

# 항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구

-부산항 신항 전기에너지 소비를 중심으로-

A Study on Establishment of Roadmap for  
Introducing Port Energy Management System  
-Focusing on Electric Energy Consumption in Busan New Port-

김근섭 · 김세원 · 안승현 · 이주원 · 한승훈 · 이건우



한국해양수산개발원  
KOREA MARITIME INSTITUTE

---

<b>저자</b>	김근섭, 김세원, 안승현, 이주원, 한승훈, 이건우
<b>내부연구진</b>	연구책임자 김근섭 연구위원 한국해양수산개발원 항만연구본부 항만정책실 공동연구원 김세원 부연구위원 한국해양수산개발원 항만연구본부 항만정책실 공동연구원 안승현 전문연구위원 한국해양수산개발원 항만연구본부 항만정책실 공동연구원 이주원 전문연구위원 한국해양수산개발원 항만연구본부 항만정책실 공동연구원 한승훈 위촉연구위원 한국해양수산개발원 항만연구본부 항만정책실
<b>외부연구진</b>	공동연구원 이건우 한양대학교 교수

---

**연구기간** 2021. 1. 1. ~ 2021. 10. 31.

#### 보고서 집필내역

---

<b>연구책임자</b>	김근섭 연구총괄, 제1장, 제4장, 제6장
<b>내부연구진</b>	김세원 제1장 제3절 일부, 제2장 제2절, 제2장 제3절 일부 안승현 제1장 제3절 일부, 제2장 제1절 일부 제3절 일부, 제3장 제2절 일부, 제5장 이주원 제3장 제1절, 제4장 제2절 한승훈 제2장 제1절 일부, 제3장 제2절 일부, 제4장 제1절
<b>외부연구진</b>	이건우 제3장 제2절 일부

---

<b>산·학·연·정 연구자문위원</b>	전명길 ㈜비엔씨티 팀장 박은경 부산항만공사 차장 이철웅 고려대학교 교수 추윤식 해양수산부 사무관
---------------------------	--

※ 순서는 산·학·연·정 순임

---

# 발간사

우리 정부는 2020년 12월 7일 「2050 탄소중립 추진전략」을 확정, 발표하였다. 이는 우리나라의 온실가스 감축 정책을 그간의 적응적(Adaptive) 감축에서 능동적(Proactive) 대응으로 전환하는 중요한 계기가 되었다. 따라서 해운·항만 분야를 포함한 국내 전 산업 분야에서 저탄소화 추진을 위한 더 크고 강한 노력을 기울일 것으로 전망된다.

특히 글로벌 공급망의 핵심 결절점인 항만은 수많은 선박이 입출항하고 다양한 산업 활동이 이뤄지는 공간으로 전 세계 온실가스 배출의 약 3%를 차지하고 있는 것으로 알려져 있다. 이에 세계 주요 선진 항만은 탄소중립을 목표로 에너지의 효율적 사용, 신재생에너지 확대, 에너지의 재활용 등 에너지 관리를 최우선 과제로 추진하고 있다.

반면 국내의 경우에는 항만에서 소비되는 에너지 관리와 관련한 정책과 관심이 부족한 실정이다. 그 이유는 지금 당장의 현안은 아니라는 판단에 기인한 것으로 생각된다. 그러나 항만의 에너지 관리는 향후 항만 운영에서 가장 중요한 이슈가 될 것이며 에너지 부족이 예상되는 시점에서는 해결 대안을 마련하기도 어렵다. 또한 국내 주요 컨테이너 항만에서 신규로 건설되는 부두는 자동화부두로 운영될 예정이며 친환경정책에 따라 친환경 시설도 확대 설치될 것이기 때문에 에너지 소비는 더욱 증가할 수밖에 없는 상황이다. 에너지 부족에 따라 항만 운영에 지장을 초래할 경우 항만의 경쟁력 저하에 국한되는 것이 아니라 국가 수출입 경제 전반에 중대한 영향을 미치게 된다. 따라서 항만의 에너지 관리에 관한 선행적인 검토와 대비는 매우 중요하며 연구 수행의 필요성도 높다 할 수 있다.

본 연구는 이러한 배경하에 부산항 신항을 대상으로 장래 전기에너지 소비량 추정, 공급시설 소요, 에너지 관리 방안과 이를 위한 정책제언 등을 종합적으로 제시하였다. 본 연구 결과에서는 에너지 관리 중요성 인식을 강조하고 있다. 에너지 관리는 미래의 현안이 아닌 지금의 현안으로 받아

---

들여야 할 것이다. 이를 위해 「항만법」 개정을 통해 항만기본계획 수립 시 에너지 관리계획도 수립할 수 있도록 하고, 이를 위한 에너지 통계를 관리하는 체계도 마련되어야 할 것이다. 또한 항만의 에너지 관리와 안정적 공급이 가능한 기술 개발에도 노력을 아끼지 말아야 한다. 에너지 관리는 결국 기술 개발과 적용을 통해 실현 가능하기 때문이다.

본 연구가 우리나라 항만정책에서 에너지 관리의 중요성과 시급성을 인식하는 시작점이 되고, 연구 결과는 향후 항만의 에너지 관리 정책을 마련하는데 초석이 되기를 기대한다.

끝으로 이 연구의 책임을 맡은 김근섭 연구위원과 연구진인 김세원 부 연구위원, 안승현·이주원 전문연구원, 한승훈 위촉연구원의 노고에 깊은 감사를 표한다. 아울러 이 연구를 같이 수행한 한양대학교 이진우 교수와 보고서의 완성도를 높이기 위해 심의 과정 전반에서 많은 조언을 아끼지 않은 고려대학교 이철웅 교수, 부산항만공사 박은경 차장, (주)비엔씨티 전명길 팀장, 해양수산부 추윤식 사무관, 우리 연구원의 김범중 명예연구위원과 최상희 선임연구위원께도 깊은 감사의 인사를 드린다.

2021년 12월  
한국해양수산개발원  
원장 김 중 덕

---

# 목차

정책제안 \_ i

요약 \_ iii

Executive Summary \_ ix

## 01

### 서론 \_1

제1절 연구의 배경 및 목적	1
1. 연구 배경 및 필요성	1
2. 연구 목적	3
제2절 연구 내용과 방법	5
1. 연구 내용	5
2. 연구 방법	6
제3절 선행연구 검토	9
1. 선행연구	9
2. 선행연구와 차별성	24

## 02

### 해외 항만의 에너지 관리 정책 및 사례 \_27

제1절 유럽 및 미국 항만	27
1. 유럽	27
2. 미국	34
제2절 아시아 항만	38
1. 중국	38
2. 일본	45
3. 싱가포르	49
4. 두바이	51
제3절 해외 사례의 시사점	53

<b>03</b>	<b>부산항 신항 전기에너지 소비량 전망 _55</b>	
	제1절 부산항 신항의 전력소비 현황	55
	1. 부산항 신항 전체 전력 사용 현황	56
	2. 터미널별 전력 사용 현황	57
	3. 종합	66
	제2절 부산항 신항 전력 소비량 전망	66
	1. 방법론	67
	2. 분석자료	74
	3. 예측 모형 설정	76
	4. 부산항 신항 전력 소비량 전망	80
	5. 전망 결론	86
<b>04</b>	<b>부산항 신항 전력 공급 소요 전망 _87</b>	
	제1절 부산항 신항 전력 공급 계획	87
	1. 부산시 에너지 계획	87
	2. 항만기본계획의 전력 공급 계획	91
	3. 종합	92
	제2절 부산항 신항 전력 소요 분석	93
	1. 부산항 신항 전력 공급 현황	93
	2. 부산항 신항 계약전력 소요	94
	3. 종합	102
<b>05</b>	<b>부산항 신항 전력 관리 방안 및 로드맵 수립 _105</b>	
	제1절 부산항 신항 전력 관리 방안	105
	1. 방안 설정	105
	2. 전력 관리 방안	106
	제2절 기대효과 분석	115
	1. 마이크로그리드 도입 효과	115

2. 신재생에너지 확대	119
3. 장비 전력 사용 효율화	119
4. 에너지 전환	120
제3절 항만 전력 관리 로드맵 수립	124
1. 기본 방향 설정	124
2. 항만 기본계획 반영	126
3. 에너지 효율화 및 신재생에너지 기술 개발	126
4. 항만 에너지 관리 로드맵(안) 설정	128
제4절 소결	129

## 06 결론 및 정책제언\_131

제1절 결론	132
1. 에너지 관리는 항만의 핵심 과제	132
2. 항만의 에너지 관리 연구는 시작 단계	132
3. 부산항 신항의 전력 소비는 지속 증가	133
4. 부산항 신항의 전력 수요 증가에 대비 필요	134
5. 전기에너지 소비 최적화 위한 다양한 전략 활용 가능	134
6. 항만의 에너지 관리 정책 마련이 시급	135
7. 연구의 한계점과 향후 연구 과제	136
제2절 정책제언	137
1. 항만 에너지 관리 계획 수립	137
2. 항만 에너지 통계 구축	139
3. 항만 에너지 관리 기술 연구 추진	141
4. 신재생에너지 검토 다각화	142
5. 항만 에너지 관리 중요성 인식	143

---

## 표 목차

〈표 1-1〉 항만의 에너지 효율화 기술·기법과 적용 가능 항만	12
〈표 1-2〉 항만 에너지 효율화 관련 주요 선행연구	14
〈표 1-3〉 에너지 소비량 추정 관련 주요 선행연구	21
〈표 2-1〉 ESPO 소속 항만의 환경 분야별 모니터링 시행 비율 추이	30
〈표 2-2〉 로테르담항만의 Smart Energy & Industry Roadmap 세부 내용	31
〈표 2-3〉 함부르크항 smartPORT energy	33
〈표 2-4〉 상하이항의 에너지 소모량 추이(2016~2020년)	41
〈표 2-5〉 칭다오항 에너지 소모량 추이(2016~2020년)	44
〈표 2-6〉 칭다오 등자쿠항 마이크로그리드 프로젝트	45
〈표 2-7〉 일본 '재해 등 비상사태 발생 시 효과적인 항만지역 저탄소화 촉진 시범사업'	46
〈표 3-1〉 부산항 신항 전체 전기사용량 현황	56
〈표 3-2〉 부산항 신항 부두별 전기 사용량 추이(2016~2020년)	58
〈표 3-3〉 부산항 신항 부두별 운영 규모 현황(2020년 기준)	58
〈표 3-4〉 부산항 신항 하역장비 전기사용량 비중 현황(2016~2020년)	60
〈표 3-5〉 부산항 신항 1부두(PNIT) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)	61
〈표 3-6〉 부산항 신항 2부두(PNC) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)	62
〈표 3-7〉 부산항 신항 3부두(HJNC) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)	63
〈표 3-8〉 부산항 신항 4부두(HPNT) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)	64
〈표 3-9〉 부산항 신항 5부두(BNCT) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)	65
〈표 3-10〉 시계열 분석 예시	68
〈표 3-11〉 부산항 터미널운영사별 전력 사용량(2011~2020년)	75
〈표 3-12〉 RNN-LSTM 모형 관련 주요 선행연구	79
〈표 3-13〉 부산항 컨테이너 물동량 전망	80
〈표 3-14〉 부산항 컨테이너부두 하역 능력 전망	81
〈표 3-15〉 부산항 신항 컨테이너 물동량 전망	81
〈표 3-16〉 부산항 신항의 월간 컨테이너 물동량 평균 비율(2011~2020년)	82
〈표 3-17〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2025년 기준)	83
〈표 3-18〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2030년 기준)	84
〈표 3-19〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2035년 기준)	84
〈표 3-20〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2040년 기준)	85



---

〈표 3-21〉 부산항 신항 전력 소비량 연간 예측 .....	85
〈표 4-1〉 부산항 신항의 부두별 최대 계약전력(kW) 공급 계획 .....	95
〈표 4-2〉 부산항 신항 전기에너지 소비량 연도별 증가율(%) .....	96
〈표 4-3〉 부산항 신항 장기 소요 계약전력 전망 결과 .....	97
〈표 4-4〉 선종별, 톤급별 AMP 소요 전력 .....	98
〈표 4-5〉 부산항 신항 AMP 소요 계약전력 산정 결과 .....	99
〈표 4-6〉 진해신항 AMP 소요 계약전력 전망 결과 .....	99
〈표 4-7〉 항만배후단지 시설별 단위부하 및 수용률 .....	100
〈표 4-8〉 부산항 신항 항만배후단지 소요 계약 전력 전망 결과 .....	101
〈표 4-9〉 부산항 신항 소요 계약전력 전망 결과 종합 .....	102
〈표 4-10〉 부산항 신항 전력 수급 분석 결과 .....	103
〈표 5-1〉 전체 소비 전력 대비 태양광발전 전력 생산량 .....	111
〈표 5-2〉 전력수송 중 전력 손실량과 손실금액 추이(최근 5년) .....	118
〈표 5-3〉 전력 손실금액 저감 효과 산정 .....	118
〈표 5-4〉 태양광 발전 전력 정산단가 추이(최근 5년) .....	119
〈표 5-5〉 탄소배출량 추정(총 물동량 기준) .....	121
〈표 5-6〉 탄소배출권 거래금액 추정 .....	121
〈표 5-7〉 디젤 vs 전기 장비의 에너지 비용 비교 .....	122
〈표 5-8〉 부산항 물동량 대비 디젤 vs 전기 장비의 에너지 비용 비교 .....	123
〈표 5-9〉 항만 전력 관리 개략 로드맵(안) .....	128
〈표 6-1〉 「항만법」 제6조(항만기본계획의 내용) 개정(안) .....	139
〈표 6-2〉 「항만법」 제00조(항만에너지통합정보체계의 구축·운영) 개정(안) .....	140

---

# 그림 목차

〈그림 1-1〉 연구 흐름도 .....	8
〈그림 1-2〉 항만에서 환경과 에너지 관리의 전후 관계 .....	9
〈그림 1-3〉 항만에서의 에너지 소비계통 예시 .....	11
〈그림 2-1〉 유럽 항만의 상위 10개 환경 우선 요인의 변화 추이 .....	29
〈그림 2-2〉 POLB의 JCCC 마이크로그리드의 개념 .....	36
〈그림 2-3〉 POLA의 그린 옴니 터미널 프로젝트 개요 .....	37
〈그림 2-4〉 상하이항 뤼징항만구역의 지붕형 태양광 발전시설 .....	42
〈그림 2-5〉 칭다오항의 수소에너지 트레일러와 야드크레인 .....	44
〈그림 2-6〉 요코하마항 화물센터의 수소연료전지시스템 .....	48
〈그림 2-7〉 고베항의 하이브리드 크레인과 전원 공급장치 .....	49
〈그림 2-8〉 싱가포르 주룽항의 세계 최대 항만 태양광발전 시스템 .....	51
〈그림 2-9〉 DP World그룹의 전력 소비 중 재생에너지원 비중(%) .....	52
〈그림 3-1〉 시계열 단일 스텝 예측 모델 .....	69
〈그림 3-2〉 시계열 다중 스텝 예측 모델 .....	70
〈그림 3-3〉 부산항 신항 항만 물동량과 전력 소비량의 상관관계(=0.88) .....	76
〈그림 3-4〉 LSTM 모형을 이용한 부산항 에너지 소비량 전망치(2022~2040년) ....	83
〈그림 4-1〉 부산시 최종 에너지원별 소비량 추이 .....	88
〈그림 4-2〉 부산시 전력 소비량 추이 .....	89
〈그림 4-3〉 부산 지역과 전국 연간 발전량 추이 .....	90
〈그림 4-4〉 부산항 신항 전력 공급 흐름도 .....	94
〈그림 5-1〉 마이크로그리드 개념도 .....	107
〈그림 5-2〉 마이크로그리드 구성과 요소기기 예시 .....	107
〈그림 5-3〉 항만 마이크로그리드 구성 예시 .....	110

---

# 약어 목록

- AGV(무인운반차): Automated Guided Vehicle
- AMP(육상전원공급시설): Alternative Marine Power
- ANN(인공신경망): Artificial Neural Network
- ARIMA(자동회귀 누적이동 평균): Autoregressive Integrated Moving Average
- BSI(영국표준협회): British Standards Institution
- CFS(컨테이너 작업장): Container Freight Station
- CNN(합성곱 신경망): Convolutional Neural Networks
- CNPC(중국석유천연가스그룹): China National Petroleum Corporation
- CY(컨테이너 야드): Container Yard
- DNN(심층신경망): Deep Neural Network
- DR(분산자원): Distributed Resources
- DSCE(두바이최고에너지위원회): Dubai Supreme Council of Energy
- ECH(공컨테이너핸들러): Empty Container Handler
- EMAS(유럽환경감사제도): Eco-Management and Audit Scheme
- EMS(에너지관리시스템): Energy Management System
- EPCI(전기프로그램): Electric Program Investment Charge
- E-RTGC(전기 고무타이어형 트랜스퍼크레인): Electric Rubber Tyred Gantry Crane
- ESPO(유럽항만협회): European Sea Ports Organization
- ESS(전력저장장치): Energy Storage System
- EU(유럽연합): European Union
- GHC(온실가스): Global Greenhouse Gas
- IMO(국제해사기구): International Maritime Organization
- ITT(내륙운송 및 타 부두환적): Internal Terminal Transportation
- JCCC(합동통제센터): Joint Command and Control Center
- LBCT(롱비치컨테이너터미널): Long Beach Container Terminal)

- 
- LSTM(장단기메모리): Long Short Term Memory
  - MSE(평균제곱오차): Mean Squared Error
  - NTS(난양이공대학교): Nanyang Technological University
  - PERS(항만환경검토시스템): Port Environmental Review System
  - PESO(항만 에너지시스템 최적화): Port Energy Systems Optimisation
  - POLA(로스앤젤레스항) Port of Los Angeles
  - POLB(롱비치항): Port of Long Beach
  - QC(안벽 크레인): Quay Crane
  - ReLu(정류 선형 유닛): Rectified Linear Unit
  - RMGC(레일형트랜스퍼크레인): Rail Mounted Gantry Crane
  - RMSE(평균제곱근오차): Root Mean Squared Error
  - RNN(순환신경망): Recurrent Neural Network
  - RSM(반응표면방법론): Response Surface Methodology
  - RTG(방사성동위원소 열전기 발전기): Radioisotope thermoelectric generator
  - RTGC(고무타이어형 트랜스퍼크레인): Electric Rubber Tyred Gantry Crane
  - SC(스트래들 캐리어): Straddle Carrier
  - SDM(자가진단법): Self Diagnosis Method
  - SMES(스마트 에너지 관리시스템): Smart Multi-Energy System
  - TM(견인트랙터): Tug Masters
  - TOS(Terminal Operation System): 터미널 운영시스템
  - Y-CC(요코하마항 화물센터): Yokohama Port Cargo Center
  - YT(야드트랙터): Yard Tractor
  - SIPG(상하이항그룹): Shanghai International Port Group

---

# 정책제안

## ■ 분석 내용 및 방법

1. 부산항 신항의 장기 전력 소비량 전망과 공급소요 추정
2. 전력 소비량은 LSTM 알고리즘을 활용한 딥러닝 방법으로 전망, 2040년 까지 최소 연평균 4.9% 증가
3. 전력 소비 증가에 기반한 공급 소요는 계약전력에 기반하여 추정, 2040년 기준 현재 공급능력의 3.5배 이상 추가 시설 필요

## ■ 정책제안

1. 「항만법」 개정을 통해 항만기본계획 수립 시 에너지 관리계획 수립
2. 항만 에너지 통계 관리를 위한 항만에너지통합정보체계 구축, 운영
3. 항만에너지 관리 기술의 연구개발(R&D) 확대, 항만 마이크로그리드 구축 사업 시범 추진
4. 신재생에너지 다변화, 파력, 압전, 수전해 등 다각화 추진
5. 항만 에너지 관리의 중요성 인식이 핵심



# 요약

## 1. 연구의 목적

- 본 연구는 향후 급격한 증가가 예상되는 향만의 전기에너지 소비 최적화를 위한 기술과 정책대안 제시를 목적으로 함
  - 첫째, 최근 전 세계적으로 향만 운영에서 매우 중요한 이슈 중 하나이나 국내에서는 관심과 연구가 부족했던 향만의 에너지 관리 시급성과 중요성을 강조하고자 함
  - 둘째, 향만 에너지 중 비중이 가장 높으며, 에너지 관리를 위해 매우 중요한 기초가 되나 관련 연구가 거의 없는 장래 전기에너지 소비량을 부산향 실태를 사례로 추정하고자 함
  - 셋째, 향만의 전기에너지 소비를 최적화할 수 있는 대안을 모색하고 로드맵을 제시하고자 함
  - 넷째, 향만의 에너지 관리를 위해 필요한 정부 정책을 제안하고자 함

---

## 2. 연구의 방법과 특징

### 1) 연구의 방법

- 선행연구와 해외 사례는 기존 문헌과 인터넷 자료 등 광범위한 검토를 통해 수행함
- 부산항 신항을 사례로 한 장기 전기에너지 소비량 전망은 에너지 소비 전망 분야에서 널리 적용되고 있는 딥러닝 기법을 활용하고 LSTM 알고리즘을 적용함
- 전망을 위해 사용한 자료는 부산항 신항의 최근 10년간 월별·터미널별 사용 실적과 컨테이너 물동량 전망치를 활용함
- 부산항 신항의 장기 전기 공급소요 추정은 한국전력과 부산항 신항 전기 관련 기업의 전문가 자문을 통해 계약전력으로 도출함
- 에너지 소비 최적화 방안과 기대효과, 로드맵은 선행연구, 해외 사례를 기반으로 연구과정 전반에서 제시된 전문가와 이해관계자의 다양한 의견을 최대한 반영하여 마련함

### 2) 연구의 특징

- 본 연구는 중요성에 비해 그간 국내에서 관심과 준비가 부족했던 항만의 에너지 관리와 관련한 종합적 연구라는 특징이 있음
- 특히 선행연구에서 자료 확보 등의 어려움으로 수행되지 못했던 항만의 전기 에너지 소비량을 전망함
- 또한 그간의 선행연구가 장비와 에너지 관리 방안, 기술 등 특정 분야에 한정하였다면 본 연구는 에너지 관리와 관련한 전반적인 사항을 포괄하여 수행하였음



### 3. 연구 결과

#### 1) 연구 결과 요약

- **항만의 에너지 관리는 핵심 과제**
  - 항만 물동량 증가, 자동화 운영 도입 확대에 따른 에너지 소비량 증가, 에너지 전환 확대에 따른 에너지 비용 증가 등으로 에너지 관리와 최적화는 항만의 우선 정책 중 하나임
- **항만의 에너지 관리 연구는 시작단계**
  - 항만의 에너지 관리 중요성 증가로 관련 연구가 확대되고 있으나 대부분의 연구는 주요 항만의 부문별 전략과 도입기술을 소개하는 수준에 불과하고 가장 핵심인 장래 에너지 소비량 추정과 관련한 종합적 관점에서는 연구 수행이 이루어지지 못함
- **부산항 신항의 전력 소비는 지속 증가하고 있으며 향후에도 크게 증가할 것으로 전망되나 공급 여력은 충분하지 않을 것으로 예상됨**
  - 부산항 신항 전력 사용량은 물동량 증가보다 높은 증가세를 시현함. 특히 전력의 약 60%를 하역장비가 소비함. 향후 완전자동화운영체계 도입, 친환경 시설 확대 등으로 전력 소비가 크게 증가할 것으로 예상되어 항만운영에서 가장 중요한 문제로 부상할 것으로 예상됨
  - 본 연구에서는 딥러닝 방법을 활용하여 2040년까지 부산항 신항의 전기 에너지 소비량을 추정함. 추정 결과에서도 전력 소비량 증가율이 물동량 증가율보다 클 것으로 전망됨. 그러나 공급 여건 분석에서는 향후 대규모 전력시설이 공급되어야 할 것으로 추정되어 공급 가능 여력을 초과할 가능성도 상존함
- **항만의 전력소비 최적화를 위한 다양한 전략 활용 가능**

- 항만의 전력 관리는 ①에너지 소비 최적화를 위한 마이크로그리드 설치 ②신재생에너지 확대 ③에너지 전환 등의 추진이 필요함
- 그중 핵심이며 가장 유효한 전략은 에너지 소비 자체를 줄이는 것임
- **국내 항만의 에너지 관리 정책 마련이 시급함**
- 연구 결과의 종합 결론은 항만의 에너지 관리의 중요성을 하루빨리 인식하고 관련 정책의 마련을 서둘러야 한다는 것임
- 에너지 부족이 현실이 될 때 해결 가능한 방안이 많지 않기 때문에 사전에 준비하지 않으면 큰 위협으로 다가올 수 있음

## 2) 정책대안 제시 내용과 정책화 활용

- **항만 에너지 관리 계획 수립**
- 현행 「항만법」 제6조 제1항 제9호에서 규정하고 있는 ‘기타 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항’에 에너지 수급계획을 포함하여 규정하고 있음. 이를 통해 중장기 에너지 수급계획이 항만계획의 중요한 정책으로 발전 가능할 것임

〈표 요약-1〉 「항만법」 제6조(항만기본계획의 내용) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	① 항만기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.	(현행과 같음)
	1.~8. (생략)	(현행과 같음)
	9. 그 밖에 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항	9. 그 밖에 <b>에너지 수급 계획 등</b> 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항

## ■ 항만 에너지 통계 구축

- 항만의 에너지 관리를 위해서 가장 시급히 해야 할 일은 항만 에너지 통계 구축이기 때문에 「항만법」에 ‘항만에너지통합정보체계 구축과 운영’ 조항의 신설을 제안

〈표 요약-2〉 「항만법」 제00조(항만에너지통합정보체계의 구축·운영) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	신설	<p>① 해양수산부장관은 항만 에너지의 효율적 관리·운영 등을 위하여 필요한 경우에는 항만에너지통합정보체계를 구축·운영할 수 있다.</p> <p>② 해양수산부장관은 제1항에 따라 항만에너지통합정보체계를 구축·운영하기 위하여 다른 중앙행정기관, 지방자치단체 및 「공공기관의 운영에 관한 법률」에 따른 공공기관(이하 “공공기관”이라 한다)의 장 및 항만시설운영자에게 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다.</p> <p>③ 해양수산부장관은 항만에너지통합정보체계를 적절하게 관리할 수 있는 인력 및 조직과 시설·장비를 갖춘 자를 전담기관으로 지정하여 항만건설통합정보체계를 관리·운영하게 할 수 있다.</p>

## ■ 항만 에너지 관리 기술 연구 추진

- 해양수산부 항만국을 중심으로 ‘항만 마이크로그리드 구축 연구개발 사업(가칭)’을 부산항 신항을 대상으로 기획연구를 추진하고 향후 전국 항만으로 확대하여 실용성을 확보해야 함

## ■ 신재생에너지 검토 다각화

- 항만 입지는 풍력과 태양광 외 파력, 블루수소, 해수열 등 다양한 신재생에너지 발전을 개발하고 실증사업을 추진할 수 있다는 장점이 있음

- 
- 방파제 개발 시 파력발전이 동시에 이루어질 수 있도록 하는 것, 선박의 이동이 많은 항로 인근에 항주파를 활용한 파력발전 등 항만을 중심으로 적용 가능한 다양한 신재생에너지 발전을 위한 연구개발의 확대가 필요함
  - 항만 에너지 관리 중요성 인식
  - 정책제언이 반영되고 정책화되기 위해서는 타당성보다 항만의 에너지 관리가 더욱 중요하다는 인식의 전환이 우선되어야 할 것임

### 3) 정책적 기여 등 기대효과

- 항만의 안정적 운영 여건 확보
- 본 연구를 통해 항만 에너지 관리의 중요성과 시급성을 강조하여 향후 항만의 안정적 운영 여건 확보에 기여할 것임
- 항만에너지 관리 기술 발전
- 본 연구에서 제안한 에너지 관리 관련 연구개발(R&D) 확대를 통해 우리나라의 기술력을 제고하고 전국 항만에 확대하여 실용성 확보할 수 있음
- 국가의 탄소중립 실현에 기여
- 항만의 에너지 관리를 통한 에너지 소비량 저감, 탄소 저감 기술 개발 등은 장기적으로 국가 탄소중립 목표 실현에 기여가 가능함

---

# EXECUTIVE SUMMARY

## 1. Purpose

- This study aims to suggest technical and policy alternatives for optimizing electric energy consumption in ports which is expected to dramatically increase in the future.
- First, it intends to emphasize the urgency and importance of energy management in ports, which have recently emerged as one of the most significant issues for port operation across the world but lacked interest and relevant studies domestically.
- Second, it intends to estimate the future electric energy consumption, which accounts for the largest share of port energy consumption and is very important for energy management but lacks related research, based on the case of the Busan New Port.
- Third, it intends to seek for alternatives enabling the optimization of electric energy consumption in ports and to present a roadmap.
- Fourth, a government policy is suggested necessary for energy management in ports.

