

전과정평가를 고려한 장기 운송 계약 LNG 선박의 선속 최적화 방안 A Method for Optimization the Speed of a Long-term Transport Contract LNG Carriers Considering Life Cycle Assessment

서강현* · 최혜진* · 김영민* · 이지웅** · 이재웅***†

Kanghyun Seo*, Hyejin Choi*, Youngmin Kim*, Ji-Woong Lee**
and Jae-Ung Lee***†

(Received 21 February 2023, Revision received 12 June 2023, Accepted 14 June 2023)

초록 : 일반적인 해상 운송 계약상의 선속은 경제적 측면만을 고려하여 결정된다. 하지만, 강화된 환경정책 및 규제에 따른 환경영향을 반영하기 위한 새로운 선속 결정방법이 요구되고 있다. 본 연구에서는 전과정평가를 이용한 환경비용을 추가적으로 고려하여 장기 운송 계약된 액화천연가스 운반선의 최적속도를 결정하고자 하였다. 이를 위해 신조선가, 유지보수비용, 연료비용을 합산하여 경제성 비용을 산정하였고, 선박의 전주기 동안 5대 대기오염물질의 배출량을 계산 및 비용화하여 환경비용을 산정했다. 경제적 비용만을 고려할 경우에는 16 노트로 운항하는 것이 최적이지만 환경적 요인을 동시에 고려할 때는 14 노트가 가장 유리한 결과로 나타났다. 본 연구의 결과는 장기 운송 계약 선박의 최적 속도를 결정하는 데 있어 친환경적인 인식의 전환이 필요함을 시사한다.

키워드 : 운송계약, 경제성 비용, 환경 비용, 최적 선속, 전과정평가

Abstract : In a typical maritime contract, the ship speed is determined by considering only economic aspects. However, there is a need for new speed decision methods that reflect the environmental impacts of enhanced environmental regulations. In this study, environmental costs were considered using life cycle assessment to determine the optimal speed of LNG carriers contracted for long-term transportation. To this end, the economic cost was calculated by adding the new building, maintenance, and fuel-costs, and the environmental cost was determined by calculating and costing the emissions of the five air pollutants during the lifecycle of the ship. As a result, considering only the economic cost, a sailing at 16 knot is optimal; however, 14 knot is the most advantageous result considering environmental factors at the same time. The results of this study suggest that a eco-friendly shift is needed in determining the optimal speed of vessels with long-term transportation contracts.

Key Words : Transport Contract, Economic Cost, Environmental Cost, Optimal Speed, Life Cycle Assessment

*** 이재웅(<https://orcid.org/0000-0002-2839-0448>) : 부교수, 한국해양대학교 기관시스템공학부

E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662

*서강현(<https://orcid.org/0000-0002-6495-1820>), 최혜진(<https://orcid.org/0000-0002-4265-9992>), 김영민(<https://orcid.org/0000-0003-4291-7151>) : 대학원생, 한국해양대학교 해사IT공학과

**이지웅(<https://orcid.org/0000-0002-6101-7389>) :

부교수, 한국해양대학교 기관시스템공학부

***† Jae-Ung Lee(<https://orcid.org/0000-0002-2839-0448>) : Associate Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University.

E-mail : julee@kmou.ac.kr, Tel : 051-410-4662

*Kanghyun Seo(<https://orcid.org/0000-0002-6495-1820>), Hyejin Choi(<https://orcid.org/0000-0002-4265-9992>), Youngmin Kim (<https://orcid.org/0000-0003-4291-7151>) : Graduate student, Division of Marine Information Technology, Korea Maritime and Ocean University.

**Ji-Woong Lee(<https://orcid.org/0000-0002-6101-7389>) : Associate Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University.

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

해상 운송 계약상에 정의된 선박의 항해 속도는 합리적인 범위 내에서 가능한 한 최고의 속도로 운항하는 것을 의미한다.¹⁾ 그러나 현재 선박으로부터 발생하는 대기오염물질의 감소 규제는 선박의 속도를 감소시키는 요인이 되었다.

