Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 603~621
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.603

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

국제해운 탈탄소 과학기술의 국제협력 우선순위 결정 모형

안용성†

한국해양수산개발원

Determining International Cooperation Priorities for Maritime Decarbonization Technologies

YONG SUNG AHN†

Korea Maritime Institute, 26, Haeyang-ro 301beon-gil, Yeongdo-gu, Busan 49111, Korea

†Corresponding author :
ahnys@kmi.re.kr

Received 24 August, 2026
Revised 28 September, 2026
Accepted 29 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> The 2023 IMO GHG Strategy set net-zero emissions for international shipping by or around 2050, yet the technology portfolio that will deliver this target remains undetermined. This asymmetry between binding deadlines and unsettled means poses a distinct resource-allocation problem for a close-follower economy such as Korea: which technologies warrant international cooperation, and of what type. This study constructs a three-tier taxonomy of maritime decarbonization technologies comprising 3 categories, 7 sub-categories and 17 items along the shipboard energy flow, and applies a two-stage structured expert elicitation to 45 experts consisting of 21 domestic and 24 European specialists. Four indicators are measured: domestic technology level, market prospects for 2030-2050, technical difficulty of commercialization, and abatement contribution. A three-step decision rule assigns each indicator a distinct theoretical function, namely bargaining resource, strategic value, and technology life-cycle position. No item qualified as frontier-leading. Domestic capability averaged 81.7 for energy efficiency improvement, 64.3 for pre/post-treatment and 60.3 for energy conversion, whereas strategic value was highest precisely where capability was lowest, and the coefficient of variation was systematically larger for the alternative-fuel group (36-48%) than for the efficiency group (21-29%). The priority index ranked ammonia, hydrogen and methanol highest. Robustness was examined in three ways: a threshold sweep, six alternative functional forms of the index, and reclassification using foreign-expert responses alone. The ranking of the top three items was invariant across all specifications, whereas the joint-versus-collaborative distinction within the alternative-fuel group proved sensitive to the 60-point boundary. Market and regulatory developments through mid-2026 broadly corroborate the model.

Key words : Maritime decarbonization(해운 탈탄소), International cooperation (국제협력), Technology level assessment(기술수준평가), Expert elicitation (전문가 평가), Window of opportunity(기회의 창), Carbon-free fuel(무탄소 연료)

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

1. 서 론

국제해운의 탈탄소 전환은 2023년을 기점으로 성격이 달라졌다. 국제해사기구(IMO)는 제80차 해양환경보호위원회(MEPC)에서 「2023 IMO 온실가스 감축전략」을 채택하여 2008년 대비 2030년까지 최소 20%, 2040년까지 최소 70%를 감축하고 2050년 전후 넷제로를 달성한다는 목표를 확정하였으며, 2030년까지 무탄소·준무탄소 연료가 국제해운 사용 에너지의 최소 5%를 차지해야 한다는 야심 수준을 함께 제시하였다[1]. 2018년 초기전략의 단일 목표와 비교하면 수준과 구속성이 모두 강화된 셈이다.

주목할 점은 이 전략이 감축량과 시한만을 규정할 뿐 이를 실현할 기술 조합은 특정하지 않는다는 사실이다. 2030년 20%와 2040년 70% 사이의 간극은 연료 전환의 대부분이 2030년대에 집중되어야 함을 시사한다. 요컨대 2030년 전후는 어떤 기술이 시장 표준으로 자리 잡을지가 사실상 결정되는 분기점이며, 현시점에서 그 결정은 아직 내려지지 않았다.

기술적 불확실성이 해소되지 않은 상태에서 규제만 선행하는 상황은 이례적인 압력으로 작용한다. 유럽연합은 2024년부터 총톤수 5,000톤 이상 선박을 배출권거래제(EU-ETS)에 편입하여 적용 비율을 2024년 40%, 2025년 70%를 거쳐 2026년 배출분부터는 100%로 확대하였고, 2026년 1월 1일부터는 메탄과 아산화질소를 포함한 CO_2 환산 기준을 적용한다[2]. 「FuelEU Maritime 규정」 또한 2025년부터 선박 사용 에너지의 온실가스 집약도를 전과정(Well-to-Wake) 기준으로 규율하며, 2020년 선대 평균 91.16 gCO_2eq/MJ를 기준으로 2025년 2%에서 2030년 6%, 2035년 14.5%, 2050년 80%까지 감축률을 단계적으로 강화한다[3]. 반면 IMO의 중기조치인 넷제로 프레임워크는 2025년 4월 MEPC 83에서 승인되어 2027년 발효가 예정되었으나[4], 같은 해 10월 임시총회에서 채택이 1년 연기되었고[5] 2026년 MEPC 84에서도 합의에 이르지 못하였다[6]. 결과적으로 국제해운은 지역 규제는 확정적으로 강화되는 반면 전 지구적 규제는 유동적인 비대칭 규제환경에 놓여 있다.

이러한 환경은 기술 최선도국이 아닌 근접 추격국에 특수한 문제를 제기한다. 우리나라는 조선 건조 역량에서 세계적 수준의 지위를 확보하고 있으나, 탈탄소 전환의 핵심을 이루는 대체연료·추진·후처리 기술군에서는 유럽 중심의 선도그룹과 격차를 안고 있는 것으로 알려져 왔다[7]. 문제는 그 격차의 크기와 분포, 나아가 격차가 미래 시장가치와 맺는 관계를 파악한 근거자료가 부족하다는 데 있다. 근거자료가 없으면 선택과 집중은 구호에 그치고 국제협력 또한 산발적 양해각서 수준을 넘기 어렵다. 협력의 조건 자체도 변화하였다. 탄소중립 핵심기술이 기술주권의 문제로 재정의되면서 협력은 교환 가능한 역량을 입증한 주체에게만 개방되는 선별적 성격을 띠게 되었기 때문이다.

따라서 본 연구가 다루는 문제는 다음과 같이 정식화된다. 기술 대안이 확정되지 않고 협력의 진입요건이 강화된 조건에서, 한정된 연구개발 및 협력 자원을 어떤 기술항목에 어떤 성격의 협력 방식으로 배분할 것인가. 이는 개별 기술의 우수성을 판단하는 문제가 아니라 기술 포트폴리오상의 상대적 위치를 판단하는 문제이다.

이에, 본 연구는 국제해운의 탈탄소 과학기술을 전과정평가 원리에 부합하도록 유형화·계층화하고, 국내외 전문가 평가를 통해 기술항목별 국내 기술수준·시장성·기술난이도·감축기여도를 측정한 뒤, 이를 결합하여 협력의 대상과 성격 및 우선순위를 도출하는 재현 가능한 결정규칙을 제시한다. 아울러 평가시점 이후 약 3년간의 시장 및 규제 전개를 활용하여 모형 예측의 사후 타당성을 검토한다.

2. 이론적 배경

2.1 선행 연구

국제해운 온실가스 감축기술에 관한 연구는 크게 세 갈래로 전개되어 왔다. 가장 이른 갈래는 감축수단의 목록화와 잠재력 평가이다. Bouman et al.[8]은 150여 편의 문헌을 종합하여 범주별 감축잠재력을

정량화하였고, Xing et al.[9]은 대체연료·에너지효율·후처리를 아우르는 대응수단을 검토하였다. 이들 연구는 기술목록의 완결성에 기여하였으나, 평가 단위가 기술 그 자체에 머무른 탓에 특정 행위자의 전략적 선택 문제로는 연결되지 않는다. 뒤이어 연료경로 중심의 경제성 및 전과정 배출 분석이 축적되고 있다. Balcombe et al.[10]은 연료·기술·정책의 대안을 통합 비교하였고, Lindstad et al.[11]은 e-연료의 역할과 한계를 정량 분석하였다. 이러한 계열은 2030년대 이후 연료 전환이 결정적이라는 점을 반복 확인하였으나, 분석 초점이 전 지구적 최적해에 놓여 있어 개별 국가의 역량 격차나 협력 전략은 논의의 대상이 되지 않는다.

국내에서는 무탄소 연료의 공급망 경제성과 선박 적용 가능성에 관한 성과가 활발히 논의되어 왔다. Hwang et al.[12]과 Kim et al.[13]은 해외 그린수소 및 청정수소 도입 공급망의 경제성을 분석하였고, Kim et al.[14]은 친환경 선박 도입 여부가 그린수소 수입단가를 좌우함을 보였다. 다만 이들 연구는 개별 연료 경로의 비용 구조를 규명하는 데 초점을 두고 있다. 그러나 비용 우위가 곧 특정 국가의 개입 우선순위를 결정하지는 않는다. 어떤 연료가 저렴하더라도 해당 기술의 세계적 성숙도가 이미 높다면 후발자가 연구개발 자원을 투입하여 얻을 이득은 제한적이며, 반대로 비용이 높더라도 기술체제가 미성숙하다면 조기 참여의 전략적 가치가 크기 때문이다. 한편 Lim et al.[7]은 소형 수소추진선박 실증 사례를 통해 우리나라가 선박 건조에서는 경쟁 우위에 있으나 핵심 기술의 해외 의존도가 높아 선도국 대비 기술개발 속도에서 열위에 있다고 진단하였다. 이 진단은 본 연구의 문제의식과 직결되나 기술군 전반의 격차 구조와 자원배분 원칙으로는 확장되지 않았다.

요컨대 선행연구는 무엇이 유효한 기술인지, 그 기술의 공급망 비용이 얼마인지에 답해 왔으나, 특정 국가가 어떤 기술에 어떤 방식으로 개입해야 하는지에는 답하지 않았다. 본 연구는 이 공백을 겨냥한다.

2.2 후발추격과 기회의 창

기술추격에 관한 진화경제학적 논의가 본 연구의 이론적 출발점이다. Perez and Soete[15]는 후발자의 진입장벽이 기술수명주기 국면에 따라 변동하며, 기술이 아직 표준화되지 않고 학습이 진행 중인 초기 국면에서 '기회의 창(window of opportunity)'이 열린다고 보았다. 성숙 국면에서는 축적된 경험과 규모의 경제, 확립된 표준이 진입장벽으로 작용하여 추격 비용이 급등하는 반면, 새로운 패러다임이 등장하는 국면에서는 선발자의 축적 자산이 오히려 관성으로 작용한다. Lee and Lim[16]은 한국 산업 사례를 통해 추격 양상이 기술체제에 따라 분화됨을 보였고, Lee and Malerba[17]는 산업 리더십의 교체가 기술·수요·제도의 세가지 기회의 창과 후발자 대응이 결합할 때 발생한다는 추격 사이클 모형을 제시하였다.

