



Document Version: v1.0.0 (Technical & Strategic Integration, Published)

Project Code: MaeBara-100B-NSR

북극항로 시대의 글로벌 주도권 확보를 위한 지능형 물류 통합 프레임워크

MaeBara: Seizing Global Maritime Leadership through AI-Native Infrastructure

전략적 필요성 및 국가적 파급효과 (Strategic Necessity & Impact)

- 해양 주권 보호: 연간 **551억 원** 규모의 국부 유출 리스크를 제거하고, 외산 솔루션 의존도를 탈피하여 독자적인 해양 데이터 주권 확보
- 부산항의 AI 거점화: 북극항로 개척에 앞서 부산항을 AI 기반 지능형 항만으로 선제적 전환하여 글로벌 환적 거점으로서의 입지 공고화
- 물류 처리 능력 극대화: 추가 토목 공사 없이 AI 최적화만으로 부산항 CAPA를 **+9.3M TEU** 확보하여 국가 물류 경쟁력 제고

기술적 우위 및 독점적 해자 (Technical Moat)

- 검증된 효율성: T-CAG TYO 도입 시 컨테이너 재처리(Rehandling) **32.4%** 절감 달성
- 운항 최적화: NSR-OptiNav v0.3.0 기준 부산-로테르담 항로 **459.3km** 단축 및 운항 시간 **12.8hr** 절감
- 압도적 실행력: OpenAI 해커톤 글로벌 우승 및 15일 만의 MVP 구현으로 입증된 AI 풀스택 개발 역량

기술 백서 (White Paper)

1. 서론: 글로벌 물류 패러다임의 변화와 매바라의 역할

1.1 해양 물류의 병목 현상과 경제적 손실

전 세계 물류의 중추인 해양 운송은 현재 운영 시스템의 노후화로 인해 막대한 비효율을 겪고 있습니다. 특히 컨테이너 터미널 내의 '컨테이너 적재 문제(Container Stacking Problem)'는 학술적으로도 복잡한 **NP-hard** 문제로 분류되며, 기존의 휴리스틱(Heuristics) 방식으로는 전역 최적해를 찾는데 한계가 있음이 지적되어 왔습니다 [1]. 동북아 물류 거점인 부산항 역시 이러한 재처리(Rehandling) 비효율로 인해 연간 약 500억 원 이상의 손실이 발생하고 있으며, 이는 국가 물류 경쟁력 약화의 핵심 요인입니다.

1.2 북극항로 시대와 선제적 AI 인프라 구축

기후 변화로 인해 개척되는 북극항로(NSR)는 새로운 글로벌 물류 동맥으로 부상하고 있습니다. Grieves(2014)가 제안한 디지털 트윈(**Digital Twin**) 개념은 물리적 세계의 데이터를 가상 세계에 완벽히 동기화하여 최적의 의사결정을 도출하는 것입니다 [2]. 매바라는 이러한 디지털 트윈 인프라를 바탕으로 부산항을 지능형 AI 항만으로 선제적 전환하고, 대한민국이 글로벌 해양 물류의 표준을 주도할 수 있도록 데이터 주권을 확보하고자 합니다.

2. 핵심 기술 아키텍처: 지능형 하이브리드 시스템

매바라의 기술적 차별점은 논리(PDDL)와 직관(DRL)을 결합하여 복잡한 물리적 환경을 완벽하게 통제하는 데 있습니다.