IMO(International Maritime Organization, 국제해사기구)에서 2021년에 발표한 GHG(Greenhouse Gas, 온실가스) 연구에 따르면 세계의 온실가스 총 배출량 중에 선박으로 기인한 배출량은 2018년 기준 약 3%이며, 2050년에는 17%까지 증가할 것으로 전망하고 있다.²⁾ 이에 IMO에서는 선박에서 발생하는 온실가스 배출량을 감소시키기 위해 SEEMP(Ship Energy Efficiency Management Plan, 선박에너지효율관리계획)의 이행, 신재생에너지 적용 및 선박 저속운항 등과 같은 완화 조치를 권고한 상황이다.³⁻⁵⁾ 그 중 저속운항 조치는 온실가스 완화 및 운항 효율을 개선시킬 수 있는 가장 신속하고 용이한 방안으로 알려져 있다.⁶⁻¹¹⁾ 하지만, 저속운항 조치는 연료 소비 및 대기오염물질 저감에 따른 환경적 이점은 가질 수 있으나, 계약 화물량 적시 수송을 위한 선대 규모의 확장이 불가피하므로 경제적 관점에서는 오히려 비효율적일 수 있다. 따라서 기존의 CAPEX(Capital Expenditure, 초기투자비용)와 OPEX(Operational Expenditure, 운용비용) 중심의 경제적 관점과 환경적 관점(규제)을 모두 충족시킬 수 있는 새로운 최적 선속 결정 방안이 필요한 시점이다. 환경적 관점에서의 환경비용은 LCA(Life Cycle Assessment, 전과정평가)를 통해 최종 산출할 수 있다. LCA는 제품이나 서비스의 전주기에 걸친 환경영향을 평가할 수 있는 분석 도구이다.

이미 IMO에서는 2018년부터 선박 연료의 추출, 이송, 생산, 운송, 사용 및 폐기까지의 전주기를 포함하는 LCA를 적용한 GHG/탄소집약도 지침을 개발 중이다.¹²⁻¹⁴⁾ 뿐만 아니라, EU에서는 전과정평가 기반 프레임워크를 개발하여 모든 제품과 서비스의 환경영향을 분석 및 모니터링하고 있는

중이다.¹⁵⁾ 이처럼 LCA는 국제적으로 광범위하게 사용되고 있다.

환경비용 산정 관련 연구로 선박 추진장치 성능을 비교하고자 수행한 연구¹⁶⁾가 있었지만 장기 운송계약 선박의 선속별 환경비용이 선박운용에 미치는 영향을 분석한 사례는 없었다. 따라서 본 논문에서는 LNG (Liquefied Natural Gas, 액화천연가스) 장기 운송프로젝트에 투입된 선박의 선속별 경제성과 환경성을 함께 고려한 최적의 선속을 결정하는 방안을 제안하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상의 개요와 범위

본 연구의 대상선박은 연간 280만 톤의 LNG 화물을 20년간 미국 Sabine Pass에서 한국의 인천 가스공사로 운송하는 프로젝트에 투입된 선박의 기본 규격을 적용하였다. Table 1은 대상선박의 기본사항과 운항정보를 나타낸다. 연구의 범위는 LNG 선박의 건조, 운항 및 폐선 단계에서 발생하는 경제적, 환경적 비용을 포함한다. 이를 위해 계약기간, 프로젝트 항로, 연간 계약물량 및 화물창 크기와 같은 기본적인 데이터를 활용하였다.

Table 1 174,000 m³ LNG carrier general specification

General Specification	
Tank filling limit	98.5%
LNG density	0.454
LNG tanker size	174,000 m ³
Engine type	2 stroke, Slow speed, Dual fuel engine
Normal Continuous Rating	21 knot × 71.4 rpm
Sailing route	Incheon - Sabine pass
Sailing distance	9987 nm
Dock repair period	42 days
Shaft loss efficiency	98~99%
Boil-Off Rate	0.15%
Engine margin	20%

3. 최적 선속 결정 방안

대상 선박의 최적 선속 결정시 기존에는 경제성 측면에서 Fig. 1에서와 같은 신조선가, 유지보수비용 및 연료비용 요소들을 분석하여 그 비용이 가장 낮게 나타나는 구간을 결정하였지만, 본 연구에서는 선박의 건조, 운항, 폐선까지의 주기에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 비용화하여 산정한 환경비용을 기존의 경제성 비용에 합산하여 본 연구에서 제안하는 전주기 비용을 산출하였다. 합산된 비용을 비교하여 가장 낮은 비용을 나타내는 선속을 최적선속으로 결정하였다.

3.1 경제성 비용 산정 방안

경제성 비용은 많은 부분들을 고려해야 하지만, 본 연구에서는 그 가운데 3가지 요소인 프로젝트에 투입될 선박의 신조선가, 유지보수비용 및 연료비용을 포함하여 20년간 선속별 총 비용으로 나타내었다.