이러한 논의가 본 연구에 주는 함의는 기술격차의 크기 자체만으로는 협력 전략이 결정되지 않는다는 데 있다. 동일한 격차라도 해당 기술이 성숙 국면에 있다면 그 격차는 고착적인 반면, 초기 국면에 있다면 가변적이기 때문이다. 그렇다면 격차의 크기와 더불어 기술수명주기의 국면을 판별할 별도의 지표가 필요해진다. 이에 본 연구는 상용화의 기술적 난이도, 곧 선도그룹조차 해결하지 못한 과제의 크기를 그 판별 지표로 사용한다. 난이도가 높다는 것은 전 지구적으로도 기술이 미성숙 국면에 있다는 것, 다시 말해 기회의 창이 아직 닫히지 않았다는 것을 의미하기 때문이다.

2.3 국제협력과 흡수역량

국제 공동연구는 위험 분산, 상보적 역량 결합, 표준 및 특허 공동형성을 통한 시장 접근이라는 세 기제로 정당화되나, 그 성과는 참여자의 사전 역량에 강하게 의존한다. Cohen and Levinthal[18]의 흡수역량 개념은 외부 지식을 인식·동화·활용하는 능력이 자체 사전 지식의 축적에 비례함을 밝혔다. 이는 협력이 역량 부족을 대체하는 수단이 아니라 역량을 증폭하

는 수단임을 함의하며, 자국의 현재 역량 수준은 배제 기준이 아니라 협력 방식을 결정하는 조건변수로 다루어져야 한다. March[19]의 탐색(exploration)과 활용(exploitation) 구분 또한 유용하다. 이미 근접한 역량을 보유한 영역에서는 활용 지향적 협력이 효율적인 반면, 역량이 낮되 세계적으로도 미성숙한 영역에서는 탐색 지향적 협력이 적합하다. 본 연구의 협력 유형 구분은 이 이론적 구분을 실증 지표에 대응시킨 것이다.

한편 Edler et al.[20]이 정리한 기술주권에 대한 논의는 협력환경의 변화를 설명한다. 기술주권은 자급자족이 아니라 핵심기술에 대한 접근을 타국의 일방적 결정에 의존하지 않을 능력으로 정의된다. 이러한 인식이 확산될수록 협력은 개방적 공공재에서 전략적 교환관계로 성격이 바뀌며, 협력을 원하는 측은 무엇을 제공할 수 있는지를 먼저 입증해야 한다. 본 연구가 국내 기술수준을 판정의 핵심 축으로 삼는 이유가 여기에 있다. 기술수준은 성과지표이기 이전에 협상 자원의 크기이다.

3. 연구 방법

3.1 기술 분류체계

기술 분류체계는 무엇보다 규제환경의 기본 전제와 정합적이어야 한다. IMO의 감축전략과 FuelEU Maritime 규정이 모두 WtW 기준을 채택하고 있는 이상, 선박이 사용하는 에너지의 배출량이 연료 생산 단계까지 소급하여 산정되며, 그 결과 무탄소 연료의 도입 여부가 선박 자체의 성능 개선과 동일한 규제 지표 위에서 비교되기 때문이다. 본 연구가 대체연료를 효율 개선 및 후처리 기술과 하나의 분류체계 안에 배치한 근거가 여기에 있다. 아울러 기술항목 간 상호배타성과 계층 일관성이 확보되어야 항목 간 비교가능성이 보장된다.

다만 분석 대상은 선박에 적용되는 기술로 한정하

Table 1. Classification of maritime decarbonization technologies

Category	Sub-category	Technology item	Main sub-technologies
Energy conversion	Energy production	Solar	Solar collector, photovoltaic panel
		Wind	Wind turbine, rotor sail, wing sail
	Energy consumption (alternative fuel)	Electricity/battery	Battery, capacitor
		Hydrogen	Fuel cell (PEMFC/SOFC/MCFC/AFC), internal combustion engine
		Ammonia	Fuel cell (SOFC/AMFC), internal combustion engine
		Methanol	Fuel cell (HT-PEMFC/SOFC/DMFC), internal combustion engine
		Biofuel	Fuel cell (SOFC/MCFC), internal combustion engine
Energy efficiency improvement	Technical measures (ship equipment)	Resistance reduction	Air lubrication, ship duct, wake equalizing duct
		Propulsion efficiency	Pre-swirl duct, stator, vortex generator fin
		Energy efficiency	Onboard DC grid, waste heat recovery
	Operational measures (ship operation)	Speed optimization	AI and big-data based optimization
		Route optimization	AI and big-data based weather routing
Pre/post-treatment	Carbon dioxide (OCCS)	Post-combustion capture	Solvent (amine), membrane, solid sorbent separation
		Pre-combustion capture	Pre-combustion capture system, oxyfuel combustion
	Methane	Methane oxidation catalyst	Methane oxidation catalyst
		Reliquefaction	Reliquefaction plant
		Plasma reduction	Plasma-based methane abatement

였다. 수소와 암모니아의 생산 공정은 육상 에너지 부문에 속하여 해운 부문의 정책 자원배분 대상이 아니고, 평가 패널 또한 조선·해운 분야 전문가로 구성되어 연료 생산기술을 판단할 전문성 범위를 벗어나기 때문이다. 따라서 Table 1의 중분류 '에너지 생산'은 연료 생산이 아니라 선상 발전, 곧 태양광과 풍력을 이용한 선내 에너지 확보를 가리킨다. 연료 생산 단계의 배출과 비용은 선행 국내 연구[12-14]가 다루고 있으므로 본 연구의 결과는 그 성과와 상호 보완적으로 해석되어야 한다.

기존 분류는 각기 한계를 보인다. EU 및 한국형 녹색분류체계[21,22]는 경제활동 단위로 구성되어 기술 항목의 해상도가 낮고, 영국 교통부의 분류[23]는 대기오염물질 저감과 온실가스 저감이 혼재되어 있으며, IMO에 제출된 분류[24]는 기술 해상도가 높으나 범주 간 원리가 일관되지 않아 계층화가 어렵다.

이에 본 연구는 선박 운용과정의 에너지 흐름, 곧 생산·소비·배출을 단일 분류 원리로 채택하였다. 이에 따라 상위 속성을 에너지 전환, 에너지 효율 개선, 배출에 대한 전·후 처리의 3개 대분류로 구분하고, 각 대분류를 에너지 흐름의 단계 또는 개입 방식에 따라 중분류로, 개별 기술 대안에 따라 소분류로 계층화하였다. 총 3개 대분류, 7개 중분류, 17개 기술항목으로 구성되며, 초안은 연구진의 사전 조사를 바탕으로 작성되어 기술분야별 국내외 전문가가 참여한 3차례 세미나를 통해 확정되었다(Table 1).

3.2 평가지표

평가는 역량 영역과 전망 영역의 2개 영역, 4개 지표로 구성된다. 역량 영역에 해당하는 국내 기술수준(*L*, 100점)은 국가 기술수준평가에서 통용되는 최고기술 보유국 대비 상대수준 방식[25]에 따라, 각 항목에 대해 세계 최선도국의 수준을 100점으로 할 때 우리나라의 상대적 수준을 평가한다. 이때 해당 항목의 기술 선도 1위 국가를 함께 지목하도록 하여 격차의 크기뿐 아니라 방향까지 포착하였다.

전망 영역은 세 지표로 구성된다. 시장 도입·적용 가능성(*M*, 7점)과 도입에 따른 감축기여도(*E*, 7점)는 각각 현재부터 2030년까지와 2030년부터 2050년까지로 분리하여 평가하며, 상용화의 기술적 난이도(*D*, 7점)는 2030년 전후 상용화를 위해 해결되어야 할 기술적 과제의 크기를 묻는다. 여기서 *D*는 우리나라가 겪는 어려움이 아니라 선도그룹을 포함한 전 지구적 미해결 과제의 크기를 측정한다는 점에서 *L*과 구별된다.

*L*과 *D*를 이렇게 분리한 설계가 본 연구의 방법론적 핵심에 해당한다. 전자가 우리나라의 상대적 위치를, 후자가 기술 자체의 성숙 정도를 측정하는 만큼, 두 지표를 결합하면 동일한 크기의 격차라도 그것이 고착적인지 가변적인지를 판별할 수 있기 때문이다.

시장성과 감축기여도를 두 시점으로 분리한 것 또한 중요하다. 단일 시점 평가는 지금 유효한 기술과 앞으로 유효할 기술을 혼동시키며 신흥 기술의 가치를 체계적으로 과소평가한다. 본 연구는 2030년 전후를 기술 패러다임의 분기점으로 상정하므로 두 시점의 격차 자체가 분석 대상이 된다.

3.3 자료 수집 및 집계 절차

기술예측은 장기적 연구개발 자원배분의 우선순위를 사회적 편익 관점에서 판단하기 위한 체계적 시도이며[26], 관측 자료가 불충분한 영역에서는 전문가 판단을 구조화된 절차로 수집하는 전문가 평가(expert elicitation)가 표준적 수단으로 활용된다. Morgan[27]은 이 절차의 신뢰성이 평가 대상의 명확한 정의, 전문가 선정의 적합성, 판단 불확실성의 명시적 제시에 달려 있다고 정리하였고, Okoli and Pawlowski[28]는 표본의 대표성보다 전문성의 적합성이 결정적이라고 강조하였으며, Landeta[29]는 결과의 신뢰도가 패널 구성의 이질성 관리에 좌우된다고 보았다.

본 연구의 자료 수집은 2단계로 이루어졌다. 1단계는 평가 대상과 지표의 구체화 단계로, 연구진이 도출한 분류체계 및 지표 초안에 대해 국내외 전문가가 참여하는 세미나를 3차례 개최하여 검토·보완하였다. 응답 대상 전문가가 세미나에 직접 참여하도

록 함으로써 항목의 정의와 문항 해석에 관한 이질성을 사전에 축소하였으며, 이를 거쳐 2개 영역 8개 문항의 설문 구조가 확정되었다. 2단계는 본 평가로, 2023년 7월 하순부터 8월 중순까지 약 3주간 전자우편 응답 방식으로 실시되었다. 응답자는 국내 21명, 해외 24명 등 총 45명이며, 논리적 오류나 결측이 있는 응답에 대해서만 개별적으로 재응답을 요청하였다.

