

Research Paper

AHP를 활용한 항만부문 기후변화 적응 지표체계 구조 개발

문한솔 · 이문숙

한국해양과학기술원 해양정책연구센터

Developing of Climate Change Adaptation Indicators for Ports Based on AHP

HanSol Mun · MoonSuk Lee

Ocean Policy Research Center, Korea Institute of Ocean Science & Technology

요약: 우리나라는 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」을 통해 기후변화영향평가 제도를 도입하고, 기후변화 영향이 높은 10개 분야에 대해 환경영향평가 수행 시 이를 함께 실시하도록 하고 있다. 반면 해양 분야에서는 육상의 환경영향평가와 목적이 유사한 '해양이용영향평가' 제도가 운영되고 있으나, 현행 평가 체계에는 기후변화 대응 요소가 충분히 반영되지 못하고 있는 실정이다. 이에 본 연구는 해양 분야에서의 기후변화영향평가 도입 가능성을 검토하기 위한 탐색적 연구로서, 현행 기후변화영향평가 대상 분야에 포함된 항만을 사례로 기후변화 '적응' 측면에 초점을 둔 평가 지표 체계를 구축하고자 하였다. 먼저, 문헌 고찰을 통해 기후변화 적응 지표를 조작적으로 정의하고, 항만에서 발생 가능한 기후변화 시나리오를 도출하였다. 각 시나리오 별로 기후변화 리스크와 레질리언스를 중심으로 한 평가 지표 후보를 설정하였다. 이후 전문가 자문을 통해 지표의 중요도, 타당성 및 평가 가능성을 검증하고, 계층적 분석법(Analytical Hierarchy Process, AHP)을 적용하여 최종 지표들의 중요도를 산출하였다. 마지막으로, 도출된 결과를 바탕으로 해양 분야 기후변화영향평가 제도 도입을 위한 적용 방안과 평가 방법을 논의하였다. 본 연구는 항만 분야의 기후변화 적응 수준을 체계적으로 진단할 수 있는 기초 지표 체계를 제시하였다는 점에서 의의가 있으며, 향후 해양이용영향평가를 기반으로 해양 분야 전반의 기후변화 적응 평가 체계 확장을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어: 기후변화영향평가, 항만 건설사업, 기후변화 적응

Abstract: South Korea has introduced a climate change impact assessment system through the 「Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis」, requiring its implementation alongside environmental impact assessments for 10 sectors highly susceptible to climate change impacts. However, in the marine sector, while a 'Sea Utilization Impact Assessment' system similar in purpose to terrestrial environmental impact assessments is in operation, the current assessment framework does not sufficiently incorporate climate change response elements. Therefore, this exploratory study examines the feasibility of introducing a climate change impact assessment in

the marine sector. Using ports—a sector currently subject to climate change impact assessments—as a case study, it aims to establish an evaluation indicator system focused on the ‘adaptation’ aspect of climate change. First, through a literature review, climate change adaptation indicators were operationally defined, and possible climate change scenarios for ports were derived. Candidate evaluation indicators centered on climate change risks and resilience were set for each scenario. Subsequently, the importance, validity, and evaluability of the indicators were verified through expert consultation, and the importance of the final indicators was calculated using the Analytical Hierarchy Process (AHP). Finally, based on the derived results, application plans and evaluation methods for introducing a climate change impact assessment system in the marine sector were discussed. This study is significant in that it presents a foundational indicator system capable of systematically diagnosing the level of climate change adaptation in the port sector. It is expected to serve as foundational data for expanding the climate change adaptation assessment system across the entire marine sector, based on sea utilization impact assessments.

Keywords: Climate Change Impact Assessment, Port Construction, Climate Change Adaptation

I. 서론

항만은 육지와 해양의 경계에 위치한 대규모 기반 시설로, 기후변화에 민감한 인프라 중 하나이다. 해수면 상승, 침수·침식과 같은 연안재해, 극한 기온, 폭풍 해일 등과 같은 기후 위험에 직접적으로 노출되어 있으며, 기온, 강수량, 바람, 폭풍 빈도 및 강도의 변화는 항만의 기능에 점점 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다(Becker et al., 2013). 이러한 기후변화의 영향은 항만 시설 자체뿐만 아니라 지역 경제, 공급망 운영, 해안 거주 인구까지도 미칠 수 있다(Ng et al., 2018). 따라서 기후변화로 인한 항만의 피해를 저감하기 위한 대응 방안은 충분히 검토되어야 한다.

국도에서는 「환경영향평가법」 시행령을 통해 2011년 1월부터 환경영향평가 항목에 온실가스 항목이 신규 추가되었다. 그러나 기후변화 적응에 관한 사항은 환경영향평가에서 고려되지 않고 있다. 이후 2021년 9월 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」(이하 탄소중립기본법)을 통해 ‘기후변화영향평가’가 도입되었다. 이는 국가 주요 계획과 개발사업에 대한 기후변화 영향을 사전에 분석·평가하는 제도이며, 전략환경영향평가 및 환경영향평가를 실시할 때 함께 운영된다. 평가 항목은 온실가스 감축 및 기후변화 적응으로 구분된다.

기후변화영향평가의 평가 대상은 전략환경영향평가

및 환경영향평가 대상 중 기후변화 영향이 높은 10개 분야에 대해 실시되며, 항만 건설이 이에 포함되었다. 다만, 관련 법령과 규칙은 평가서 작성 방법의 기본 틀만 규정하고 있을 뿐, 항만 분야의 실질적 적용을 위한 지표 체계의 구체화는 아직 미비하다. 더 나아가, 항만이 기후변화영향평가의 대상에 포함되었다는 사실은 항만이 기후 위험에 영향을 받을 수 있음을 잘 보여준다.

한편 해양에서는 유사 평가제도도 2025년 1월부터 ‘해양이용영향평가’(또는 행위의 규모에 따라 해양이용협의) 제도가 시행되었다. 해양을 개발 또는 이용하는 행위에 대해, 해양환경에 미치는 영향을 사전에 조사·평가하여 영향을 줄이기 위한 방안을 마련하는 제도이며, 평가 항목은 적정성 및 환경성 평가로 구분된다. 그러나 평가 항목 중 환경성 평가는 주로 전통적인 해양환경 요소들에 집중되어, 기후변화 관련 요인은 현재 체계 내에서 반영되고 있지 않다. 해양 분야에서 기후변화 의제가 국내·외적으로 점차 부각되고 있는 만큼, 해양이용영향평가에서도 기후변화 대응 요소의 반영을 검토할 필요가 있다.

따라서 본 연구는 해양 분야에서 기후변화영향평가 도입 가능성을 검토하기 위한 탐색적 연구로서, 현행 기후변화영향평가 대상인 항만을 사례로 기후변화에 따른 위험과 이에 대한 대응역량을 체계적으로 평가할 수 있는 기후변화 적응 평가체계를 마련하는 것을 목적으로 한다. 특히 기후변화영향평가는 감축과 적응의

두 부분으로 구성되는데, 본 연구에서는 우선 ‘적응’ 측면을 중심으로 체계를 구조화하고자 하였다. 먼저, 기존 문헌을 검토하여 항만에서 발생가능한 기후변화 시나리오들을 도출하고, 시나리오별 리스크 및 레질리언스 평가 지표 후보를 마련한다. 이후, 전문가 자문을 통해 지표의 중요성, 타당성, 평가가능성을 검증한 뒤, 확정된 지표에 대해 계층적 분석법(Analytical Hierarchy Process, AHP)을 적용하여 지표의 상대적 중요도를 산출한다.

II. 문헌 검토와 개념적 틀

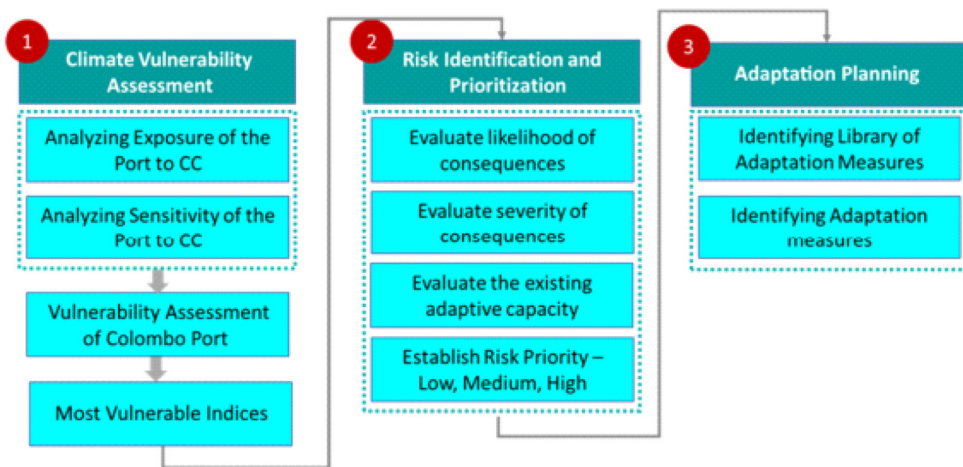
1. 해외 항만 기후변화영향평가 사례 검토

해외에서는 항만 개발사업의 계획 단계에서 기후변화영향평가를 다양한 방식으로 제도화하여 운영하고 있다. 먼저, 부두, 접안시설 및 배후 터미널을 조성하는 것을 목적으로 하는 영국의 Immingham 항만 사례를 검토한 결과, 환경영향평가 내에 ‘기후변화’ 장을 독립적으로 구성해 온실가스 배출, 기후탄력성, 결합기후영향평가를 검토하고 있었다. UKCP18 데이터 및 IPCC AR5(IPCC, 2014)의 RCP 8.5 시나리오를 활용하여, 부두 높이, 배수 시스템, 폭염 대응 등 설계 요소별로 관련 기후 리스크를 도출하고, 각 리스크의 ‘발생 가능성(likelihood)’과 ‘결과의 심각성(consequence)’를 조합

하여 정성적으로 평가하였다. 또한 해당 설계가 미래 기후 조건에서도 기능을 유지할 수 있는지 여부를 검토하고, 회복력 확보 여부를 평가하는 데 중점을 두었다.

