현안연구 2026-01

항만분야 피지컬 AI 도입 효과 연구

A Study on the Effects of Physical AI Adoption in the Port Sector

김근섭 · 안승현 · 이주원









KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

현안연구 2026-01

항만분야 피지컬 AI 도입 효과 연구

A Study on the Effects of Physical AI Adoption in the Port Sector

김근섭 · 안승현 · 이주원

KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자	**김근섭, 안승현, 이주원**
내부연구진	연구책임자 김근섭 한국해양수산개발원 항만연구본부 선임연구위원 공동연구원 안승현 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원 공동연구원 이주원 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원

연구기간	2026. 4. 1. ~ 2026. 8. 31.

보고서 집필내역

연구책임자	김근섭 연구총괄, 제1장, 제3장, 제4장
내부연구진	안승현 제2장, 제4장 이주원 제1장, 제3장

발간사

항만은 우리나라 수출입 화물의 99.7%를 처리하는 국가 경제의 관문이자 국가 공급망의 결절점이다. 부산항은 세계 7위의 컨테이너 항만이자 세계 2위의 환적 허브로 성장하였고, 인천항과 광양항도 권역별 거점으로서 중요한 역할을 수행하고 있다. 그러나 세계의 항만산업은 지금 또 한 번의 전환기를 맞고 있다. 주요 선진 항만은 완전 자동화를 넘어 물리적인 구동 장비에 인공지능(AI)과 데이터를 결합한 피지컬 AI 항만으로 진화하고 있으며, 항만 경쟁력의 기반이 인프라 중심에서 기술 중심으로 옮겨가고 있기 때문이다.

우리 항만은 세계적 수준의 인프라를 갖추고 있음에도 생산성과 효율성의 개선 속도는 상대적으로 더디다. 국내의 첫 완전 자동화터미널이 2024년에야 개장하였고, 부산항의 선석 생산성은 칭다오항 등 경쟁 중인 항만과의 격차가 좁혀지지 않고 있다. 여기에 지정학적인 갈등과 공급망 교란에 따른 대외의 불확실성, 고위험의 작업 공간인 항만의 안전 문제, 소프트웨어 중심으로 재편되는 항만기술산업의 성장 기회까지 겹치면서 첨단 기술의 도입은 더 이상 미룰 수 없는 과제가 되었다. 정부가 「피지컬 AI 항만 전략(안)」을 마련하고 진해신항 등의 후속 사업에서 피지컬 AI 생태계의 활성화를 추진하는 것도 이러한 배경에서다.

이러한 문제 인식 속에서 이번 연구는 항만에 피지컬 AI 기술을 도입하였을 때 어떤 효과가 어느 정도 발생하는지를 체계적으로 산정하고자 수행되었다. 대규모 재정과 민간 투자가 수반되는 정책이 안정적으로 추진되기 위해서는 객관적인 근거 위에서 도입 효과가 제시되어야 하기 때문이다. 이번 연구는 개별 기술을 실증하는 효과에 머무르지 않고 터미널의 운영 효과가 선사와 화주의 편익, 항만의 경쟁력, 항만기술산업의 성장, 국민경제로의 파급효과로 확산되는 경로를 구조화하고 각 단계의 효과를 산정하였다.

아울러 국내외 선행연구와 주요 항만의 도입 사례를 폭넓게 검토하고, 현장과 정책 분야의 전문가 80명을 대상으로 한 설문조사를 병행하여 문헌의 실증값과 현장의 기대 수준을 비교하였다. 자동화에 기반한 효과와 AI 적용에 따른 추가 효과를 구분하고, 근거의 성격과 검증 수준이 다른 수치를 무리하게 합산하기보다 적용 범위와 가정

을 명시함으로써 연구의 신뢰성을 높이고자 하였다.

분석 결과 피지컬 AI의 도입은 선박의 재항 시간 단축과 생산성 향상, 유지보수의 개선을 통해 항만 이용자에게 연간 4조 원이 넘는 편익을 제공하고 항만기술산업의 수입대체와 해외시장으로의 진출, 생산·부가가치·고용 등을 유발하는 것으로 나타났다. 다만 이러한 효과는 저절로 실현되지 않는다. 국산 기술의 가격 경쟁력과 품질 검증, 강소기업 중심의 산업 생태계, 기술 변화 속도에 맞는 프로그램형 연구개발, 그리고 무엇보다 항만 운영 데이터의 축적과 전문 인력의 양성이 함께 갖추어질 때 비로소 기대효과가 현실이 될 수 있다.

피지컬 AI 항만으로의 전환은 정부와 항만공사, 터미널 운영사, 장비·시스템 기업, 연구기관이 함께 풀어가야 할 과제이다. 이번 연구가 관련된 정책의 추진 근거를 다지고 우리 항만의 경쟁력과 항만기술산업의 성장을 함께 이끄는 논의의 출발점으로 활용되기를 기대한다.

2026년 10월
한국해양수산개발원
원장 조 정 희

목차

정책제안 _ i

요약 _ iii

Executive Summary _xi

01 **서론_1**

제1절 연구의 배경 및 목적 1
1. 연구의 배경 1
2. 연구 목적 4

제2절 연구 내용 및 방법 6
1. 연구 내용 6
2. 연구 방법 7

제3절 선행연구 검토 8
1. 선행연구 검토 8
2. 종합 및 시사점 22
3. 본 연구의 차별성 24

02 **피지컬 AI 기술과 국내외 항만 현황_29**

제1절 피지컬 AI 기술 29
1. 피지컬 AI의 개념 29
2. 항만 자동화의 발전 단계와 수준 32
3. 피지컬 AI의 구성 기술 요소 33
4. 항만의 운영 구조와 병목 요인 34

제2절 주요 해외 항만 현황 및 사례 분석 35
1. 터미널 운영 전반의 결합 사례 36
2. 개별 공정·장비 단위의 결합 사례 39

3. 주요국 정책 동향 40
4. 종합 42

제3절 국내 현황 및 사례 분석 44
1. 자동화 인프라 보급 44
2. 장비·운영 시스템 국산화 정책과 성과 46
3. AI 기술의 도입·개발 48
4. 소결 49

03 항만 피지컬 AI 도입 효과 분석_51

제1절 산정 체계 51
1. 도입 효과 구성 51
2. 설문 조사 53

제2절 도입 효과 산정 55
1. 운영 효과 55
2. 항만 경쟁력 효과 59
3. 항만기술산업 경쟁력 효과 68
4. 국민경제 파급효과 72
5. 기타 효과 73
6. 도입 효과 종합 75

04 결론 및 정책 제언_77

제1절 결론 77
1. 항만 경쟁력 기반 전환 77
2. 항만기술산업 활성화 중요 78
3. 피지컬 AI 기술 도입은 다양한 기대효과 창출 79
4. 인력과 데이터 중심의 정책 추진 중요 80

제2절 정책 제언 80
1. 가격 경쟁력 확보 방안 검토 80

2. 국산 기술 도입 의무 비율 검토 81
3. 강소기업 육성 82
4. 프로그램형 R&D 적극 추진 84
5. 산업 데이터 축적 최우선 추진 85

참고문헌_87

부록_95

표 목차

〈표 1-1〉 선행연구와 비교 및 본 연구의 차별성 ····· 26
〈표 2-1〉 항만의 발전 단계 ····· 32
〈표 2-2〉 컨테이너터미널의 자동화 수준 분류 ····· 33
〈표 2-3〉 피지컬 AI의 구성 기술요소 ····· 34
〈표 2-4〉 컨테이너 항만의 운영 영역별 병목 요인과 개선 방향 ····· 35
〈표 2-5〉 주요국의 항만 AI 정책·제도 동향 ····· 42
〈표 2-6〉 해외 항만의 피지컬 AI 결합 사례 종합 ····· 42
〈표 2-7〉 국내 주요 항만 자동화 사업 현황 ····· 45
〈표 2-8〉 국내 자동화항만 하역 장비 도입 규모 ····· 46
〈표 3-1〉 항만 피지컬 AI 도입 효과 연결 구조 ····· 52
〈표 3-2〉 설문 응답자 개요 ····· 54
〈표 3-3〉 설문 결과 ····· 54
〈표 3-4〉 운영 효과 산정 항목 ····· 56
〈표 3-5〉 시간 절감 효과 ····· 57
〈표 3-6〉 생산성 향상 효과 ····· 58
〈표 3-7〉 유지보수 향상 효과 ····· 59
〈표 3-8〉 항만 경쟁력 효과 산정 항목 ····· 60
〈표 3-9〉 선사의 재항 비용 절감 효과 산정 기준(부산항 기준) ····· 62
〈표 3-10〉 화주의 지체료 절감 효과 산정 기준(부산항 기준) ····· 64
〈표 3-11〉 항로별 시간가치 사례 ····· 66
〈표 3-12〉 화주 화물의 시간가치 편익(부산항 기준) ····· 66
〈표 3-13〉 항만기술산업 경쟁력 효과 산정 항목 ····· 69
〈표 3-14〉 국내 자동화 항만 하역 장비 도입 규모 ····· 70
〈표 3-15〉 피지컬 AI 기반 항만기술장비 수입대체 효과 ····· 70
〈표 3-16〉 피지컬 AI 기반 해외시장 확보 효과 ····· 72
〈표 3-17〉 기계 및 장비 부문 유발계수 ····· 73
〈표 3-18〉 국내 시장 규모 기준 파급효과 산정 ····· 73
〈표 3-19〉 항만 피지컬 AI 도입 효과 종합 ····· 75

약어 목록

- AI(인공지능): Artificial Intelligence
- AGV(자동유도차량): Automated Guided Vehicle
- TOS(터미널 운영 시스템): Terminal Operating System

정책제안

▌분석 내용 및 방법

1. 국내외 선행연구와 주요 항만의 피지컬 AI 도입 사례 분석을 통해 효과의 파급 경로와 산정 방식을 설정함
2. 운영 효과, 항만의 경쟁력에 대한 효과, 항만기술산업의 경쟁력 효과 및 국민경제로의 파급효과로 구분하여 도입 효과를 단계별로 산정함
3. 현장·정책 분야의 전문가 80명에 대한 설문조사를 통해 선행연구의 실증값과 현장의 기대 수준을 비교·검증함

▌정책제안

1. 가격 경쟁력을 확보하기 위한 방안 검토
2. 국산 기술 도입의 의무 비율 검토
3. 강소기업 육성
4. 프로그램형 R&D의 적극적인 추진
5. 산업 데이터의 축적을 최우선으로 추진

요 약

항만분야 피지컬 AI 도입 효과 연구

김근섭 · 안승현 · 이주원

1. 연구 배경 및 목적

1) 연구 배경

- **항만은 국가 경제의 핵심 거점이지만 생산성·효율성의 개선 속도는 정체되어 있음**
  - 2025년 전국 항만의 컨테이너 물동량은 3,211만 TEU이며, 부산항은 2,488만 TEU를 처리하여 세계 7위의 컨테이너 항만이자 세계 2위의 환적 허브임
  - 부산항의 선석 생산성은 시간당 약 75회로 칭다오항(약 116회), 싱가포르항(약 80회)보다 낮고 최근 5년간 연평균 증가율도 약 0.7%에 그침
- **세계 주요 항만은 완전 자동화를 넘어 AI를 결합한 피지컬 AI 항만으로 전환 중임**
  - 대외 불확실성의 확대, 항만의 안전 강화, 소프트웨어를 중심으로 한 항만 기술산업의 성장 기회 등에 대응하기 위해 로테르담·함부르크·상하이 양

산·싱가포르 투아스항 등이 전환을 추진하고 있음

- 추진 주체와 방식은 다양하나 물리적 자동화 위에 AI와 데이터를 결합한다는 점은 동일하며, 항만의 경쟁력이 곧 국가 물류와 경제의 경쟁력으로 직결됨

▪ **정부도 「피지컬 AI 항만 전략(안)」 등을 통해 항만 자동화·지능화를 국가 정책으로 설정함**

- 국내에서 최초로 완전 자동화터미널을 개장한 이후 광양항 자동화 테스트베드, 인천신항 1-2단계, 부산항 진해신항 등 후속 사업을 추진하며 피지컬 AI 생태계의 활성화를 추진함

▪ **대규모 투자가 수반되는 정책의 안정적인 추진을 위해 도입 효과의 체계적·정량적 분석이 필요함**

- 기존 연구는 자동화의 영역별 또는 개별 AI 기술의 효과에 한정되고, 정부 전략의 기대효과도 국민경제로의 파급효과를 중심으로만 제시되어 있어 종합적 효과의 파악이 어려움

2) 연구 목적

▪ **본 연구는 항만에 피지컬 AI 기술을 도입하였을 때 기대되는 효과를 파급되는 경로별로 산정·제시하는 것을 목적으로 함**

- 첫째, 우리 항만에 피지컬 AI 기술을 도입하면 어느 부문에서 어느 정도의 효과가 창출되는지를 산정·제시함
- 둘째, 정책 추진의 안정성과 투자의 타당성을 확보하기 위한 정책의 근거를 제공함
- 셋째, 첨단 기술의 안정적·적극적인 도입을 확대하여 우리 항만의 경쟁력을 제고함

- 넷째, 항만에 피지컬 AI 기술의 실질적인 도입과 적용을 위한 정책 과제를 제언함

2. 연구 내용 및 방법

1) 연구 내용

▪ **본 연구는 주요 목적을 달성하기 위해 총 네 개 장으로 구성됨**

- 제1장에서는 연구의 배경과 목적, 연구의 내용 및 방법을 제시하고, 항만 자동화·AI 적용의 효과에 관한 국내외 선행연구를 검토하여 본 연구의 차별성을 도출함
- 제2장에서는 피지컬 AI의 개념과 계층 구조를 정립하고, 국내외 항만에서 기술을 도입한 현황과 사례를 검토하여 도입 효과의 파급 경로를 설정함
- 제3장에서는 운영 효과, 항만 경쟁력의 효과, 항만기술산업 경쟁력의 효과 및 국민경제로의 파급효과로 구분하여 효과별 산정 방식을 제시하고 도입 효과를 산정함
- 제4장에서는 본 연구의 핵심 결과를 요약하고, 정부 정책의 과제 중 구체화가 필요하거나 추가적으로 강조가 필요한 정책을 제안함

2) 연구 방법

▪ **본 연구는 주요 목적을 달성하기 위해 다음의 연구 방법을 통해 수행함**

- 첫째, 항만의 자동화·지능화 및 AI 기술 도입의 효과를 산정한 국내외 학술 논문과 정책 자료를 조사하여 효과를 산정하는 방법과 주요 지표·기준값을 도출함

- 둘째, 항만공사·터미널 운영사·건설업·선사·하역업·장비공급·연구기관 등의 전문가 80명을 대상으로 설문조사를 시행하여 선행연구의 실증값과 현장의 기대 수준을 비교함
- 셋째, 효과별 산정 방식을 제안하고, 국민경제로의 파급효과는 한국은행 산업연관표를 활용한 산업연관분석을 적용함
- 넷째, 연구 수행 전반에 걸쳐 전문가 의견을 수렴하고 현장의 실제적인 여건과 비교하여 연구 내용의 타당성을 확보함

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- **피지컬 AI의 도입에 따른 효과는 운영 효과에서 항만의 경쟁력, 항만기술산업의 경쟁력, 국민경제로의 파급효과로 이어지는 경로로 확산됨**
  - 운영상 효율의 개선이 선사·화주의 편익과 항만의 선택으로 이어지고, 인프라 수요의 확대가 항만기술산업의 시장 규모와 해외로의 진출 기회를 넓히며 국민경제 전반으로 파급됨
- **운영 효과는 시간 절감, 생산성의 향상, 유지보수의 개선으로 나타나며, 자동화 도입의 효과와 AI 적용의 효과를 승수 방식으로 결합하여 산정함**
  - 선박 대기 15~25%, 이송장비 대기 20~35%의 절감, 안벽크레인의 생산성·선석의 이용률·장비 작업의 효율이 14.2~30% 향상할 것으로 기대함
  - 자동화 도입의 효과에 AI 적용의 효과를 결합한 안벽크레인 생산성은 40.5% 향상, 크레인의 고장에 대한 예측의 정확도는 83~99.6% 수준으로 개선됨

- 장비 가동률과 점검·정비의 효율은 15~30% 향상이 기대되며, 효과 계수는 선행연구의 실증값과 전문가 설문의 최솟값을 보수적으로 적용함

▪ **항만 경쟁력 효과는 부산항 기준 연간 약 4.4조 원**

- 재항 시간 20% 단축에 따른 선사의 재항 비용 절감이 연간 약 7,352억 원, 화주의 지체료 절감이 연간 약 162억 원, 화물의 시간가치 편익이 연간 약 3.63조 원임
- 부산항 환적화물 1,410만 TEU의 부가가치를 약 2.1조 원으로 유지하는 효과도 기대됨

▪ **항만기술산업 경쟁력의 효과는 수입대체가 약 1.5조 원, 해외시장의 확보가 약 2.5조 원**

- 국내 자동화 하역 장비의 발주시장 3.14조 원에 국산화율의 목표(43.1% → 90%)를 적용한 수입대체 효과는 2031년 기준으로 최소 1조 4,705억 원임
- 세계 항만의 AI 시장 27.4조 원(2033년)에서 국내 시장의 점유분을 제외하고 점유율 목표 10%를 적용한 해외시장 확보의 효과는 약 2.5조 원임

▪ **국민경제로의 파급효과는 생산유발이 약 6.1조 원, 부가가치유발이 약 1.9조 원, 고용유발이 약 1만 4,447명**

- 국산화율의 목표를 적용한 국내 시장 규모 2.79조 원을 최종 수요로 하고 2023년 산업연관표의 기계 및 장비 부문의 유발계수를 적용하여 산정함

▪ **탄소 배출·에너지 소비 절감과 공급망의 회복력 강화 등 정성적 효과도 병행함**

- 항만-선박 간 AI에 기반한 정시 협조로 기항당 탄소 배출 절감이 6.45~7.39% 가능하고, 대내외의 충격 시에도 안정적인 운영으로 공급망의 회복력을 강화함

▪ **항만 경쟁력의 기반은 인프라 중심에서 기술 중심으로 전환 중이며, 항만기술산업의 활성화와 인력·데이터 중심의 정책 추진이 중요함**

- 소프트웨어 부문은 독보적인 기업이 없어 시장을 선점할 수 있는 기회가 크고, 사이버의 위험과 외산 장비의 정보 노출에 대응하기 위해서도 항만기술산업을 고부가가치 산업으로 육성할 필요가 있음

2) 정책제언

▪ **가격 경쟁력의 확보를 위한 방안의 검토**

- 신규 운영사 선정 시 가점 부여, 항만공사·민간의 발주 시 펀드 활용, 이차보전 등 간접적인 지원 방식으로 국산 기술·장비의 초기 수요에 대한 창출을 지원할 필요가 있음

▪ **국산 기술 도입 의무 비율의 검토**

- 핵심 부품과 인식·제어·통제·분석 기술을 대상으로 항만 장비와 관련한 지침에 도입 의무 비율을 규정하고, 인증 제도와 인증기관을 마련하여 검증된 제품과 기술만 도입함

▪ **강소기업의 육성**

- 피지컬 AI 등 첨단 기술 분야의 생태계 강화에 집중하고, 항만배후단지를 활용한 강소연구개발특구 지정과 관계 부처를 육성하기 위한 수단의 연계를 적용할 필요가 있음

▪ **프로그램형 R&D의 적극 추진**

- 매년 신규 기술의 수요를 반영하는 단기 프로그램형 R&D를 신속히 기획·사업화하고, 싱가포르 Pier 71과 같이 현장의 수요를 반영한 공공 주도의 방식으로 수행함

▪ **산업 데이터의 축적을 최우선으로 추진함**

- 세계에서 가장 선제적으로 항만 운영 데이터를 확보·활용하는 기반을 구축하고, 항만배후단지까지 포함한 데이터 테스트베드의 확장과 데이터의 공유 인센티브를 마련할 필요가 있음

EXECUTIVE SUMMARY

A Study on the Effects of Physical AI Adoption in the Port Sector

Geun-Sub Kim · Seung-Hyun An · Joo-Won Lee

1. Background and Purpose

1) Background

- Ports are the core hubs of the national economy, yet the pace of productivity and efficiency gains has stagnated.
  - In 2025, container throughput at Korean ports totaled 32.11 million TEU. Busan Port handled 24.88 million TEU, ranking seventh in the world as a container port and second as a transshipment hub.
  - Berth productivity at Busan Port is about 75 moves per hour, below Qingdao (about 116) and Singapore (about 80), and has grown by only about 0.7% per year over the past five years.
- Leading ports worldwide are moving beyond full automation toward physical AI ports that integrate AI.

- Rotterdam, Hamburg, Shanghai Yangshan and Singapore Tuas are pursuing this transition in response to growing external uncertainty, stronger port safety requirements and growth opportunities in the software-driven port technology industry.
- Approaches may differ, but all combine AI and data on top of physical automation, as port competitiveness translates directly into the competitiveness of national logistics and the economy.

▪ The Korean government has also set port automation and intelligent operations as national policy through initiatives such as the Physical AI Port Strategy.

- Following the opening of Korea's first fully automated terminal, follow-up projects such as the Gwangyang automation test bed, Incheon New Port Phase 1-2 and Busan Jinhae New Port are under way to activate the physical AI ecosystem.

▪ A systematic and quantitative analysis of adoption effects is needed to ensure the stable implementation of policies that entail large-scale investment.

- Existing studies are limited to the effects of specific automation areas or individual AI technologies, and the expected effects in the government strategy are presented mainly as national economic ripple effects. This makes it difficult to assess the full range of effects of physical AI adoption.

2) Purpose

- This study aims to estimate and present the expected effects of adopting physical AI technologies in ports along their ripple-effect pathways.
  - First, to estimate in which areas and to what extent effects are generated when physical AI technologies are adopted in Korean ports
  - Second, to provide a policy basis for stable policy implementation and investment feasibility
  - Third, to enhance the competitiveness of Korean ports by expanding the stable and proactive adoption of advanced technologies
  - Fourth, to propose policy recommendations for the practical adoption and application of physical AI technologies in ports

2. Content and Methodology

1) Content

- This study consists of four chapters to achieve its objectives.
  - Chapter 1 presents the background, purpose, content and methodology of the study, and reviews domestic and international literature on the effects of port automation and AI adoption to identify the distinctiveness of this study.

- Chapter 2 defines the concept and layered structure of physical AI, reviews adoption status and cases at domestic and overseas ports, and establishes the ripple pathways through which adoption effects spread.
- Chapter 3 presents estimation methods and estimates adoption effects in four categories: operational effects, port competitiveness effects, port technology industry competitiveness effects and national economic ripple effects.
- Chapter 4 summarizes the key findings and proposes policies that require elaboration or additional emphasis among the government's policy agenda.

2) Methodology

▪ The following methods were employed to achieve the objectives of the study.

- First, domestic and international academic papers and policy documents estimating the effects of port automation, intelligent operations and AI adoption were reviewed to derive estimation methods, key indicators and baseline values.
- Second, a survey of 80 experts from port authorities, terminal operators, construction firms, shipping lines, stevedoring companies, equipment suppliers and research institutes was conducted to compare empirical values in the literature with expectations in the field.

- Third, estimation methods were proposed for each effect, and input-output analysis based on the Bank of Korea's Input-Output Tables was applied to the national economic ripple effects.
- Fourth, expert opinions were collected throughout the study and compared with actual field conditions to ensure the validity of the findings.

3. Result

1) Summary

- The effects of physical AI adoption spread along a pathway from operational effects to port competitiveness, port technology industry competitiveness and the national economy.
  - Improved operational efficiency leads to benefits for shipping lines and shippers and influences their port selection, while expanded infrastructure demand enlarges the market size and overseas opportunities of the port technology industry and spreads to the national economy as a whole.
- Operational effects appear as time savings, productivity gains, and maintenance improvements, and were estimated by combining automation effects and AI effects in a multiplicative manner.

- Vessel waiting time is expected to decrease by 15~25% and transfer equipment waiting time by 20~35%, while quay crane productivity, berth utilization, and equipment operating efficiency improve by 14.2~30%.
- Quay crane productivity combining automation and AI effects improves by 40.5%, and crane failure prediction accuracy improves to 83~99.6%.
- Equipment availability and inspection and maintenance efficiency are expected to improve by 15~30%; the effect coefficients are conservatively set at the minimum of empirical values in the literature and expert survey results.

▪ The estimated effects on port competitiveness amount to about KRW 4.4 trillion per year for Busan Port.

- A 20% reduction in vessel turnaround time saves shipping lines about KRW 735.2 billion per year in port stay costs, saves shippers about KRW 16.2 billion per year in demurrage, and generates about KRW 3.63 trillion per year in cargo time-value benefits.
- The Port of Busan is also expected to retain about KRW 2.1 trillion in value added from its 14.1 million TEU of transshipment cargo.

▪ Port technology industry competitiveness effects consist of about KRW 1.5 trillion in import substitution and about KRW 2.5 trillion in overseas market share.

- Applying the localization rate target (from 43.1% to 90%) to the KRW 3.14 trillion domestic procurement market for automated

cargo-handling equipment yields an import substitution effect of at least KRW 1.4705 trillion as of 2031.

- Applying the 10% market share target to the KRW 27.4 trillion global port AI market (2033), excluding the domestic market share, yields an overseas market capture effect of about KRW 2.5 trillion.

▪ National economic ripple effects include about KRW 6.1 trillion in production inducement, about KRW 1.9 trillion in value-added inducement and about 14,447 jobs.

- These were estimated by applying the inducement coefficients of the machinery and equipment sector in the 2023 Input-Output Table to a final demand of KRW 2.79 trillion, the domestic market size reflecting the localization rate target.

▪ Qualitative effects such as reduced carbon emissions and energy consumption and stronger supply chain resilience are also generated.

- AI-based just-in-time coordination between ports and ships can reduce vessel carbon emissions by 6.45~7.39% per port call, and stable operations under internal and external shocks strengthen supply chain resilience.

▪ The basis of port competitiveness is shifting from infrastructure to technology, and fostering the port technology industry and pursuing workforce- and data-centered policies are important.

- The software segment has no dominant company and thus offers a significant opportunity to lead the market, and the port technology industry needs to be fostered as a high value-added industry to address cyber risks and data exposure through foreign-made equipment.

2) Policy Recommendations

▪ Review measures to secure price competitiveness

- Support the creation of initial demand for domestic technologies and equipment through indirect measures such as bonus points in the selection of new terminal operators, the use of funds in port authority and private procurement, and interest subsidies.

▪ Review a mandatory share for the adoption of domestic technologies

- Stipulate a mandatory adoption share for core components and recognition, control, command and analysis technologies in port equipment guidelines, and establish a certification system and designate certification bodies so that only verified products and technologies are adopted.