여기서 절차의 성격을 분명히 밝힐 필요가 있다. 1단계는 항목 정의와 측정도구를 정련하는 과정이며, 응답 결과를 패널에게 회람하여 재평가를 받는 반복적 의견수렴은 수행되지 않았다. 따라서 본 연구의 절차는 델파이 기법이 요구하는 반복과 통제된 피드백[30]을 충족하지 않으며, 이를 델파이로 규정하지 않고 구조화된 전문가 평가로 규정한다. 반복의 부재는 응답의 수렴을 인위적으로 유도하지 않는다는 이점이 있으나 의견 분산이 그대로 남는다는 한계를 수반하므로, 본 연구는 평균값과 함께 표준편차와 변동계수를 제시하여 각 판정이 근거하는 합의 수준을 명시한다.

패널 설계에서 특기할 점은 국내와 해외 전문가를 유사한 비율로 구성한 것이다. 이는 자기평가 편의를 외부 관점으로 교정하는 동시에, 미래 기술 시나리오에 대한 시각차 자체를 분석 대상으로 확보하기 위한 설계이다. 항목별 유효 응답 수는 지표에 따라 38건에서 45건 사이에서 변동하는데, 이는 전문 분야가 상이한 응답자가 판단이 어려운 항목에 대해 응답을 유보한 결과이다. 본 연구는 결측을 대체하지 않고 유효 응답만으로 평균을 산출하였다.

집계 방식은 다음과 같다. 항목별 대표값은 국내 전문가 평균과 해외 전문가 평균을 각각 산출한 뒤 두 값을 동일 가중으로 평균한 값이다. 국내 21명과 해외 24명이라는 인원 차이가 대표값에 반영되지 않도록 하기 위한 조치이며, 두 집단의 시각차를 분석 대상으로 삼는 본 연구의 설계와도 정합적이다. 반면 표준편차와 사분위범위 및 변동계수는 두 집단을 통합한 전체 응답을 대상으로 산출하였다. 분산은 집단 간 차이를 포함한 전체 판단의 흩어짐을 나타내야 하기 때문이다.

3.4 협력유형 결정규칙

네 지표를 단일 가중합으로 처리하는 방식은 가중치 설정의 자의성을 피할 수 없고, 무엇보다 지표 간 성격 차이를 소거한다. 이에 본 연구는 각 지표에 구별되는 기능을 부여한다. 국내 기술수준(L)은 협력 상대에게 제시할 수 있는 교환가치의 크기이자 흡수 역량의 대리지표이고, 시장성(M)과 감축기여도(E)는 자원을 투입할 이유의 크기, 곧 전략적 가치를 각각 수요 측면과 공공적 효과 측면에서 포착하며, 기술적 난이도(D)는 기회의 창의 개폐를 판별한다.

이러한 기능 배분에 근거하여 다음 3단계 규칙을 적용한다. 1단계는 전략적 관련성 판정으로, 2030년부터 2050년까지의 시장성과 감축기여도가 모두 높음 급간(4.2점) 이상인 항목만 협력 포트폴리오 후보로 포함한다. 이는 시장 수요와 공공적 감축효과 중 어느 하나만 충족하는 기술에 전략 자원을 배분하지 않는다는 원칙을 표현한다.

2단계는 협력유형 배정으로, 후보 항목을 L과 D의 조합에 따라 네 유형으로 나눈다. 선도기술(lead)은 L이 90점 이상인 경우로, 협력보다 집중투자를 통한 초격차 확보가 우선한다. 공동기술(joint)은 L이 60점 이상 90점 미만인 경우로, 교환 가능한 역량을 보유하므로 공동 고도화와 표준 공동제안 등 활용 지향적 협력이 적합하다. 협동기술(collaborative)은 L이 60점 미만이면서 D가 4.2점 이상인 경우로, 역량은 낮으나 세계적으로도 기술이 미성숙하여 기회의 창이 열려 있는 영역이며 기초·응용 단계 공동연구가 적합하다. 역량 축적형(capability-building)은 L이 60점 미만이면서 D가 4.2점 미만인 경우로, 세계적으로 이미 성숙한 기술에서 격차가 발생하여 기회의 창이 사실상 닫혀 있으므로 도입·실증·국산화를 통한 자체 역량 축적이 우선한다.

이 규칙의 핵심은 역량 축적형과 협동기술의 구별에 있다. 두 유형은 국내 기술수준이 낮다는 점에서 동일하나, 전자는 성숙한 기술체제에서 발생한 고착적 격차이고 후자는 미성숙 기술체제에서 발생한 가변적 격차이다. 전자에 공동 연구개발 자원을 투입하

면 학습곡선을 뒤늦게 반복하는 비효율이 발생하고, 후자를 방치하면 열려 있는 기회의 창을 놓치게 된다.

3단계는 우선순위 산정으로, 유형 내부와 유형 간 순위를 결정하기 위해 우선순위지수 P를 식(1)과 같이 정의한다.

$$P = V \times G,\ \text{단}\ V = (M + E)/2,\ G = 1 - L/100 \quad (1)$$

여기서 V는 전략적 가치, G는 정규화된 기술격차이다. P는 격차를 해소하지 못할 경우 상실하게 될 전략적 가치의 기댓값으로 해석되며, 전략적 가치가 크더라도 격차가 없으면 협력의 한계효용이 낮고 격차가 크더라도 전략적 가치가 없으면 협력의 필요가 없다는 직관을 형식화한 것이다. 아울러 V가 5.6점 이상인 항목은 격차 해소의 지연 자체가 비용이 되므로 시급 대상으로 표시한다.

P의 구성에는 두 가지 설계 판단이 개입되어 있으므로 근거를 밝힌다. 먼저 M과 E에 동일 가중을 부여한 것은, 사적 시장 수요와 공공적 감축 편익 가운데 어느 쪽이 사회적으로 더 중요한지에 관하여 본 연구가 선험적 입장을 취하지 않겠다는 선택이다. 두 요소의 상대적 비중은 정책 목표에 따라 달라지는 규범적 판단의 영역이므로, 이를 모형에 내장하기보다 4.6절에서 가중치를 변화시킨 대안 산정 결과를 함께 제시하는 편이 타당하다고 보았다. 다음으로 기술적 난이도 D를 P에 포함하지 않은 것은 누락이 아니라 설계 의도이다. D는 협력의 가치를 키우거나 줄이는 연속적 크기가 아니라 협력의 방식을 가르는 국면 판별 변수이며, 이를 가치 항에 합산하면 난이도가 높다는 이유만으로 우선순위가 상승하는 왜곡이 발생한다. 다만 이 판단 역시 검증 대상이므로 D를 포함한 대안도 함께 산정하였다.

급간은 응답 분포와 척도 구조를 함께 고려하여 설정하였다. 기술수준의 60점과 90점은 국가 기술수준평가에서 최고기술 보유국 대비 상대수준을 구분할 때 통용되는 기준[25]을 따른 것으로, 90점 이상은 선도국과 실질적 차이가 없는 수준을, 60점 미만은 자체 역량만으로 상용화에 이르기 어려운 수준을 뜻한다. 7점 척도의 4.2점과 5.6점은 각각 척도 범위의 상위 40%와 상위 20% 경계에 해당한다. 이러한 기준이 결과에 미치는 영향은 4.6절에서 임계값을 이동시킨 재분류를 통해 검토한다.

4. 결 과

4.1 기술유형별 기술수준

기술유형별 국내 기술수준은 Table 2에, 선도국 지목 분포는 Table 4에 정리하였다. 에너지 전환의 기술수준은 평균 60.3점으로 세 대분류 중 가장 낮다. 항목별로는 전력·배터리가 66.7점으로 상대적으로 높고 바이오연료가 57.3점으로 가장 낮다. 선도국 지목에서는 유효응답 289건 중 유럽이 177건(61.2%)으로 압도적이며, 미국 43건(14.9%), 우리나라 25건(8.7%), 일본 24건(8.3%)이 뒤를 이었다. 즉 이 영역에서 우리나라는 유럽뿐 아니라 차선도 그룹인 미국과도 유의미한 거리를 두고 있다.

반면 에너지 효율 개선의 기술수준은 평균 81.7점으로 가장 높다. 선도국 지목에서도 전체 216건 중 유럽이 110건(50.9%)으로 최다이나 우리나라가 73건(33.8%)으로 두 번째이며, 저항 감소 항목에서는 우리나라 지목이 19건으로 유럽의 15건을 상회하였다. 이는 조선 건조 역량에 기반한 선체·추진 설계 분야에서 우리나라가 실질적 공동선도 위치에 있음을 시사한다. 다만 최적 항로 항목의 우리나라 지목은 8건에 그쳐, 소프트웨어 및 최적화 솔루션 영역에서는 상대적 열위가 확인된다.

전·후 처리의 기술수준은 평균 64.3점이다. 이산화탄소 처리에서는 연소 후 포집이 66.1점으로 연소 전 포집의 58.2점보다 높게 평가되었는데, 이는 화학흡수 기반 연소 후 포집이 육상 발전 부문의 기술 기반을 활용할 수 있는 반면 연소 전 포집 및 산소연료 연소는 선박 적용 사례가 거의 없다는 현실과 부합한다. 선도국 지목에서는 4개 항목 150건 중 유럽이 98건(65.3%)으로 세 유형 중 가장 높은 집중도를 보였다.

Table 2. Domestic technology level by technology item (100-point scale)

Category	Technology item	n	Overall	Dom.	For.	Gap	SD	IQR	CV (%)
Energy conversion	Solar	42	59.8	64.3	55.2	+9.0	24.9	40.0	41.6
	Wind	42	58.3	59.5	57.1	+2.4	26.3	40.0	45.1
	Electricity/battery	42	66.7	67.1	66.2	+1.0	23.9	33.8	35.9
	Hydrogen	44	60.6	61.7	59.6	+2.1	26.5	32.5	43.7
	Ammonia	43	59.5	58.6	60.5	-1.9	28.7	35.0	48.2
	Methanol	43	60.2	61.4	58.9	+2.5	27.0	35.0	44.9
	Biofuel	42	57.3	61.0	53.6	+7.4	27.3	33.8	47.7
Energy efficiency improvement	Resistance reduction	42	82.6	89.5	75.7	+13.8	24.1	20.0	29.2
	Propulsion efficiency	42	83.8	89.5	78.1	+11.4	21.9	20.0	26.1
	Energy efficiency	42	82.9	89.0	76.7	+12.4	21.8	27.5	26.3
	Speed optimization	42	80.6	86.7	74.5	+12.1	18.1	28.8	22.5
	Route optimization	42	78.7	83.6	73.8	+9.8	16.7	20.0	21.2
Pre/post-treatment	Post-combustion capture	42	66.1	68.6	63.6	+5.0	21.8	30.0	32.9
	Pre-combustion capture	39	58.2	58.2	58.2	+0.1	22.2	25.0	38.1
	Methane oxidation catalyst	39	67.7	70.8	64.7	+6.0	19.9	20.0	29.4
	Reliquefaction	38	69.4	73.2	65.6	+7.7	21.7	20.0	31.1
	Plasma reduction	38	60.1	64.0	56.1	+7.9	20.0	20.0	33.2

Note: n = number of valid responses. Dom. = mean of domestic experts; For. = mean of foreign experts; Gap = Dom. − For. Overall is the equally weighted mean of the two group means, whereas SD, IQR and CV are computed on the pooled responses of both groups. Gap is computed from unrounded group means and may therefore differ from the difference of the rounded values shown.