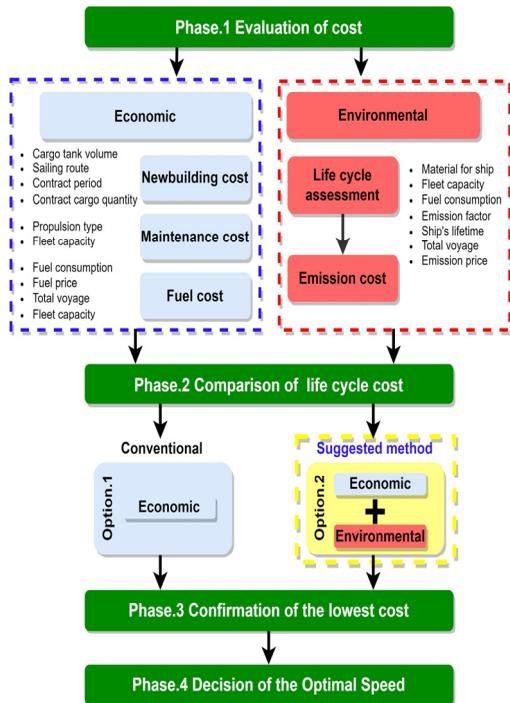


Fig. 1 Flow-chart to make decision the optimal speed

Table 2는 경제성 비용 산정을 위한 각 요소들의 단가를 나타낸다. CAPEX 사항인 신조선가는 Table 3과 같이 선속별로 연간 계약 화물량 달성을 위해 투입되는 선박의 척수를 반영하였는데, 계산상으로는 15 knot의 선속으로 운항하여도 6척차가 가능하여 19~16 knot 선속구간과 같이 6척의 선박이 필요한 것으로 나타나지만, 이는 선박의 예상치 못한 정선 또는 2.5년 주기의 입거수리가 고려되지 않은 것이다.

Table 2 Consideration items for economic cost

Items	Price
Newbuilding cost ⁱ⁾	230 (M\$/vessel)
Maintenance cost ⁱⁱ⁾	0.6 (M\$/year-vessel)
LNG ⁱⁱⁱ⁾	527 (\$/ton fuel)
MGO ^{iv)}	637 (\$/ton fuel)

i) Clarkson research average price on 2022

ii) Engine maker information

iii) Unit conversion : 1 toe = 52 mmBtu

iii) LNG price : 4 \$/mmBtu (Average. 6 month) (Source by: Henry Hub Natural Gas Price)

iv) Marine Gas Oil - 6 month average price from 2022.07

Table 3 Required vessels for completion of contract

Contract volume/Year	2,800,000 ton			
Cargo volume/Voyage	77,811 ton			
Required voyage/Year	36			
Normal seagoing distance/Voyage	9,807 nm			
Maneuvering day/Voyage	5			
Ship's speed	19~16	15~14	13~12	11
Normal seagoing day/Voyage	44~52	55~59	63~69	75
Total sailing day/Voyage	49~57	60~64	68~74	80
Feasible voyage/Year	6~7	5~6	4~5	4
Required Vessels	6	7	8	9

이에 본 연구에서는 이러한 운항 외 고려해야 할 사항 중 입거수리를 고려하였고, 이에 Table 3과 같이 선속구간별 투입되어야 하는 척수가 결정되었다. 또한 OPEX에 해당하는 유지보수비용의 경우, 본 연구의 대상선박 엔진의 제조사로부터 취득한 정보를 반영하였다. 그리고 연료비용은 대상선박과 동일한 174K 현존 LNG선의 엔진출력 및 선속구간별 연료사용량 데이터를 활용하여 항차당 선속 시나리오별로 운항하는 시간을 반영하여 산정하였다.

3.2 환경성 비용 산정 방안

환경성 비용 산정은 먼저, 국제표준(ISO14040~14043)¹⁷⁾을 토대로 선박의 전주기 환경영향을 확인할 수 있는 방법¹⁸⁾인 전과정평가를 Fig. 2에서 정의된 4단계와 같이 수행하였다. 이를 통해 선박의 전주기 동안 발생하는 대표적인 5가지 대기오염물질인 이산화탄소(CO₂), 질소산화물(NOx), 비메탄 휘발성 유기화합물(NMVOC), 황산화물(SOx), 미립자물질(PM_{2.5})의 배출량을 산출하였다.