반면, 환경영향평가 외부에서 별도의 기후변화 적응평가를 수행하는 방식도 확인된다. 스리랑카 콜롬보항 서부 구역에 3.2백만 TEU 규모의 신규 컨테이너 터미널을 조성하는 대형 항만 개발사업이 진행되었다. 본 개발사업에서는 환경영향평가와 별도로 기후변화 적응계획 보고서를 작성하였으며, ‘취약성 평가 → 리스크 식별·우선순위화 → 적응계획 수립’의 3단계 구조로 평가가 이루어졌다(Figure 1). 이 사례의 특징은 평가 결과를 통해 우선 조치가 필요한 자산들을 선별하고, 결과에 기반한 적응대책을 수립하는 논리적인 구조를 갖추고 있다는 것이다.

또한 국제기구(아시아개발은행)의 기준에 따라 기후변화위험평가를 체계화한 사례가 있다. 기후변화에 취약한 도서국인 남태평양 나우루공화국의 항만건설 프로젝트는, 기존 노후 항만을 대체하고 무역 접근성과 재난 대응력을 확보하는 것을 목적으로 진행되었으며, 아시아개발은행(ADB)이 주관하였다. 본 사업의 일환으로 ‘기후위험 및 취약성 평가(Climate Risk and Vulnerability Assessment, CRVA)’가 작성되었으며, 이는 IPCC 및 ADB 기준에 기반된 체계적 리스크 평가 방법론을 따랐다. 평가는 ‘기후 리스크 요인 식별 → 리스



<Figure 1> Overall Methodology for Climate Vulnerability Assessment and Adaptation Planning

Source: AECOM Ltd.(2022)

크 분석 → 설계 차원의 대응 → 잔여 리스크 검토'의 절차에 따라 진행되었다. 특히 스크리닝 방식을 통해 항만에서 발생가능한 기후 스트레스를 도출했다는 점이 특징이다. 또한 기존 항만과 제안된 신규 항만에 대해 동일한 리스크 평가를 각각 실시한 후, 이의 결과를 비교하여 신규 항만 설계가 실제로 기후탄력성을 어떻게 개선할 수 있는지를 입증하는 '설계 차원의 대응(Design Response)' 절차를 포함하고 있다. 이들 사례는 항만 개발에서 기후변화 리스크 또는 적응 평가가 이미 국제적으로 제도화되고 있으며, 다양한 평가 절차가 실무에 적용되고 있음을 시사한다.

2. 기후변화 적응 개념의 발전

IPCC AR3(IPCC, 2001)과 AR4(IPCC, 2007)은 기후변화 취약성을 노출, 민감도, 적응능력의 함수로 정의하며, 유연한 틀을 제공하였다. 노출은 실제 기후 피해의 결과를 반영하는 요소(결과 취약성)이며, 민감도와 적응능력은 사회·경제적 맥락에서의 대응 여건을 나타내는 요소(맥락 취약성)이다. 이후 IPCC AR5(IPCC, 2014)은 맥락 취약성의 중요성을 더욱 강조하게 되는데, 취약성이 아닌 리스크의 개념이 전면에 등장하게 되었다. 위험성과 노출을 분리하고 취약성의 사회경제적 맥락을 강조하게 된 것이다(Han et al., 2023). 이에 따라 AR5에서는 리스크를 기후와 관련된 다양한 위험성(Hazard), 노출(Exposure), 취약성(Vulnerability) 사이의 상호작용으로 인한 잠재적인 부정적 결과로 인식하였다. AR4가 취약성 평가를 강조했던 것에 비해 리스크 평가는 기후변화라는 불확실한 현상을 다루는데 유리하며, 정책 및 의사결정 과정과 직접적으로 연계될 수 있다는 장점이 있다(Kim, 2015).

IPCC AR6(IPCC, 2022)에서는 이러한 세 요소의 틀은 유지하되, 기후, 생태계, 인간사회의 상호연결된 시스템 간 상호작용에 주목하였다. 즉, 리스크의 범위를 생태계와 인간사회 시스템의 복합적 위험으로 확장하였으며, 적응 한계를 넘어 발생할 수 있는 손실과 피해까지 포괄하였다. 이에 따라 AR6는 리스크를 단순한 위험 회피를 위한 피해의 잠재성으로 보는 대신, 적응, 완화, 전환을 강화하여 사회와 생태계 전반의 회복탄력성을 제고하는 기후탄력적 개발의 출발 속에서 이해

한다. 즉, 리스크는 더 이상 단순 부정적 결과가 아니라, 시스템 전환과 지속가능한 회복력 구축을 유도하는 중심 개념으로 자리 잡았다.

한편 IPCC AR6(IPCC, 2022)에 따르면, 기후변화 적응의 목표는 (1) 기후변화에 대한 위험과 취약성을 줄이고, (2) 회복력을 강화하며, (3) 웰빙과 예측 능력을 향상시키고, (4) 변화에 성공적으로 대응하는 것이다. 국내 「탄소중립기본법」 제2조제11호 또한 기후위기 적응을 기후위기에 대한 취약성을 줄이고 기후위기로 인한 건강피해와 자연재해에 대한 적응역량과 회복력을 높이는 등 현재 나타나고 있거나 미래에 나타날 것으로 예상되는 기후위기의 파급효과와 영향을 최소화하거나 유익한 기회로 촉진하는 모든 활동으로 정의하고 있다.

따라서 기후 적응 프레임워크에서 필요한 첫번째 단계는 리스크 분석을 통한 위험의 진단이다. 주요 위험 요인과 발생 가능성을 진단하고, 동시에 시스템의 취약성을 구조적으로 분석하는 것을 포함한다. IPCC가 제시한 세 요소의 리스크 프레임워크는 다양한 분야에서 구체화되어왔으며, 항만 분야에서도 적용되고 있다. 예컨대 Fernandez-Perez et al.(2024b)은 파도·해수면 상승·폭풍해일을 hazard로, 항만 자산 또는 장소(위치)를 exposure로, 자산의 구조적·운영상 약점을 vulnerability로 정의하여 기후변화 리스크를 평가하였다. Izaguirre et al.(2021) 또한 이 프레임워크의 조합을 통해 피해 규모와 빈도를 반영하였다. 이러한 구조는 위험 발생의 경로와 시스템의 약점을 세분화하여 정책적 개입 지점을 도출할 수 있다는 장점을 지닌다.

리스크는 다양한 방식으로 정의되고 구체화되어 왔으며, 위험요인(hazard)의 발생가능성(likelihood)과 실제 발생했을 때의 결과(consequence)의 조합으로 정의되기도 한다. Fernandez-Perez et al.(2024a)는 자산 손상 및 항만 활동 중단을 초래할 수 있는, 발생 강도와 빈도의 조합이 수용 가능한 수준을 초과하는 상태라고 정의한다. 실제로 기후 요인과 항만 인프라 특성을 조합한 시나리오의 발생가능성 기반의 리스크 평가(Mutombo & Ölçer, 2017; Yang et al., 2025), 발생가능성과 심각성의 곱셈을 통한 리스크 점수 계산(Yang & Ge, 2020), GIS 기반 리스크 매트릭스(Messner et al., 2013)

등이 활용되었다. 또한 기후 영향 요인별 과거 데이터를 기반으로 리스크를 단순 정량화하기도 하였다(Poo et al., 2021). 이와 같은 정의는 결국 IPCC가 제시한 3 요소의 정의와 밀접하게 연관되어 있다. 즉, 발생가능성이나 빈도는 hazard의 물리적 특성과 발생확률을 반영하며, 위험요인이 실제로 발생하면서 생기는 결과(consequences)는 해당 시스템의 취약성과 위험에 대한 노출에 의해 결정되기 때문이다(Lee & Kang, 2018).

