

탄소배출량 최소화와 운항시간 제약에 따른 LNG 운반선 최적 운항속도 비교 분석

김현주¹, 김동현², 정봉규^{3*}

¹국립부경대학교 산업및데이터공학과 박사수로, ²국립부경대학교 융합공학부(기계조선에너지시스템공학전공) 교수,

³경상국립대학교 해양경찰시스템학과 교수

Comparative Analysis of Optimal LNG Carrier Speeds under CO₂ Minimization and Voyage Time Constraints

Hyun-Ju Kim¹, Dong-Hyun Kim², Bong-Kyu Jung^{3*}

¹Ph.D. Candidate, Department of Industrial and Data Engineering, Pukyong National University

²Professor, Department of Smart Machine Mobility Engineering, Pukyong National University

³Professor, Department of Maritime Police and Production System, Gyeongsang National University

요약 국제해사기구(IMO)의 탄소집약도지수(Carbon Intensity Indicator, CII) 규제 시행에 따라 선박의 탄소배출량을 저감하면서 운항 효율을 유지할 수 있는 운항 의사결정 기술의 중요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 LNG 운반선을 대상으로 AI 기반 탄소배출량 예측모델과 Grid Search를 활용하여 운항속도를 결정하고, 탄소배출량 최소화과 운항시간 제약에 따른 최적 운항속도를 비교·분석하였다. 머신러닝(XGBoost) 예측모델을 이용하여 운항속도별 시간당 탄소배출량을 예측하고, 동일 항해거리에서의 총 탄소배출량, 운항시간 및 CII 만족 여부를 종합적으로 고려하여 최적 운항속도를 도출하였다. 사례 연구 결과, 탄소배출량만 최소화하는 경우 최적 운항속도는 12.9 knot로 나타났으며, 기준 운항 대비 총 탄소배출량이 약 26.8% 감소하였다. 반면, 운항시간 제약을 함께 고려한 경우 최적 운항속도는 16.9 knot로 결정되었으며, 모든 운항 제약조건을 만족하면서 총 탄소배출량을 약 5.4%를 저감하였다. 본 연구는 AI 기반 탄소배출량 예측과 운항 제약조건을 결합하여 운항속도 결정에 활용할 수 있는 실용적인 의사결정 지원 방법을 제시하였으며, 향후 기상예측과 항로 최적화를 포함한 다목적 운항 의사결정 연구의 기반으로 활용될 수 있다.

주제어 : LNG 운반선, 탄소배출량 예측, 운항속도 최적화, Grid Search, CII

Abstract With the implementation of the International Maritime Organization (IMO) Carbon Intensity Indicator (CII) regulation, there is an increasing need for operational decision-making techniques that can reduce carbon emissions while maintaining operational efficiency. This study determines the sailing speed of an LNG carrier using an artificial intelligence (AI)-based carbon emission prediction model and a Grid Search algorithm and comparatively analyzes the optimal sailing speeds under two operational scenarios: carbon emission minimization and voyage time constraints. ML model(XGBoost) was used to estimate hourly CO₂ emissions at different sailing speeds, and the optimal sailing speed was determined by considering total voyage CO₂ emissions, voyage time, and compliance with the CII requirements under the same voyage distance. The case study showed that when only carbon emissions were minimized, the optimal sailing speed was 12.9 knots, resulting in a 26.8% reduction in total CO₂ emissions compared with the baseline operating condition. When voyage time constraints were additionally considered, the optimal sailing speed was determined to be 16.9 knots, satisfying all operational constraints while reducing total CO₂ emissions by 5.4%. The proposed approach provides a practical decision-support method for sailing speed determination by integrating AI-based carbon emission prediction with operational constraints and can serve as a basis for future multi-objective voyage decision-making incorporating weather forecasting and route optimization.

Key Words : LNG carrier, CO₂ emission prediction, Sailing speed optimization, Grid Search, CII

이 연구는 2025년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

*교신저자 : 정봉규(bkjung@gun.ac.kr)

접수일 2026년 7월 20일 수정일 2026년 08월 11일 심사완료일 2026년 08월 20일

1. 서론

국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 국제해운 분야의 온실가스(Greenhouse Gas, GHG) 배출 저감을 위하여 환경규제를 지속적으로 강화하고 있다. 2023년 개정된 IMO GHG Strategy에서는 국제해운 분야의 순배출(Net-zero)을 2050년경까지 달성하는 것을 장기 목표로 제시하였으며, 2030년과 2040년을 목표로 단계적인 온실가스 감축 목표를 설정하였다[1]. 또한 IMO는 Net-Zero Framework(NZF)를 통해 국제해운 분야 최초의 글로벌 탄소가격제(Carbon Pricing Mechanism)를 포함한 온실가스 감축 이행체계 구축을 추진하고 있으며, 최종 채택은 연기되었으나 회원국 간의 실무 협의를 지속하면서 세부 가이드라인과 기술기준을 구체화하고 있다[2]. 이러한 규제 강화는 선박 설계뿐만 아니라 실제 운항 단계에서의 탄소배출 저감 기술 개발과 운항 효율 향상의 중요성을 더욱 부각시키고 있다.