4.2 시장성, 기술난이도 및 감축기여도

항목별 세 지표의 평가 결과는 Table 3과 같으며, 이하에서 제시하는 대분류 값은 해당 대분류에 속한 기술항목 평균의 산술평균이다. 먼저 시장성의 시점 간 구조가 명확하다. 에너지 효율 개선은 이미 높은 수준인 5.0점에서 5.5점으로 완만히 상승하는 반면, 에너지 전환은 3.9점에서 5.3점으로, 전·후 처리는 3.2점에서 4.5점으로 낮은 수준에서 출발하여 2030년 이후 급상승한다. 항목 수준의 대비는 더욱 선명하여, 수소는 3.5점에서 6.1점으로 2.6점 상승한 반면, 저항 감소는 4.9점에서 5.3점으로 0.4점 상승하는 데 그쳤다. 이 결과는 2030년을 기술 패러다임의 분기점으로 상정한 본 연구의 전제를 실증적으로 뒷받침한다. 현재 유효한 기술과 2030년 이후 시장을 주도할 기술은 상당 부분 다른 집합이며, 따라서 현재의 시장 적합도만을 기준으로 한 자원배분은 체계적 오류를 낳는다.

기술난이도에서는 전·후 처리가 5.3점으로 가장 높고 에너지 효율 개선이 3.8점으로 가장 낮다. 에너지 전환 내부에서는 수소가 6.1점, 암모니아가 5.7점으로 높은 반면 태양광은 3.7점, 풍력과 바이오연료는 각 4.0점으로 낮게 평가되었다. 특기할 점은 이 지표에서 국내와 해외 전문가의 인식 격차가 대분류 기준 0.2점에서 0.3점으로 매우 작다는 사실이다.

감축기여도는 2030년 이후 에너지 전환이 5.3점으로 가장 높고, 항목별로는 수소와 암모니아가 각각 6.2점으로 최고치를 기록한 반면, 에너지 효율 개선은 4.8점에 그쳤다. 전문가 다수가 효율 개선과 전·후 처리를 보조적 수단으로 인식하는 것은, 두 유형이 배출을 근원적으로 제거하지 않고 발생한 배출을 저감·처리하는 성격에 기인한다. 요컨대 2030년 이후 탈탄소의 성패는 무탄소 연료 전환이 결정한다는 것이 전문가 집단의 지배적 판단이다.

Table 3. Market prospects, technical difficulty and abatement contribution by technology item (7-point scale)

Technology item	n (M/D/E)	M (SD)	CV (%)	D (SD)	CV (%)	E (SD)	CV (%)
Solar	43/44/45	4.11 (1.91)	47	3.69 (1.44)	39	4.14 (1.85)	45
Wind	43/44/45	4.57 (1.67)	36	4.02 (1.21)	30	4.60 (1.53)	33
Electricity/battery	43/44/45	5.37 (1.56)	29	4.51 (1.49)	33	5.29 (1.58)	30
Hydrogen	44/44/45	6.13 (1.32)	22	6.14 (0.85)	14	6.15 (1.44)	23
Ammonia	44/44/45	6.03 (1.05)	17	5.68 (1.18)	21	6.21 (1.04)	17
Methanol	44/44/45	5.55 (1.55)	28	4.48 (1.42)	32	5.52 (1.49)	27
Biofuel	44/44/45	5.11 (1.49)	29	3.95 (1.78)	45	5.04 (1.50)	30
Resistance reduction	44/44/45	5.33 (1.67)	31	3.86 (1.59)	41	4.64 (1.58)	34
Propulsion efficiency	44/44/45	5.45 (1.58)	29	3.93 (1.55)	39	4.77 (1.58)	33
Energy efficiency	44/44/45	5.77 (1.36)	24	4.01 (1.48)	37	4.82 (1.51)	31
Speed optimization	43/44/44	5.54 (1.44)	26	3.47 (1.59)	46	4.82 (1.42)	29
Route optimization	43/44/44	5.50 (1.33)	24	3.60 (1.62)	45	4.75 (1.50)	31
Post-combustion capture	43/43/44	5.05 (1.31)	26	5.40 (1.03)	19	5.02 (1.49)	30
Pre-combustion capture	43/43/44	4.52 (1.49)	33	5.59 (1.24)	22	4.59 (1.70)	37
Methane oxidation catalyst	42/42/43	4.48 (1.31)	29	5.10 (1.36)	27	4.43 (1.56)	35
Reliquefaction	41/42/43	4.21 (1.42)	34	5.10 (1.51)	30	4.36 (1.57)	36
Plasma reduction	40/42/43	3.99 (1.37)	34	5.36 (1.43)	27	4.34 (1.73)	40

Note: M = market prospects for 2030-2050; D = technical difficulty of commercialization; E = abatement contribution for 2030-2050. Values in parentheses are standard deviations; CV = coefficient of variation.

Table 4. Leading-country designations by category (number of responses)

Category	Valid responses	Europe	USA	Korea	Japan	Others
Energy conversion	289	177 (61.2%)	43 (14.9%)	25 (8.7%)	24 (8.3%)	20 (6.9%)
Energy efficiency improvement	216	110 (50.9%)	10 (4.6%)	73 (33.8%)	23 (10.6%)	–
Pre/post-treatment	150	98 (65.3%)	24 (16.0%)	17 (11.3%)	11 (7.3%)	–

Note: Others refers to third countries written in by respondents, mostly China. Figures for pre/post-treatment are the sum of four items, excluding plasma reduction. For that item the recorded designations were identical to the column subtotals of the other four items and therefore could not be treated as item-level responses; it is excluded from this table and from the related discussion. Its technology level score (Table 2) was collected through a separate question and is unaffected, and is thus retained.

여기서 역량 분포와 전략가치 분포가 서로 어긋나 있다는 사실이 드러난다. 우리 역량은 하드웨어 최적화 영역에서 가장 높고 에너지 시스템 자체를 교체하는 영역에서 가장 낮은데, 이는 우리 조선·기자재 산업이 기존 추진 패러다임 내에서의 성능 개선에 특화되어 발전해 왔음을 반영한다. 그런데 감축기여도와 시장성은 정확히 반대 방향으로 분포한다. 에너지 전환은 역량이 가장 낮으면서 감축기여도가 가장 높고 난이도도 높아 선도그룹조차 미해결 과제를 안고 있다. 역량 열위와 전략가치 우위, 그리고 열려 있는 기회의 창이 동시에 존재하는 이러한 조건에서 국제협력이라는 수단의 정당성은 가장 커진다. 반면 에너지 효율 개선은 역량과 시장성이 모두 높으나 감축기여도와 난이도가 낮다. 이는 이미 성숙한 영역에서 우리나라가 유리한 위치를 점하고 있음을 뜻한다. 여기에는 전략적 함의가 하나 더 있다. 난이도가 낮게 인식된다는 것은 2030년 전후까지 이를 넘어서는 새로운 기술 개념, 예컨대 풍력추진과 운항 최적

화 및 자동화를 결합한 통합 시스템을 우리가 먼저 정의할 여지가 있다는 의미이기도 하다. 요컨대 이 영역의 과제는 격차 해소가 아니라 표준 선점에 있다.

4.3 응답 분산과 합의 수준

평균값만으로는 각 판정이 어느 정도의 합의에 근거하는지 알 수 없으므로, 변동계수를 통해 항목별 의견 수렴 정도를 검토하였다(Table 2, Table 3).

기술수준에서 가장 뚜렷한 규칙성은 합의 수준이 대분류에 따라 체계적으로 갈린다는 점이다. 에너지 효율 개선 5개 항목의 변동계수는 21%에서 29%에 분포하여 가장 낮은 반면, 에너지 전환 7개 항목은 36%에서 48%로 가장 높다. 전·후 처리는 29%에서 38%로 그 중간에 위치한다. 이는 우리 산업이 오랜 실적을 축적해 온 영역일수록 전문가 판단이 수렴하고, 상용 실적이 부족한 영역일수록 판단이 분산됨을 보여준다. 특히 암모니아(48%)와 바이오연료(48%), 풍력(45%)에서 분산이 가장 크다.

주목할 대비는 난이도 지표에서 나타난다. 수소의 난이도 변동계수는 14%로 전 항목 가운데 가장 낮고 암모니아는 21%, 연소 후 포집은 19%로 뒤를 잇는다. 반면 같은 항목의 기술수준 변동계수는 각각 44%와 48%에 이른다. 즉 전문가들은 이 기술들이 세계적으로 얼마나 어려운 과제인지에 대해서는 높은 수준으로 합의하면서도, 그중에서 우리나라가 어디쯤 위치하는지에 대해서는 견해가 크게 갈린다. 이는 3.2절에서 기술수준과 난이도를 별개 지표로 분리한 설계가 실제로 서로 다른 성격의 판단을 포착하고 있음을 보여주는 증거이다.

이러한 분산 구조는 이후 강건성 검토와 직접 연결된다. 변동계수가 높은 대체연료군이 곧 기술수준 60점 경계에 밀집한 항목군이기 때문이다.

