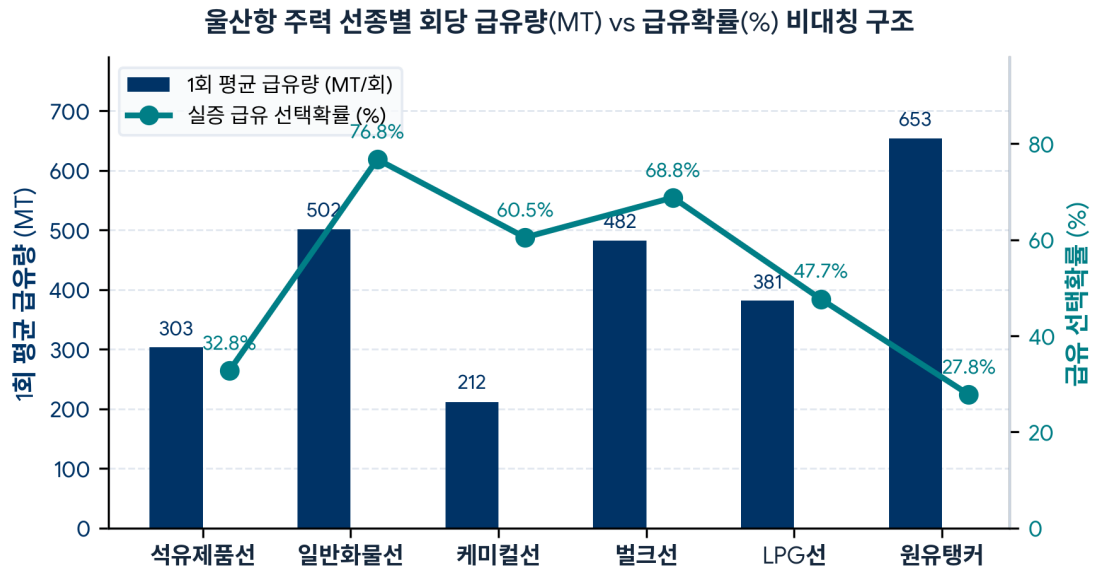
• $N_{p,v}$: 선종별 입항 척수 • $P_{p,v}$: 조건부 급유확률 • $S_{p,v}$: 회당 스템(MT)

울산항 2026 실증 수식 대입 검산 및 퍼널 분기 원리

① 석유제품선 (Product Tanker · 다빈도 중형 급유)
2,973.9척 × 급유확률 32.79% = 975건 × 303.2 MT = 295,647 MT (점유 30.9%)

② 일반화물선 (General Cargo · 고확률 대형 급유)
670.9척 × 급유확률 76.76% = 515건 × 501.9 MT = 258,491 MT (점유 27.0%)

③ 실시간 몬테카를로 확률 퍼널 (Monte Carlo Funnel)
입항 선박 스트림이 확률 게이트(39.92%)를 통과하며 급유 호출선(2,912건)과 단순 화물 하역 통과선(4,383척)으로 분기되는 과정을 실시간 재현합니다.



▶ 차트 해석: 케미컬선은 입항 시 60.5%가 급유하지만 회당 212 MT만 수급하는 반면, 원유탱커는 급유율은 27.8%이나 1회 급유 시 653.4 MT의 대규모 물량을 수급합니다. 이 2차원 비대칭성 때문에 선종별 분리 시뮬레이션만이 정확한 수요를 예측합니다.

정밀도 검증 단순 전체 평균 곱셈에서 발생하는 집계 편의(Aggregation Bias)를 원천 제거하고 울산항 8대 선종 공식 실적과 100% 일치시켰습니다.

유가 스프레드 탄력성(ΔP)과 항만 인센티브 What-If 시뮬레이션

싱가포르·저우산 대비 가격 경쟁력을 확보하거나 외항선 인센티브를 부여할 때 유입되는 임의 급유선(Discretionary Callers)을 정량화합니다.