2.1 PDDL 기반 지능형 디지털 트윈 (**T-CAG Digital Twin**)

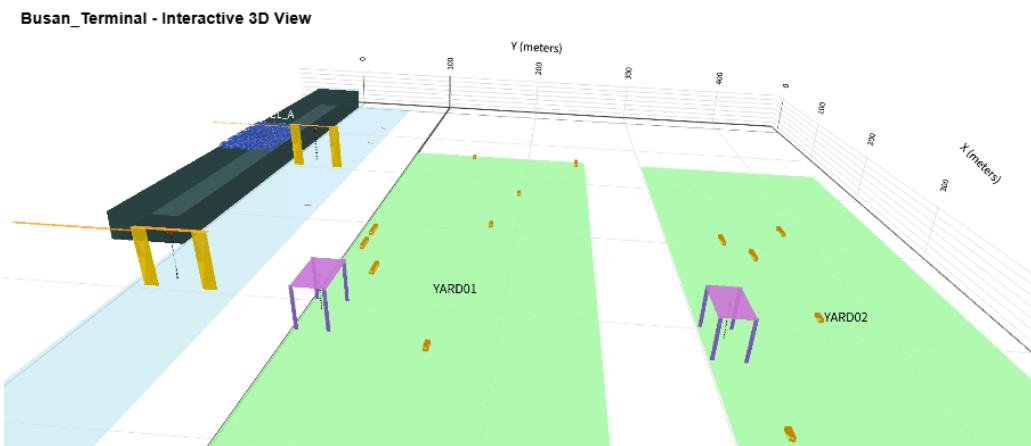


그림 1. T-CAG Digital Twin 항만 스크린샷

항만의 복잡한 규칙과 운영 프로세스를 PDDL(Planning Domain Definition Language)로



정의하여 AI가 활동할 수 있는 무결한 가상 환경을 구축합니다 [3].

- 상태의 기호화 (**Predicates**): 컨테이너 위치와 물리적 간섭 정보를 논리 기호로 전환하여 AI 에이전트의 연산 효율을 극대화합니다.
- 유효 경로 탐색 (**Action Masking**): 물리적 제약 조건을 Action Mask로 활용하여 AI가 불가능한 행동에 자원을 낭비하지 않고 오직 최적의 해답에 집중하도록 설계되었습니다.

2.2 T-CAG Yard Orchestrator (TYO): 예측 기반 적재 엔진

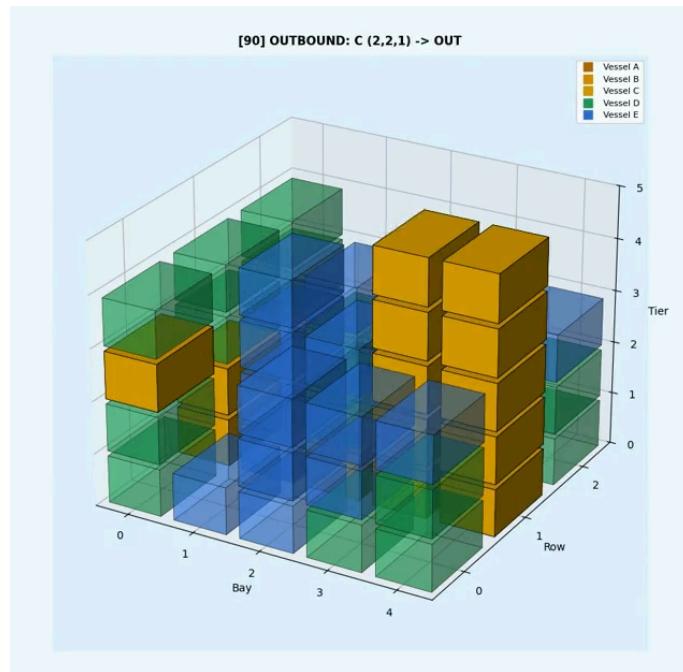


그림 2. T-CAG Yard Orchestrator (TYO) 스크린샷

TYO는 심층 강화학습(DRL)을 활용하여 실시간 야드 상태와 미래 출고 스케줄을 동적으로 연동합니다. Mnih et al. (2015)의 연구가 입증했듯, DRL은 고차원적인 상태 공간에서 인간의 직관을 뛰어넘는 전략을 도출할 수 있습니다 [4].

- 비용 함수 (**Cost Function**):

$$\text{Total Cost} = \sum(C_{in} + C_{out} + C_{rehandle})$$

기존의 Greedy Rule 기반 적재 방식이 가진 한계를 극복하기 위해 [5], 미래의 재처리 확률을 현재의 가치 함수(Value Function)에 반영하여 누적 비용을 최소화합니다.

- 전략적 적재 (**Look-ahead Stacking**): 화물의 체류 시간과 목적지를 고려하여 최적의 적재 위치를 결정함으로써 불필요한 장비 이동을 최소화합니다.