4.4 국내 · 해외 전문가의 인식 격차

국내 전문가 응답에서 해외 전문가 응답을 차감한 인식 격차는 Table 5와 같으며, 여기서 세 가지 규칙성이 관찰된다. 무엇보다 자기평가의 성격이 강한 지표일수록 격차가 크게 나타난다. 기술수준에서 최대 11.9점의 격차가 발생한 반면, 기술 자체의 속성을 묻는 난이도에서는 그 차이가 0.3점 이내로 수렴하기 때문이다. 격차는 전망 시점에 따라서도 달라져, 감축 기여도의 경우 2030년까지의 구간에서 최대 1.9점에 이르나 2030년 이후 구간에서는 1.1점으로 축소된다. 요컨대 판단의 시점이 가까울수록 견해차가 커지는 셈이다. 이 두 경향이 겹치는 영역이 전·후 처리로, 국내 역량이 낮게 평가된 영역일수록 근미래 낙관이 강하게 작용하여 격차가 가장 크게 벌어진다. 다만 장기 전망에서는 양측이 수렴하고 에너지 효율에서는 오히려 해외 전문가가 근소하게 높게 평가한다는 점에서, 이 격차는 전면적 낙관이 아니라 전망 시점과 평가 대상에 따라 구조화된 편의로 이해해야 한다.

4.5 국제협력 대상 기술항목의 식별

결정규칙을 적용한 결과는 Table 6과 같으며, 기술수준과 난이도의 평면상 배치는 Fig. 1에, 전략적

Table 5. Perception gap between domestic and foreign experts (domestic−foreign)

Indicator	Energy conversion	Energy efficiency improvement	Pre/post-treatment
Technology level (100-point)	+3.2	+11.9	+5.4
Market prospects (–2030)	+0.7	+0.4	+1.4
Market prospects (2030-2050)	+0.4	−0.1	+0.8
Abatement contribution (–2030)	+1.3	+0.5	+1.9
Abatement contribution (2030-2050)	+0.6	−0.1	+1.1
Technical difficulty	+0.2	+0.3	+0.3

Table 6. Cooperation type assignment and priority index in descending order of *P*

Rank	Technology item	L	M	D	E	V	P	Cooperation type	Urgency
1	Ammonia	59.5	6.03	5.68	6.21	6.12	2.476	Collaborative	Urgent
2	Hydrogen	60.6	6.13	6.14	6.15	6.14	2.416	Joint	Urgent
3	Methanol	60.2	5.55	4.48	5.52	5.54	2.205	Joint	–
4	Biofuel	57.3	5.11	3.95	5.04	5.07	2.168	Capability-building	–
5	Wind	58.3	4.57	4.02	4.60	4.59	1.911	Capability-building	–
6	Pre-combustion capture	58.2	4.52	5.59	4.59	4.56	1.904	Collaborative	–
7	Electricity/battery	66.7	5.37	4.51	5.29	5.33	1.777	Joint	–
8	Post-combustion capture	66.1	5.05	5.40	5.02	5.04	1.709	Joint	–
–	Plasma reduction	60.1	3.99	5.36	4.34	4.16	1.663	Excluded	–
–	Solar	59.8	4.11	3.69	4.14	4.12	1.660	Excluded	–
9	Methane oxidation catalyst	67.7	4.48	5.10	4.43	4.45	1.436	Joint	–
10	Reliquefaction	69.4	4.21	5.10	4.36	4.28	1.311	Joint	–
11	Route optimization	78.7	5.50	3.60	4.75	5.12	1.091	Joint	–
12	Speed optimization	80.6	5.54	3.47	4.82	5.18	1.005	Joint	–
13	Energy efficiency	82.9	5.77	4.01	4.82	5.30	0.908	Joint	–
14	Resistance reduction	82.6	5.33	3.86	4.64	4.98	0.866	Joint	–
15	Propulsion efficiency	83.8	5.45	3.93	4.77	5.11	0.828	Joint	–

Note: L: domestic technology level, M: market prospects (2030-2050), D: technical difficulty, E: abatement contribution (2030-2050), V = (M+E)/2, P = V×(1−L/100). Solar and plasma reduction were excluded at step 1 (strategic relevance) and are therefore not ranked.

가치와 기술격차의 관계는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 가장 먼저 확인되는 사실은 선도기술로 판정된 항목이 하나도 없다는 점이다. 국내 기술수준이 90점을 넘는 항목은 존재하지 않으며 최고치도 추진효율 개선의 83.8점에 그친다. 다만 에너지 효율 개선 5개 항목이 모두 최상위 근접 구간에 분포하고 있어, 이 영역에서는 추가적인 연구개발 성과에 따라 선도 진입의 여지가 남아 있다.

우선순위의 상위권은 대체연료군이 독점하였다. 1위부터 4위까지가 모두 에너지 소비 중분류에 속하는데, 이 항목들이 높은 전략가치와 큰 기술격차를 동시에 보유하고 있기 때문이다. 그중에서도 암모니아와 수소는 전략적 가치가 각각 6.12점과 6.14점으로 매우 높음 급간에 해당하여 시급 대상으로 판정되었다. 그럼에도 두 항목의 협력유형은 갈리는데, 암모니아가 기술수준 60점 경계 아래에 위치하면서 난이도까지 높아 협동기술로 배정된 반면 수소는 그 경계를 근소하게 상회하여 공동기술로 분류되었기 때문이다.

이와 대조적으로 에너지 효율 개선 항목은 협력유형상 공동기술로 배정되면서도 우선순위지수에서는 최하위군을 형성한다. 이는 모순이 아니라 규칙의 설계 의도가 반영된 결과이다. 역량이 이미 높은 만큼 격차 해소를 목적으로 하는 협력의 한계효용은 낮을 수밖에 없으며, 이 영역에 필요한 것은 보유 역량을 국제 표준 및 인증 체계에 반영시키기 위한 협력이기 때문이다.

한편 풍력과 바이오연료는 역량 축적형으로 분류되었다. 두 항목 모두 국내 기술수준이 60점에 미치지 못하면서 난이도 또한 4.2점을 밑도는데, 이는 세계적으로 이미 성숙한 기술에서 격차가 발생한 경우로서 기회의 창이 열려 있지 않음을 뜻한다. 실제로 풍력추진은 로터세일과 윙세일 등의 형태로 이미 상업 운용 단계에 진입하였고, 바이오연료 역시 드롭인(drop-in) 연료인 만큼 기술적 장벽보다는 원료 확보

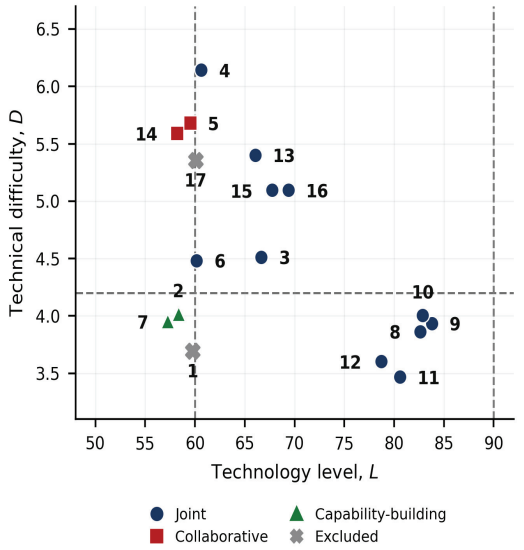


Fig. 1. Cooperation type assignment on the technology level–technical difficulty plane
Note: Numbers denote technology items: 1 = solar, 2 = wind, 3 = electricity/battery, 4 = hydrogen, 5 = ammonia, 6 = methanol, 7 = biofuel, 8 = resistance reduction, 9 = propulsion efficiency, 10 = energy efficiency, 11 = speed optimization, 12 = route optimization, 13 = post-combustion capture, 14 = pre-combustion capture, 15 = methane oxidation catalyst, 16 = reliquefaction, 17 = plasma reduction. Dashed lines indicate the assignment thresholds (L = 60, 90; D = 4.2)

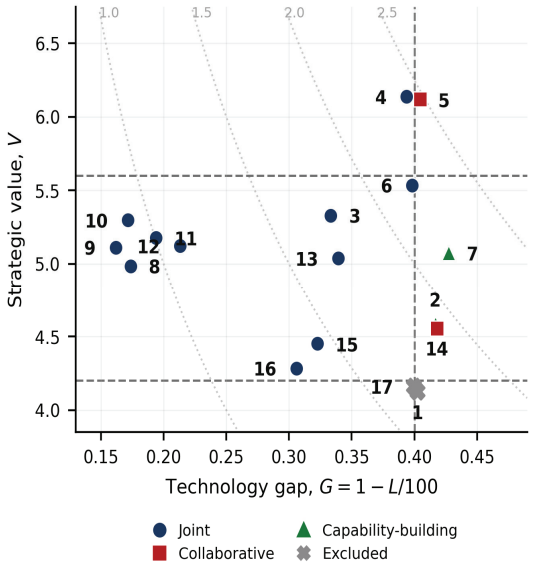


Fig. 2. Strategic value against normalised technology gap
Note: Item numbers are as defined in Fig. 1. Dotted curves are iso-P contours of the priority index, labelled with the corresponding P value; P increases towards the upper right. Dashed lines indicate L = 60 (vertical) and the strategic relevance and urgency thresholds V = 4.2 and 5.6 (horizontal)

와 전과정 배출 인증이 실질적 제약으로 작용한다.

끝으로 태양광과 플라즈마 감소는 전략적 관련성 판정 단계에서 제외되었다. 태양광은 시장성과 감축기여도가 모두 4.2점에 미달하는데, 이는 선체 면적의 물리적 제약상 추진 에너지에서 유의미한 비중을 차지하기 어렵다는 전문가 판단을 반영한다. 플라즈마 감소는 감축기여도 요건은 충족하였으나 시장성이 기준에 미치지 못하였다.

4.6 결정모형의 강건성 검토

앞서 제안된 결정규칙은 임계값 설정과 지수의 함수 형태, 그리고 응답 집단의 선택이라는 세 가지 재량적 요소를 포함한다. 따라서 각 요소를 변화시켰을 때 결과가 어떻게 달라지는지를 확인해야 모형의 판별력을 판단할 수 있다.

먼저 임계값을 이동시킨 재분류 결과는 Table 7과 같다. 기술수준 임계값을 60점으로 유지하는 한 난이도 임계값을 4.0점에서 4.4점으로 변화시켜도 유형 배정은 사실상 달라지지 않아, 4.0점에서 풍력 1개 항목만 이동한다. 반면 기술수준 임계값을 55점으로 낮추면 4개 항목이, 65점으로 높이면 2개에서 3개 항목의 배정이 바뀐다. 요컨대 모형의 민감도는 난이도 임계값이 아니라 기술수준 임계값에 집중되어 있으며, 이는 기술수준 60점 부근에 대체연료 항목이 밀집한 분포에서 비롯된 결과이다. 난이도 기준에 대한 둔감성은 기회의 창 판별이라는 이 지표의 기능이 특정 경계값에 의존하지 않음을 뜻하므로, 본 연구의 핵심 설계가 안정적임을 시사한다.