IMO는 중간 단계의 온실가스 감축 규제인 Energy Efficiency Existing Ship Index(EEXI)와 Carbon Intensity Indicator(CII)를 도입하였다[3]. EEXI는 기존 선박의 설계 효율을 평가하는 지표인 반면, CII는 선박의 실제 연간 운항실적을 기반으로 단위 수송능력당 탄소배출량을 평가하는 운항 기반 환경지표이다[4]. 선박은 매년 Attained CII와 Required CII를 비교하여 A부터 E까지의 등급을 부여받으며, 일정 기간 동안 낮은 등급을 받을 경우 운항이 중단될 수 있다[4]. 따라서 최근 해운업계에서는 선박 설계 개선뿐 아니라 실제 운항 단계에서 탄소배출량을 저감할 수 있는 운항기술에 대한 관심이 크게 증가하고 있다.

선박 운항 과정에서 운항속도는 연료소모량과 탄소배출량에 가장 큰 영향을 미치는 운항 변수 중 하나이다[5,6]. 일반적으로 운항속도를 낮추면 기관 출력이 감소하여 시간당 연료소모량과 탄소배출량은 감소하지만 항해시간이 증가하게 된다. 반대로 운항속도를 높이면 항해시간은 단축되지만 추진저항이 급격히 증가하여 연료소모량과 탄소배출량이 비선형적으로 증가한다[5]. 따라서 실제 운항에서는 탄소배출량 저감과 운항 효율성, 정시성(On-time Arrival) 및 경제성 사이의 상충관계(trade-off)를 고려한 적절한 운항속도 결정이 필요하다.

이러한 배경에서 Slow Steaming은 대표적인 탄소배출 저감 운항기법으로 널리 활용되어 왔다[6,7]. 운항속도를 낮춤으로써 연료소모량과 탄소배출량을 효과적으로

감소시킬 수 있으나, 운항시간 증가에 따른 서비스 수준 저하, 계약 도착시간(Expected Time of Arrival, ETA) 지연, 선박 회전을 감소 등의 문제가 발생할 수 있다[6]. 이에 따라 최근에는 단순 감속 운항이 아닌 운항 일정, 경제성 및 IMO 환경규제를 동시에 고려하는 운항속도 최적화 연구가 활발히 수행되고 있다[7,8].

이에 따라 최근에는 운항 일정, 경제성 및 IMO 환경규제를 동시에 고려한 운항속도 결정 연구와 함께, 실제 운항 데이터를 활용한 머신러닝, 딥러닝 기반 연료소모량 및 탄소배출량 예측 연구도 활발히 수행되고 있다. Automatic Identification System(AIS), 기관 운전 데이터, 기상 및 해양환경 데이터 등을 활용하여 LightGBM, XGBoost, Random Forest 및 딥러닝 기반 모델을 적용한 연구들이 보고되었으며, 기존의 물리 기반 모델보다 높은 예측 성능을 나타내고 있다[9-14]. 이러한 예측 기술은 실제 운항환경을 효과적으로 반영할 수 있으며, 운항 의사결정을 지원하는 핵심 기술로 활용 가능성이 높아지고 있다.

그러나 기존 연구들은 크게 머신러닝, 딥러닝 기반 연료소모량 및 탄소배출량 예측 연구 [9-14]와 운항속도 최적화 연구 [7,8,15]로 구분된다. 이러한 연구는 예측 정확도 향상에 중점을 두고 있으며, 운항속도 최적화 연구는 다양한 운항조건에서의 최적 운항전략 도출에 초점을 두고 있다. 특히 운항속도 최적화 연구에서는 Dynamic Programming(DP), Mixed Integer Linear Programming(MILP), Metaheuristic Algorithms 및 Reinforcement Learning(RL) 기반의 다양한 최적화 기법이 제안되어 왔다 [7,8,15]. 그러나 이러한 방법들은 구간별 기상-해양환경 정보, ETA 및 항로 계획 등 다양한 입력정보를 요구하는 경우가 많아 실제 운항 의사결정에 직접 적용하기에는 절차가 복잡하다는 한계가 있다. 또한 AI 기반 탄소배출량 예측 연구와 운항속도 최적화 연구가 각각 독립적으로 수행되는 경우가 많아, 이미 구축된 예측모델을 실제 운항 의사결정에 활용하기 위한 실용적인 접근은 상대적으로 부족한 실정이다.