기후 적응 프레임워크에서 필요한 두번째 단계는 시스템 전반의 회복탄력성 강화를 다루는 것이다. IPCC AR5는 레질리언스를 ‘위험이나 교란에 대처하고, 본질적인 기능·정체성·구조를 유지하며, 재조직할 수 있는 사회, 경제 및 환경 시스템의 능력’으로 정의한다(IPCC, 2014). 이는 주로 충격 이후의 회복과 본질적 기능의 유지에 중점을 두고 있다. 반면, AR6에서는 변환(transformation)이라는 개념에 대해 상당한 비중을 둔다. 변환은 ‘주어진 기간 내에 시스템을 다른 상태 또는 조건으로 변경하는 프로세스’로 정의된다(IPCC, 2022). 기존의 ‘점진적(incremental) 적응’으로는 극복할 수 없는 위험을 해결하기 위해, 시스템의 근본적 체계 변화를 의미하는 ‘변혁적(transformational) 적응’을 강조하는 것이다. 즉, 단순한 회복을 넘어 예측되는 충격에 따라 체계를 전환하고, 변화된 환경 속에서 새로운 균형을 형성하는 능력까지 포함한다. 이러한 확장된 개념을 적용하면, 항만에서의 레질리언스는 항구가 중단된 후 새로운 정상 상태에 적응하는 능력으로 정의할 수 있다(Xu et al., 2024).

Bruneau et al.(2003)은 레질리언스를 4Rs 체계(Robustness, Rapidity, Redundancy, Resourcefulness)로 정리하였으며, 이후 다양한 분야에서의 분석 틀로 활용되고 있다. 항만 분야에서도 다양한 세부 지표를 활용하고 있으나, 실질적으로는 네 가지 차원과 개념적으로 연결된다. 예를 들어, Jiang et al.(2021)은 Robustness, Efficiency 등을, Kim et al.(2021)은 Robustness, Redundancy, Recovery, Collaboration, Information Sharing, Response 등의 세부 지표를 통해, 충격 저항, 대체 수단 확보, 빠른 대응 등 4R의 핵심 요소를 포괄하고 있다. Polydoropoulou et al.(2025), León-Mateos et al.(2021), Yang et al.(2025) 역시 인프라, 거버넌스, 네트워크 차원에서 대체 수단

확보, 위기관리, 빠른 대응 역량 등을 강조하며, 공통적으로 충격 저항, 중복성, 자원 동원력, 신속성이라는 네 가지 요소로 수렴하는 결과를 보였다. 그러나 항만 레질리언스 지표의 설계와 검증을 다룬 실증 연구는 여전히 부족하며, 기존 연구들은 특정 기후 요인이나 제한된 이해관계자에 집중하는 부분적 접근에 머무르는 경향이 있다고 지적된 바 있다(León-Mateos et al., 2021).

3. 개념적 틀

적응 평가에서 활용되는 지표 체계는 리스크 평가, 취약성 평가, 레질리언스 평가 등이 혼재되어 수행되고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 리스크는 hazard, exposure, vulnerability의 함수로 정의된다. 취약성은 exposure, sensitivity, adaptive capacity로 구성된다. 레질리언스는 이 중 특히 adaptive capacity를 확장한 개념으로, robustness, rapidity, redundancy, resourcefulness의 개념에 기반하여 구성되고 있다. 이처럼 각 평가 요소들이 연관성을 가질 수 밖에 없는 만큼, 중복을 최소화하고 명확한 평가 체계를 마련하는 것이 필요하다. 결국 기후변화 적응 프레임워크는 (1) 위험 요인 규명과 취약성 진단(H-E-V 구조), (2) 시스템 회복탄력성 강화(4Rs 구조) 라는 두 축을 중심으로 발전해 왔다. 그러나 기존 연구들은 리스크와 레질리언스를 개별적으로 다루는 경향이 강해, 통합적·체계적 틀로 구조화하



<Figure 2> Structure of the evaluation indicator system developed in this study

<Table 1> Operational Definitions of the Evaluation Indicators

Indicator		Dimension	Definition
Adaptation	Risk	Hazard	A physical event of human or natural origin that can cause damage and loss to property, infrastructure, ecosystems, or environmental resources
		Exposure	People, property, infrastructure, or economic, social, and cultural assets located in areas and environments that may be adversely affected by climate change
		Vulnerability	The degree of sensitivity to harm or the lack of capacity to cope and adapt to climate impacts
	Resilience	Robustness	The ability to resist external shocks and prepare proactively
		Rapidity	The speed at which systems respond after impacts and, when necessary, implement incremental or transformative changes
		Redundancy	Possibility of structural transition through alternative routes and system flexibility
		Resourcefulness	The capacity for learning, innovation, and mobilization of resources to support crisis response and system transformation

는 데는 한계가 있다. 이에 본 연구는 기후변화 적응을 평가하기 위해 리스크와 레질리언스 개념을 함께 사용하며, 이를 구체화하기 위한 조작적 정의가 필요하다.

리스크란, 항만 시스템이 기후변화로 인해 피해를 입을 가능성을 의미하며, hazard, exposure, vulnerability의 세 지표로 구성되는 복합 지표로써, 이의 세부 정의는 Table 1과 같다. 한편, 레질리언스란, 항구가 중단된 후 새로운 정상 상태에 적응하는 능력을 의미한다. 선제적으로 피해에 대비하고, 전환에 빠르게 대응하며, 전환된 새로운 시스템에 대해 기능을 유지하거나 회복할 수 있는 능력이 필요하다. 본 연구는 Bruneau et al.(2003)의 개념을 확장하여, robustness, rapidity, redundancy, resourcefulness의 네 지표로 구성되는 복합 지표로 레질리언스를 정의한다.

앞서 살펴본 바와 같이 기후변화 적응 프레임워크에는 위험 진단과 회복탄력성 강화, 두 단계의 접근이 필요하다(Figure 2). 기후변화로 인해 피해를 입을 가능성이 인 리스크와, 충격을 받은 항만 시스템이 중단된 후 새로운 정상 상태에 적응하는 능력인 레질리언스를 함께 평가하는 이원적 평가 체계가 바람직하다. 전자는 ‘얼마나 어떻게 위험한가’에 대한 질문을 통해 위험을 진단하는 도구라면, 후자는 ‘새로운 정상 상태에 얼마나 잘 적응할 수 있는가’에 대한 질문을 통해 예측, 회복, 전환 능력을 확보하는 대응적 접근으로서 역할을 한다. 따라서 이 두 요소는 상호보완적인 개념으로써, 통합적 접근이 이뤄져야 한다.

III. 평가 지표와 방법론

1. 항만 리스크 시나리오

기후변화 적응 지표를 구성하기 위해서는 먼저 ‘항만’이라는 공간 내에서 발생할 수 있는 기후변화 위험 요인과 그 상호 관계를 파악할 필요가 있다. 기후변화로 인한 물리적·환경적 변화가 항만 운영과 인프라에 미치는 영향이 다양하며, 발생 가능한 시나리오에 따라 요구되는 지표 또한 달라지기 때문이다. 이에 본 연구에서는 선행연구들을 종합하여, 항만에서 다뤄야 하는 유의미한 기후변화 예측 요인들과, 이로부터 파생되는 영향 요인들을 검토하였다.

검토 결과, 항만에서 주로 고려해야 할 기후변화 예측 요인으로는 해수면 고도, 파랑, 극한 강우, 고온, 해수면 온도 등이 반복적으로 언급되었다. 이러한 예측 요인은 침수, 침식, 폭풍해일, 태풍, 인프라 손상 등 다양한 영향 요인으로 이어지는 것으로 나타났다(Fernandez-Perez et al., 2024a, 2024b; Izaguirre et al., 2020, 2021; León-Mateos et al., 2021; McIntosh & Becker, 2019, 2020; Messner et al., 2013; Mutombo & Ölçer, 2017; Ng et al., 2013; Poo et al., 2021; Sharaan et al., 2024; Yang & Ge, 2020; Yang et al., 2018; Yang et al., 2025). 따라서 본 연구는 이들 간의 관계를 바탕으로 시나리오 A, B, C, D를 정의하였다(Table 2).