다음으로 우선순위지수의 함수 형태를 변경한 결과는 Table 8과 같다. 시장성과 감축기여도의 가중치를 7 대 3 및 3 대 7로 조정하거나, 산술평균 대신 기하평균을 적용하거나, 기술격차를 제곱하여 비선형으로 반영하거나, 난이도를 전략적 가치에 포함시

Table 7. Reassignment under alternative threshold values

L threshold	D threshold	Relevance threshold	Reassigned items	Item (s)
55	4.0	4.2	4	Wind, Ammonia, Biofuel, Pre-combustion capture
55	4.2	4.2	4	Wind, Ammonia, Biofuel, Pre-combustion capture
55	4.4	4.2	4	Wind, Ammonia, Biofuel, Pre-combustion capture
60	4.0	4.2	1	Wind
60 (baseline)	4.2	4.2	0	–
60	4.4	4.2	0	–
65	4.0	4.2	3	Wind, Hydrogen, Methanol
65	4.2	4.2	2	Hydrogen, Methanol
65	4.4	4.2	2	Hydrogen, Methanol

Note: The strategic relevance threshold is fixed at 4.2. Reassigned items are those whose cooperation type differs from the baseline specification ($L \geq 60$, $D \geq 4.2$).

Table 8. Priority ranking under alternative functional forms of the index

Functional form	1 st	2 nd	3 rd	4 th	5 th
$V = (M+E)/2$ (baseline)	Ammonia	Hydrogen	Methanol	Biofuel	Wind
$V = 0.7M+0.3E$	Ammonia	Hydrogen	Methanol	Biofuel	Wind
$V = 0.3M+0.7E$	Ammonia	Hydrogen	Methanol	Biofuel	Wind
$V = \sqrt{(M \times E)}$	Ammonia	Hydrogen	Methanol	Biofuel	Wind
$P = V \times G^2$	Ammonia	Hydrogen	Biofuel	Methanol	Wind
$V = (M+E+D) / 3$	Ammonia	Hydrogen	Methanol	Pre-combustion capture	Biofuel

Note: $G = 1 - L/100$. The two items excluded at the strategic relevance step are omitted from the ranking.

킨 여섯 가지 설정을 비교하였다. 그 결과 상위 3개 항목인 암모니아와 수소, 메탄올의 순위는 모든 설정에서 동일하게 유지되었다. 4위 이하에서는 격차를 제곱한 설정에서 바이오연료와 메탄올의 순서가 뒤바뀌고, 난이도를 포함한 설정에서 연소 전 포집이 4위로 상승하는 변화가 관찰된다. 후자는 앞서 3.4절에서 지적한 왜곡, 곧 난이도가 높다는 이유만으로 우선순위가 상승하는 현상을 그대로 보여주며, 난이도를 지수에서 배제한 설계의 타당성을 뒷받침한다.

끝으로 앞서 확인한 인식 격차를 고려하여, 기술수준을 해외 전문가 응답만으로 대체하고 동일 규칙을 재적용하였다(Table 9). 17개 항목 중 14개의 유형 배정이 유지되었고 수소와 암모니아, 메탄올 3개 항목에서 공동기술과 협동기술의 경계를 넘는 이동이 발생하였다. 세 항목 모두 기술수준이 59.5점에서 60.6점의 좁은 구간에 밀집해 있어 60점 경계에 구조적으로 민감하며, 이는 임계값 스윕의 결과와도 일치한다.

세 검토를 종합하면 두 가지 결론이 도출된다. 협력 대상 여부와 우선순위의 상위 구조는 어떤 설정에서도 흔들리지 않는다는 점이 하나이고, 대체연료군 내부의 공동기술과 협동기술 구분은 견고하지 않다는 점이 다른 하나이다. 후자는 세 항목의 기술수준 평균이 60점 경계에 근접해 있을 뿐 아니라 변동계수 또한 44%에서 48%로 전 항목 가운데 가장 높

Table 9. Reclassification using foreign-expert responses only

Technology item	Overall L	Type	Foreign L	Type	Result
Solar	59.8	Excluded	55.2	Excluded	Retained
Wind	58.3	Capability-building	57.1	Capability-building	Retained
Electricity/battery	66.7	Joint	66.2	Joint	Retained
Hydrogen	60.6	Joint	59.6	Collaborative	Changed
Ammonia	59.5	Collaborative	60.5	Joint	Changed
Methanol	60.2	Joint	58.9	Collaborative	Changed
Biofuel	57.3	Capability-building	53.6	Capability-building	Retained
Resistance reduction	82.6	Joint	75.7	Joint	Retained
Propulsion efficiency	83.8	Joint	78.1	Joint	Retained
Energy efficiency	82.9	Joint	76.7	Joint	Retained
Speed optimization	80.6	Joint	74.5	Joint	Retained
Route optimization	78.7	Joint	73.8	Joint	Retained
Post-combustion capture	66.1	Joint	63.6	Joint	Retained
Pre-combustion capture	58.2	Collaborative	58.2	Collaborative	Retained
Methane oxidation catalyst	67.7	Joint	64.7	Joint	Retained
Reliquefaction	69.4	Joint	65.6	Joint	Retained
Plasma reduction	60.1	Excluded	56.1	Excluded	Retained

다는 사실에서 이중으로 확인된다. 즉 경계 부근에 위치한다는 사실과 전문가 합의 수준이 낮다는 사실이 같은 방향을 가리킨다. 따라서 이 세 항목에 대해서는 협력 방식을 배타적으로 배정하기보다 공동 고도화와 탐색적 공동연구를 병행하는 포트폴리오 접근이 타당하며, 지배적 표준이 아직 결정되지 않았다는 점에서도 분산 투자가 합리적이다. 한편 에너지 효율 개선은 해외 전문가 기준 기술수준이 73.8점에서 78.1점에 그쳐 선박속도 최적화와 최적 항로가 최상위 근접 기준에 미달하므로, 운영 최적화 소프트웨어 영역에는 보다 보수적인 자기평가가 요구된다.

5. 고 찰

5.1 평가 이후 전개를 통한 사후 타당성 검토

전문가 기반의 미래 평가는 그 성격상 검증 기회를 갖기 어렵다는 한계를 안는다. 다만 본 연구의 평가가 2023년 하반기에 수행되었으므로, 이후 약 3년간의 시장 및 규제 전개를 통해 예측의 방향성을 부분적으로 점검할 수 있다. 이하에서는 네 영역으로 나누어 검토한다.

대체연료의 경우 방향성이 확인되었다. 전문가 집단은 암모니아와 수소를 2030년 이후 시장성과 감축 기여도가 가장 높으면서 기술적 난이도 또한 가장 높은 항목으로 평가하였는데, 실제 전개는 이 평가와 부합한다. 2026년 1월 세계 최초로 암모니아 이중연료 2행정 엔진의 형식승인시험과 공장인수시험이 완료되었고, 같은 해 6월 46,000 m^3급 중형 가스운반선이 인도되어 상업 운항에 진입하였다[31]. 해당 엔진은 고압 암모니아 분사 방식으로 전부하에서 약 5%의 파일럿 연료를 사용하며, 저탄소 암모니아 사용 시 재래식 선박 대비 최대 90%의 온실가스 저감이 가능한 것으로 평가된다. 제도적 뒷받침도 병행되어, 2026년 5월 IMO 해사안전위원회가 가스운반선의 암모니아 화물 연료 사용에 관한 잠정 지침을 승인하였다[32]. 주목할 점은 엔진 기본설계는 유럽 기업이, 엔진 제작과 시험 및 선박 건조는 한국 기업이

담당하였다는 사실이다. 이 분업 구조는 본 연구가 확인한 역량 분포, 즉 설계와 시스템 통합에서는 격차가 있고 건조와 제작에서는 강점이 있다는 진단과 정확히 부합한다.

다만 확산 속도는 기대에 미치지 못하였다. 대체연료 추진선 신규 발주는 2024년의 이례적 호황 이후 감소하여 2025년 275척, 2026년 상반기 137척을 기록하였고, 특히 메탄올 발주는 2024년 149척에서 2025년 61척으로 급감한 뒤 2026년 상반기에는 2척에 그친 반면 LNG 이중연료는 상반기 73척으로 전체의 절반 이상을 차지하였다[33]. 이는 규제 불확실성이 장기 자산인 선박의 연료 선택을 지연시키고 검증된 과도기 연료로 회귀시키는 전형적 양상이다. 요컨대 대체연료군의 시장성 급상승 시점을 2030년 이후로 특정한 본 연구의 판단은 타당하였으나, 그 전제인 규제 확정이 지연되고 있다.

전·후 처리에 대한 낮은 시장성 평가 역시 지지된다. 선상 탄소포집은 화학흡수 방식을 중심으로 기술성숙도 7단계에서 8단계에 도달하여 15건 이상의 실증 사례가 축적되었으나[34], 상용 확산을 가로막는 요인은 기술 자체가 아니라 선박 외부의 여건에 있다. 포집 설비 운용에 따른 추가 에너지 수요가 구성에 따라 9%에서 30%로 보고되고, 액화 이산화탄소 저장 탱크의 용적과 중량이 선내 배치를 제약하며, 포집된 이산화탄소의 항만 수용 설비와 인증 체계가 미비하다[35]. 이는 본 연구에서 전문가들이 지적한 제약과 정확히 일치한다. IMO는 2025년 4월 규제체계 개발 작업계획을 승인하였으나 완료 목표 시점은 2028년이다[4].

풍력의 역량 축적형 분류도 타당성을 확보하였다. 풍력추진 시스템을 장착한 400총톤 이상 상선은 2026년 6월 100척을 상회하였고 설치된 개별 시스템은 230기를 넘어섰으며, 개조 설치 기준 5%에서 20%, 최적화 설계 시 최대 30%의 추진에너지 대체가 확인된다[36]. 유조선 37척과 벌크선 24척이 설치의 다수를 차지한다는 점은 이 기술이 특정 선종의 실험을 넘어 범용화되고 있음을 보여준다. 만약 결정규칙이 국내 기술수준만으로 판단하였다면 풍력은 협동기술로 오분류되었을 것이며, 기술난이도를 기회의 창 판별 지표로 도입한 설계가 이 오류를 방지하였다.