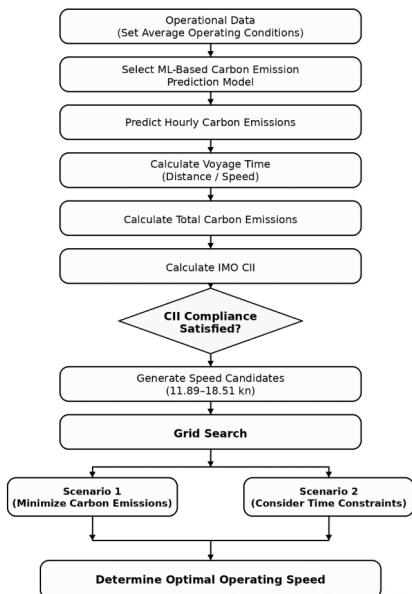
이에 본 연구에서는 머신러닝 기반 탄소배출량 예측모델을 개발하고, 이를 활용하여 LNG 운반선의 운항속도를 결정하는 방법을 제안하였다. 대상 선박의 평균 운항조건을 대표 운항조건으로 설정하고, 운항속도를 유일한 의사결정변수로 정의하였다. IMO CII 규제를 공통 제약조건으로 적용한 상태에서 (1) 동일 항해거리에서 총 탄소배출량을 최소화하는 시나리오와 (2) 허용 가능한 운항시간 증가를 고려하는 시나리오를 구성하여 비교·분석하

였다. 이를 위해 11.89~18.51 knot 구간을 0.5 knot 간격으로 구분한 14개의 속도 후보에 대해 Grid Search를 수행하고, 각 속도에서 AI 모델을 이용하여 시간당 탄소배출량을 예측한 후 동일 항해거리 기준의 총 탄소배출량, 운항시간 및 CII 만족 여부를 종합적으로 평가하였다. 제한한 방법은 복잡한 항로 최적화 기법이나 실시간 기상·해양환경 정보 없이도 기존 AI 기반 탄소배출량 예측모델을 실제 운항속도 결정에 활용할 수 있는 실용적인 의사결정 지원 방법을 제시한다. 또한 동일한 예측모델을 활용하더라도 운항 목적과 제약조건에 따라 최적 운항속도가 어떻게 달라지는지를 비교함으로써, 실제 운항환경에서 활용 가능한 운항 전략 수립 기준을 제시하고자 한다.

2. 운항속도 최적화 방법

2.1 프레임워크

본 연구에서는 머신러닝 기반 탄소배출량 예측모델을 이용하여 LNG 운반선의 최적 운항속도를 결정하는 절차를 제안하였다. 전체 과정은 [Fig. 1]과 같이 시간당 탄소배출량 예측, 항해 탄소배출량 및 CII 계산, 운항속도 후보 생성, Grid Search를 통한 최적 운항속도 결정의 단계로 구성된다.



[Fig. 1] Flowchart of Study

먼저 대상 선박의 평균 운항조건을 대표 운항조건으로 설정하고, 운항속도를 제외한 모든 입력변수는 평균값으로 고정하였다. 이후 운항속도만을 변화시키면서 AI 기반 탄소배출량 예측모델을 이용하여 각 속도에서의 시간당 탄소배출량을 예측하였다.

예측된 시간당 탄소배출량을 이용하여 동일 항해거리 기준의 총 탄소배출량과 Attained CII를 계산하였으며, 이를 Required CII와 비교하여 IMO 규제 만족 여부를 평가하였다. 마지막으로 11.89~18.51 knot 범위 내의 운항속도 후보(0.5 knot 간격, 총 14개)를 대상으로 Grid Search를 수행하여 운항 시나리오별 최적 운항속도를 도출하였다.

2.2 AI 기반 탄소배출량 예측

본 연구에서는 LNG 운반선의 실제 운항 데이터를 이용하여 AI 기반 탄소배출량 예측모델을 개발하였다. 모델 학습에는 약 7개월 동안 10분단위로 수집된 약 23만 개의 운항 데이터를 사용하였다. 입력변수는 기관 운전 데이터, 선박 운항 정보 및 기상·해양환경 데이터를 포함한 총 25개 변수로 구성하였으며, 출력변수는 시간당 탄소배출량(ton CO₂/h)으로 설정하였다.

모델 학습을 위해 전체 데이터셋은 무작위(Random Shuffle) 방식으로 학습용(Training)과 검증용(Test) 데이터셋을 8:2 비율로 분할하였다. 무작위 분할은 다양한 운항조건이 학습 및 검증 데이터에 고르게 포함되도록 하여 특정 항차나 운항환경에 따른 편향을 최소화하기 위해 적용하였다.