▪ Foster competitive small and medium-sized companies

- Concentrate on strengthening the ecosystem in advanced technology fields such as physical AI, designate small but strong R&D special zones using port hinterlands, and link the support measures of related ministries.

- Actively promote program-based R&D

- Rapidly plan and commercialize short-term program-based R&D that reflects new technology demand every year, and implement it in a public-led manner that reflects field demand, as with Singapore's Pier 71.

- Prioritize the accumulation of industrial data

- Build a foundation for securing and utilizing port operation data ahead of the rest of the world, expand data test beds to include port hinterlands, and provide incentives for data sharing.

01
서론

제1절 연구의 배경 및 목적

1. 연구의 배경

항만은 우리나라 수출입 화물의 99.7%를 처리하고 있는, 국가 경제의 핵심적인 거점이다.[1] 2025년 전국 항만의 컨테이너 물동량은 3,211만 TEU를 기록하였다.[2] 특히 부산항은 2,488만 TEU를 처리하여 국내 1위, 세계 7위의 컨테이너 항만이자 싱가포르항에 이어 세계 2위의 환적 허브 역할을 하고 있다.[3] 인천항과 광양항도 각각 344만 TEU, 206만 TEU를 처리하며 권역별로 중요한 역할을 수행하고 있다.[4] 모든 항만은 아니지만 국내의 주요 항만은 규모 면에서 이미 세계적으로 경쟁력을 갖추고 있다.

그러나 글로벌 항만산업은 다양한 구조적 도전에 직면하고 있다. 첫째, 생산성과 효율성 강화이다. 세계 주요 항만은 초기의 자동화를 넘어 지능

1) 관계부처 합동(2026), p. 1.
2) 해양수산부 Port-MIS(검색일: 2026.6.14.)
3) 해양수산부 Port-MIS(검색일: 2026.6.14.); 관계부처 합동(2026), p. 1.
4) 해양수산부 Port-MIS(검색일: 2026.6.14.)

화 단계로 진입하면서 하역의 생산성과 운영상 효율을 빠르게 개선하고 있다. 반면 국내 항만은 2024년 4월에 처음으로 완전 자동화터미널이 도입되어 상대적으로 속도가 느리고 관련된 지표도 정체 상태에 있다. 국내의 대표 항만인 부산항의 선석 생산성은 2025년 기준 시간당 약 75회로 칭다오항(약 116회), 싱가포르항(약 80회)에 비해 낮은 수준이 지속되고 있다.[5] 특히 최근 5년간 칭다오항의 생산성이 연평균 약 4.4% 증가하는 동안 부산항은 약 0.7% 증가하는 데에 그치고 있다.[6] 칭다오항은 선도적으로 완전 자동화 운영 방식을 도입했고 이후 안정화 및 인공지능(AI) 기술을 도입하여 항만의 효율을 극대화하고 있다.

둘째, 대외 환경의 불확실성이다. 미·중의 무역 경쟁과 지정학적인 갈등, 공급망 교란, 주요 항로의 리스크 확대는 국가 물류의 안정성을 위협하고 있다. 항만은 국가 공급망의 결절점이기 때문에 대외 충격에 대한 회복력의 확보 여부가 국가 경제의 안정과 직결된다. 따라서 해외 국가들은 항만에 자동화를 도입하여 회복력을 높여 왔다. 최근에는 AI 기술이 급속하게 발전하면서 피지컬 AI 기술을 중심으로 첨단화를 추진하고 있고 디지털 생태계도 강화하고 있다.

셋째, 항만의 안전 강화이다. 항만은 대형 중량물과 이동 장비가 밀집된 고위험의 작업 공간이다. 항만의 재해 빈도는 전 산업과 유사하거나 전 산업보다 적은 수준이지만 작업 특성상 하나의 사고가 중대재해로 이어질 위험성이 크다. 다만 항만은 피지컬 AI 기술을 통해 기존의 고위험에 직접 대응할 수 있는 장점이 있다. 따라서 많은 항만들이 각종 영역에서 AI 기술을 도입하여 안전을 원천 차단하거나 최소화하고 있다.

5) 한국해양수산개발원(2026), p. 7.
6) 한국해양수산개발원(2026), p. 19.

넷째, 항만기술산업 자체의 성장이다. 과거의 항만기술산업은 장비 제작 등 하드웨어 중심으로 발전되어 왔다. 그러나 최근에는 하드웨어의 기술력만으로는 기대 수준에 도달하기 어려워 AI 기술을 중심으로 한 소프트웨어 분야가 성장하고 있다. 특히 소프트웨어 분야는 시장을 절대적으로 선도하는 주체가 없어 시장을 선점할 수 있는 기회가 큰 상황이다.

그 외 더 많은 도전 과제들이 있지만 중요한 점은 해외의 선도 항만들이 이러한 변화들에 대응하기 위해 완전 자동화를 넘어 AI를 결합한 '피지컬 AI 항만'으로의 전환을 추진한다는 것이다. 네덜란드 로테르담항, 독일 함부르크항, 중국 상하이 양산항, 싱가포르 투아스(Tuas)항이 대표적이다. 추진 주체와 방법은 다양하다. 싱가포르는 해사항만청(MPA)이 AI 기술 제품 개발 및 실증을 주도하고 항만산업 현장으로 확산하는 방식을 적용하고 있다. 중국도 정부 주도로 데이터를 기반으로 한 통합적인 운영체계와 항만에 특화된 AI 모델을 확산하고 있으며, 유럽은 데이터 플랫폼과 친환경으로의 전환을 결합하고, 일본은 인력의 수용성과 자동화를 조화시키고 있다. 이처럼 주요국이 각기 다른 방식과 전략으로 추진하고 있지만 물리적 자동화 위에 AI와 데이터를 결합한다는 점은 동일하다. 이는 항만의 경쟁력이 곧 국가 물류와 경제의 경쟁력으로 직결되기 때문이다.

우리 정부도 이러한 흐름에 대응하여 「스마트항만 기술산업 육성 및 시장 확대 전략」[7]과 「제4차 전국 항만기본계획 수정계획(2026~2030)」[8] 등을 통해 항만의 자동화 및 지능화를 국가의 항만 정책으로 설정하였다. 최근에는 글로벌한 스마트항만의 선도를 목표로 「피지컬 AI 항만 전략(안)」[9]을 마련하였다. 즉 국내 최초의 완전 자동화터미널을 개장한 이후 광양항의 자동화 테스트베드, 인천신항의 1-2단계, 부산항 진해신항 등의 후속

7) 해양수산부(2023)
8) 해양수산부(2026)
9) 관계부처 합동(2026)

사업을 추진하면서 우리 항만의 피지컬 AI 생태계의 활성화를 추진하고 있다.

그러나 이러한 대규모 전환이 항만의 운영과 항만을 이용하는 핵심 고객에게 어떠한 효과를 제공하는지, 항만기술산업 및 국가 경제의 전반에 어떻게 파급되는지에 대한 체계적·정량적 분석은 충분하지 않다. 항만의 자동화에서 영역별 또는 개별로 AI 기술을 도입하면서 이에 따른 효과는 부분적으로 연구되고 있으나 보다 종합적인 개념의 효과는 검토되지 못한 한계점이 있다. 「피지컬 AI 항만 전략」에도 기대효과가 제시되어 있지만 국민경제에 미치는 파급효과를 중심으로만 제시되어 있어 다양한 효과를 파악하기는 어렵다.

피지컬 AI 기술은 항만산업의 생태계 전반에 걸쳐 도입해야 경쟁력을 확보할 수 있고 항만기술산업의 성장도 가능하기 때문에 장기적인 투자와 정책 추진의 안정성이 중요하다. 이를 위해서는 피지컬 AI 기술 도입에 대한 다양한 효과에 대한 분석이 매우 중요하고 부족한 관련 연구를 확대하기 위한 기초적 연구도 필요하다. 이러한 관점에서 본 연구를 수행하는 데 있어 그 필요성은 충분하고 시의성도 적정하다고 할 수 있다.

2. 연구 목적

본 연구의 핵심적인 목적은 항만에 피지컬 AI 기술을 도입했을 때 기대되는 효과를 산정하는 것이지만 이를 통해 정책 추진의 기반을 강화하고 우리 항만의 경쟁력 강화 및 정부의 정책 과제에 대한 제시도 중요한 목적이라 할 수 있다. 구체적인 연구 목적은 다음과 같다.

첫째, 가장 기본적인 목적은 우리 항만에 피지컬 AI 기술을 도입하면 어느 부문에서 어느 정도의 효과가 창출될 수 있는지를 산정·제시하는 것이

다. 정부의 정책자료에도 파급효과는 제시되어 있으나 단일한 파급효과로서 본 연구에서는 도입 효과의 파급 경로를 중심으로 제시하는 것이다.

둘째, 피지컬 AI 기술 도입의 효과를 제시하여 보다 적극적으로 기술을 도입할 수 있는 정책의 근거를 제공하는 것이다. 정부 정책 추진의 안정성과 투자의 타당성 확보를 위해서는 충분한 효과를 제시하는 것이 중요하다. 특히 항만의 생태계 전반에 첨단 AI 기술을 도입하기 위해서는 중장기적인 관점의 정책 추진과 투자가 필요하기 때문에 정책에 대한 근거의 제공은 필수라 할 수 있다.

셋째, 첨단 기술의 안정적·적극적인 도입을 확대하여 우리 항만의 경쟁력을 높이는 것이다. 앞서 연구 배경에서 살펴본 것과 같이 부산항 등 우리의 주요 항만은 세계적 수준의 인프라를 확보하고 있으나 생산성, 효율성 등에서는 경쟁력이 상대적으로 정체되는 추세이다. 따라서 효과의 분석, 정책의 근거 제공을 통한 항만의 경쟁력에 대한 제고도 본 연구의 주요 목적 중 하나라 할 수 있다.

넷째, 항만에 피지컬 AI 기술의 실질적인 도입과 적용을 위한 정책을 제언하는 것이다. 정부에서는 이미 다양한 정책 과제를 제시하고 있지만 연구 과정에서 추가로 필요한 정책 과제를 발굴하여 정책 추진의 안정성을 확보하는 것이다.

이상과 같이 본 연구의 핵심적인 목적은 피지컬 AI 기술의 도입으로 인한 효과의 산정에 있지만 최종적으로 지향하는 목적은 우리 항만의 경쟁력을 강화하고 항만기술산업의 성장을 촉진하여 항만산업의 생태계 전체를 활성화하는 것이다.

제2절 연구 내용 및 방법

1. 연구 내용

본 연구는 주요 목적 달성을 위해 4개 장으로 구성하였다. 우선 제1장에서는 연구의 배경과 목적, 연구의 내용 및 방법을 중심으로 제시하였다. 또한 항만분야의 첨단화·자동화 및 AI 기술의 적용에 대한 효과와 관련한 국내외의 선행연구를 주제별로 검토하고 본 연구가 차별적으로 수행될 수 있도록 하였다.

제2장에서는 피지컬 AI의 개념과 국내외 항만에 대한 기술 도입의 현황을 검토하였다. 피지컬 AI의 개념은 다양하게 정의되고 있고 그 범위에 대해서도 다양한 시각이 있다. 따라서 도입의 효과를 분석하기에 앞서 어떠한 개념을 기반에 두고 피지컬 AI를 논의하고 있는지와 주요 항만에서는 어떤 분야에 AI 기술을 어떤 전략으로 도입하고 있는지를 사전에 파악하고 도입 효과가 파급되는 경로를 설정하였다.

제3장에서는 항만의 피지컬 AI 도입 효과를 분석하였다. 기본적으로는 선행연구의 주요 결과를 참고하였다. 그러나 항만에 피지컬 AI 기술을 도입한 후의 효과에 대한 분석은 많이 연구되지 않은 분야임을 고려하여 개별 효과별로 별도의 산정 방식을 도출하였다. 단순한 산정 방식이지만 운영상 효율, 항만의 경쟁력 강화, 항만기술산업의 육성 및 국민경제에 대한 파급효과 등 파급되는 경로별로 주요 도입 항목을 제시하고자 하였다. 또한 설문조사도 병행하였다. 선행연구가 매우 세분화된 영역 또는 기술을 중심으로 수행되고 항만의 생태계 전반에 대한 효과를 제시하지 못하는 한계점을 보완하고 실제 산업 현장과 정책 분야의 전문가들의 인식을 살펴보는 것도 중요한 고려 요소이기 때문에 수행하였다.

마지막 제4장에서는 본 연구의 핵심 결과를 요약하고 정책 추진에 필요한 추가 정책을 제안하였다. 정부의 정책 과제 중 구체화되지 못했거나 추가할 제안 또는 강조가 필요한 과제를 중심으로 제안하였다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 주요 연구 목적 달성을 위해 다음의 연구 방법을 통해 연구를 수행하였다.

첫째, 항만의 자동화, 디지털화, 지능화 및 AI 기술의 도입에 따른 효과를 산정한 국내외 학술 논문과 문헌조사를 수행하였다. 문헌조사의 핵심적인 목적은 연구 분야에 대한 파악, 연구 방법 및 핵심 결과의 검토를 통해 본 연구를 차별적으로 수행하기 위함이다. 또한 본 연구에서는 도입 효과를 산정하는 방법을 도출하고 산정 시 필요한 주요 지표 및 기준값을 도출하였다.

둘째, 설문조사를 시행하였다. 설문조사는 앞서 언급한 바와 같이 실제 현장의 전문가, 정책의 전문가 및 추진할 주체 등의 인식과 기대효과를 파악하기 위해 수행하였다. 따라서 주어진 항목을 선택하는 방식이 아니라 현장과 정책 분야의 전문가들이 예상하는 효과의 종류와 기대 수준의 범위를 자유롭게 기술하도록 하였다. 이를 통해 선행연구의 실증값과 전문가의 기댓값을 비교하여 가장 적정한 효과 수준을 파악하고자 하였다.

셋째, 다양한 도입 효과의 산정을 위한 방법을 제안하였다. 피지컬 AI 기술을 항만에 도입했을 때의 효과를 포괄적으로 산정하는 연구는 거의 없는 것으로 파악된다. 선행연구들은 세부적인 기술의 적용에 따른 실증의 연구를 중심으로 하여 포괄적이거나 종합적인 개념의 효과는 제시하지 못하고

있다. 따라서 본 연구에서는 도입 효과의 산정이 가능한 방법을 제시하였다. 국민경제에 대한 파급효과는 가장 일반적으로 사용하고 있는 산업연관표를 활용한 산업연관분석을 적용하였다.

넷째, 연구 내용의 타당성을 확보하기 위해 전문가의 다양한 의견을 수렴하고 현장의 실제적인 여건도 비교하였다. 전문가에 대한 의견 수렴은 설문의 시행 과정과 연구의 수행 전반에 걸쳐 수행하여 본 연구가 실제적으로 정책 현장에서 활용될 수 있도록 하였다.

제3절 선행연구 검토

1. 선행연구 검토

항만의 자동화와 인공지능(AI) 적용의 효과에 관한 연구는 최근 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 관련된 선행연구는 효과의 발생 단계와 분석 대상에 따라 크게 네 가지 유형으로 구분할 수 있다. 첫째, 자동화·스마트화의 도입이 항만의 성과에 미치는 효과를 종합적으로 평가한 연구, 둘째, 무인이송장비·자동크레인·AI 스케줄링·예측정비 등 개별적인 기술 요소의 운영 효과를 분석한 연구, 셋째, 항만의 운영 개선이 선사·화주 등 항만 이용자의 편익과 항만의 경쟁력을 거쳐 항만기술산업 및 국민경제로 파급되는 경로를 다룬 연구, 넷째, 탄소중립·에너지 효율·항만 안전·공급망 회복력 등 국가 전략 차원의 효과를 다룬 연구이다.

이러한 분류 체계는 피지컬 AI를 도입하여 터미널의 직접적인 운영을 개선하는 것이 항만 이용자의 편익과 항만의 경쟁력에 대한 제고로 이어지고,

이는 다시 항만기술산업의 성장과 국민경제로의 파급효과로 확장되는 경제적 효과라는 경로를 반영한다. 이와 함께 피지컬 AI의 도입은 탄소 배출 및 에너지 사용의 절감, 항만의 안전성 제고, 공급망의 회복력 강화 등 국가적으로도 전략 차원의 효과를 병행하여 발생시킬 수 있다. 데이터, 전문인력, 가격경쟁력, 운영역량, 시스템 연계, 기술의 검증 및 법·제도는 별도의 효과를 발생하는 유형이라기보다 네 가지 효과의 실현 정도를 좌우하는 공통된 조건이다. 따라서 본 연구는 선행연구를 상기의 네 가지 기준으로 구분하여 각 효과의 내용과 발생경로 및 효과의 실현 조건을 검토하고, 이를 종합하여 본 연구에 대한 시사점과 차별성을 도출한다.

1) 항만 자동화·스마트화 효과 연구

항만 자동화·스마트화의 효과에 대한 연구는 자동화에 대한 기대와 실제 운영성과 사이의 차이를 확인하고 효과가 실현되는 조건을 규명하는 방향으로 발전해 왔다. 맥킨지의 글로벌 조사(Chu et al., 2018)에서는 자동화 터미널에서 운영비 25~55%의 절감과 생산성 10~35%의 향상이 기대되었으나 실제 사례에서는 운영비 절감이 15~35%에 그치고 생산성은 오히려 7~15% 하락한 경우도 확인하였다.[10] ITF-OECD(2021)의 53개 자동화 터미널에 대한 분석도 자동화터미널의 생산성이 기존 터미널보다 낮게 나타날 수 있으며, 자동화의 편익은 인건비가 높거나 일정한 수준 이상의 물동량이 확보된 지역에서 상대적으로 크게 실현된다고 분석하였다.

자동화의 기대성과가 실제적인 운영성과로 이어지는 조건을 분석한 연구도 수행되었다. Knatz, Notteboom, & Pallis(2022)는 전 세계 63개 자동화터미널의 조직·기술·시장 특성을 분석하여 자동화가 다양한 규모와 운영 여건에서 추진되고 있음을 확인하였다.[11] 후속 연구에서는 안전, 단위

10) Chu et al.(2018), pp. 3-4.

별 하역비용, 서비스의 일관성 및 인건비를 중심으로 자동화의 추진 동인과 실현 편익을 비교하고 기대 편익과 실제 편익의 차이가 항목별·터미널별로 다름을 제시하였다(Knatz, Notteboom, & Pallis, 2024).[12] Majoral, Reyes, & Saurí(2024)는 자동화터미널의 생산성이 기존의 터미널보다 높다고 단정할 근거가 부족하며, 기술의 발전을 통해 현재의 운영상 제약을 해소할 필요가 있다고 보았다.

국내 연구는 자동화·스마트화의 경제성에 대한 평가와 편익을 산정하기 위한 방법을 중심으로 축적되어 왔다. An & Park(2021)은 공공부문의 관점에서 자동화 컨테이너터미널 투자의 경제성을 분석하고 선석 규모별로 손익분기의 물동량과 '적정한 처리능력'의 개념을 제시하였다. 안승현 외(2025)는 스마트항만에서 발생할 수 있는 하역 생산성의 향상, 환경 개선 및 안전사고 감소의 편익을 유형화하고 예비타당성조사에 활용할 수 있는 편익별 산정식과 원단위를 개발하였다. UNCTAD(2025)와 ADB(2020)의 연구에서는 항만의 자동화·디지털화·지능화가 세계 항만의 전반에서 진행되는 구조적인 변화라는 점을 보여준다.

이상의 연구는 자동화의 도입만으로 성과가 일률적으로 보장되는 것이 아니라 물동량, 인건비, 터미널의 유형, 기술 안정성, 운영역량, 시스템의 통합 수준 및 도입비용에 따라 효과가 달라진다는 점을 공통적으로 보여준다. 따라서 자동화의 종합성과를 피지컬 AI의 효과로 그대로 적용하기보다 자동화가 제공하는 기반에서의 효과와 AI의 적용에 따른 추가 효과를 개념적으로 구분할 필요가 있다. 다만 이들 연구가 두 효과의 구체적인 결합방식까지 제시한 것은 아니므로 두 효과의 결합은 연구 대상, 기준값 및 성과지표가 비교 가능한 항목에 한해 적용해야 한다. 이러한 조건은 제3장에서 효과 계수를 선정할 때 수치의 크기뿐 아니라 분석 대상, 근거 수준 및 국

11) Knatz, Notteboom, & Pallis(2022), pp. 22-24.
12) Knatz, Notteboom, & Pallis(2024), pp. 11-14.

내의 적용 가능성을 함께 검토하고 가격 경쟁력과 기술 검증 등의 효과를 실현할 수 있는 조건을 정책적으로 다루어야 한다는 근거가 된다.

2) 피지컬 AI 기술 요소별 운영 효과 연구

최근의 연구는 터미널 전체의 종합성과를 평가하는 방식에서 나아가 개별 장비와 공정에 적용되는 자동화 및 AI 기술의 효과를 분석하고 있다. 기술요소별 연구에서 확인되는 효과는 제3장의 운영 효과의 산정항목과 연계하여 시간 절감, 생산성 향상 및 유지·보수의 개선으로 구분할 수 있다. 자동화와 AI는 효과가 발생하는 원리가 다르므로 각각 구분하여 검토한다. 두 효과는 적용 대상·기준선·성과지표의 비교 가능성과 중복 가능성을 검토한 후 본 연구에서 제시한 분석 가정에 따라 승수 방식으로 결합한다.

(1) 시간 절감 효과

시간 절감과 관련해서는 자동화 장비의 도입 효과와 AI에 기반한 운영 최적화의 추가 효과가 각각 제시되고 있다. Jobran & Kara(2022)는 시뮬레이션을 통해 자동화로 전환할 시 선박의 재항 시간이 약 18% 단축되고, 일부 선석에서는 이송장비의 안벽크레인 대기 시간이 약 30% 감소하는 것으로 분석하였다.[13] 반면 외부 트럭의 회전시간은 증가하여 특정한 공정의 자동화가 다른 공정에서의 병목을 심화시킬 수도 있음을 확인하였다.[14] 관계부처 합동(2026)은 AI 기반의 입항 시간 예측 플랫폼을 도입한 로테르담항에서 선박의 대기시간이 약 20% 절감된 사례를 제시하였다.[15] 다만 이 수치는 실증연구의 결과가 아니라 개별 항만의 운영 사례이므로 실증연구

13) Jobran & Kara(2022), p. 152.
14) Jobran & Kara(2022), p. 150, 152.
15) 관계부처 합동(2026), p. 3.

에서의 효과 계수와 구분하여 해석할 필요가 있다.

AI에 기반한 운영의 최적화에 대한 연구에서는 선박과 이송장비의 대기를 완화하는 효과가 제시되었다. Wang et al.(2025)은 시공간의 지식그래프와 AI 에이전트를 활용한 선석 배정의 시뮬레이션에서 선박의 대기를 완화하고 선석의 이용 효율을 높일 수 있음을 제시하였다.[16] Jin et al.(2023)은 심층강화학습에 기반한 자동 야드크레인의 동적 스케줄링으로 이송장비의 대기를 18.8~49.2% 줄였다.[17] Chen, Zhang, & Wang(2025)은 자율 이송장비와 크레인의 협업에 따른 스케줄링 및 정보의 연계가 대기와 공정 간 병목을 줄이는 데 중요하다고 보았다.[18]

(2) 생산성 향상 효과

생산성 효과는 주로 안벽크레인의 처리 효율, 선석의 이용률 및 하역 장비의 작업 효율을 중심으로 분석되어 왔다. Xu et al.(2024)은 자동화 안벽크레인의 도입으로 생산성이 약 30% 향상되고, AI의 적용으로 하역 장비의 작업 효율이 14.2% 개선될 수 있다고 제시하였다.[19] Lyu & Yang(2026)이 인용한 Cisco(2019)의 분석에서는 상하이 양산항의 지능형 시스템 도입을 통해 하역 효율이 약 30% 향상되는 것으로 제시되었다.[20] Wang et al.(2025)은 AI에 기반한 선석 배정을 통해 선석의 이용률이 개선될 수 있음을 제시하였다.[21]

이들 연구는 AI가 장비의 제어, 작업순서의 결정 및 선석 배정의 효율을 높일 수 있음을 보여준다. 다만 크레인의 생산성, 장비의 작업 효율 및 선

16) Wang et al.(2025), p. 20, 27.
17) Jin et al.(2023), pp. 16-17.
18) Chen, Zhang, & Wang(2025), pp. 10-13.
19) Xu et al.(2024), p. 16, 18.
20) Cisco(2019), p. 1, 재인용: Lyu & Yang(2026), p. 2.
21) Wang et al.(2025), p. 20, 27.

석 이용률은 측정대상과 단위가 서로 다르므로 하나의 생산성 지표로 직접 합산하기는 어렵다. 자동화에 기반한 효과와 AI의 추가 효과를 결합할 경우에도 장비, 작업 범위 및 기준선의 비교 가능성을 우선 검토해야 한다.

(3) 유지보수 개선 효과

유지·보수 분야에서는 AI를 활용한 고장의 예측과 이상 탐지의 기술적인 성능을 분석한 연구가 축적되고 있다. Klar, Andersson, & Angelakis (2026)은 AI를 활용한 안벽크레인의 고장을 예측한 연구에서 평균 83%의 정확도를 제시하였다.[22] Awasthi, Krpalkova, & Walsh(2024)는 LSTM에 기반한 크레인 오류신호의 예측에서 99.6%의 정확도를 제시하였으나 정확도만으로 실제적인 오류 탐지의 성능을 판단하는 데에는 한계가 있다.[23] 한편 Wang et al.(2026)은 항만군집에 대한 AI 투자의 최적화가 교란을 일으키는 전파 규모의 중앙값을 60% 이상 줄일 수 있음을 제시하였다.[24] 이는 개별 장비의 정비 효율과 구분되는 시스템의 안정성과 관련된 효과로 참고할 수 있다.

이러한 연구는 AI에 기반한 예측정비의 기술적 가능성을 뒷받침하지만 고장에 대한 예측의 정확도는 정비 시간의 절감률, 장비의 가동률 또는 유지관리비의 절감률과 동일한 효과지표가 아니다. 따라서 고장에 대한 예측의 정확도를 유지보수 효율의 개선율로 직접 전환하기보다 예측정비 도입의 선행 성과지표로 해석하고 실제의 정비 효율과 가동률의 개선 효과는 현장 자료 또는 전문가에 대한 조사를 통해 별도로 보완할 필요가 있다.

22) Klar, Andersson, & Angelakis(2026), p. 14.
23) Awasthi, Krpalkova, & Walsh(2024), p. 16, 19.
24) Wang et al.(2026), p. 1, pp. 15-18.

(4) 국내 기술 실증 및 효과 연구

국내 연구는 기술 요소의 현장 적용과 도입 여건에 대한 분석을 중심으로 수행되고 있다. 이효준 외(2025)는 유전 알고리즘(genetic algorithm)에 기반한 AI의 자동 배차를 통해 공차 거리를 최소화하면서 균등 배차의 공정성을 확보할 수 있음을 보였다.[25] 김현서 외(2023)는 부산항 신선대부두에서 IoT에 기반한 근로자 안전기술을 실증하여 작업자의 사고위험을 감지하고 위험수준을 추정할 수 있음을 확인하였다.