---

## 2. Methodology and Features

### 1) Methodology

- Preceding studies and overseas case studies were conducted through a wide range of reviews on existing literatures and materials on Internet, etc.
- The forecast of the long-term electric energy consumption focusing on the case of the Busan New Port was presented by means of the deep-learning technique being widely applied in the energy forecasting field and with the application of the LSTM algorithm.
- Materials and data used for the forecast were obtained from the monthly/terminal-specific usage for the recent decade and the forecast of the container cargo volume in the Busan New Port.
- Materials and data used for the forecast were obtained from the monthly/terminal-specific usage electric energy consumption record for the recent decade and the forecast of the container cargo volume in the Busan New Port.
- The required long-term power supply for the Busan New Port was estimated based on the contract demand via expert advice from the Korea Electric Power Corporation (KEPCO) and power-related companies for the Busan New Port.
- The required long-term power supply for the Busan New Port

was estimated based on the contract demand electric supply via expert advice from the Korea Electric Power Corporation (KEPCO) and power-related companies for the Busan New Port.

- The energy consumption optimization plan, expected effect and roadmap were prepared based on the preceding studies and overseas cases, by reflecting a variety of opinions from experts and stakeholders presented throughout the study process.

## **2) Features**

- This study is characterized as a comprehensive study on energy management in ports which, despite its importance, has lacked attention and preparation domestically so far.
  - Specifically, it forecasted the electric energy consumption in ports, which previous studies failed to draw due to difficulties in securing data.
- In addition, while previous studies conducted so far were limited to specific areas such as equipment, energy management plans and technologies, this study was carried out to encompass overall matters regarding energy management.

---

## 3. Results

### 1) Summary

- Energy management in ports is a core challenge.
- Energy management and optimization are one of top priority policies for ports due to the increase of port cargo volume, the increase of energy consumption resulting from the introduction of automation operation, the increase of energy cost caused by the expansion of energy conversion, etc.
- The study on energy management in ports is at the beginning stage.
- Although related studies are expanding due to an increase in the importance of energy management in ports, most of them only introduce the sectoral strategies and adopted technologies of major ports and fail to cover the estimation of future energy consumption, which is the most critical, from a comprehensive perspective.
- Although the power consumption of the Busan New Port has continued to increase and is expected to grow significantly in the future, the supply capacity is not expected to be sufficient.
- The power consumption of the Busan New Port showed an increase trend higher than that of the cargo volume. Especially, about 60% of power was consumed by cargo-handling equipment. This is expected to become the most important problem, since the power consumption is going to increase significantly due to the



introduction of the full-automation operating system and the expansion of eco-friendly facilities, etc.

- This study estimated the electric energy consumption of the Busan New Port by 2040 through the deep-learning method. The estimation results also showed that the increase rate of the power consumption is expected to be greater than that of the cargo volume. However, the analysis on supply conditions estimated that it is required to provide large-scale power facilities in the future, also suggesting a possibility that the supply capacity could be exceeded.
- This study estimated the electric energy consumption of the Busan New Port by 2040 through the deep-learning method. The estimation results also showed that the increase rate of the electric energy consumption is expected to be greater than that of the cargo volume. However, the analysis on supply conditions estimated that it is required to provide large-scale power facilities in the future, also suggesting a possibility that the supply capacity could be exceeded.
- Utilizing various strategies for optimizing the power consumption of ports
- Utilizing various strategies for optimizing the electric energy consumption of ports
- Power management in ports requires ① the installation of the microgrid for optimizing energy consumption, ② the expansion of new renewable energy and ③ the conversion of energy.
- Electric energy management in ports requires ① the installation

---

of the microgrid for optimizing energy consumption, ② the expansion of new renewable energy and ③ the conversion of energy.

- The most fundamental and effective strategy, among others, is to reduce energy consumption itself.
- It is urgent to provide an energy management policy for domestic ports.
- It is urgent to provide an electric energy management policy for domestic ports.
- The overall results of the study show that it is urgent to recognize the importance of energy management in ports as soon as possible and to provide a related policy.
- Unless prepared in advance, energy shortage could pose a great threat down the road because there are few solutions.

## 2) Policy suggestions and policy-making activities

- Establishment of port energy management plan
  - It is desirable to incorporate and stipulate the energy supply and demand plan in “other matters recognized to be necessary by the Minister of Oceans and Fisheries” which are specified in Paragraph 9 of Article 6 (1) of the current 「Port Act」. In doing this, the mid-and long-term energy supply and demand plan is going to develop as the critical policy of the port plan.

〈Summary table〉 「Port Act」 Article 6 (Details of Port Master Plan)  
Revision (draft)

Sort	Current	Improvement (draft)
Content	① The Port Master Plan shall include each of the following items.	(Same as current)
	1～8. (omitted)	(Same as current)
	9. Other matters recognized to be necessary by the Minister of Oceans and Fisheries	9. Other matters, including the energy supply and demand plan, recognized to be necessary by the Minister of Oceans and Fisheries

- Establishment of port energy statistics
  - This study suggested to create the new item of “Establishment and Operation of Integrated Port Energy Information System” in the 「Port Act」, because what is most urgent for energy management in ports is to establish the port energy statistics.

〈Summary table-2〉 「Port Act」 Article 00 (Establishment/Operation of Integrated Port Information System) Revision (draft)

Sort	Current	Improvement (draft)
Content	New	<p>① The Minister of Oceans and Fisheries may establish/operate an integrated port energy information system, if necessary, for the efficient energy management/operation in ports.</p> <p>② The Minister of Oceans and Fisheries may request heads of other central administrative agencies, local governments and public institutions under「Act on Management of Public Institutions」(hereinafter referred to as “public institutions”) and operators of port facilities to provide data and information for the establishment/operation of an integrated port information system in accordance with Section 1.</p> <p>③ The Minister of Oceans and Fisheries may designate a person who is equipped with personnel, an organization and facilities/equipment as a dedicated organization and allow him/her to manage the integrated port energy information system properly.</p>

- Promoting research on port energy management technology
  - The Ports and Harbors Bureau under the Ministry of Oceans and Fisheries is recommended to lead researches to promote the ‘Research and Development Project for Establishment of Port Microgrid (tentative name)’ for the Busan New Port, and to secure its practicality by expanding the project to ports across the country in the future.
- Diversification of new renewable energy review
  - Port areas have advantages in developing a variety of new renewable energy, including wave power, blue hydrogen, seawater heat as well as wind power and solar photovoltaic power and carrying out demonstration projects.

- It is required to expand R&D for the development of various new renewable energy applicable mainly to ports, including the development of breakwater concurrent with wave-power generation as well as wave-power generation utilizing ship wave adjacent sea routes with heavy ship traffic.
- Recognizing the importance of energy management in ports
- What should be prioritized is to create awareness that energy management in ports is significantly more important than validity in order to reflect the policy suggestions and turn them into actual policies.

### **3) Expected benefits including policy contribution**

- Securing stable port operation conditions
- This study contributes to the stable operation of ports in the future by emphasizing the importance and urgency of the energy management in ports.
- Development of port energy management technology
- The energy management-related R&D project suggested in this study will provide an opportunity to improve technology and secure practicability by expanding the project to ports across the country.
- Contributing to carbon neutrality of the country
- Energy management in ports will realize the reduction of energy consumption, the development of a carbon reduction technology, etc., possibly contributing to achieving the national carbon neutrality goal in the long term.



# 01

## 서론

### 제1절 연구의 배경과 목적

---

#### 1. 연구의 배경과 필요성

우리 정부는 2020년 12월 7일 「2050 탄소중립 추진전략」을 확정, 발표하였다. 이는 우리나라의 온실가스 감축 정책을 그간의 적응적(Adaptive) 감축에서 능동적(Proactive) 대응으로 전환하는 중요한 계기가 되었다. 따라서 국내 전 산업 분야에서 저탄소화 추진을 위한 더 크고 강한 노력을 기울일 것으로 전망된다. 해운·항만 분야는 친환경선박의 개발과 확산, 이를 지원할 수 있는 항만인프라 구축이 추진전략에 포함되었다.<sup>1)</sup>

전 세계 물동량의 80% 이상이 해운으로 운송<sup>2)</sup>되고, 항만은 글로벌 공급망의 핵심 거점으로서 수많은 선박이 입출항하고 다양한 산업 활동도 수행되고 있다. 그 결과 해운산업의 에너지 수요가 연간 1.6%씩(2010~2015년) 증가<sup>3)</sup>했고, 항만 부문도 전 세계 온실가스 배출량의 약 3%를 차지<sup>4)</sup>하는

---

1) 관계부처 합동(2020)

2) World Bank(2020), p. 14.

3) Colarossi. D. & P. Principi(2020), p.1, 재인용: Secretariat UNCTAD(2016), p.15.

---

것으로 분석되고 있다. 특히 기후변화 대응이라는 시대적 요구와 산업 여건 변화에 따른 자동화 운영 체계 확산, 각종 하역장비의 전기 동력화 등 에너지 전환, 친환경 항만 구축을 위한 AMP(Alternative Marine Power, 육상 전원공급시설) 설치 등으로 항만의 전기에너지 소비가 크게 확대될 것으로 예상되고 있다.

이 같은 배경과 여건에 따라 세계 주요 선진 항만은 탄소중립을 목표로 로드맵을 수립하거나 다양한 정책을 추진하고 있다. 로테르담항, 앤티워프항, 함부르크항, 포츠머스항, 헬싱키항 등 유럽 항만과 LA-LB항, 뉴욕-뉴저지항 등 미주 지역 항만이 가장 선도적으로 추진하고 있다. 이상의 선진 항만이 추진 중인 주요 정책을 종합해 보면 에너지의 효율적 사용, 신재생 에너지 확대, 에너지 재활용 등 3가지 분야로 요약할 수 있다. 특히 적은 에너지로 동일한 서비스 수준을 유지할 수 있도록 하는 에너지 소비 최적화는 많은 항만에서 공통적으로 취하고 있는 전략이다. 신재생에너지의 활용과 에너지의 재활용은 항만과 지역, 배후산업 여건에 따라 적용 여건과 수준이 상이하기 때문에 공통적으로 적용하기에는 한계가 있다.

반면 국내의 경우에는 항만에서 소비되는 에너지의 관리와 관련한 정책은 거의 없는 실정이다. 항만의 탄소배출량 산정, 탄소배출 저감 등을 위한 정책은 추진 중이나 향후 지속적인 증가가 예상되는 항만의 전기에너지 소비 대책은 없다. 또한 국내외 선행연구에서도 항만의 에너지 소비량 추정의 중요성은 강조하면서도 자료 확보의 어려움 등으로 시도하지 못하고 있는 실정이다. 그러나 부산항, 광양항, 인천항 등 국내 수출입 경제를 받치고 있는 주요 컨테이너항만은 신규로 공급되는 터미널에 자동화운영 체계를 도입할 계획이며, 「항만 지역 등 대기질 개선에 관한 특별법」에 따라 AMP도 설치하도록 규정하고 있다. 이런 상황에서 향후 국내 주요 항만의 전기

---

4) Iris and Lam(2019), p. 176, 재인용: Misra *et al.*(2014), p. 45.



에너지 수요는 급격하게 증가할 것으로 예상되고, 공급이 충분하지 못한 경우 정전으로 항만 운영이 중단되는 사태가 발생할 수도 있다. 항만 운영의 중단은 항만의 서비스 경쟁력을 저하시키는 데 그치지 않고 국가경제 전체에 중대한 영향을 미치게 된다. 최근 코로나 팬데믹으로 발생한 주요 항만의 운영 중단이 자국 내뿐만 아니라 전 세계 공급망과 상품가격 상승에 얼마나 큰 영향을 미치는지를 잘 증명하고 있다. 특히 현재 부산항 신항의 경우 단일 전력 공급으로 3년 주기로 점점 시 터미널 전체가 정전되는 상황에 처해 있다. 물론 향후 시설공급이 확대되면 추가적인 전력공급도 이루어 지겠지만 항만에 공급 가능한 전력량은 한정적이다. 따라서 항만의 전기 에너지 수요와 공급과 관련한 선행적 검토를 통해 적절한 대책을 수립하는 일은 매우 중요하고 시급한 과제이며 그 수행의 필요성도 높다 할 수 있다.

## 2. 연구 목적

본 연구는 부산항 신항을 사례로 장기적인 전기에너지 소비량을 추정하고 장래 공급 능력과 비교하여 수급을 분석한 뒤 전기에너지 관리를 위한 대안 제시를 목적으로 한다. 본 연구가 항만의 에너지 관리를 위한 로드맵 수립을 주제로 하고 있지만, 항만에서는 다양한 에너지를 사용하고 있기 때문에 본 연구는 전기에너지를 중심으로 수행하였다. 특히, 전기에너지 관리를 위해 가장 중요하지만 시도되지 못했던 소비량 추정에 큰 비중을 두고, 수급 분석과 에너지 소비 최적화를 위한 효과적인 대안 제시에 중점을 두고자 하였다. 세부적인 연구 목적은 다음과 같다.

첫째, 항만의 에너지 관리 중요성 강조이다. 항만의 에너지 소비량과 비용은 동반 상승하고 있다. 에너지 소비량 증가는 비용 증가뿐만 아니라 환경에 미치는 영향도 커진다. 특히 항만의 자동화, 친환경화 확산으로

---

전기에너지 소비량이 많아지면서 비중도 높아지고 있다. 그러나 국내 항만 정책에서 에너지 관리 분야는 상대적으로 관심과 연구가 부족한 실정이다. 이에 항만의 에너지 관리가 중요하고 시급한 문제임을 강조하는 것이 목적이다.

둘째, 항만의 전기에너지 소비량의 추정 시도이다. 항만의 전기에너지 관리를 위한 첫 단계가 장래 소비량 추정이나 이에 관한 연구는 거의 없는 것으로 파악된다. 그 이유는 자료 부족, 자료의 신뢰성 결여, 시간 부족 등 다양하게 제시되고 있다. 이에 본 연구에서는 부산항 신항의 터미널별 실적 자료를 최대한 수집하고 계량분석을 통해 장래 전기에너지 소비량을 추정해 보는 것을 목적으로 한다.

셋째, 항만의 전기 소비를 최적화할 수 있는 대안을 모색하고 로드맵을 제시하는 것이다. 향후 크게 증가할 것으로 예상되는 항만의 전기에너지를 가장 효율적으로 소비할 수 있는 방법을 찾는 것이 중요하기 때문이다. 본 연구의 범위상 세부 방안까지 제시하는 것은 어려우나, 해외 사례를 기반으로 가능한 방안을 모색하고 그 효과를 개략적으로 분석하여 향후 정부 정책 수립 시 도입될 수 있도록 정보를 제공하는 것을 목적으로 한다.

넷째, 항만의 전기에너지 관리를 위한 정책의 제안이다. 에너지 관리는 단순히 할 수 있는 것이 아니다. 관련 데이터의 체계적인 수집부터 정부 계획에 반영 등 다양한 추진 과제가 있다. 본 연구는 이와 같이 정부가 추진해야 할 부분과 이를 위해 정비되어야 할 부분을 제시하는 것을 목적으로 한다.

## 제2절 연구 내용과 방법

### 1. 연구 내용

본 연구의 핵심 목적은 부산항 신항을 사례로 하여 장래 전기에너지 소비량을 추정하고, 중장기적으로 에너지 소비를 최적화할 수 있는 방안과 이를 위한 정책대안을 제시하는 것이다. 향후 전기에너지 소비량과 가격의 증가로 에너지 관리가 항만 운영의 핵심 이슈가 될 것이기 때문이다. 더욱 중요한 것은 자칫 전기에너지 부족으로 항만 운영이 중단되는 사태가 발생할 경우 전체 물류 공급망뿐만 아니라 국가경제 전체에 미치는 영향이 매우 크기 때문이다.

이러한 연구 목적 달성을 위한 본 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

제1장에서는 연구의 배경과 목적, 연구 내용과 방법, 선행연구와 차별성 등을 제시한다. 특히 본 연구의 주요 목적 중 하나인 항만의 전기에너지 소비량 추정과 관련한 선행연구를 집중 검토한다. 선행연구는 항만과 해운 분야에서 수행된 에너지 소비 관련 연구와 그 외 타 산업 분야의 에너지 소비 관련 연구를 종합적으로 검토한다. 이를 통해 다양한 수요 추정 방법론 중 본 연구에 적합한 방법론을 선정하고 선행연구와 차이점을 제시한다.

제2장에서는 해외 주요 항만의 에너지 관리 방안과 정책에 관한 주요 사례를 검토한다. 해외 선진 항만의 에너지 관리 전략을 종합 정리하고, 그중 국내 항만에 적용 가능한 대안을 채택하여 본 연구에 적용한다.

제3장에서는 부산항 신항을 대상으로 장래 전기에너지 소비량을 전망한다. 전기에너지를 중심으로 한 이유는 향후 부산항 신항에 신규로 공급되는 컨테이너부두는 완전자동화 운영체제로 개발, 운영될 예정이며, 이는

---

곧 모든 하역장비가 전기동력으로 전환되어 전기에너지가 가장 중요한 에너지원이 되기 때문이다. 전기에너지 소비량 전망의 목표연도는 해양수산부의 항만기본계획상 진해신항 개발계획을 고려하여 2040년으로 설정하였다.

제4장에서는 부산항 신항의 소요 전력 공급을 추정한다. 즉, 제3장에서 추정된 부산항 신항의 장래 전기 에너지 소비량을 활용하여 향후 공급해야 할 전력 규모를 파악한다. 이때 공급 능력은 계약전력을 기준으로 한다. 공급 능력 추정에 관해서는 한국전력공사에 자문해 그 타당성을 제고하고자 한다.

제5장에서는 제3장과 제4장의 분석 결과를 토대로 부산항 신항의 전력 관리최적화를 위한 대안과 로드맵을 제시한다. 국내외 사례 조사를 기반으로 부산항 신항의 여건을 고려하여 다양한 방안을 제안하고자 한다. 아울러 제시된 방안별 정량적인 효과도 개략적으로 분석하여 저감의 당위성을 확보하고자 한다.

제6장에서는 본 연구의 내용을 종합적으로 정리하고 체계적인 항만의 에너지 관리를 위한 정부정책을 제언한다. 정부정책은 현재 항만의 에너지 소비관리를 위해 추진 중인 기존 정책의 검토를 고려하여 제시한다.

## 2. 연구 방법

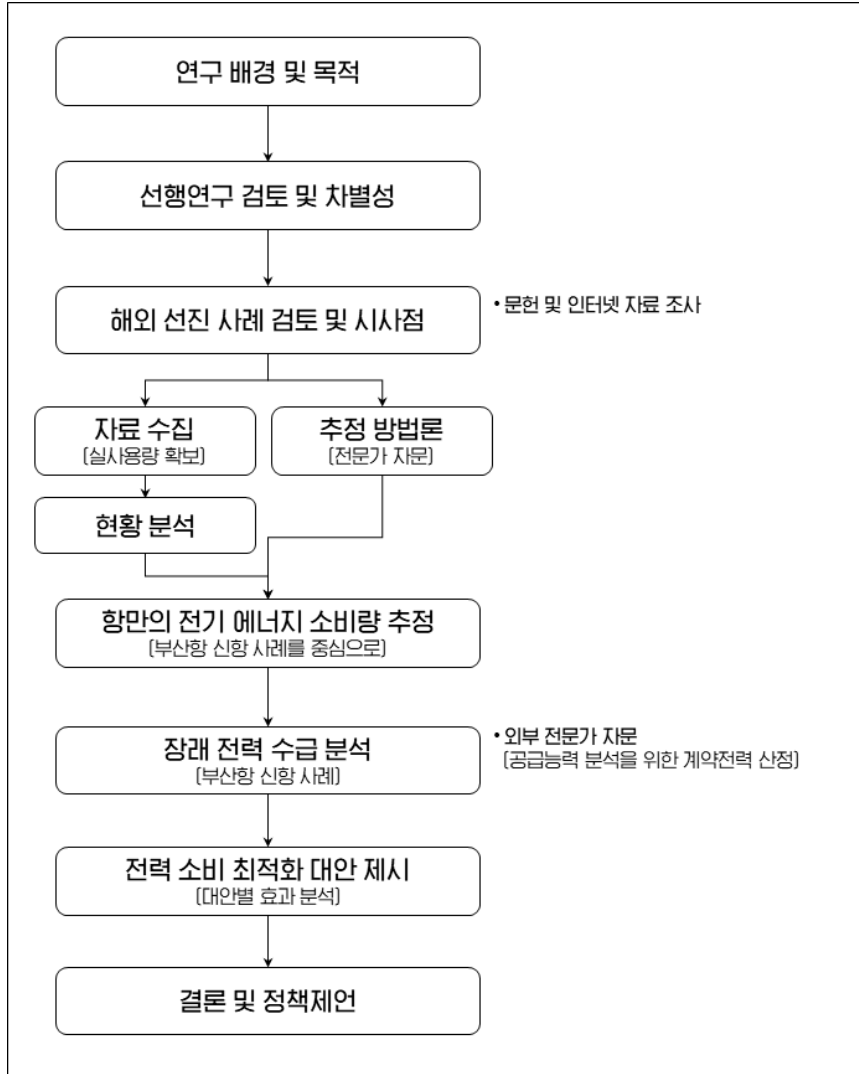
본 연구는 국내외 선행연구, 해외 사례 조사, 기초 자료 수집, 장래 전기 에너지 수요 추정, 장래 전력 공급 능력 분석과 대안 제시 등을 중심으로 진행하였다. 우선 해외 사례 조사는 현지 조사가 어려운 현 여건을 고려하여 문헌 조사와 인터넷 조사로 수행하였다. 따라서 보다 세부적인 사례 분석을 하지 못한 한계점이 있다.

본 연구의 핵심인 장래 전기에너지 소비량 추정을 위한 기초 자료는 부산항 신항의 154k 변전소 관리소와 터미널 운영사를 대상으로 터미널별·월별 실사용량을 수집하였다. 항만의 에너지 소비량 추정이 어려운 이유 중 가장 큰 이유인 자료 확보의 어려움을 극복하기 위해 노력하였다. 그러나 터미널별로 보유하고 있는 세부 전력 소비 통계는 통일된 기준과 구분이 없어 일치하지 않는 세부 분야별 사용량을 수요 추정에 활용하기는 어렵기 때문에 현황 분석에만 사용하였다. 장래 전기에너지 수요 전망에는 전력 관리기관의 최근 10년간 터미널별·월별 총 사용량 실적을 활용하여 전문가 자문을 통해 에너지 소비 추정에 널리 적용되고 있는 딥러닝 기법을 도입하고 공동 작업을 수행하였다. 항만의 전기에너지 소비량 추정과 관련한 선행연구가 거의 없는 상황으로 본 연구에서는 가용한 자료를 활용한 최적 방법론을 찾기 위해 노력하였다.

이후 공급 능력 분석에서도 장래 공급 가능한 계약 전력 분석이 필요하기 때문에 부산항 신항에 전기 공급 업무를 수행하는 전문가의 자문을 통해 분석하였다. 계약전력 분석의 범위는 현재 부산항 신항 터미널, 향후 개장 예정인 서컨테이너터미널, 장래 계획 중인 진해신항과 부두별 설치 예정인 AMP 등과 더불어 항만배후단지까지, 항만에서 전력을 소비하는 대상 전반을 포함하였다.

연구 과정 전반부에서 다양한 전문가와 이해관계자의 의견을 수렴하였다. 착수심의, 중간심의, 최종심의 과정을 통해 항만공사, 해양수산부, 터미널 운영사, 전기 전문가, 학계·연구소의 항만 전문가 등 다양한 전문가의 의견을 최대한 수렴하였다. 세미나 또는 워크숍 등을 통해 의견을 직접 수렴하는 것이 가장 적절하나 코로나 상황을 고려하여 심의 과정을 적극적으로 활용하고 검토 분야를 다양화하기 위해 노력하였다. 이상과 같은 본 연구 수행을 위한 전체적인 연구 흐름은 <그림 1-1>과 같다.

〈그림 1-1〉 연구 흐름도



자료: 저자 작성.

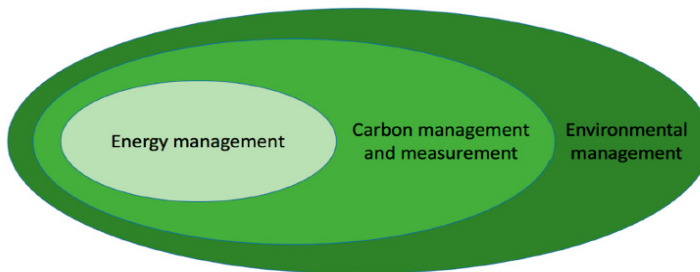
## 제3절 선행연구 검토

### 1. 선행연구

#### 1) 항만의 에너지 효율화 관련 선행연구

항만의 에너지 효율화 연구는 친환경 항만 구축의 틀 내에서 같이 다루어져 왔다(Eleftherios *et al.*, 2019). 특히 에너지 효율화는 탄소를 포함한 온실가스(GHC) 배출과 밀접한 관계가 있어 다수의 선행연구에서는 항만의 온실가스 배출 저감을 위한 에너지 효율화 방안을 제시하고 있다(국토해양부, 2008; 한국해양수산개발원, 2009; 김태균·김환성 2014; 조진행, 2019; Geerlings and Duin, 2011; Moya, Paja and Maldonado, 2019; Alamoush, Ballini and Ölçer, 2020; Puig *et al.*, 2020; Sifakis and Tsoutsos, 2021 등).