2.3 NSR-OptiNav: 지능형 항로 최적화 엔진

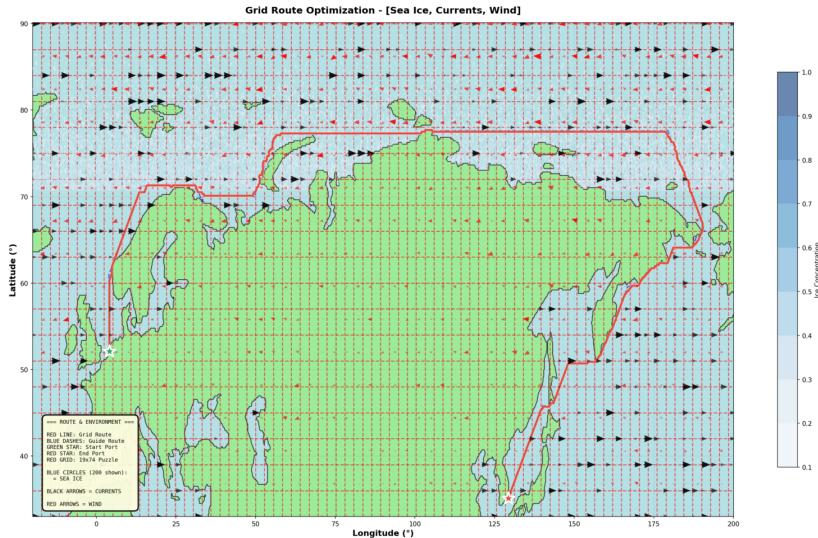


그림 3. NSR-OptiNav 항로 결과 스크린샷

북극항로의 불확실성을 수익으로 전환하는 차세대 지능형 내비게이션 아키텍처입니다.

- 실데이터 기반 환경 복제 (**Ocean Digitization**): NSIDC 및 NOAA 데이터를 실시간 수신하여 해빙(Ice), 해류(Current), 기상 데이터를 통합 그리드로 레이어화합니다. 고위도 왜곡 방지를 위한 Azimuthal 투영법을 적용하여 정밀한 통행 가능 구역을 정의합니다.
- 2단계 계층적 최적화 (**Hierarchical Routing**): - 전략적 가이드 (*Theta**): 기존 *A**의 그리드 제약을 극복한 Line-of-Sight 최적화를 통해 부드러운 전역 최단 경로를 도출합니다 [6].
 - 전술적 피팅 (**Grid Puzzle Logic**): 가이드 경로 주변을 고해상도 그리드로 정밀 분석하고, 실제 해류와 바람 데이터를 반영하여 미세 경로(Micro-path)를 피팅합니다.
- 선박 동역학 모델링 (**Vessel Digital Twin**): 선박의 쇄빙 등급(Ice Class)을 반영하여 유빙 농도에 따른 비선형 저항을 수치화하고, 연료비를 5% 이상 절감할 수 있는 '경제 선속(Economic Speed)'을 산출합니다.

3. 실증적 성과: 데이터로 증명된 가치

3.1 항만 운영 효율화 (T-CAG TYO)

3x5x5 표준 환경 시뮬레이션 결과, 매바라의 TYO 엔진은 기존 운영 정책 대비 압도적인 개선 효과를 입증했습니다.

표 1. 터미널 운영 데이터를 기반으로 한 시뮬레이션 결과

| Algo | Steps | Inbound | Outbound | Rehandle | Total Cost | Rehandle |
|--------|------------|---------|----------|-----------|------------|---------------|
| T-CAG | 175 | 80 | 72 | 23 | 841 | 31.9 % |
| GREEDY | 186 | 80 | 72 | 34 | 1017 | 47.2 % |

- 재처리 횟수 (**Rehandle**): 기존 Greedy 정책 대비 32.4% 절감 (34회 → 23회).
- CAPA 증대**: 불필요한 장비 가동 시간 단축을 통해 부산항 전체 처리 능력을 약 9.3M TEU 추가 확보할 수 있는 잠재력을 확인했습니다.