한편 규제 환경의 불확실성은 오히려 확대되었다. 넷제로 프레임워크는 2025년 10월 임시총회에서 찬성 57개국, 반대 49개국, 기권 21개국으로 채택이 연기되었고, 2026년 MEPC 84에서 이행지침은 진전되었으나 프레임워크 본체에 대한 합의는 이루어지지 않아 최종 판단이 2026년 말 회기로 이월되었다[5,6]. 그런데 이 지연은 본 연구의 함의를 약화시키기보다 오히려 강화한다. 지역 규제가 예정대로 강화되는 사이 전 지구적 규제만 유동적인 상태로 남으면서 규제 비대칭이 확대되었기 때문이다. 나아가 기술 대안의 불확실성이 장기화되면서 특정 연료에 대한 조기 집중투자의 위험 또한 커졌는데, 이는 분산된 기술 포트폴리오 관리의 중요성을 높인다는 점에서 앞서의 민감도 분석 결론과도 정합적이다. 여기에 더하여 규제 형성 과정 자체가 기술 경쟁의 장으로 바뀌었다. 전과정 배출계수의 산정 방식과 무탄소 연료의 정의, 보상 기제의 설계가 모두 특정 기술경로의 경쟁력을 좌우하기 때문이다.

5.2 정책적 함의

이상의 결과는 국제협력을 단일한 활동으로 다루지 않고 유형별로 차별화할 것을 요구한다. 동일한 예산이라도 협력유형에 따라 집행 방식과 성과지표가 달라져야 하기 때문이다. 협동기술군인 암모니아와 연소 전 포집에 대해서는 기초·응용 단계 공동연구와 위험분담형 컨소시엄이 적합하다. 선도그룹조차 미해결 과제를 안고 있으므로 상호 불확실성을 공유하는 구조가 협력의 성립 조건이 되기 때문이다. 특히 암모니아는 독성과 연소안정성, 아산화질소 배출, 벙커링 안전이라는 과제군을 안고 있어 안전기준과 시험·인증 방법론의 공동 개발이 실질적 의제가 될 수 있다.

공동기술군에 대해서는 공동 고도화와 표준 공동제안이 적합하다. 교환 가능한 역량을 보유하므로 협력의 성격이 학습에서 교환으로 이동하기 때문이다.

특히 에너지 효율 개선은 역량이 최상위 근접 수준이고 선도국 지목에서도 33.8%를 차지하므로 기술 흡수가 아니라 국제 규범 형성 참여를 목표로 해야 한다. 풍력추진과 운항 최적화의 연료절감 효과 검증 방법론이 아직 표준화되지 않았다는 점이 기회이며, 검증 방법론의 선점은 관련 기자재 시장의 진입 조건을 규정하는 효과를 갖는다. 반면 역량 축적형인 풍력과 바이오연료에 대해서는 공동 연구개발 예산이 아니라 실증·인증·공급망 구축 예산이 배분되어야 한다.

다만 기술협력만으로 해소되지 않는 국내 제약이 남아 있다. 우선순위 1위로 판정된 암모니아의 경우, 「고압가스 안전관리법」상 이동식 탱크로리를 이용한 선박 직접 공급이 허용되지 않아 선박이 육상 연료공급시설에 접안해야만 연료 수급이 가능하였다. 이 제약은 2025년 6월 울산 암모니아 벙커링 규제자유특구가 지정되면서 특례 형태로 완화되어, 2027년 12월까지 미포국가산단 일대에서 차량 고정형 탱크로리를 이용한 선박 직접 공급 실증이 진행된다[38]. 그러나 이는 지역과 기간이 한정된 실증 특례이므로, 본 연구가 확인한 건조·제작 역량의 우위가 상용 공급망으로 이어지려면 특례의 성과를 일반 규정으로 전환하는 후속 작업이 병행되어야 한다. 국제 공동연구를 통해 확보한 안전기준과 시험·인증 방법론이 국내 법령에 반영되는 경로를 함께 설계해야 하는 이유가 여기에 있다.

협력 상대의 선별 문제는 상당 부분 해소되어 있다. 본 연구의 모든 지표에서 유럽이 일관된 선도그룹으로 확인되었기 때문이다. 남은 문제는 접근 경로이며, 이 점에서 우리나라의 Horizon Europe Pillar II 준회원국 지위는 결정적 기회를 제공한다. 우리나라는 2025년 1월 1일부터 잠정 적용 방식으로 참여하기 시작하였고 같은 해 7월 준회원 협정에 서명함으로써 아시아 국가로는 최초의 준회원국이 되었으며, 이에 따라 우리 연구기관은 EU 회원국과 동등한 자격으로 과제에 지원하고 별도의 국내 선정 절차 없이 연구비를 지원받을 수 있다[37]. 다만 제도적 접근권의 확보가 곧 활용을 의미하지는 않는다. 유럽의 협력연구 과제는 컨소시엄 구성과 사전 네트워크, 제안서 작성 역량이라는 진입 조건을 요구하며 개별 연구자의 노력만으로 충족되기 어렵다. 따라서 두 가지 제도적 뒷받침이 요구된다. 하나는 기술 영역별 거점 컨소시엄의 사전 구성이다. 본 연구가 식별한 협력 우선순위, 곧 대체연료와 선상 탄소포집 및 운항 최적화별로 국내 거점 연구기관과 대학 및 기업이 참여하는 컨소시엄을 구성하고 이를 단위로 유럽 파트너와 접촉하는 방식이며, 개별 기관 단위의 접근은 제시할 수 있는 교환가치의 크기를 축소시킨다. 다른 하나는 협력 우선순위 정보의 주기적 갱신과 공개이다. 본 연구의 평가 이후 3년 사이에 암모니아는 실증에서 상업 운항으로, 풍력추진은 확산 국면으로 이동하였다. 4축 평가를 1년에서 2년 주기로 갱신하고 결과를 공개하는 체계는 정보 비대칭에 따른 시장 참여자의 위험을 줄이는 공공재적 기능을 갖는다.

끝으로 본 연구의 결과는 기술개발과 규범 형성이 분리된 활동이 아님을 시사한다. 연료의 전과정 온실가스 집약도 산정 방법론과 무탄소 연료의 정의가 개별 기술경로의 경쟁력을 직접 결정하기 때문이다. 이 점에서 실선 건조·인도 실적과 실증 데이터의 축적이라는 우리나라의 강점은 유효한 협상 자원이 될 수 있다. 실제로 MEPC 84는 풍력추진의 에너지효율지수 산정 방식을 검토 의제로 채택하였는데[6], 이는 본 연구가 강점으로 확인한 선체·추진 설계 및 성능 검증 역량이 직접 활용될 수 있는 논의이다.

6. 결 론

본 연구는 기술 대안이 확정되지 않은 채 규제 시한만 선행하는 조건에서, 근접 추격국이 국제협력 자원을 어떤 기술항목에 어떤 성격으로 배분해야 하는가라는 문제를 다루었다. 이를 위해 선박 운용과정의 에너지 흐름을 단일 원리로 삼아 17개 기술항목의 분류체계를 구축하고, 국내외 전문가 45명을 대상으로 한 2단계 구조화된 전문가 평가를 통해 국내 기술수준과 시장성, 기술적 난이도, 감축기여도를 측정한 뒤, 각 지표에 협상자원·전략가치·기술수명주기 국면

이라는 구별되는 기능을 부여한 3단계 결정규칙을 적용하였다.

분석을 통해 확인된 가장 근본적인 사실은 우리나라의 역량 분포와 전략적 가치의 분포가 서로 어긋나 있다는 점이다. 기술수준은 에너지 효율 개선 81.7점, 전·후 처리 64.3점, 에너지 전환 60.3점 순인 반면 2030년 이후의 감축기여도는 정확히 그 역순으로 분포한다. 요컨대 우리 산업은 기존 추진 패러다임 내부의 성능 개선에 특화되어 발전해 온 탓에, 정작 2030년대 이후 시장을 규정할 에너지원 교체 영역에서 가장 큰 격차를 안고 있는 셈이다. 역량이 가장 부족한 영역에서 전략적 가치가 가장 크다는 이 어긋남이야말로 국제협력이라는 수단의 정당성이 성립하는 근거이며, 우선순위지수의 상위를 암모니아와 수소, 메탄올이 독점한 결과 또한 여기에서 비롯된다.

그러나 격차의 크기만으로는 협력의 성격이 결정되지 않는다. 본 연구가 기술적 난이도를 기회의 창의 개폐를 판별하는 지표로 도입한 이유가 여기에 있다. 이 지표를 결합함으로써 국내 기술수준이 동일하게 낮은 항목들 가운데서도, 세계적으로 기술체제가 아직 미성숙하여 탐색적 공동연구가 유효한 영역과 이미 성숙하여 도입과 국산화가 우선하는 영역을 구별할 수 있었다. 암모니아와 풍력이 유사한 기술수준을 보이면서도 전자는 협동기술로, 후자는 역량 축적형으로 갈린 것이 그 예이며, 평가 이후 풍력추진이 상업적 확산 국면에 진입한 전개는 이 판정을 사후적으로 뒷받침한다.

한편 국내와 해외 전문가의 인식 격차는 무작위적 오차가 아니라 평가 대상의 성격에 따라 구조화된 편의로 나타났다. 자기평가의 성격이 강한 기술수준에서는 최대 11.9점의 격차가 발생한 반면 기술 자체의 속성을 묻는 난이도에서는 0.3점 이내로 수렴하였기 때문이다. 이러한 비대칭은 변동계수 분포에서도 확인되어, 상용 실적이 축적된 효율 개선군의 변동계수가 21~29%인 반면 대체연료군은 36~48%에 이른다. 임계값 이동과 지수의 함수 형태 변경, 해외 전문가 응답만을 이용한 재분류라는 세 가지 검토를 수행한 결과 상위 3개 항목의 순위는 모든 설정에서 불변이었으나, 대체연료군 내부의 유형 구분은 60점 경계에 민감한 것으로 드러났다. 따라서 이 영역에 대해서는 단일 연료에 대한 배타적 배정보다 포트폴리오 관리가 합리적이며, 넷제로 프레임워크의 채택 지연으로 규제 불확실성이 오히려 확대된 현 국면은 이러한 판단을 한층 강화한다.