CONDITIONAL BUNKERING PROPENSITY ELASTICITY FUNCTION

$$P_{p,v} = \text{clip}_{[0.03, 0.92]}\left(P^{0}_{p,v} + \beta_{flag} \cdot \Delta\phi_{FOR} - \beta_{price} \cdot \Delta P_{sp} + \rho_{inc} \right)$$

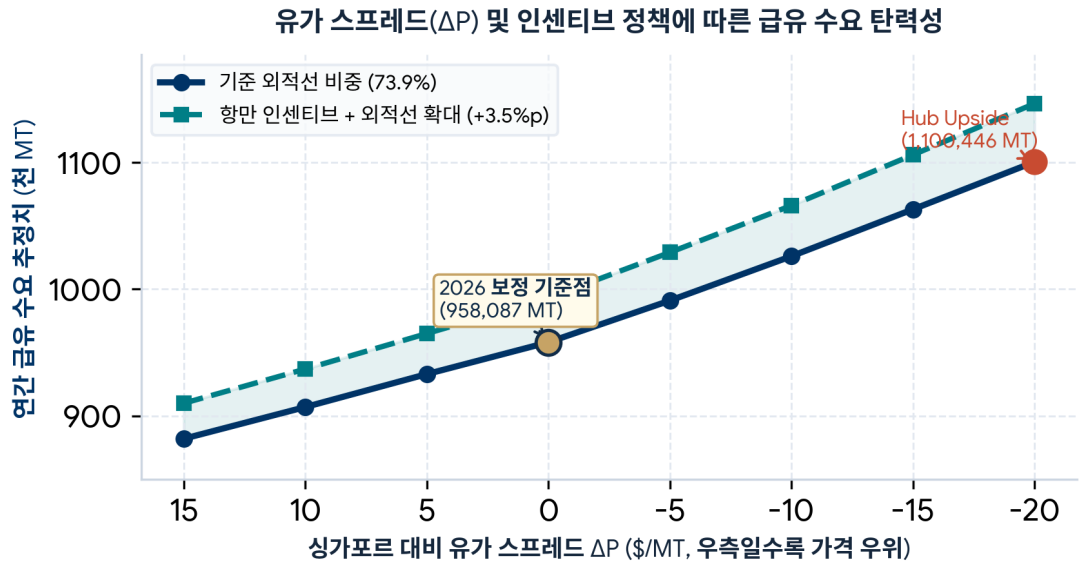
• $\Delta P_{sp} = P_{Local} - P_{Singapore}$ ($/MT) • $\Delta\phi_{FOR}$: 외적선 비중 변화 • ρ_{inc}: 인센티브(%p)

3대 시장·정책 조작 레버(Control Levers)의 작동 원리

01 · 경쟁 허브 대비 유가 스프레드 ($-\beta_{price} \cdot \Delta P_{sp}$)
우리 항만 유가가 싱가포르 대비 저렴해지면($\Delta P_{sp} < 0$), 항로 상에서 급유지를 선택하는 원양 선박들의 차익 급유(Bunker Arbitrage) 유입으로 $P_{p,v}$가 상승합니다.

02 · 외국적 외항선 기항 비중 확대 ($+\beta_{flag} \cdot \Delta\phi_{FOR}$)
외적선(41.29%)은 국적선(36.04%) 대비 급유 성향이 +5.25%p 높으므로 글로벌 선대 유치 시 항만 전체 유효 급유 유치율이 동반 상승합니다.

03 · 항만시설사용료·묘박료 감면 인센티브 ($+\rho_{inc}$)
급유 전용 정박선에 톤세·묘박료 감면 시 한계 급유 확률이 즉각 상향 이동합니다.



▶ **시나리오 대역(Scenario Band) 산출 결과:**

- **Conservative (Low): 937,417 MT**
- **Empirical Base: 958,087 MT**
- **Hub Upside (High): 1,100,446 MT (+142,359 MT 순증, 시장매출 약 +$92M/yr)**

전략적 활용 유가 스프레드 -$15/MT 개선 및 외항선 인센티브 결합 시 울산항 급유 수요는 95.8만 MT에서 최대 110.0만 MT(Hub Upside)까지 확장됩니다.

다종연료 열역학 물성과 '체적 팽창(Volumetric Expansion)'의 법칙

친환경 연료(LNG·메탄올) 전환 시 선박 운항 에너지가 동일하더라도 저장탱크 설비 체적(m^3)은 약 2.08~2.45배 커져야 합니다.