반면 윤동하·최용석(2025)의 광양항 스마트항만으로의 전환 요인에 대한 연구, 원승환·조성우·이언경(2025)의 터미널 운영 시스템(TOS) 산업 활성화에 대한 연구, 이다예 외(2025)의 기술 수용과 관련된 법·제도에 대한 연구는 직접적인 효과의 계수보다 효과가 실현되기 위한 산업적·제도적인 조건을 제시한다. 이들 연구는 데이터의 확보와 표준화, 시스템 간의 연계, 전문인력, 초기 시장의 형성, 기술의 검증·인증, 가격 및 기술 경쟁력, 법·제도적 수용성이 기술 자체의 성능과 함께 갖추어져야 함을 보여준다. 따라서 해당 연구는 제3장의 직접적인 효과 계수로 사용하기보다 해외 효과 계수의 국내 적용에 대한 가능성을 판단하고, 제4장에서 제시하는 정책 제언을 구체화하는 근거로 활용하는 것이 적절하다.

종합하면 기술 요소별의 연구는 제3장의 효과 분석에 기초 자료를 제공한다. 다만 연구마다 적용 대상, 기준선, 분석 방법 및 효과지표가 다르므로 동일한 수준의 근거로 볼 수 없으며 기술적 성능지표와 실제 운영 효과를 구분하여 적용해야 한다.

25) 이효준 외(2025), pp. 61-62.

3) 항만 경쟁력·항만기술산업·국민경제 파급효과 연구

항만의 운영 개선이 항만의 경쟁력과 항만기술산업 및 국민경제로 확산되는 경로에 관한 연구는 효과의 파급 단계에 따라 구분할 수 있다. 세 단계는 상호 연계될 수 있으나 분석 대상과 산정 방법이 서로 다르므로 모든 효과가 자동적으로 연쇄하여 발생한다고 전제하기보다 단계별 발생 경로와 실현 조건 및 중복 가능성을 구분하여 검토해야 한다.

(1) 항만 경쟁력 효과 연구

항만의 경쟁력에 대한 연구는 선사와 화주가 항만을 선택할 때 소요되는 비용, 운영상의 효율, 서비스 및 수송망 등을 종합적으로 고려한다는 점을 보여준다. Tongzon & Sawant(2007)과 Tongzon(2009)은 선사와 포워더의 항만 선택에서 항만요금, 서비스, 운영상의 효율 및 수송망 등의 중요성을 제시하였다.[26] Bae et al.(2013)과 Song et al.(2016)은 환적 및 수송체인의 관점에서 비용과 혼잡도 등을 고려한 항만 경쟁을 분석하였다.[27] Jourquin, Tavasszy, & Duan(2014)은 복합운송의 운송비용과 시간가치를 반영하여 운송수단의 선택과 수요의 관계를 분석하였다.[28] Tagawa, Kawasaki, & Hanaoka(2021)은 직기항과 환적 간의 선택 조건을 수송망 모형으로 분석하였고,[29] Wang et al.(2024)은 항만 내의 수요 조정과 항만 간의 경쟁을 게임이론으로 분석하여 기항 수요가 가격과 혼잡도 등 경쟁 조건에 민감함을 보였다.[30]

26) Tongzon & Sawant(2007), pp. 477-492; Tongzon(2009), pp. 186-195.
27) Bae et al.(2013), pp. 479-481; Song et al.(2016), pp. 75-77.
28) Jourquin, Tavasszy, & Duan(2014), p. 362.
29) Tagawa, Kawasaki, & Hanaoka(2021), pp. 12-14.
30) Wang et al.(2024), pp. 3-4.

이들 연구는 피지컬 AI의 도입에 따른 운영 시간과 비용의 개선이 선사·화주의 편익을 높이고 결과적으로 항만 선택과 환적화물 유지에 영향을 줄 수 있다는 이론적인 근거를 제공한다. 또한 일본 국토기술정책종합연구소(NILIM, 2010)의 컨테이너화물 시간가치에 대한 연구는 운송시간 단축을 화주의 경제적 편익으로 환산할 수 있는 방법론적인 근거를 제공한다.[31] 따라서 제3장에서 선사의 재항 비용 절감, 화주의 지체료 절감 및 화물의 시간가치 편익을 항만의 경쟁력에 대한 효과로 산정하는 것은 기존의 항만 선택과 시간가치 연구의 흐름과 부합한다.

다만 운영 시간의 단축이 항만의 선택이나 환적화물의 유지로 직접 이어지는 정도를 계량적으로 제시한 연구는 제한적이다. 따라서 운영 효과를 이용자 편익으로 환산하는 단계와 이용자 편익이 실제 물동량 유지·증가로 이어지는 단계는 구분해야 하며, 환적화물 전체의 가치를 피지컬 AI 도입의 직접적인 효과로 간주해서는 안 된다.

(2) 항만기술산업 경쟁력 효과 연구

항만기술산업 연구는 항만 자동화와 지능화의 확산이 하역 장비, 제어 시스템, 터미널 운영 시스템 및 AI 소프트웨어 시장의 성장으로 이어질 수 있음을 보여준다. 원승환·조성우·이언경(2025)은 국내 터미널 운영 시스템의 산업 활성화와 해외시장으로의 진출을 위해 기술개발, 현장 검증 및 국내 구축실적의 확보가 필요하다고 제시하였다.[32] Drewry(2025)의 세계 컨테이너터미널 운영시장에 대한 전망도 터미널 운영자의 투자 확대가 항만 장비·시스템 시장의 성장으로 이어질 가능성을 보여준다.[33]

31) NILIM(2010).
32) 원승환·조성우·이언경(2025), pp. 47-49.
33) Drewry(2025).

해양수산부가 중심이 되어 관계부처 합동(2026)으로 수립한 「피지컬 AI 항만 전략(안)」은 세계 항만의 AI 시장이 2025년 약 6.7조 원에서 2033년 약 27.4조 원으로 확대될 것으로 전망하고 2035년 세계시장으로의 진출을 확대하기 위한 목표를 10%로 제시하였다.[34] 또한 국내 항만에서 확보한 기술개발·실증·상용화의 실적을 기반으로 항만 장비, 운영 시스템 및 운영 노하우를 패키지화하여 해외시장에 진출하는 경로를 제시하였다. 반면 높은 도입비용, 수요기업과 공급기업 간의 정보 부족, 전문인력의 부족 및 취약한 실증·상용화 기반을 산업 성장의 주요한 제약요인으로 지적하였다. 한편 해양수산부(2023)는 스마트항만 기술산업의 국산 하역 장비에 대한 시장점유율을 90%까지 높이는 정책목표를 제시하였다.[35] 이러한 시장전망과 정책목표는 제3장의 수입대체 및 해외시장 확보 효과를 산정하기 위한 기준을 제공하지만 피지컬 AI의 도입으로 실증된 효과 계수는 아니다. 다만 세계 항만의 AI 시장규모에 대한 전망은 2033년, 세계시장 점유율의 목표는 2035년으로 기준연도가 다르며, 세계 항만의 AI 시장과 국내 자동화 하역 장비 발주시장의 범위도 동일하지 않을 수 있다. 따라서 수입대체 효과와 해외시장 확보의 효과는 이러한 차이와 국내 기술 수준, 가격경쟁력, 실증 실적 및 공급역량을 전제로 한 조건부 정책 시나리오로 해석해야 한다.

이상의 연구와 정책자료는 국내 항만의 투자와 실증이 국산 장비·시스템의 초기시장 형성, 수입대체 및 해외시장 진출로 연결될 수 있음을 보여준다. 그러나 운영의 생산성 향상이 자동적으로 국내 기업의 시장점유율 증가로 이어지는 것은 아니다. 제3장의 항만기술산업에 대한 경쟁력의 효과는 운영 효과의 직접적인 결과라기보다 국산화율, 해외시장으로의 진출 목표 및 국내 산업생태계의 역량을 전제로 한 정책 시나리오로 구분하는 것이 적절하다.

34) 관계부처 합동(2026), pp. 5-6.
35) 해양수산부(2023), p. 6.

(3) 국민경제 파급효과 연구

국민경제에 미치는 파급효과에 관한 연구는 주로 산업연관분석을 활용하여 관련된 산업의 생산, 부가가치 및 고용 유발효과를 산정한다. Jun, Lee, & Choi(2018)는 산업연관분석을 통해 스마트항만 산업의 생산유발, 부가가치유발 및 고용유발 효과를 산정하여 스마트항만 투자의 국민경제적인 파급을 정량화하였다.[36] 오삼일 외(2025)는 AI의 도입이 생산성과 경제성장에 미치는 영향을 분석하였고,[37] 서동현·오삼일·윤종원(2026)은 생성형 AI를 활용하는 근로자의 업무시간이 평균 3.8% 단축되는 것으로 분석하였다.[38] 이들 AI에 대한 연구는 생산성 개선의 경제적인 파급 가능성을 보여주지만 항만 피지컬 AI에 직접적으로 적용할 수 있는 효과 계수를 제시한 것은 아니다.

산업연관분석에서 산정되는 생산·부가가치·고용에 대한 유발효과는 피지컬 AI의 도입으로 직접 발생하는 운영상의 편익이 아니라 국내에서 발생한 최종 수요의 파급효과이다. 따라서 제3장의 국민경제 파급효과는 피지컬 AI와 관련된 국내 투자 또는 국내 공급분을 최종 수요로 설정하고 국산화율과 대상 산업의 범위를 명확히 한 상태에서 산정해야 한다. 운영비 절감이나 이용자 편익을 다시 최종 수요에 포함하면 동일 효과가 중복될 수 있으므로 운영 효과, 항만의 경쟁력 효과 및 산업과 연관된 파급효과를 구분할 필요가 있다.

종합하면 기존의 연구는 운영 개선이 이용자 편익과 항만 선택, 항만기술산업의 시장 확대 및 국민경제로의 파급으로 이어질 수 있는 단계별 경로를 제공한다. 그러나 세 단계 전체를 하나의 모형에서 인과적으로 연결한 연구는 제한적이다. 이에 본 연구는 운영 효과, 항만 경쟁력 효과, 항만

36) Jun, Lee, & Choi(2018), pp. 487-490.
37) 오삼일 외(2025), pp. 10-12.
38) 서동현·오삼일·윤종원(2026), p. 4, pp. 6-7.

기술산업 경쟁력 효과 및 국민경제 파급효과를 공통의 파급 체계로 구조화하되 직접 연계가 가능한 변수만 연결하고 단계별 가정과 적용 범위를 명시할 필요가 있다.

4) 탄소중립·안전·공급망 회복력 등 국가 전략 차원의 효과 연구

피지컬 AI의 도입에 따른 효과는 운영상의 효율과 경제적 파급에 한정되지 않으며 탄소중립, 에너지 절감, 항만 안전, 고용과 직무의 전환, 공급망의 회복력 및 사이버보안 등 국가 전략 차원에서도 발생한다. 이들 효과는 경제적 효과라는 경로의 마지막 단계가 아니라 피지컬 AI의 도입과 운영의 개선 과정에서 병행하여 발생한다. 다만 측정 단위와 근거의 수준이 서로 다르고 일부는 정량화가 어렵기 때문에 정량적으로 산정할 수 있는 효과와 정책적·질적으로 검토할 효과를 구분할 필요가 있다.

(1) 탄소중립 및 에너지 절감

탄소중립 측면에서 김가현 외(2022)는 스마트항만 기술을 자동화 장비, 신재생에너지 및 IoT·ICT 시스템으로 구분하고 부산항 신항의 동력 전환에 따른 기술유형별로 탄소 저감 효과를 정량화하였다.[39] Meng & Comer (2023)는 시애틀항과 뉴욕·뉴저지항의 전면적인 전기화가 초미세먼지 배출을 69~75% 줄이고 조기 사망을 예방하는 등 건강상의 편익을 창출할 수 있다고 분석하였다.[40] Zhang, Yang, & Wang(2024)은 중국의 39개 주요 항만을 분석하여 스마트화 정책이 항만의 탄소 배출 효율을 개선하는 효과를 제시하였다.[41]

39) 김가현 외(2022).
40) Meng & Comer(2023), p. 1.
41) Zhang, Yang, & Wang(2024).

Nguyen et al.(2026)은 항만과 선박 간에 AI에 기반한 정시 입항의 협력을 통해 선박 연료소비와 배출량을 6.45~7.39% 절감할 수 있다고 분석하였다.[42] 다만 전체 기항의 2.94%를 대상으로 한 시험 결과이므로 항만 전체로 확대하여 적용할 때에는 적용 범위와 참여 조건을 고려해야 한다. Wu et al.(2026)은 항만의 탄소와 대기오염물질을 함께 줄일 수 있는 기술 포트폴리오의 최적화 틀을 제시하였다.[43] 국내에서는 김근섭 외(2021)가 부산항의 에너지 소비 증가율이 물동량 증가율을 상회하는 추세를 확인하고, 이를 항만 에너지관리시스템에 단계적으로 도입하는 방안을 제시하였다.[44]

이들 연구는 운영의 최적화, 정시 입항, 장비의 전동화 및 에너지관리시스템이 탄소와 에너지 절감에 기여할 수 있음을 보여준다. 다만 전동화에 따른 탄소 저감과 AI 운영의 최적화에 따른 에너지 절감은 발생 원리가 다르므로 구분해야 하며, 전력의 탄소 배출 계수와 장비의 전환 범위 등 적용 조건을 함께 제시해야 한다.

(2) 항만 안전 및 고용·직무 전환

안전 측면에서 안승현 외(2025)는 스마트항만의 주요 편익 중 하나로 안전사고의 감소를 제시하고 산정 방법을 개발하였다.[45] 김현서 외(2023)는 IoT에 기반한 근로자 안전기술의 현장 실증을 통해 작업자의 사고위험을 감지하고 위험수준을 추정할 수 있음을 확인하였다.[46] 이들 연구는 피지컬 AI가 고위험 작업의 원격화, 위험요인에 대한 인식 및 사고 예방에 기여할 수 있음을 보여준다. 다만 기술 탐지의 정확도와 실제 사고의 감소율은 다

42) Nguyen et al.(2026), pp. 17-18.
43) Wu et al.(2026), pp. 2-6.
44) 김근섭 외(2021), p. 56.
45) 안승현 외(2025).
46) 김현서 외(2023), pp. 57-68.

른 지표이므로 안전에 대한 효과를 정량화할 때는 기술 성능, 현장의 적용 범위 및 사고 발생 자료를 구분하여 검토해야 한다.

고용 측면에서 한국노동연구원(2022)은 스마트항만과 자동화가 하역 인력의 규모와 직무 구조에 미치는 영향을 분석하였다.[47] 자동화와 AI는 반복·위험 업무를 줄이는 동시에 기존 직무의 축소와 새로운 디지털·데이터 직무의 확대를 수반할 수 있다. 따라서 고용효과는 단순한 인력의 절감 또는 고용 유발의 인원만으로 판단하기보다 직무의 전환, 재교육 및 현장의 수용성을 포함하여 검토해야 한다.

(3) 공급망 회복력 및 사이버 위험

공급망 회복력의 측면에서 Wang et al.(2026)은 시뮬레이션을 통해 항만군집의 AI 투자 최적화가 교란을 일으키는 전파 규모의 중앙값을 60% 이상 줄일 수 있음을 제시하였다. 이는 항만과 공급망 전체의 시스템 회복력을 보여주는 결과이다.[48]

한편 자동화와의 연결성이 높아질수록 사이버 공격과 시스템 장애라는 새로운 위험도 확대될 수 있다. Weaver et al.(2022)은 항만에 대한 사이버 공격의 경제적 손실을 추정하였고,[49] Zhao et al.(2026)은 스마트항만에 대한 주요 사이버 위협과 대응체계를 정리하였다.[50] 세계은행(World Bank, 2026)은 항만 사이버보안의 정책 방향을 개별 위험의 방어에서 시스템 회복력의 확보 중심으로 전환할 것을 권고하였다.[51] 따라서 피지컬 AI의 도입 효과는 공급망 회복력의 편익과 사이버 취약성의 증가를 함께

47) 한국노동연구원(2022).
48) Wang et al.(2026), p. 1, pp. 15-18.
49) Weaver et al.(2022), pp. 23-27.
50) Zhao et al.(2026), pp. 11-13.
51) World Bank(2026), pp. xi-xvii.

고려해야 하며 보안 체계, 데이터 관리체계, 비상 운영의 절차 및 전문인력이 효과를 실현하는 전제조건이 된다.

종합하면 국가 전략 차원의 효과는 피지컬 AI 도입의 정책적인 필요성을 확장하는 근거가 되지만 모든 효과를 동일한 방식으로 정량화하기는 어렵다. 탄소·에너지 등 계량화가 가능한 효과는 적용되는 조건과 범위를 명시하여 산정하고, 안전·고용·공급망의 회복력·사이버의 위험은 정량 지표와 질적 평가를 병행하는 것이 적절하다. 또한 이러한 효과가 실제로 실현되기 위해서는 데이터의 관리, 사이버보안, 비상 운영, 전문인력 및 현장의 수용체계가 함께 구축되어야 한다.

2. 종합 및 시사점

이상의 선행연구를 네 가지 유형별로 종합하면 첫째, 항만 자동화·스마트화의 종합성과는 물동량, 비용 구조, 기술 안정성 및 운영 역량에 따라 달라지는 조건부 효과로 나타났다. 둘째, 피지컬 AI 기술의 요소별 연구에서는 시간 절감, 생산성 향상 및 유지·보수의 개선 가능성이 확인되었으나 연구별로 분석 대상과 성과지표가 달라 효과 계수의 직접적인 비교와 합산에는 한계가 있었다. 셋째, 항만의 운영에 대한 개선은 선사·화주의 편익과 항만의 경쟁력을 거쳐 항만기술산업 및 국민경제로까지 파급될 수 있으나 각 단계의 효과가 자동적으로 연쇄 발생하는 것은 아니었다. 넷째, 탄소·에너지 절감, 항만 안전 및 공급망의 회복력 등 국가 전략 차원의 효과는 경제적 효과와 병행하여 발생하며 사이버 위험과 고용·직무의 전환 등 부정적 영향도 함께 고려할 필요가 있는 것으로 나타났다. 이러한 검토 결과를 바탕으로 본 연구에 대한 다섯 가지 시사점을 도출하였다.

첫째, 자동화에 기반한 효과와 AI의 추가 효과를 구분해야 한다. 기존 연구는 대부분 자동화 또는 AI 중 어느 한 단계의 효과를 분석하고 있어 두 효과를 동시에 식별한 연구가 제한적이다. 따라서 자동화와 AI의 효과는 적용 대상·기준선·성과지표의 비교 가능성과 중복 가능성을 검토하여 결합한다. 이때 적용하는 승수 방식은 두 효과의 중복 계상을 줄이기 위해 본 연구가 설정한 분석 가정이며 선행연구에서 직접 검증된 결합계수는 아니다.

둘째, 효과 계수는 수치의 크기보다 근거의 수준과 비교 가능성을 기준으로 선정해야 한다. 검토된 문헌에는 현장 실측, 사례분석, 시뮬레이션, 이론 모형, 정책상 기대효과, 시장 전망 및 재인용 값이 혼재되어 있다. 따라서 연구 방법, 분석 대상, 기준선, 측정 단위, 적용 범위 및 국내 항만과의 유사성을 종합적으로 검토하여 제3장의 효과 계수와 적용 범위를 설정해야 한다.

셋째, 해외 연구에서 제시된 효과를 국내 항만의 여건을 고려하여 적용해야 한다. 피지컬 AI의 효과는 기술의 성능뿐 아니라 물동량, 비용 구조, 운영 역량, 데이터, 전문인력, 시스템의 연계 및 법·제도에 따라 달라진다. 따라서 문헌의 수치를 일률적으로 적용하기보다 효과의 적용 범위와 실현 조건을 함께 제시하고, 전문가에 대한 조사는 문헌의 실증값을 검증하는 수단이 아니라 국내 현장의 적용 가능성과 기대 범위를 보완하는 자료로 활용해야 한다.

넷째, 운영 효과와 항만의 경쟁력, 항만기술산업 및 국민경제로의 파급효과를 단계별로 구분하고 중복 계상을 방지해야 한다. 운영 시간과 생산성의 개선은 선사·화주의 비용 및 시간가치 편익으로 연결될 수 있으나 이것이 곧바로 물동량 증가나 국내 기업의 시장점유율 확대로 이어지는 것은 아니다. 또한 산업연관분석의 유발효과는 국내 최종 수요의 경제적인 파급효과이므로 운영비 절감이나 이용자 편익과 구분해야 한다. 이에 따라 본

연구에서는 직접 연계가 가능한 변수만 단계 간에 연결하고 연계 근거가 충분하지 않은 효과는 개별적인 산정 결과로 제시한다.

다섯째, 경제적인 효과와 국가 전략 차원의 효과 및 위험을 함께 고려해야 한다. 시간·비용·생산성의 개선과 같이 계량화가 가능한 효과는 적용 조건과 산정 범위를 명확히 하여 제시하고, 탄소·에너지 절감과 공급망의 회복력 등은 제3장의 기타 효과와 연계하여 검토한다. 항만 안전, 고용·직무의 전환 및 사이버의 위험은 정량 산정 결과와 구분하여 정책적·질적으로 검토한다. 아울러 가격경쟁력, 국산 기술의 공급 기반, 데이터·인력·연구개발, 기술의 검증·인증, 산업생태계, 보안 및 법·제도는 도입 효과가 실제적인 성과로 이어지기 위한 공통 조건으로 제시한다.

3. 본 연구의 차별성

본 연구는 국내 컨테이너터미널을 중심으로 항만 피지컬 AI의 도입 효과를 직접적인 운영 효과에서 항만 이용자의 편익과 항만의 경쟁력, 항만기술산업의 경쟁력 및 국민경제로의 파급효과로 확장하여 분석하였다. 또한 탄소중립·에너지의 절감 및 공급망의 회복력 등 국가 전략 차원의 효과와 도입 효과의 실현 조건을 함께 검토한다는 점에서 기존 연구와 차별된다. 본 연구의 주요한 차별성은 다음의 다섯 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 분석 대상을 항만 피지컬 AI로 명확히 규정하였다. 기존 연구가 스마트항만 또는 항만 자동화 전반을 대상으로 한 것과 달리 본 연구는 물리적 자동화 장비와 AI에 기반하여 체화된 지능이 결합된 항만 피지컬 AI를 분석 대상으로 설정하였다. 이를 바탕으로 자동화 하드웨어를 기반으로 하는 효과와 AI 적용에 따른 추가적인 효과를 개념적으로 구분하고 효과분석의 대상과 범위를 구체화하였다.

둘째, 기술 요소별 선행연구를 제3장의 운영 효과를 산정하는 항목과 직접 연계하였다. 운영 효과를 시간 절감, 생산성 향상 및 유지·보수 개선으로 구분하고 각 항목과 관련된 국내외 선행연구의 결과와 전문가에 대한 조사 결과를 비교하였다. 자동화와 AI 효과의 비교 가능성과 중복 가능성을 검토하고 승수 방식을 본 연구의 분석을 위한 가정으로 적용하였다.

셋째, 피지컬 AI의 도입 효과를 경제적 효과의 파급경로와 국가 전략 차원의 효과로 구조화하였다. 개별적인 장비 또는 단일한 효과에 초점을 맞춘 기존 연구와 달리 본 연구는 터미널의 운영 효과가 항만 경쟁력을 거쳐 항만기술산업 및 국민경제로 확장되는 경로를 단계별로 구분하였다. 다만 각 단계의 효과가 자동적으로 연쇄 발생한다고 전제하지 않고 직접적인 연계 근거가 확인되는 변수만 연결하여 단계 간 중복 계상을 최소화하였다. 즉 항만 피지컬 AI 기술의 도입으로 발생할 수 있는 전체 효과를 다루었다는 점에서 큰 차별성이 있다.

넷째, 항만기술산업의 경쟁력과 국민경제 파급효과를 국내의 공급 조건 및 정책목표와 연계하여 조건부로 산정하였다. 항만기술산업의 경쟁력에 대한 효과는 국내 자동화 하역 장비를 발주하는 시장의 규모, 국산화율의 정책목표 및 해외시장의 점유율을 높이기 위한 목표를 적용하여 수입대체 효과와 해외시장의 확보라는 효과를 추정하였다. 이를 통해 국산화율, 국내 기업의 기술력, 실증할 수 있는 실적 및 시장의 확보 여부가 항만기술산업과 국민경제에 미치는 파급효과의 크기를 결정한다는 점을 명확히 하였다.

다섯째, 선행연구의 효과 계수와 전문가에 대한 조사 결과를 구분하여 활용하고 분석 결과를 도입 효과의 현실화를 위한 정책과제로 연결하였다. 선행연구에서 제시된 수치는 현장 실측, 사례분석, 시뮬레이션, 이론 모형, 정책상의 기대효과 및 재인용 값 등 근거의 유형과 수준을 구분하여 검토하였다. 전문가에 대한 조사는 선행연구의 실증값을 검증하는 수단이 아니

라 해외 문헌에서 제시된 효과를 국내에 적용할 수 있을지의 가능성과 현장의 기대 범위를 보완적으로 판단하는 자료로 활용하였다. 이를 통해 효과 계수의 근거와 적용 범위를 명확히 하고 선행연구에서 확인된 가격경쟁력, 국산 기술의 공급 기반, 기술의 검증·인증, 강소기업의 육성, 프로그램형 연구개발, 산업 데이터, 전문인력 및 법·제도의 개선을 효과 실현을 위한 정책 방향과 연계하였다. 이상의 차별성은 효과분석과 정책방향 설정으로 이어진다. 기술요소별 선행연구와 전문가에 대한 조사 결과는 시간 절감, 생산성 향상 및 유지·보수 개선효과의 적용 범위를 설정하는 데 활용하고, 항만 선택과 시간가치와 관련된 연구는 선사·화주의 편익에 기반한 항만의 경쟁력 효과를 산정하는 데 활용한다. 항만기술산업 및 산업연관과 관련된 연구는 해외시장의 확보 및 국민경제에 미치는 파급효과의 산정 근거로 활용하며, 선행연구에서 확인된 효과의 실현 조건은 관련된 정책과제를 도출하는 근거로 활용한다.