이상의 논의를 통해 본 연구는 기술추격 문헌의 기회의 창 개념을 측정 가능한 지표로 조작화하고 이를 정책 자원배분의 준거로 전환하였다. 제안된 결정규칙은 지표의 측정값과 급간 기준이 주어지면 동일한 결과를 산출하며 기준 변경의 영향을 추적할 수 있다는 점에서, 선언에 머물러 온 선택과 집중을 재현 가능한 절차로 정식화한 의의를 갖는다. 암모니아 추진선의 상업 인도 과정에서 관측된 설계와 제작의 국제 분업 구조가 본 연구의 역량 진단과 부합하였다는 사실 또한 모형이 실제 산업 구조를 포착하고 있음을 시사한다.

물론 본 연구에는 표본과 모형, 시점의 세 측면에서 한계가 남는다. 45명의 패널은 전문성 요건상 불가피한 규모이나 통계적 대표성을 주장하기에는 충분하지 않으며, 해외 전문가가 유럽에 집중된 결과 다른 주요 조선국의 관점이 반영되지 못하였다. 모형의 측면에서는 우선순위지수가 전략가치와 기술격차의 중요도를 동일하게 가정하여 격차 해소의 한계비용을 반영하지 못하고, 기술수준 60점 부근에 밀집한 항목이 급간 경계에 민감하다는 문제도 남아 있어 연속적 판정이나 퍼지 집합 접근의 도입이 대안이 될 수 있다. 아울러 평가 이후 규제 환경에 유의미한 변화가 발생한 만큼 갱신된 평가를 통한 재검증이 뒤따라야 하며, 동일한 분류체계를 유지한 반복 측정으로 지표값의 변화 속도 자체를 분석 대상으로 삼는 작업 또한 후속 과제로 남는다.

References

1. International Maritime Organization (IMO), “2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships”, IMO, UK, 2023, pp. 1-19, Retrieved from https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-

on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx.
2. European Commission, “Reducing emissions from the shipping sector”, Belgium, 2026, Retrieved from https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en.
3. European Union, “Regulation (EU) 2023/1805 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC (text with EEA relevance)”, Official Journal of the European Union, L 234, 2023, pp. 48-100, Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805/oj.
4. International Maritime Organization (IMO), “Marine environment protection committee (MEPC 83), 7 to 11 April 2025”, UK, 2025, Retrieved from https://www.imo.org/en/mediacentre/meetingsummaries/pages/mepc-83rd-session.aspx.
5. H. N. Psaraftis, “On the path towards decarbonisation of maritime transport: key issues at stake at the IMO MEPC 84”, Policy Department for Transformation, Innovation and Health, European Parliament, Belgium, 2026, pp. 1-19, doi: https://doi.org/10.2861/0347862.
6. Lloyd’s Register, “MEPC 84 summary report”, UK, 2026, Retrieved from https://www.lr.org/en/knowledge/regulatory-updates/imo-meetings-and-future-legislation/mepc-84-summary-report/.
7. J. Lim, S. Lee, S. Yoon, and O. Lim, “The technology development and substantiation of small hydrogen powered vessel”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 555-561, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.555.
8. E. A. Bouman, E. Lindstad, A. I. Rialland, and A. H. Strømman, “State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping - a review”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 52, 2017, pp. 408-421, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022.
9. H. Xing, S. Spence, and H. Chen, “A comprehensive review on countermeasures for CO_2 emissions from ships”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 134, 2020, pp. 110222, doi: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110222.
10. P. Balcombe, J. Brierley, C. Lewis, L. Skatvedt, J. Speirs, A. Hawkes, and I. Staffell, “How to decarbonise international shipping: options for fuels, technologies and policies”, Energy Conversion and Management, Vol. 182, 2019, pp. 72-88, doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.080.
11. E. Lindstad, B. Lagemann, A. Rialland, G. M. Gamlem, and A. Valland, “Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels”, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 101, 2021, pp. 103075, doi: https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103075.
12. H. Hwang, Y. Lee, N. Kwon, S. Kim, Y. Yoo, and H. Lee, “Economic feasibility analysis of an overseas green hydrogen supply chain”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 616-622, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.616.
13. A. Kim, C. Choe, S. Cheon, and H. Lim, “Economic and environmental impact analyses on supply chains for importing clean hydrogen from Australia in the Republic of Korea”, Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 33, No. 6, 2022, pp. 623-635, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2022.33.6.623.
14. D. H. Kim, Y. Choi, J. H. Oh, and C. H. Park, “Analysis of carbon emission effects and hydrogen prices for overseas green hydrogen imports by development of green ship”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 1-13, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.1.
15. C. Perez and L. Soete, “Catching up in technology: entry barriers and windows of opportunity”, in G. Dosi, C. Freeman, R. Nelson, G. Silverberg, and L. Soete (Eds.), “Technical change and economic theory”, Francis Pinter, UK, 1988, pp. 458-479, Retrieved from https://carlotaperez.org/wp-content/downloads/publications/development-s-g/Perez-Soete%20TCh%26EcTh_1988_on%20catching%20up1.pdf.
16. K. Lee and C. Lim, “Technological regimes, catching-up and leapfrogging: findings from the Korean industries”, Research Policy, Vol. 30, No. 3, 2001, pp. 459-483, doi: https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00088-3.
17. K. Lee and F. Malerba, “Catch-up cycles and changes in industrial leadership: windows of opportunity and responses of firms and countries in the evolution of sectoral systems”, Research Policy, Vol. 46, No. 2, 2017, pp. 338-351, doi: https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.09.006.
18. W. M. Cohen and D. A. Levinthal, “Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation”, Administrative Science Quarterly, Vol. 35, No. 1, 1990, pp. 128-152, doi: https://doi.org/10.2307/2393553.
19. J. G. March, “Exploration and exploitation in organizational learning”, Organization Science, Vol. 2, No. 1, 1991, pp. 71-87, doi: https://doi.org/10.1287/orsc.2.1.71.
20. J. Edler, K. Blind, H. Kroll, and T. Schubert, “Technology sovereignty as an emerging frame for innovation policy: defining rationales, ends and means”, Research Policy, Vol. 52, No. 6, 2023, pp. 104765, doi: https://doi.org/

10.1016/j.respol.2023.104765.
21. European Commission, “Taxonomy: final report of the technical expert group on sustainable finance”, European Commission, Belgium, 2020, pp. 1-67, Retrieved from https://finance.ec.europa.eu/system/files/2020-03/200309-sustainable-finance-teg-final-report-taxonomy_en.pdf.
22. Ministry of Environment, "Guidelines for the Korean green taxonomy (K-taxonomy)", Ministry of Environment, Korea, 2021, pp. 1-125, Retrieved from https://eng.me.go.kr/m/mob/policy_data/read.do?menuId=38&seq=7853.
23. Department for Transport, “Reducing the maritime sector's contribution to climate change and air pollution: maritime emission reduction options”, Crown copyright, UK, 2019, pp. 1-24, Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5d25f15ce5274a586197f093/maritime-emission-reduction-options.pdf.
24. G. Horton, H. Finney, S. Fischer, I. Sikora, J. McQuillen, N. Ash, and H. Shakeel, “Technological, operational and energy pathways for maritime transport to reduce emissions towards 2050”, Ricardo Energy & Environment, UK, 2022, Retrieved from https://www.ogci.com/wp-content/uploads/2023/05/OGCI_Concawe_Maritime_Decarbonisation_Final_Report_Issue_6C.pdf.
25. Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP), “Technology level assessment”, KISTEP, Korea, 2023, pp. 1-52, Retrieved from https://www.kistep.re.kr/board.es?act=view&bid=0018&list_no=43234&mid=a10506000000.
26. B. R. Martin, “Foresight in science and technology”, Technology Analysis & Strategic Management, Vol. 7, No. 2, 1995, pp. 139-168, doi: https://doi.org/10.1080/09537329508524202.
27. M. G. Morgan, “Use (and abuse) of expert elicitation in support of decision making for public policy”, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 111, No. 20, 2014, pp. 7176-7184, doi: https://doi.org/10.1073/pnas.1319946111.
28. C. Okoli and S. D. Pawlowski, “The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications”, Information & Management, Vol. 42, No. 1, 2004, pp. 15-29, doi: https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002.
29. J. Landeta, “Current validity of the Delphi method in social sciences”, Technological Forecasting and Social Change, Vol. 73, No. 5, 2006, pp. 467-482, doi: https://doi.org/10.1016/j.techfore.2005.09.002.
30. G. Rowe and G. Wright, “The Delphi technique as a forecasting tool: issues and analysis”, International Journal of Forecasting, Vol. 15, No. 4, 1999, pp. 353-375, doi: https://doi.org/10.1016/S0169-2070(99)00018-7.
31. WinGD, “WinGD achieves first type approval and factory acceptance testing for ammonia-fuelled two-stroke engine”, Switzerland, 2026, Retrieved from https://wingd.com/news-media/news/wingd-achieves-first-type-approval-and-factory-acceptance-testing-for-ammonia-fuelled-two-stroke-engine.
32. International Maritime Organization (IMO), “Report of the maritime safety committee on its 111th session (MSC 111)”, IMO, UK, 2026, Retrieved from https://www.mpa.gov.sg/api/media/e783b0c8-e1f3-44bf-8462-d2357ff91654/MSC-111-22---Report-Of-The-Maritime-Safety-Committee-On-Its-111Th-Session-(Secretariat).pdf.
33. DNV, “Alternative Fuels Insight (AFI)”, DNV, Norway, 2026, Retrieved from https://www.dnv.com/services/alternative-fuels-insights-afi--128171/.
34. European Maritime Safety Agency (EMSA), “Onboard carbon capture technologies”, EMSA, Lisbon, 2026, pp. 1-210, Retrieved from https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/5634-onboard-carbon-capture-technologies.html.
35. International Chamber of Shipping (ICS), “Onboard carbon capture and storage review”, ICS, UK, 2026, pp. 1-88, Retrieved from https://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2026/06/2508-0042-Final-Report-OCCS.pdf.
36. International Windship Association (IWSA), “Wind-powered cargo ships sail past the 100-vessel milestone”, UK, 2026, Retrieved from https://www.wind-ship.org/wind-powered-cargo-ships-sail-past-the-100-vessel-milestone/.
37. European Union, “Agreement between the European Union, of the one part, and the Republic of Korea, of the other part, on the participation of the Republic of Korea in Union programmes”, Official Journal of the European Union, L 2025/1532, 2025, pp. 1-24, Retrieved from https://eur-lex.europa.eu/eli/agree_internation/2025/1532/oj.
38. Ministry of SMEs and Startups (MSS), “Designation of the Ulsan ammonia bunkering regulation-free special zone”, MSS, Korea, 2025, Retrieved from https://rfz.go.kr/?menuno=319.