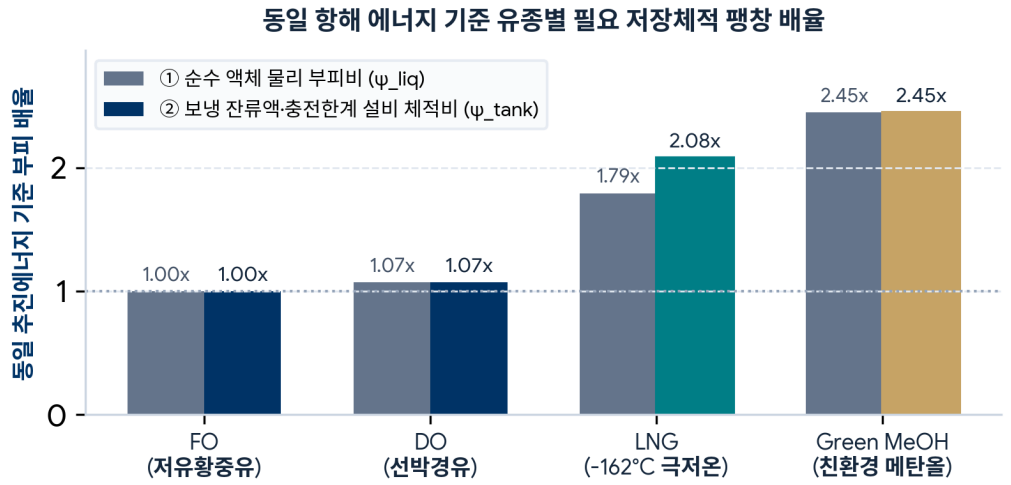
EQUIVALENT PROPULSION ENERGY & DUAL VOLUMETRIC EXPANSION

$$M_f = D_p \cdot w_f \cdot (LHV_{FO} / LHV_f), \quad \psi^{liq}_f = \kappa^{mass}_f \cdot (\rho_{FO} / \rho_f)$$

실설비 체적 배율: $\psi^{tank}_f = \psi^{liq}_f \times (\eta_{usable,FO} / \eta_{usable,f})$ [극저온 Heel·충전한계 반영]

연료 유종	발열량 (MJ/kg)	질량비 (κ_mass)	액체밀도 (t/m³)	①순수액체 부피비	②실설비 체적배율
FO (중유)	40.5	1.00×	0.96	1.00×	**1.00×**
DO (경유)	42.6	0.95×	0.85	1.07×	**1.07×**
LNG (-162°C)	48.2	0.84×	0.45	1.79×	**2.08×**
Green MeOH	20.0	2.02×	0.79	2.45×	**2.45×**

※ 공학적 핵심: LNG는 액체 밀도가 0.45 t/m³로 가볍고 탱크 바닥에 상시 10%의 냉각 잔류액(Heel)을 남겨야 해 실설비 기준 2.08배, 메탄올은 열량이 낮아 2.45배 체적이 요구됩니다.



▶ 기존 인프라 계획의 맹점 극복:
입항 척수만 보고 기존 중유(FO) 탱크 용량 수준으로 친환경 벙커링 기지를 설계하면, 2030년 이후 저장 용량이 절반 이하로 부족해지는 심각한 공급 병목이 발생합니다. Stage 2 트윈은 이를 사전 예방합니다.

수치 정합성 해설 순수 액체 물리 부피비(LNG 1.79배)와 극저온 냉각 유지용 바닥 잔류액(Heel 10%)·BOG 여유공간을 포함한 실설비 체적비(LNG 2.08배)를 구분 정립했습니다.

유종별 완전 분리 탱크 설계 및 액체화학 클러스터 개조(Retrofit) 효과

FO · DO · LNG · 메탄올 4대 연료는 보관 온도와 재질이 달라 혼유가 불가능하므로 전용 모듈 단지로 각각 산정합니다.