〈그림 1-2〉 항만에서 환경과 에너지 관리의 전후 관계



자료: Eleftherios *et al.*(2019), p. 6

또한 모든 산업 분야에서 환경적 측면의 평가가 중요해짐에 따라 항만분야에서도 환경관리 성과나 환경 효율성을 측정한 연구도 활발히 진행되고 있다(Darbra *et al.*, 2004; Chang, 2013; Acciaro *et al.*, 2014a; Wang

---

*et al.*, 2020; Puig *et al.*, 2020 등). 항만의 환경관리 성과 평가 방법으로는 과거의 ISO 14001(환경경영체제) 또는 EU의 EMAS(Eco-Management and Audit Scheme)를 대신하여 상대적으로 간편한 자가진단법(SDM: Self Diagnosis Method)이 개발되었고 현재 ESPO(European Sea Ports Organisation)의 유럽 항만 환경관리 성과 평가 등에 활용되고 있다(Darbra *et al.*, 2004). Acciaro *et al.*(2014a)는 주요 7개 항만의 친환경 항만 목표 달성을 위한 혁신조치의 달성 수준을 평가했다. 평가지표는 항만의 4개 기능적 측면(토지임대자 기능, 규제담당자 기능, 운영자 기능, 커뮤니티 관리자 기능)으로 구분하여 친환경 항만 목표를 설정하였다. 항만 담당자를 대상으로 한 델파이조사를 통해 혁신조치의 친환경 목표 달성 정도를 측정한 결과, ‘환경규정 관련 정보 공유’ 목표 달성 수준이 가장 높은 것으로 나타났다.

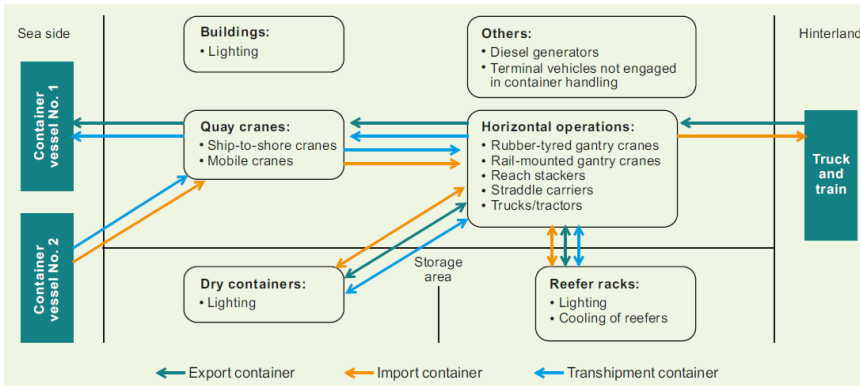
항만의 환경 효율성 측정은 한국 항만의 환경 효율성을 SBM-DEA 모형을 통해 평가한 Chang(2013)의 연구를 시작으로 점차 증가하는 추세를 보인다. 대표적으로 Wang *et al.*(2020)은 항만의 친환경 효율성(Green efficiency)이란 항만의 경제적, 환경적 편익을 고려한 항만 운영의 효율성이라고 정의하고, 게임교차효율성 모형을 이용한 DEA를 통해 18개 중국 항만의 친환경 효율성을 비교하였다. 분석 결과 중국 항만의 친환경 효율성은 전반적으로 낮은 수준이며 불균형적이라고 제시하였다.

또한 항만의 친환경화를 위한 신규 장비 도입, 물동량 증가, 자동화 운영 시스템 구축 확대 등으로 항만의 에너지와 비용이 크게 증가하면서 에너지 효율화만을 대상으로 한 연구도 수행되고 있다. 항만에서 에너지 효율화는 결국 보다 적은 에너지 소비를 통해 동일한 항만 서비스를 제공하는 것으로 에너지 효율화를 위해서는 항만의 에너지원 파악과 정확한 에너지 소비량 측정이 중요하다(Iris and Lam, 2019). 항만에서 사용되는 에너지원은 기본적으로 유류, 천연가스, 전력 등으로 구성된다(Bjerkan and Seter,



2019). 또한 항만의 공간별, 소비 형태별, 작업 유형별, 설비·장비별 등에 따라 에너지 소비패턴도 다양하며, Wilmsmeier(2016)는 남미 컨테이너 터미널의 화물 종류별(수출, 수입, 환적 등) 업무 흐름에 따른 에너지 소비 계통을 <그림 1-3>과 같이 제시하였다.

<그림 1-3> 항만에서의 에너지 소비계통 예시



자료: Wilmsmeier(2016), p. 3

항만의 에너지 소비가 다양하게 구분됨에 따라 선행연구에서는 항만에서 에너지 소비 절감과 효율화 방안을 여러 가지 측면에서 제시하고 있다. 먼저 항만의 운영적 측면에 초점을 둔 연구가 있는데(김우선·최상희·하태영, 2007; 최용석·김우선·손호성, 2008; Ja, Cho and Pak, 2012; He, Huang and Yan, 2015 등), 주로 특정 항만을 대상으로 한 시뮬레이션 분석을 통해 에너지 효율 개선을 제시하고 있다. Ja *et al.*(2012)은 영국 S항의 SC(Straddle Carrier), TM(Tug Masters), ECH(Empty Container Handler)의 연료 소비량과 인건비, 운영비, 운영시간 데이터 등을 기준으로 한 시뮬레이션 분석을 통해 항만 내 장비 운행 프로세스 개선, 운전기술 고도화, 중량화물의 배치공간 재구조화 등으로 에너지 소비를 절감할 수 있다고 제시했다.

그 다음으로 장비·설비와 신에너지원 활용 등 기술적인 측면에서도 항만의 에너지 효율화 방안을 제시하고 있다(SIEMENS, 2017; 정태원 2018; Iris and Lam, 2019; Bjerkan and Seter, 2019; Sifakis and Tsoutsos, 2021 등). 특히 스마트항만의 개념이 부각됨에 따라 스마트기술을 활용한 에너지 효율화 방안이 제시되고 있는데, SIEMENS(2017)는 ①선박과 안벽 ②터미널과 장치장 ③배후지와 연계라는 물류 공급망에 따라 항만의 에너지 효율성을 제고할 수 있는 스마트기술을 제시하였다. Sifakis and Tsoutsos(2021)는 2010년 이후 발표된 선행연구를 바탕으로 ‘에너지제로 항만(nZEP: nearly Zero Energy Port)’을 실현하기 위한 기술·기법을 도출했으며, 항만의 경제적, 기술적 성숙도와 경험에 따라 <표 1-1>과 같이 국제항(International port), 국가항(National port), 지방항(Local port)으로 구분하여 도출된 기술·기법의 적용이 가능하다고 제시했다.

<표 1-1> 항만의 에너지 효율화 기술·기법과 적용 가능 항만

응용 분야	기술·기법	전제 조건	적용 가능 항만
전력 공급	바이오매스에너지	사용 가능한 에너지원	국제항, 국가항
	풍력(육상·해상)	강한 풍력 잠재력	모든 항만
	태양광에너지	태양광 잠재력	모든 항만
	조수(Tidal)에너지	강한 풍력 및 파랑	모든 항만
	지열에너지	가용 에너지원 및 지열 용량	국제항
	AMP	기술 노하우	모든 항만
	에너지 저장시스템	기술 노하우	모든 항만
거리, 건물 의 조명 및 공조시스템 (HVAC), 운송수단	혁신 기술	-	모든 항만
	자동화 센서	기술 노하우	모든 항만
	전기 차량	충분한 에너지용량을 갖춘 배터리	모든 항만
	수소에너지	사용 가능한 에너지원 및 기술 노하우	모든 항만
	바이오연료	사용 가능한 바이오연료	모든 항만

응용 분야	기술·기법	전제 조건	적용 가능 항만
건물 내 환경	최적화된 온도관리 공조시스템(HVAC)	첨단 컴퓨터 및 기술 노하우	모든 항만
	원격조종 시스템	첨단 컴퓨터	국제항, 국가항
	효율적인 온수 사용	자동화 보일러, 효율적 사용 노하우	모든 항만
화물, 물류	원격조정 시스템	첨단 컴퓨터	국제항, 국가항
	자동화 컨테이너터미널	자동화 터미널 및 기술 노하우	국제항
	전기화 작업 설비·장비	충분한 에너지용량을 갖춘 배터리	국제항
	AMP	기술 노하우	모든 항만
소비 관리	혁신적인 친환경 기술·기법	해박한 관련 지식	모든 항만
	입항 선박에 대한 환경 생애주기분석(LCA)	풍부한 경력을 갖춘 연구자	국제항
	유류폐기물을 통한 발전	-	국제항, 국가항

자료: Sifakis and Tsoutsos(2021), p. 12.

주: 국가항(National port)은 한 국가 내 교통수요를 충족시키며 소규모의 물류인프라를 갖춘 항만, 국제항(International port)은 국가의 국제적인 수요에 부합하고 대규모의 물류인프라를 갖춘 항만

최근에는 에너지 관리시스템의 측면에서 항만의 에너지 절감과 효율화 방안을 제시한 연구도 점차 증가하고 있는 추세이다(Acciaro *et al.*, 2014b; Iris and Lam, 2019; Song *et. al.*, 2020; Molavi *et al.*, 2020 등). Iris and Lam(2019)은 항만의 에너지 관리시스템 측면에서 실시간 에너지 소비 모니터링 시스템을 포함한 에너지 소비 추정, 신재생에너지를 포함한 에너지 공급, 마이크로그리드와 스마트그리드 등 스마트 에너지관리시스템, 에너지 관리 정책 등이 적용 가능하다고 제시하였다. 특히 에너지 소비 정보가 없으면 에너지 효율화 방안을 적용하기 어렵기 때문에 에너지 효율화에 앞서 정확한 에너지 소비량 추정이 선행되어야 한다고 강조하고 있다. Molavi *et al.*(2020)는 기존 연구(Molavi, Lim and Race, 2019)에서 제시한 스마트항만 지수(Smart Port Index) 매트릭스를 활용

하여 마이크로그리드 시스템 적용이 항만의 운영, 환경, 에너지, 안전·보안 등 4가지 영역에서 항만의 성과를 개선할 수 있는 방법을 모색하였다. 이 연구에서 휴스턴의 Barbours Cut 터미널을 대상으로 한 시뮬레이션 결과, 터미널에 마이크로그리드 시스템 적용은 에너지 절감, 탄소 배출 저감, 주 전력 계통의 에너지 의존도 감소 등의 효과가 있다고 주장하였다.

이상과 같이 에너지 효율화는 항만 분야에서도 중요한 연구주제로 발전해 왔다. 2010년 이전까지는 친환경항만 전략의 일부분으로 에너지 효율화를 다루고 있었으나, 최근에는 스마트항만의 측면에서 또는 에너지 관리 시스템 측면에서 에너지 효율화를 다루고 있는 연구가 증가하고 있다. 그러나 아직까지 직접적인 항만 에너지 관리 관점의 연구는 소수에 불과하고 국내에서는 수행된 사례가 없는 것으로 파악된다.

〈표 1-2〉 항만 에너지 효율화 관련 주요 선행연구

저자(연도)	연구 내용	연구 방법
Darbra <i>et al.</i> (2004)	• 유럽 항만의 환경관리 성과 측정에 도입된 SDM 방법과 기존 방법(ISO 14001 등) 비교 분석	• 문헌 연구 • 비교 연구
김우선 · 최상희 · 하태영 (2007)	• 국내 컨테이너터미널의 하역비용 구조 및 다양한 대안의 에너지 절감 효과 분석 • 운영대안, 장치대안, 신기술 대안으로 구분하여 대안별 적용 절차 제시	• 하역비용 분석 • 시뮬레이션 분석 • 사례 연구
최용석 · 김우선 · 손호성 (2008)	• 컨테이너터미널 하역시스템 분석을 통해 에너지 전환 모델, 고정비용 절감 모델, 변동비용 절감 모델 제시	• 문헌 연구 • 사례 연구
Ja, Cho and Pak(2012)	• 항만 주요 장비별 연료소비량, 운영비 등을 바탕으로 시뮬레이션 분석을 통해 에너지 절감 방안 제시 • 장비운영 프로세스 개선, 운전기술 고도화, 화물 배치공간 재구조화 등 방안으로 제시	• 시뮬레이션 분석

저자(연도)	연구 내용	연구 방법
Chang (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SBM-DEA 모델을 통한 한국 항만들의 환경 효율성 측정</li> <li>• 경제성과 환경성을 동시 고려 시, 경제적 효율성은 감소할 수 있으나 환경 효율성은 제고</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SBM-DEA 모델</li> </ul>
Acciaro <i>et al.</i> (2014a)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만의 환경지속가능성 혁신 전략들의 중요도에 대한 정량적 평가지표 제시</li> <li>• 앤트워프, 제노바, 함부르크, LA·LB, 리예카, 싱가포르, 지브르게 7개 항만을 대상으로 친환경 혁신 전략 수집</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사례 연구</li> <li>• 델파이 분석</li> <li>• Wilcoxon 검증</li> </ul>
Acciaro <i>et al.</i> (2014b)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 함부르크, 제노아항의 사례 분석을 통해 항만 에너지 수요·공급 관리 전략 제시</li> <li>• 항만당국의 에너지 계획 및 소비 관리에 대한 중요성 강조</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌 연구</li> <li>• 사례 연구</li> </ul>
Wilmsmeier (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 남미 항만의 운영장비 및 연료별 에너지 소비량 분석</li> <li>• 터미널의 에너지절감을 위해 소비를 바탕으로 한 터미널 요금 산정, 에너지관리시스템 개발 지원 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aactivity-Bas ed-Cost 분석</li> </ul>
He, Huang and Yan(2015)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에너지 효율성 측면의 최적의 YC 스케줄링 방법 제시</li> <li>• 시뮬레이션 시 유전알고리즘(GA)과 PSO알고리즘 방법을 통해 다양한 크기의 YC 스케줄링 문제 해결 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 혼합정수계획법 (MIP)</li> <li>• 시뮬레이션 분석</li> </ul>
SIEMENS (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만의 물류사슬에 따라 에너지 효율성을 제고할 수 있는 스마트기술 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사례 연구</li> </ul>
정태원 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 세계 스마트항만 선진 사례 분석을 통해 우리나라 스마트항만의 중점 과제와 세부 추진과제 제시</li> <li>• 에너지 동력 공급에서 향후 전 부문 전기동력 사용 및 마이 크로그리드를 통한 전력관리 실현 전망</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사례 연구</li> </ul>
Eleftherios <i>et al.</i> (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ISO 50001(에너지경영시스템) 내용 분석</li> <li>• 유럽 주요 항만의 에너지 효율화 정책 및 항만에너지 지원 인프라와 설비 분석</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌연구</li> <li>• 사례 연구</li> </ul>
Song <i>et al.</i> (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통합 항만에너지시스템(IPES) 모델링을 위한 프레임 워크 개발 및 EH(energy hub)기반 계획모델 구축</li> <li>• 시뮬레이션 결과 IPES가 기존 시스템 대비 약 26% 개선</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시뮬레이션 분석</li> <li>• 민감도 분석</li> </ul>
Iris and Lam(2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만의 운영전략적, 기술적, 에너지 관리시스템적 측면에서 에너지 효율화 방안 제시</li> <li>• 에너지 관리시스템에는 에너지 소비 모니터링 시스템, 에너지 관리 정책, 스마트 에너지 관리시스템 등이 포함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌 연구</li> </ul>
Bjerkar and Seter(2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만관리 및 계획, 전력 및 연료, 해상 활동, 육상 활동 등 4 가지 주요 범주에 대한 26개의 수단 및 기술 검토</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌 연구</li> </ul>

저자(연도)	연구 내용	연구 방법
Wang <i>et al.</i> (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중국 18개 항만 대상 교차효율성 모델을 통한 항만 환경 효율성 비교</li> <li>• 중국 항만의 개선 방안 및 친환경 항만 개발 전략 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 게임교차효율성 모델</li> <li>• 토빗 회귀분석</li> </ul>
Alamouch, Ballini and Ölçer (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만의 온실가스 감축을 위해 정보, 장비, 에너지(신재생에너지) 등, 에너지 효율화, 운영, 육상운송, 선박과 항만연계 측면의 19가지 조치 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌 연구</li> </ul>
Molavi, Lim and Race(2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 마이크로그리드 통합을 스마트항만 운영 개선 방안 제시</li> <li>• 휴스턴항 시뮬레이션 분석 결과 마이크로그리드 시스템 적용은 에너지 및 탄소배출 절감 등의 효과 입증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 추계프로그래밍 기법</li> <li>• 시뮬레이션 분석</li> </ul>
Puig <i>et al.</i> (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SDM을 이용한 유럽 90개 항만의 환경관리 성과 분석(54개 지표의 데이터 분석)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 자가진단법 (SDM)</li> </ul>
Sifakis and Tsoutsos (2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 에너지 소비 절감, 친환경 관련 문헌 검토 결과 도출된 요인을 경제적, 기술적 성숙도 관점의 IPA 분석을 통해 평가</li> <li>• SWOT 분석을 통해 'nZEP'으로 전환 시 장단점 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌 연구</li> <li>• IPA 분석</li> <li>• SWOT 분석</li> </ul>

자료: 저자 작성.

## 2) 에너지 소비량 추정 및 전망 관련 연구

Iris and Lam(2019)의 연구에서 강조한 바와 같이 항만의 에너지를 효율적으로 관리하기 위해서는 항만의 에너지 소비량 추정이 중요하다. 그러나 항만의 에너지 소비량 추정과 관련된 연구는 그 중요성에 비해 부족한 상황이며 일부 수행된 연구(Wilmsmeier *et al.*, 2014; Wilmsmeier, 2016; Acciaro *et al.*, 2014a; Wang *et al.*, 2020 등)도 특정 하역 장비와 운영건물 등을 대상으로 사용 실적 기반의 원단위 분석 또는 설문조사 결과를 활용한 수준이다. 그 이유는 항만 분야의 에너지 소비량 추정을 위해 필요한 신뢰성 있는 자료 수집이 어렵기 때문이다(Iris and Lam, 2019).

항만 분야의 에너지 소비량 추정과 관련한 연구는 크게 항만 에너지 소비에 따른 CO<sub>2</sub> 등 대기오염물질의 배출량 추정(국토해양부, 2008; 윤종상 외, 2009; 부산광역시, 2010; Geerlings and Duin, 2011; Yang and Lin, 2013; 노영훈·장영태, 2015; 최상진 외, 2016; Moya, Paja and Maldonadoa, 2019 등), 환경오염 저감 또는 에너지 비용 절감 목적의 에너지 효율화 방안 마련을 위한 하역 장비와 공간(운영동, 냉동컨테이너 장치장 등)의 에너지 소비량 추정으로 구분할 수 있다(JA, Cho and Pak, 2012; Wilmsmeier *et al.*, 2014; Wilmsmeier, 2016; Iris and Lam, 2019; Wang *et al.*, 2020; Haibo, Wen and Xiaowei, 2019 등).

주요 연구 방법은 기초 통계자료 등의 부족에 따라 주로 원단위법(김우선 외, 2007; 국토해양부, 2008; Geerlings and Duin, 2011; 최상진 외, 2016; Moya *et al.*, 2019 등), 설문조사(Wilmsmeier *et al.*, 2014; 김태균 외, 2014 등), 원가계산방법(Wilmsmeier, 2016 등) 등 현재 현황조사와 설문 기반 평가 방식을 주로 활용하였다. 항만의 에너지 소비량과 관련이 있는 주된 요인은 터미널 레이아웃(Geerlings and Duin, 2011; JA, Cho and Pak, 2012 등), 장비 구성 및 성능(Yang and Lin, 2013; Wilmsmeier *et al.*, 2014; Wilmsmeier, 2016; Moya, Paja and Maldonadoa, 2019; Iris and Lam, 2019 등) 등으로 나타났다. 컨테이너터미널 레이아웃에 따라 CO<sub>2</sub> 배출량이 차이가 나며 동일 항만 내에서 효율적인 배치를 통해 CO<sub>2</sub> 배출을 최대 70%까지 저감 가능한 것으로 나타났다(Geerlings and Duin, 2011). 또한 장비 구성과 성능에 따라 에너지 소비 효율성이 다른 것으로 분석되었다(Iris and Lam, 2019). 특히 항만 내에서 사용되는 전력 중 35~40%가 냉동 컨테이너 장치장에서 사용하고 있으며(Duin *et al.*, 2018), 하역 장비 중 Electric-RTGC와 A-RMGC(Automated Rail Mounted Gantry Crane)의 에너지효율이 가장 높은 것으로 나타났다(Yang and Lin, 2013). Iris and Lam(2019)은 전 세계 주요 항만 12개를 대상으로 에너지

---

효율화를 위한 전략과 대체 연료, 마이크로그리드 등 에너지 관리시스템 구축 필요성 등을 제시하였으나, 설문조사와 통계 분석을 활용한 문헌 연구 수준이다.

항만 분야의 에너지 소비량 추정과 관련된 선행연구 결과를 요약하면 항만의 에너지 소비를 통해 CO<sub>2</sub> 등 대기오염물질이 많이 발생하고 있으며, 대기오염물질 배출량 저감 또는 에너지비용 절감을 위하여 에너지 소비를 줄여야 한다는 것이다. 그러나 기존 연구가 대기오염물질 배출량 산정을 위해 현재 기준의 에너지 소비량 추정에만 국한되어 있으며, 중장기 에너지 수요 전망에 관한 연구는 찾아보기 어려웠다. 이러한 제한적인 연구의 주된 원인은 Iris and Lam(2019)이 지적한 것처럼 신뢰성 있는 에너지 소비 자료의 부족으로 판단된다. 특히 자동화 항만 도입, 스마트·지능화 항만 구축 추진에 따른 전력 사용량의 급격한 증가가 당면과제인 현재 시점에서 매우 아쉬운 부분이라 할 수 있다.

선박 분야에서는 에너지 소비량 추정 관련 연구가 항만 분야 대비 상대적으로 활발하게 수행되고 있다(Yuan and Nian, 2018; Tie *et al.*, 2019; Peng *et al.*, 2020; Uyanik, Karatug and Arslanoglu, 2020; Isikli *et al.*, 2020 등). 이는 선박 항해일지(Logbook)<sup>5)</sup>에 연료 소비량을 기록하고 있어 과거부터 축적된 통계자료가 방대하고 2010년대에 들어 EU, IMO 등에서 선박 실제 연비자료를 공개하는 등 연료 소비량 자료 수집이 비교적 용이하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 선박의 운영비용이 지속적으로 증가하는 상황에서 연료소비를 줄이는 것이 가장 효과적인 운영비용 절감 방안이기 때문일 것이다. 이들 연구에서는 반응표면방법론(RSM: Response Surface Methodology)을 활용한 요인분석(Isikli *et al.*, 2020), 가우스 프로세스 회귀모형(Yuan and Nian, 2018), 강화학습

---

5) 항해일지에는 선박의 출항, 항해, 입항 등 모든 상황을 기록하게 되어 있으며 전일 정보부터 당일 정보까지 연료 소비량과 잔량을 기록하고 있음



(Tie *et al.*, 2019), 지도학습(Peng *et al.*, 2020; Uyanik, Karatug and Arslanoglu, 2020) 등을 활용하여 선박의 연료 소비량을 추정하고 연료 소비 절감 방안을 제시하였다. 선박의 에너지 소비량과 관련한 주된 요인은 순중량, 재화중량, 실중량(Peng *et al.*, 2020), 엔진의 분당회전수(RPM), 적재화물 중량, 흘수(Isikli *et al.*, 2020) 등 선박의 제원과 바람, 파랑 등 기상 조건(Yuan and Nian, 2018), 터미널 하역 생산성(Peng *et al.*, 2020) 등으로 나타났다. 특히 운항 선박과 접안 선박의 에너지 효율화 방안이 다르게 나타났다.

운항 중인 선박의 에너지 사용에 가장 큰 영향을 미치는 것은 선박의 속도로, 10% 감속하면 소비량은 17% 감소하는 것으로 나타났다(Yuan and Nian, 2018). 그러나 선박 속도 감속에 따른 연료 소비량 감소 효과는 비선형적으로 임계점을 지나면 오히려 비효율적인 것으로 나타나 에너지 효율화를 위해서는 적정 수준의 속도 준수가 필요한 것으로 제시되었다(Isikli *et al.*, 2020). 접안 선박의 경우에는 항만의 하역 생산성이 가장 중요한 요인으로 제시되었으며, 하역 생산성이 2배 증가하면 선박 에너지 소비량은 34.2% 감소하는 것으로 나타나 항만의 적절한 하역 생산성 유지가 중요한 것으로 분석되었다(Peng *et al.*, 2020).