이를 위해, Fig. 3과 같이 대상 선박의 엔진 제작에 필요한 재료와 운영하는 단계, 20년간 운항 연료인 LNG와 MGO 수급 및 사용, 폐선 시 재활용 및 폐기 단계를 포함하여 모델링하였다. 또한 선박의 전주기 환경영향 평가를 위해 CML 2001 방법론을 적용하였다. 본 연구에서는 전과정평가 상용 소프트웨어인 GaBi(독일)의 데이터베이스를

통해 선박 엔진의 건조와 폐선단계에서의 배출량을 산출하였고, 운항 단계에서의 배출량은 Table 4와 5에서 나타난 IMO의 대기오염물질별 배출계수를 적용하였다.²⁾

Table 4 Emission factors for various fuel type

(g pollutant/g fuel)	LNG	MGO
CO ₂	2.75	3.206
SOx	0.0000317	0.0014

Table 5 Emission factors for LNG fueled engine

(g pollutant/kWh)	LNG fueled diesel engine
NOx	3.4
PM2.5	0.0092
NMVOC	0.4

$$EM_i = FC_i \times EF_f \tag{1}$$

$$EM = FC_i \times EF_f \times (D/V)$$

EM_i : The hourly emission (g pollutant/hr)
 EM : Total emission
 FC_i : The hourly fuel consumption (g fuel)
 EF_f : Fuel emission factor (g pollutant/g fuel)
 D : Distance (NM)
 V : Ship's speed (knot)

$$EM_i = EF_e \times W_i \tag{2}$$

$$EM = EF_e \times W_i \times (D/V)$$

EM_i : The hourly emission (g pollutant/hr)
 EM : Total emission
 EF_e : Energy emission factor (g pollutant/kWh)
 W_i : Engine's power output (kW)
 D : Distance (NM)
 V : Ship's speed (knot)

운항 단계에서의 CO₂와 SOx 발생량은 연료기반 배출계수에 따라 식 (1)과 같이 연료사용량과의 곱으로 산정하였다. NOx, PM_{2.5} 및 NMVOC 발생량은 에너지기반 배출계수와 엔진 유형에 따른 출력과의 곱으로 식 (2)와 같이 산정하였다. 산출된 20년간의 배출량은 비용화를 하기 위해 유럽에서 제정한 대기오염물질별 1 ton당 단가를 적용하였다.¹⁹⁾

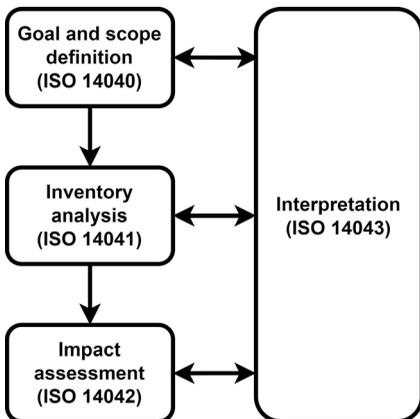


Fig. 2 LCA basic process

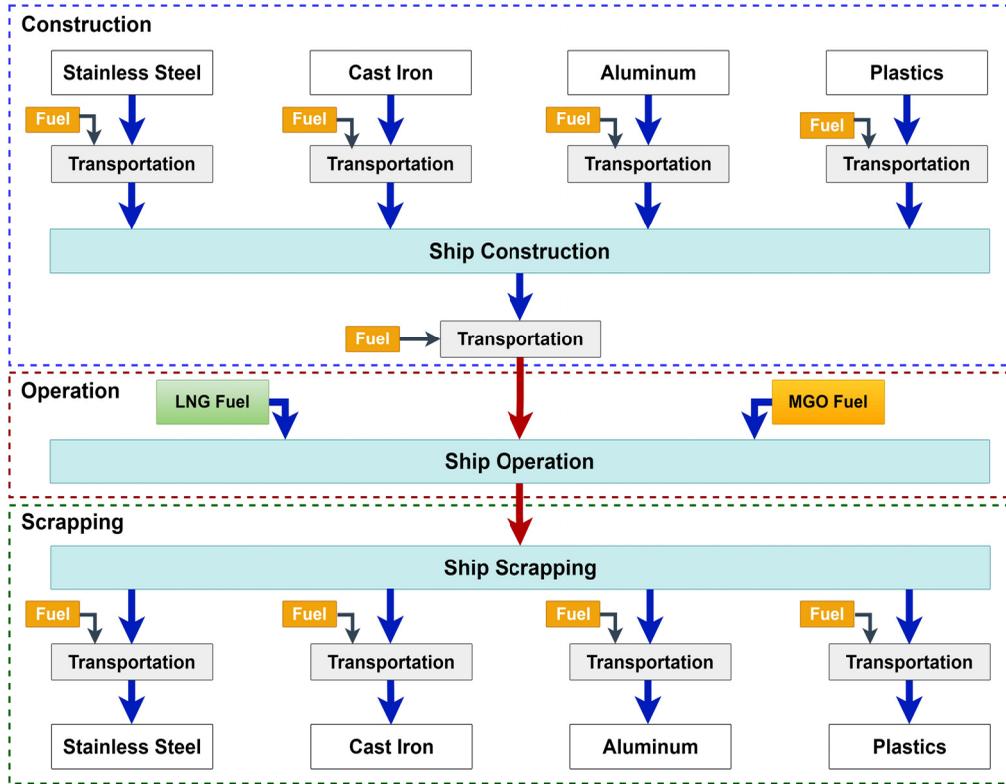


Fig. 3 Life cycle assessment modelling for LNG carriers

3.3 전주기 비용 산정 방안

전주기 비용은 기존의 선속별 경제성 비용 산정을 위해 고려한 신조선가, 유지보수비용 및 연료비용에 추가적으로 선박의 운송 계약 기간인 20년간을 기준으로 선박의 건조, 운항 및 폐선 단계에서 발생하는 선속별 환경성 비용을 합산하여 산정하였다.