<Table 2> Classification of Climate Change Factors of Key Literatures

Category	Scenario name	Predictive factor	Impact factor	Description
A	Flooding, overtopping, and coastal erosion risks caused by sea-level rise and high waves	Sea level, wave height (intensity and frequency)	Inundation, overtopping, erosion	Port inundation risk, changes in hydrodynamics and sediment transport, altered dredging requirements, wave penetration hazards, and vessel safety issues
B	Port flooding risks caused by extreme rainfall	Precipitation amount, frequency of extreme weather events	Heavy rain, flooding	Inundation or damage to port facilities, increased water levels and flow variations, reduced visibility affecting vessel maneuverability within ports
C	Heat-related malfunction of port infrastructure and worker safety risks under high-temperature & high-humidity conditions	temperature, relative humidity, solar radiation	Fire, corrosion, equipment malfunction, worker safety	Damage to infrastructure, equipment, or cargo; increased energy consumption for cooling; and health and safety issues for workers due to extreme temperatures
D	Structural damage and operational disruption risks caused by typhoons and strong winds	Sea surface temperature, wind speed, typhoon frequency	Typhoon, strong winds, structural damage	Difficulty in ship operations and berthing, equipment damage, and temporary shutdowns of port operations

2. 기후변화 적응 지표 체계

앞서 정의된 네 개의 시나리오에 적합한 리스크 평가 지표 및 레질리언스 평가 지표를 구성하기 위해 선행연구를 검토하여 초안을 도출하였다. 다만, 레질리언스 지표는 별도의 시나리오로 구분하지 않았는데, 이는 특정 기후 요인에 종속된 역량이 아닌, 기후 재난 전반에 걸쳐 작동하는 항만 시스템의 포괄적 능력을 측정해야 하기 때문이다.

본 연구는 3계층 구조로 항만의 기후변화 적응 지표 체계를 정의하였다. 먼저 리스크 지표의 경우, L1은 시나리오별 리스크, L2는 Hazard, Exposure, Vulnerability, L3는 각 세부 지표별 하위 지표로 구성된다. 레질리언스 지표 또한 L1은 레질리언스, L2는 Robustness, Rapidity, Redundancy, Resourcefulness, L3는 이에 대응하는 하위 지표로 구성되었다. 리스크 평가 지표는 대부분 정량적 데이터 기반으로 측정되지만, 레질리언스 평가는 항만이 보유한 역량을 설명하는 데 중점을 두며, 주로 정성적 지표로 구성된다. 구체적인 평가 기준에 따라 1-5 범위의 점수와 근거를 평가하는 방식으로, 이 과정에서 현장 점검이나 내부 자료와 같은 정성적 정보도 활용될 수 있다. 레질리언스의 L3 지표별 정의와 평가 기준은 부록(Appendix 1)에 제시하였다.

한편, 선행연구 검토를 통해 도출된 지표의 적절성 검증을 위해 전문가 평가를 실시하였다. 중요성, 타당성, 평가 가능성을 기준으로 검토가 이루어졌으며, 총 21명의 전문가(연구기관 8명, 공공기관 4명, 학계 3명, 정부부처 4명, 민간기업 4명)가 참여하였다. 그 결과 삭제 검토, 필수 포함, 추가 제안의 과정을 통해 지표 체계가 보완되었다. Figure 3은 전문가 평가 과정을 통해 학문적 정당성과 실무적 타당성을 반영하여 수정된 최종 지표 체계이다.

3. AHP의 적용

본 연구는 지표 체계를 구성할 때, 모든 지표의 중요도가 동일하지 않다는 점을 인식했다. L2 수준의 세부 지표들이 항만 시스템에 미치는 의미가 상이하고, 각 하위 지표들이 항만의 기후변화 적응에 기여하는 영향의 강도 또한 동일할 수 없기 때문이다. 따라서 본 연구는 지표의 중요도를 분석하기 위해 다중 기준 의사결정 분석(MCDA)의 AHP 방법론을 채택하였다. 다중 기준 의사결정 분석은 의사결정 과학 분야에서 구조적 접근 방식을 통해 다양한 대안, 정보 및 판단을 분석할 수 있는 일련의 의사결정 지원 방법을 말한다(Cegan et al., 2017; Kurth et al., 2017).



<Figure 3> Framework of assessment indicators

AHP 분석에서는 쌍별 비교를 통해 속성 가중치를 평가해 우선순위 척도를 도출할 수 있다. 다수의 속성들을 계층적으로 분류하고 분석함으로써 합리적인 의사결정을 지원하는 도구이다(Saaty, 2008). 의사결정하기 어려운 문제에 대해 전문가들의 지식을 활용하여 가중치를 산출하는데 유용하게 사용된다. 이 방법론은 다음과 같은 이점을 가진다. 첫째, 통계적 일반화를 요구하지 않기 때문에 50명 미만의 소규모 표본에서도 활용 가능하다(Herath, 2004). 둘째, 쌍대 비교를 통해 의사결정 요소의 우선순위를 도출함으로써 응답자의 인지적 부담을 줄이고 일관성 있는 판단을 가능하게 한다(Himes, 2007). 셋째, 숫자적 선호도 척도를 사용하여 정량적 기준과 정성적 기준을 모두 일관성 있게 비교할 수 있다는 점에서 유연성과 실용성이 높다(Morgan, 2017).

최근에는 다양한 분야에서 복합 지표의 세부 지표별 가중치를 산정하는 표준화된 방법으로 활용되고 있다. 특히 기후·환경·재해 분야에서의 활용이 두드러지며, 항만 취약성 평가 지표(McIntosh & Becker, 2020), 도로

기후변화 적응 평가 지표(Song et al., 2024), 기후스마트 농업 모니터링 지표(Singh et al., 2024), 홍수 재해 회복력 지표(Mushwani et al., 2024), 지속가능한 도시재생 지표(Zhao et al., 2023) 등 여러 분야에서 활용되고 있다.

본 연구의 AHP 평가는 연구기관, 학계, 공공기관, 정부부처, 민간기업 소속 전문가 35명을 대상으로 이루어졌다. 연령대는 30대가 37.1%로 가장 많았고, 평균 연령은 44.7세였다. 소속은 연구원이 42.9%로 가장 높은 비중을 차지했으며, 민간기업(20.0%), 대학(14.3%), 정부(11.4%), 공기업(11.4%) 순으로 나타나 다양한 배경을 반영하였다. 주요 전문 분야는 항만계획·정책·운영(20.0%), 항만공학·인프라(14.3%), 해양·연안공학/모델링(22.9%), 기후변화·재난/안전(22.9%), 해양정책·계획(20.0%) 등으로 고르게 분포하였다. 응답자의 관련 분야 종사 경력은 평균 14년이었으며, 전체 응답자의 약 57%가 10년 이상의 경력을 보유하고 있었다.

AHP 평가 프레임워크는 두 가지 수준으로 구성되었다. 첫 번째 수준은 시나리오별 리스크의 세 가지 세부

<Table 3> Results of scenario-specific importance analysis

Category	Weight	Rank
A (Flooding, overtopping, and coastal erosion risks caused by sea-level rise and high waves)	0.3183	2
B (Port flooding risks caused by extreme rainfall)	0.1821	3
C (Heat-related malfunction of port infrastructure and worker safety risks under high-temperature and high-humidity conditions)	0.1407	4
D (Structural damage and operational disruption risks caused by typhoons and strong winds)	0.3589	1

지표 및 레질리언스의 네 가지 세부 지표에 가중치를 부여하기 위한 구조이다. 그리고 두 번째 수준은 각 세부 지표들의 하위 지표들에 가중치를 부여하는 단계이다. 응답자들은 “A와 B 중 어떤 것이 더 중요하다고 생각하는가?”라는 쌍대 비교 질문에서, 1~5점 척도를 사용하여 중요도를 평가하였다. 또한, AHP에서는 응답자의 일관성 비율(Consistency ration, CR) 값이 0.1 이하를 만족해야 하므로, 응답자가 스스로 CR 값을 확인할 수 있도록 피드백 과정을 포함하였다. 분석 결과, 35개 평가 결과의 CR 값은 모두 0.1 이하를 만족하는 것으로 나타났다.

IV. 연구 결과

1. 시나리오의 중요도

본 연구는 평가 지표의 중요도를 산출하기 이전에, 먼저 항만에서 발생가능한 리스크 시나리오를 분류하여 이의 중요도를 평가하였다(Table 3). 응답자들은 네 가지 시나리오 중 시나리오 D(35.89%)에 가장 높은 중요도를 부여하였으며, 그 뒤를 시나리오 A(31.83%)가 이었다. 반면 시나리오 B(18.21%)와 시나리오 C(14.07%)는 20%에 못미치는 중요도를 가지는 것으로 나타나 그 뒤를 이었다.

시나리오 C와 같이 점진형 변화나 서서히 누적되는 스트레스보다 D 및 A 같이 돌발형 재해에 해당하는 시나리오가 상대적으로 더 중요하다고 나타났다. 즉, 태풍이나 고파랑과 같은 돌발적 영향이 즉각적인 운영 장애로 이어지기 쉬운 상황이 더 무겁게 평가되고, 관련한 주의와 대비 필요성이 상대적으로 크게 인식되고 있음을 시사한다.