타 산업 분야에서는 상업·공공용 건물, 제조업 등을 중심으로 에너지 소비량 추정 연구가 국내외에서 상당히 활발하게 수행되었다. 1990년대부터 2000년대까지 연구에서는 건물의 형상과 전력소비량의 관계를 이용해 미래 소비량을 추정하는 다중회귀모형을 활용한 연구(Noren and Pyrko, 1998; Lam *et al.*, 2008; 이강희·류승훈·이은택, 2009 등) 또는 시설·건물 규모에 따른 전력 사용량 기반의 원단위법(박민용·김명진, 1995, Deng and Burnett, 2000; 김우선·최상희·하태영, 2007; 국토해양부, 2008; Hu *et al.*, 2004; 이정재 외, 2014 등) 등이 많았으나, 2010년대에 들어서는 과거 전력 사용량 기반의 오차수정모형(원두환, 2012, 김민경·박권숙·김세용,

---

2017), ARIMA 등 시계열 모형(안병훈·최희련·이홍철, 2015; Miswan *et al.*, 2016; 박경미·김재희, 2019)을 이용한 추정 방법론을 동시에 활용해 왔다. 최근에는 컴퓨팅 기술 발달에 따라 인공지능망(Neto and Fiorelli, 2008; 김미경·홍철의, 2016; Chae *et al.*, 2016 등) 또는 신경망에 기반한 CNN 또는 LSTM 모형(김도현 외, 2019; Somu, Raman and Ramamritham, 2021 등), 서포트벡터머신(SVM)을 통한 회귀분석(탁해성 외, 2016; Paterakis *et al.*, 2017 등), 랜덤포레스트(Robinson *et al.*, 2017 등) 등 머신러닝(Machine learning) 방법론을 활용한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

주요 연구 결과를 살펴보면 국내 건물 부문의 에너지 소비량은 2013년 기준 국내 총에너지 소비량의 17.8%이며 그중 주택 부문이 9.95%, 상업건물이 7.82%를 차지하고, 에너지 효율화 노력으로 주택 부문과 상업건물의 에너지 원단위는 지속해서 감소하는 추세이나 주택의 원단위는 상업건물 대비 높은 수준으로 나타났다(정영선·정해권, 2016). 이렇듯 거주자 특성에 따라 전력 사용 패턴이 달라 주거용 건물에 대한 전력 사용 지침 마련 등을 통한 효율화 필요성이 제기되었다(박경미·김재희, 2019). 또한, 대학캠퍼스에서는 LED 교체, 건물 외벽 보강, 신재생에너지 활용을 통해 행정동, 강의동, 연구동 등의 에너지 소비량 중 최대 40%까지 절감 가능하였다(김미경·홍철의, 2017). 그와 함께 머신러닝 방법론을 통해 상업용 건물에서도 에너지 사용량과 밀접한 요인과 그 중요성을 도출할 수 있으며, 사용 패턴이 유사한 뉴욕시 상업용 건물의 전력 데이터를 이용하여 애틀랜타시의 상업용 건물 에너지 사용량 추정이 가능하였다(Robinson *et al.*, 2017). 머신러닝 대비 스스로 학습이 가능한 딥러닝 방법론을 활용하면 건물 에너지 소비량의 시공간적 비선형 특성까지 고려할 수 있어 더 정확한 미래 소비량 추정이 가능하다(Somu *et al.*, 2021). 건물 분야의 에너지 소비량 추정 연구가 활발하게 이루어지고 있는 이유는 신뢰도 높은 양질의

대규모 자료 확보가 수월하고 사회적으로 이른 시기에 에너지 효율화 노력 필요성이 제기된 분야이기 때문이다. 그 결과 에너지 소비 원단위, 시계열, 머신러닝 등을 활용한 에너지 소비량 추정 연구가 활발하게 이루어졌고, 연구 결과를 바탕으로 에너지의 효과적 사용을 위한 다양한 방안이 모색되고 있는 것으로 판단된다.

최근 들어 분야를 가리지 않고 에너지 소비량 추정 관련 연구에서 머신러닝 방법론 적용이 확대되고 있다. 그 이유는 크게 세 가지로 요약이 가능하다. 첫째, 스마트미터 등을 활용한 양질의 전력소비량 수집(Lynham *et al.*, 2016)과 자료 구축이 가능하다는 점, 둘째, 컴퓨팅 기술의 발전으로 빅데이터 등 대용량 자료를 활용한 분석이 가능하다는 점, 마지막으로는 전망모형 구축이 효율적이라는 점이다. 다시 말해 과거에 활용한 회귀모형, 시계열모형 등 전통적 통계학 기반의 예측 방법은 전망 대상에 맞는 적절한 구조를 갖는 수학적 모델을 구축해야 하지만 머신러닝 방법은 모형이 과거 실적자료를 학습하여 전망에 필요한 계수를 결정하게 된다. 따라서 전망모형 구축을 위한 다양하고 어려운 작업을 과거에 비해 용이하게 수행할 수 있고 전통적 예측 방법 대비 예측 정확도가 높은 것으로 제시되고 있다(정혜란·임창원, 2019).

〈표 1-3〉 에너지 소비량 추정 관련 주요 선행연구

저자(연도)	연구 내용	연구 방법
국토해양부 (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>선박, 하역 장비, 외부차량의 연료 사용에 따른 이산화탄소 배출량 산출 및 장래 배출량 전망</li> <li>배출저감 목표 설정 및 저감 방안 제안</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>원단위 분석</li> <li>배출량산식 활용</li> </ul>
Neto and Fiorelli (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>대학교 관리 건물의 전력 수요량 예측을 위한 인공신경망과 시뮬레이션 모형 개발 및 두 모형의 결과 비교</li> <li>두 모형 모두 건물 전력 소비량 추정에 적합</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>인공신경망</li> <li>시뮬레이션 분석</li> </ul>

저자(연도)	연구 내용	연구 방법
Geerlings and Duin(2011)	<ul style="list-style-type: none"> <li>로테르담항의 터미널별 하역 장비의 에너지 소비량 측정 및 장비별 이동거리를 고려한 이산화탄소 배출량 추정</li> <li>장비별 이동거리를 최소화하는 터미널 레이아웃 배치를 통한 이산화탄소 배출 저감 방안 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시뮬레이션 분석</li> <li>원단위 분석</li> </ul>
최상진 외 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>선박, 하역 장비별 엔진 출력에 따른 연료소비량 산정</li> <li>오염물질 관리를 위한 배출원별 활동 공간 할당 방안 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>배출량산정식</li> <li>공간할당 분석</li> </ul>
김미경·홍철의 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>인공신경망을 기반으로 한 하절기, 동절기 등의 시간과 날씨 요소를 고려한 전력수요 예측</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>인공신경망</li> </ul>
탁해성 외 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>지역 기상정보를 활용한 단기 전력 수요 예측 모델 제시</li> <li>기상데이터만을 이용한 분석 결과 대비 예측오차 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>서포트벡터회귀 (SVR)</li> </ul>
Chae <i>et al.</i> (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>인공신경망을 활용한 건물의 전력 소비량 예측 모형 개발</li> <li>상업용 건물 테스트 결과 1일 사용량의 90% 예측 정확도</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>인공신경망</li> </ul>
Robinson <i>et al.</i> (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>뉴욕시의 상업용 건물 에너지 소비량 자료를 활용하여 기계학습 모형 구축</li> <li>모형을 통해 애틀랜타 상업용 건물 에너지 소비량 추정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>선형회귀</li> <li>그래디언트부스팅 회귀 등</li> </ul>
Duin <i>et al.</i> (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>컨테이너터미널의 냉동 컨테이너 전력 수요 추정</li> <li>작동 중인 냉동 컨테이너 간 전력 피크(Peak) 소비 제한 등 전력소비 절감 방안 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>시뮬레이션 분석</li> </ul>
Moya, Paja and Maldonado (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>발렌시아항의 컨테이너터미널의 2011년 에너지 사용량 조사 결과를 활용한 이산화탄소 배출량 추정</li> <li>전체 배출량 중 68.1%를 차지하는 YT와 RTGC를 LNG로 대체하거나 개조하는 방안 제시</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>현황조사</li> <li>원단위 분석</li> </ul>
Yuan and Nian(2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>운항조건(크기, 흘수, 중량 등) 및 기상조건(바람, 파도 등)과 에너지 소비량 간의 상관관계 분석</li> <li>연료 소비량과 가장 큰 상관관계는 선박의 속도로 분석되었으며 속도가 10% 감소하면 소비량이 17% 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>가우시안프로세스</li> <li>시뮬레이션 분석</li> <li>시나리오 분석</li> </ul>
문지훈·박성우·황인준 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>단기 전력수요 예측에서 결측치 보완 방법 제시</li> <li>랜덤포레스트기반의 결측치 데이터 보완 및 보완된 데이터를 기반으로 다층 퍼셉트론 모델로 수요 예측</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>랜덤포레스트</li> <li>다층퍼셉트론</li> </ul>
김도현 외 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>CNN 모델과 LSTM 모델을 결합한 STLCL(Short Term LSTM-CNN) 모델 제시</li> <li>복합적인 모델을 사용할 시 예측 정확도 제고 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CNN 및 LSTM 결합 모델</li> </ul>

저자(연도)	연구 내용	연구 방법
Isikli <i>et al.</i> (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 운항조건(크기, RPM, 재화중량) 및 기상조건(바람, 파도)과 에너지 소비량간의 상관관계 분석</li> <li>• 연료소모와 속도가 가장 큰 상관관계를 보이거나 비선형적으로 적절한 속도 유지 중요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 문헌조사</li> <li>• 반응표면 분석</li> </ul>
Peng <i>et al.</i> (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 중국 징당항의 8,019척의 선박 자료를 활용 에너지 소비 4대요인(재화중량, 실중량, 순톤수, 하역생산성 등) 도출</li> <li>• 요인별 중요도 검토를 통해 하역생산성이 가장 중요한 요인이며 하역생산성이 2배로 증가하면 선박 에너지 소비량은 34.2% 감소</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 통계분석</li> <li>• 지도학습</li> <li>• 모형별 적합도 분석</li> </ul>

자료: 저자 작성

### 3) 선행연구 종합

세계적인 친환경 추세 속에서 항만의 에너지 효율화는 갈수록 주목받는 연구 분야이다. 현재까지 대다수의 선행연구는 항만의 친환경화 틀 속에서 에너지 효율화를 다루고 있으며, 2000년대 들어 항만의 환경관리 성과와 환경 효율성에 관련한 연구도 발표되고 있다. 항만은 다양한 작업 공간과 설비가 운영되고 다양한 주체가 참여하므로 선행연구에서는 항만에서 에너지 효율화 방안을 여러 가지 측면에서 제시하고 있다. 먼저 운영적 측면에서는 터미널의 동선, 장비 운영 프로세스 등의 개선을 중심으로 제시되고 있으며, 기술적인 측면에서는 과학기술의 발전에 따른 장비 설비, 신에너지원 활용 등도 항만의 에너지 효율화를 실현할 수 있는 방안으로 주목받고 있다. 특히 최근에는 운영적, 기술적 측면 외에도 에너지 관리시스템 측면에서 항만의 에너지 효율화를 다룬 연구도 증가하고 있는 추세이며, 마이크로그리드, 스마트그리드 등 스마트 에너지 관리시스템이 주된 대안으로 제시되고 있다. 그러나 아직 국내에서는 에너지 관리시스템 측면에서 항만의 에너지 효율성을 다룬 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.

항만에서 에너지를 효율적으로 관리하기 위해서는 에너지 소비량 추정이

---

선행되어야 하지만, 그 중요성에 비해 항만의 에너지 소비량 추정과 관련한 연구는 소수에 불과하다. 기수행된 연구도 설비나 건물의 에너지 사용 실적에 따른 원단위 분석, 원가계산 방법 등을 통한 추정에 그치고 있는 실정이며, 이는 항만에서 신뢰성 있는 에너지 소비량 데이터 부재에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 선박 운항의 에너지 소비 추정은 선박 항해일지(Logbook) 등 데이터 수집이 상대적으로 용이하므로 비교적 활발하게 수행되어 왔으며 소비량 추정의 방법론 역시 항만 분야에 비해 다양한 편이다. 건물이나 공장 등의 에너지 소비량 추정 연구 역시 건물·공장 단위별로 신뢰성 있는 대규모 자료 확보가 용이하고 사회적으로도 에너지 효율화의 필요성이 항만보다 일찍 논의되어 연구가 활발히 진행되어 왔다. 추정 방법론은 기본적인 원단위 분석부터 다중회귀모형, 인공신경망 등 다양하게 활용되고 있다. 특히 최근 들어 머신러닝 방법론을 활용해 선박이나 건물의 에너지 소비량을 추정하는 연구가 증가하고 있는데, 스마트미터 등을 활용한 양질의 통계자료 확보가 가능하고, 컴퓨팅 기술의 발전에 따른 대용량 자료 분석이 용이하며 전통적인 수리모형에 비해 효율적인 전망모형 구축이 가능하기 때문이다. 또한 전통적인 예측 방법론 대비 예측의 정확도가 높다는 점도 다수의 선행연구를 통해 검증되고 있다. 그러나 이 같은 장점에도 불구하고 아직 항만 분야에서 머신러닝을 활용한 에너지 추정은 이루어지지 않고 있으므로 본 연구에서는 부산항 신항의 실제 과거 전력 소비량을 바탕으로 머신러닝의 한 분야인 딥러닝 기반 모형을 통해 전력 소비량을 전망하고자 한다.

## 2. 선행연구와 차별성

이상의 선행연구 검토를 기반으로 한 본 연구의 차별성을 네 가지로 제시할 수 있다.

첫째, 대부분 선행연구는 전력 소비량 전망보다는 유류 사용량 추정에 집중되었으며, 장래 사용량 전망 관련 연구는 거의 없는 상황이다. 본 연구의 핵심 목적인 장래 항만의 에너지는 대부분 전기에너지로 전환되어 전력 소비량 전망이 가장 중요한데 이와 관련된 연구는 전무한 수준으로 연구 수행 자체로 차별성이 크다고 할 수 있다.

둘째, 기존 선행연구에서는 자료 수집의 현실적인 제약에 따라 대상 항만의 건물·설비의 원단위 또는 설문조사 등으로 수집된 자료를 활용한 연구가 대부분이었다. 그러나 본 연구에서는 부산항 신항 5개 컨테이너터미널의 10년간 실제 전력 소비량 자료를 활용하여 분석 결과의 신뢰성을 크게 향상시켰다.

셋째, 딥러닝 방법론을 항만의 에너지 소비량 전망에 선도적으로 적용했다는 점이다. 머신러닝 방법론은 타 분야에서 활발하게 활용되고 있으나, 항만 분야에서는 기초자료 부족 등으로 활용되지 못하였다. 본 연구가 분석 가능한 적정 수준의 자료를 수집하고 항만의 전력 소비량 전망에 딥러닝 방법론을 적용하는 첫 번째 정책연구라 판단된다.

넷째, 항만의 전기에너지와 관련한 종합적 관점의 연구라는 점이다. 기존 선행연구에서는 항만의 전력 수요와 공급 능력을 다루지 않았으며 적절한 대안도 제시되지 못했다. 즉, 부분적으로 연구를 수행하고 수행 범위 내의 대안을 제시하였다. 그러나 본 연구는 부산항 신항을 대상으로 한 장래 전력 소비량 전망뿐만 아니라 공급 능력 추정과 종합적인 전력 관리, 개략적인 효과까지 제시하였다.





## 02

# 해외 항만의 에너지 관리 정책과 사례

본 장에서는 제1장에서 제시한 본 연구의 목적 달성을 위해 해외 주요 항만에서 추진 중인 에너지 관리 정책과 전략을 살펴보고 우리나라 항만에 참고 가능한 시사점을 도출하고자 한다.

### 제1절 유럽과 미국 항만

#### 1. 유럽

EU(European Union)에서는 2030년까지 총 에너지 소비를 32.5% 줄이기 위해서 에너지 사용의 효율화를 위한 노력을 지속하고 있다.<sup>6)</sup> 이에 항만 분야에서도 유럽항만협회(ESPO: European Sea Ports Organization)를 중심으로 항만 구역 내 에너지 소비 효율화를 위한 노력을 강화하고 있다.

6) European Commission(검색일: 2021. 5. 10)

---

## 1) ESPO의 EcoPorts 프로그램

EcoPorts는 1997년 유럽의 주요 항만에서 시작한 친환경 항만 이니셔티브로서 2011년부터 ESPO에서 운영하고 있다. 1990년대 후반부터 유럽 지역 항만의 환경 개선을 위해 항만환경검토시스템(PERS: Port Environmental Review System), ISO 14001 등 환경 관련 표준을 규정하고 있다. ESPO에서는 EcoPorts 프로그램을 통해 매년 협회 소속 항만의 담당자를 대상으로 자가진단법(SDM: Self Diagnosis Method)을 이용하여 각 항만의 환경 지표를 수집하고 환경관리 표준, SWOT 분석을 통해 각 항만의 상위 5개의 개선 필요 분야를 평가하고 있다. 개별 항만의 평가 결과는 비공개이며, 전체 항만을 대상으로 합산하여 10개의 우선 개선 분야를 발표하고 있다.<sup>7)</sup>

1990년대 후반에는 수질(Water quality), 준설(Dredging), 먼지(Dust), 서식지 파괴(Habitat loss) 등이 주력 해결 부문으로 제시되었으나, 2009년에는 상위 10대 우선 해결 분야 중 7위로 에너지 소비(Energy consumption)가 선정되면서 에너지 문제가 처음으로 제시되었다. 이후 지속가능한 항만 산업의 발전을 위한 에너지 소비 문제의 중요성이 강조되면서 2013년 3위로 순위가 상승하였고, 2016년 이후 2019년까지 대기질(Air quality) 다음으로 2위를 유지하였다. 가장 최신판인 2020년에는 에너지 소비에서 에너지 효율화(Energy efficiency)로 명칭을 변경하고 대기질, 기후변화(Climate change) 다음인 3위인 것으로 나타났다.(〈그림 2-1〉 참조)

---

7) EcoPorts(검색일: 2021. 5. 10)

&lt;그림 2-1&gt; 유럽 항만의 상위 10개 환경 우선 요인의 변화 추이

	1996	2004	2009	2013	2016	2017	2018	2019	2020
1	Port development (water)	Garbage/ Port waste	Noise	Air quality	Air quality	Air quality	Air quality	Air quality	Air quality
2	Water quality	Dredging operations	Air quality	Garbage/ Port waste	Energy consumption	Energy consumption	Energy consumption	Energy consumption	Climate change
3	Dredging disposal	Dredging disposal	Garbage/ Port waste	Energy consumption	Noise	Noise	Noise	Climate change	Energy efficiency*
4	Dredging operations	Dust	Dredging operations	Noise	Relationship with the local community	Water quality	Relationship with the local community	Noise	Noise
5	Dust	Noise	Dredging disposal	Ship waste	Garbage/ Port waste	Dredging operations	Ship waste	Relationship with the local community	Relationship with the local community
6	Port development (land related)	Air quality	Relationship with the local community	Relationship with the local community	Ship waste	Garbage/ Port waste	Port development (land related)	Ship waste	Ship waste
7	Contaminated land	Hazardous cargo	Energy consumption	Dredging operations	Port development (land related)	Port development (land related)	Climate change	Garbage/ Port waste	Water quality
8	Habitat loss/ degradation	Bunkering	Dust	Dust	Water quality	Relationship with the local community	Water quality	Port development (land related)	Garbage/ Port waste
9	Traffic volume	Port development (land related)	Port development (water)	Port development (land related)	Dust	Ship waste	Dredging operations	Dredging operations	Dredging operations
10	Industrial effluent	Ship discharge (bilge)	Port development (land related)	Water quality	Dredging operations	Climate change	Garbage/ Port waste	Water quality	Port development (land related)

자료: ESPO(2020), p. 19.

또한 ESPO에서는 <표 2-1>과 같이 SDM 설문 조사를 통해서 항만별로 어떤 분야의 환경 모니터링 프로그램을 운영하고 있는지를 조사하고 전체 응답 항만 대비 시행 항만의 비율을 백분율로 나타내고 있다. 즉, 비율이 높을수록 많은 항만에서 모니터링을 시행하고 있어 우선순위가 높은 분야이다. <표 2-1>은 2020년 조사 결과로 항만 폐기물은 2013년 대비 12%, 에너지 효율화는 10%가 상승하여 지속적으로 모니터링하는 분야로 나타났다. 시행 비율이 가장 큰 폭으로 증가한 지표는 대기질이나, 우선순위 측면에서는 5순위로 에너지 효율화 대비 비교적 후순위에 위치하고 있다.

〈표 2-1〉 ESPO 소속 항만의 환경 분야별 모니터링 시행 비율 추이

단위: %

Indicators	2013	2016	2017	2018	2019	2020	Change 2013-2020
Garbage/ Port waste	67	79	88	84	79	79	+12
Energy efficiency	65	73	80	80	76	75	+10
Water consumption	58	62	71	72	68	69	+11
Water quality	56	70	75	76	71	67	+11
Air quality	52	65	69	67	62	67	+15
Sediment quality	56	63	65	58	54	59	+3
Noise	52	57	64	68	57	54	+2
Carbon footprint	48	47	49	47	49	52	+4
Marine ecosystems	35	36	44	40	40	46	+11
Terrestrial habitats	38	30	37	38	37	41	+3
Soil quality	42	44	48	38	32	41	-1

자료: ESPO(2020), p. 13

## 2) 유럽 항만의 에너지 관리 사례

### (1) 로테르담항(Port of Rotterdam)

네덜란드의 로테르담항은 스마트항만 산업을 선도하는 항만으로서 항만의 전력화와 효율화뿐 아니라 배후산업과 연계된 효율화를 모색하고 있다. 배후 산업단지에 위치한 유럽 최대의 석유화학 클러스터를 2030년까지 화석연료 기반이 아닌 전기에너지 기반으로 전환하는 것을 골자로 하는 스마트 에너지와 산업 로드맵을 수립해 추진하고 있다. 이 로드맵의 핵심은 다양한 에너지원의 적절하고 효율적인 활용을 통해 지속가능한 석유화학 클러스터 구축, 지속가능한 에너지를 마련하는 것이다.

이를 달성하기 위해서 10개 항목의 세부 과제를 추진하고 있으며, 크게 3가지 분야로 요약이 가능하다. 첫째, 바이오매스, 포집 이산화탄소, 그린 수소 등 다양한 에너지원을 활용한 안정적인 에너지 공급이다. 둘째, 이산화탄소 포집과 재활용, 탄소 저감 시나리오별 이행전략 수립, 지역 간 거버넌스 구축 등을 통한 탄소배출 저감 추진이다. 셋째, 지역 기업 연계 에너지 공급 네트워크 마련, 지능형 통합에너지 공급 시스템 구축 등을 통한 에너지의 효율적인 활용 방안 마련이다(〈표 2-2〉 참조).

〈표 2-2〉 로테르담항만의 Smart Energy & Industry Roadmap 세부 내용

부문	주요 내용
Power-2-Fuels	• 산업단지에서 방출되는 CO <sub>2</sub> 를 포집하고 전기분해를 통해 연료(수소, 메탄, 메탄올 등) 합성
Electrons to Chemical Bonds	• 합성연료와 화학물질 생산에서 활용되는 전기분해 기술의 효율성 개선
CAPCOM	• 바이오매스(Biomass, 유기성 생물체를 의미)를 이용하여 바이오펠릿 <sup>8)</sup> 을 생산해 에너지원으로 활용
Governance van het havenindustriële complex en klimaatdoelstellingen	• 로테르담항만, 산업단지, 지역의 거버넌스를 형성하고 지역과 국가의 기후 목표 달성을 위해 노력

부문	주요 내용
CCU landscaping	• CO <sub>2</sub> 포집을 통한 배출량 감소와 건축자재·시멘트 등으로 재활용하는 순환 경제 달성
Electrons to Chemicals	• Interreg-2-Seas 보조금 프로그램의 일환으로 전기, 천연가스, CO <sub>2</sub> 를 이용해 DME <sup>9)</sup> 생산을 통한 지속가능한 석유화학산업 모색
Flexnet	• Botlek 지역의 기업을 에너지클러스터화하여 수요를 고려한 전기에너지와 열에너지 공급 네트워크를 테스트하여 향후 항만과 배후산업에 적용
System integration Energy	• 항만의 지속가능한 에너지 공급을 위한 재생에너지 변동성을 제어하고 가변 공급모델 연구를 통한 지능적 공급 수요 시스템 마련
DDP bottom-up - Power-2-Hydrogen	• 전기분해를 통해 그린수소를 생산하여 로테르담항만 지역의 CO <sub>2</sub> 배출 저감과 배후산업에 안정적 수소 공급 기반 마련
DDP - Deep Decarbonisation Pathways	• 2050년까지 로테르담항만 지역의 CO <sub>2</sub> 배출을 2015년 대비 30~98% 저감하는 4가지 시나리오를 구성하여 시나리오별 연계성 마련을 통한 이행력 제고

자료: SmartPort(검색일: 2021. 5. 10)

## (2) 함부르크항(Port of Hamburg)

함부르크 항만청(HPA)은 「smartPORT」 프로그램을 통해 항만의 재생 에너지 사용과 에너지 전환을 촉진하고 있다. 「smartPORT」 프로그램은 물류 부문(Smart Port Logistics)의 12개 프로젝트와 에너지 부문(Smart Port Energy)의 15개 프로젝트가 진행되고 있다. 에너지 부문의 주요 목표는 에너지 소비 절감과 환경의 영향을 최소화하는 것이며 이와 관련하여 신재생에너지원 사용 확대, 오염물질 배출 최소화, 친환경적인 운송수단 활용 등의 프로젝트가 포함된다.

8) 펠릿연료라고도 하며 유기물을 펠릿 형태로 만든 바이오 연료를 의미함. 다양한 유기체를 재활용 할 수 있고 펠릿화를 통해 부피가 축소되어 보관 및 운송에 유리하며 습기에 강해 다양한 용도로 활용 가능함. 또한 펠릿연료를 연소할 때 발생하는 오염물질 또한 다른 가열 방식의 연료 대비 낮은 강점이 있음

9) DME(디메틸에테르)는 다른 화석연료에 비해 대기오염원 배출이 매우 낮은 청정연료로 디젤 등을 대신해서 석유화학산업, 자동차 등에서 활용이 가능함

〈표 2-3〉 함부르크항 smartPORT energy

구분	smartPORT energy
목표	• 에너지 소비량 감축 및 환경 영향 최소화
주요내용	① 재생에너지 활용 촉진 ② 에너지 소비량 감축으로 오염물질 배출 최소화 ③ 친환경·혁신적인 운송수단 활용
프로젝트 사례	• Wind farm sites: sustainability & expansion(7개의 추가 풍력발전 터빈 설치) • Cross-company use of waste heat(항만 내 기업 간 폐열에너지 교환 및 자체 전력 생산 후 사용) • Alternative power for heavy-duty traffic(LNG 등 다양한 에너지원을 활용한 트럭 개발 및 운행 검토)

자료: 김근섭 외(2018), p. 7

또한 에너지 비용을 절감하기 위해 모션 센서 기반의 스마트 조명 설치, 스마트 에너지 관리시스템 운영과 에너지 사용량을 수집하고 제어할 수 있는 스마트 미터를 핵심 항만 인프라에 설치하였다.<sup>10)</sup> 이러한 smartPORT 프로젝트를 통해 함부르크항은 선박, 트럭, 크레인 등 항만 관련 모든 자원을 실시간으로 연계하여 항만 운영비의 75%를 절감했다.<sup>11)</sup>

### (3) 포츠머스항(Portsmouth International Port)

포츠머스항은 항만의 탄소중립 실현의 일환으로 스마트 에너지 시스템인 항만 에너지시스템 최적화(PESO: Port Energy Systems Optimisation) 프로젝트를 2020년 6월부터 시범운영하고 있다. Innovate UK에서 2년간 보조금을 지원하는 「PESO project」는 항만의 스마트그리드 기술과 관리 소프트웨어를 활용하여 에너지 소비의 효율을 최적화하는 방법을 모색함과

10) 정태원(2018), p. 495.