이러한 전주기 비용 산정은 환경영향을 평가하는데 있어 선속 결정과 관련된 당사자들 간의 가중치 여부에 따른 혼란을 줄이고 단순화된 일정한 기준을 제공하기 위함이다.

4. 연구결과

4.1 경제성 평가

20년간 선속별 경제성 비용은 Fig. 4에서와 같이 나타났다. 경제성 비용의 한 요소인 신조선가

는 프로젝트상의 계약된 물량 달성 조건 만족을 위해 9척의 선박이 필요한 선속 11 knot가 가장 많은 비용이 발생하였고, 유지보수비용은 운항 중인 선박의 척수와 비례하는 관계를 나타내기 위해 선속 11 knot가 신조선가 부분과 같이 가장 많은 비용이 발생하는 것으로 확인되었다.

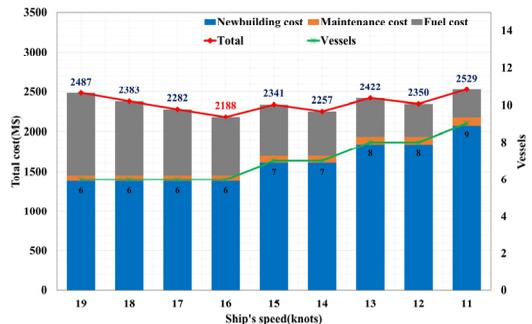


Fig. 4 Life cycle economic cost by ship's speed

이와 반대로 장기계약 달성을 위해 가장 적은 6척의 선박이 투입되는 19~16 knot의 선속 구간이 신조선가 및 유지보수비용 면에서는 가장 적은 비용이 발생하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 경제성 비용 산정을 위해 추가적으로 고려한 요소인 연료소모량에 따른 비용은 19 knot가 가장 많은 비용이 발생하는 선속 구간으로 나타났고, 11 knot가 가장 적은 비용을 나타냈다. 이는 일반적으로 선박의 배수량이 일정할 경우, 연료소모량이 선속의 3승에 비례하는 관계로부터 기인한 결과라 판단된다.

이러한 경제성 비용 평가 요소인 신조선가, 유지보수비용 및 연료비용을 합산한 총 비용은 20년간 프로젝트에 투입되는 선박이 가장 적은 선속 구간 중에 가장 적은 연료소모량을 나타내는 16 knot가 2,188 M\$로서 경제적으로 가장 유리함을 나타냈고, 본 연구에서 가정된 선박의 전주기 동안 연료소모량이 가장 적은 선속인 11 knot가 2,529 M\$로서 가장 불리한 선속으로 나타났다.

두 구간의 비용차는 선속 저감에 따른 연간 운송물량 부족분을 보완하기 위해 추가적으로 선박이 투입됨에 따라 CAPEX와 OPEX의 증가를 야기함에 따른 결과인 것이다. 이를 통해 선속 변경에 따른 프로젝트에 투입되는 선박 척수의 규모가 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 요소임을 확인할 수 있었다.

4.2 환경성 평가

환경성 평가를 위한 비용 산정은 먼저, 대상 선박의 전과정평가를 수행함에 따라 Fig. 5와 같이 선속별 20년간 선박의 전주기 동안 5가지 대기오염물질 배출량을 산정하였다. 그 결과, CO₂가 주 연료를 LNG로 사용할 때 가장 많은 발생량을 나타냈고, NO_x, NMVOC, SO_x, PM_{2.5} 순으로 나타났다. 선속이 감소하므로 배출물질과 양의 감소는 동일한 경향성을 나타냈다.