2. 리스크 지표의 중요도

리스크의 세부 지표 수준에서는 시나리오 A, B, D에서 공통적으로 Hazard 차원이 상대적으로 높은 중요도를 보였으며, 그 하위는 Vulnerability, Exposure 순으로 나타났다. 그러나 시나리오 C에서는 Exposure가 가장 중요한 요소로 평가되었다. 이러한 결과는 짧은 시간에 강한 외력으로 작동하는 상황(A, D)에서는 물리적 구동력 자체의 영향력이 상대적으로 크고, 열, 습도와 같이 누적되는 환경(C)에서는 작업 환경, 근로자 노출 등이 상대적으로 커짐을 시사한다. 따라서 시나리오에 따라 어떤 요소가 항만에 미치는 리스크 영향은 상이할 수 있음을 시사한다. 또한 이러한 차이는 “어떤 상황에서 무엇을 먼저 다루어야 하는가”에 대한 답이 시나리오 특성에 의해 달라진다는 것을 의미한다.

하위 지표 수준 분석에서도 마찬가지로 상황 시나리오별 핵심 항목이 명확히 달라지고, 위험의 주요 경로가 구체화된다는 점을 확인하였다. 시나리오 A에서는 A1-2(설계빈도 초과 파고 발생률)이 최상위였고, A3-3(방파제 설계파고 대비 실제파고 대비율), A3-1(시설별 설계여유고 평균 충족률)이 뒤를 이었다. 반면 A3-2(매립지 유무)는 낮은 비중을 보였다. 파랑의 설계 초과 빈도와 방재시설·여유고의 성능 여유가 핵심 경로를 시사한다. B에서는 B1-3(1시간 최대 강우강도), B3-3(설계강우 대비 배수충족률), B2-1(침수 위험지역 면적 비율)이 상위권으로, 유입 강도, 배수 용량, 그리고 노출 면적이 함께 리스크 결과를 좌우함을 보여준다. C에서는 C1-2(폭염 일수), C2-2(항만 옥외 근로자 수), C3-1(온열질환자 발생률이 상대적으로 높았고, C1-1(상위 10% 일 최고기온 평균)은 낮았다. 열 스트레스 맥락에서는 노출 규모와 건강영향 관련 지표의 영향이 크다는 뜻이다. D에서는 D1-3(태풍 영향일 최대

<Table 4> Results of importance analysis of risk indicators

Scenario	Sub-indicator	Weight	Rank	Subcomponent indicator	Weight	RWeight	Rank
A	A1. Hazard	0.4046	1	A1-1. Annual Mean Sea Level Rise Rate	0.2765	0.1119	5
				A1-2. Frequency of Exceedance of Design Wave Height	0.4999	0.2023	1
				A1-3. Coastal Erosion Severity in Adjacent Shoreline	0.2237	0.0905	6
	A2. Exposure	0.2701	3	A2-1. Proportion of Inundation-prone Areas within Port Area	0.4516	0.1220	4
				A2-2. Number of Floating Population and Port Workers within Port Area	0.2999	0.0810	7
				A2-3. Average Daily Berth Cargo Throughput and Passenger Volume	0.2485	0.0671	8
	A3. Vulnerability	0.3253	2	A3-1. Average Satisfaction Ratio of Design Freeboard per Facility	0.3832	0.1247	3
				A3-2. Presence of Landfill within Port Area	0.1755	0.0571	9
				A3-3. Observed-to-Design Wave Height Ratio at Breakwaters	0.4413	0.1436	2
B	B1. Hazard	0.3829	1	B1-1. Number of Extreme Rainfall Days	0.3126	0.1197	4
				B1-2. Annual Maximum Daily Precipitation	0.2112	0.0809	7
				B1-3. Maximum Hourly Rainfall Intensity	0.4762	0.1823	1
	B2. Exposure	0.2606	3	B2-1. Proportion of Inundation-prone Areas within Port Area	0.5111	0.1332	3
				B2-2. Number of Floating Population and Port Workers within Port Area	0.2750	0.0717	8
				B2-3. Average Daily Gate and Yard Cargo Throughput	0.2140	0.0558	9
	B3. Vulnerability	0.3565	2	B3-1. Degree of Aging of Port Facilities	0.2600	0.0927	6
				B3-2. Proportion of Low-lying Areas	0.3134	0.1117	5
				B3-3. Drainage Capacity Ratio against Design Rainfall	0.4265	0.1520	2
C	C1. Hazard	0.3434	2	C1-1. Average of Daily Maximum Temperature	0.1913	0.0657	9
				C1-2. Number of Heatwave Days	0.4540	0.1559	1
				C1-3. Number of Days with WBGT > 31	0.3547	0.1218	5
	C2. Exposure	0.3534	1	C2-1. Proportion of Heat- and Humidity-sensitive Facilities and Equipment	0.2243	0.0793	7
				C2-2. Number of Port Workers	0.4071	0.1439	2
				C2-3. Proportion of Hazardous Materials Sensitive to Heat and Humidity	0.3686	0.1303	4
	C3. Vulnerability	0.3032	3	C3-1. Incidence Rate of Heat-related Illnesses in Port Area	0.4402	0.1335	3
				C3-2. Number of Work-restriction Days due to High Temperature	0.3356	0.1018	6
				C3-3. Application Rate of Heat- and Corrosion-resistant Materials	0.2242	0.0680	8
D	D1. Hazard	0.3895	1	D1-1. Annual Frequency of Typhoon Impacts	0.2946	0.1147	4
				D1-2. Number of Storm Days	0.2719	0.1059	5
				D1-3. Maximum Significant Wave Height on Typhoon-impact Days	0.4335	0.1688	1

<Table 4> Continued

Scenario	Sub-indicator	Weight	Rank	Subcomponent indicator	Weight	RWeight	Rank
D2. Exposure	0.2874	3	D2-1. Number of Assets Exposed to Typhoon Risk	0.5384	0.1547	2	
			D2-2. Average Daily Port Utilization Volume	0.2307	0.0663	9	
			D2-3. Proportion of Outdoor Storage Area within Port Area	0.2309	0.0664	8	
D3. Vulnerability	0.3231	2	D3-1. Compliance Ratio with Wind-resistant Design Standards	0.3107	0.1004	6	
			D3-2. Historical Records of Typhoon and Wind Damage	0.2955	0.0955	7	
			D3-3. Observed-to-Design Wave Height Ratio at Breakwaters	0.3938	0.1272	3	

유의파고), D2-1(태풍 취약 자산 노출 대수), D3-3(방파제 설계파고 대비 실제파고 대비율)이 상위였고, D2-2(일일 이용 규모)나 D2-3(옥외 적재 면적 비율)은 상대적으로 낮았다. 외력의 피크, 취약 설비의 노출, 해안 보호구조물의 성능 여유가 결합된 경로가 두드러진다. 시나리오별로 리스크 전개 경로가 구체화되었다는 점도 중요하다. 이는 항만별·업무별 환경과 자산 구성에 따라 적응 전략이 달라져야 함을 시사하며, 차등화된 적응 전략의 필요성을 뒷받침한다.

3. 레질리언스 지표의 중요도

레질리언스 지표의 세부(Level 2) 및 하위 지표(Level 3) 가중치를 산출한 결과는 Table 5과 같다. 먼저 세부 지표 분석 결과, Robustness(34.58%)가 큰 비중을 가지며 가장 높게 나타났다. 그 뒤를 Rapidity(24.39%)와 Redundancy(23.13%)가 이었고, Resourcefulness(17.90%)의 경우 가장 낮은 중요도를 가지는 것으로 나타났다. 항만이 기후변화 위협에 대응하기 위해서는 무엇보다도 물리적인 강건성이 우선적으로 확보되어야 한다는 것을 알 수 있다.

게다가 Robustness 차원 내에서 R1-1(34.13%), R1-3

<Table 5> Results of importance analysis of resilience indicators

Sub-indicator	Weight	Rank	Subcomponent indicator	Weight	RWeight	Rank
R1. Robustness	0.3458	1	R1-1. Port Infrastructure Safety Rating	0.3413	0.1180	1
			R1-2. Adoption of Green Infrastructure	0.1329	0.0460	11
			R1-3. Physical Protection Facilities	0.2829	0.0978	2
			R1-4. Infrastructure Protection Measures	0.2429	0.0840	3
R2. Rapidity	0.2439	2	R2-1. Emergency Response Planning and Training	0.2793	0.0681	6
			R2-2. Establishment of Emergency Response Entity	0.2093	0.0510	9
			R2-3. Early Warning and Information-Sharing System	0.3292	0.0803	4
			R2-4. Alternative Operational Plan in Emergencies	0.1822	0.0444	13
R3. Redundancy	0.2313	3	R3-1. Availability of Backup Equipment and Personnel	0.3219	0.0745	5
			R3-2. Securing Emergency Power Supply	0.2912	0.0674	7
			R3-3. Accessibility to External Alternative Infrastructure	0.1961	0.0454	12
			R3-4. Data Backup	0.1908	0.0441	14
R4. Resourcefulness	0.1790	4	R4-1. Financial Stability	0.2244	0.0402	15
			R4-2. Emergency Monitoring System	0.3289	0.0589	8
			R4-3. Level of Digitalization	0.1718	0.0308	16
			R4-4. Collaborative Governance and Joint Response Capacity	0.2749	0.0492	10