3.2 항로 최적화 실증 (NSR-OptiNav v0.3.0)

표 2. 부산-로테르담 항로 시뮬레이션 결과

| 분석 지표 (Metrics) | 기존 가이드 항로 (Guide) | MaeBara (NSR-OptiNav) | 절감 성과 (Saved) |
|-----------------|-------------------|-----------------------|---------------------|
| 총 운항 거리 (km) | 15,399.4 km | 14,940.1 km | -459.3 km |
| 총 운항 시간 (Days) | 18.00 Days | 17.46 Days | -0.54 Days (-12.8h) |
| 연료 소모량 (Tons) | 2,757.2 tons | 2,674.9 tons | -82.3 tons |
| 종합 효율 개선 (%) | 기준점 | - | 2.98% ↑ |

- 경로 효율: 단순 최단 경로(15,399.4km) 대비 환경 통합 최적화를 통해 **459.3km** 단축 (14,940.1km).
- 운항 시간: 해빙 회피 및 해류 타기 전략을 통해 기존 대비 **12.8**시간 단축 가능성을 확보했습니다.

4. 통합 비전: 해양 물류의 '테슬라 모델' 실현

매바라는 단편적인 솔루션을 넘어 해상과 육상이 하나의 데이터로 연결되는 완전 자율 물류 생태계를 지향합니다.

1. 데이터 선순환 구조: 플랫폼 운영을 통해 축적된 데이터를 다시 AI 모델 고도화에 투입하여 진입 장벽을 지속적으로 높입니다.
2. **AI-Native** 인프라 표준화: 소프트웨어가 하드웨어 장비의 사양을 규정하는 역설계를 주도하여 글로벌 시장의 표준을 선점합니다.
3. 통합 관제 센터 (**DTCC**): 바다 위의 선박과 육상의 항만 장비가 하나의 신경망으로 연동되는 '지능형 물류 파이프라인'을 완성합니다.

5. 금융 및 생태계 확장 전략

매바라의 정밀한 예측 데이터는 물류를 넘어 금융 및 보험 산업의 새로운 표준이 됩니다.

- 데이터 기반 해상 보험: 실시간 위험도 분석을 통해 실제 사고 확률에 근거한 동적 보험 요율(Usage-Based Insurance) 모델을 제공합니다.
- 선박 금융 리스크 관리: AI가 예측한 선박의 운항 수익성과 자산 가치 데이터를 금융권에 제공하여 투자의 투명성과 효율성을 제고합니다.

6. 지속 가능한 경쟁 우위 (The Moat)

6.1 독보적인 기술적 장벽

포스텍 박사급 인력의 심층 연구 역량과 OpenAI 해커톤 우승으로 증명된 최신 AI 아키텍처 적용 능력은 매바라만이 가진 고유한 자산입니다. 특히 15일 만에 MVP를 구현해내는 압도적인 속도는 시장의 변화에 기민하게 대응하는 핵심 동력입니다.

6.2 국가 전략적 가치

매바라의 기술은 부산항을 전 세계에서 가장 효율적인 AI 항만으로 변모시킴으로써, 대한민국이 북극항로 시대의 물류 패권국으로 도약하는 데 기여할 것입니다.

7. 결론: 해양 물류의 새로운 기준을 세우다

매바라는 북극항로가 열리는 역사적 전환점에서 대한민국 해양 물류의 '두뇌'가 되고자 합니다. 우리는 검증된 AI 기술과 실행력을 바탕으로 항만과 바다의 지도를 새로 그리고 있습니다. 지금 부산항에 AI를 심는 것은 다가올 물류 혁명의 시대에 대한민국이 가장 앞선 자리에 서기 위한 '가장 확실한 투자'입니다. 매바라가 그 여정의 파트너가 되겠습니다.

References

- [1] Gharehgozli, A. H., et al. (2014). "A review of real-time scheduling of container terminal operations." European Journal of Operational Research.
- [2] Grieves, M. (2014). "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication." White Paper.
- [3] McDermott, D., et al. (1998). "PDDL - The Planning Domain Definition Language." Yale Center for Computational Vision and Control.
- [4] Mnih, V., et al. (2015). "Human-level control through deep reinforcement learning." Nature.
- [5] Kim, K. H., & Hong, G. P. (2006). "A heuristic rule for relocating blocks." Computers & Industrial Engineering.
- [6] Daniel, K., et al. (2010). "Theta*: Any-angle path planning on grids." Journal of Artificial Intelligence Research.

Document History

- v1.0.0: Technical & Strategic Integration, Published (2025.12)
- Author: Han Sang-do (MaeBara Corp.)
- Copyright © 2025 MaeBara Corporation. All rights reserved.