11) 물류신문(2018. 7. 18)

---

동시에 탄소배출 저감을 통한 대기질 개선도 추진하는 것이다. 포츠머스항에 시행된 PESO 시범사업의 주요 내용은 100kW의 전력 공급이 가능한 리튬 이온배터리 도입, 항만 구역 내 에너지 발전과 저장, 스마트 포트 그리드 인프라를 최적화하는 최신 소프트웨어 개발 등이다.<sup>12)</sup> 또한 포츠머스항은 포츠머스시의회와 협업하여 2021년 중 1,670개의 태양광 패널을 설치하여, 현장 전력의 약 30%를 공급할 예정이다. 이를 통해 자동화 장비 충전을 비롯해 전력 피크(Peak) 시에도 충분한 전력을 공급할 수 있도록 하고 있다.<sup>13)</sup>

#### (4) 델프제일항(Port of Delfzijl)

네덜란드의 델프제일항만은 2030년 에너지 중립 달성을 위해 2017년 1,100개의 스마트 가로등(Dynamic smart lighting system)을 설치하였다. 스마트 가로등의 동적조광(Dynamic dimming)을 통해 기존 일반 조명시설 대비 최대 80%의 전기에너지를 절약하고 모션 센서(City Sense)와 관리소프트웨어(City Manger)를 활용하여 유지관리 비용을 50%가량 절감할 수 있을 것으로 기대하고 있다.<sup>14)</sup>

## 2. 미국

항만의 에너지 효율화 분야에서 미국 항만이 가장 선도적인 위치라고 할 수 있다. 유럽의 항만은 2010년 중반 이후 스마트화, 친환경화가 동시에 이루어지고 있으나, 미국 항만의 에너지 효율화는 2000년대 초반부터 친환경 항만 구축을 위해 선도적으로 추진되었다.

---

12) CATAPULT(검색일: 2021. 5. 10)

13) PIP(2021. 1. 8)

14) Ledsmagazine(2017. 8. 23)



## 1) 롱비치항(POLB: Port of Long Beach)

미국 캘리포니아에 위치한 POLB의 LBCT(Long Beach Container Terminal)는 전 영역 자동화<sup>15)</sup> 친환경 컨테이너터미널로 운영되고 있다. LBCT는 2016년 전기 기반 크레인을 도입하고 2018년 전 영역 자동화를 도입하면서 야간작업에 소요되는 연간 1,000만 kWh의 전력을 절약할 수 있었다.<sup>16)</sup> 또한 POLB는 2018년 10월 CEC(California Energy Commission)의 전기프로그램(EPCI: Electric Program Investment Charge)을 통해 약 500만 달러를 지원받아 합동통제센터(JCCC: Joint Command and Control Center)에 마이크로그리드(POLB Microgrid Project)를 설치하였으며 2021년에 시험 운전할 예정이었다. 이 마이크로그리드 프로젝트는 300kW PV 어레이(PhotoVoltaic array)<sup>17)</sup>, 330kW의 고정식 배터리, 250kW의 이동식 배터리 등으로 구성되어 있으며, 항만, 공항, 철도, 폐수 처리시설, 매립지, 기타 주요 시설 등에서 소비되는 에너지를 효율적으로 관리할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 장비의 전력 소모량을 파악하고 적절한 전력 공급을 통한 비용 절감과 전력에너지 부하를 관리하여 전력망 서비스의 신뢰성을 확보하고 있다.<sup>18)</sup>

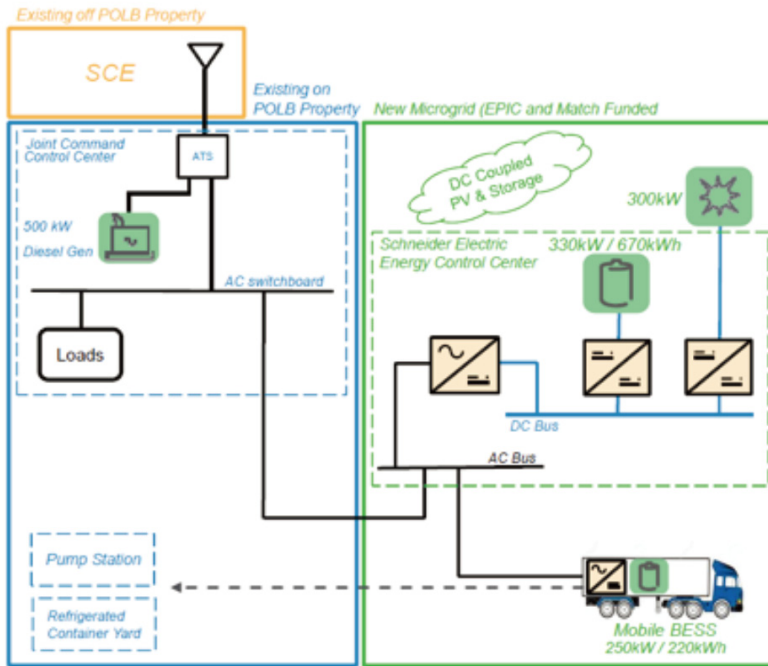
15) 전 영역 자동화는 안벽(선박↔안벽), 이송(안벽↔야드), 야드(보관·적재)의 모든 영역의 자동화를 의미

16) ASE(검색일: 2021. 5. 10)

17) 태양광발전시스템을 의미하며 동의어로 Solar Panel, Solar Farms 등을 사용함

18) GTM(2020. 3. 10)

〈그림 2-2〉 POLB의 JCCC 마이크로그리드의 개념

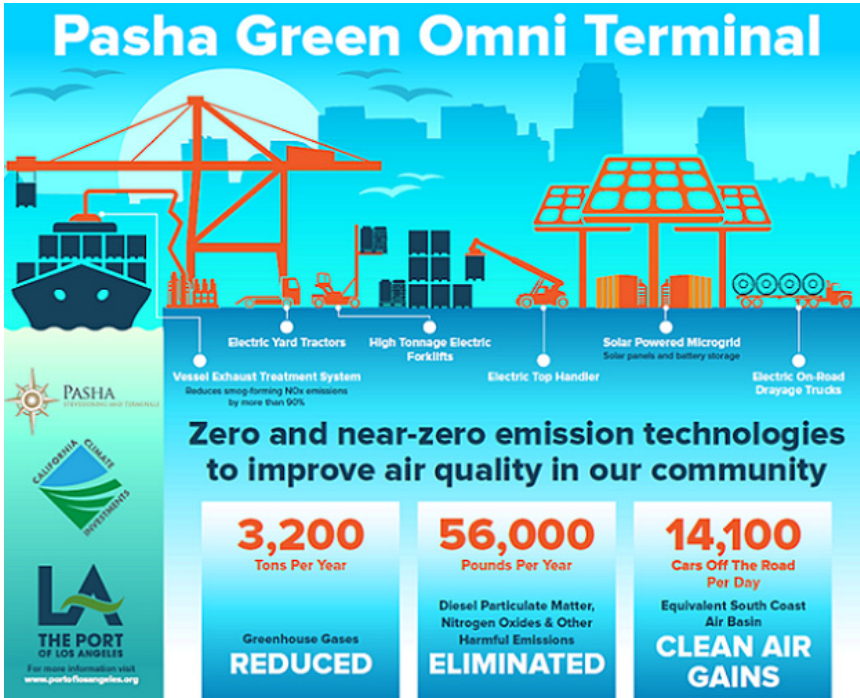


자료: Port of Long Beach(2018), p. 2

## 2) 로스앤젤레스항(POLA: Port of Los Angeles)

POLA는 2016년부터 그린 옴니 터미널 프로젝트(Green omni terminal project)를 추진하여 온실가스 배출 제로 달성을 목표로 하고 있다. 세부 추진 과제로 2,660만 달러를 투자해 1.03MW의 PV 어레이, 2.6MWh의 배터리 저장 시스템, 양방향 충전설치, 에너지 관리시스템, Siemens사의 SICAM(그리드컨트롤러)으로 구성된 마이크로그리드를 구축하였다. 정전 시 또는 그리드망에서 분리되어도 독립적으로 운용이 가능하여 유사시 지역사회에 기본적인 에너지를 공급하고 재난 발생 시 군사용 작전 기지로도 역할을 수행할 예정이다.<sup>19)</sup>

〈그림 2-3〉 POLA의 그린 옴니 터미널 프로젝트 개요



자료: Microgridknowledge(a)(검색: 2021. 5. 17)

### 3) 샌디에이고항(Port of San Diego)

샌디에이고항은 기후행동계획(Port's Climate Action Plan)의 목표 달성을 위해 기존 조명의 고효율 LED 교체, 직원교육, 항만시설물 대상의 에너지 감사(Energy Audit)를 지속적으로 추진하고 있다. 또한 2018년에는 10th avenue marine terminal에 890만 달러 규모의 마이크로그리드 설치를 시작하였다. 총 사업비 중 490만 달러를 CEC의 EPCI 프로그램을 통해 지원받았다. 2021년 준공 예정으로 700kW의 PV 어레이를 통해 700kW

19) Microgridknowledge(b)(검색일: 2021. 5. 17)

---

의 에너지 저장 장치, 고효율 조명시설 등으로 구성된 중앙 집중식 마이크로그리드에 전력을 공급한다. 마이크로그리드는 탄력적인 전력을 공급해 10th avenue marine terminal의 온실가스 배출량을 감소시키는 동시에 터미널 전기 비용 60% 절약, 정전 시 최대 40분간 터미널에 전력 공급이 가능할 것으로 예상된다.<sup>20)</sup> 또한 크루즈터미널과 화물터미널에 추가로 설치 예정인 육상전원공급장치(AMP: Alternative Maritime Power)를 마이크로그리드 시스템에 포함시키고<sup>21)</sup>, 보안 인프라, 현장 조명, 사무실과 기존 연료 저장 장치를 포함한 항만 운영시설에도 전력을 제공할 예정이다.<sup>22)</sup>

## 제2절 아시아 항만

---

### 1. 중국

#### 1) 중국의 항만 에너지 관리 정책

환경오염은 현재 중국 사회가 당면한 가장 큰 이슈 중 하나이며, 이에 따라 항만·해운업계 역시 친환경화를 요구받고 있다. 중국 정부에서도 항만의 에너지 소비 절감, 화석에너지 연료의 친환경 연료 전환 등과 관련된 정책을 지속적으로 발표하고 있다. 2007년 중국 교통운수부(당시 교통부)는 「항만의 에너지 및 배출가스 절감 업무에 관한 지도의견(关于港口节能减排工作的指导意见)」을 발표하며 항만 내 에너지 절감의 중요성을 상기시키고 노후 장비 교체, 신항만 건설, 노후 항만의 리모델링 시에 전력 담당

---

20) Microgridknowledge(c)(검색일: 2021. 5. 17)

21) GREENPORT(검색일: 2021. 5. 17)

22) Port of San Diego(검색일: 2021. 5. 17)

부문과 협력하여 전력 공급 과정에서 전력 손실을 줄일 수 있는 방안을 모색하도록 하였다. 그 후에도 교통운수부는 「도로수로교통 운송 에너지 및 배출가스 절감 ‘12·5’ 계획(公路水路交通运输节能减排“十二五”规划)」(2011년), 「항만의 업그레이드 전환에 관한 지도의견(关于推进港口转型升级的指导意见)」(2014년), 「녹색항만등급평가기준(绿色港口等级评价标准)」(2015년) 등을 지속적으로 발표하여 항만 내 에너지 소비와 오염물질 배출 절감을 강조하고 있다.

특히 2021년부터 ‘제14차 5개년 계획 기간(2021~2025년)’에 들어가면 서 중국 정부에서는 GDP 단위당 에너지 소비와 CO<sub>2</sub> 배출을 2025년까지 2020년 대비 각각 13.5%, 18% 절감한다는 목표를 설정함에 따라 향후 해운·항만 분야의 에너지 절감과 친환경화 정책도 더욱 강화될 것으로 예상된다.<sup>23)</sup> 중국 정부의 정책 기조에 따라 중국의 주요 항만도 에너지 관리에 많은 노력을 기울이고 있다.

## 2) 중국 항만의 에너지 관리 사례

### (1) 상하이항(Port of Shanghai)

상하이항의 관리 주체인 상하이항그룹(SIPG)은 2000년대부터 친환경 정책을 추진해 왔으며, 2008년 ‘상하이시 에너지 절약 업무 선진 단체(上海市节能工作先进集体)’에 선정될 만큼 에너지 절약에서도 두각을 나타내고 있다.<sup>24)</sup> 항만 소재지인 상하이시 정부(상하이시교통운수항만관리국)에서도 2011년 「상하이항의 자원절약형, 환경친화형 항만 건설 지도의견(上海港“资源节约型、环境友好型”港口建设指导意见)」 등을 발표하여 상하이항

23) 新华社(검색일: 2021. 4. 28)

24) SIPG(2010), p. 34.

---

의 에너지 소비 절감을 요구했으며,<sup>25)</sup> 2015년 상하이항그룹 역시 자체적인 「녹색항만 3년 액션플랜」을 발표하여 2017년까지 항만 물동량 단위당 에너지 소모량을 2010년 대비 7% 감소시키겠다는 목표를 수립하기도 하였다.<sup>26)</sup>

상하이항그룹은 에너지관리 측면에서도 다양한 방법으로 에너지 소비를 줄이는 데 노력하고 있다. 먼저 그룹의 운영예산 수립 시 에너지 소비액을 연간 예산목표에 반영하고 정기적으로 목표에 맞게 집행되도록 관리하고 있으며, 각 자회사와 지사에도 자체적인 에너지관리 체계를 구축하고 매일 에너지 구매량, 사용량, 보관량을 비롯해 주요 설비의 에너지 소비 지표 등을 확인하고 있다.<sup>27)</sup> 특히 2012년 중국석유화학그룹(SINOPEC), 중국석유천연가스그룹(CNPC) 등 주요 에너지 공급사와 협약을 체결하고 2013년부터 그룹 소속 자회사가 개별적으로 중간 공급상에게서 유류제품을 구매해 오던 계약 형태를 변경하여 그룹 차원에서 일괄적으로 구매계약을 하도록 하였다. 이를 통해 유류제품의 구매 비용을 낮추고 안정적인 유류 품질 유지를 도모하고 있으며, 각 소속 자회사의 에너지 구매·소비 정보의 통합·전산화 관리를 진행해 오고 있다.<sup>28)</sup>

항만 설비·장비 측면에서도 상하이항그룹은 디젤 트레일러 교체, LED 조명 교체, 하이브리드 예인선과 전동·하이브리드 RTG 구비 등을 통해 에너지 소비와 배출가스를 감소시키고 있다. 특히 디젤 트레일러를 LNG 트레일러로 교체함으로써 배출가스뿐만 아니라 에너지 소비도 절감하고 있는데, 관련 연구에 따르면 디젤 트레일러에서 LNG 트레일러로 교체 시 TEU

---

25) 당시 「지도의견」에서는 상하이항 물동량 단위당(만 톤) 에너지 소모량(표준석탄 소모량/물동량)을 2010년 대비 2015년과 2020년 각각 5%와 8% 절감한다는 목표를 제시함. 上海市交通运输和港口管理局 (2011. 12. 14)

26) 상하이항의 물동량 단위당 에너지 소모량(표준석탄 기준)은 목표치에는 못 미쳤지만 2015년 만 톤당 5.16톤에서 2017년 5.0톤까지 감소함. SIPG(2018), p. 111.

27) SIPG(2012), p. 51.

28) SIPG(2015), pp.97-98.; SIPG(2016), pp. 105-108.

당 에너지 소모가 1.1175L에서 0.943L로 절감되는 것으로 추산되었다.<sup>29)</sup> 2020년 말 기준으로 상하이항그룹 내 트레일러의 LNG화 비율은 95%에 달하였으며, 하이브리드 RTG의 비율도 90%에 달해 친환경과 함께 에너지 소비 절감도 동시에 실현하고 있다.<sup>30)</sup> 이러한 다각적인 노력에 따라 <표 2-4>와 같이 상하이항의 유류 소비는 지속적으로 감소하고 있으나, AMP와 전동, 하이브리드 장비 사용 증가에 따라 전력 사용은 증가하고 있는 추세이다.

<표 2-4> 상하이항의 에너지 소모량 추이(2016~2020년)

단위: 만 톤, 만 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연평균 증가율
디젤유	102,549	94,507	88,873	86,556	73,853	-7.9%
연료유	63,687	66,879	74,100	55,296	53,321	-4.3%
전력	39,320	40,621	41,022	47,396	49,449	5.9%

자료: SIPG(2021), p. 96; SIPG(2018), p. 110.

따라서 상하이항그룹은 전력 증가 추세에 대응하기 위해 2015년 선닝에너지그룹(Shenergy)<sup>31)</sup>과 50:50 합자를 통해 ‘상하이항만에너지유한공사(上海港口能源有限公司)’를 설립하고 LNG 병커링사업뿐만 아니라 새로운 에너지원 개발도 적극 추진하고 있다. 2020년 상하이항만에너지유한공사는 상하이 뤼징(罗泾) 항만구역 물류센터에 지붕형 태양광 발전시설을 완공, 운영하기 시작했는데, 한 달여간의 운영기간에 1일 평균 4,500kW 이상의 전력을 생산한 것으로 나타났다. 이는 상하이항 최초의 계통연계형

29) 李宗良(2016), pp.97-98.

30) SIPG(2021), p. 97.

31) 선닝에너지그룹은 상하이시가 소유한 국유기업으로 LNG 생산·구매·공급 및 화력발전, LNG발전을 주요 사업으로 하고 있으며, 태양광, 풍력 등 신재생에너지와 마이크로그리드 기술 개발도 하고 있는 종합 에너지기업임

---

태양광 발전시스템(grid connected photovoltaic system)으로 생산된 전력은 발전기가 설치된 물류센터에 사용되고 여분의 전력은 주 전력계통으로 흡수된다.<sup>32)</sup>

〈그림 2-4〉 상하이항 뤼징항만구역의 지붕형 태양광 발전시설



자료: SIPG(2021), p. 97.

## (2) 선전항(Port of Shenzhen)

선전시도 2016년 「선전시 녹색·저탄소항만건설 5년 액션플랜(深圳市绿色低碳港口建设五年行动方案)」을 발표하며, 2020년까지 항만의 컨테이너 물동량 단위별 에너지 소모를 2015년 대비 5% 절감한다는 목표를 제시하고 항만구역 내 조명 교체 등을 통해 에너지 소비를 절감할 것을 강조해 왔다.<sup>33)</sup> 이에 따라 선전항은 항만 설비·장비 개선을 통한 에너지 효율화 측면에서 두각을 나타내고 있다. 선전항은 2006년부터 주요 컨테이너터미널의 RTG의 전기화 개선 작업을 추진했으며, 그중 옌텐항(盐田港)의 전체 RTG는 전기 또는 하이브리드 동력으로 교체되었다.<sup>34)</sup> LED 조명 교체 역시 항만의 에너지 소비 절감에 크게 기여하고 있다. 2019년 말 기준, 옌텐

---

32) SIPG(2021), 앞의 책, p.97.

33) 深圳市人民政府(검색일: 2021. 4. 28)

34) 中国港口网(2019. 7. 8)



항에서만 총 4,017개의 에너지절감형 LED 조명으로 교체되었는데, 이를 통한 연간 전력 절감은 500만 kWh로 추산된다.<sup>35)</sup>

특히 선전항은 에너지 관리 측면에서도 많은 노력을 기울이고 있는데 2017년 'ISO 50001' 에너지경영시스템의 인증 절차를 시작하여 1년의 과정을 거쳐 영국표준협회(BSI)로부터 'ISO 50001' 인증을 취득하였다. ISO 50001은 시스템이 적용된 데이터 기반의 절차를 통해 지속적인 에너지 관리를 요구하고 있는데 옌텐항은 이 같은 요구에 부합하며 인증을 현재까지 유지해 오고 있다.<sup>36)</sup>

### (3) 칭다오항(Port of Qingdao)

칭다오항의 소재지인 칭다오시도 에너지 소비 절감을 강조하고 있고, 항만에도 에너지 절감을 요구하고 있다. 칭다오시는 2018년 「2018~2020년 칭다오시 에너지 절감과 녹색발전 액션플랜(关于印发青岛市节能与绿色发展行动方案)」을 발표하여 2020년까지 지역 GDP 단위당 에너지 소모를 2015년 대비 16% 절감하고 에너지 소비총량을 표준 석탄<sup>37)</sup> 기준 3,380만 톤 이내로 통제하겠다는 계획을 발표하였다. 칭다오항에도 2020년까지 물동량 단위당 에너지 소모를 2015년 대비 2% 절감할 것을 요구하였다.

이에 따라 칭다오항도 다양한 방법을 통해 에너지 절감에 노력해 오고 있는데, 항만 설비·장비의 측면에서는 신재생에너지의 활용을 활발히 추진하고 있다. 칭다오항은 2018년 288대의 항만 출입 차량을 LNG차량으로 교체하였으며, 전기차량의 확대에도 노력을 기울여 2020년 기준 항만구역 주차장에는 총 30여 개소의 전기차량 충전기가 설치되어 있다. 최근에는 수소연료 기반의 트레일러와 야드 크레인도 시범적으로 운영하고 있다.<sup>38)</sup>

35) 盐田港(검색일: 2021. 4. 28)

36) 위의 자료

37) 표준석탄(标准煤)은 발열량 7,000Cal/kg을 가리킴

〈그림 2-5〉 칭다오항의 수소에너지 트레일러와 야드크레인



자료: QINGDAO PORT INTERNATIONAL(2021), p. 43.

주: 좌측은 수소연료 트레일러, 우측은 야드크레인

이 같은 노력을 통해 〈표 2-5〉와 같이 칭다오항의 유류 소비는 지속적으로 감소하였으나, 하이브리드와 전기화 설비의 증가로 전력 소비는 지속적으로 증가하고 있는 추세를 나타낸다.

〈표 2-5〉 칭다오항 에너지 소모량 추이(2016~2020년)

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연평균 증가율
디젤유(천 톤)	53	49	46	50	-	-1.7%*
전력(백만 kWh)	386	426	462	554	684	15.4%

자료: QINGDAO PORT INTERNATIONAL(2021), p. 46.; QINGDAO PORT INTERNATIONAL(2020), p. 36

주: \*은 2016~2019년 연평균증가율

이렇게 증가하는 전력 수요에 대응하기 위해 창고 옥상에 태양광 발전설비를 설치하거나, 일부 부두에는 풍력 또는 태양광 보조 조명을 사용하여 대체 전력원을 확보하고 있다. 특히 칭다오 둥자커우항(董家口港)은 2017년 중국국가발전개혁위원회와 국가에너지국이 선정한 28개의 「신재생에너지 마이크로그리드 시범 프로젝트 리스트(新能源微电网示范项目名单)」에 중국 항만 중 유일하게 포함되기도 했다. 이 시범 프로젝트는 둥자커우 항

38) QINGDAO PORT INTERNATIONAL(2021), p. 43.

만구역에 태양광과 LNG 열병합발전을 전력원으로 하는 계통연계형 그리드를 구축하는 것으로 세부 내용은 <표 2-6>과 같다.

<표 2-6> 칭다오 동자커우항 마이크로그리드 프로젝트

시공사	프로젝트 주요 내용	기술 지표	공급 범위
Qingdao New Energy Solutions (青岛昌盛日电太阳能科技股份有限公司)	<ol style="list-style-type: none"> <li>구성: 동자커우항에 1개의 계통연계형(grid-tied) 마이크로그리드 설치</li> <li>전원: 태양광발전 60MW, LNG 열병합발전(CCHP) 6MW, 전력저장 30MWh</li> <li>배전 방식: 10kV 단일회선</li> <li>부하: 전력공급 면적 70km<sup>2</sup>, 전력부하 45MW</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>신재생에너지 이용률: &gt;100%</li> <li>전력 자급률: 60%</li> <li>전력공급 신뢰도: &gt;99.99%</li> <li>단독 운영 상황: 끊김없는 전환 및 단독 발전 능력 구비</li> <li>투자액: 8억 위안</li> </ol>	항만 배후단지 전력공급, 단지 내 주요 석유화학, 야금, 장비제조업 등 기업 대상

자료: 国家能源局(검색일: 2021. 4. 28)

## 2. 일본

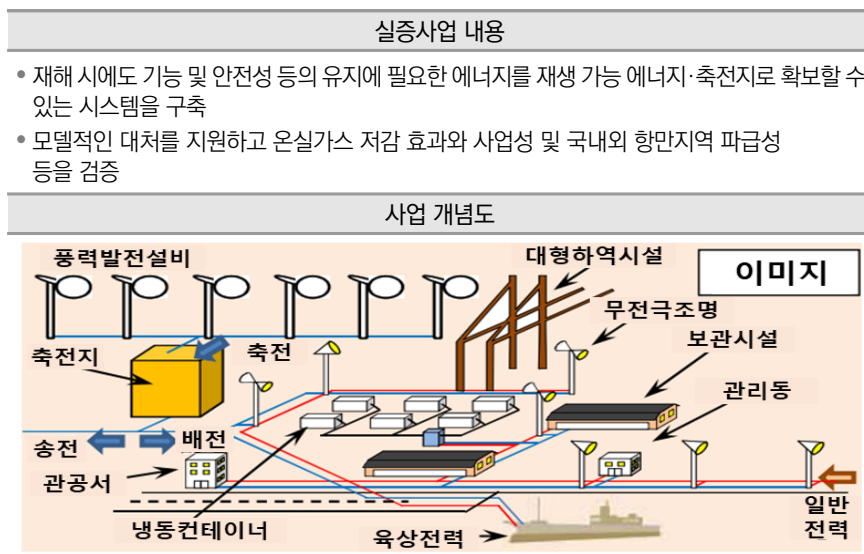
### 1) 일본 항만의 에너지 관리 정책

일본은 2011년 후쿠시마 원전 사태 이후 심각한 에너지 가격 변동과 에너지 자립도 저하를 경험한 후, 제4~5차 국가 에너지기본계획을 통해 국가 에너지 정책 방향을 에너지공급 안전성(Energy Security), 에너지효율 증진(Economic), 친환경(Environment), 에너지 안전성 제고(Safety)라는 '3E+S'로 설정하였다. 또한 원전 신뢰성이 낮아진 상태에서 화석연료 의존도를 축소하기 위해 신재생에너지 활성화에 많은 노력을 기울이고 있는데, 2018년 발표된 「제5차 에너지기본계획」에서는 2030년까지 신재생에너지 비중을 22~24%로 제고한다는 목표를 제시했다.<sup>39)</sup>

39) 양의석·임지영(2019), pp. 3~4.