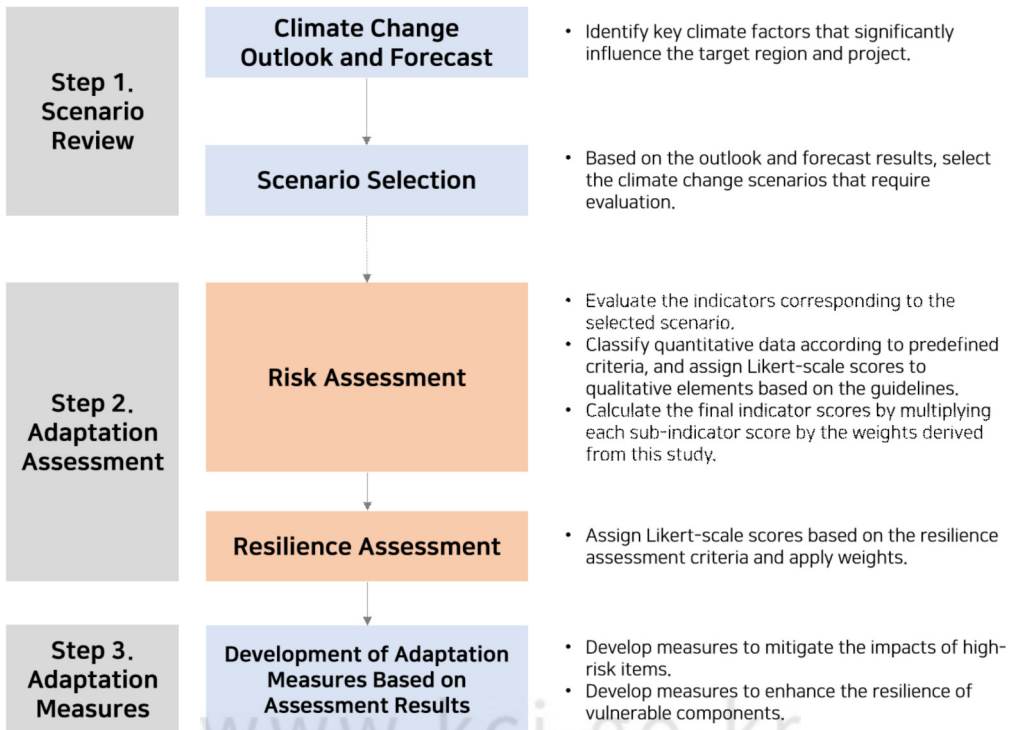
(28.29%), R1-4(24.29%)가 상대적으로 높은 가중치를 기록하였는데, 최종가중치 분석 결과에서도 가장 상위권에 위치해 Robustness 차원의 지표들이 전반적으로 중요성이 높은 것을 알 수 있다. 또한 Rapidity 차원에서는 R2-3(32.92%), R2-1(27.93%), R2-2(20.93%), R2-4(18.22%) 순으로 중요도가 산출되었고, Redundancy 차원에서는 R3-1(32.19%), R3-2(29.12%)가 두드러졌다. 한편, Resourcefulness 차원에서는 R4-2(32.89%)가 상대적으로 높게 나타났지만, 나머지 지표들은 최종가중치 기준으로 전체 레질리언스 지표 내에서 대체로 낮은 중요도를 나타냈다.

V. 토론

항만은 국내 「환경영향평가법」의 적용을 받는 주요 개발사업으로, 본 연구를 통해 항만 개발 과정에서 기후위기 대응을 제도적으로 반영할 수 있음을 확인하였다. 육상 부문의 환경영향평가는 이미 「탄소중립 기본법」에 근거하여 기후변화영향평가를 포함하고

있으나, 해양 부문에서 수행되는 해양이용영향평가는 여전히 전통적인 해양환경 요소에 집중되어 있으며 기후변화 요인은 평가체계에 반영되지 않고 있다. 환경영향평가의 본래 목적이 개발계획이나 사업이 환경에 미치는 영향을 사전에 예측·평가하여 환경 훼손을 최소화하고 지속가능한 발전을 도모하는 데 있음을 고려한다면, 해양공간 이용·개발 사업 역시 단순한 해양환경 보전을 넘어 기후위기 대응과 지속가능한 해양 관리로 확장될 필요가 있다.

따라서 향후 해양이용영향평가에도 기후변화 대응 요소를 제도적으로 반영해야 한다. 이는 항만을 비롯한 해양개발 사업이 기후변화로 인한 위험에 보다 효과적으로 대응하고, 동시에 탄소중립 실현과 지속가능한 해양 관리 체계 구축에 기여할 수 있는 기반이 될 것으로 사료된다. 환경영향평가에 기후변화영향평가가 추가된 국내 사례와 같이, 해양 부문에서도 기후변화 적응과 탄소중립을 위한 평가 항목을 제도적으로 포함하거나 별도의 절차로 병행하는 방안이 요구된다. 구체적인 평가 방법은 (1) 기후변화 전망 및 예측, (2) 시



<Figure 4> Methods of marine climate impact assessment

나리오 선택, (3) 리스크 평가, (4) 레질리언스 평가, (5) 적응 방안 수립으로 이어진다(Figure 4).

먼저, 기후변화 현황과 전망 자료를 토대로 대상 항만사업이 직면할 수 있는 주요 기후인자를 파악한다. 해당 지역 및 해당 사업에서 기후변화 영향에 가장 크게 기여하는 핵심 인자를 식별하고, 그 결과를 바탕으로 본 연구에서 제시된 네 가지 기후변화 시나리오 중 평가가 필요한 시나리오들을 선택한다.

다음 단계는 선정된 시나리오 내 hazard, exposure, vulnerability 지표의 하위 지표들에 대해 평가를 수행하는 것이다. 이 때 각 지표는 정량적 데이터를 기준에 따라 등급화하고, 정성적 요소의 경우 마련된 가이드라인에 근거해 리커트 척도로 점수를 부여한다. 이후 본 연구 결과로 도출된 중요도(가중치)를 각 하위 지표 점수에 곱하여 지표의 최종 점수를 산출한다. 동시에 레질리언스 지표에 대한 평가도 병행하며, 마찬가지로 Appendix 1에 제안된 평가 기준에 근거하여 동일한 방식으로 리커트 점수를 부여하고 가중치를 적용한다.

마지막으로, 리스크와 레질리언스 평가 결과를 통합하여 적응 방안을 마련하고 이를 개발 사업 계획에 수록하여야 한다. 이 단계에서는 부여받은 점수에 근거하여, 고위험 리스크의 영향을 저감하고, 레질리언스 평가에서 드러난 취약한 회복 전략을 보완할 수 있는 방안을 포괄적으로 제안해야 한다. 따라서 본 연구가 제안하는 평가체계는 기후변화에 대한 항만의 위험 및 회복역량을 진단하고 개선하는데 실질적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

앞선 절차를 실무 평가체계에 적용하기 위해서는 제도적 도입 관점에서의 검토가 필요하다. 따라서 해양의 이용 및 개발 행위에 대한 기후변화 영향을 평가하기 위해 두 가지의 제도 도입 방안을 고려할 수 있다. 첫 번째로는 기존 해양이용영향평가 항목에 기후변화 내용을 포함하는 방식이다. 현재 해양이용영향평가의 평가 항목은 적정성평가(공간이용 적정성, 사회경제적 영향), 환경성평가(해양물리, 수질 및 퇴적물, 해양지형, 생태계(부유, 저서, 유영), 경관 및 빛공해, 소음 및 진동, 전자기장, 대기질 및 기상, 해양조류 및 포유류)로 구성되어 있다. 여기에 기후변화영향 평가를 별도 항목으로 추가하고, 평가 방법으로는 앞서 제시된

시나리오 검토, 적응 평가, 적응 방안 마련으로 이어지는 방법을 활용한다. 이 경우 행위 유형 및 규모에 따라 평가의 심층도를 차등 적용할 수 있다. 두 번째는 육상의 제도와 유사하게 '해양기후영향평가'를 별도 독립 절차로 운영하는 방안이다. 시나리오 기반의 리스크, 레질리언스 평가를 하나의 독립된 절차로 미리 수행하고, 그 결과를 해양기후영향평가서 형태로 제출하여 인·허가 과정에서 의무적으로 반영하도록 하는 방식이다.

전자의 경우 행정 부담이 상대적으로 적기 때문에 제도 도입의 현실성이 높고, 하나의 평가서 내에서 모든 항목을 검토하므로 사업자가 작성해야 할 문서 수가 증가하지 않는다는 장점이 있다. 반면, 후자의 경우 기후변화 평가의 위상이 강화된다. 별도의 평가서에 기후변화 적응 및 감축 요건을 명확히 제시함으로써 이를 충족하지 않을 경우 인·허가가 제한되는 등 제도적 구속력을 확보할 수 있다. 또한 기존 평가 항목의 틀에 제한되지 않아 중장기 기후변화 대응 전략과 연계하기 용이하다는 장점이 있다.