〈표 1-1〉 선행연구와 비교 및 본 연구의 차별성

구분	선행연구	본 연구
연구목표	• 개별 스마트 기술의 직접 효과 규명 • 자동화 투자의 경제성 분석 • 스마트항만 편익 산정 방법 개발	• 피지컬 AI 도입 효과의 종합 산정과 정책 방향 도출
연구대상	• 스마트항만 또는 항만 자동화 일반 • 특정 터미널·개별 기술 사례	• 물리적인 구동과 체화된 지능이 결합된 피지컬 AI • 국내 컨테이너터미널 중심의 도입 효과 분석
연구범위	• 개별 기술 또는 단일 효과 단계 중심	• 운영 효과 → 이용자 편익·항만 경쟁력 → 항만기술산업·국민경제의 단계별 구조화 • 국가 전략 차원의 효과(탄소중립·에너지·안전·공급망 회복력) 병행 검토

구분	선행연구	본 연구
연구방법	• 개별 기술 실증·시뮬레이션 및 사례분석 • 운영 효과, 산업연관 파급효과를 개별적으로 분석	• 기술요소별 효과계수 검토 및 단계별 산정(비교 가능한 항목에 한해 승수 결합하되 분석 가정으로 명시) • 산업연관표와 국산화율 정책목표를 적용한 조건부 산정 • 전문가 설문을 통해(80명) 국내 적용 가능성과 기대 범위를 보완 • 선행연구·설문 출처 구분 표기

자료: 선행연구를 바탕으로 저자 작성

02
피지컬 AI 기술과 국내외 항만 현황

본 장에서는 국내 항만이 직면한 다양한 도전 과제의 대응 수단으로 선택한 피지컬 AI가 무엇이고 어떤 기술로 이루어지는지와 국내외 항만은 이 기술을 어디까지 도입하였는지를 검토하였다. 항만에 피지컬 AI 기술의 도입에 따른 효과의 산정은 이러한 검토가 수행된 이후에 분석의 범위와 방법을 결정할 수 있기 때문이다.

제1절 피지컬 AI 기술

1. 피지컬 AI의 개념

1) 정의

피지컬 AI(Physical AI)는 소프트웨어와 데이터의 영역에 머물던 인공지능이 물리적인 현실 세계로 나온 단계를 일컫는다. 인공지능이 센서로 환경을 읽고 구동기(actuator)와 제어 시스템을 통해 현실에 직접 작용하는

시스템이다. IBM은 이를 "물리적 세계 안에서 작동하고 상호 작용하는 인공지능 시스템"이라 정의하였다.[52] 엔비디아(NVIDIA)는 자율주행차·로봇·자동화 설비처럼 물리적인 세계를 인식·이해·상호 작용하는 자율기계의 기반적인 기술로 설명한다.[53]

소프트웨어 AI와의 경계는 체화(embodiment)와 물리적인 구동(actuation)에 있다. 데이터를 분석해 예측과 판단을 내놓는 데서 멈추면 소프트웨어 AI다. 그 판단이 장비의 동작으로 이어져 현실의 상태를 바꿀 때 피지컬 AI가 된다. 인식(perception)에서 판단(reasoning), 작동(actuation), 학습(learning)으로 이어지는 순환을 물리적인 공간에서 수행하는 사이버-물리적 시스템인 것이다. 시장의 성장세도 가파르다. 글로벌 피지컬 AI 시장은 2025년 124조 2천억 원에서 2033년 1,461조 7천억 원 규모로 연평균 36.1%의 성장이 전망된다.[54]

항만이 피지컬 AI의 유망한 실증 무대로 인식되는 이유는 작업 환경의 특징에 있다. 항만에서 화물을 처리하는 절차는 정형화되어 있고, 작업 공간이 외부와 차단되어 있으며, 동일한 작업이 대규모로 반복된다. 예측이 어려운 보행자, 차량 등이 뒤섞이는 도로와 달리 통제된 구역에서 정해진 경로를 오가는 환경이다. 그만큼 개방된 환경보다는 기술 적용의 난이도가 상대적으로 낮고 효과의 측정도 용이하다. 다만 고중량 화물의 취급, 기상의 영향, 24시간 연속 운영 등 항만이 가진 고유의 기술적인 난점은 남아 있다.

52) IBM(2025)(검색일: 2026.7.15.)
53) NVIDIA(2025)(검색일: 2026.7.15.)
54) Grand View Research(검색일: 2026.7.15.)

2) 항만에서의 계층 구조

항만에 적용되는 피지컬 AI는 기존의 학술·표준 체계[55]를 근거로 세 계층으로 나누어 볼 수 있다. 물리적인 구동(제1계층)은 하역·이송을 실제로 수행하는 장비군이다. 자율주행 무인이송장비(AGV, ATV 등)와 자동 야드 크레인(ARMGC 등), 자동·원격 안벽크레인이 여기에 속한다. 체화한 지능(제2계층)은 이 장비들을 지휘하는 인공지능이다. 선석의 배정, 크레인의 스케줄링, 경로계획 등의 운영에 대한 최적화, 컴퓨터비전에 기반한 인식·안전의 감시, 디지털트윈, 예지 정비 등이 해당한다. 이들 지능의 판단은 운영 시스템을 거쳐 개별 장비의 작업 순서와 경로로 집행된다. 판단이 물리적인 구동으로 이어지는 폐쇄된 순환 구조라는 점에서 구동과는 관련이 없는 제3계층과 구분된다. 경영·전략 수준의 인공지능(제3계층)은 수요에 대한 예측이나 투자에 대한 의사결정처럼 장비의 구동보단 상위의 판단을 맡는다.

최근 정부의 「피지컬 AI 항만 전략(안)」[56]에서 제시한 발전 경로, 곧 재래식 항만에서 자동화 항만을 거쳐 피지컬 AI 항만으로 나아가는 단계의 구분도 이 계층의 구분과 일치한다. 자동화 항만이 물리적인 구동까지의 단계라면 피지컬 AI 항만은 여기에 체화한 지능이 더해진 제1계층과 제2계층의 결합이다. 본 연구의 효과에 대한 산정의 대상도 이 결합으로 한정한다. 제3계층은 산정에서 제외하되 도입의 배경과 정책 여건에 활용한다. 이와 같은 경계의 명확한 구분은 장비의 구동과 무관한 상위 판단의 효과까지 항만에 도입하여 나타난 효과로 확대되는 오류를 막을 수 있다.

55) 제1·2계층을 가르는 체화(embodiment)한 기준은 지능이 물리적인 신체와 상호 작용 속에서 성립함을 논한 로보틱스 문헌(Brooks, 1991, pp. 139–159)을 참고하였으며, 인식–판단–작동–학습의 순환 구조는 사이버–물리적인 시스템의 계층 아키텍처(Lee et al., 2015, pp. 18–23)를 참고함. 제2·3계층을 가르는 제어–경영 계층의 분리는 산업자동화 국제표준(IEC 62264–1:2013)의 기능 계층 모델임

56) 관계부처 합동(2026), p. 2.

2. 항만 자동화의 발전 단계와 수준

1) 항만의 발전 단계

항만의 발전 단계별 특징과 한계는 다음과 같다. 재래식 항만에서는 판단과 운영을 사람이 담당하며 그만큼 인력에 대한 의존과 안전에 대한 문제를 안고 있다. 자동화 항만은 하드웨어에 소프트웨어가 결합되어 규칙과 순서에 따라 무인으로 운영된다. 다만 정해진 절차의 반복작업에 강한 대신 예외적인 상황과 복잡한 최적화에는 약하다는 한계가 있다. 피지컬 AI의 항만은 AI가 장비의 인지·판단·제어까지 맡는 단계로 아직 원천기술과 운영 실적(레퍼런스)이 부족하다는 과제를 안고 있다.[57]

〈표 2-1〉 항만의 발전 단계

구분	재래식 항만	자동화 항만	피지컬 AI 항만
전환	-	(무인화)	(자율화)
운영 방식	사람 중심 판단·운영	규칙·순서에 의한 자동운영	AI 기반 인지·판단·장비 제어
한계	사람 의존, 안전문제	유연성 부족, 생산성 향상 한계	원천기술·레퍼런스 부족
기술 구성	하드웨어 중심	하드웨어 + 소프트웨어	(하드웨어 + 소프트웨어) + AI

자료: 관계부처 합동(2026), p. 2를 참고하여 저자 작성

2) 자동화 수준의 분류

물리적 자동화의 수준은 무인화가 어느 단계까지 왔는지를 기준으로 판단된다. 모든 장비를 사람이 탑승해 조종하면 비자동화, 야드 장치부터 자동·원격으로 전환하였으면 반자동화, 안벽 하역은 원격조종, 이송·장치의 전 영역이 무인이면 완전 자동화다. 자동화가 야드에서 출발하는 것은 컨

57) 관계부처 합동(2026), p. 2.

테이너가 멈춰 있는 영역이라 기술 난이도가 상대적으로 낮기 때문이다. 이후 이송과 안벽으로 확대되는 것이 일반적인 경로다.

〈표 2-2〉 컨테이너터미널의 자동화 수준 분류

공정 영역	비자동화	반자동화	완전 자동화
안벽 하역	유인 조종	유인 조종	원격조종 안벽크레인
수평 이송	유인(야드트랙터)	유인	무인이송장비 (AGV·AIV 등)
야드 장치	유인	자동/원격 야드크레인	자동 야드크레인 (ARMGC)

자료: 한국노동연구원(2022), pp. 35-37을 바탕으로 저자 작성

여기서 강조할 점은 완전 자동화와 피지컬 AI가 같지 않다는 사실이다. 장비가 고정된 규칙대로만 움직인다면 그것은 물리적인 구동에 머문 상태다. AI에 기반한 실시간 최적화, 돌발 상황에 대한 유연한 대처 등이 이루어질 때 피지컬 AI라 부를 수 있다. 동일한 완전 자동화터미널이라도 어느 쪽인지에 따라 성과가 갈린다. 제3장에서 선행연구에 기반한 자동화 도입의 효과와 구분하여 AI의 적용에 따른 추가적인 효과를 산정하는 것도 이 구분에 근거한다.

3. 피지컬 AI의 구성 기술 요소

물리적인 구동의 계층에서 쓰이는 장비부터 보면 수평으로의 이송은 무인이송장비가 맡는다. 매설된 트랜스폰더를 따라가는 AGV, 스스로 경로를 정하는 ATV 등이 대표적이다. 야드에서는 자동 야드크레인이 화물을 처리하고, 안벽에서는 원격조종에 기반한 안벽크레인이 모선 작업을 담당한다. 최근에는 장비의 전동화가 병행되어 무인화와 함께 에너지 효율 개선과 배출 저감 효과도 거두고 있다.

대표적인 체화한 지능의 계층은 크게 보면 다음과 같이 정리할 수 있다. 스케줄링, 조정하는 지능은 선석의 배정부터 크레인의 작업 순서, 이송 장비의 배차 및 경로 설정까지를 실시간으로 최적화한다. 컴퓨터비전은 컨테이너의 번호 판독, 손상 검사, 작업자·장애물의 감지와 같은 인식·안전의 기능을 맡는다. 디지털트윈은 실제 터미널을 가상 공간에 복제하여 도입하는 기술을 사전에 검증하거나 운영 시나리오를 점검하고, 예지 정비는 센서 데이터에서 고장의 징후를 잡아내 비가동할 수 있는 비율을 줄인다. 이들 지능은 따로 작동하지 않고 서로 맞물려 대규모의 무인 장비가 병목 없이 유연하게 협업하는 기반이 된다.

〈표 2-3〉 피지컬 AI의 구성 기술요소

계층	기술요소	주요 기능
물리적인 구동	무인이송장비(AGV·ATV 등)	안벽 ↔ 야드 수평 이송
	자동 야드크레인(ASC·ARMGC)	야드 적치·반출
	자동·원격 안벽크레인	선박 ↔ 안벽 하역
	자동 게이트·판독 설비	반출입 무인화
체화한 지능	스케줄링·조정 지능	선석 배정·크레인 순서·배차 최적화
	컴퓨터비전	인식·손상검사·안전감시
	디지털트윈	운영 예측·시험·최적화
	예지정비	고장 사전 포착, 계획외 비가동 감소

자료: 관계부처 합동(2026), pp. 7-9, p. 11; Jin et al.(2023), p. 17; Trinh et al.(2025), p. 1; Kastner et al.(2024), p. 10; Klar et al.(2026), p. 1을 참고하여 저자 작성

4. 항만의 운영 구조와 병목 요인

도입 효과가 어느 지점에서 발생하는지를 보려면 항만의 운영 구조를 구분하여 살펴볼 필요가 있다. 컨테이너는 입출항 항로를 지나 선석에서 양·적하되고 야드에 보관되었다가 게이트를 거쳐 내륙으로 빠져나간다. 이 다섯 구간의 병목은 상당 부분 정보가 이어지지 않는 데서 비롯된다. 선박의

운항 정보와 하역 일정이 따로 관리되면 대기가 생기고, 크레인 및 이송 장비의 배치 계획 등 작업계획의 조정이 어긋나면 지연이 반복된다. 이는 장비를 더 투입하는 것만으로는 풀리지 않는 문제다. 구간을 가로질러 정보를 잇고 의사결정을 최적화하는 지능, 곧 체화한 지능의 결합이 요구되는 이유가 여기에 있다. 관계부처 합동(2026)을 바탕으로 구간별 핵심 기능, 병목 요인, 개선 방향을 정리하면 〈표 2-4〉와 같다.

〈표 2-4〉 컨테이너 항만의 운영 영역별 병목 요인과 개선 방향

구분	핵심 기능	병목 요인	개선 방향
입출항로	선박이 항만으로 진입하는 구간	선박 운항 상황과 하역 스케줄의 실시간 연계 부재	안전 항로·적정 속도·최적 도착시간을 제시하는 지능형 입출항 관리체계
선석	선박에서 컨테이너를 싣고 내리는 구간	크레인·이송장비·하역계획의 동시 조정 부재에 따른 대기와 지연	하역 장비가 대기 없이 연속 작업하는 자율 협업형 선석 운영체계
야드	컨테이너를 보관하고 옮기는 구간	컨테이너 위치·장비 배치·화물차 도착시간의 연계 부재에 따른 재작업	재이동을 최소화하고 장비·차량을 최적 배치하는 동적 야드 운영체계
게이트	화물차가 항만으로 드나드는 관문	리핸들링과 트럭 배차의 연계 부족, 게이트 정체의 터미널 전이	차량이 정차·대기 없이 이동하는 스마트 게이트
내륙	항만 밖 물류센터·도로와의 연결 구간	화물·차량 정보의 실시간 연결 부재에 따른 물류 흐름 정체	항만과 배후단지와 내륙 운송이 하나의 흐름으로 작동하는 통합형 배후 물류

자료: 관계부처 합동(2026), p. 2, 4, 8, 14를 바탕으로 저자 작성

제2절 주요 해외 항만 현황 및 사례 분석

해외의 사례는 본 연구의 내용에 부합하는 범위로 한정하여 검토하였다. 제1절에서 피지컬 AI를 물리적인 구동과 체화한 지능의 결합, 곧 AI가 물

리적 장비의 인지·판단·제어가 결합된 단계로 정의하였다. 따라서 검토할 대상도 자동화 장비에 AI가 실제로 결합되어 작동하는 사례를 중심으로 한다. 결합의 형태에는 AI가 장비를 직접 제어하는 유형과 AI가 수립한 운영 계획이 장비의 작업 지시로 집행되는 유형이 모두 포함된다. 반면 기항 일정의 조정이나 항만 경영에 대한 지원처럼 물리적인 구동과 직접적으로 연결되지 않는 지능화의 성과는 제3계층에 해당하므로 검토 범위에서 제외한다. 유의할 점은 이 기준을 충족하는 사례 자체가 아직 많지 않다는 것이다. 선석, 이송, 야드, 게이트의 전 영역을 AI가 자율로 최적화하는 완결된 피지컬 AI의 항만은 공개된 사례를 기준으로 할 때 많이 확인되지 않는다. 세계 최고 수준의 자동화터미널을 운영하는 선진 항만들도 그 위에 AI를 결합하는 작업은 이제 시작하는 단계에 있다. 현재 확인되는 사례는 터미널의 운영 전반에 AI를 결합한 유형과 개별 작업과 장비 단위에 AI를 결합한 유형으로 구분되며 그 수와 적용될 범위는 아직 제한적이다.

1. 터미널 운영 전반의 결합 사례

칭다오항은 안벽~이송~야드의 전 공정에서 AI가 장비를 직접 제어하는 단계에 가장 근접한 사례다. 산둥항만그룹은 자동화터미널의 운영 시스템(A-TOS)과 장비제어 시스템(A-ECS)을 자체적으로 개발하여 전 장비를 하나의 체계로 통합하여 제어한다. 안벽에서는 AI와 3차원 포인트클라우드 기술이 선박의 위치 편차를 실시간으로 인식하여 안벽크레인이 사람의 개입 없이 하역 작업을 수행한다. 이송에서는 시각인지와 자동 유도의 결합으로 장비 간 운행 간격을 2.6% 좁히고 주행 속도를 3.6% 높였다.[58] 야드에서는 AI가 15만 개가 넘는 장치의 위치 후보에서 최적의 적치 위치를 산

58) Port Technology International(2025.5.23.)(검색일: 2026.7.23.)

정하여 재이동률을 5.14% 낮추었다.[59] 그 결과 2025년 5월 안벽크레인 1기 기준으로 시간당 62.62 BOX(컨테이너 실물 개수 기준)를 처리하여 자동화터미널의 하역 효율에서 세계기록을 13번째로 경신하였다.[60]

칭다오항 사례에서 주목할 점은 하드웨어 자동화의 성과에서 한계를 끌어올린 것이 자체 개발한 운영 시스템과 AI 알고리즘이라는 사실이다. 운영 시스템을 자체적으로 보유하면 현장의 데이터가 자국 기술의 학습된 자산으로 축적되고 개선에 필요한 주기도 빨라진다.

상하이 양산항의 4단계는 세계 최대 규모의 완전 무인 자동화터미널로 지능형 항만 운영 시스템(ITOS)과 초저지연 5G 특화망을 연계하여 운영된다. 자율이송장비와 원격제어 안벽크레인이 센서·AI를 기반으로 협업하며 작업 지연이나 충돌 없이 밀리초 단위의 자율 작업이 이루어진다. 그 결과 1인당 노동생산성이 재래식 터미널의 약 213% 수준(약 2.1배)으로 높아지고 인력은 약 70% 감축된 것으로 발표되었다.[61] 완전 자동화 하드웨어 시스템 위에 지능형 운영체계가 결합될 때의 성과를 보여주는 대표적인 사례다.

텐진항은 물리적인 구동과 체화한 지능의 결합을 장비와 운영의 양면에서 보여준다. 장비 측면에서는 기존의 무인이송장비 대신 자율운송로봇(ART)을 도입하였다. ART는 카메라와 레이더로 주변 환경을 인지하고 위성항법으로 위치를 파악하며 5G 통신으로 클라우드와 연결되어 경로와 속도를 스스로 조정한다.[62] 운영 측면에서는 AI의 수리(數理)최적화 도구가 선박·선석·크레인·야드·배차에 걸친 수천만 개 변수의 운영 계획을 수립한다. 과거에는 24시간 걸리던 계획의 수립이 10분 이내로 단축되었고 장비의

59) Port Technology International(2025.5.23.)(검색일: 2026.7.23.)
60) Port Technology International(2025.5.23.)(검색일: 2026.7.23.)
61) 上海市商务委(2025.4.30.)(검색일: 2026.7.30.)
62) Huawei(검색일: 2026.7.30.)

가동률은 15% 향상, 야드의 재이동은 20% 감소, 선박의 평균 재항 시간은 10% 단축되었다.[63]

텐진항의 성과는 물리적인 설비의 추가 증설 없이 AI에 기반하여 계획된 기능을 고도화한 뒤 운영지표가 개선된 사례라는 점에서 의미가 있다. 다만 공표된 자료만으로는 같은 시기에 이루어진 다른 운영 개선의 영향을 분리하기 어렵다. 따라서 AI 접목에 따른 추가 효과의 가능성을 보여주는 사례로 해석한다.

태국 람차방항은 후발 항만도 AI의 결합으로 성과를 낼 수 있음을 보여준다. AI 의사결정시스템이 게이트·자율주행 트럭·하역 장비를 통합하여 관제하며 병목을 예측하고 장비의 동선을 실시간으로 재계산한다. 그 결과 기존의 자동화터미널과 대비하여 운영효율이 30% 향상된 것으로 보고되었다.[64] 텐진항과 마찬가지로 비교의 기준이 재래식이 아닌 자동화터미널이라는 점에서 자동화 장비 도입과는 별개로 AI 기술 도입의 순(純)효과가 발현될 수 있다는 가능성을 보여주는 사례에 해당한다.

싱가포르는 투아스(Tuas)항을 연간 6,500만 TEU를 처리할 수 있는 세계 최대의 자동화 항만으로 개발하고 있다.[65] 1단계에서만 선석 21개가 2027년까지 단계적으로 운영에 들어가 연간 2,000만 TEU를 처리할 예정이다.[66] 전기식 무인이송장비와 자동화 야드크레인이 야드·안벽 간 이송과 적치를 담당하며, 이와 관련된 작업은 투아스항 관제센터에서 원격으로 관리된다.[67] 운영사인 PSA는 투입할 장비의 확대에 대비하여 과학기술연구청(A*STAR)과 대규모 장비의 관리와 관련된 알고리즘을 공동으로 개발하고 있다.[68] 이는 대규모 무인 장비를 병목 없이 원활하게 관리·관제하는

63) Huawei Cloud(검색일: 2026.7.30.)
64) Westwell(검색일: 2026.7.30.)
65) Maritime and Port Authority of Singapore(검색일: 2026.7.30.)
66) Maritime and Port Authority of Singapore(검색일: 2026.7.30.)
67) Maritime and Port Authority of Singapore(검색일: 2026.7.30.)

것이 자동화 항만의 핵심 기술임을 시사한다. 아울러 해사항만청(MPA)은 직접 AI 제품을 개발·시범한 뒤 산업 전반으로 확산하는 공공 주도형 도입 모델을 운영한다. 공공이 초기의 기술 위험을 부담하고 검증된 기술을 산업으로 확산하는 방식은 초기 시장의 불확실성이 큰 항만 AI 분야에서 민간 투자를 견인하는 유효한 전략으로 평가되며, 우리도 국가의 R&D 등 공공이 초기에 주도하는 정책을 추진하고 있다.

2. 개별 공정·장비 단위의 결합 사례

터미널 전반의 결합에 이르지 않더라도 개별적인 공정이나 장비의 단위에 체화한 지능을 결합한 사례가 나타나고 있다. 이 유형은 완전 자동화라는 전제 없이 적용할 수 있어 기존의 유인·반자동 터미널이 다수인 국내 여건에서 참고할 가치가 크다.

함부르크항만물류(HHLA)의 부르하르트카이 터미널(CTB)은 완전 자동화터미널이 아님에도 야드 작업에 AI를 도입하였다. 수입 컨테이너의 반출 시점과 육상의 트럭 등 연계되는 후속 운송수단에 대한 정보가 부족하여 컨테이너를 임시로 옮겨 쌓는 재취급(셔플링) 작업이 반복되는 문제가 AI 도입의 출발점이었다. 수백만 건의 운영 데이터를 학습한 머신러닝 모델이 개별 컨테이너의 체류시간과 후속 운송수단을 예측하고 그 결과가 야드크레인의 적치 작업 계획에 반영된다. 이를 통해 연간 12만 건 이상의 재취급 작업을 줄였다.[69] 예측된 지능이 장비의 물리적인 작업량 자체를 줄인 사례이며, 야드 재취급 작업의 감소는 장비 가동의 절감, 에너지 절감, 유지보수 비용의 절감 등으로 이어진다.

68) PSA Singapore(2022.3.2.)(검색일: 2026.7.30.)
69) HPC Hamburg Port Consulting(검색일: 2026.7.30.)

앤트워프-브뤼헤항(Port of Antwerp-Bruges)은 감시·점검의 물리적인 수행 주체를 자율 기계로 대체하였다. 항만공사는 2023년 5월부터 자율 드론 6대가 120㎢가 넘는 항만 구역을 하루 18회 감시·점검하는 상시의 운영 체계를 세계 최초로 가동하였다.[70] 드론은 중앙 관제센터의 통제 아래 선석 관리, 시설물의 점검, 유류 유출·부유 폐기물의 탐지, 사고에 대응한 지원을 수행한다.[71] 하역 작업은 아니지만 자율 이동체가 인지·판단·작동의 순환을 항만 현장에서 수행한다는 점에서 피지컬 AI의 정의에 부합하는 사례다. 항만에서의 안전·보안 인력의 고위험 순찰 업무를 무인화할 수 있다는 점도 기대된다.

한편 해외 항만에서는 물리적인 구동과 결합되지 않는 지능화 성과도 다수 보고되고 있다. 로테르담항이 머신러닝에 기반한 도착예정시간의 예측으로 선박 대기 시간을 약 20% 단축한 것이 대표적이다.[72] 다만 이러한 기항 시간의 조정, 경영의 지원이라는 영역은 본 연구가 정의한 제3계층에 해당한다. 따라서 피지컬 AI의 직접적인 효과 계수를 산정하는 데에는 사용하지 않되 선박 대기·재항 시간 등 항만 이용자 효과의 파급경로를 설명하는 데는 참고 사례로 활용한다.

3. 주요국 정책 동향

항만 AI의 전환은 개별 항만의 기술 도입에 그치지 않으며 주요국은 국가 차원의 정책과 제도로 이를 뒷받침하고 있다. 중국은 「지능형 항만·수로 건설 가속화 지침」(2023)과 「AI+교통 실행의견」(2025)을 통해 2030년까지 스마트 물류 핵심기술의 자립화를 달성한다는 로드맵을 제시하였다. 싱

70) Port of Antwerp-Bruges(2023.5.5.)(검색일: 2026.7.30.)
71) Port of Antwerp-Bruges(2023.5.5.)(검색일: 2026.7.30.)
72) Port of Rotterdam(검색일: 2026.7.30.)