이러한 국가의 에너지 정책기조에 부합해 일본의 해운·항만 분야에서도 화석연료 탈피와 신재생에너지 활용을 강화하고 있다. 특히 동일본대지진, 후쿠시마 원전 사태를 겪으며 재해 발생 시 항만의 정상적인 기능을 유지 하면서 신재생에너지 사용 확대라는 두 마리 토끼를 잡기 위해 노력하고 있다. 이러한 노력의 일환으로 일본 환경성과 국토교통성은 2012년부터 ‘재해 등 비상사태 발생 시 효과적인 항만지역 저탄소화 촉진 시범사업(災害等非常時にも効果的な港湾地域低炭素化推進事)’ 공모를 통해 비상시 항만에 전기를 공급할 수 있는 효과적인 신재생에너지 발전시설과 저장 배터리 사용에 재정을 지원하고 있다(〈표 2-7〉 참조).<sup>40)</sup> 또한 일본 국토교통성의 중장기 항만 정책인 「PORT 2030」 계획에서도 8대 핵심 과제 중 신재생 에너지 도입과 에너지 공급거점 구축이 포함되어 있어 항만 에너지원의 다변화에 초점을 맞추고 있다.

〈표 2-7〉 일본 ‘재해 등 비상사태 발생 시 효과적인 항만지역 저탄소화 촉진 시범사업’



자료: 環境省(2012. 7. 12)

40) 環境省(2012. 7. 12)

특히 바다에 인접한 항만의 특성상 해상풍력발전은 일본 항만의 새로운 에너지원으로 각광받고 있다. 일본 정부는 2016년 「항만법」 개정을 통해 점용공모제도를 도입하여 해상풍력발전단지 사업자에게는 공유수면을 장기(최대 20년) 이용할 수 있도록 명문화했으며, 2018년에는 「신재생에너지 해역이용법」을 발표하여 항만구역이 아닌 일반 해역에서 해상풍력발전 도입을 촉진하고 있다.<sup>41)</sup> 이에 따라 일본은 항만을 중심으로 한 해상풍력발전단지 계획이 수립되어 있으며 이미 사업자도 선정된 상태이다.<sup>42)</sup> 해상 풍력 이외에도 일본 항만은 수소에너지 등 다양한 신재생에너지원 확보와 에너지 소비 절감 등에 노력하고 있다.

## 2) 일본 항만의 에너지 관리 사례

### (1) 요코하마항(Port of Yokohama)

요코하마항은 일본의 핵심 무역항이자 ‘미나토미라이21’로 대표되는 워터프런트로서 친환경 항만 건설을 매우 중시하고 있으며 컨테이너터미널에서도 하이브리드 트랜스퍼 크레인, 항만 내 LED 조명, 태양발전 시스템 등 친환경·고효율 설비를 다양하게 활용하고 있다.<sup>43)</sup> 또한 ‘녹색 물류’를 통한 에너지 소비와 탄소배출 절감을 추진하고 있는데 대표적으로 내항 운송, 바지선 운송 그리고 철도 운송을 장려하고 있다. 특히 2006년부터 시작된 컨테이너 바지선 운송은 1회에 트럭 80대 운송 효과에 상당하여 항만 주변의 혼잡 해소와 에너지 절약에 크게 기여하고 있다. 2013년부터는 이러한 바지선을 통한 입항을 대상으로 입항료와 안벽 사용료를 전액 또는 일부 감면하는 정책을 시행하고 있다.<sup>44)</sup>

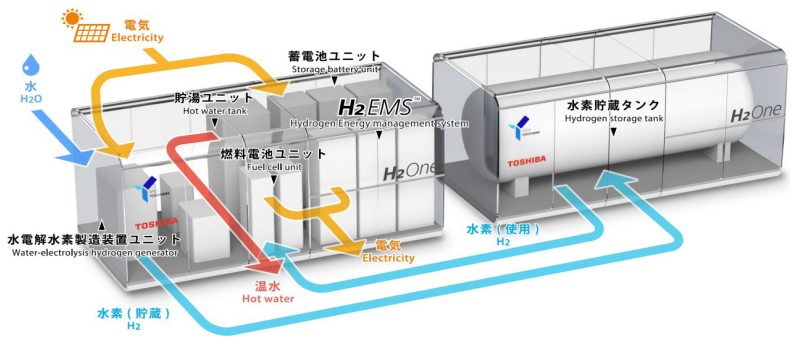
41) 일반해역은 영해 및 내수 가운데 어업활동으로 이용되는 항구 및 항만 구역 등을 제외한 대부분의 해역을 의미하며, 해상풍력사업은 25~30년의 사업기간이 소요되나 해역을 이용할 수 있는 점용 기간이 지역에 따라 3~5년으로 짧아 해상풍력사업의 진입장벽이 높았음. 에너지경제연구원(검색일: 2021. 4. 28)

42) 이종필 외(2019)

43) City of Yokohama(a)(검색일: 2021. 5. 27)

수소경제에 발맞춘 요코하마항의 수소연료전지시스템 구축 역시 주목할 만하다. 2014년 개정된 「요코하마 항만계획(Master Plan of the Port of Yokohama)」에 따라 요코하마항은 에너지 사용 효율 개선, 탄소 저감, 재해 발생에 따른 전력공급 차단에 대비해 항만에 수소연료전지시스템(H2One)을 요코하마항 화물센터(Y-CC: Yokohama Port Cargo Center)에 설치하여 운영 중이다. 수소연료전지시스템은 <그림 2-6>과 같이 ①전해수소 제조장치 ②수소저장탱크 ③연료전지 ④축전기 ⑤온수탱크로 구성되어 있으며, 에너지관리시스템(EMS: Energy Management System)을 통해 관리된다.

<그림 2-6> 요코하마항 화물센터의 수소연료전지시스템



자료: City of Yokohama(c)(검색일: 2021. 5. 27)

이 수소연료시스템은 수돗물을 태양광발전을 통해 생성된 전기로 전기분해해 수소를 생성하며, 생성된 수소는 저장탱크에서 최대 72시간 동안 저장 가능하다. 전력 저장 용량은 44kWh이며, 재해로 계통 전력이 차단될 때는 자율적으로 비상용 전력을 공급할 수 있다.

44) City of Yokohama(b)(검색일: 2021. 5. 27)

## (2) 고베항(Port of Kobe)

고베항은 에너지 효율화를 위한 설비의 개선을 적극적으로 시도하고 있다. 국토교통성과 환경성의 ‘재해 등 비상사태 발생 시 효과적인 항만지역 저탄소화 촉진 시범사업’의 지원(9,933만 엔)을 받아 하이브리드형 트랜스퍼 크레인 2대를 2018년부터 고베항 PC-18터미널에 도입하였다. 이를 통한 에너지 소비 절감액은 연간 401만 엔으로 기존 장비 사용에 비해 에너지 비용을 51%까지 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 이 크레인에는 에너지 소비 절감을 실현할 뿐만 아니라 크레인의 엔진 발전기에서 냉동 컨테이너나 기타 전력이 필요한 설비로 전력을 공급할 수 있어 정전 등 비상시 활용이 가능한 특징도 갖추고 있다.<sup>45)</sup>

〈그림 2-7〉 고베항의 하이브리드 크레인과 전원 공급장치



자료: 環境省(2020), p. 73

주: 좌측은 크레인 모습, 우측은 리퍼용 전원박스

## 3. 싱가포르

싱가포르는 자체적인 에너지 자원이 없어 효율적인 에너지 관리가 매우 중요한 문제이다. 이에 따라 싱가포르 환경청(National Environment

45) 環境省(2020)

---

Agency)과 에너지시장청(Energy Market Authority)은 2007년부터 에너지효율프로그램사무소(Energy Efficiency Programme Office)를 설치하고 에너지 수요 전망, 에너지의 효율적인 사용과 관리, 관련 기술 개발 등에 많은 노력을 기울이고 있다.<sup>46)</sup> 싱가포르 해운항만청(Maritime and Port Authority of Singapore) 역시 2011년부터 ‘Maritime Singapore Green Initiative(MSGI)’를 추진해 오고 있으며, 2019년에는 MSGI를 2024년까지 연장했다. MSGI는 크게 ‘Green Ship Programme’, ‘Green Port Programme’, ‘Green Energy and Technology Programme’, ‘Green Awareness Programme’ 등 4개의 프로그램으로 구성되어 있다.<sup>47)</sup>

싱가포르는 항만의 에너지원 다변화도 추진하고 있다. PSA는 2016년 싱가포르 최대의 태양광시스템기업인 Sunseap Group과 공동으로 주룽(Jurong)항에 세계 최대의 항만 태양광발전시스템을 건설하였으며 연간 발전량은 1,200만 kWh 이상으로 이는 주룽항 전체 전력 수요의 60%에 달하는 규모이다.<sup>48)</sup> 그러나 태양광을 통해 생성된 전력 중에서 유실되는 양도 상당히 많아 항만의 통합적인 에너지 관리시스템이 요구되었다. 이를 해결하기 위해 주룽항은 난양이공대학교(NTS), SP그룹과 함께 다양한 에너지원을 관리할 수 있는 AI 기반의 ‘스마트 에너지 관리시스템(SMES: Smart Multi-Energy System)’을 개발하고 2018년 말부터 주룽항에서 테스트를 시작하였다. 이 시스템은 기상 상황 등에 따라 태양광 발전이나 더 적합한 다른 에너지원을 선택할 수 있고 에너지 사용 모니터링과 분석도 가능하도록 설계되었으며, 최대 10%의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 나타났다.<sup>49)</sup>

---

46) Energy Efficiency Programme Office(검색일: 2021. 5. 28)

47) MPA(검색일: 2021. 5. 28)

48) SIEMENS(2017), *앞의 책*, p. 46.

49) NTU(2018. 9. 8)



〈그림 2-8〉 싱가포르 주룽항의 세계 최대 항만 태양광발전 시스템



자료: Marine Insight(2017. 11. 1)

또한 PSA는 2018년 파시르판장터미널(Pasir Panjang Terminal)에 태양광에너지를 활용하기로 결정하고 파시르판장터미널 내 건물, 게이트, 정비 기지, 근로자 숙소를 포함한 터미널 5개 구역에 태양광시스템을 구축했으며, 매년 4.3GWh 규모의 전력 생산이 가능하다. 2019년 PSA는 싱가포르 에너지시장청과 함께 파시르판장터미널을 테스트베드로 하여 항만의 에너지 소비를 모니터링하고 최적화하는 스마트그리드 관리시스템과 에너지 저장시스템 개발 프로젝트에 착수하기도 했다.<sup>50)</sup>

## 4. 두바이

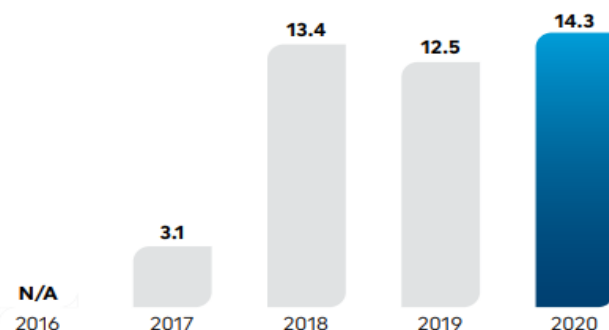
산유국인 두바이 역시 에너지 효율화가 국가의 주된 관심사이다. 두바이는 2009년에 두바이최고에너지위원회(DSCE: Dubai Supreme Council of Energy)를 설립했으며, 2010년 「두바이 통합에너지 전략 2030(Dubai Integrated Energy Strategy 2030)」을 제시하며 효율적인 에너지 관리의

50) 프로젝트명은 "AIoT-Enabled Smart Grid Applications for Sustainable and Resilient Digital Ports in Singapore"임, Energy Market Authority(검색일: 2021. 5. 28)

중요성을 강조했다. 또한 2015년에는 「두바이 청정에너지 전략 2050 (Dubai Clean Energy Strategy 2050)」을 수립하여 2030년까지 두바이의 청정에너지원 비중을 25%까지, 2050년에는 75%까지 제고하겠다는 단계적인 목표를 제시했다. 이 전략에는 2030년까지 두바이에 있는 세계 최대 단일 태양발전소인 ‘Mohammed Bin Rashid Al Maktoum Solar Park’의 용량을 5,000MW까지 높이는 등 관련 인프라 구축 계획도 포함되어 있다.<sup>51)</sup>

두바이항 역시 이러한 정부의 정책기조에 맞춰 에너지 절감과 재생에너지 확대에 노력하고 있다. 두바이항을 운영하고 있는 DP World는 2020년 새로운 ‘장기 탄소와 에너지 전략’을 수립하고 2050년까지 탄소제로를 실현한다는 목표이다. 이에 따라 전체 DP World그룹에서 신재생 에너지를 통한 전력 공급은 2018년 12만 2,460MWh에서 2020년 15만 9,670MWh로 빠르게 증가했으며, 이는 전체 그룹 전력 소비의 약 14%에 해당하는 수준이다.<sup>52)</sup>

〈그림 2-9〉 DP World그룹의 전력 소비 중 재생에너지원 비중(%)



자료: DP World(2021), p. 66

51) The United Arab Emirates' Government portal(검색일: 2021. 5. 28)

52) DP World(2021), p. 66.

### 제3절 해외 사례의 시사점

이상에서 검토된 해외 사례의 시사점을 종합하면 다음과 같다.

첫째, 세계 주요 국가와 지역에서는 정부의 친환경정책과 에너지 관리정책을 연계하여 항만의 에너지 효율화를 추진하고 있다. 유럽항만협회(ESPO)에서도 EU의 에너지 소비 절감 기조에 맞춰 항만 환경 검사시스템을 도입하면서 항만의 에너지 효율화를 중시하고 있으며, 중국도 중앙정부와 지방 정부에서 항만의 에너지 소비 절감을 강조하는 정책을 발표하고 상하이, 선전, 칭다오 등 주요 항만에서는 이를 실현하기 위해 노력 중이다. 일본 항만은 국가 에너지정책에 부합하여 신재생에너지 사용 확대와 자연재해 같은 비상사태 시 사용 가능한 에너지체계를 구축하고 있다.

둘째, 세계 주요 항만 대부분은 에너지 효율화를 위해 다양한 방식을 종합적으로 활용하고 있다. 주요 사례를 요약하여 정리하면 에너지를 적게 사용하는 장비로 교체(LA/LB항, 로테르담항, 함부르크항, 델프트제일항, 상하이항, 선전항, 칭다오항 등), 태양광과 풍력 등 신재생에너지 확대(함부르크항, 로테르담항, LA/LB항, 샌디에이고항, 싱가포르항, 두바이항, 요코하마항, 고베항, 상하이항, 칭다오항), 마이크로그리드 등 에너지 관리 시스템 구축(로테르담항, 함부르크항, LA/LB항, 샌디에이고항, 칭다오항 등) 등이다.

셋째, 세계 주요 항만에서 유류 등의 화석에너지 소비는 다각적 노력으로 감소하고 있으나 전력 소비량은 증가하고 있는 추세이다. 이는 하역장비의 전기에너지 전환, AMP 설치, 터미널의 자동화 등에 기인한다. 세계 주요 항만은 증가하는 전력 소비에 대응하여 마이크로그리드를 구축해 전력 소비를 효율화(로테르담항, 함부르크항, LA/LB항, 샌디에이고항, 칭다

---

오항 등)하고 전력 공급과 분산 전원 마련을 위해 신재생에너지를 적극 활용 중이다.

이렇듯 해외 주요 항만에서는 정부 정책기조의 틀 내에서 에너지 효율화를 위한 다양한 정책을 추진하고 있다. 특히 항만에서 전력 사용 증가는 세계적인 추세인 만큼 국내 항만에서도 유류 등의 사용은 지속적으로 감소하고 전력 소비량이 급증할 것으로 예상된다. 이에 항만의 중장기 전력 소비량 전망을 통한 수급 검토, 전력 소비 효율화를 위한 마이크로그리드 등 관리시스템 도입, 안정적 전력 공급을 위한 분산 전원 마련 목적의 신재생 에너지 도입 필요성 등 다각적인 검토가 시급한 실정이다.

## 03

# 부산항 신항 전기에너지 소비량 전망

제2장에서 해외 주요 항만에서 추진 중인 에너지 관리정책을 살펴보았다. 본 장에서는 우리나라 항만의 에너지 관리정책 수립에서 가장 중요한 중장기 전기에너지 소비량을 부산항 신항을 대상으로 전망한다. 전기에너지 소비로 한정된 이유는 항만의 자동화, 친환경화로 전력 기반 장비가 증가하고 있으며, 스마트항만의 본격 도입에 따라 모든 장비가 전력화되어 향후 전기에너지가 항만에서 가장 중요한 에너지원이 될 것으로 판단되기 때문이다.

## 제1절 부산항 신항의 전력 소비 현황

---

항만에서의 전력 소비 대상은 개별 터미널의 운영 여건에 따라 상이하나 주로 하역장비, 냉동컨테이너(Reefer), 건물, 기타 등의 시설 운영에 대부분의 전기가 소비된다. 하역장비는 안벽크레인, 야드크레인, 이동장비 등이며, 건물은 터미널 운영 건물, 정비공장, 변전소, 창고, 세관검색대 등이다. 또한 기타 항만 내 조명탑, 식당, 게이트 등 터미널 운영에 필요한 시설물도 전기 소비의 대상에 포함된다.

## 1. 부산항 신항 전체 전력 사용 현황

부산항 신항의 전력 소비 현황을 파악하기 위해 부산항 신항 5개 터미널(1~5부두)의 전기 사용량 현황을 분석하였다. 5개 터미널은 부두의 규모에 따라 처리 물동량 수준, 하역장비와 시설, 부두 구조 등이 다르며 이에 따라 부두별 전기 사용량 소비구조 등에도 차이가 있다. 5개 터미널을 전체적으로 살펴보면 물동량이 증가함에 따라 전기 사용량도 꾸준한 증가세를 보이고 있는 것으로 나타났다. 2016년부터 2020년까지 물동량은 약 3.6% 증가한 반면에 전기 사용량은 약 5.5% 증가하여 물동량 증가세를 상회하였다. 특징적인 것은 장비의 전기 사용량 비중이 연간 전기 사용량의 60% 이상을 차지하고 있고, 장비를 제외한 시설의 전기 사용량이 약 7.8% 증가하여 장비보다 높은 증가세를 보였다는 것이다. 이는 장비 외에도 친환경 설비, 냉동컨테이너 처리 증가 등 비장비 분야에도 에너지원 전환, 타 전력 소비 화물의 증가 등에서 기인하는 것으로 판단된다.

〈표 3-1〉 부산항 신항 전체 전기사용량 현황

단위: 천 kWh, 천 TEU

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연평균 증가율
장비	137,385 (66.4%)	143,866 (65.6%)	155,922 (64.0%)	157,973 (63.8%)	162,745 (63.3%)	4.3%
기타	69,522 (33.6%)	75,146 (34.4%)	87,852 (36.0%)	91,329 (36.2%)	94,168 (36.7%)	7.8%
사용량 합계	206,907	219,012	243,774	247,302	256,913	5.5%
물동량 (천 TEU)	12,835	13,449	14,518	14,867	14,777	3.6%

단위: 천 kWh, 천 TEU

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	연평균 증가율
사용량 /TEU	16.12	16.28	16.79	16.63	17.38	1.9%

자료: 부산항 신항 각 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주1): 장비는 부두별 하역장비(QC, RMGC, 이동장비 등) 전기 사용량을 합산하여 분석

주2): 기타는 하역장비 이외의 부두 시설별(Reefer, 운영건물, 변전소, 창고, 식당, 게이트, 세관건물, 각종 창고, 조명탑, 크레인 정비공장 등) 전기 사용량을 합산하여 분석

주3): 물동량은 2016~2020년 신항 5개 부두(1~5부두) 물동량을 합산한 수치임

## 2. 터미널별 전력 사용 현황

부산항 신항 5개 터미널별 전기 사용량 추이를 살펴보면 2부두가 5년간 평균 7,200만 kWh 수준으로 가장 많은 전기를 사용하고 있으며, 3부두(4,100만 kWh), 4부두(4,100만 kWh), 5부두(4,000만 kWh), 1부두(3,900만 kWh) 순으로 전기를 많이 사용한 것으로 나타났다. 그러나 최근 5년간(2016~2020년) 전기 사용량 증가율에서는 5부두(BNCT)가 연평균 12.8%로 5개 부두 중에서 가장 높은 증가세를 보였다. 그다음으로 1부두(PNIT, 6.2%), 3부두(HJNC, 5.9%), 2부두(PNC, 4.4%) 순이며, 4부두(HPNT)의 경우 동기간 -0.5%의 감소세를 보였다. 5부두의 전기 사용량 증가율이 가장 높았던 이유는 2012년 개장 이후 신항 5개 터미널 중 유일하게 수직배열의 자동화 장치장으로 운영되어 장치장 내 모든 크레인 장비가 타 부두 장치장의 크레인 대비 상대적으로 전기가 많이 소요되는 ARMGC이기 때문인 것으로 판단된다.

〈표 3-2〉 부산항 신항 부두별 전기 사용량 추이(2016~2020년)

단위: 천 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균 사용량	연평균 증가율
1부두 (PNIT)	36,357	34,753	38,899	41,584	46,194	39,557	6.2%
2부두 (PNC)	62,355	70,119	74,926	77,489	76,036	72,185	5.1%
3부두 (HJNC)	37,114	37,336	42,195	42,296	46,654	41,119	5.9%
4부두 (HPNT)	42,179	38,451	42,741	44,835	41,297	41,901	-0.5%
5부두 (BNCT)	28,902	38,350	45,010	43,791	46,730	40,557	12.8%
합계	206,907	219,009	243,771	249,995	256,911	235,319	5.5%

자료: 부산항 신항 각 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

반면 2부두의 전기 사용량이 가장 많은 이유는 부산항 신항 5개 터미널 중 가장 많은 물동량을 처리하고 있고, 이를 위해 가장 많은 장비와 시설을 운영하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 2부두 규모는 약 174만 m<sup>2</sup>로 5개 터미널 중 규모가 가장 크며 장비 운영 규모 역시 하역장비와 이송장비를 포함하여 622대로 가장 많다.

〈표 3-3〉 부산항 신항 부두별 운영 규모 현황(2020년 기준)

구분	1부두 (PNIT)	2부두 (PNC)	3부두 (HJNC)	4부두 (HPNT)	5부두 (BNCT)
부두 길이	1,200m	2,000m	1,100m	1,150m	1,400m
접안 능력	5만 톤급 3선석	5만 톤급 6선석	5만 톤급 2선석, 2만 톤급 2선석	5만 톤급 2선석, 2만 톤급 2선석	5만 톤급 4선석



구분	1부두 (PNIT)	2부두 (PNC)	3부두 (HJNC)	4부두 (HPNT)	5부두 (BNCT)
면적	·부지 840천㎡ ·CY 294천㎡ ·건물 20천㎡	·부지 1,210천㎡ ·CY 525천㎡ ·건물 11천㎡ ·CFS 2.5천㎡	·부지 688천㎡ ·CY 346천㎡ ·건물 15.7천㎡ ·CFS 1.1천㎡	·부지 553천㎡ ·CY 213천㎡ ·건물 10.3천㎡ ·CFS 1.4천㎡	·부지 785천㎡ ·CY 154천㎡ ·건물 7.8천㎡ ·CFS 0.9천㎡
합계	1,154천㎡	1,748천㎡	1,050천㎡	777천㎡	947천㎡
장비	·C/C 12기 ·T/C 42기 ·Y/T 83대 ·R/S 3대 ·새시 166대 ·F/L 10대 ·E/H 8대	·C/C 22기 ·T/C 69기 ·Y/T 154대 ·R/S 5대 ·새시 334대 ·F/L 21대 ·E/H 17대	·C/C 12기 ·T/C 42기 ·Y/T 96대 ·R/S 4대 ·새시 213대 ·F/L 17대 ·E/H 7대	·C/C 12기 ·T/C 38기 ·Y/T 85대 ·R/S 5대 ·새시 161대 ·F/L 11대 ·E/H 3대	·C/C 14기 ·T/C 52기 ·S/C 36대 ·Y/T 10대 ·R/S 4대 ·새시 70대 ·F/L 9대 ·E/H 4대
합계	336대	622대	391대	315대	199대
전력량 (천kWh)	46,194	76,036	46,654	41,297	46,730
물동량 (비중)	2,295천TEU (12.6%)	5,501천TEU (22.2%)	2,784천TEU (13.5%)	2,167천TEU (9.7%)	2,119천TEU (9.8%)

자료: 부산항 신항 각 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주: 장비 대수는 각 터미널의 운영 중인 하역장비와 이송장비를 모두 합친 숫자임

부산항 신항 5개 터미널 전기 사용량 중 하역장비의 전기 사용량이 평균 60% 이상으로 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 2부두의 장비 전기 사용량이 5년(2016~2020년) 평균 4,400만 kWh로 가장 높은 것으로 나타났다.

〈표 3-4〉 부산항 신항 하역장비 전기사용량 비중 현황(2016~2020년)

단위: 천 kWh, %

구분		2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균	연평균 증가율
1부두	전체사용량 (천kWh)	36,357	34,753	38,899	41,584	46,194	39,557	6.2%
	장비사용량 (천kWh)	26,267	25,373	28,382	28,977	34,344	28,668	7.9%
	비중(%)	72.25	73.01	72.96	69.68	74.35	72.45	0.07%
2부두	전체사용량 (천kWh)	62,355	70,119	74,926	77,489	76,036	72,185	5.1%
	장비사용량 (천kWh)	40,217	43,605	44,791	46,188	45,830	44,126	3.3%
	비중(%)	64.50	62.19	59.78	59.61	60.27	61.27	-1.68%
3부두	전체사용량 (천kWh)	37,114	37,336	42,195	42,296	46,654	41,119	5.9%
	장비사용량 (천kWh)	23,558	25,451	28,436	28,628	30,846	27,384	7.0%
	비중(%)	63.47	68.17	67.39	67.68	66.12	66.57	1.0%
4부두	전체사용량 (천kWh)	42,179	38,451	42,741	44,835	41,297	41,901	-0.5%
	장비사용량 (천kWh)	25,376	23,610	24,682	25,497	25,008	24,835	-0.3%
	비중(%)	60.16	61.40	57.75	56.87	60.56	59.35	0.16%
5부두	전체사용량 (천kWh)	28,902	38,350	45,010	43,791	46,730	40,557	12.8%
	장비사용량 (천kWh)	21,966	25,825	29,630	28,680	26,716	26,563	5.0%
	비중(%)	76.00	67.34	65.83	65.49	57.17	66.37	-6.87%

자료: 부산항 신항 각 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주: 장비는 각 터미널 하역장비(QC, RMGC, 이송장비 등)의 전기 사용량을 합산한 수치임

## 1) 1부두(PNIT)

최근 5년간(2016~2020년) 1부두의 전체 시설별(RMGC, QC, Reefer, 운영건물 등) 전기 사용량 현황을 살펴보면 RMGC가 평균 1,682만 kWh, 연평균 7.9% 증가하여 가장 높은 전기 사용량과 증가율을 기록한 것으로 나타났다. 다음으로 QC 1,185만 kWh(연평균 5.6%), Reefer 1,020만 kWh(연평균 4.0%), 기타 운영건물은 약 69만 kWh(연평균 5.8%) 수준의 전기를 사용하고 있는 것으로 분석되었다. RMGC가 5년 평균 전기 사용량의 42.50%를 차지하는 것은 자동화 하역장비로 운영 중이기 때문인 것으로 판단된다.