DEDICATED MODULAR TANK SIZING EQUATION (유종별 독립 산정 후 합산)

$$V^{req}_f = [\,(M_f / 365) \cdot \tau_{buf} \cdot \zeta_{peak}\,] / (\rho_f \cdot \eta_{fill}),\quad K^*_f = \lceil V^{req}_f / u_f \rceil$$

• τ_buf: 안전 버퍼일(12일) • ζ_peak: 성수기 피크(1.25) • η_fill: 안전 충전한도(0.85)

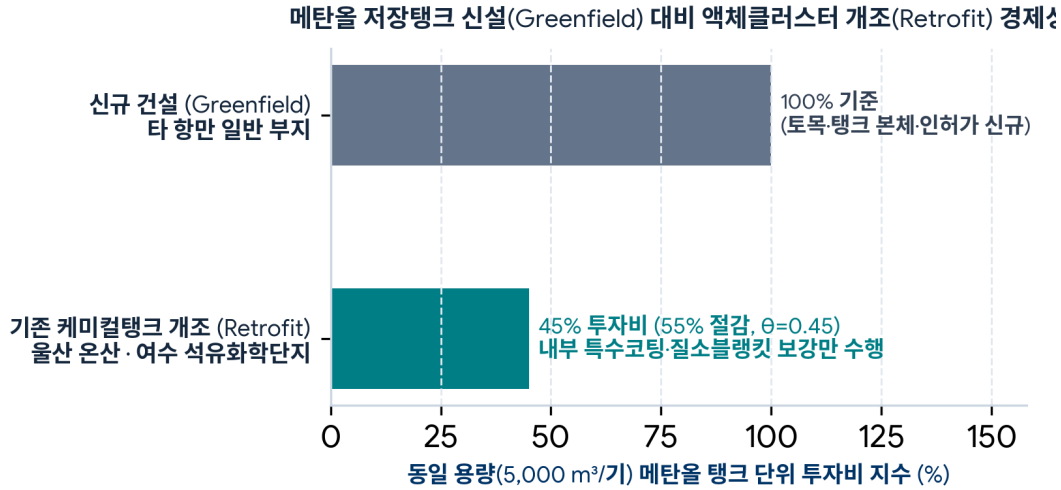
4대 유종별 표준 모듈 규격(u_f) 및 수치 대입 예시

- FO 전용 단지 (u_FO = 10,000 m³/기): 상압 가열 보온(50~60°C) 탄소강 탱크
- DO 전용 단지 (u_DO = 3,000 m³/기): 상온 경질유 다빈도 출하 탱크
- LNG 전용 단지 (u_LNG = 15,000 m³/기): −162°C 9% 니켈강/멤브레인 극저온 탱크
- MeOH 전용 단지 (u_MeOH = 5,000 m³/기): 질소 블랭킷 밀폐·특수 코팅 케미컬 탱크

▶ 검산 예시 (울산항 LNG 분담률 23% 전환 시):

M_LNG = 1,085,000 × 0.23 × 0.84 = 209,622 MT/yr

V^req_LNG = (574.3 × 12 × 1.25) ÷ (0.45 × 0.85) = 22,522 m³ → 15k 표준탱크 2~3기



▶ 왜 울산항·광양항이 그린 메탄올 허브에 유리한가?

극저온 LNG 탱크는 100% 신규 건설이 불가피하지만, 상온 액체화물인 메탄올은 울산 온산·여수 산단의 유휴 액체화학 탱크 내부 코팅과 배관만 개조(θ_retro = 0.45)하여 공기 단축과 55% 자본 절감을 동시에 달성합니다.

클러스터 비교우위 울산 온산단지 및 여수 석유화학단지의 기존 케미컬 탱크를 메탄올용으로 개조(Retrofit)하면 신규 건설 대비 탱크 CAPEX를 55% 절감합니다.

3대 급유 공급 경로(STS·TTS·PTS)와 '저수지 vs 셔틀' 비차감 원칙

선박의 위치(외항 묘박지 vs 부두 선석)에 따른 급유 메커니즘을 구분하고, 육상 탱크와 급유선 선복을 독립 산정합니다.