모델 성능을 비교하기 위하여 Bi-LSTM, LightGBM 및 XGBoost를 적용하였으며, RMSE(Root Mean Square Error), MAE(Mean Absolute Error), R²(Coefficient of Determination) 및 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 이용하여 예측성능을 평가하였다.

성능평가 결과, XGBoost 모델이 RMSE 0.1737 t/h, MAE 0.0659 t/h, R² 0.9864 및 MAPE 2.9152%로 가장 우수한 예측성능을 나타내어 최종 탄소배출량 예측모

〈Table 1〉 Performance Comparison of AI-Based Carbon Emission Prediction Models

Model	RMSE (t/h)	MAE (t/h)	R ²	MAPE (%)
Bi-LSTM	0.2277	0.0956	0.9744	4.5463
LGBM	0.1742	0.0754	0.9863	3.1714
XGBoost	0.1737	0.0659	0.9864	2.9152

델로 선정하였다(Table 1). 따라서 본 연구에서는 XGBoost 기반 예측모델을 이용하여 운항속도별 시간당 탄소배출량을 예측하였다.

운항속도 변화에 따른 탄소배출량의 영향을 분석하기 위해 운항속도를 제외한 모든 입력변수는 대표 운항조건으로 고정하였다. 운항속도는 11.89~18.51 knot 범위에서 0.5 knot 간격으로 변화시켰으며, 각 속도 조건에 대해 XGBoost 모델을 이용하여 시간당 탄소배출량을 예측하였다. 예측된 시간당 탄소배출량은 총 탄소배출량과 CII를 산정하고, 운항 시나리오별 최적 운항속도를 결정하는 데 활용하였다.

2.3 Grid Search 기반 운항속도 최적화

AI 모델에서 예측한 시간당 탄소배출량을 이용하여 동일 항해거리에서의 총 탄소배출량을 계산하였다.

항해시간은 항해거리와 운항속도를 이용하여 Eq(1)과 같이 계산된다.

$$T(v) = D/v \quad \text{Eq(1)}$$

여기서 D는 항해거리(nm), V는 운항속도(knot), T는 항해시간(h)을 의미한다. 따라서 총 탄소배출량은 예측된 시간당 탄소배출량과 항해시간의 곱으로 Eq(2)와 같이 계산하였다.

$$E_{\text{total}} = E_{\text{hour}} \times T(v) \quad \text{Eq(2)}$$

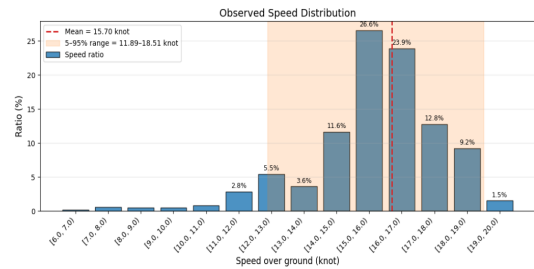
계산된 총 탄소배출량을 이용하여 IMO CII 가이드라인에 따라 Eq. (3)을 이용해 Attained CII를 산정하였으며, Attained CII가 Required CII 이하(Attained CII ≤ Required CII)를 만족하는지를 기준으로 운항속도의 규제 적합 여부를 판단하였다.

$$CII_{\text{attained}}(v) = CO_2(v)/(DWT \times Distance) \quad \text{Eq(3)}$$

2.4 Grid Search-Based Sailing Speed Optimization

본 연구에서는 운항속도를 유일한 의사결정변수로 설정하였으므로, Grid Search 기반 완전탐색 기법을 적용하여 최적 운항속도를 도출하였다. 운항속도 후보는 대표 운항조건에서 산출된 운항속도의 5~95% 분위수(Percentile) 범위를 기준으로 설정하였으며, 11.89~18.51 knot 구간을 0.5 knot 간격으로 구분하여 총 14개의 후보를 생성하였다.

각 속도 후보에 대하여 AI 모델을 이용해 시간당 탄소배출량을 예측하고, 이를 기반으로 동일 항해거리에서의 총 탄소배출량과 Attained CII를 계산하였다. 이후 각



[Fig. 2] Observed Speed Distribution

운항속도에 대하여 IMO CII 규제 만족 여부를 확인하고, 운항 시나리오별 평가기준에 따라 최적 운항속도를 선정하였다.

최적 운항속도는 두 가지 운항 시나리오를 대상으로 도출하였다. Scenario 1은 동일 항해거리에서 총 탄소배출량을 최소화하는 운항속도를 선정하는 시나리오이다. Scenario 2는 IMO CII 규제를 만족하는 조건에서 기준 운항시간 대비 허용 지연율(allowable delay rate)을 5%로 설정하여 최적 운항속도를 선정하는 시나리오이다. 허용 지연율은 기준 운항시간 대비 허용 가능한 운항시간 증가 비율을 의미하며, 본 연구에서는 운항 효율성을 고려하여 최대 허용 운항시간을 기준 운항시간의 105%로 설정하였다. 따라서 최대 허용 운항시간을 초과하는 운항속도는 후보에서 제외하였다.