〈표 3-5〉 부산항 신항 1부두(PNIT) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)

단위: 천 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균	연평균 증가율
QC (비중)	11,339 (31.2%)	10,460 (30.1%)	11,807 (30.4%)	11,552 (27.8%)	14,075 (30.5%)	11,847 (30.0%)	5.6%
RMGC (비중)	14,928 (41.1%)	14,912 (42.9%)	16,574 (42.6%)	17,424 (41.9%)	20,268 (43.9%)	16,821 (42.5%)	7.9%
Reefer (비중)	9,570 (26.3%)	8,548 (24.6%)	9,778 (25.1%)	11,894 (28.6%)	11,199 (24.2%)	10,198 (25.8%)	4.0%
기타 (비중)	519 (1.4%)	831 (2.4%)	738 (1.9%)	713 (1.7%)	650 (1.4%)	690 (1.8%)	5.8%
합계	36,357	34,753	38,899	41,584	46,194	39,557	6.2%

자료: 부산항 신항 1부두 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주: 기타는 1부두 터미널 내 운영동, 식당 등의 각 시설물 전기 사용량을 합산한 수치임

## 2) 2부두(PNC)

2부두(PNC)의 최근 5년간 시설별(장비, 건물, 기타) 전기 사용 현황 분석 결과, 장비(안벽크레인, 야드크레인, 이동장비)의 전기 사용량이 평균 4,427만 kWh 수준으로 가장 높았으며, 건물(본관동, 조명탑, 운영건물, 크레인정비 공장, 변전소, 창고, 세관검색대) 약 2,662만 kWh, 기타(게이트, 초소, 식당) 130만 kWh 수준의 전기를 사용하고 있는 것으로 나타났다. 2부두 전체의 전기 사용량에서 장비가 차지하는 비중이 최근 5년간 약 61.3%로 절대적으로 많았으며, 세관검색대, Reefer시설, 조명탑 등 터미널 운영에 필요한 각종 시설물의 전기 사용량도 연평균 8.5%의 증가율을 보이고 있다.

〈표 3-6〉 부산항 신항 2부두(PNC) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)

단위: 천 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균	연평균 증가율
장비 (비중)	40,217 (64.5%)	43,605 (62.2%)	44,791 (59.8%)	46,884 (60.5%)	45,830 (60.3%)	44,265 (61.3%)	3.3%
건물 (비중)	20,876 (33.5%)	25,275 (36.0%)	28,788 (38.4%)	29,215 (37.7%)	28,935 (38.1%)	26,618 (36.9%)	8.5%
기타 (비중)	1,262 (2.0%)	1,239 (1.8%)	1,347 (1.8%)	1,390 (1.8%)	1,271 (1.7%)	1,302 (1.8%)	0.2%
합계	62,355	70,119	74,926	77,489	76,036	72,185	4.4%

자료: 부산항 신항 2부두 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주1): 장비는 안벽크레인, 야드크레인, 이동장비의 전기 사용량을 합산한 수치임

주2): 건물은 본관동, 조명탑, 운영건물, 크레인정비공장, 부변전소, 리퍼변전소, 중량물창고, 세관검색대의 전기사용량을 합산한 수치임

주3): 기타는 동측게이트, 동측청경초소, 서측식당의 전기 사용량을 합산한 수치임

### 3) 3부두(HJNC)

3부두 전기 사용량 현황 분석 결과 QC와 RMGC가 포함된 장비의 전기 사용량이 5년간 평균 66.6% 수준으로 전체 전기 사용량에서 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 2020년 기준 RMGC장비 사용량이 1,722만 kWh로 가장 높았으며, QC 1,363만 kWh, Reefer 1,181만 kWh, 건물 230만 kWh, 조명탑 122만 kWh, 기타 47만 kWh 순으로 높은 전기 사용량을 보이고 있다. 선박 대형화에 따른 하역장비 규모 증가, 냉동냉장 화물처리 증가에 따라 5년간(2016~2020년) QC와 냉동컨테이너(Reefer) 전기사용량은 각각 연평균 10.2%와 6.1%의 증가율을 보이고 있다. 반면 3부두 조명탑 LED 교체사업이 진행됨에 따라 조명탑 전기 사용량은 5년간 연평균 약 3.6% 감소하였다.

〈표 3-7〉 부산항 신항 3부두(HJNC) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)

단위: 천 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균	연평균 증가율
QC (STS)	9,232 (24.9%)	10,627 (28.5%)	12,215 (28.9%)	12,423 (29.4%)	13,629 (29.2%)	11,625 (28.3%)	10.2%
RMG	14,326 (38.6%)	14,824 (39.7%)	16,221 (38.4%)	16,205 (38.3%)	17,216 (36.9%)	15,758 (38.3%)	4.7%
복합건물	2,294 (6.2%)	2,308 (6.2%)	2,354 (5.6%)	2,322 (5.5%)	2,299 (4.9%)	2,315 (5.6%)	0.1%
Reefer	9,337 (25.2%)	7,887 (21.1%)	9,452 (22.4%)	9,486 (22.4%)	11,814 (25.3%)	9,595 (23.3%)	6.1%
조명탑	1,412 (3.8%)	1,229 (3.3%)	1,486 (3.5%)	1,382 (3.3%)	1,221 (2.6%)	1,346 (3.3%)	-3.6%
기타	510 (1.4)	459 (1.2%)	466 (1.1%)	475 (1.1%)	471 (1.0%)	476.2 (1.2%)	-2.0%
합계	37,114	37,336	42,195	42,296	46,654	41,119	5.9%

자료: 부산항 신항 3부두 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주: 기타는 3부두 터미널 내 식당, 변전소 등의 시설물 전기 사용량을 합산한 수치임

#### 4) 4부두(HPNT)

4부두의 전기 사용량은 2016년 약 4,218만 kWh 수준에서 2020년 약 4,130만 kWh 수준으로 5년간 연평균 0.5% 감소했다. 4부두 전체 전기 사용량 중 장비(QC와 ATC)가 차지하는 비중은 5년 평균 59.3%로 비중이 가장 높으며 그다음으로 냉동변전실이 32.6%로 높은 비중을 차지하고 있다. QC와 ATC의 전기 사용량은 연평균 0.4%, 0.3%로 각각 감소하였으며, 냉동변전실 전기 사용량도 최근 5년간 연평균 2.1% 수준의 감소세를 보이고 있다. 4부두 전기 사용량 감소는 처리 물동량의 감소에서 기인한다. 실제 4부두 화물은 2016년 232만 TEU에서 2020년 211만 TEU로 연평균 약 2.3% 수준으로 감소하였다. 4부두 물동량 감소에 따른 하역장비(QC와 ATC) 전기 사용량 감소로 전체 부두의 전기 사용량이 감소한 것으로 판단된다.

〈표 3-8〉 부산항 신항 4부두(HPNT) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)

단위: 천 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균	연평균 증가율
QC	10,031 (23.8%)	9,047 (23.5%)	9,624 (22.5%)	10,216 (22.8%)	9,860 (23.9%)	26,040 (23.3%)	-0.4%
ATC	15,344 (36.4%)	14,563 (37.9%)	15,057 (35.2%)	15,281 (34.1%)	15,147 (36.7%)	15,078 (36.0%)	-0.3%
냉동변전실	13,873 (32.9%)	11,639 (30.3%)	14,485 (33.9%)	15,805 (35.3%)	12,726 (30.8%)	13,706 (32.6%)	-2.1%
조명탑	642 (1.5%)	682 (1.8%)	996 (2.3%)	840 (1.9%)	878 (2.1%)	807.6 (1.9%)	8.1%
복합건물	1,922 (4.6%)	2,099 (5.5%)	2,140 (5.0%)	2,266 (5.1%)	2,279 (5.5%)	2,141 (5.1%)	4.4%
변전실	365 (0.9%)	420 (1.1%)	436 (1.0%)	424 (0.9%)	404 (1.0%)	409.8 (1.0%)	2.6%
합계	42,179	38,451	42,741	44,835	41,297	41,901	-0.5%

자료: 부산항 신항 4부두 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

## 5) 5부두(BNCT)

5부두의 전기 사용량은 2016년에서 2020년까지 약 1,200만 kWh(연평균 12.8%) 증가하여 신항 5개 터미널 중 가장 높은 증가세를 보였다. 5부두 전체 전기 사용량 중 QC와 RMGC 등 주요 하역장비의 사용량이 5년 평균 66.3% 수준으로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 특히 Reefer의 전기 사용량은 5년간 연평균 45.1%의 폭발적인 증가세를 보였다. 이는 같은 기간 다른 터미널의 Reefer 전기 사용량 증가율<sup>53)</sup>보다 약 9배 수준의 높은 증가율로 5부두의 Reefer 화물이 다른 부두 대비 대폭 증가한 것에서 기인한다. 또한 QC와 RMGC 등 자동화장비 시설의 전기 사용량도 5년간 각각 연평균 7.2%, 4.0%의 증가율을 보였다.

〈표 3-9〉 부산항 신항 5부두(BNCT) 시설별 전기 사용량 현황(2016~2020년)

단위: 천 kWh

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균	연평균 증가율
QC	6,579 (22.8%)	8,420 (22.0%)	10,073 (22.4%)	9,363 (21.4%)	8,700 (18.6%)	8,627 (21.4%)	7.2%
RMGC	15,387 (53.2%)	17,404 (45.4%)	19,556 (43.4%)	19,317 (44.1%)	18,015 (38.6%)	17,936 (44.9%)	4.0%
Reefer	3,858 (13.3%)	9,661 (25.2%)	12,382 (27.5%)	12,279 (28.0%)	17,123 (36.6%)	11,061 (26.1%)	45.1%
운영동 및 CIS	1,334 (4.6%)	1,263 (3.3%)	1,263 (2.8%)	1,218 (2.8%)	1,213 (2.6%)	1,258 (3.2%)	-2.4%
조명타워	845 (2.9%)	727 (1.9%)	799 (1.8%)	708 (1.6%)	742 (1.6%)	764.2 (2.0%)	-3.2%
기타	897 (3.1%)	871 (2.3%)	935 (2.1%)	904 (2.1%)	934 (2.0%)	908.2 (2.3%)	1.0%
합계	28,902	38,350	45,010	43,791	46,730	40,557	12.8%

자료: 부산항 신항 5부두 터미널운영사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

주: 기타는 5부두 터미널 내 식당, 변전소 등의 시설물 전기 사용량을 합산한 수치임

53) 2016년~2020년, 1부두와 4부두의 Reefer 전기사용량은 4.0%, 6.1% 각각 증가함

---

### 3. 종합

이상 부산항 신항의 전기에너지 소비 추이를 종합해 보면 물동량 증가와 신항 터미널의 자동화 운영 체계 확산, 하역장비의 전기동력화 등 에너지 전환, 친환경 항만 구축을 위한 새로운 시설 설치로 소비량이 지속적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 2016년부터 2020년까지 신항 물동량은 약 3.6% 증가한 반면 전기 사용량은 이를 상회하는 5.5%의 증가율을 보였다. 또한 하역장비가 가장 많은 전력을 소모하고 있는 것으로 나타났는데, 2020년 기준 부산항 신항 5개 터미널 전체 전기 사용량 약 2억 5,000만 kWh 중 하역장비의 전기 소모량은 1억 6,000만 kWh로 전체의 63.3%라는 높은 비중을 점유하였다.

특히 5부두의 최근 5년간(2016~2020년) 전기 사용량 증가율이 12.8%로 가장 높은 증가세를 보이고 있는데 이는 5부두가 부산항 신항에서 유일하게 수직배열의 자동화 장치장으로 운영 중이기 때문이다. 장래 부산항 신항 서컨테이너터미널(이하 ‘서컨’)과 진해신항 등 신규 공급 예정인 부두는 완전 자동화터미널로의 운영을 계획하고 있으므로 향후 자동화부두 운영에 따른 장비 운용, AMP 설치 의무화 등으로 신항의 전기에너지 소비량은 크게 증가할 것으로 예상된다.

## 제2절 부산항 신항 전력 소비량 전망

---

본 연구에서는 장래 전력 소비량 전망을 위해서 딥러닝 기법을 활용하였다. 구체적으로는 학습자료의 정규화를 통한 모델 예측 정확도 향상, 학습 결과를 바탕으로 한 시계열 분석을 통해 장래 전력 소비량 예측, 표본을



활용한 예측 결과를 모집단으로 확대하는 전수화 과정을 통해 부산항 신항의 장래 전력 소비량을 예측한다.

## 1. 방법론

### 1) 정규화 과정(Normalization)

데이터 전처리하는 앞서 언급한 머신러닝 또는 딥러닝 기술을 이용하여 데이터를 학습할 때 높은 모델 예측 정확도를 위하여 필요한 과정이다. 그 중 데이터 정규화(normalization)는 데이터 분석 시 변수 데이터 값의 범위의 차이로 발생하는 오류를 줄여 보다 정확한 모델을 생성한다.

정규화 기법 중 학습에 주로 사용되는 최소최대 정규화(Min-Max normalization)는 모델의 입력 데이터(X)에서 가장 작은 변수값을 0, 큰 변수값을 1로 고정하고 나머지 변수는 비율에 맞추어 0과 1 사이의 값으로 변환한다. 최소최대 정규화 식은 아래 [식 4-1]과 같다.

$$X_{new} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad [\text{식 4-1}]$$

여기서  $X_{\min}$ : 입력 데이터 최솟값

$X_{\max}$ : 입력 데이터 최댓값

$X_{new}$ : 입력 데이터 변환값

### 2) 시계열 분석

전기에너지 소비량 데이터는 부두별 월별 전력 사용량의 정보를 포함한

시계열 데이터의 속성을 지니고 있다. 시계열 데이터란 시간의 흐름에 따른 현상 변화를 기록한 데이터를 의미한다. 따라서 시계열 데이터는 관찰과 분석을 통하여 주어지는 데이터를 발생시키는 체계를 이해하고 과거의 데이터를 통하여 미래의 값을 예측할 수 있다. 이때 과거의 데이터는 바로 앞 시점인  $t=0$ 의 데이터를 이용하여 그다음 시점인  $t=1$ 을 예측하거나 여러 시점의 과거 데이터를 이용하여 다음 시점을 예측할 수 있다.

$$Y_t = f(Y_{t-1}, Y_{t-2}, Y_{t-3}, \dots, Y_{t-n}) \dots\dots\dots [\text{식 4-2}]$$

〈표 3-10〉 시계열 분석 예시

단위: kWh, TEU

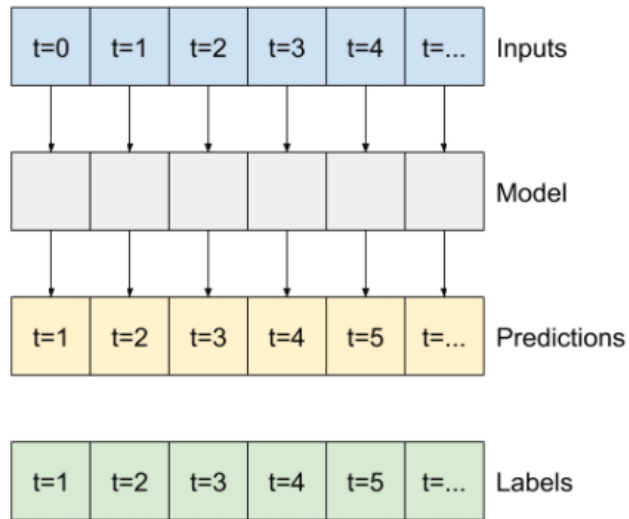
	전력 <sub><math>t-2</math></sub>	물동량 <sub><math>t-2</math></sub>	전력 <sub><math>t-1</math></sub>	물동량 <sub><math>t-1</math></sub>	전력 <sub><math>t</math></sub>
1	4,243,721	239,600	3,772,342	232,803	4,396,722
2	3,772,342	232,803	4,396,722	268,155	4,734,312
3	4,396,722	268,155	4,734,312	262,676	5,138,262
4	4,734,312	262,676	5,138,262	292,667	4,640,934
5	5,138,262	292,667	4,640,934	289,746	5,083,103

자료: 저자 작성

또한 시계열 데이터는 단변량 데이터와 다변량 데이터로 나누어 분석이 이루어진다. 단변량 시계열 데이터는 각 시점에서 분석 대상이 되는 변수가 하나인 데이터를 의미한다. 따라서 월별 에너지 소비량을 예측하기 위해서 이용하는 데이터는 월별 에너지 소비량임을 의미한다. 다변량 시계열 데이터는 단변량 시계열 데이터와 비슷하나 각 시점에서 하나의 분석 대상을 통하여 예측하는 대신, 두 개 이상의 변수를 통하여 하나 또는 두 개 이상의 분석 대상을 예측한다. 이에 따라 분석 시 활용되는 데이터는 월별

에너지 소비량과 에너지 소비량에 영향을 미치는 변수이며 이를 이용하여 에너지 소비량을 예측한다. 따라서 단변량 또는 다변량 시계열 데이터는 딥러닝 기반 단일 스텝 또는 다중 스텝 예측 모델을 이용하여 분석이 가능하다. 시계열 단일 또는 다중 스텝 예측 모델은 다음과 같이 예측한다.<sup>54)</sup>

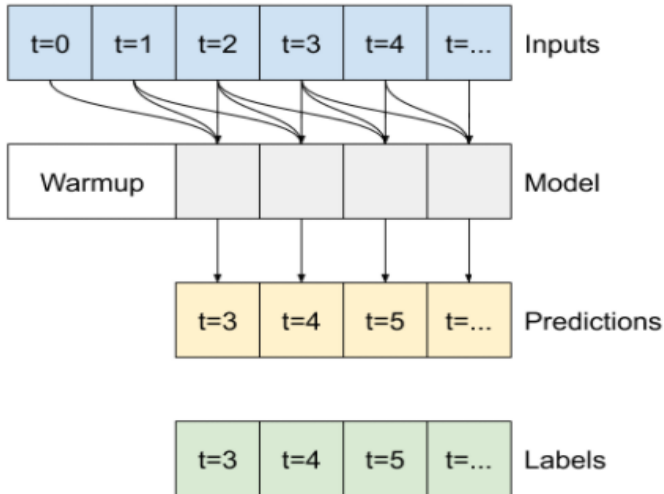
〈그림 3-1〉 시계열 단일 스텝 예측 모델



자료: TensorFlow(검색일: 2021. 8. 24)

54) Tensorflow.org(검색일: 2021. 8. 24)

〈그림 3-2〉 시계열 다중 스텝 예측 모델



자료: TensorFlow(검색일: 2021. 8. 24)

시계열 자료의 특성과 예측하고자 하는 변수의 특성에 따라 단변량과 다변량 모델을 적절하게 사용해야 한다. 본 연구에서는 예측 정확도가 상대적으로 높은 기법으로 평가되고 있는 다변량 분석 기법을 활용하였다. 또한 최근 에너지 소비량 예측 연구에서 자주 활용되는 DNN 모형과 LSTM 모형 관련 선행연구 검토를 통해 보다 적합한 모형을 선정하였다.

### (1) DNN(Deep Neural Network)

DNN은 두 개 이상의 은닉층을 구성하고 있으며 활성화 함수<sup>55)</sup>를 활용하여 데이터의 비선형 특징을 추출한다. 추출하기 위한 식은 다음과 같다(김영수·박호정, 2021).

55) 활성화 함수는 입력 자료의 출력을 결정하는 함수이며 자세한 내용은 후술함

$$\left. \begin{aligned} Z^{[i]} &= W^{[i]T} A^{[i-1]} + b^{[i]} \\ W^{[i]} &= W^{[i]} - \alpha \frac{\partial L}{\partial W^{[i]}} \\ b^{[i]} &= b^{[i]} - \alpha \frac{\partial L}{\partial b^{[i]}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots [식 4-3]$$

여기서,  $W^{[i]}$ : 각 층의 가중치 행렬

$b^{[i]}$ : 각 층의 가중치 행렬

$\alpha$ : 학습률

## (2) LSTM(Long Short-Term Memory)

LSTM은 RNN(Recurrent Neural Network)을 기본 모형으로 따르며 RNN의 장기 의존성 문제(long-term dependencies)를 해결하기 위해 개발된 모델이다. LSTM은  $x = (x_1, \dots, x_T)$ 를 고려하여  $y = (y_1, \dots, y_T)$ 를 추정한다. 추정하기 위한 식은 다음과 같다(Sak *et al.*, 2014).

$$i_t = \sigma(W_{ix}x_t + W_{im}m_{t-1} + W_{ic}c_{t-1} + b_i) \dots\dots [식 4-4]$$

$$f_t = \sigma(W_{fx}x_t + W_{fm}m_{t-1} + W_{fc}c_{t-1} + b_f) \dots [식 4-5]$$

$$c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot g(W_{cx}x_t + W_{cm}m_{t-1} + b_c) [식 4-6]$$

$$o_t = \sigma(W_{ox}x_t + W_{om}m_{t-1} + W_{oc}c_t + b_o) \dots\dots [식 4-7]$$

$$m_t = o_t \odot h(c_t) \dots\dots\dots [식 4-8]$$

$$y_t = \phi(W_{ym}m_t + b_y) \dots\dots\dots [\text{식 4-9}]$$

여기서,  $W$ : 가중치,  $b$ : 편향 벡터,  $\sigma$ : 로지스틱 시그모이드 함수,  $i$ : 입력게이트,  $f$ : 망각게이트,  $o$ : 출력게이트,  $c$ : 셀 활성화 벡터,  $m$ : 출력 활성화 벡터,  $\odot$ : 아다마르 곱<sup>56)</sup>,  $g$ : 입력셀 활성화 함수,  $h$ : 출력셀 활성화 함수,  $\phi$ : 네트워크 출력 활성화 함수

### (3) 활성화 함수

활성화 함수는 입력받은 자료를 다음 레이어로 출력할지를 결정하는 함수이다. 즉, 연산 결과가 특정 조건에 부합하면 다음 레이어로 값을 전달한다. 은닉층과 출력층 사이에 주어진 활성화 함수를 활용하여 분산 계산을 수행한다. 주로 사용되는 활성화 함수로는 Sigmoid 함수, Tanh (Hyperbolic Tangent) 함수, ReLu(Rectified Linear Unit) 함수 등이 있다. 각각의 식은 다음과 같다(Keras).

〈Sigmoid 함수〉

$$s = \frac{1}{1 + e^{-x}} \dots\dots\dots [\text{식 4-10}]$$

〈Tanh 함수〉

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} \dots\dots\dots [\text{식 4-11}]$$

56) 아다마르 곱은 같은 크기인 두 행렬을 각 성분끼리 곱하는 연산을 의미함

〈ReLU 함수〉

$$f(x) = \max(0, x) \dots\dots\dots [\text{식 4-12}]$$

여기서,  $x$ : 입력 데이터

이때 ReLu 함수는 Sigmoid 함수와 Tanh 함수에 비해 비교적 학습이 빠르고, 연산 비용이 적다는 장점이 있다.

### 3) 전수화

전수화는 표본자료를 이용하여 전체 모집단 특성과 유사하게 맞추는 과정이며, 표본에 적용하는 전수화 계수를 알맞게 산출하는 것이 중요하다. 이때 전수화 계수는 표본 데이터 한 개가 전체 모집단에서 대표할 수 있는 크기를 의미한다. 전수화 계수를 산출하는 식은 [식 4-13]과 같다. 항만에서는  $i$ 는 항만,  $j$ 는 터미널 또는  $i$ 는 전국 항만,  $j$ 는 부산항이라고 예시를 제시할 수 있다.

$$\text{Exp}_{ij} = \frac{\text{Pop}_{ij}}{\text{Sam}_{ij}} \dots\dots\dots [\text{식 4-13}]$$

여기서,  $i$ : 항만

$j$ : 터미널

---

$Exp_{ij}$ :  $i$ 존,  $j$ 카테고리의 전수화 계수

$Pop_{ij}$ :  $i$ 존,  $j$ 카테고리의 모집단 크기

$Sam_{ij}$ :  $i$ 존,  $j$ 카테고리의 표본 크기

## 2. 분석 자료

### 1) 전력 소비량

부산항 신항의 전력 소비량 전망을 위해 사용한 자료는 부산항만공사에서 관리하는 2011~2020년 터미널별, 월별 소비량 자료를 활용하였다.<sup>57)</sup> 그 이유는 앞서 터미널별 전력 소비 현황 분석을 위해 터미널 운영사로부터 수집한 자료는 부문별로 파악이 가능한 장점이 있지만 자료 기간이 5년으로 짧고 일관성이 부족하여 전망에 적용하기 부적합하다고 판단했기 때문이다. 따라서 제1절의 소비 현황 분석에서 사용한 터미널별 소비량과 전망에 적용한 소비량에 일부 차이가 있음을 밝혀둔다.

---

57) 전력 사용량은 부산항만공사에서 관리하는 부산항 신항 154kV 변전소 사용량 기준임



〈표 3-11〉 부산신항 터미널운영사별 전력 사용량(2011~2020년)

단위: mWh, %

구분	1부두 (PINT)	2부두 (PNC)	3부두 (HJNC)	4부두 (HPNT)	5부두 (BNCT)	합계
2011년	18,862	56,328	45,957	38,561	2,454	162,162
2012년	22,988	56,434	50,004	40,883	16,911	187,218
2013년	30,686	55,078	47,140	42,653	26,649	202,205
2014년	30,004	60,009	43,931	42,179	31,394	207,516
2015년	37,541	64,788	45,163	40,819	27,699	216,010
2016년	36,349	65,193	37,114	42,183	30,819	211,658
2017년	34,849	72,855	37,336	38,442	40,045	223,527
2018년	39,069	77,657	42,196	42,741	46,035	247,697
2019년	41,585	79,304	42,296	44,835	44,964	252,985
2020년	46,194	78,761	46,654	41,298	49,514	262,422
평균	33,813	66,641	43,779	41,459	31,648	217,340
연평균 증가율	10.5%	3.8%	0.2%	0.8%	9.3% (39.6%)	5.5%

자료: 부산항만공사 내부자료를 바탕으로 저자 작성

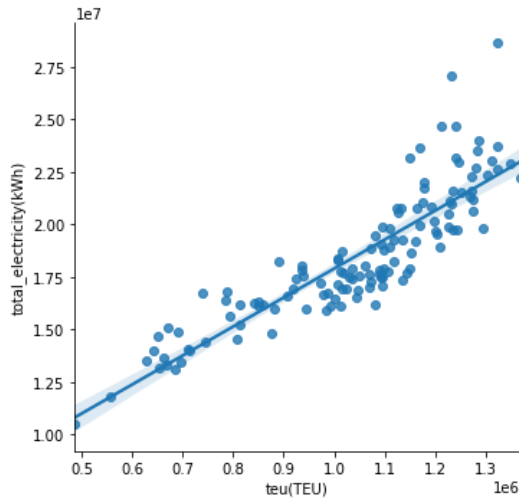
주: 5부두는 안정화 기간을 고려하여 2013년 기준으로 연평균 증가율을 계산하였으며, ( )안의 수치는 2011년을 기준 증가율임

## 2) 물동량

본 연구에서는 상대적으로 우수한 모형으로 평가받는 다변량 모형을 적용한다. 다변량 분석을 위해서는 항만의 활동자료를 입력변수로 활용해야 한다. 항만 활동자료로 고려될 수 있는 변수는 물동량과 하역장비가 대표적이다. 그러나 하역장비는 전력 소비 주기에 맞는 투입 실적이 필요하고 신규 하역장비 투입이 연도별로 발생하는 것이 아니기 때문에 적절하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 항만의 활동자료로 처리 물동량을 고려하였다.