산정된 전주기 동안의 총 배출량을 기반으로 대기오염물질별 톤당 단가를 적용하여 환경비용을 산정한 결과, Fig. 6에서와 같이 19 knot로 운항할 때 488 M\$로 가장 많은 비용이 발생하였고,

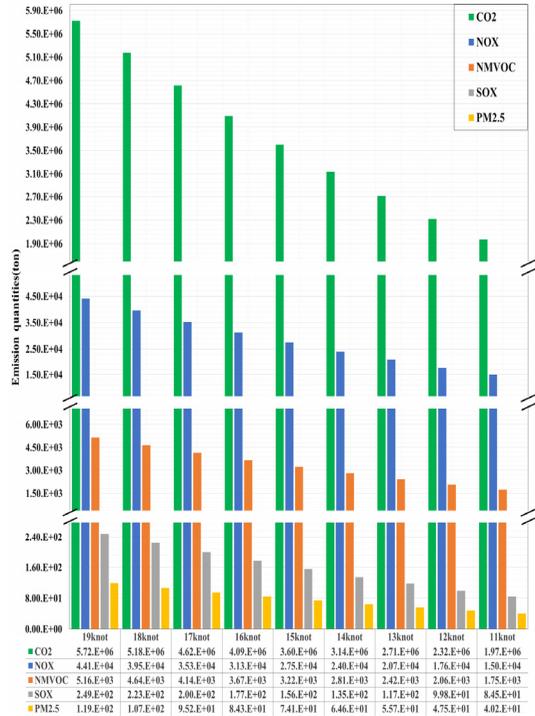


Fig. 5 Life cycle emissions by ship's speed

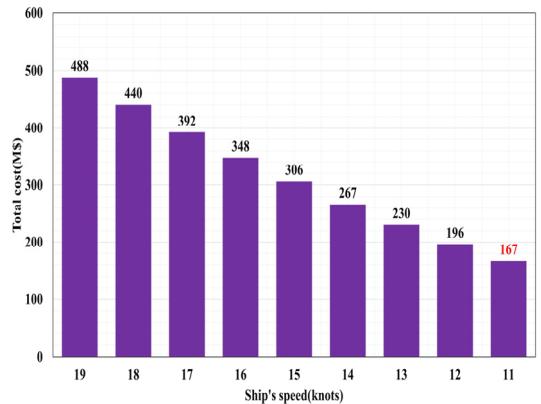


Fig. 6 Life cycle environmental cost by ship's speed

반면에 11 knot 운항 시 167 M\$로 가장 낮은 비용을 나타냈다. 이는 전주기 대기오염물질 배출량 결과와 동일한 경향을 나타낸 결과였다. 선속이 높을수록 연료사용량이 증대하고 이것이 대기오염물질 배출량을 증가시켰고 결국, 환경비용을 증가시키는 요인이 되었다.

4.3 전주기 비용 평가

프로젝트에 투입된 대상 선박의 전주기 비용은 20년간 발생하는 경제성과 환경성 비용을 합산하여 Fig. 7에서와 같은 결과를 나타냈다.

CAPEX와 OPEX를 포함하는 경제성 비용면에서는 16 knot가 가장 유리한 선속으로 나타났지만, 대기오염물질 배출량에 따른 환경성 비용을 동시에 고려한 전주기 총 비용은 선속 14 knot가 16 knot보다 12 M\$ 적은 2,524 M\$로서 가장 유리한 비용 결과를 보여 주었다.

비록 선속이 감소함에 따라 경제성 측면에서 가장 유리한 선속인 16 knot보다 1척의 선박이 프로젝트에 추가로 투입되어 신조선가 부분과 유지보수비용 부분에서 비용이 증가하였지만, 운항 중 연료사용량이 감소함에 따라 연료비용과 배출물에 의한 환경비용이 감소되어 경제성 비용 관점에서의 결과와는 다르게 나타났다.

추가적으로, 경제성 비용면에서 가장 불리한 것으로 나타났던 선속 11 knot가 전주기 비용 관점에서는 선속 19~18 knot 구간보다 279~127 M\$의 차이만큼 낮은 비용을 나타냈다. 11 knot 선속은 19 knot일 경우보다 총 3척의 선박이 추가로 투입되어 CAPEX가 상당히 증가하였음에도 불구하고 전주기적 관점에서는 19~18 knot 선속보다 유리한 것으로 나타났다.

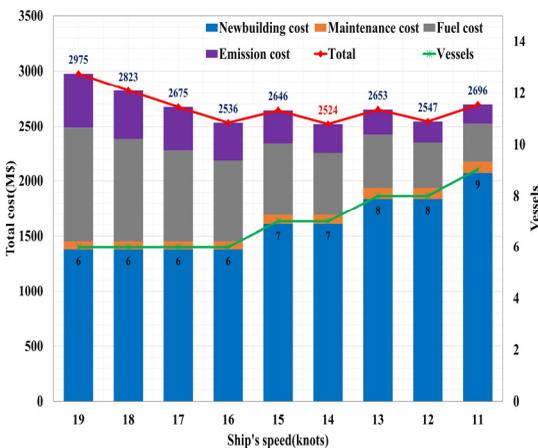


Fig. 7 Life cycle cost by ship's speed

5. 고 찰

본 연구의 결과는 장기운송계약에 투입될 선박의 최적 선속을 결정하는데 있어 경제성 비용만을 고려할 경우와 환경비용을 더불어 고려할 경우에 선박의 전주기 동안 발생하는 선속별 특징을 보여 준다.