아울러 본 연구에서 도출된 중요도와 지표 순위는 항만·시설 특성과 시나리오별 상황에 따라 상이한 우선순위를 정합적으로 도출할 근거를 제공한다. 따라서 평가 후 적응 방안 수립 시 시나리오나 시설 특성에 따른 차등적 우선순위를 설정할 수 있다. 이를 바탕으로 단계적 실행계획과 점검 기준(KPI)을 정립한다면, 평가 제도를 통한 항만의 기후변화 적응을 향상시킬 수 있을 것이다. 한편으로는, 본 연구의 시나리오별 중요도 및 순위를 항만 개발 사업안이 충족해야 할 최소 적응요건으로 활용할 수 있다. 이는 어떤 조치가 마련되어 있고, 어떤 요소가 부족한지를 판정할 수 있는 기준틀을 제공함으로써, 향후 인·허가 과정에서 실질적인 도구로 사용될 수 있다.

VI. 결론

본 연구는 해양 분야에서의 기후변화영향평가 도입을 검토하기 위한 기초 연구로서, 항만을 사례로 기후변화 적응 지표 체계를 구조화하였다. 리스크와 레질리언스를 통합한 지표 체계를 제시하고, 시나리오를

구분한 뒤, AHP를 통해 시나리오, 리스크 및 레질리언스의 세부 지표, 하위 지표의 상대적 중요도를 산출하였다. 연구 결과는 다음과 같은 함의를 제공하였다. 첫째, 기후변화 적응에는 리스크 및 레질리언스의 두가지 개념의 상호보완적 성격을 활용해야 한다. 둘째, 기후변화 적응을 검토하기 위해서는 평가 대상마다 발생가능한 기후변화 시나리오를 설정해야 하며, 시나리오별로 리스크 지표들의 중요도가 상이한 것을 확인하였다. 셋째, 본 연구의 시나리오 및 지표별 중요도는 항만이 기후변화에 적응하기 위해 충족해야 할 최소 요건으로 활용될 수 있다. 따라서 어떤 조치를 갖추고 있고, 어떤 요소가 부족한지를 판정할 수 있는 기준 틀이 되므로, 기후변화영향평가의 마지막 단계인 적응대책 수립과도 자연스럽게 연계된다. 마지막으로 본 연구의 지표 구조와 중요도는 해양이용영향평가 내에 기후변화영향평가 항목을 추가하는 경우는 물론, 별도의 해양기후영향평가 제도를 도입하는 경우에도 적용 가능한 표준화된 평가 체계로 활용될 수 있다.

아울러, 본 연구는 항만 부문에서 기후변화 리스크 및 레질리언스를 정량적으로 진단하는 방법, 그리고 해양이용영향평가 절차 내에서 이를 제도적으로 반영할 수 있는 구체적 적용 방안을 제시하였다는 점에서 실질적 기여를 갖는다. 또한 향후 항만 운영기관과 정책결정자가 기후변화 영향을 사전에 진단하고, 효과적인 적응 전략을 수립하는 데 기초 자료로 활용될 수 있으며, 항만 기후변화영향평가 지침의 제도적 구체화에도 기여할 것으로 기대된다.

한편, 본 연구에서 제안한 평가체계는 향후 시범 적용을 통해 실제 운영 과정에서의 활용 가능성을 더욱 구체화할 필요가 있다. 그리고 지표와 지수 산정 과정에서 정규화, 가중합, 임계치 설정과 같은 세부 규칙이 보다 표준화된다면 평가의 실용성이 한층 강화될 것으로 기대된다. 향후 이러한 연구의 확장이 이루어진다면, 해양 부문의 기후변화영향평가 도입을 뒷받침하는 제도적 근거가 더욱 강화될 것으로 판단된다.

사사

이 연구논문은 해양수산부 재원으로 해양수산과학

기술원의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2022-KS221620, 해양공간 정책시뮬레이터 기술개발)입니다.

References

김동현. (2015). 기후변화 적응을 위한 리스크 평가 및 유형화: 영국의 정성적 리스크 평가 방법론 적용. *환경정책연구*, 14(1), 53-83.

Kim, D. H. (2015). Risk Assessment and Classification for Climate Change Adaptation: Application on the Method of Climate Change Risk Assessment in the UK. *Environmental Policy Research*, 14(1), 53-83.

이상혁, 강정은. (2018). 도시계획 적응을 위한 도시홍수 취약성 및 리스크 평가. *국토계획*, 53(5), 185-206.

Lee, S. H., & Kang, J. E. (2018). Urban Flood Vulnerability and Risk Assessments for Applying to Urban Planning. *Journal of Korea Planning Association*, 53(5), 185-206.

한인성, 이준수, 김창신, 양준용. (2023). 해양수산분야 기후변화 영향, 전망과 평가 정보의 현황 및 제공. *한국기후변화학회지*, 14(6-2), 965-972.

Han, I. S., Lee, J. S., Kim, C. S., & Yang, J. Y. (2023). Impacts, projections and assessments related to climate change in ocean and fisheries. *Journal of Climate Change Research*, 14(6-2), 965-972.

AECOM Ltd. (2022). Immingham Eastern Ro-Ro Terminal: Environmental Statement, Volume 1, Chapter 19 – Climate Change (Document Ref. 8.2.19). Prepared for Associated British Ports.

Asian Development Bank. (2018). Sustainable and Climate-Resilient Connectivity Project (RRP NAU 48480-003): Climate Change Assessment. Manila: Asian Development Bank.

Becker, A. H., Acciaro, M., Asariotis, R., Cabrera, E., Cretegnny, L., Crist, P., Esteban, M., Mather, A., Messner, S., & Naruse, S. (2013). A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global

- society. *Climatic change*, 120(4), 683-695.
- Bruneau, M., Chang, S. E., Eguchi, R. T., Lee, G. C., O'Rourke, T. D., Reinhorn, A. M., ... & Von Winterfeldt, D. (2003). A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. *Earthquake spectra*, 19(4), 733-752.
- Cegan, J. C., Fillion, A. M., Keisler, J. M., & Linkov, I. (2017). Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. *Environment Systems and Decisions*, 37(2), 123-133.
- Environmental Management Centre Pvt. Ltd. (2023). Climate Proofing of West Container Terminal-1, Colombo for Adani Ports and Special Economic Zone Limited: Climate Vulnerability and Adaptation Planning Report.
- Fernandez-Perez, A., Losada, I. J., & Lara, J. L. (2024a). A framework for climate change adaptation of port infrastructures. *Coastal Engineering*, 191, 104538.
- Fernandez-Perez, A., Lara, J. L., Lucio, D., & Losada, I. J. (2024b). Compound climate change risk analysis for port infrastructures. *Coastal Engineering*, 193, 104560.
- Herath, G. (2004). Incorporating community objectives in improved wetland management: the use of the analytic hierarchy process. *Journal of Environmental Management*, 70(3), 263-273.
- Himes, A. H. (2007). Performance indicator importance in MPA management using a multi-criteria approach. *Coastal Management*, 35(5), 601-618.
- Impact Assessment Agency of Canada. (2020). Federal Review Panel Report for the Roberts Bank Terminal 2 Project. Ottawa: Impact Assessment Agency of Canada.
- Institute of Environmental Management and Assessment. (2022). Environmental Impact Assessment Guide to: Assessing Greenhouse Gas Emissions and Evaluating their Significance.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (J. J. McCarthy et al., Eds.). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (M. L. Parry et al., Eds.). Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri & L. A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). Climate change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H. Lee et al., Eds.). Cambridge University Press.
- Izaguirre, C., Losada, I. J., Camus, P., Gonzalez-Lamuno, P., & Stenek, V. (2020). Seaport climate change impact assessment using a multi-level methodology. *Maritime Policy & Management*, 47(4), 544-557.
- Izaguirre, C., Losada, I. J., Camus, P., Vigh, J. L., & Stenek, V. (2021). Climate change risk to global port operations. *Nature Climate Change*, 11(1), 14-20.
- Jiang, M., Lu, J., Qu, Z., & Yang, Z. (2021). Port vulnerability assessment from a supply Chain perspective. *Ocean & Coastal Management*, 213, 105851.
- Kim, S., Choi, S., & Kim, C. (2021). The framework for measuring port resilience in Korean port case. *Sustainability*, 13(21), 11883.