공급 방식 (Mode)	대상 선박 위치 및 상황	현장 작동 프로세스 (육상 탱크 → 모선 전달)	주력 적용 유종 및 설비
STS (Ship-to-Ship) **해상 급유선 직공급**	외항 묘박지 정박선 또는 부두 접안 대형선(SIMOPS)	급유 바지선 또는 극저온 전용선(LNGBV)이 육상 터미널에서 연료를 실어 외항 정박선이나 하역 중인 모선 해측(Waterside)에 접선해 동시 급유	FO (중유 바지선) LNG (LNGBV 전용선) MeOH (케미컬 겸용바지)
TTS (Truck-to-Ship) **육상 탱크로리 급유**	일반부두·내항부두에 접안한 소형선·내항선	육상 출하대(Truck Loading Bay)에서 연료를 적재한 20~30톤급 탱크로리가 부두 에이프런(안벽)으로 직접 진입해 호스 연결 급유	DO (선박용 경유 MGO) 소량·다빈도 기항선
PTS (Pipe-to-Ship) **파이프라인 직공급**	전용 액체화학부두 및 에너지부두 직접 접안선	바지선·트럭을 거치지 않고 육상 저장탱크에서 부두 선석까지 연결된 전용 배관 및 로딩암(Loading Arm)으로 대용량 초고속 직공급	울산 온산 케미컬부두(MeOH) 울산신항 KET 부두(LNG)

비차감 법칙 ① · 귀항 즉시 재선적(Reloading) 재고 보장

LNGBV(7,500 m^3급)나 바지선이 급유 완료 후 빈 배로 터미널에 귀항했을 때, 육상 탱크에
즉시 출하 가능한 액체 재고(V_inv ≥ V_parcel)가 상시 준비되어 있어야 연쇄 출동이 가능합니다.
급유선 용량만큼 육상 탱크를 줄이면 재충전 대기 및 공급망 재고 고갈(Stock-out)이 발생합니다.

비차감 법칙 ② · 기상 악화 시 원양 수입선 체선료(Demurrage) 방어

풍랑주의보로 외항 STS 급유가 3~4일간 중단되면 바지선들은 만재 상태로 발이 묶입니다.
이때 정유사 배관이나 원양 LNG 도입선의 하역 물량을 받아줄 육상 완충 용량(10~14일분)이
독립 확보되어 있지 않으면 대형 도입선 하역 지연으로 막대한 체선료 손실이 발생합니다.

핵심 설계 원칙 바지선·LNGBV 내부 탱크는 해상 배달용 '운송 셔틀'이고 육상 탱크는 '비축 저수지'이므로 육상 저장용량에서 급유선 선복을 차감하지 않습니다.

유종별 급유 작업시간 분해 및 Erlang-C 대기행렬(M/M/c) 최적화

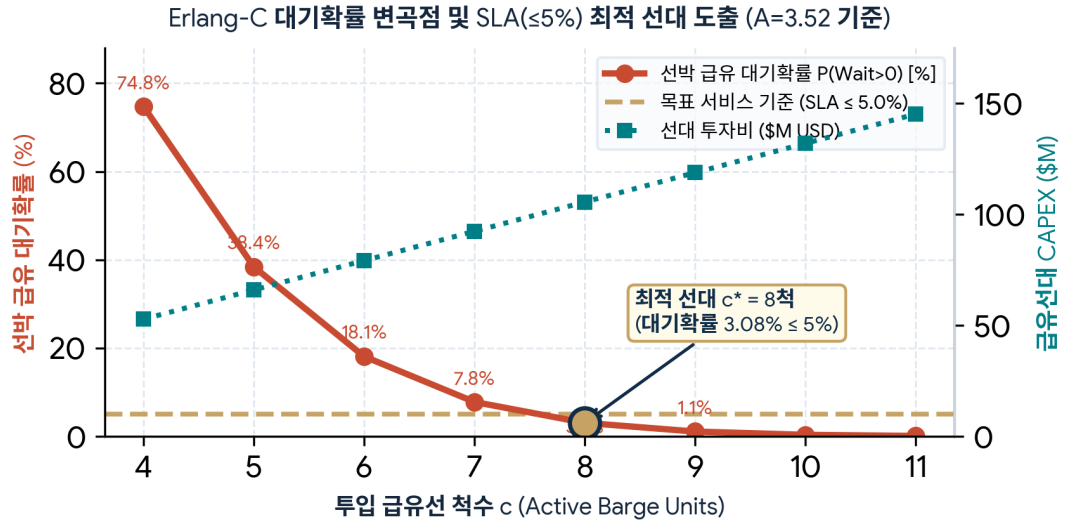
극저온 예냉·퍼징으로 1회 12.5시간이 걸리는 LNGBV와 바지선의 대기확률 변곡점을 찾아 최소 최적 선대(c*)를 결정합니다.