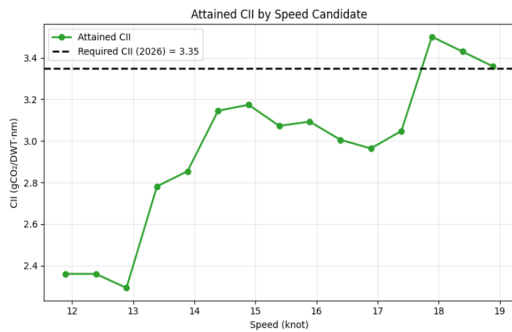
3. 운항속도 최적화 결과 및 분석

3.1 운항속도에 따른 탄소배출량 및 CII 변화

운항속도 변화에 따른 총 탄소배출량, Attained CII 및 CII 규제 만족 여부를 Table 2, [Fig. 3]에 나타내었다. 운항속도가 증가할수록 항해시간은 감소하였으나 시간당 탄소배출량은 증가하는 경향을 보였다. 이로 인해 총 탄소배출량은 운항속도에 따라 단조롭게 변화하지 않았으며, 운항시간 감소와 시간당 탄소배출량 증가의 상호작용으로 특정 운항속도에서 최소값을 나타내었다. 총 탄소배출량은 12.9 knot에서 29.98 tCO₂로 가장 낮게 나타났으며, 이후 운항속도가 증가할수록 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 운항시간 단축 효과보다 기관 출력 증가에 따른 시간당 탄소배출량 증가가 더욱 크게 작용하였기 때문이다.

〈Table 2〉 Representative results according to speed

Speed (knot)	Time (h)	Total CO ₂ (t)	Attained CII	Remarks
11.89	12.38	30.87	2.361	Lowest candidate speed
12.9	11.42	29.98	2.293	Minimum total CO ₂ emission
13.89	10.59	37.33	2.854	–
14.39	10.23	41.14	3.146	First speed satisfying time constraint
15.70	9.37	40.98	3.134	Baseline operation
16.9	8.71	38.76	2.964	Optimal speed (Scenario 2)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
17.39	8.46	–	< 3.35	Last CII-compliant speed
17.89	8.22	–	> 3.35	First CII non-compliant speed



[Fig. 3] Attained CII by Speed Candidate

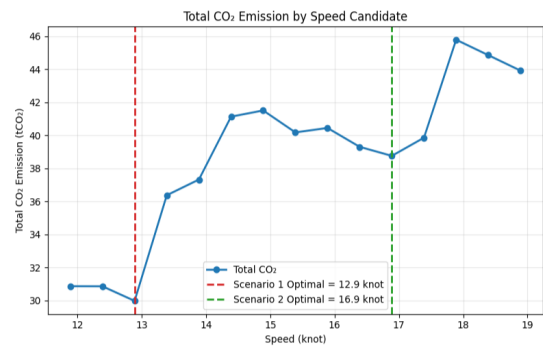
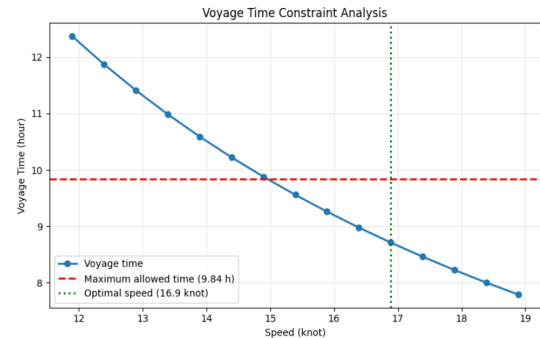
한편 [Fig. 3]와 같이 Attained CII 역시 운항속도가 증가함에 따라 지속적으로 증가하였다. 〈Table 2〉에서 확인할 수 있듯이 17.39 knot까지는 Attained CII가 Required CII 이하를 유지하여 IMO CII 규제를 만족하였으나, 17.89 knot부터는 Required CII를 초과하여 규제를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 운항속도 증가에 따른 운항시간 단축에는 한계가 있으며, IMO CII 규제를 고려할 경우 운항속도는 일정 범위 이하에서 운항되어야 함을 확인하였다.