가포르는 해상운송 산업전환지도(ITM)에서 항만의 연결성과 혁신 역량을 핵심적인 방향으로 설정하고 해사항만청의 주도로 AI 도입을 확산하고 있다. 일본은 '인간을 지원하는 AI 터미널' 이니셔티브로 원격적인 운영·손상 검사 등에 AI를 적용해 왔다. 2026년 5월에는 'AI 터미널 2.0'을 포함한 항만물류의 경쟁력 강화를 위한 방향을 발표하고 경제안보 차원에서 2040년 미국 항만의 하역 장비 시장에서의 점유율 30% 확보를 목표로 제시하였다.[73]

유럽연합은 규율의 틀을 먼저 마련하였다. 「EU AI Act」(Regulation (EU) 2024/1689)는 2024년 8월 발효된 세계 최초의 포괄적 AI 규제로 AI 시스템을 위험 수준에 따라 구분하여 규제 강도를 달리 적용한다. 항만의 자동화 장비에 적용되는 AI는 기계류 등 부속서 I에 열거된 제품에 내장되는 안전 구성요소로서 '고위험 AI 시스템(high-risk AI system)'으로 분류될 수 있으며, 이 경우 시장에 출시되기 전에 적합성 평가와 위험 관리 요건을 충족하여야 한다. 여기서 '고위험'은 AI가 사용되는 작업의 위험도가 아니라 AI 시스템이 사람의 안전과 기본권에 미칠 수 있는 위험 수준에 따른 법적 분류를 의미한다. 고위험 AI 시스템에 대한 의무의 적용 시점은 당초 2026년 8월이었으나 2026년 7월에 발효된 디지털 옴니버스(Digital Omnibus)의 개정에 따라 독립형 고위험 AI 시스템은 2027년 12월 2일, 부속서 I의 제품에 내장되는 고위험 AI 시스템은 2028년 8월 2일로 조정되었다.[74] 항만 자동화 장비에 내장되는 AI가 부속서 I 제품의 안전 구성요소에 해당하고 고위험 AI 시스템의 분류 요건을 충족하는 경우에는 후자의 적용 일정을 따른다. 이러한 제도의 변화를 가져오는 동향은 항만 AI의 도입이 기술만의 문제가 아니라 안전성 확보, 책임 규정, 검증 등 제도의 정비 또한 필요한 과제임을 보여준다.

73) 관계부처 합동(2026), p. 3.
74) European Commission(2026.7.27.)(검색일: 2026.8.15.)

〈표 2-5〉 주요국의 항만 AI 정책·제도 동향

국가	주요 정책·제도	핵심 내용
중국	「지능형 항만·수로 건설 가속화 지침」(2023), 「AI+교통 실행의견」(2025)	2027년 디지털 전환, 2030년 스마트 물류 핵심기술 자립화
싱가포르	해상운송 산업전환지도(ITM), 해사항만청 주도 AI 확산	공공 주도 AI 개발·확산, 혁신 생태계 구축
유럽연합	「EU AI Act」(2024.8. 발효), 디지털 옴니버스(2026.7. 발효)	위험 기반 규제, 고위험 AI 적합성 평가, 고위험 의무 2027년 12월(독립형)·2028년 8월(제품 내장형) 시행
일본	AI 터미널 이니셔티브, 항만물류 경쟁력 강화 방향(2026.5.)	인간지원형 AI 터미널, 하역 장비 생산기능 강화

자료: 관계부처 합동(2026), p. 3; Regulation(EU) 2024/1689; European Commission(2026.7.27.) (검색일: 2026.8.15.)을 바탕으로 저자 작성

4. 종합

이상의 해외 사례를 종합하면 〈표 2-6〉과 같으며 다음의 세 가지 동향이 확인된다.

〈표 2-6〉 해외 항만의 피지컬 AI 결합 사례 종합

항만	결합 유형	물리적인 구동	결합된 체화 지능	주요 성과·현황
칭다오(중국)	터미널 전반	자동 안벽크레인·이송장비·야드크레인	자체 개발 A-TOS·A-ECS, 3차원 포인트클라우드 인식, AI 적치 최적화	크레인 1기 시간당 62.62BOX 세계기록, 재이동률 5.14% 감소
상하이 양산(중국)	터미널 전반	완전 무인 자동화 장비	지능형 운영 시스템(ITOS)·5G	노동생산성 재래식의 213% 수준, 인력 70% 감축
텐진(중국)	터미널 전반	자율운송로봇(ART)	AI 기반 수리최적화 운영계획	가동률 15% 향상, 재항 시간 10% 단축, 재이동 20% 감소
람차방(태국)	터미널 전반	자율주행 트럭·하역 장비	AI 의사결정시스템 통합 관제	자동화터미널 대비 운영 효율 30% 향상

항만	결합 유형	물리적인 구동	결합된 체화 지능	주요 성과·현황
투아스 (싱가포르)	터미널 전반	전기식 무인이송 장비·자동화 야드크레인	대규모 선단관리 알고리즘, 공공 주도 AI	전기식 무인 선단 운영, 대규모 선단관리 기술 개발(운영 현황)
함부르크 (독일)	작업 단위 (야드)	야드크레인 (기존 터미널)	머신러닝 체류시간 예측·적치 계획	연간 12만 건 이상 셔플 이동 감소
앤트워프-브뤼헤 (벨기에)	작업 단위 (감시·점검)	자율 드론 6대	BVLOS 상시 자율 비행·관제	120㎢ 무인 감시, 일 18회 비행(운영 현황)

자료: Port Technology International(2025.5.23.)(검색일: 2026.7.23.); 上海市商务委(2025.4.30.)(검색일: 2026.7.30.); Huawei(검색일: 2026.7.30.); Huawei Cloud(검색일: 2026.7.30.); Westwell(검색일: 2026.7.30.); Maritime and Port Authority of Singapore(검색일: 2026.7.30.); PSA Singapore(2022.3.2.)(검색일: 2026.7.30.); HPC Hamburg Port Consulting(검색일: 2026.7.30.); Port of Antwerp-Bruges(2023.5.5.)(검색일: 2026.7.30.); 관계부처 합동(2026), p. 3을 바탕으로 저자 작성

첫째, 본 연구가 정의한 피지컬 AI에 부합하는 사례는 소수이며 완결된 피지컬 AI의 항만은 아직 확인되지 않는다. 선진 항만에서도 피지컬 AI의 도입은 이제 시작되는 단계로 두 경로로 진행되고 있다. 중국, 싱가포르 등은 완전 자동화터미널 전반에 AI를 적용하고 있고, 유럽은 야드 적치나 감시·점검 등 개별적인 작업 단위에 적용하고 있다.

둘째, 자동화 위에 AI를 결합할 때의 추가 성과가 보고되고 있다. 텐진항은 설비의 증설 없이 가동률 15% 향상과 재항 시간 10% 단축을 달성하였고, 람차방항은 기존의 자동화터미널과 대비하여 운영효율을 30% 높인 것으로 보고되었다. 함부르크항은 자동화 장비의 도입 없이 AI 예측기술을 적용하여 연간 12만 건 이상의 야드 재취급을 줄였다. 자동화의 효과와 구분되는 AI 도입의 순효과에 대한 가능성이 확인된다는 점은 제3장에서 자동화 도입의 효과와 AI 적용의 효과를 구분하는 산정 방식이 타당할 수 있다는 점을 뒷받침한다. 다만 다양한 사례에서 제시하는 수치는 성격과 검증 수준이 다르다. 따라서 본 연구에서는 해외 사례를 효과를 산정하는 직접적인 근거가 아닌 보조적인 근거로 활용하였다.

셋째, 국가 간 성과 경쟁의 원천이 운영 시스템과 소프트웨어의 자체 역량으로 이동하고 있으며 확산은 공공의 주도와 제도 정비를 동반하고 있다. 칭다오항의 세계기록은 자체적으로 개발한 운영·제어 시스템에서 나왔다. 주요 항만의 지능화는 항만당국과 공공기관이 주도하고 있고, 유럽연합은 고위험 AI 시스템에 대한 적합성 평가 등 규율 체계를 먼저 갖추고 있다. 이러한 해외의 동향이 국내에 주는 함의는 제3절에서 국내 현황과 함께 검토한다.

제3절 국내 현황 및 사례 분석

국내 현황은 자동화 인프라, 장비·운영 시스템의 국산화, AI 기술의 세 축으로 진단한다. 앞의 두 축은 정부의 정책 추진으로 기반이 갖추어지고 있는 반면 AI 기술의 결합은 아직 초기 단계에 있다.

1. 자동화 인프라 보급

우리나라 항만이 비록 완전 자동화터미널의 도입은 해외와 대비하여 지연되었으나 최근 자동화 인프라의 확충 속도는 매우 빠르다. 국내 최초의 완전 자동화 부두인 부산항 신항 2-5단계 서컨테이너부두(DGT)가 2024년 4월 운영에 들어갔다.[75] 향후 2-6단계와 피더부두가 개장하면 DGT는 6선석 체계로 운영될 예정이다.[76] 인천신항 1-2단계, 광양항 자동화 테스트베

75) 관계부처 합동(2026), p. 4; 해양수산부 내부자료(2025)
76) 해양수산부 내부자료(2025)

드, 부산항 진해신항이 그 뒤를 잇는다. 그중 진해신항은 21선석의 완전 자동화 항만으로 계획되어 향후 국내 항만 자동화의 중심이 될 전망이다. 자동화 하드웨어가 부산·광양·인천의 주요 항만 전반에 적용되면서 지능 계층이 결합될 물리적인 기반은 안정적으로 다져지고 있다. 정부는 「피지컬 AI 항만 전략(안)」을 통해 진해신항을 세계 최고 수준의 피지컬 AI 항만으로 육성할 계획을 제시하였다.[77]

〈표 2-7〉 국내 주요 항만 자동화 사업 현황

사업	사업기간	총사업비	사업규모	하역능력	주요 장비
부산항 신항 2-5단계	2008~2023	1조 2,000억 원	4천 TEU급 3선석	195만 TEU	• 안벽크레인 9대 • 이송장비 60대 • 야드크레인 46대
부산항 신항 2-6단계	2019~2026	9,800억 원	4천 TEU급 2선석	130만 TEU	• 안벽크레인 6대 • 이송장비 39대 • 야드크레인 34대
인천신항 1-2단계(A구역)	2021~2028	1조 2,000억 원	4천 TEU급 3선석	138만 TEU	• 안벽크레인 9대 • IGV 65대 • 야드크레인 34대
광양항 3-2단계 (테스트베드)	2022~2029	7,600억 원	4천 TEU급 3선석, 2천 TEU급 1선석	136만 TEU	• 안벽크레인 8대 • 이송장비 44대 • 야드크레인 32대
부산항 진해신항 1단계	2022~2031	7조 9,000억 원	3만 TEU급 9선석	801만 TEU	• 안벽크레인 39대 • 이송장비 154대 • 야드크레인 156대

주: 주장비 대수는 사업계획 기준이며, 발주 단계의 장비 대수와 금액은 〈표 2-8〉 참조
자료: 해양수산부 내부자료(2025)를 바탕으로 저자 작성

이러한 신규 항만의 개발에 따라 국내 항만기술산업의 시장 규모도 확대되고 있다. 진해신항의 경우 1-1단계는 안벽크레인 12기 3,600억 원과 야드크레인 54기 3,240억 원의 신규 발주가 계획되어 있다. 1-2단계는 안벽

77) 관계부처 합동(2026)

크레인 24기 7,920억 원과 야드크레인 108기 7,128억 원 규모다. 관계부처 합동(2026)에 따르면 2035년까지 국내 시장의 투자 규모는 11조 6천억 원에 이를 것으로 예상되며, 정부에서는 이러한 국내 시장의 수요를 활용하여 관련된 산업을 육성하기 위한 다양한 계획을 추진하는 중이다.[78]

〈표 2-8〉 국내 자동화항만 하역 장비 도입 규모

단위: 대, 억 원

사업	안벽크레인		야드크레인		이송장비	
	대수	금액	대수	금액	대수	금액
부산항 신항 2-5단계	9	1,530	46	1,840	60	780
부산항 신항 2-6단계	8	2,392	34	1,972	40	680
광양항 테스트베드	8	2,059	32	1,535	44	828
진해신항 1-1단계	12	3,600	54	3,240	미정	미정
진해신항 1-2단계	24	7,920	108	7,128	미정	미정

주: 장비 대수와 금액은 발주 기준으로, 2-5단계·2-6단계·광양항 테스트베드는 입찰금액, 진해신항은 2026년 3월 계획 당시 견적가 기준임
자료: 해양수산부 내부자료(2025)를 바탕으로 저자 작성

2. 장비·운영 시스템 국산화 정책과 성과

정부는 2023년 「스마트항만 기술산업 육성 및 시장 확대 전략」[79]을 수립하여 항만 장비와 운영 시스템의 국산화를 정책 과제로 추진해 왔다. 2025년에는 「항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률」이 시행되어 산업 육성의 제도적인 기반도 마련되었다. 정책 추진의 성과는 시장에서 확인된다. 부산항 신항 2-5·2-6단계와 광양항 테스트베드를 통해 약 1조 3,600억 원 규모의 국내 시장이 형성되었고, 안벽크레인 25대, 야드크레인 112대, 이송장비 144대가 국산 장비로 발주되었다(〈표 2-8〉 참조). 또한 2024년 안벽크레인을 싱가포르 투아스항에 납품하였고, 터미널의 운영 시스템은 브

78) 관계부처 합동(2026), p. v, p. 26.
79) 해양수산부(2023)

라질 산토스항(2025년)과 모로코 나도르항(2026년)에 각각 공급되었다.[80]

다만 하드웨어의 국산화에 대한 기반은 여전히 취약하다. 부산항 신항의 안벽크레인은 중국산의 의존도가 높으며, 이는 세계의 안벽크레인 시장을 중국의 특정한 제조사가 약 70% 점유하고 있는 구조와 맞물린다.[81] 국내 기업의 안벽크레인 세계시장에서의 점유율은 2003년 8.1%가 최고치였다.[82] 이후 사실상 수주가 끊기면서 시장에서 철수하였다가 최근 국산 장비의 도입이 확대되면서 점유율이 회복되는 단계이다.

운영 시스템의 국산화와 원천기술의 확보도 핵심 과제로 추진되고 있다. 항만 운영의 두뇌에 해당하는 터미널 운영 시스템(TOS)은 그동안 해외 제품에 의존해 왔다. 이를 국산화하면 그 위에 국산 AI 기술을 결합하고 현장 데이터를 우리 기술의 자산으로 축적할 수 있다. 제2절에서 살펴본 바와 같이 칭다오항이 자체적으로 개발한 운영 시스템으로 세계 최고의 생산성을 달성한 데서 확인되듯 이 방향은 산업의 육성을 넘어 국가 간 성과 경쟁의 전제이기도 하다. 시장에서의 전망도 이 방향을 뒷받침한다. 글로벌 항만의 AI 시장은 2025년 6조 7천억 원에서 2033년 27조 4천억 원으로 연평균 19.1% 성장하고, 그중 소프트웨어 부문의 성장률이 20.8%로 가장 높을 전망이다.[83] 하드웨어 시장은 저성장의 국면에 있고 중국이 이미 선점한 반면 AI·소프트웨어 시장은 고성장의 국면에 진입하고 있다. 이러한 배경에서 우리 정부도 국내 AI 기술에 기반한 항만 운영 시스템의 개발 사업 등을 통해 글로벌 시장에 진출하기 위한 전략을 추진하는 중이다.

80) 관계부처 합동(2026), p. 5.
81) 해양수산부(2023), p. 4; 관계부처 합동(2026), p. 5.
82) 안승현 외(2023), p. 31.
83) DataIntelo(2025), pp. 25-27.

3. AI 기술의 도입·개발

반면 AI 기술 부문의 개발은 이제 본격화되는 단계다. 학술 영역에서는 개별 기술의 실증이 쌓이고 있다. 유전 알고리즘(genetic algorithm, 생물의 진화 과정을 모방한 최적화 기법)을 활용한 AI 자동 배차로 이송 장비의 공차 거리를 줄여 비용과 시간을 절감할 수 있음이 확인되었고, 사물인터넷(IoT)과 AI로 작업자의 위험을 실시간 감지하는 안전 기술도 현장 실증을 마쳤다.

공공 주도의 AI 기술 도입도 광양항의 자동화 테스트베드에서 시작될 예정이다. 동 사업의 AI 기술 도입 과제는 운영 시스템의 고도화, 객체인식의 정밀화, 스마트 게이트 등이다. 이러한 과제의 공통점은 기존 시스템의 한계를 극복하는 것을 출발점으로 삼는다는 데 있다. 먼저 규칙에 기반한 운영 시스템의 한계를 극복하기 위해서 생성형 AI 기술에 기반한 터미널 운영 시스템을 개발하고, 인식·정밀조작의 문제로 인해 사람이 원격 조종하던 방식으로 개입하던 단계를 피지컬 AI 기술을 기반으로 자동화·효율화하는 것이다.

또한 부산항만공사는 「부산항 AX 추진계획(2026)」에서 AI 기술개발의 로드맵을 제시하였고,[84] 부산항 신항 DGT에서는 내부망을 기반으로 한 상용의 대규모 언어모델을 운영에 활용하는 방안이 추진되고 있다. 그러나 선석 배정·크레인 스케줄링·디지털트윈 등 터미널 전체를 실시간으로 최적화하는 통합적인 지능은 아직 상용화 단계에 이르지 못하였다. 자동화 인프라와 국산화의 기반에 비해 AI 기술의 결합은 초기 단계에 머물러 있는 것이다.

84) 부산항만공사(2026)

4. 소결

국내외 현황을 종합하면 다음과 같다. 해외의 선도국도 정부, 공기업, 항만공사 등을 중심으로 연구개발과 실증, 제도 정비를 병행하고 있다. 다만 공개적으로 확인되는 운영 성과는 아직 개별적인 터미널이나 특정한 영역의 결합 사례가 중심이다.

국내는 자동화 인프라를 확충하고 일부 장비·운영 시스템의 국산화 성과를 축적하여 왔다. 정부는 「피지컬 AI 항만 전략(안)」을 통해 기술개발·실증·확산을 연계하는 추진체계를 마련하였다. 향후의 과제는 이러한 정책적 기반을 통합한 지능의 상용 운영, 현장의 데이터 축적, 국내외 운영 실적(레퍼런스)의 확보로 연결하는 것이다.

다만 정책적으로 본격 도입할 때에는 대규모 재정·민자 투자가 수반된다. 진해신항 등 후속 사업의 장비·시스템의 투자만도 조 단위에 이른다. 따라서 정책 추진의 당위성을 확보하기 위해서는 도입 효과를 객관적인 근거 위에서 산정하는 작업이 선행되어야 한다. 해외 사례는 자동화에 기반한 토대 위에 AI를 결합할 때 추가 개선이 가능함을 보여주는 보조 근거이며, 효과의 크기는 학술적인 선행연구의 결과와 전문가에 대한 설문에 기반하여 산정한다. 이어지는 제3장에서 이를 다룬다.

03
항만 피지컬 AI 도입 효과 분석

3장에서는 앞서 살펴본 선행연구와 국내외의 적용 현황 및 사례를 기반으로 항만에 피지컬 AI 기술을 도입했을 때의 효과를 산정하였다. 선행연구의 분류와 국내외 항만에서 적용하고 있거나 추진하고 있는 분야를 종합적으로 고려하여 도입 효과를 체계적으로 구분하고 효과별 산정 방식도 제시하였다.

제1절 산정 체계

1. 도입 효과 구성

항만 피지컬 AI 도입의 효과를 산정하기에 앞서 어떤 효과가 발생할지를 사전적으로 정의할 필요가 있다. 본 연구에서는 항만 피지컬 AI 도입의 효과를 운영 효과, 항만의 경쟁력에 대한 효과, 산업의 경쟁력에 대한 효과, 국민경제로의 파급효과로 구분하였다.

우선 항만에 피지컬 AI를 도입하면 동일한 물량을 처리하는데 더 작은 자원을(시간, 인력, 에너지 등) 투입하여 운영상의 효율을 높일 수 있다. AI 기술 도입으로 선박의 대기 시간과 항만에서 머무는 시간(재항 시간)은 줄어들고, 터미널의 생산성은 높아지며, 인력과 에너지 소비도 줄어드는 것이 대표적일 것이다. 이렇게 항만의 운영상 효율이 개선되면 항만을 이용하는 핵심 고객인 선사와 화주는 이익을 얻을 수 있다. 선박의 대기 시간과 재항 시간이 감소하면 연료비, 용선료 등 선사의 선박 운영비용이 감소할 것이고, 화주는 수출입과 관련한 물류비용의 절감과 화물의 시간가치에 대한 확보가 가능할 것이다. 이러한 이익을 지속적으로 제공해 주는 항만은 결과적으로 주요 고객이 선택할 확률이 높아진다. 주요 고객이 선택할 확률에 대한 제고는 곧 항만의 경쟁력이 된다. 항만의 경쟁력이 강화되면 안정적인 물동량이 증가하고 이에 따른 터미널의 개발 수요가 증가하고, 터미널 운영을 위해 투입해야 할 피지컬 AI에 기반한 장비 및 시스템의 규모도 비례하여 증가할 것이다. 이러한 과정을 통해 기술력을 갖춘 국산 제품의 도입이 증가하면 국내 시장 규모가 커지고 항만기술산업도 활성화될 것이다. 국내 시장에 투입되어 기술력이 검증되면 해외시장을 개척할 기회도 확대될 것이다. 아울러 국산 장비 도입의 확대는 국내 산업 전반에 걸쳐 생산유발, 부가가치유발 및 고용유발 등의 파급효과를 창출할 수 있다. 이상과 같이 피지컬 AI 기술의 도입으로 예상되는 효과의 경로에 기반하여 도입 효과를 산정하였다.

〈표 3-1〉 항만 피지컬 AI 도입 효과 연결 구조

구분	효과	핵심 내용
①	운영 효과	• 동일 물량을 더 적은 자원 투입으로 처리 가능(운영상 효율 향상)
②	항만 경쟁력 효과	• 비용·시간·신뢰성 개선에 따른 이용자 편익·서비스 경쟁력
③	산업 경쟁력 효과	• 국내 실증·국산화를 통한 국산 비율 증가와 세계시장 진출
④	국민경제 파급효과	• 투자·산업활동에 따른 생산·부가가치·고용 유발

자료: 저자 작성

그리고 도입 효과의 분석 과정에서 선행연구 또는 실증 결과와 실제 현장의 인식을 비교하고 객관성과 적절성을 판단하기 위해 설문조사를 수행하였다. 특히 운영 효과의 경우 선행연구 대부분이 특정한 세부 영역을 중심으로 수행되어 보다 큰 개념의 효과를 도출하는 것이 어렵다는 한계점이 있다. 설문조사는 이를 보완하기 위한 수단으로도 활용하였다.

2. 설문 조사

항만 피지컬 AI 기술의 도입 효과를 정량적으로 제시한 선행연구와 참고 자료는 많지 않다. 선행연구들은 완전 자동화터미널의 특정한 영역 또는 기술을 중심으로 수행되고 있고 AI와 자동화를 명확하게 분리하여 실증적으로 분석하는 사례도 거의 없는 실정이다. 특히 운영 효과의 경우 영역별로 기준이 달라 개별 효율(%)을 중심으로 비교가 필요하다. 따라서 이러한 한계점을 보완하기 위한 목적으로 설문조사를 시행하였다.

설문은 2026년 5월~6월 한 달간 진행하였으며 전체 80명의 응답자를 대상으로 하였다. 조사 대상은 피지컬 AI 기술을 적용하고 있거나 적용이 가능한 분야에 종사하는 전문가, 항만공사, 연구 기관 등으로 다양하게 구성하였다. 항만공사에서는 최근 운영관리의 전 분야에 AI의 도입을 확산하기 위한 노력을 강화하고 있으며, 터미널 운영사는 현장의 최전선에서 AI를 도입하거나 도입의 필요성을 강하게 인식하고 있기 때문에 응답자 수가 가장 많았다.

〈표 3-2〉 설문 응답자 개요

단위: 명

구분	응답자수	구분	응답자수
항만공사	17	포워더	5
터미널 운영	17	장비공급	3
건설업	12	연구기관	3
해운선사	9	정부기관	2
하역업	9	기타(협회, 창고 등)	3
합계		80	

자료: 저자 작성

설문 결과에서 응답이 없는 내용과 극단적인 수치는 제외하였다. 극단적인 수치는 0% 또는 100%로 응답한 수치로 판단하였다. 전체 범위는 극단치를 제외하고 실제 응답의 산포이며, 대표되는 구간은 개별 설문의 하한에서의 중앙값과 상한에서의 중앙값으로 하였다.

개별적인 효과 분야의 항목별로 대표되는 구간의 결과를 보면 50% 수준은 넘지 않고 주로 15~40%의 범위 내 효과가 가장 많은 것으로 나타났다.

〈표 3-3〉 설문 결과

구분	효과 항목	대표 구간	전체 범위
운영	안전사고 감소	30~50%	10~50%
	안벽생산성	15~30%	5~40%
	야드 생산성	20~35%	10~70%
	이송시간 절감	30%	10~30%
	선박 대기 감소	15~25%	15~25%
	게이트 대기 감소	30~50%	30~50%
	의사결정	25~40%	25~40%
	에너지 절감	10%	10%
유지보수	정비점검 효율	20~30%	15~50%
	장비가동율	15~30%	10~30%

구분	효과 항목	대표 구간	전체 범위
건설	설계 정확도	20~30%	3~40%
	시설 이상 조기 탐지	20~40%	20~50%
	건설 안전사고 감소	30~50%	10~50%
	비용 절감	10~20%	10~20%

주: 1) 대표 구간: 응답값의 하한 중앙값~상한 중앙값을 의미함
2) 전체 범위: 극단치를 제외한 최솟값~최댓값을 의미함
자료: 설문조사 결과를 바탕으로 저자 작성

제2절 도입 효과 산정

1. 운영 효과

1) 산정 항목 및 방식

본 연구의 운영 효과에 대한 산정은 시간 절감, 생산성의 제고, 유지보수의 향상 등 3개 항목을 대상으로 하였다. 운영 효과에는 인력, 에너지, 의사결정 등 더 다양한 항목들도 있으나 선행연구의 검토에서 완전 자동화 및 AI 도입에 따른 효과를 확인할 수 있고 설문에서도 포함된 항목을 대표로 하는 것이 객관성을 담보할 수 있다고 판단했기 때문이다.

우선 시간 절감에서는 선박의 대기 시간 및 재항 시간, 터미널 내 이송 및 게이트의 대기 시간 절감 등으로 구분할 수 있다. 생산성은 동일한 물동량을 더 짧은 시간에 처리하는 효과라 할 수 있다. 여기서 생산성의 제고와 선박의 재항 시간 절감은 중복이라는 문제가 제기될 수 있다. 그러나 선박의 재항 시간은 생산성과 정확히 일치되는 개념은 아니다. 전체 재항 시간에서 하역 작업 외의 시간 비중이 약 40%[85]에 이르기 때문에 선박의 대기

에는 다양한 요인들이 복합적으로 작용하고 있다. 유지보수는 장비의 고장에 대한 예측의 정확도를 높이고 장비의 가동률을 높이는 영역이 주를 이루고 있다.

〈표 3-4〉 운영 효과 산정 항목

구분	효과	핵심 내용
①	시간 절감 효과	• 선박의 입항 전 대기, 입항 후 재항 시간의 절감 효과
②	생산성 효과	• 동일한 물동량을 짧은 시간에 처리하는 효과
③	유지·보수 효과	• 장비 고장을 사전에 예측하고 가동률을 높이는 효과

자료: 저자 작성

운영 효과의 산정 방식은 기본적으로 효율 상승분(%)을 기준으로 하였다. 그리고 피지컬 AI의 도입을 최종 단계로 하고 단계별로 효율 상승을 고려하였다. 또한 재래식 또는 반자동화와 대비한 완전 자동화 방식의 도입 효과와 완전 자동화와 대비한 AI 적용의 효과가 이중으로 적용되지 않도록 승수 방식으로 산정하였다.