M/M/c ERLANG-C WAITING PROBABILITY & INTEGER FLEET OPTIMIZATION

$$P_W(c) = \left[\frac{A^c}{c!} \cdot \frac{c}{c-A} \right] \Big/ \left[\sum_{k=0}^{c-1} \frac{A^k}{k!} + \frac{A^c}{c!} \cdot \frac{c}{c-A} \right] \le \alpha_{SLA}$$

작업부하 $A_f = \lambda_f \cdot \bar{s}_f$ (Erlangs), 최적 척수 $c^*_f = \min \{ c \in Z^+ \mid P_W(c) \le 5\%, A_f/c \le 0.86 \}$

1회 출동 세부 공정	DO 바지	FO 바지	MeOH 바지	LNGBV
① 왕복 항해 · 접안 계류	1.2 h	2.0 h	2.0 h	**2.2 h**
② 호스연결 · 극저온 예냉	0.5 h	1.0 h	1.5 h	**2.8 h**
③ 본 연료 펌핑 (BOG 회수)	1.8 h	4.0 h	4.0 h	**4.5 h**
④ 드레인 · 질소 퍼징 · 이안	0.7 h	1.5 h	2.0 h	**3.0 h**
총 서비스 점유시간 ($\bar{s}_f$)	**4.2 h**	**8.5 h**	**9.5 h**	**12.5 h**



▶ 그래프 판독 (작업부하 A = 3.52 Erlang 실증 예시):

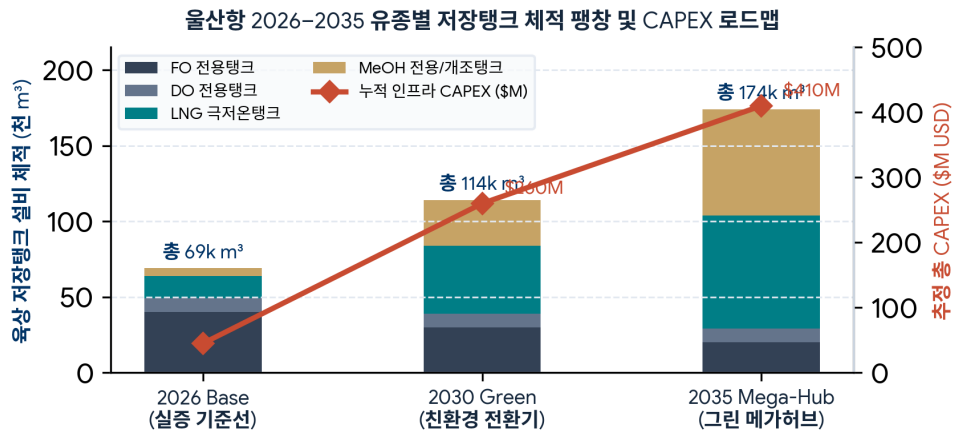
- 5척 운영 시 대기확률 41.5% (심각한 외항 체선 및 타 항만 이탈 발생)
- 7척 운영 시 대기확률 7.77% → 8척 투입 시 3.06%로 급감 (SLA ≤ 5% 충족!)
- 따라서 과잉 투자(9척 이상)와 병목(7척 이하)을 모두 피하는 최적해는 c* = 8척입니다.

최적화 원리 붉은색 선박 대기위험 곡선 P_W(c)가 목표 서비스 기준선(SLA ≤ 5%) 아래로 처음 진입하는 황금색 변곡점이 과잉투자 없는 최적 척수입니다.

울산항 2026–2035 에너지 전환 단계별 인프라·투자비(CAPEX) 로드맵

현행 석유계 기준선(2026)에서 친환경 확산기(2030), 동북아 그린 벙커링 메가허브(2035)까지의 정량 시뮬레이션 결과입니다.