3.2 시나리오별 최적 운항속도 도출

운항 시나리오별 최적 운항속도 산정 결과를 〈Table 3〉에 나타내었으며, 운항속도에 따른 총 탄소배출량과 운항시간 변화를 각각 [Fig. 4]와 [Fig. 5]에 나타내었다. 〈Table 3〉과 [Fig. 4]와 같이 Scenario 1에서는 동일 항해거리에서 총 탄소배출량을 최소화하는 것을 목표로 하였으며, 최적 운항속도는 12.9 knot로 도출되었다. 이때 총 탄소배출량은 29.98 tCO₂로 기준 운항 대비 26.84% 감소하였다.

〈Table 3〉 Comparison of Optimal Sailing Speeds Under Different Operational Scenarios

Parameter	Baseline	Scenario 1	Scenario 2
Objective	Current operation	Minimize total CO ₂ emissions	Minimize CO ₂ under voyage time constraint
speed (knot)	15.70	12.9	16.9
time (h)	9.37	11.42	8.71
Total CO ₂ (t)	40.98	29.98	38.76
CO ₂ reduction (%)	–	26.84	5.42
Attained CII (gCO ₂ /dwt-nm)	3.134	2.293	2.964
CII compliance	Yes	Yes	Yes

[Fig. 4] Total CO₂ Emission by Speed Candidate

[Fig. 5] Voyage Time Constraint Analysis

반면 Scenario 2에서는 IMO CII 규제를 만족하는 조건에서 기준 운항시간 대비 허용 지연율 5%를 고려하였다. [Fig. 5]와 같이 허용 지연율 5%를 적용한 최대 허용 운항시간은 9.84 h이며, 12.9 knot는 시간 제약을 만족하지 못하였다. 반면 16.9 knot에서는 운항시간이 최대 허용 운항시간 이하를 만족하였으며, Attained CII 또한 Required CII 이하를 유지하는 것으로 확인되었

다. 이에 따라 시간 제약과 IMO CII 규제를 동시에 만족하는 조건에서 16.9 knot를 최적 운항속도로 선정하였으며, 총 탄소배출량은 38.76 tCO₂로 기준 운항 대비 5.42% 감소하였다.

특히 Scenario 2에서는 기준 운항 대비 항차당 약 2.22 tCO₂의 탄소배출량 저감이 가능한 것으로 나타났으며, 연간 운항 항차 수를 고려할 경우 이에 비례한 연간 저감 효과를 기대할 수 있다. 또한 Required CII는 감축계수에 따라 단계적으로 강화되는 구조이므로, 현재 확보된 Attained CII의 여유분은 향후 규제 강화에 따른 CII 등급 저하를 지연시키는 데 기여할 수 있다.

두 시나리오 모두 IMO CII 규제를 만족하였으나, Scenario 1은 총 탄소배출량 최소화에 중점을 둔 반면, Scenario 2는 운항시간 제약을 함께 고려하여 최적 운항속도를 도출하였다.

3.3 시나리오 비교 및 고찰

Scenario 1과 Scenario 2의 비교 결과, 탄소배출량을 최소화하는 운항속도와 실제 운항환경에서 적용 가능한 운항속도는 서로 다를 수 있음을 확인하였다. Scenario 1에서는 총 탄소배출량 최소화를 목표로 12.9 knot가 최적 운항속도로 도출되었으나, 해당 운항속도에서는 운항시간이 기준 운항시간 대비 약 21.8% 증가하여 실제 운항계획에 적용하기에는 한계가 있었다. 반면 Scenario 2에서는 운항시간 제약과 IMO CII 규제를 함께 고려함으로써 16.9 knot를 최적 운항속도로 도출하였으며, 탄소배출량을 저감하면서도 운항 일정과 환경규제를 동시에 만족할 수 있음을 확인하였다.

이러한 결과는 탄소배출량만을 기준으로 운항속도를 결정하는 접근이 실제 선박 운항에서는 반드시 최적의 의사결정으로 이어지지 않음을 시사한다. 특히 LNG 운반선은 화물 인도 일정과 정시 운항이 중요한 선종이므로, 탄소배출량 저감과 운항 효율성을 함께 고려한 운항속도 결정이 요구된다. 본 연구에서 제안한 방법은 AI 기반 탄소배출량 예측 결과를 활용하여 운항 목적과 제약조건에 적합한 운항속도를 정량적으로 도출할 수 있음을 확인하였으며, 이는 IMO CII 규제 대응과 실제 운항계획 수립을 위한 의사결정 지원에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. Conclusions

본 연구에서는 머신러닝 기반 탄소배출량 예측모델을

개발하고 이를 활용하여 LNG 운반선의 운항속도를 결정하는 방법을 제안하였다. 실제 운항 데이터를 이용하여 Bi-LSTM, LightGBM 및 XGBoost 모델의 예측 성능을 비교한 결과, XGBoost가 가장 우수한 성능(RMSE 0.1737 t/h, MAE 0.0659 t/h, R² 0.9864, MAPE 2.9152%)을 나타내어 최종 탄소배출량 예측모델로 선정하였다. 이후 대표 운항조건에서 운항속도만을 변화시키며 시간당 탄소배출량을 예측하고, 동일 항해거리 기준의 총 탄소배출량과 Attained CII를 산정하여 Grid Search 기반으로 최적 운항속도를 도출하였다.