총 20년간 운항하는 선박들의 선속별 경제성 비용 측면에서 프로젝트에 투입될 선박 척수, 운항을 위한 연료비용 그리고 유지보수비용 순으로 영향도를 가진다는 것을 보여 주었다. 이는 경제성만을 고려할 경우에는 우선적으로 선박의 척수가 적은 선대를 구성해야 하고, 선대가 구성되면 운항에 사용되는 연료의 단가를 최대한으로 낮추어 연료비용을 감소시키는 것이 최적의 선속으로 운항하기 위한 중요한 요인임을 나타낸 것이다.

반면, 환경비용은 프로젝트에 투입된 선박의 건조 및 폐선 단계보다 운항 중 사용된 연료량에 더 큰 영향을 받는 것으로 확인되었다. 다시 말해, 무조건적으로 선속을 낮추는 것이 아닌 일정 선속의 감소에 의한 연료사용량의 감소가 환경보호 및 규제 만족을 위한 기기 탑재와 더불어 환경비용을 줄일 수 있는 방안임을 보여 준 것이라 판단된다. 또한 엔진 출력이 허용하는 최대 선속으로 운항하는 것이 최적의 선속으로 결정되었던 기존의 방식에 대한 변화가 필요함을 나타낸 것이라 볼 수 있다.

이러한 경제성과 환경성 비용을 합산한 전주기 비용의 결과로서, 14 knot가 가장 유리한 선속으로 나타난 것은 경제성 부분이 환경성 부분보다 선박의 전주기 비용 부분에서 더 큰 비율을 차지하고 있다는 것을 의미하지만 경제성면에서 가장 유리한 16 knot의 선속이 가장 유리한 비용을 나타내지 않은 결과는 더 이상 환경영향에 대한 인식의 변화를 간과할 수 없음을 나타낸 것이라 판단된다.

본 연구를 통해 제시된 선속 결정 방안은 앞으로 신규 장기 운송 계약 선박의 기본적인 제원 설정을 위한 의사결정지원 도구로써 활용될 가능성이 있다고 사료된다.

추가적으로, 본 연구에서 활용한 비용 항목 이외에 항로, 화물창 크기, 선원비, 입거수리비, 선박 전체의 관리비 및 발전기 연료사용량 등의 정보를 보완하여 선박의 전주기 비용을 구체적으로 산정하는 연구가 필요함을 확인하였다.

6. 결 론

장기 운송계약 프로젝트에 투입된 선박의 최적 선속을 결정하기 위해 경제성 및 환경성 비용을 평가하였다. 평가 결과는 다음과 같다.

1) 선속별 경제성 비용 산정 결과는 16 knot가 가장 유리한 것으로 나타났다. 프로젝트에 투입된 선박의 척수가 가장 적은 19~16 knot의 선속 구간 중에서도 16 knot가 가장 유리하게 나타난 것은 동일한 CAPEX의 경우, 선박의 운항비용인 OPEX 요소 중에서 연료비용이 가장 많은 부분을 차지한다는 것을 나타낸 것이라 볼 수 있다.

2) 전과정평가 기반 환경비용 결과는 11 knot가 가장 낮은 비용을 나타내는 선속임이 확인되었다. 이는 연료사용량과 선속의 3승 관계에 따라 연료사용량이 가장 적었고 이에 대기오염물질 배출량이 가장 적음에 기인한 결과라 판단된다.

3) 선박의 전주기 비용은 총 2,524 M\$로 경제성과 환경성 각각의 결과와는 다르게 14 knot가 가장 유리한 선속인 것으로 나타났다. 경제성 비용면에서 가장 유리한 16 knot 선속 구간보다 1척의 선박을 더 투입해야 하지만 연료사용량 감소로 인해 환경비용의 차이가 발생하였고, 이는 초기비용에 대한 증가분을 상쇄시킬 수 있었다. 또한 환경성 비용면에서 가장 유리했던 11 knot보다 더 많은 연료사용량에 따른 높은 환경비용을 발생시키지만 운송을 위해 투입되는 선박의 척수가 감소함에 따라 11 knot보다 높은 환경비용을 상쇄시킬 수 있는 것으로 나타났다.