핵심 설계 지표	2026 Base (실증 기준선)	2030 Green (친환경 전환기)	2035 Mega-Hub (그린 메가허브)
추진에너지 수요 (급유 호출 건수)	958,087 MT (2,912 Calls)	1,085,000 MT (3,240 Calls)	**1,280,000 MT (3,790 Calls)**
다종연료 믹스 (FO/DO/LNG/MeOH)	72% / 22% 5% / 1%	48% / 14% 23% / 15%	**25% / 10% 35% / 30%**
육상 저장탱크 총 설비 체적	69,000 m^3 (FO4·DO3·LNG1·MeOH1)	114,000 m^3 (+65%) (FO3·DO3·LNG3·MeOH6)	**174,000 m^3 (+152%) (FO2·DO3·LNG5·MeOH14)**
최적 급유 선대 (SLA ≤ 5% 기준)	중유·경유 바지 6척 + LNGBV 1척	일반바지 6 + 겸용 2 + LNGBV 2척	**일반바지 4 + 겸용 4 + LNGBV 3척**
누적 CAPEX 추정 (온산 개조 반영)	기존 설비 활용 (신규 증설 최소)	$245M ~ $275M (개조 $38M 절감)	**$390M ~ $430M (메가허브 완비)**



TOTAL INFRASTRUCTURE CAPEX OBJECTIVE

$$CAPEX_p = \Sigma_f [\, \theta_{retro} \cdot (V_f/10^4) \cdot \pi^{tank}_f + c^*_f \cdot \pi^{vessel}_f \,] + B_{bay} + \Pi_{PTS}$$

- LNGBV 단가 ~$70M/척, 일반·겸용바지 ~$13.2–18M/척
- 온산 메탄올 개조(θ_retro=0.45)로 초기 진입장벽 대폭 완화

핵심 인사이트 2035년 추진 에너지 수요는 +33.6% 증가하지만, LNG·메탄올 체적 팽창과 긴 작업시간(12.5h) 때문에 저장탱크 체적은 +152% 확충이 필수적입니다.

울산항 권역별 최적 입지 배치도 및 경영진 의사결정 가이드

항만 지형과 산업 클러스터 인프라를 결합하여 중복·과잉 투자를 차단하고 동북아 친환경 벙커링 허브 전략을 완성합니다.

권역 01 · FO (저유황중유)

온산항 · 신항 남방파제 바지 계류기지

- 외항 묘박지(E-1~E-3) 최단거리 해상 접근성 확보
- 4,000 DWT급 STS 전용 바지선 왕복 운항시간 단축 및 정유사 배관 직결 수급

권역 02 · DO (선박용 경유)

울산 본항 일반부두 육상 출하대 (Truck Bay)

- 내항선·소형 화물선 접안 밀집 구역에 TTS 탱크로리 출하대 집중 배치
- 고가 해상 바지선 투입을 대체하여 소량·다빈도 급유 운영비 최소화

권역 03 · LNG (-162°C 극저온)

울산신항 북항 에너지부두 (KET 터미널 연계)

- 코리아에너지터미널(KET) 대형 LNG 육상탱크 및 전용 PTS 제티를 모기지 활용
- LNGBV 재적재(Reloading) 시간 단축 및 대형 컨테이너·원유선 SIMOPS 지원

권역 04 · Green Methanol

온산 국가산단 액체화학 클러스터 부두

- 기존 상업용 액체화학 탱크 개조(Retrofit, 55% 절감) 및 케미컬부두 PTS 배관 직결
- 케미컬·컨테이너선에 동북아 최저 공급단가 구현 가능한 핵심 전략 거점

01 · 데이터 및 모형 일관성

관측 원장(Fact) · 사전 시나리오(Prior) · 울산 실증 보정(Calibrated)을 단일 수리 엔진으로 통합

02 · 열역학·산업공학적 엄밀성

연료별 발열량·밀도·극저온 잔류유 물리 법칙과 M/M/c Erlang-C 대기행렬 최적화 결합

03 · 실시간 정책·투자 시뮬레이션

유가 스프레드·인센티브·친환경 전환 속도에 따른 탱크·선대·CAPEX($M) 즉각 검증

최종 요약 META Bunkering Digital Twin은 [단일 수리 수요예측 → 다종연료 체적 변환 → Erlang-C 선대·CAPEX 최적화]를 실시간 통합한 의사결정 플랫폼입니다.