운항 시나리오별 분석 결과, 총 탄소배출량 최소화를 목표로 한 Scenario 1에서는 최적 운항속도가 12.9 knot로 도출되었으며, 기준 운항 대비 총 탄소배출량을 26.84% 저감할 수 있었다. 반면 운항시간 제약과 IMO CII 규제를 동시에 고려한 Scenario 2에서는 16.9 knot가 최적 운항속도로 선정되었으며, 총 탄소배출량은 기준 운항 대비 5.42% 감소하면서도 허용 운항시간과 IMO CII 규제를 모두 만족하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 탄소배출량 최소화를 위한 운항속도와 실제 운항환경에서 적용 가능한 운항속도가 서로 다를 수 있음을 보여주었다.

본 연구에서 제안한 방법은 복잡한 항로 최적화 알고리즘이나 실시간 기상·해양환경 정보를 사용하지 않고도 기존 머신러닝, 딥러닝 기반 탄소배출량 예측모델을 실제 운항속도 결정에 활용할 수 있는 실용적인 의사결정 지원 방법을 제시하였다. 또한 운항 목적과 제약조건에 따라 적절한 운항속도를 정량적으로 도출할 수 있음을 확인함으로써, IMO CII 규제 대응과 LNG 운반선의 운항계획 수립에 활용 가능성을 제시하였다.

한편 본 연구에서 도출된 예측모델과 최적 운항속도 구간(11.89~18.51 knot)은 분석 대상 LNG 운반선 1척의 선형, 기관 특성, 실제 항로 및 운항 패턴에 기반한 결과이므로, 선종, 선형, 추진기관 및 운항항로가 상이한 타 선박에 동일하게 적용하기에는 한계가 있다. 따라서 타 선박에 본 연구의 방법론을 적용하기 위해서는 해당 선박의 실제 운항데이터를 활용한 예측모델의 재학습(retraining) 및 성능 검증 과정이 선행될 필요가 있다.

향후에는 다양한 선종과 항로, 다수 선박의 운항데이터로 연구 대상을 확대하고, 실시간 기상·해양환경 정보와 실제 운항일정 등 동적인 운항조건을 반영하여 최적 운항속도 결정 방법의 적용성과 일반화 가능성을 검토할 필요가 있다. 또한 다양한 선박에 대한 적용성을 높이기 위해 선박별 예측모델의 재학습 방안뿐만 아니라, 선종,

선형, 기관 특성 및 운항 패턴 등의 차이를 통합적으로 반영할 수 있는 통합 예측모델에 대한 추가 연구가 필요하다. 이를 통해 개별 선박에 특화된 모델과 다양한 선박에 공통적으로 적용 가능한 모델의 적용 범위 및 성능을 비교·검토하고, 보다 일반화된 탄소배출량 예측 및 최적 운항속도 결정 체계를 구축할 필요가 있다. 나아가 경제성 및 연료비 등을 함께 고려하는 다목적 의사결정 기법으로 연구를 확장할 필요가 있다.

아울러 본 연구에서 제시한 최적 운항속도 결정은 탄소배출량 저감뿐만 아니라 선박의 운항경제성과도 연계될 수 있다. 동일한 연료를 사용하는 조건에서는 탄소배출량 감소가 연료소모량 감소와 밀접하게 관련되므로, 향후에는 최적 운항속도 적용에 따른 탄소배출 저감 효과를 연료사용량 및 연료비 절감 효과로 환산하여 정량적으로 평가할 필요가 있다. 또한 CII 규제의 감축 요구 수준이 연도별로 단계적으로 강화되고 있는 점을 고려하여, 연도별 CII 기준 변화에 따른 허용 운항속도 범위와 최적 운항속도의 변화를 분석할 필요가 있다.

이와 함께, 동일한 탄소배출량 예측모델과 Grid Search 방법을 활용하더라도, 탄소배출량을 최소화하는 문제와 일정한 탄소배출량 상한 또는 CII 기준을 만족하는 범위에서 운항속도를 최대화하는 문제는 서로 다른 의사결정 목적을 갖는다. 전자는 탄소배출량 및 연료소모량 저감을 우선하는 반면, 후자는 규제기준을 만족하면서 운항시간 단축과 정시성 확보를 우선하는 문제이다. 따라서 향후에는 선사의 운항목적에 따라 두 최적화 문제를 구분하여 적용하고, 환경성, 경제성 및 운항 정시성을 종합적으로 고려할 수 있는 의사결정 체계로 연구를 확장할 필요가 있다.