운영효과(%) = 1-(1-자동화 도입 효과)×(1-AI 적용 효과) [식 3-1]

아울러 시간 절감, 생산성 제고, 유지·보수의 향상은 자원 단위가 다르므로 개별적으로 제시하였다. 자원 단위가 다른 값을 하나의 값으로 통합하여 제시하기 위해서는 여러 가정이 필요하나 본 연구에서는 단순한 비율을 비교하는 수준이기 때문에 실제 응답값을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다.

85) World Bank(2024), p. 17.

2) 운영 효과 산정

(1) 시간 절감 효과

선행연구에서는 자동화 또는 AI 기술의 도입으로 선박의 재항 시간, 선박 및 이송 장비의 대기 시간이 절감될 것으로 분석되었다. 개별 항목의 효율이 증가한 범위는 연구별로 차이가 있으나 약 20~30% 수준에 수렴하는 것으로 나타났다. AI 기술의 적용에 따른 재항 시간 및 대기 시간의 단축 효과와 관련한 연구는 선행연구에서 검토된 바와 같이 예상보다 많지 않았다. 그 이유는 선행연구의 한계와 함께 재항 시간 및 대기 시간의 관계에서 비롯된 것으로 판단된다. 우선 항만 내 선박의 시간과 관련한 연구 대부분은 자동화 운영 방식의 도입에 따른 효과가 대부분이고 재항 시간이 대기 시간과 서비스 시간의 합으로 인식되기 때문에 구분하여 효과를 산정한 경우가 거의 없기 때문인 것으로 판단된다. 항만 전체의 효율성은 30% 수준의 제고라는 효과가 있는 것으로 제시되었다.

설문조사에서는 피지컬 AI의 도입으로 선박의 대기 15~25% 절감, 이송장비의 대기는 20~35% 수준으로 제시하였다. 선행연구와 설문조사의 효율 범위가 크게 다르지 않은 것으로 나타났다. 개별적인 작업의 영역이 아닌 전체 항만의 운영상 효율은 30%와 15~30%로 나타나 유사한 수준을 보였다.

〈표 3-5〉 시간 절감 효과

구분		선행연구	설문조사	최솟값	비고
재항 시간 단축	자동화 도입 효과	18.0%	-	18.0%	Jobran·Kara(2022)
선박 대기 절감	자동화 도입 효과	20.0%	-	20.0%	관계부처 합동(2026)
	AI 적용 효과	20.0%	15~25%	15.0%	Wang, P. et al.(2025)
선박 대기 절감 효과		-	-	32%	

구분		선행연구	설문조사	최솟값	비고
이송장비 대기	자동화	30%	-	20%	Jobran·Kara(2022)
	AI 적용 효과	18.8~49.2%	20~35%	18.8%	Jin et al.(2023)
		21.8%			Chen et al.(2025)
전체 효율	AI 적용 효과	30%	15~30%	15%	Wang et al.(2026)

자료: 선행연구 및 설문조사 결과를 참고하여 저자 작성

(2) 생산성 효과

생산성의 향상 효과도 운영의 효율과 같이 제한적으로 제시하였다. 완전 자동화 방식의 도입으로 안벽 및 야드 크레인의 생산성 향상과 관련한 연구는 다양한 사례를 대상으로 수행되었다. 그러나 결과가 매우 상이하고 AI의 도입으로 인해 추가로 향상되는 효과를 제시한 연구는 거의 찾아보기 어려운 상황이다. 따라서 선행연구에서 AI의 도입에 따른 효과를 분석한 연구를 중심으로 제시하였다.

안벽크레인의 생산성, 선석 이용률, 하역 장비의 작업 등에서 AI를 도입했을 때 14.2~30% 수준의 생산성 향상이 있을 것으로 제시되었다. 설문조사에서도 거의 동일한 15~30%의 생산성 제고가 있을 것으로 나타났다. 특히 안벽크레인의 경우 자동화 방식에 피지컬 AI 기술을 적용하면 40.5%의 생산성 향상의 효과가 기대되는 것으로 산정되었다.

〈표 3-6〉 생산성 향상 효과

구분		선행연구	설문조사	최솟값	비고
안벽 크레인	자동화 도입 효과	30%	-	30%	Xu et al.(2024)
	AI 적용 효과	30%	15~30%	15%	Cisco(2019) [Lyu & Yang 2026]
안벽크레인 생산성		-	-	40.5%	
선석 이용률	AI 적용 효과	15%	-	15%	Wang, P. et al.(2025)
장비작업효율	AI 적용 효과	14.2%	-	14.2%	Xu et al.(2024)

자료: 선행연구 및 설문조사 결과를 참고하여 저자 작성

(3) 유지보수 효과

유지보수 효과는 선행연구와 설문조사 수준이 많이 상이하였다. 그 이유는 선행연구는 특정한 세부 기술 중심인 반면 설문조사는 비교적 포괄적인 범위로 제시되었기 때문이다. 이 중 크레인 고장에 대한 예측률은 AI 기술의 도입으로 그 정확도가 크게 개선되는 것으로 나타났다. 설문조사에서는 장비의 가동률과 장비의 정비 효율이 최대 30%의 유사한 수준으로 조사되었다.

〈표 3-7〉 유지보수 향상 효과

구분		선행연구	설문조사	최솟값	비고
크레인 고장 예측 정확도	AI 도입 효과	83%	-	83%	Klar et al.(2026)
		99.6%	-	99.6%	Awasthi et al.(2024)
시스템 붕괴 감소	AI 도입 효과	60%+	-	60%+	Wang et al.(2026)
장비가동률	AI 도입 효과	-	15~30%	15%	설문조사
점검정비효율	AI 도입 효과	-	20~30%	20%	설문조사

자료: 선행연구 및 설문조사 결과를 참고하여 저자 작성

2. 항만 경쟁력 효과

1) 산정 항목

일반적인 항만의 경쟁력은 다양한 형태로 제시되고 있다. 효율성(DEA), 생산성, 선택 확률 등 연구자가 선택한 방법론에 따라 다양하다. 그러나 본 연구에서는 앞서 제시된 주요 운영 효과가 실제로 항만을 이용하는 핵심 고객인 선사와 화주에게 어느 정도의 이익 또는 편익으로 돌아가는지를 항만의 경쟁력 효과로 산정하였다. 항만은 결국 이용 고객인 선사와 화주에게 유무형의 이익을 제공할 수 있도록 효율성 또는 생산성을 높여야 고객

에게 선택될 확률이 높아지고, 이것이 곧 항만의 경쟁력으로 나타나기 때문이다. 또한 항만의 경쟁력을 정량화하기에도 적합한 방법이라고 판단하였다.

우선 선사의 관점에서는 선박의 대기 비용 또는 재항 비용의 절감이 필요하다. 다만 본 효과 분석에서는 재항 비용의 절감 효과를 산정하였다. 선박 대기는 다양한 방식으로 나타날 수 있으나 실제 통계에는 집계되지 않는다는 한계가 있다. 예를 들면 부산항에 기항하는 선사 중 일부는 전 출발지에서 운항 속도를 줄이거나 부산항 인근에 도착해서 순회하면서 대기하는 경우가 있으나 실제 대기와 관련한 통계에는 집계되거나 반영되지 않고 있다. 반면 부산항과 같은 주요 항만의 재항 시간은 통계의 활용이 가능하다는 장점이 있다. 선박이 항만에 머무는 동안에도 용선료·연료비·기회비용이 계속 발생하므로 재항 시간의 단축은 곧 선사의 직접적인 비용 절감의 방법이다.

화주의 관점에서는 선박의 대기 또는 재항 시간의 단축, 생산성 향상 등의 결과로 터미널에서 화물의 장치기간을 줄일 수 있고 보다 신속한 화물의 수출 과정을 통해 화물의 시간가치를 높일 수 있다. 이상의 항만 경쟁력에 대한 효과 항목을 정리하면 다음과 같다.

〈표 3-8〉 항만 경쟁력 효과 산정 항목

구분	효과	핵심 내용
①	선사의 재항 비용 감소 효과	• 재항 시간 단축으로 인한 선사의 직접 이익 효과
②	화주 물류비용 절감 효과	• 선박 대기 감소로 화물 지체료 감소 효과
③	화물의 시간가치 효과	• 신속한 화물 처리로 화물의 시간가치 증가 효과

자료: 저자 작성

2) 항만 경쟁력 효과 산정

(1) 선사의 재항 비용 감소

항만 피지컬 AI의 도입에 따른 선사의 재항 비용 절감 효과는 부산항을 대상으로 산정하였다. 부산항은 국내 항만 중 가장 선도적으로 AI를 도입하고 있고 선사도 가장 큰 효과를 얻을 수 있는 항만이기 때문이다. 또한 재항 시간에 대한 통계도 잘 구축되어 있다.

선사의 재항 비용 감소는 다음과 같이 산정하였다.

V(선사의 재항 비용 감소) = $\Delta T \times N \times p$ [식 3-2]

여기서, ΔT(선박당 재항 시간 단축) = T×r

T = 2025년 부산항 컨테이너선 평균 재항 시간(시간)

r = 재항 시간 단축률(%)

N = 2025년 부산항 컨테이너선 입항 척수(척)

p = 선박의 시간가치(일일 용선료 × 환율 ÷ 24시간)

항만의 경쟁력에 대한 효과는 앞서 운영 효과에서 살펴본 효율을 기준으로 산정한다. 운영 효과에서는 자동화 운영의 도입으로 재항 시간이 18% 절감되는 것으로 제시되었다. 그러나 이는 단일한 연구의 자동화 도입에 대한 결과이며 설문에 대한 조사결과도 없어 일반화하여 적용하기에는 적합하지 않다고 판단하였다. 따라서 유사한 개념인 선박 대기 절감 효과의 선행연구와 설문조사의 결과를 고려하여 20%의 보수적인 수준[86]을 적용하였다.

86) 〈표 3-5〉에서 자동화 및 AI의 도입 효과는 32%로 제시되었으나 조사 결과가 많지 않아 보수적으로 적용함

〈표 3-9〉 선사의 재항 비용 절감 효과 산정 기준(부산항 기준)

구분	적용값	출처
평균 재항 시간	31.9시간	• 한국해양수산개발원(2026), p. 17
재항 시간 단축률	20%	• 선박 대기 및 설문 조사 결과 활용하여 가정
컨테이너선 입항 척수	24,616척	• 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026.8.20.)
선박 일일 용선료(8,500TEU)	79,000$	• Harper Petersen & Co.(검색일: 2026.10.15.)
환율	1,422.16원	• 한국은행 2025년 연평균 환율

주: 8,500TEU를 기준으로 한 것은 2025년 부산항 입항 컨테이너선의 평균 선형이 8,211TEU[87]이기 때문에 근사치를 적용함
자료: 한국해양수산개발원(2026), p. 17; 국가데이터처 보도자료(2026.6.17.)(검색일: 2026.9.30.), p. 3; Harper Petersen & Co.(검색일: 2026.10.15.); 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026.8.20.)을 참고하여 저자 작성

이상의 기준에 따른 부산항 기항 선박들의 연간 재항 비용의 절감 금액은 약 7,352억 원으로 산정된다.

V(재항 비용 감소) = 6.38(시간)×24,616(척)×4,681,277(원)=7,352억 원

여기서, $\Delta T=31.9\times0.20=6.38h$/척

$$p=\frac{\$79,000\times1,422.16원/\$}{24h}=4,681,277원/h$$

(2) 화주의 물류비용 절감

피지컬 AI의 도입으로 항만의 생산성 및 운영의 효율이 향상하여 화주의 이익으로 전환되는 것은 화주의 화물이 터미널 또는 선박에 머물지 않고 신속하게 처리되는 것을 의미한다. 이를 통해 화주가 물류비용을 절감한다면 항만은 큰 경쟁력을 확보하는 것이다. 화주의 물류비는 크게 운송비(육상 및 해상), 항만의 하역료, 터미널 내에 대기하면서 발생하는 비용 등으

87) 국가데이터처 보도자료(2026.6.17.)(검색일: 2026.9.30.), p. 3.

로 구분할 수 있다. 여기에서 운송비, 터미널 하역료 등은 생산성과 무관하게 지불해야 한다. 다만 항만에서의 대기로 인해 발생하는 지체료(D&D)[88]는 터미널의 효율과 생산성의 향상으로 충분히 절감이 가능한 비용으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 화주의 물류비용 중 지체료 절감을 대상으로 하였고 선박의 대기비용 절감과 동일하게 부산항을 기준으로 산정하였다. 이를 위한 산정 방식은 다음과 같다.

$$V = Q \times D \times R \times r \qquad [식\ 3\text{-}3]$$

여기서, Q = 무료장치기간 초과 발생 화물량(수출입 컨테이너 물동량 × 무료장치기간 초과 발생률)

D = 평균 초과 일수

R = 일일 지체료 요율

r = 피지컬 AI 도입에 따른 개선율

항만에서 지체료를 부과하는 것은 수출입 화물만 그 대상으로 하기 때문에 기준의 물동량은 2025년 부산항의 수출입 화물을 기준으로 하였다. 무료장치기간을 초과한 물동량의 발생률은 10%를 적용하였다. 부산항의 평균 무료장치기간은 약 11일로 전 세계의 주요 항만 중 가장 길다.[89] 또한 부산항 컨테이너의 평균적인 체류 기간은 약 5.5일로 매우 짧다.[90] 즉 대부분의 화물이 무료장치기간 내에 반출되고 있는 상황으로 판단된다. 반면 로테르담항은 부산항과 대비하여 무료장치기간이 4일로 짧아 단순히 비교하는 것은 어렵지만 평균 20%(수입 30%, 수출 10%)의 화물이 무료장치기간을 초과하는 것으로 조사되었다.[91] 따라서 부산항은 이러한 상황을 고려

88) Demurrage & Detention
89) Container xChange(2024)(검색일: 2026.8.16.)
90) Beacon(2024)(검색일: 2026.8.20.)
91) Veenstra et al.(2023), p. 50.

하여 보수적인 관점에서 10%를 적용하였다. 평균적인 초과 일수는 국내의 요율 구조를 고려하여 5일로 가정하였다. 국내 항만의 경과 보관료는 5일을 초과했을 때 정액으로 가산되는 구조이기 때문에 대부분 5일 이내에 반출이 이루어지도록 유도하고 있어 가장 적정한 수준으로 판단하였다. 일일 지체료는 부산항에 기항한 선사별 요율을 조사한 결과 20피트 기준으로 평균 수준인 15,000원을 적용하였다.[92] 2023년 기준 부산항의 14일 누적 지체료는 세계 주요 항만 중 가장 낮은 수준인 40$[93]로, 이를 하루 단위로 환산하면 약 10$(약 14,220원)[94]이므로 본 연구에서 적용한 일일 지체료 15,000원과 비슷한 수준이다. 마지막으로 피지컬 AI의 도입에 따른 개선율은 운영 효과에서 제시된 선박의 대기 시간의 절감에 따른 효율 20%를 적용하였다. 선박의 대기가 길어지면 터미널에서의 화물 반입과 반출이 지연되기 때문에 대기 시간의 절감은 지체료 절감으로 이어지기 때문이다. 코로나 팬데믹 시 항만의 적체로 인해 선사의 지체료가 폭증하고 이에 전 세계의 운임과 물가가 상승한 사례가 가장 대표적이다.

〈표 3-10〉 화주의 지체료 절감 효과 산정 기준(부산항 기준)

구분	적용값	출처
부산항 수출입 컨테이너(2025)	10,785천 TEU	• 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026. 8.20.)
무료장치기간 초과 발생률	10%	• 보수적 가정치 적용
평균 초과 일수(D)	5일	• Container xChange(2024)(검색일: 2026.8.16.), Beacon(2024)(검색일: 2026.8.20.)을 참고하여 설정
일일 지체료 요율(R)	15,000원	• Hapag-Lloyd(검색일: 2026.8.20.)
개선율(r)	20%	• 운용 효과 지표(선박 대기 20% 절감)

자료: Container xChange(2024)(검색일: 2026.8.16.); Hapag-Lloyd(검색일: 2026.8.20.); 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026.8.20.)을 참고하여 저자 작성

92) Hapag-Lloyd(검색일: 2026.8.20.)
93) Container xChange(2024)(검색일: 2026.8.16.)
94) Hapag-Lloyd(검색일: 2026.8.20.)의 2025년 기준 20피트 일반컨테이너의 무료보관일수는 10일, 14일 보관 시 4일 초과, 40$/4일을 적용하여 산정함

이를 기준으로 산정하면 화주의 지체료 절감에 대한 효과는 연간 약 162억 원(=10,785천 TEU×10%×5일×15,000원×20%)으로 산정되었다. 화주의 지체료 절감 비용은 상대적으로 적게 산정되었다. 그 이유는 부산항은 대기가 많지 않고 지체료 수준도 낮다는 장점이 작용했기 때문이다.

(3) 화물의 시간가치 편익

선박의 대기 시간 감소는 화물의 시간가치 편익으로도 전환이 가능하다. 화물이 신속하게 운송되면 화주는 자본의 기회비용과 재고 유지비용의 감소 효과가 있다. 이에 따라 항만에서 피지컬 AI의 도입으로 선박의 대기 시간 또는 재항 시간이 감소하여 보다 신속하게 운송할 수 있다면 화주에게는 그만큼의 시간가치 편익이 발생할 수 있다. 다만 전체 물동량 중 우리나라의 화주와 관련이 있는 수출입 물동량만을 기준으로 하였다.

부산항에 피지컬 AI 기술이 도입되어 입항 선박의 대기 시간이 절감됨에 따라 발생하는 화물의 시간가치 편익은 다음과 같이 산정된다.

$$V=N_{입항척수}\times TEU_{척당}\times \triangle T\times VOT_{TEU} \quad [식\ 3\text{-}4]$$

여기서, N = 부산항 컨테이너선 입항 척수(척)

$TEU_{척당}$ = 부산항 척당 하역량(TEU)

$\triangle T$ = 피지컬 AI 도입에 따른 선박 대기 시간 절감(시간)

VOT_{TEU} = 화물의 시간가치(원)

부산항에서 처리하는 화물의 시간가치 편익을 산정하기 위한 기준은 컨테이너선의 입항 척수와 척당 하역량을 기본으로 하였다. 부산항을 기항하는 컨테이너선의 척당 물동량은 한국해양수산개발원의 항만 서비스 지표(2,098VAN)[95]에서 부산항의 TEU/VAN 비율(1.5645)과 수출입 화물 비

중(43%)[96]을 적용하여 산정하였다. 선박 재항 시간의 절감은 부산항의 평균 재항 시간 31.9시간에 운영 효과 산정의 20% 효율을 적용하여 6.38시간이 절감되는 것으로 적용하였다. 화물의 시간가치는 일본 국토교통성의 연구[97]를 준용하였다. 다만 항로별로 시간가치가 달리 적용되어 부산항의 주요 항로별 비중을 적용한 가중평균(VOT=Σ(항로비중×항로별 시간가치))을 적용하였다. 산정 결과 1,643엔으로 산정되었으며 2025년을 기준으로 환율을 적용하면 16,378원/시간·TEU로 산정되었다.

〈표 3-11〉 항로별 시간가치 사례

구분	비중	시간가치	기여값
아시아항로	0.60	1,412엔	847.2
기간항로	0.32	2,055엔	657.5
기타항로	0.08	1,734엔	138.7
가중평균	1.00		1,643엔

자료: 犠牲量モデルを用いたコンテナ貨物の時間価値に関する一考察(2010)의 컨테이너 화물 시간가치 자료를 활용하여 저자가 재산정함

〈표 3-12〉 화주 화물의 시간가치 편익(부산항 기준)

구분	적용값	출처
컨테이너선 입항 척수(2025)	24,616척	• 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026. 8.20.)
부산항 척당 하역량(2025)	3,282TEU	• 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026. 8.20.) 및 한국해양수산개발원(2026), p. 11 자료 활용(TEU/VAN 비율 적용)
수출입 화물 비중(2025)	43%	• 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026. 8.20.)
선박 대기 시간 절감	6.38시간	• 한국해양수산개발원(2026), p. 17
화물 시간가치	16,378원	• NILIM(2010) 자료를 활용하여 재산정

자료: 한국해양수산개발원(2026), p. 11, 17; 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026.8.20.); NILIM(2010)을 참고하여 저자 작성

95) 한국해양수산개발원(2026), p. 11.
96) 부산항만공사 체인포털(검색일: 2026.8.20.)
97) NILIM(2010).

이상과 같은 기준으로 적용하면 화주의 시간가치 편익은 약 3.63조 원(=24,616척×3,282TEU×0.43×6.38시간×16,378원)으로 산정되었다. 2025년 부산항을 이용한 화물의 수출입 금액 약 470조 원[98]을 기준으로 화물의 시간가치는 0.77%로 계산되었다.

(4) 환적화물 가치 유지 효과

본 절에서 제시하는 항만의 경쟁력에 대한 효과 대부분은 부산항을 사례로 산정하였다. 따라서 부산항의 관점에서 항만 경쟁력의 효과를 추가한다면 환적화물의 가치를 유지하는 효과도 가능할 것으로 판단된다. 항만이 새로운 화물을 유치하는 것도 중요하지만 기존 화물이 이탈하지 않도록 하는 것도 매우 중요하고 큰 경쟁력의 효과이기 때문이다. 실제 환적 물동량은 이탈할 가능성이 높은 화물이면서도 터미널의 수입을 창출할 뿐만 아니라 항만연관산업 전반에 부가가치와 고용을 창출하는 화물이다. 따라서 환적화물이 이탈한다면 그만큼의 가치 상실이 발생하기 때문에 유지하는 것 자체가 큰 효과라 할 수 있다. 이런 관점에서 보면 피지컬 AI 기술의 도입으로 생산성 제고뿐만 아니라 항만 전반의 운영상 효율을 높여 경쟁력을 강화한다면 기존의 환적 물동량의 이탈을 막을 수 있다.

이러한 개념을 기반으로 환적화물의 가치 유지 효과를 산정하기 위해서는 환적화물 1TEU당 부가가치 수준을 정하는 것이 중요하다. 그러나 환적화물의 부가가치 수준에 대해 공식화된 것은 없고 일부 선행연구도 시기별·연구별로 다르게 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 가장 최근에 해양수산부(2024)[99]에서 인용한 환적화물의 부가가치 15만 원을 적용하는 것이 가장 적정하다고 판단하였다. 이 부가가치를 기준으로 2025년 부산항의 환적화물 1,410만 TEU에 적용하면 약 2조1,145억 원의 부가가치 유

98) 관세청(검색일: 2026.8.15.)
99) 해양수산부 보도자료(2024.12.11.)(검색일: 2026.9.30.), p. 1.

지 효과로 산정된다. 물론 이는 환적화물 전체를 기준으로 한 부가가치지만 그만큼 피지컬 AI의 도입을 통한 항만의 경쟁력 유지는 중요하다는 점을 강조하기에 충분하다고 판단된다. 그러나 환적 물동량의 이탈 가능성에 대한 비율은 단순한 시나리오 외에 적용하기 어려워 도입 효과 분석의 결과에는 포함하지 않았다.

3. 항만기술산업 경쟁력 효과

1) 산정 항목

피지컬 AI 기술의 도입에 따른 항만기술산업의 경쟁력은 외산 장비를 국산 장비로 대체하는 효과(수입대체 효과)와 기술력 제고로 해외시장을 확보하는 효과(해외시장 점유율 향상 효과)로 구분할 수 있다. 국내 첨단 하역장비의 시장 규모가 작았고 피지컬 AI 기술이 본격적으로 도입되지 않았던 시기에는 외산 장비의 수입이 주를 이루었다. 그러나 최근 기술개발(R&D), 법률(「항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률」) 제정, 산업육성계획 수립[100] 및 산업 지원과 완전 자동화 장비의 본격적인 도입으로 항만기술산업의 기술력이 확보된다면 수입을 대체할 수 있다. 특히 장비가 첨단화되면서 사이버 보안이슈가 중요하기 때문에 국산 장비의 도입에 대한 필요성은 더욱 커질 것이다. 그리고 이러한 산업 기반을 통해 기술력을 축적하고 충분한 검증을 거친다면 해외시장으로의 진출도 충분히 가능하다. 특히 중국산 하역 장비의 구입에 우려가 큰 미국 시장은 우리 항만기술산업이 해외로 진출할 좋은 기회를 제공하고 있다. 최근 아랍에미레이트(UAE)의 아부다비와 항만 피지컬 AI의 국제협력이 추진되고 있는 것도 해외 진출의 중요한 전환점을 제공할 수 있다.

100) 항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률 제5조

〈표 3-13〉 항만기술산업 경쟁력 효과 산정 항목

구분	효과	핵심 내용
①	수입대체 효과	• 외산장비를 국산장비로 대체하는 효과
②	해외시장 확보 효과	• 높은 기술력 확보로 해외시장 점유율 확보 효과

자료: 저자 작성

2) 산업 경쟁력 효과 산정

(1) 수입대체 효과

수입대체 효과는 피지컬 AI 기술에 기반한 부품, 시스템 및 완성 장비의 제작 전체를 포함한 개념으로 산정하였다. 다만 피지컬 AI 기술을 포함한 국내 항만기술산업 전체의 명확한 국산화율에 대한 자료의 확보는 어려운 상황이다. 따라서 항만기술산업의 국산화율은 국내 항만의 안벽크레인 국산화율(2023년 기준 43.1%)[101]을 대체하여 적용하였다. 안벽크레인이 항만기술산업 전체를 대표할 수는 없지만 부품, 시스템, 완성품의 제작 및 피지컬 AI 기술 등이 가장 집적된 장비기 때문에 일정 부문에서는 대표적일 수 있을 것이라고 판단했다.

국산화율의 목표는 정부의 정책목표를 기준으로 하였다. 해양수산부는 「스마트항만 기술산업 육성 및 시장 확대 전략」[102]에서 부품의 국산화율 65%를 목표로 설정했다. 그러나 본 연구에서는 단순한 장비의 부품 산업이 아닌 피지컬 AI를 포함한 국내 항만기술산업 전체의 경쟁력 효과를 산정하는 것이다. 따라서 국내 자동화분야의 시장점유율 목표인 90%를 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다. 장래 국내의 시장 규모는 제작하는 중에 있거나 향후에 계획 중인 완전 자동화터미널의 하역 장비 발주규모를 기준으로 하였다. 이 장비들은 피지컬 AI 기술이 적용될 것으로 예상되고

101) 해양수산부 내부자료(2025)
102) 해양수산부(2023)

있고 민간 터미널에서 실제로 도입할 각종 운영 시스템의 규모는 현 단계에서는 파악하기 어렵기 때문이다. 또한 실제로 하역 장비 외의 다른 운영 부문에서 도입될 기술 시장은 제외되어 최소한의 시장 규모를 대상으로 하는 점도 고려할 요인이 될 수 있다.