- Kurth, M. H., Larkin, S., Keisler, J. M., & Linkov, I. (2017). Trends and applications of multi-criteria decision analysis: use in government agencies. *Environment Systems and Decisions*, 37(2), 134-143
- León-Mateos, F., Sartal, A., López-Manuel, L., & Quintás, M. A. (2021). Adapting our sea ports to the challenges of climate change: Development and validation of a Port Resilience Index. *Marine Policy*, 130, 104573.
- McIntosh, R. D., & Becker, A. (2019). Expert evaluation of open-data indicators of seaport vulnerability to climate and extreme weather impacts for US North Atlantic ports. *Ocean & Coastal Management*, 180, 104911.
- McIntosh, R. D., & Becker, A. (2020). Applying MCDA to weight indicators of seaport vulnerability to climate and extreme weather impacts for US North Atlantic ports. *Environment Systems and Decisions*, 40(3), 356-370.
- Messner, S., Moran, L., Reub, G., & Campbell, J. (2013). Climate change and sea level rise impacts at ports and a consistent methodology to evaluate vulnerability and risk. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 169, 141-153.
- Morgan, R. (2017). An investigation of constraints upon fisheries diversification using the Analytic Hierarchy Process (AHP). *Marine Policy*, 86, 24-30.
- Mushwani, H., Ahmadzai, M. R., Ullah, H., Baheer, M. S., & Peroz, S. (2024). A comprehensive AHP numerical module for assessing resilience of Kabul City to flood hazards. *Urban Climate*, 55, 101939.
- Mutumbo, K., & Ölçer, A. (2017). Towards port infrastructure adaptation: A global port climate risk analysis. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 16(2), 161-173.
- Ng, A. K., Chen, S. L., Cahoon, S., Brooks, B., & Yang, Z. (2013). Climate change and the adaptation strategies of ports: The Australian experiences. *Research in Transportation Business & Management*, 8, 186-194.
- Poo, M. C. P., Yang, Z., Dimitriu, D., Qu, Z., Jin, Z., & Feng, X. (2021). Climate change risk indicators (CCRI) for seaports in the United Kingdom. *Ocean & Coastal Management*, 205, 105580.
- Polydoropoulou, A., Bouhouras, E., Papaioannou, G., & Karakikes, I. (2025). Living labs for the resilience of ports against climate change disruptions. *Ocean & Coastal Management*, 261, 107528.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services sciences*, 1(1), 83-98.
- Sharaan, M., Ibrahim, M. G., Moubarak, H., ElKut, A. E., Romya, A. A., Hamouda, M., ... & Iskander, M. (2024). A qualitative analysis of climate impacts on Egyptian ports. *Sustainability*, 16(3), 1015.
- Singh, S. N., Bisaria, J., Sinha, B., Patasaraiya, M. K., Sreerag, P. (2024). Developing a composite weighted indicator-based index for monitoring and evaluating climate-smart agriculture in India. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(2), 12.
- Song, M. S., Yum, S. G., Yun, H. S., Park, S. H., Bae, S. W., Lee, J. J. (2024). Development of an evaluation indicator for highway climate change adaptation projects based on analytical hierarchy process in South Korea. *Meteorological Applications*, 31(2), e2180.
- Xu, L., Yang, Z., Chen, J., & Zou, Z. (2024). Spatial-temporal heterogeneity of global ports resilience under Pandemic: a case study of COVID-19. *Maritime Policy & Management*, 51(8), 1655-1668.
- Yang, Z., Ng, A. K., Lee, P. T. W., Wang, T., Qu, Z., Rodrigues, V. S., ... & Lau, Y. Y. (2018). Risk and cost evaluation of port adaptation measures to climate change impacts. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 444-458.
- Yang, Y. C., & Ge, Y. E. (2020). Adaptation strategies for port infrastructure and facilities under climate

- change at the Kaohsiung port. *Transport Policy*, 97, 232-244.
- Yang, Z., Lau, Y. Y., Poo, M. C. P., Yin, J., & Yang, Z. (2025). Port resilience to climate change in the Greater Bay Area. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 142, 104681.
- Zhao, P., Ali, Z. M., Ahmad, Y. (2023). Developing indicators for sustainable urban regeneration in historic urban areas: Delphi method and Analytic Hierarchy Process (AHP). *Sustainable Cities and Society*, 99, 104990.

<Appendix 1> Description of resilience subcomponent indicators

Sub-indicator	Subcomponent indicator	Description
R1. Robustness	R1-1. Port Infrastructure Safety Rating	Evaluates the current condition and climate-disaster resilience of port infrastructure using the safety grades (A-E) specified in the Port Facility Safety Inspection Guidelines. Where applicable, the assessment also considers facility age and whether design standards reflecting extreme climate events (e.g., 50-year return period typhoon or wave) have been applied.
	R1-2. Adoption of Green Infrastructure	Assesses the extent and effectiveness of green infrastructure within and around the port that mitigates climate impacts and enhances environmental sustainability. Evaluation includes the presence, scale, and performance of systems such as low-impact development (LID) facilities, vegetated buffer zones, permeable pavements, ecological waterways, and green belts, as well as modern sustainable facilities such as eco-friendly fuel storage and bunkering systems, zero/low-carbon cargo-handling equipment, smart and green port operation systems, renewable-energy installations (solar, wind), waterfront developments, waste recycling systems, and conversion to eco-friendly vehicles and vessels.
	R1-3. Physical Protection Facilities	Evaluates the presence, adequacy, and operational condition of protection structures—such as flood barriers, water gates, and levees—designed to minimize damage from floods, overtopping, and typhoons.
	R1-4. Infrastructure Protection Measures	Evaluates whether contingency and protection plans are in place to secure cranes, container equipment, buildings, and other facilities during disasters, in order to prevent debris generation and secondary damage.
R2. Rapidity	R2-1. Emergency Response Planning and Training	Evaluates the establishment, periodic updating, and implementation of emergency response and recovery plans for climate-related disasters. Assessment includes designation of responsible departments, installation of evacuation maps and signage, and establishment of threshold criteria for issuing evacuation orders under extreme conditions.
	R2-2. Establishment of Emergency Response Entity	Evaluates whether a well-structured emergency response system is in place for prompt and coordinated action during crises. Assessment includes a list of responsible agencies for emergency and recovery services (e.g., equipment, supplies, damage assessment, facility control, and waterway maintenance), the presence of an incident command structure, and clearly defined roles and responsibilities of key personnel.
	R2-3. Early Warning and Information-Sharing System	Evaluates the establishment and operation of early warning systems that enable rapid detection and timely response to climate disasters. Assessment includes real-time monitoring (e.g., CCTV), digital recovery scenarios, automated response systems, and mechanisms for swift and accurate information exchange among various port stakeholders to ensure effective coordination.
	R2-4. Alternative Operational Plan in Emergencies	Evaluates the port's capacity to promptly reallocate operations, manpower, and equipment during service disruptions. Assessment includes the existence of alternative operation plans and vessel evacuation measures, including identification of shelter ports.

<Appendix 1> Continued

Sub-indicator	Subcomponent indicator	Description
R3. Redundancy	R3-1. Availability of Backup Equipment and Personnel	Evaluates preparedness and management of backup equipment and personnel that can be mobilized immediately during emergencies. Quantified using the backup capacity ratio (backup capacity / total required capacity × 100).
	R3-2. Securing Emergency Power Supply	Evaluates the availability and operational reliability of emergency and backup power systems to maintain essential port functions during disruptions. Assessment considers self-generation and renewable-energy capacity as well as independent operation duration (emergency power endurance time).
	R3-3. Accessibility to External Alternative Infrastructure	Evaluates the feasibility of utilizing nearby terminals or transport facilities for emergency operations when port functions are suspended due to climate disasters. Assessment is based on distance, travel time, and accessibility indicators.
	R3-4. Data Backup	Evaluates whether critical operational data are physically backed up outside disaster-prone areas or stored via cloud/server-based systems. For trade ports (and strategically significant coastal ports), evaluation includes establishment of disaster-recovery (DR) centers and implementation of emergency IT drills.
R4. Resourcefulness	R4-1. Financial Stability	Evaluates the ability of port authorities and operators to secure and allocate financial resources needed to maintain and restore port functions during climate disasters. Assessment includes emergency budget allocation, financial soundness, funding availability for disaster response, coordination with government financial-aid mechanisms, and supporting legal or institutional frameworks.
	R4-2. Emergency Monitoring System	Evaluates the development and functionality of real-time monitoring systems capable of tracking equipment and personnel conditions to support rapid decision-making during emergencies.
	R4-3. Level of Digitalization	Evaluates the extent of digital integration in port operations for climate adaptation, including use of big data and AI for predictive analysis, real-time meteorological and ocean data collection and sharing, and digital management of systems, documents, and communication networks.
	R4-4. Collaborative Governance and Joint Response Capacity	Evaluates the level of cooperation between internal and external stakeholders for climate adaptation and disaster prevention. Assessment includes regular information-exchange mechanisms, joint response and resource-sharing networks, and formal cooperation frameworks with governments, neighboring ports, and private sectors. It also considers the governance capacity to implement carbon-neutral and green-port initiatives through strategic planning, budgeting, and R&D collaboration.