REFERENCES

- [1] International Maritime Organization, 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, Resolution MEPC.377(80), London, UK, 2023.
- [2] International Maritime Organization, IMO Net-Zero Framework, International Maritime Organization, London, UK, 2025.
- [3] International Maritime Organization, 2021 Guidelines on the Operational Carbon Intensity Reduction Measures and Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI), Resolution MEPC.328(76), London, UK, 2021.
- [4] International Maritime Organization, 2022 Guidelines on Operational Carbon Intensity Indicators and the Calculation Methods (CII Guidelines, G1), Resolution MEPC.352(78), London, UK, 2022.
- [5] N.Bialystocki and D.Konovessis, "On the Estimation of Ship's Fuel Consumption and Speed Curve: A Statistical Approach," *Journal of Ocean Engineering and Science*, Vol.1, No.2, pp.157-166, 2016.
- [6] J.J.Corbett, H.Wang and J.J.Winebrake, "The Effectiveness and Costs of Speed Reductions on Emissions from International Shipping," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol.14, No.8, pp.593-598, 2009.
- [7] H.N.Psaraftis and C.A.Kontovas, "Speed Models for Energy-Efficient Maritime Transportation: A Taxonomy and Survey," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.26, pp.331-351, 2013.
- [8] A.Fagerholt, G.Laporte and I.Norstad, "Reducing Fuel Emissions by Optimizing Speed on Shipping Routes," *Journal of the Operational Research Society*, Vol.61, No.3, pp.523-529, 2010.
- [9] R.Yan, S.Wang and H.N.Psaraftis, "Data Analytics for Fuel Consumption Management in Maritime Transportation: Status and Perspectives," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.155, Article 102489, 2021.
- [10] Z.Hu, T.Zhou, R.Zhen and X.Yan, "A Two-Step Strategy for Fuel Consumption Prediction and Optimization of Ocean-Going Ships," *Ocean Engineering*, Vol.249, Article 110904, 2022.
- [11] P.Agand, A.Kennedy, T.Harris, C.Bae, M.Chen and E.J.Park, "Fuel Consumption Prediction for a Passenger Ferry Using Machine Learning and In-Service Data: A Comparative Study," *Ocean Engineering*, Vol.284, Article 115271, 2023.
- [12] P.Han, S.Li, Z.Liu, Z.Sun and C.Yan, "Ship Fuel Oil Consumption Prediction at Sea and in Port Considering Sustainable Maritime Industry: A Comparative Study of Machine Learning and Deep Learning Approaches," *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, Vol.101, No.4, pp.239-260, 2025.
- [13] X.Li, Y.Du, Y.Chen, Z.Wang, Y.Liu and X.Yan, "Data Fusion and Machine Learning for Ship Fuel Efficiency Modeling: Part I—Voyage Report Data and Meteorological Data," *Communications in Transportation Research*, Vol.2, Article 100074, 2022.
- [14] J.Kim, S.Lee and Y.Shin, "Fuel Consumption Prediction and Optimization Model for Pure Car/Truck Transport Ships," *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.11, No.6, Article 1231, 2023.
- [15] H.N.Psaraftis and C.A.Kontovas, "Ship Speed Optimization: Concepts, Models and Combined Speed-Routing Scenarios," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol.44, pp.52-69, 2014.

김 현 주(Hyun-Ju Kim)

[정회원]



- 2017년 1월 : 한국해양대학교
기관공학(공학사)
- 2023년 8월 : 부경대학교 산업및
데이터공학과(공학석사)
- 2025년 8월 : 국립부경대학교
산업및데이터공학과(박사수료)

〈관심분야〉

선박 빅데이터, 인공지능, 머신러닝, 딥러닝

김 동 현(Dong-Hyun Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 부경대학교 조선해
양공학(공학사)
- 2019년 2월 : 국립부경대학교
조선해양공학(공학박사)
- 2023년 3월 ~ 현재 : 국립부경대
학교 미래융합대학 스마트기계모
빌리티전공 조교수

〈관심분야〉

해운 데이터 분석, 리스크 평가, 인공지능

정 봉 규(Bong-Kyu Jung)

[정회원]



- 1995년 2월 : 부산수산대학교 어
업공학과(수산학사)
- 2014년 2월 : 한국해양대학교
해양경찰학과(해양경찰학박사)
- 2025년 8월 : 국립부경대학교
수산물리학과(이학박사)

- 2022년 3월 ~ 현재 : 경상국립대학교 해양과학대학 해
양경찰시스템학과 부교수

〈관심분야〉

해양경찰 행정, 정책 및 과학기술 해상교통 정보, 통신 및
선박 안전 시스템