이상의 기준에 따른 수입대체 효과는 2031년 최소 1조 4,705억 원이 발생할 것으로 산정되었다. 여기서 최소라고 제시한 것은 앞선 설명에서와 같이 컨테이너터미널의 하역 장비 발주 규모만 고려했기 때문이다. 실제 피지컬 AI 기술은 컨테이너터미널의 하역 장비뿐만 아니라 터미널 현장의 다양한 분야에서도 적용되고, 비컨테이너부두 전반에도 도입될 가능성이 높기 때문에 최소 효과라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 1조 이상의 수입대체 효과의 발생이 가능하다는 것은 피지컬 AI 기술의 도입이 항만산업 전반을 넘어 국가 경제에 기여하는 부분이 크다는 것을 시사한다.

〈표 3-14〉 국내 자동화 항만 하역 장비 도입 규모

단위: 억 원

구분	안벽크레인	야드크레인	이송장비	합계
부산항 신항 2-6단계	2,392	1,972	680	5,044
진해신항 1-1단계	3,600	3,240	미정	6,840
진해신항 1-2단계	7,920	7,128	미정	15,048
광양항 테스트베드	2,059	1,535	828	4,422
합계				31,354

자료: 해양수산부 내부자료(2025)

〈표 3-15〉 피지컬 AI 기반 항만기술장비 수입대체 효과

구분	적용값	출처
현재 국산화율(2025)	43.1%	• 조승환 의원실(2025)
목표 국산화율(2031)	90%	• 해양수산부(2023)
국내시장 규모(2026)	3.14조 원	• 해양수산부 내부자료(2025)
수입대체 효과	1조 4,705억 원	• 국내시장 규모×국산화율 개선분(46.9%)

자료: 저자 작성

(2) 해외시장 확보 효과

세계 항만 AI·터미널 시장은 빠르게 성장하고 있다. 항만 AI 시장은 2025년 약 6.7조 원에서 2033년 약 27.4조 원으로 연평균 약 19.1% 성장하고,[103] 소프트웨어 부문의 성장률이 하드웨어 부문보다 높을 것으로 전망하고 있다. 이는 국내 기업의 기술력 제고로 하드웨어 시장뿐만 아니라 소프트웨어 부문의 세계시장에도 진출할 여지가 크다는 점을 시사한다. 특히 하드웨어 시장은 중국의 ZPMC[104]처럼 절대적으로 높은 시장점유율을 확보한 기업이 있지만 소프트웨어 부문은 아직 독보적인 기업이 없는 상황이라 해외시장 진출에 더욱 유리한 점도 있다.

해외시장의 규모는 관계부처 합동(2026)[105]의 전망 자료를 기준으로 하였다. 다만 앞선 국산화율 90%의 목표에 기반한 수입대체 효과는 전체 시장 규모에서 제외하였다. 해외시장의 점유율에 대한 목표는 10%를 적용하였다. 이 목표는 해양수산부의 「항만기술산업 육성전략」과 「피지컬 AI 항만 전략」에 동일하게 설정된 목표이다. 즉 해양수산부의 강력한 정책적 의지를 보여주는 목표로 적용하기에 가장 적정한 것으로 판단된다. 이상의 기준에 따른 해외시장의 확보 효과는 약 2.5조 원에 이를 것으로 산정되었다.

103) 관계부처 합동(2026), p. 5; DataIntelo(2025), pp. 25-27.
104) 상하이 진화 중공업, 중국 국영 장비 제작 기업
105) 관계부처 합동(2026)

〈표 3-16〉 피지컬 AI 기반 해외시장 확보 효과

구분	적용값	출처
해외시장 규모(전체)	27.4조 원	• 관계부처 합동(2026), 2033년 기준 규모
국내 시장 점유 규모	2.8조 원	• 국내시장 3.14조 원×0.9(국산화율 목표)
적용 해외시장 규모	24.6조 원	• 27.4조 원-2.83조 원
해외시장 점유율 목표	10%	• 해양수산부(2023)·관계부처 합동(2026, '35년 목표)
해외시장 확보 효과	약 2.5조 원	

자료: 저자 작성

4. 국민경제 파급효과

항만 피지컬 AI의 도입에 따른 국민경제로의 파급효과는 AI 기술이 실제로 가장 많이 적용될 수 있는 분야만을 대상으로 하였다. 항만산업 전체로 본다면 설문조사에서도 확인된 바와 같이 토목 및 건설 분야에도 적용할 수 있지만 본 연구에서는 항만의 운영, 유지보수 등 가장 핵심적으로 적용할 수 있는 분야로 한정하였다. 그 이유는 토목·건설 부문까지 포함하면 항만기술 분야에 초점을 맞춘 파급효과의 파악이 어렵기 때문이다.

우선 파급효과를 산정하기 위한 유발계수는 한국은행(2025)의 「2023년 산업연관표(연장표)」를 기준으로 하였다. 파급효과는 생산유발, 부가가치 유발, 취업유발, 고용유발 등 4개 분야를 산정하였다. 또한 적용할 유발계수는 '기계 및 장비' 분야로 한정하였다. 피지컬 AI 기술은 항만의 장비 외 다양한 시스템 분야에도 널리 도입되고 있으나 장비와 시스템 분야에 대한 시장의 명확한 구분이 어렵고 피지컬 AI 기술의 특성상 실제로 기계 및 장비에 탑재되어 운영되는 형태이기 때문에 가장 적정하다고 판단하였다.

〈표 3-17〉 기계 및 장비 부문 유발계수

구분	2020년	2021년	2022년	2023년
생산유발계수	2.1096	2.1652	2.1671	2.1890
부가가치유발계수	0.7220	0.6813	0.6439	0.6697
취업유발계수(명/10억 원)	7.187	6.476	6.092	6.2547
고용유발계수(명/10억 원)	5.930	5.343	5.056	5.1781

자료: 한국은행(2025)의 2023년 산업연관표(연장표)를 참고하여 저자 작성

최종 수요는 앞선 산업경쟁력 효과에서 국산화율 90%의 목표를 적용한 국내 시장규모인 2.79조 원을 적용하였다. 이상의 기준으로 산정한 결과 생산유발효과는 약 6.1조 원, 부가가치유발효과는 약 1.9조 원 수준으로 산정되었다. 고용은 약 1만 4,447명이 창출되는 것으로 산정되었다.

〈표 3-18〉 국내 시장 규모 기준 파급효과 산정

구분	유발계수	산정	유발규모
생산유발효과	2.1890	2.79조 원×2.1890	약 6.1조 원
부가가치유발효과	0.6697	2.79조 원×0.6697	약 1.9조 원
취업유발효과	6.2547명/10억 원	27,900억 원×6.2547÷10	약 1만 7,451명
고용유발효과	5.1781명/10억 원	27,900억 원×5.1781÷10	약 1만 4,447명

자료: 한국은행(2025)의 2023년 산업연관표(연장표)를 참고하여 저자 작성

5. 기타 효과

앞서 분석된 항만 피지컬 AI의 도입에 따른 정량화 효과 외에도 친환경 항만의 구축, 에너지 소비 감소 및 회복 탄력성의 강화 등 다양한 정성적 효과들도 있다.

우선 선박의 대기 시간 절감 등에 따른 연료 절감은 탄소 배출량 절감 효과로 나타난다. 항만-선박 간 AI에 기반한 정시 협조가 선박의 탄소 배출을 기항 당 6.45~7.39% 절감[106]한다는 연구도 있다. 또한 주요 항만별

로 자동화 및 AI 기술을 도입하는 이유는 다르지만 LA/LB 및 뉴욕/뉴저지 항을 대표로 하는 많은 항만들은 탄소 배출 저감을 통해 친환경 항만을 구축하는 것을 도입의 목적으로 하고 있다.

둘째, 항만 내 처리 시간의 단축은 에너지 소비를 크게 줄일 수 있다. 항만에서의 에너지 소비와 비용 부담은 급격히 증가하고 있다. 부산항도 물동량의 증가율보다 에너지 소비량의 증가가 더 큰 것으로 나타났다.[107] 이에 따라 에너지 소비의 최적화가 항만 운영에 있어 중요한 이슈가 되고 있다. 앞서 탄소 배출 저감 효과를 언급하였지만 에너지 소비 자체를 줄이는 것도 탄소 배출을 줄이기 위한 주요한 수단이 되고 있다. 해외 항만들도 EMS(에너지 관리 시스템), 마이크로 그리드 등 AI를 기반으로 한 에너지 관리의 최적화 기술을 도입하여 에너지 소비 관리에 노력을 기울이고 있다.

셋째 공급망 회복력을 들 수 있다. 코로나 팬데믹과 같은 대규모 충격과 사이버 공격에 보다 탄력적으로 대응하고 방어하는 수단이 될 수 있다. 팬데믹의 경우 운영의 안정성을 확보할 수 있고, 사이버 공격은 AI 기술을 통해 위험에 대한 관리와 회복으로의 역량을 강화할 수 있다. AI 기술의 도입에 따른 효과는 아니지만 김보경·김근섭·강무홍(2022)은 코로나 팬데믹 기간에 완전 자동화터미널이 비완전 자동화터미널과 대비했을 때 안정적인 접안시간을 유지하고 처리한 물동량의 증가는 물론 더 많은 선박이 기항한 것으로 분석하였다.[108] 즉 항만이 다양한 대내외의 충격에서 안정적으로 운영될 수 있게 하고, 이는 결국 공급망의 회복력을 강화하는 방안이기도 하다.

106) Nguyen et al.(2026), pp. 17-18.
107) 김근섭 외(2021), p. 56.
108) 김보경·김근섭·강무홍(2022), pp. 7-9.

6. 도입 효과 종합

이상에서 분석된 도입 효과를 종합하면 다음과 같다.

〈표 3-19〉 항만 피지컬 AI 도입 효과 종합

구분	효과 항목	도입 효과
운영 효과	시간절감 효과	선사의 재항 시간 단축, 선박 및 이송장비 대기 절감
	생산성 효과	안벽크레인 생산성, 선석 이용률, 장비 작업 효율 상승
	유지보수 효과	크레인 고장 예측 정확도, 장기 가동률, 정비 효율 상승
항만 경쟁력 효과	선사 재항 비용 감소	연간 약 7,352억 원(부산항 기준)
	화물 물류비용 절감	연간 약 162억 원(부산항 기준)
	화물 시간가치	연간 약 3.63조 원
항만기술산업 경쟁력 효과	수입대체 효과	약 1.5조 원(2031년 기준)
	해외시장 진출 효과	약 2.5조 원(2033년 기준)
국민경제 파급효과	생산유발효과	약 6.1조 원(2031년 기준)
	부가가치유발효과	약 1.9조 원(2031년 기준)
	고용유발효과	약 1만 4,447명(2031년 기준)

자료: 저자 작성

04
결론 및 정책 제언

제1절 결론

1. 항만 경쟁력 기반 전환

전통적으로 항만의 경쟁력을 확보하기 위한 요인은 주로 대규모의 인프라 확보, 입지 여건, 화물 창출 기반의 강화, 항로 연결성의 확대 등이 중심이었다. 그러나 최근의 항만 환경은 다양한 불확실성에 직면하고 있다. 미·중 무역 및 패권을 차지하기 위한 전쟁의 지속, 지정학적인 긴장의 확산, 주요 항로의 리스크 확대 및 공급망 교란 등 다양한 원인으로 불확실성이 가속되고 있다. 또한 항만의 안전에 대한 중요도도 전 세계적으로 증가하고 있다.

따라서 글로벌 주요 항만들은 이러한 불확실성에 탄력적으로 대응하기 위해 피지컬 AI 기술을 대표로 하는 디지털화 및 지능화로 항만의 경쟁력을 확보하기 위한 전략을 전환하고 있다. 이를 통해 생산성과 효율성을 강화하면서도 항만 운영의 안정성과 안전도 확보하고 있다. 또한 최적화된 첨단 기술을 도입하기 위해 다양한 연구개발(R&D) 사업을 추진하고 스타트업의 육성 및 인재 양성도 동시에 진행하고 있다.

즉 항만의 경쟁력에 대한 기반이 인프라 중심에서 기술 중심으로 넘어가고 있는 것이다. 국가별·항만별로 첨단 기술의 도입 방식과 분야는 다르지만 초기 단계에서는 정부 또는 공공이 주도하는 방식이 주를 이루고 있다. 이는 항만이 국가 공급망의 결절점이자 국가 경제의 안정과 직결되기 때문이다.

2. 항만기술산업 활성화 중요

이러한 첨단 AI 기술은 자국 기반의 기술 또는 자국 생태계에 최적화된 환경으로 도입하고 있다. 정부가 직접 기술을 개발하거나 기술력이 있는 스타트업과 인재를 육성하는 방식을 주로 활용하고 있다.

그 이유는 크게 2가지로 대표될 수 있다. 첫째는 항만기술산업 자체의 성장 가능성이다. 특히 하드웨어 부문보다 소프트웨어 부문의 성장세가 더 높을 것으로 예상되고 있다. 하드웨어 부문은 대표적인 항만 장비 제작업체들이 이미 높은 점유율을 확보하고 있으나 소프트웨어 부문은 독보적인 기업이 없는 상황이다. 기존의 터미널 운영 시스템(TOS), 장비관제시스템(ECS) 등은 일부 대표적인 기업이 있지만 최근 급성장하는 AI 기술을 접목하는 분야는 여전히 선점할 기회가 남아 있다.

둘째는 디지털화와 지능화가 진전될수록 사이버 위험에 노출될 가능성이 높기 때문이다. 사이버 위험 자체의 증가도 문제이지만 외산 장비의 사용에 따른 정보 노출도 하나의 문제로 제기되고 있다. 특히 미국은 자국 내의 하역 장비 생산을 공식적으로 발표하였다. 이러한 기회를 활용하기 위해 일본은 2040년까지 미국 항만 내 장비 시장의 30%를 점유하겠다는 목표를 설정하기도 했다.[109]

109) 관계부처 합동(2026), p. 3.

따라서 우리도 항만기술산업 자체를 활성화하는 것이 중요하다. 단순히 항만의 효율성을 높이기 위한 목적도 중요하지만 항만기술산업 자체를 높은 부가가치를 창출하는 중요한 산업으로 인식해야 한다. 또한 국가 공급망의 안정화를 위한 핵심 시설인 항만을 안정적으로 운영하기 위해서도 중요한 산업이다.

3. 피지컬 AI 기술 도입은 다양한 기대효과 창출

이러한 피지컬 AI 기술을 항만에 도입하면 다양한 효과가 기대된다. 본 연구에서는 ① 운영 효과, ② 항만 경쟁력 효과, ③ 항만기술산업의 경쟁력 효과 및 ④ 국민경제로의 파급효과로 기대효과의 파급 경로에 따라 도입 효과를 구분하였다. 우선 항만 운영(①)에서 생산성 및 효율성이 높아지면 항만을 이용하는 고객의 이익과 만족도가 높아져 우리 항만의 경쟁력 강화(②)로 이어질 수 있다. 항만의 경쟁력 강화로 안정적으로 물동량이 처리되고 추가 화물이 유치되면 인프라 수요가 확대되면서 항만기술산업의 시장 규모와 경쟁력도 향상(③)되고 해외시장으로의 진출 기회도 확대될 것이다. 국내외 시장의 확보는 결국 국민경제 전반에 걸친 파급효과(④)로 이어질 수 있을 것이다.

화물의 시간가치 편익을 포함한 항만경쟁력 효과는 연간 약 4.4조 원, 항만기술산업의 경쟁력 효과는 2033년 기준 약 4.0조 원, 생산 유발과 부가가치 유발을 포함한 파급효과는 2031년 기준 약 7.0조 원으로 산정되었다. 고용유발은 2031년 기준 약 15천 명 수준이 기대되었다. 이와 같이 피지컬 AI 기술의 도입은 단순한 첨단 기술의 도입을 넘어 항만산업의 생태계 전반과 국가 경제에 미치는 효과가 매우 큰 정책이다. 앞서 항만기술산업 자체를 중요한 산업으로 인식해야 한다고 주장한 근거이기도 하다.

4. 인력과 데이터 중심의 정책 추진 중요

이와 같은 막대한 효과를 창출하는 피지컬 AI 기술을 적극적으로 도입하고 기대효과를 현실화하기 위해서는 다양한 추진 과제 중에서도 인재 양성과 데이터 확보를 핵심으로 두어야 한다.

피지컬 AI 기술의 핵심은 어떻게 체화된 데이터를 많이 확보하고 이를 기반으로 장비의 작동과 항만 운영을 얼마나 더 최적화할 수 있는가이다. 중국이 피지컬 AI 분야의 선도국으로 인정받고 있는 이유 또한 산업 분야를 불문하고 체화된 데이터를 대량으로 확보하고 기술과 모델에 적용하여 더 좋은 데이터의 확보가 가능하도록 도시 전체를 하나의 실험실로 쓰고 있기 때문이다. 또한 이러한 데이터를 분석하고 시스템으로 개발하는 것은 결국 사람이다. 항만산업과 데이터 산업 모두에 전문성을 갖춘 인력을 양성하는 체계가 필요하고 정부의 주도 하에 추진될 필요성이 있다. 현재 국내 항만기술산업의 규모 및 성숙도는 낮은 상황이기 때문에 정부가 인재 양성을 주도하여 산업의 활성화를 이끌 수 있도록 하는 정책이 중요하기 때문이다.

제2절 정책 제언

1. 가격 경쟁력 확보 방안 검토

본 연구에서 살펴본 피지컬 AI 기술의 도입에 따른 다양한 효과가 현실화되기 위해서는 민간에서 도입을 고려할 수 있는 가격 경쟁력도 매우 중

요하다. 기술력이 매우 우수하다면 가격이 유사하거나 약간 고가인 경우에도 충분히 도입할 것이다. 그러나 아직 충분하게 검증되지 않았거나 월등한 기술력을 확보하지는 못한 기술과 제품은 가격 경쟁력이 낮으면 시장에서 선택받기 어렵다.

가격 경쟁력을 제기하는 이유는 시장의 수용성이 있어야 지속적인 개발이 가능하고 이를 통해 경험과 기술력에 대한 제고도 가능하기 때문이다. 공공에서 수용할 수 있는 기술과 제품의 규모는 분명한 한계가 있다. 현재 우리 장비의 가격 경쟁력은 낮은 상황이다. 기업 자체에서 가격을 인하하려는 노력도 있어야 하겠지만 정부에서도 가격 안정화를 위한 간접적 방식의 지원을 적극적으로 고려할 필요가 있다.

초기의 도입 대상은 신규로 개발되는 컨테이너터미널일 가능성이 높다. 기존 터미널에는 부분적으로 필요한 기술을 도입하겠지만 신규로 개발될 터미널은 운영 전반에 AI에 기반한 첨단 기술을 도입할 가능성이 크기 때문이다. 따라서 신규 운영사를 선정할 시에 가점의 부여, 항만공사 또는 민간 발주 시 펀드 활용, 이차보전 등의 간접적인 지원 방식을 검토할 필요가 있다. 물론 가격 정책보다 기술 정책에 중점을 두어 기술력을 크게 높이는 것이 가장 중요하지만 기술력도 결국 시장의 다양한 수요에 기반하기 때문에 초기의 수요 창출을 지원하는 것도 필요하다. 본 연구에서는 특정한 지원 방식의 구체적인 대안을 제시하기보다는 가격 경쟁력의 중요성을 강조하는데 비중을 두었다.

2. 국산 기술 도입 의무 비율 검토

국내 항만기술산업에서 피지컬 AI 분야와 첨단 부품 등의 기술력과 산업생태계는 초기 단계의 수준에 있다. 현 수준에서는 해외 주요 기업의 기술

력에 단독으로 대응하기에는 어려운 현실이다. 따라서 이러한 한계점을 신속하게 극복하기 위해서는 국내의 제품 또는 기술 도입을 의무화하는 방안을 검토해 볼 필요가 있다.

그러나 단순한 제작 중심의 대형 장비에 대한 도입 의무화를 추진하자는 의미는 아니다. 미래의 기술력은 장비 제작과 같은 물리적인 영역이 아닌 AI가 결합된 기술과 이를 인식하고 통제하는 기술을 확보하는 것이기 때문이다. 따라서 핵심 부품과 인식·제어·통제·분석 등의 핵심 기술의 도입을 일정 비율로 설정하는 방식이 적정할 것이다. 정부에서 항만기술산업의 핵심 부품 개발을 위한 R&D를 추진하고 있는 것도 이러한 이유에서일 것이다.

의무 비율의 설정은 항만법 등 법률로 규정하는 것이 가장 안정적이나 법률의 특성을 고려한 적정성 여부는 판단해 볼 필요가 있다. 법률에 직접 규정하는 것이 아니더라도 항만의 장비와 관련한 지침에서 별도의 규정을 만드는 것과 항만공사와 같은 장비의 발주기관에 내부 규정을 두는 것도 가능할 것이다. 다만 항만공사가 정부의 기본적인 지침을 준용하는 형태로 운영되는 점을 고려한다면 항만의 장비와 관련된 지침을 별도로 신설하는 것이 가장 적절하다고 판단된다. 다만 단순히 의무적인 비율만 적용해서는 안 된다. 도입할 제품과 기술의 품질을 검증할 수 있는 인증 제도와 인증기관을 마련하여 인증된 제품과 기술에 대해서만 도입하도록 해야 할 것이다.

3. 강소기업 육성

앞서 제시한 가격 경쟁력의 확보와 국산 부품 또는 기술 도입의 의무 비율 적용을 검토하더라도 이를 현실화하기 위해서는 우리 항만기술산업 분야의 강소기업을 육성할 필요가 있다. 어떤 산업이든 어떤 인재 육성이든 산업 생태계가 잘 갖추어지지 않으면 성장 가능성이 크다고 보기 어렵다.

특히 대형 앵커기업도 중요하지만 산업 생태계의 관점에서 보면 이를 지원하고 다양한 기술개발을 끊임없이 시도하는 중소·중견 기업이 없다면 생태계가 경쟁력을 확보하기 어렵다.

현재 우리 항만기술산업의 생태계에 대한 경쟁력은 상대적으로 약한 편이라 평가할 수 있다. 일부 대형 장비 제조기업들이 시장을 주도하고 있으나 글로벌에서 대표할 기업은 없고, 그간 국내 시장도 장기간 침체되어 강소기업의 생태계도 약한 편이다. 특히 피지컬 AI 기술 분야의 생태계는 더욱 취약하다고 할 수 있다.

따라서 강소기업을 육성하기 위한 강력한 정책 수단이 필요하다. 특히 피지컬 AI 등 첨단 기술 분야의 생태계 강화에 보다 집중해야 한다. 본 연구에서 살펴본 것과 같이 향후의 항만기술 시장은 소프트웨어 분야가 성장을 주도할 것으로 예상되고 있다. 그렇다면 강소기업의 육성은 어떻게 할 것인가가 중요할 것이다. 앞서 제시한 기술 검증에 기반한 핵심 부품 및 AI 기술의 의무 비율 적용 등 국내 항만기술산업에 대한 정책적 배려가 우선되어야 할 것이다. 또한 항만배후단지 등을 활용하여 항만 피지컬 AI 기술의 개발에 특화된 강소연구개발특구의 지정에 대한 고려도 가능할 것이다.

강소기업의 육성 수단도 기본적으로는 해양수산부의 정책 수단을 중심으로 하되 과기부, 산업부, 중기부, 국토부, 기후부 등 다양한 부처의 강소기업 육성을 위한 수단들도 연계·적용하여 더욱 빠르게 생태계의 경쟁력을 확보할 수 있도록 해야 할 것이다. 최근 발표된 피지컬 AI 항만 전략이 관계부처 간 합동으로 발표된 것도 이와 같은 이유일 것으로 판단된다.

4. 프로그램형 R&D 적극 추진

프로그램형 R&D의 신설 추진은 해양수산부의 「피지컬 AI 항만 전략(안)」[110]에 이미 포함된 과제다. 본 연구에서 다시 언급하는 이유는 그만큼 중요도가 크다는 점을 강조하기 위함이다. 항만의 피지컬 AI 기술을 도입하는 분야는 매우 다양하고 투자 규모도 기술 종류에 따라 크게 다를 것이다. 즉 특정한 대형 기술도 있지만 작은 세부 기술들도 많다는 것이다. 또 하나 중요한 점은 기술의 발전 속도가 너무 빠르다는 것이다. 기존 R&D의 수행 방식처럼 1~2년의 준비 기간을 거쳐 4~5년 동안 수행한다면, 세계 최초의 원천기술을 개발하는 경우가 아닌 한 AI 기술 분야에서 세계적인 선도 기술을 확보하기는 어려울 것이다. 연구 기획 및 개발을 시작하는 시점에는 선진 기술이었던 것이 개발을 종료할 시에는 후진 기술이 되어 있을 것이기 때문이다. 또한 다양한 수요에 대한 기술의 확보도 어려울 것이다.

따라서 매년 필요한 신규 기술의 수요를 신속하게 추진하고, 수행하는 기간도 단기간으로 설정하여 민간의 수요에 적시에 대응하는 것이 중요하다. 이를 통해 시장의 수요에 대응함은 물론 계속된 현장의 적용, 체화된 데이터의 확보 및 기술력의 제고를 통해 우리의 기술 기반을 강화할 수 있을 것이다.

따라서 피지컬 AI 항만 기술을 확보하기 위한 프로그램형 R&D 사업의 기획을 신속히 추진하고 사업화하여 장기적으로 기술력을 강화하기 위한 기반을 확실하게 마련해야 할 것이다. 사업화 단계에서는 싱가포르의 Pier 71과 같이 항만 현장의 수요를 적극적으로 반영하고 공공이 주도하는 방식으로 수행할 필요가 있다.

110) 관계부처 합동(2026), p. 8.

5. 산업 데이터 축적 최우선 추진

피지컬 AI 기술의 경쟁력은 데이터에 기반한다. 인식·예측·최적화 등 거의 대부분의 기술은 항만의 운영 데이터를 학습하여 작동하므로 데이터의 확보와 표준화 없이는 기술력 확보와 고도화도 불가능하다. 해외의 선도 항만들이 데이터 플랫폼을 강화하기 위해 노력하는 것도 이 때문이다. 해양수산부도 이러한 인식하에 데이터의 공유 및 플랫폼 구축을 중요한 정책 과제로 설정하고 있다.

그러나 본 연구에서 강조하고 싶은 점은 가장 적극적이고 우선적인 정책으로 삼아야 한다는 것이다. 앞선 해외 선도 항만들도 노력은 하고 있으나 실행 단계에서는 많은 어려움을 겪고 있다. 반면 우리의 경우 정책을 추진하기 위한 환경이 상대적으로 양호하다. 가령 부산항만공사에서 구축한 체인포털의 경우 민간 운영사의 데이터를 제한적으로 확보하여 활용하고 있다. 이러한 점을 인정받아 디지털화에서의 우수 사례로 세계은행(World Bank)에서 발간한 보고서[111]에 소개되기도 하였다. 즉 우리 항만기업들은 해외 항만기업과 대비하여 정보 공유에 대한 수용성이 매우 높다고 할 수 있다.