이러한 연구의 결과는 선박의 최적 선속 결정의 경우, 환경성이 경제성과 더불어 고려되어야 하는 부분임을 시사한 것이라 판단된다.

사 사

본 논문은 2021년도 해양수산부 및 해양수산과학

기술진흥원 연구비 지원으로 수행된 ‘자율운항 선박 기술개발사업(20200615)’의 연구결과이며, 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No.2021R1F1A1047115) 또한 본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학연협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다. 이에 감사드립니다.

Author contributions

K. H. Seo; Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Resources, Writing-original draft. H. J. Choi; Investigation, Writing-review & editing. Y. M. Kim; Investigation, Visualization. J. W. Lee; Supervision, Validation, Writing-review & editing. J. U. Lee; Funding acquisition, Project administration, Supervision, Validation, Writing-review & editing.

References

1. J. F. Alvarez, T. Longva, and E. S. Engebretsen, 2010, “A methodology to assess vessel berthing and speed optimization policies”, *Maritime Economics & Logistics*, 12(4), 327-346. (DOI:10.1057/mel.2010.11)
2. IMO, 2021, *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*, 409-416.
3. IMO, 2012, *Guidelines for the development of a ship energy efficiency management plan (SEEMP)*. MEPC. 213(63), 3-12.
4. F. Burel, R. Taccani and N. Zuliani, 2013, “Improving sustainability of maritime transport through utilization of Liquefied Natural Gas (LNG) for propulsion”, *Energy*, 57, 412-420. (DOI:10.1016/j.energy.2013.05.002)
5. S. Wang and X. Wang, 2016, “A polynomial-time algorithm for sailing speed optimization with containership resource sharing”,

- Transportation Research Part B: Methodological, 93(A), 394-405.
(DOI:10.1016/j.trb.2016.08.003)
6. X. Li, B. Sun, C. Guo, W. Du and Y. Li, 2020, "Speed optimization of a container ship on a given route considering voluntary speed loss and emissions", *Applied Ocean Research*, 94, 101995. (DOI:10.1016/j.apor.2019.101995)
 7. H. Lindstad, B. E. Asbjørnslett and A. H. Strømman, 2011, "Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds", *Energy Policy*, 39(6), 3456-3464. (DOI:10.1016/j.enpol.2011.03.044)
 8. M. S. Eide, O. Endresen, R. Skjong, T. Longva and S. Alvik, 2009, "Cost-effectiveness assessment of CO₂ reducing measures in shipping", *Maritime Policy & Management*, 36(4), 367-384. (DOI:10.1080/03088830903057031)
 9. Seas at Risk, 2017, Regulating ship speed could cut emissions by a third-study, <https://www.transportenvironment.org>. (Lasted accessed by: 2023.01.13.)
 10. L. Cameron, 2010, "The big money in slow shipping, *Canadian Business*", 83(7), 22.
 11. H. N. Psaraftis and C. A. Kontovas, 2009, "CO₂ emission statistics for the world commercial fleet", *WMU Journal of Maritime Affairs*, 8, 1-25. (DOI:10.1007/BF03195150)
 12. IMO, 2018, IMO resolution MEPC, 304(72): Initial IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships, 7.
 13. IMO, 2022, ISWG-GHG 11/2/3, Development of Draft Lifecycle GHG and Carbon Intensity Fuidelines for Maritime Fuels(Draft LCA Guidelines), 1-2.
 14. IMO, 2022, ISWG-GHG 13/3/2, Further Consideration of Concrete Proposals on the Revision, 1-8.
 15. S. Sala, A. Beylot, S. Corrado, E. Crenna, E. S. Mengual and M. Secchi, 2019, "Indicators and assessment of the environmental impact of EU consumption, Publications Office of the European Union, Luxembourg", EUR 29648 EN. (DOI:10.2760/25774)
 16. B. Jeong, E. Oguz, H. Wang and P. Zhou, 2018, "Multi-criteria decision-making for marine propulsion: Hybrid, diesel electric and diesel mechanical systems from cost-environment-risk perspectives", *Applied energy*, 230, 1065-1081. (DOI:10.1016/j.apenergy.2018.09.074)
 17. ISO, 2006, ISO 14040:2006-Environmental Management-Life cycle Assessment-Principles and framework.
 18. B. Jeong, 2018, "Comparative Analysis of SOx Emission-Compliant Options for Marine Vessels from Environmental Perspective", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 22(1), 72-78.
 19. M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter, H. P. van Essen, B. H. Boon, R. Smokers, A. Schrotten, C. Doll, B. Pawlowska and M. Bak, 2007, Handbook on estimation of external costs in the transport sector, CE Delft.