따라서 세계에서 가장 선도적이고 선제적으로 데이터를 확보하고 이를 활용할 수 있는 기반의 구축에 집중해야 할 것이다. 또한 항만산업의 데이터를 활용한 학습과 적용을 위한 테스트베드를 더욱 확장해야 한다. 앞서 중국의 체화된 데이터 확보 및 활용 사례와 같이 항만 전체를 거대한 데이터 실험실로 구축하는 수준으로 추진하고 항만배후단지까지 포함되도록 해야 한다. 그 이후에는 항만을 중심으로 도시 및 내륙의 운송까지 연계하여 항만이 피지컬 AI 산업 자체를 선도하는 분야로 나아가도록 추진해야 할

111) World Bank(2021), pp. 72-75.

필요가 있다. 물론 데이터 공유를 더욱 확대하기 위해 데이터 공유자에 대해 설득하려는 노력과 유무형의 인센티브를 제공하기 위한 보상의 마련도 같이 고민해야 할 것이다.

참고문헌

국내 문헌

관계부처 합동(2026), 피지컬 AI 항만 전략(안).

김가현 외(2022), 스마트항만 구축에 따른 탄소저감효과 연구, 한국해양수산개발원.

김근섭 외(2021), 항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구, 한국해양수산개발원.

김보경·김근섭·강무홍(2022), 완전 자동화터미널, 글로벌 공급망 대란에서 그 안정성을 증명하다, 동향분석 Vol.179, 한국해양수산개발원.

김현서 외(2023), IoT 기반 항만 근로자 스마트 안전기술 개발 및 실증, 로지스틱스연구, 31(3), pp. 57-68.

부산항만공사(2026), 부산항 AX 추진계획.

서동현·오삼일·윤종원(2026), AI 도입은 생산성을 높이는가? 초기 3년의 효과 분석, BOK 이슈노트 제2026-12호, 한국은행.

안승현 외(2023), 항만기술산업 육성을 위한 법제도 마련 연구, 한국해양수산개발원.

안승현 외(2025), 스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구, 한국해양수산개발원.

오삼일 외(2025), AI와 한국경제, BOK 이슈노트 제2025-2호, 한국은행.

원승환·조성우·이언경(2025), 스마트항만 터미널 운영 시스템(TOS) 관련 기술 및 산업 활성화 방안, 해운물류연구, 41(1), pp. 25-53.

윤동하·최용석(2025), 광양항 컨테이너터미널의 스마트 항만 전환을 위한 요인분석 연구, 해운물류연구, 41(2), pp. 229-242.

이다예 외(2025), 스마트항만 기술 수용성 제고를 위한 법·제도 개선 방안 연구, 한국해양수산개발원.

이효준 외(2025), 균등 배차를 고려한 유전 알고리즘 기반 항만 물류 AI 자동 배차 최적화 방법, 한국정보기술학회논문지, 23(2), pp. 57-63.

조승환 의원실(2025), 국내 항만 안벽크레인 국산화율 관련 제공자료(2025.3. 기준).

한국노동연구원(2022), 스마트항만 도입이 고용에 미치는 영향.

한국은행(2025), 2023년 산업연관표(연장표).

한국해양수산개발원(2026), 세계 컨테이너 항만 서비스 지표(2025년 연간), 항만연구본부 항만수요분석연구실.

해양수산부(2023), 스마트항만 기술산업 육성 및 시장 확대 전략.

해양수산부(2026), 제4차 전국 항만기본계획 수정계획(2026~2030).

해양수산부 내부자료(2025).

국외 문헌

ADB(2020), Smart Ports in the Pacific, Asian Development Bank.

An, Y., & Park, N.(2021), "Economic Analysis for Investment of Public Sector's Automated Container Terminal: Korean Case Study", Journal of Marine Science and Engineering, 9(5), 459.

Awasthi, A., Krpalkova, L., & Walsh, J.(2024), Deep Learning-Based Boolean, Time Series, Error Detection, and Predictive Analysis in Container Crane Operations, Algorithms, 17(8), 333, https://doi.org/10.3390/a17080333.

Bae, M. J. et al.(2013), Container transshipment and port competition, Maritime Policy & Management, 40(5), pp. 479-494.

Brooks, R. A.(1991), Intelligence without representation, Artificial Intelligence, 47(1-3), pp. 139-159.

Chen, R., Zhang, J., & Wang, H.(2025), Autonomous fleet management system in smart ports: Practical design and analytical considerations, Multimodal Tra

nsportation, 4(3), 100211, https://doi.org/10.1016/j.multra.2025.100211.

Chu, F. et al.(2018), The future of automated ports, McKinsey & Company.

Cisco(2019), Case study: Shanghai International Port Group.

DataIntelo(2025), Global AI in Ports and Terminals Market Analysis and Forecast, 2018-2033.

Drewry(2025), Global Container Terminal Operators Annual Review and Forecast 2025/26.

IEC(2013), Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology(IEC 62264-1:2013), International Electrotechnical Commission.

ITF-OECD(2021), Container Port Automation: Impacts and Implications, OECD Publishing.

Jin, X. et al.(2023), Deep Reinforcement Learning for Dynamic Twin Automated Stacking Cranes Scheduling Problem, Electronics, 12(15), 3288, https://doi.org/10.3390/electronics12153288.

Jobran, Y., & Kara, G.(2022), Examining the Efficiency of Automation in Container Terminals, Journal of Transportation and Logistics, 7(1), pp. 137-155.

Jourquin, B., Tavasszy, L., & Duan, L.(2014), On the generalized cost - demand elasticity of intermodal container transport, European Journal of Transport and Infrastructure Research, 14(4), pp. 362-374.

Jun, W. K., Lee, M.-K., & Choi, J. Y.(2018), Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis, Transportation Research Part A: Policy and Practice, 118, pp. 480-493.

Klar, R., Andersson, A., & Angelakis, V.(2026), Understanding and predicting quay crane breakdowns using explainable AI, Maritime Transport Research, 10, 100152, https://doi.org/10.1016/j.martra.2026.100152.

Knatz, G., Notteboom, T., & Pallis, A. A.(2022), Container terminal automation: revealing distinctive terminal characteristics and operating parameters, Maritime Economics & Logistics, 24(3), pp. 537-565.

Knatz, G., Notteboom, T., & Pallis, A. A.(2024), Container terminal automation: assessment of drivers and benefits, Maritime Policy & Management, 51(6), pp.

1252-1276.

Kastner, Marvin et al.(2024), Insights into How to Enhance Container Terminal Operations with Digital Twins, Computers, 13(6), https://doi.org/10.3390/computers13060138.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A.(2015), A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, Manufacturing Letters, 3, pp. 18-23.

Lyu, S., & Yang, R.(2026), Mitigating container port congestion and carbon emissions through AI and capacity sharing, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 154, 105251, https://doi.org/10.1016/j.trd.2026.105251.

Majoral, G., Reyes, A., & Saurí, S.(2024), Lessons from Reality on Automated Container Terminals: What Can Be Expected from Future Technological Developments?, Transportation Research Record, 2678(2), pp. 401-415.

Meng, Z., & Comer, B.(2023), Electrifying Ports to Reduce Diesel Pollution from Ships and Trucks and Benefit Public Health, ICCT Working Paper 2023-05.

Nguyen, S. et al.(2026), AI-driven Just-In-Time coordination between port and ships: Advancing maritime decarbonization, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 207, 104569, https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104569.

NILIM(2010),「犠牲量モデルを用いたコンテナ貨物の時間価値に関する一考察」, 일본 국토기술정책종합연구소.

Song, D.-P. et al.(2016), Modeling port competition from a transport chain perspective, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 87, pp. 75-96.

Tagawa, H., Kawasaki, T., & Hanaoka, S.(2021), Conditions influencing the choice between direct shipment and transshipment in maritime shipping network, Journal of Shipping and Trade, 6, 4, https://doi.org/10.1186/s41072-021-00085-3.

Trinh, T.V.A. et al.(2025), Robust visual-based tracking using deep learning with image enhancement for reach stackers in container terminals, Alexandria Engineering Journal, 132, pp. 1-26.

Tongzon, J. L.(2009), Port choice and freight forwarders, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 45(1), pp. 186-195.

Tongzon, J. L., & Sawant, L.(2007), Port choice in a competitive environment: from the shipping lines' perspective, Applied Economics, 39(4), pp. 477-492.

UNCTAD(2025), Review of Maritime Transport 2025, United Nations.

Veenstra, A., Verweij, K., van de Wijdeven, J., Cieremans, A.-J., & Post, D.(2023), Demurrage en Detention-kosten containertransport over zee, Topsector L ogistiek.

Wang, H. et al.(2024), Intra-port demand coordination and inter-port competition: Ports' pricing strategies with congestion concerns, Ocean & Coastal Manag ement, 248, 106918, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106918.

Wang, M. et al.(2026), Resilient AI adoption strategy for regional port clusters: A deep reinforcement learning approach, Safety Science, 202, 107269, https: //doi.org/10.1016/j.ssci.2026.107269.

Wang, P. et al.(2025), Intelligent port logistics: A spatiotemporal knowledge graph and AI-agent framework for berth allocation, Advanced Engineering Infor matics, 68, 103633, https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103633.

Weaver, G. A. et al.(2022), Estimating economic losses from cyber-attacks on shippi ng ports: An optimization-based approach, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 137, 103423, https://doi.org/10.1016/j.trc.202 1.103423.

World Bank(2021), Accelerating Digitalization: Critical Actions to Strengthen the Resilience of the Maritime Supply Chain, pp. 72-75.

World Bank(2024), The Container Port Performance Index 2023, p. 17.

World Bank(2026), Cybersecurity in Ports: Shifting from Risk to Resilience.

Wu, J. et al.(2026), An adaptive technology portfolio optimization framework for port carbon and pollutants mitigation, Journal of Cleaner Production, 543, 147665, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147665.

Xu, H. et al.(2024), The impact of AI technology adoption on operational decision-making in competitive heterogeneous ports, Transportation Research Part

E: Logistics and Transportation Review, 183, 103428, https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103428.

Zhang, C., Yang, Y., & Wang, N.(2024), Port governance and sustainable development: The impact of port smartization on port carbon emission efficiency, Ocean & Coastal Management, 259, 107485, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107485.

Zhao, Y. et al.(2026), Cybersecurity in smart port systems: A systematic review and data-driven research agenda, Transport Policy, 187, 104268, https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104268.

인터넷 자료

관세청 UNI-PASS, https://unipass.customs.go.kr/csp/index.do(검색일: 2026.8.15.)

국가데이터처 보도자료(2026.6.17.), 데이터로 본 부산과 세계 주요 항구 도시(동남지방데이터청), https://mods.go.kr/board.es?act=view&bid=11802&list_no=445503&mid=a60301010500(검색일: 2026.9.30.)

부산항만공사 체인포털, https://www.chainportal.co.kr/main/ko/(검색일: 2026.8.20.)

해양수산부, Port-MIS, https://new.portmis.go.kr/portmis/websquare/websquare.jsp?w2xPath=/portmis/w2/main/intro.xml(검색일: 2026.6.14.)

해양수산부 보도자료(2024.12.11.), 부산항, 수출입 공급망 안정화를 위해 글로벌 TOP 3 항만으로 키운다, https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=59556&listUpdtDt=2024-12-20++10%3A00&menuSeq=971&bbsSeq=10(검색일: 2026.9.30.)

Beacon(2024), Beacon Container Dwell Time Report, https://beacon.com/container-dwell-time(검색일: 2026.8.20.)

Container xChange(2024), Demurrage and detention charges: Save money in top 10 ports(2024), https://www.container-xchange.com/blog/demurrage-detention(검색일: 2026.8.16.)

European Commission(2026.7.27.), AI Omnibus enters into force, https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/ai-omnibus-enters-force(검색일: 2026.8.15.)

Grand View Research(2026), Physical AI Market Size And Share, Industry Report 2033, https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/physical-ai-market-report(검색일: 2026.7.15.)

Hapag-Lloyd, https://www.hapag-lloyd.com/en/services-information/offices-localinfo/east-asia/korea/local-info/export.html(검색일: 2026.8.20.)

Harper Petersen & Co., HARPEX(Harper Petersen Charter Rates Index), https://www.harperpetersen.com/harpex(검색일: 2026.10.15.)

HPC Hamburg Port Consulting, AI-Based Container Dwell Time Prediction, https://www.hamburgportconsulting.com/projects/project/ai-based-container-dwell-time-prediction-3125a(검색일: 2026.7.30.)

Huawei, The future of ports is in Tianjin, China, https://www.huawei.com/en/media-center/transform/21/16-tianjin-port(검색일: 2026.7.30.)

Huawei Cloud, OptVerse AI Solver Powers Tianjin Port's Intelligent Planning Platform, https://www.huaweicloud.com/intl/en-us/cases/tjg.html(검색일: 2026.7.30.)

IBM(2025), What is Physical AI?, https://www.ibm.com/think/topics/physical-ai(검색일: 2026.7.15.)

Maritime and Port Authority of Singapore, Port of the Future, https://www.mpa.gov.sg/maritime-singapore/port-of-the-future(검색일: 2026.7.30.)

NVIDIA(2025), Physical AI, https://www.nvidia.com/en-us/glossary/generative-physical-ai/(검색일: 2026.7.15.)

Port of Antwerp-Bruges(2023.5.5.), World first in Antwerp port area: drone network officially launched, https://newsroom.portofantwerpbruges.com/en/press-releases/world-first-in-antwerp-port-area-drone-network-officially-launched(검색일: 2026.7.30.)

Port of Rotterdam, PortXchange Synchronizer, https://www.portofrotterdam.com/en/services/online-tools/portxchange(검색일: 2026.7.30.)

Port Technology International(2025.5.23.), Qingdao Port breaks container handlin

g record, https://www.porttechnology.org/news/qingdao-ports-automated-terminal-breaks-container-handling-record/(검색일: 2026.7.23.)

PSA Singapore(2022.3.2.), PSA and A*STAR collaborate on smart, scalable solutions for managing AGV fleets in preparation for Tuas Port, https://www.singaporepsa.com/2022/03/02/psa-and-astar-collaborate-on-smart-scalable-solutions-for-managing-automated-guided-vehicle-agv-fleets-in-preparation-for-tuas-port/(검색일: 2026.7.30.)

Westwell, ReeWell AI Port Scheduling & Fleet Management Software, https://en.westwell-lab.com/resources/Blogs/intelligent-terminal-scheduling(검색일: 2026.7.30.)

上海市商务委(2025.4.30.), 世界大港上海水运口岸洋山港努力创造更多世界第一, https://kab.sww.sh.gov.cn/xwzx/001001/20250430/9353f068-f960-4303-a7a5-c04443a555dd.html(검색일: 2026.7.30.)

법령 자료

국가법령정보센터, 항만기술산업의 육성 및 지원에 관한 법률(법률 제20135호, 2024. 1.23.)

Regulation (EU) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 (Artificial Intelligence Act), OJ L, 2024/1689, 12.7.2024.

부 록

선행연구 현황

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
1	The future of automated ports(2018)	Chu et al. (McKinsey)	자동화 항만 투자 성과 진단	• 글로벌 설문·사례 조사(컨설팅 보고서)	• 기대(운영비 25~55% 절감, 생산성 10~35% 향상) 대비 실제는 운영비 15~35% 절감, 생산성 7~15% 하락 사례 확인
2	Container Port Automation: Impacts and Implications (2021)	ITF-OECD	자동화터미널 성과·정책 효과 규명	• 53개 터미널 자료 분석(국제기구 보고서)	• 자동화터미널 생산성이 기존 대비 낮다는 역설적 결과 제시, 편익은 고임금 지역 중심의 조건부 효과
3	Container terminal automation: revealing distinctive terminal characteristics and operating parameters (2022)	Knatz, Notteboom & Pallis	자동화 터미널의 특성·성립 조건 규명	• 63개 자동화터미널 전수 DB 분석	• 전 세계 터미널 중 자동화는 약 3%, 자동화 결정의 조건(물동량 등) 실증

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
4	Container terminal automation: assessment of drivers and benefits(2024)	Knatz, Notteboom & Pallis	자동화 추진 동인·실현 편익 비교	• 글로벌 설문·통계·회귀분석	• 동인(안전·단위비용·일관성·인건비)과 실현 편익 간 영역별 편차 규명
5	Lessons from Reality on Automated Container Terminals (2024)	Majoral, Reyes & Saurí	자동화터미널 실운영 성과 진단	• 사례·기술 전망 분석	• 자동화 성과가 기대에 미달한 원인과 향후 기술 발전의 개선 여지 제시
6	Economic Analysis for Investment of Public Sector's Automated Container Terminal: Korean Case Study(2021)	An & Park	공공 관점 자동화 투자 경제성 분석	• 비용편익 분석·민감도분석	• '적정 처리능력' 개념 제시, 선석 규모별 손익분기 물동량 도출
7	스마트항만 개발 효과 산정 방법론 연구(2025)	안승현 외	스마트항만 개발 편익 도출·정량화	• 문헌·전문가 자문·가상 사례 검증	• 하역생산성·환경·안전 편익의 산정식·원단위 개발, 예비타당성 지침 반영안 제시
8	Review of Maritime Transport 2025(2025)	UNCTAD	세계 해운·항만 동향 분석	• 통계·시장 분석(국제기구 보고서)	• 항만의 자동화·지능화가 세계 항만 전반의 구조적 추세임을 제시
9	Smart Ports in the Pacific(2020)	ADB	스마트항만 개념·추진 방향 제시	• 사례·정책 분석(국제기구 보고서)	• 스마트항만의 구성 요소와 태평양 지역 항만의 적용 방향 제시
10	Examining the Efficiency of Automation in Container Terminals(2022)	Jobran & Kara	자동화터미널 운영효율 분석	• 시뮬레이션 분석(실제 항만 자료 검증)	• 재항 시간 약 18% 단축, 외부 트럭 회전시간 증가 등 공정 간 상충 확인

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
11	Strategic port management by consolidating container terminals (2022)	Kim, G.S., Lee, E.S. & Kim, B.K.	국가 차원 터미널 통합 운영 효과 분석	• 사례·통계 분석	• 터미널 통합 운영의 효율 개선 효과와 항만 관리 전략 제시
12	Deep Reinforcement Learning for Dynamic Twin Automated Stacking Cranes Scheduling Problem (2023)	Jin et al.	자동 야드크레인 스케줄링 최적화	• 심층강화 학습	• 쌍둥이 ASC 동적 스케줄링으로 이송장비 대기 18.8~49.2% 감소
13	Autonomous fleet management system in smart ports(2025)	Chen et al.	자율 함대 관리 효과 분석	• 시스템 설계·시뮬레이션	• 이송 함대의 자율 관제·배차 체계 설계, 대기 시간 21.8% 감소 제시
14	Intelligent port logistics: A spatiotemporal knowledge graph and AI-agent framework for berth allocation (2025)	Wang, P. et al.	AI 기반 선석 배정 최적화	• 시공간 지식그래프·AI 에이전트	• 선박 대기 약 20% 감소, 선석 이용률 약 15% 향상

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
15	The impact of AI technology adoption on operational decision-making in competitive heterogeneous ports(2024)	Xu et al.	AI 도입의 항만 운영·경쟁 효과 분석	• 게임이론·수치분석	• 항만 유형별 AI 도입 효과 분석. 칭다오항 하역 효율 30% 향상 및 장비 작업 효율 14.2% 개선 제시
16	Case study: Shanghai International Port Group(2019)	Cisco	지능형 항만 운영 효과 소개	• 사례 분석	• 양산항 지능형 시스템 도입으로 인한 하역 효율 30% 향상 제시
17	Understanding and predicting quay crane breakdowns using explainable AI(2026)	Klar et al.	안벽크레인 고장 예측	• 설명가능 AI·기계학습	• 고장 예측 정확도 약 83%, 예측정비로 계획 외 비가동 감소
18	Deep Learning-Based Boolean, Time Series, Error Detection, and Predictive Analysis in Container Crane Operations (2024)	Awasthi et al.	크레인 운영 오류·고장 예측	• LSTM 딥러닝	• 오류 예측 정확도 99.6%(재현율 0.50, F1 0.667)
19	균등 배차를 고려한 유전 알고리즘 기반 항만 물류 AI 자동 배차 최적화 방법 (2025)	이효준 외	AI 자동 배차 최적화	• 유전 알고리즘	• 공차 거리 최소화로 이송 비용·시간 절감, 균등 배차 공정성 확보

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
20	IoT 기반 항만 근로자 스마트 안전기술 개발 및 실증(2023)	김현서 외	근로자 안전기술 개발·실증	• IoT·AI 현장 실증	• 부산항 신선대부두에서 작업자 위험 실시간 감지 실증
21	The Container Port Performance Index 2023(2024)	World Bank	세계 컨테이너 항만 성과 비교	• 선박 재항 시간 기반 지수 산정	• 주요 항만의 재항 시간 성과 지수화, 전체 재항 시간 중 하역 작업 외 시간 비중 약 40% 제시
22	Conditions influencing the choice between direct shipment and transshipment in maritime shipping network(2021)	Tagawa et al.	직기항-환적 선택 조건 규명	• 수송망 모형 분석	• 기항 선택이 시간·비용 조건에 민감함을 모형 분석으로 제시
23	Intra-port demand coordination and inter-port competition (2024)	Wang, H. et al.	항만 경쟁 구조 분석	• 게임이론 모형	• 기항 수요가 가격·혼잡도 등 경쟁 조건에 민감함을 제시
24	Container transshipment and port competition (2013)	Bae et al.	환적 경쟁 구조 분석	• 게임이론	• 환적화물 유치 경쟁에서 비용·서비스 우위의 중요성 제시(기초 연구)
25	Modeling port competition from a transport chain perspective (2016)	Song et al.	수송체인 관점 항만 경쟁 분석	• 네트워크 모형	• 항만 선택이 수송체인 전체 비용으로 결정됨을 제시(기초 연구)

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
26	Impact of the smart port industry on the Korean national economy using input-output analysis (2018)	Jun, Lee & Choi	스마트항만 산업의 국민경제 효과 산정	• 산업연관 분석	• 스마트항만 산업의 생산·부가가치·고용 유발효과 산정
27	스마트항만 도입이 고용에 미치는 영향 (2022)	한국노동연구원	자동화의 고용 영향 실증	• 실태조사·통계분석	• 자동화 수준별 하역인력 규모·직무구조 변화 분석
28	스마트항만 터미널 운영 시스템(TOS) 관련 기술 및 산업 활성화 방안 (2025)	원승환 외	TOS 산업 육성 방안 도출	• 기술·시장 분석	• 외산 의존 TOS의 국산화·산업화 과제 제시
29	AI와 한국경제 (2025), AI 도입은 생산성을 높이는가? (2026)	한국은행	AI 도입의 거시·미시 효과 분석	• 거시 분석·가계조사 분석	• AI 확산의 성장 기여 전망, AI 사용 근로자의 업무시간 약 3.8% 절감 확인
30	Global Container Terminal Operators Annual Review and Forecast 2025/26(2025)	Drewry	세계 터미널 운영시장 분석·전망	• 시장조사·전망	• 터미널 운영자 수익 개선과 설비투자 급증, 처리능력 확충 전망
31	스마트항만 구축에 따른 탄소 저감효과 연구 (2022)	김가현 외	스마트항만 기술별 탄소저감 정량화	• 기술별 산정·사례 분석	• 부산항 신항 사례의 동력 전환 중심 기술별 탄소 저감 효과 정량화

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
32	Electrifying ports to reduce diesel pollution from ships and trucks and benefit public health(2023)	Meng & Comer	항만 전기화의 배출·건강 편익 분석	• 배출량 추정·건강영향 평가	• $PM_{2.5}$ 69~75% 감소, 조기사망 예방 등 건강 편익 산정
33	Port governance and sustainable development: The impact of port smartization on port carbon emission efficiency(2024)	Zhang, Yang & Wang	스마트화 정책의 탄소효율 영향 분석	• SBM·DID 실증	• 중국 39개 항만에서 스마트화 정책의 탄소 배출 효율 개선 실증
34	항만 에너지 관리 시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구(2021)	김근섭 외	항만 에너지 관리 체계 구축 방향 제시	• 실태 분석·로드맵 수립	• 부산항 에너지 소비 증가가 물동량 증가를 상회함을 확인, 에너지 관리시스템 도입 로드맵 제시
35	AI-driven Just-In-Time coordination between port and ships(2026)	Nguyen et al.	AI 기반 정시(JIT) 입항 협조 효과	• 최적화·시뮬레이션	• 연료·배출 6.45~7.39% 절감(전체 기항의 2.94% 적용 시험)
36	An adaptive technology portfolio optimization framework for port carbon and pollutants mitigation(2026)	Wu et al.	탄소·오염 저감 기술 조합 최적화	• 포트폴리오 최적화	• CO_2와 대기오염물질 동시 저감의 기술 조합 도출

구분	연구명(년도)	저자	연구목적	연구방법	주요연구내용
37	Resilient AI adoption strategy for regional port clusters(2026)	Wang, M. et al.	항만군 AI 투자와 회복력 분석	• 네트워크·최적화 모형	• 최적 AI 투자 배분으로 전체 운영상 효율 약 30% 개선, 교란 전염 60% 이상 감소
38	Estimating economic losses from cyber-attacks on shipping ports(2022)	Weaver et al.	항만 사이버 공격의 경제손실 추정	• 최적화 기반 추정	• 사이버 공격의 경제손실 규모 추정, 회복력 관리 필요성 제시
39	Cybersecurity in smart port systems(2026)	Zhao et al.	스마트항만 사이버보안 체계 정리	• 문헌·체계 분석	• 자동화·연결성 증가에 따른 신규 취약성과 대응 체계 제시
40	Cybersecurity in Ports: Shifting from Risk to Resilience (2026)	World Bank	항만 사이버 위험 관리 방향 제시	• 정책 분석	• 위험 관리에서 회복력 중심으로의 전환 권고

현안연구 2026-01

항만분야 피지컬 AI 도입 효과 연구

인 쇄 2026년 10월 29일
발 행 2026년 10월 31일

발 행 인 조 정 희
발 행 처 한국해양수산개발원
주 소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)
연 락 처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)
등 록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 (사)아름다운사람들(02-6948-9650)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337
비매품/무료

항만분야 피지컬 AI 도입 효과 연구

A Study on the Effects of Physical AI Adoption in the Port Sector

KMI 한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

49111 부산광역시 영도구 해양로301번길 26 (동삼동)
TEL. 051-797-4800

비매품/무료
95300
9 791168 663367
ISBN 979-11-6866-336-7 (PDF)