물동량의 적용 가능 여부 판단을 위해서는 전력 소비량 간 상관관계 검토가 필요하다. 이를 위해 부산항 신항의 월간 전력 소비량과 물동량의 상관관계를 분석하였다. 분석 결과 두 변수 간 상관관계는 0.88로 상관관계가 매우 높은 것으로 나타나 적용 가능한 것으로 판단하였다.

〈그림 3-3〉 부산항 신항 항만 물동량과 전력 소비량의 상관관계( $\rho=0.88$ )



자료: 저자 작성

### 3. 예측 모형 설정

최근 에너지 소비량 추정을 비롯한 다양한 분야의 연구에서 딥러닝 모형을 활발하게 활용하고 있다. 본 연구에서는 다양한 선행연구 검토를 통하여 부산항 신항 전력 소비량 전망에 적합한 모형을 선정하였다.

에너지 소비량 예측에서는 DNN과 LSTM 모형이 자주 활용되고 있으며, 그중에서도 LSTM 모형의 정확도가 조금 더 높은 것으로 알려져 있다. LSTM 모형은 시계열 데이터를 활용한 데이터 예측, 특히 태양광, 전력 등

에너지 추정 관련 연구에서 주로 활용되고 있다(김한솔 외, 2016; 이원규 외, 2016; 신동하 외, 2018; 염찬욱 외, 2018; 이정현 외, 2019; 이해성 외, 2020; 조성재 외, 2020 등). 또한 다수의 연구에서는 LSTM 모형과 DNN 모형, 기타 모형 간 비교를 통해 LSTM 모형의 우수함을 입증하였다(권혁건 외, 2017; 신동하 외, 2017; 신동하 외, 2018; 이종원, 2018; 차성재 외, 2018; 김종화 외, 2019; 이용준 외, 2019; 조성재 외, 2020; 최훈, 2021 등).

김한솔 외(2016)는 SARIMA(Seasonal Auto Regressive Integrated Moving Average) 모형과 LSTM 모형을 사용하여 약 2년간의 전력 수요를 예측하고 정확도를 비교하였다. 2005년부터 2014년까지 국내 일일 전력 소비량 자료를 수집하여 2005년부터 2012년까지는 학습데이터로 활용하고 2013년부터 2014년까지는 검증데이터로 활용하였다. LSTM 모형은 시계열 데이터의 비선형적 관계 해석을 통해 전력 수요에 큰 영향을 끼치는 변수를 고려할 수 있어 예측 정확도가 높았다. 반면, SARIMA 모형은 전력 수요 변동을 정확히 추적하지 못하는 문제점이 발견되었다. 기존 전력 수요 예측에 주로 활용된 SARIMA 모형은 식별과 모수 추정, 검증을 통해 수립된 통계적 모형으로 이론적인 강점이 있으나, 비선형적 관계 해석에 한계가 있으며, RNN 기반의 LSTM 모형이 시계열 데이터를 처리하는데 효과적이다(이정현 외, 2019). 이원규 외(2016)는 2006년부터 2011년까지 국내 가정집의 전력 소비량 자료를 활용하여 LSTM 모형의 예측 정확도를 검토하였다. 검증 결과 손실이 0.1 미만으로 높은 정확도를 보였다. 이해성 외(2020)는 2016~2018년의 EV 충전소의 전력 소비량 자료와 LSTM 모형을 활용해 충전소의 일별 최대 전력 부하량을 예측하였다. 데이터 학습 횟수에 따라 4개의 그룹으로 분류하고, LSTM 모형과 ES(Exponential Smoothing), SARIMA, TBATS<sup>58)</sup> 모형의 예측 성능을 비교하였다. 3개의

58) Box-Cox 변환 및 ARIMA 모형의 장점을 지수평활법과 결합한 형태의 모형임

---

그룹에서 LSTM 모형이 가장 낮은 오차를 나타냈다. 권혁진 외(2016)는 시계열 재무 데이터를 활용하여 예측 정확도, ROC(Receiver Operating Characteristic)곡선, 부도 적중률 등 3가지 기준을 설정하고 LSTM, GLM, SVM, ANN, MDA 등 다양한 딥러닝 모형의 성능을 평가하였다. LSTM 모형의 정확도와 AUC(Area under the Curve)가 각각 82.8%(타 모형 평균 77.1%), 89.1%(타 모형 평균 82%)로 가장 높은 것으로 나타났다. 신동하 외(2017)는 주가 데이터를 활용하여 DNN 모형과 LSTM 모형의 성능을 비교 분석하였다. LSTM 모형은 총 3,000번, DNN 모형은 총 2만 번을 학습 이후 예측값을 비교한 결과 LSTM의 최소 오차율과 최대 오차율 간의 차이는 DNN보다 작은 것으로 나타났다. 이용준 외(2019)는 2008년부터 2016년까지 콘크리트 포장 상태지수 자료와 도로포장 열화에 영향을 주는 ESAL(Equivalent Single Axle Load)<sup>59)</sup>과 6개의 환경변수 자료를 이용해 시간의 흐름에 따른 열화량 예측과 RNN-LSTM, DNN 모형의 성능을 평가하였다. 그 결과 RNN-LSTM 모형의 RMSE(Root Mean Square Error) 값이 DNN 모형 대비 0.102 작은 것으로 나타났다.

딥러닝 모형을 활용한 다양한 분야의 선행연구를 검토한 결과 인공지능형 기법은 신경망(NN: Neural Network)을 통해 전력 소비량과 다양한 환경적 변수의 복잡한 관계를 쉽게 모델링할 수 있는 장점이 있다(김한솔 외, 2016). 다양한 딥러닝 모형 중 LSTM 모형의 우수성은 다양한 분야의 추정 연구에서 입증되었다. 또한 에너지 소비량 추정 연구에서도 에너지 소비량만을 변수로 고려할 수 있는 DNN 모형보다는 다양한 환경변수를 고려할 수 있는 LSTM 모형을 활용하는 연구가 증가하는 추세이다.

이에 본 연구에서도 LSTM 모형을 활용하여 2040년까지 부산항 신항의 전력 소비량을 전망하고자 한다.

---

59) 등가단축하중으로 설계기간 혼합교통량을 설계교통량으로 환산하기 위해 원단위(8.2톤)를 반영한 하중임

〈표 3-12〉 RNN-LSTM 모형 관련 주요 선행연구

저자(연도)	연구 내용
김한솔 외 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RNN-LSTM 기반 전력 수요 예측</li> <li>• RNN-LSTM의 전력 데이터 예측의 적합성 검증</li> </ul>
이원규 외 (2016)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RNN-LSTM 모형을 활용한 전력 데이터 예측</li> <li>• 실측값 대비 손실값이 0.1 미만으로 높은 정확도 확인</li> </ul>
권혁건 외 (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시계열 재무데이터를 기업 부도예측모형 비교</li> <li>• 여러 모형 중 정확도 및 AUC 수치가 각 82.8%, 89.1%로 RNN(LSTM)모형이 가장 우수한 것으로 검증</li> </ul>
신동하 외 (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DNN, RNN-LSTM 모형을 활용한 주가 예측</li> <li>• RNN-LSTM 이 DNN 대비 15% 예측률 향상 검증</li> </ul>
신동하 외 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 딥러닝을 활용한 태양광 발전량 단기 딥러닝 모형 제안</li> <li>• DNN, RNN, LSTM 결과 비교 및 LSTM 모형의 성능 검증</li> </ul>
염찬욱 외 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 단기 전력 가격 데이터를 활용한 가격 예측</li> <li>• 에너지 효율 분야 적용 및 LSTM모형의 적합성 검증</li> </ul>
이종원 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 데이터 예측을 위한 DNN, 기본 LSTM, 상태 유지 LSTM 모형 비교를 통한 정확도 및 변화량 분석</li> <li>• 모형별 실험 결과 제시 및 기본 LSTM 모형이 가장 적합한 것으로 결과 도출</li> </ul>
차성재 외 (2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 딥러닝 시계열 알고리즘을 활용한 기업부도예측모형 검증</li> <li>• 8개의 모형 중 RNN-LSTM 모형의 우수한 성능 검증</li> </ul>
김종화 외 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항공사 데이터를 활용한 딥러닝 모형 비교 분석</li> <li>• LSTM 모형의 기존 단순 신경망 모형보다 우수함 검증</li> </ul>
이용준 외 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 딥 러닝을 활용한 도로 포장 유지보수 시기 및 공법 결정을 위한 열화 예측</li> <li>• DNN-RNN(LSTM) 모형 비교 및 RNN(LSTM)모형 성능 검증</li> </ul>
이정현 외 (2019)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SARIMA 모형과 LSTM 모형을 활용한 Peak 전력량과 시간대 예측</li> <li>• PRESS 값 기준 LSTM 모형의 높은 예측값 검증</li> </ul>
이해성 외 (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RNN-LSTM 모형을 활용하여 EC 충전소의 일별 최대 전력 부하량 예측</li> <li>• 4개의 모형 중 LSTM 모형이 가장 낮은 예측 오차 검증</li> </ul>
조성재 외 (2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DNN, LSTM 모형을 활용한 대기질 예측 및 비교분석</li> <li>• 6개의 대기오염물질 LSTM모형이 시계열 분석에 적합한 결과 도출</li> </ul>
최훈 (2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 주가 예측을 위한 최적의 AI 모형 도출</li> <li>• 검증결과 LSTM 모형이 84.9%로 다른 AI 모형 중 가장 높은 예측값 검증</li> </ul>

자료: 저자 작성

## 4. 부산항 신항 전력 소비량 전망

### 1) 부산항 신항 물동량 전망

다변량 모형을 이용한 부산항 신항의 전력 소비량 전망을 위해 입력변수로 해양수산부(2020)<sup>60)</sup>의 부산항 물동량 전망치를 적용하였다. 다만 해양수산부(2020)에서 제시된 전망치는 부산항 전체의 컨테이너 물동량이다. 따라서 진해신항을 포함한 부산항 신항의 물동량을 도출해야 한다. 부산항 신항과 진해신항은 위치와 명칭이 명확하게 구분되어 있으나 연구 내용의 설명과 이해의 편의를 위해 부산항 신항으로 통칭하여 서술하였다. 본 연구에서는 부산항 신항의 물동량 전망치를 부산항 북항과 부산항 신항의 하역능력 비율을 적용하여 배분하였다. 제4차 전국 항만기본계획(2020)에서 부산항 총 컨테이너 물동량은 2040년 42,599천 TEU에 이를 것으로 전망하고 있다.

〈표 3-13〉 부산항 컨테이너 물동량 전망

		단위: 천 TEU, %					
구분		2020년	2025년	2030년	2035년	2040년	CAGR
부산항	합계	21,824	25,452	30,120	35,878	42,599	3.4
	수입	4,853	5,841	6,842	8,132	9,596	3.5
	수출	4,951	5,841	6,842	8,132	9,596	3.4
	환적	12,020	13,771	16,435	19,614	23,408	3.4

자료: 한국해양수산개발원(2021), p. 161

주: 2020년은 실적임

부산항 신항 물동량 배분을 위해 연도별 신규 공급을 고려한 하역능력 비율을 산정하였다. 향후 부산항에 공급되는 신규 터미널 전부는 부산항

60) 해양수산부(2020)

신항에 공급될 계획이기 때문에 부산항 신항의 하역 능력 비율은 2020년 66.3%에서 2040년 88.1%까지 증가하였다.

〈표 3-14〉 부산항 컨테이너부두 하역 능력 전망

단위: 천 TEU

구분		2020년	2025년	2030년	2035년	2040년	비고
현재	북항	6,452	4,730	4,730	4,730	4,730	
	신항	12,688	12,688	12,688	12,688	12,688	
추가	신항	-	4,190	6,070	6,070	6,070	
	진해신항	-	-	2,670	12,750	16,290	
소계	북항	6,452 (33.7)	4,730 (21.9)	4,730 (18.1)	4,730 (13.1)	4,730 (11.9)	
	신항 <sup>1)</sup>	12,688 (66.3)	16,878 (78.1)	21,428 (81.9)	31,508 (86.9)	35,048 (88.1)	
합계		19,140	21,608	26,158	36,238	39,778	

자료: 해양수산부(2021), p. 200~201

주: 1) 신항은 진해신항 포함

2) ( )안의 수치는 전체 하역 능력 대비 비율임

이상의 부산항 하역 능력 비율을 부산항 컨테이너 물동량 전망치에 적용한 결과는 〈표 3-15〉와 같다. 다만 항만기본계획의 물동량은 본문과 같이 5년 단위로만 제공되기 때문에 연도별 전망치는 선형보간법을 적용하여 추정하였다.

〈표 3-15〉 부산항 신항 컨테이너 물동량 전망

단위: 천 TEU, %

구분		2020년	2025년	2030년	2035년	2040년	CAGR
부산항 신항	합계	14,978	19,880	24,673	31,195	37,533	4.7
	수입	2,707	4,562	5,605	7,071	8,455	5.9
	수출	2,925	4,562	5,605	7,071	8,455	5.5
	환적	9,347	10,756	13,463	17,054	20,624	4.0

자료: 저자 작성

LSTM 기반 모형의 입력변수는 월 단위이다. 그 이유는 연 단위 자료의 경우 학습이 무의미할 정도로 자료 수가 줄어들기 때문이다. 따라서 부산항 신항의 연도별 물동량 추정치를 월 단위로 변환해야 한다. 이를 위해 2011~2020년 부산항 신항의 월별 평균 물동량 비율을 장래 전망치에 적용하였다. 월별 평균 물동량 비율은 <표 3-16>과 같다.

<표 3-16> 부산항 신항의 월간 컨테이너 물동량 평균 비율(2011~2020년)

(단위: %)

구분	물동량 비율	구분	물동량 비율
1월	7.97	7월	8.54
2월	7.54	8월	8.30
3월	8.53	9월	8.23
4월	8.40	10월	8.57
5월	8.57	11월	8.45
6월	8.31	12월	8.59

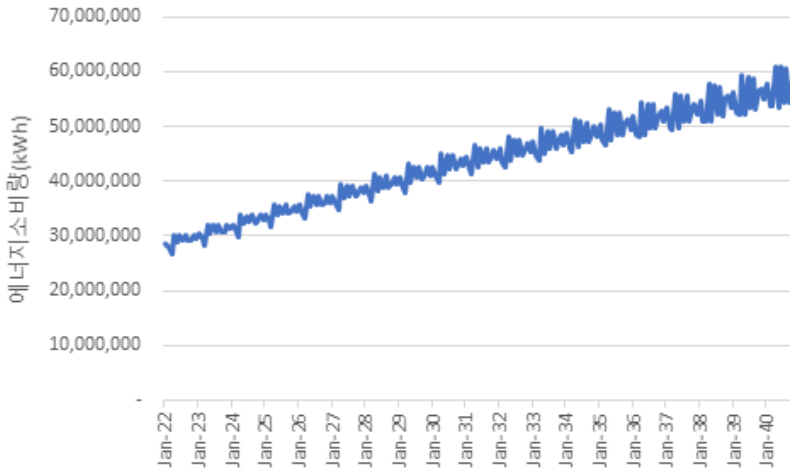
자료: 부산항만공사 자료를 바탕으로 저자 작성

## 2) 전력 소비량 전망

앞서 전망된 부산항 신항의 월별 처리 물동량을 다변량 LSTM 모형에 적용하여 2022~2040년의 월별 전력 소비량을 전망하였다(<그림 3-4>, <표 3-17>~<표 3-20> 참조).



〈그림 3-4〉 LSTM 모델을 이용한 부산항 에너지 소비량 전망치(2022~2040년)



자료: 저자 작성

〈표 3-17〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2025년 기준)

구분	부산항 신항 물동량(천 TEU)	부산항 신항 전력 소비량(kWh)
1월	1,873	33,822,820
2월	1,853	32,973,760
3월	1,952	31,620,320
4월	1,579	35,745,340
5월	1,638	33,784,804
6월	1,423	35,501,052
7월	1,521	34,195,344
8월	1,573	35,607,360
9월	1,487	34,132,960
10월	1,704	34,371,664
11월	1,644	35,553,316
12월	1,634	34,597,180
합계	19,880	411,905,920

자료: 저자 작성

주: 부산항 신항 물동량은 배분 물동량에 LSTM 모형 입력변수로 설정한 월별 실적을 적용함

〈표 3-18〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2030년 기준)

구분	부산항 신항 물동량(천 TEU)	부산항 신항 전력 소비량(kWh)
1월	2,324	42,623,620
2월	2,300	41,016,380
3월	2,423	39,709,404
4월	1,959	45,142,800
5월	2,033	41,425,816
6월	1,767	44,609,036
7월	1,887	42,215,576
8월	1,952	44,593,456
9월	1,846	42,115,412
10월	2,114	42,997,776
11월	2,040	44,251,750
12월	2,028	42,763,740
합계	24,673	513,464,766

자료: 저자 작성

주: 부산항 신항 물동량은 배분 물동량에 LSTM 모형 입력변수로 설정한 월별 실적을 적용함

〈표 3-19〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2035년 기준)

구분	부산항 신항 물동량(천 TEU)	부산항 신항 전력 소비량(kWh)
1월	2,939	50,343,604
2월	2,907	47,378,504
3월	3,063	46,707,560
4월	2,477	52,980,656
5월	2,570	47,436,556
6월	2,234	52,502,470
7월	2,386	48,528,840
8월	2,467	52,345,964
9월	2,333	48,442,256
10월	2,673	50,386,596
11월	2,580	51,349,964
12월	2,564	49,505,508
합계	31,195	597,908,478

자료: 저자 작성

주: 부산항 신항 물동량은 배분 물동량에 LSTM 모형 입력변수로 설정한 월별 실적을 적용함

〈표 3-20〉 부산항 신항 월별 전력 소비량 전망 결과(2040년 기준)

구분	부산항 신항 물동량(천 TEU)	부산항 신항 전력 소비량(kWh)
1월	3,536	57,823,100
2월	3,498	53,698,396
3월	3,686	53,773,372
4월	2,980	60,869,660
5월	3,093	53,309,630
6월	2,687	60,810,896
7월	2,871	54,511,250
8월	2,969	60,603,850
9월	2,807	54,424,370
10월	3,217	58,237,310
11월	3,104	58,244,504
12월	3,085	56,472,064
합계	37,533	682,778,402

자료: 저자 작성

주: 부산항 신항 물동량은 배분 물동량에 LSTM 모형 입력변수로 설정한 월별 실적을 적용함

이를 연 단위로 집계하여 연도별 전력 소비량을 산정하면 2040년에 682,778MWh의 전력이 필요하고, 연평균 4.9% 증가할 것으로 전망되었다. 같은 기간 부산항 신항 물동량 증가율 4.7% 대비 소폭 높을 것으로 전망된다.

〈표 3-21〉 부산항 신항 전력 소비량 연간 예측

단위: MWh, %

구분	2020년	2025년	2030년	2035년	2040년	CAGR
전력소비량	262,422	411,906	513,465	597,908	682,778	4.9

자료: 저자 작성

주: 2020년은 실적임

---

## 5. 전망 결론

본 장에서는 부산항 신항의 물동량 증가와 완전자동화 운영 방식 도입, 에너지 전환 등으로 증가가 예상되는 부산항 신항의 장기적인 전력 소비량을 전망하였다. 국내 항만을 대상으로 장기 전력 소비량 전망을 처음으로 시도하였다. 전망에는 최근 다른 분야의 에너지 소비량 전망에 활용도가 높아지고 있는 딥러닝 분석 방법을 사용하였다. 그중에서도 예측력 비교를 통해 적합도가 가장 높은 다변량 LSTM 모델을 적용하였다.

부산항 신항의 전력 통계는 표준화되어 있지 않다. 따라서 개별 터미널의 상세한 에너지 소비 통계를 전망에 활용하지 못하고 전력 공급기관에서 관리하는 터미널별, 월별 전력 소비 통계를 활용하였다. 전망을 위한 항만의 활동변수는 전력 소비량과 가장 밀접한 관계인 컨테이너 물동량 전망치를 활용하였다.

이상의 과정을 통해 전망한 결과 부산항 신항의 전력 소비량은 2020년 이후 연평균 4.9%의 증가율을 기록할 것으로 전망되었다. 부산항 신항의 물동량 증가율(4.7%)보다 약간 상회하는 증가율이다. 그러나 중요한 것은 본 연구의 전망치는 최소 전망치라는 것이다. 전망을 위해 사용한 전력 소비량 실적에 향후 신규 터미널에 도입될 완전자동화 운영 방식이 고려되지 못했기 때문이다. 현재 일부 자동화를 도입 중인 5부두의 높은 증가율이 부분적으로 반영되기는 했으나 5부두 또한 완전자동화 터미널은 아니기 때문이다. 즉, 부산항 신항의 전력 소비량은 최소 연간 4.9% 이상 증가할 것으로 전망된 것이다. 전력의 증가는 2가지 문제점을 지닌다. 하나는 전력비용의 증가이며 하나는 공급 가능성이다. 이에 다음 장에서 장래 부산항 신항에 필요한 전력 공급 소요를 추정하고자 한다.

## 04

# 부산항 신항 전력 공급 소요 전망

본 장에서는 제3장에서 전망된 부산항 신항의 장기 전력 소비량을 활용하여 미래 추가적으로 필요한 전력 공급량을 분석한다. 전력 공급은 시설 개발과 함께 진행되지만 사전에 필요한 전력 공급 규모를 파악하는 것은 안정적인 항만계획 수립에 중요하기 때문이다.

## 제1절 부산항 신항 전력 공급 계획

### 1. 부산시 에너지 계획

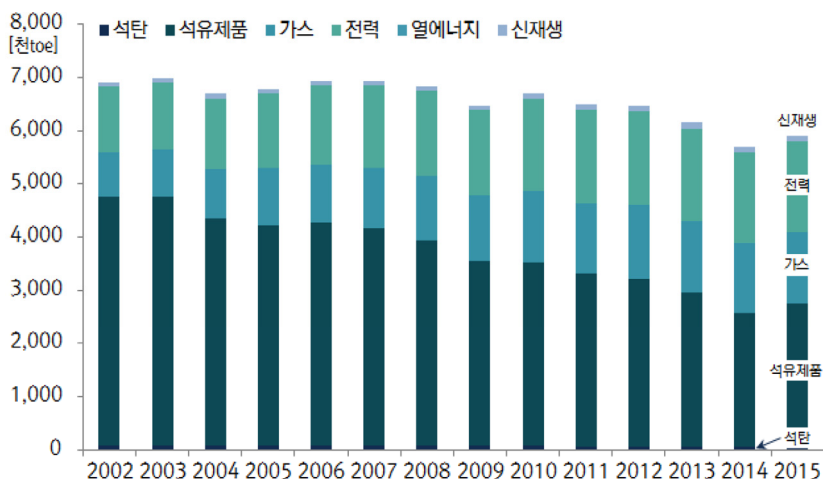
지역에너지 계획은 에너지 기본계획의 하위 개념으로, 국가에너지기본계획을 효율적으로 달성하고 지역경제의 발전을 위해 수립, 시행되는 지역의 에너지 계획이다. 이에 따라 부산시는 「지역에너지계획 수립 가이드라인」을 따라 2018년 「부산광역시 제5차 지역에너지 계획」을 수립하였다. 해당 계획은 2017년 클린에너지 원년을 발표한 부산시의 에너지 전환 정책 변화를 반영하여 2030년까지 장기적 목적 달성을 위해 수립하였다.<sup>61)</sup>

## 1) 부산시 지역에너지 수급 추이 분석

### (1) 최종 에너지 소비 특성

부산시의 최종 에너지원별 소비 유형에서 가장 큰 부분을 차지하는 에너지원은 석유제품이며, 그다음은 전력이다. 석유제품의 소비는 지속적으로 감소하고 있는 반면에 전력과 가스 소비는 조금씩 증가하는 추세이며, 신재생에너지 소비는 전체 에너지원의 극히 일부분을 차지하고 있다.<sup>62)</sup>

〈그림 4-1〉 부산시 최종 에너지원별 소비량 추이



자료: 에너지경제연구원(2003~2016) 재인용: 부산시(2017), p. 69

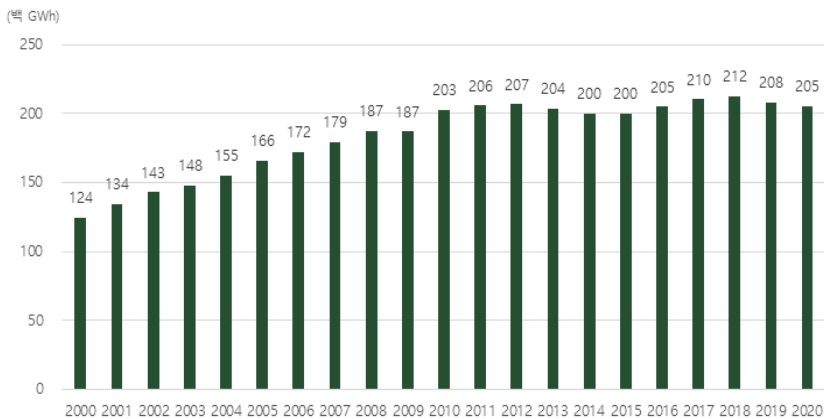
61) 부산광역시(2018). p. 3.

62) 부산발전연구원(2017), p. 39.

## (2) 전력 소비 특성

전력 소비량의 경우 2018년 212백 GWh 소비로 정점을 찍은 이후 최근 감소하고 있다. 그 원인으로 2019년 전국 1차 금속을 중심으로 한 산업 생산 활동 둔화와 기온 상승 효과 등에 따라 감소하였고, 2020년에는 온화한 겨울 날씨와 코로나19가 확산되며 전력 소비 비중이 높은 산업·상업 부문을 중심으로 전력 소비가 빠르게 감소된 것으로 나타났다(에너지경제연구원, 2020). 부산은 산업 중 제조업이 차지하는 비중이 높아 제조업 생산 감소와 코로나19 확산에 따른 경기 침체에 따라 전력 소비량이 감소된 것으로 판단된다.

〈그림 4-2〉 부산시 전력 소비량 추이



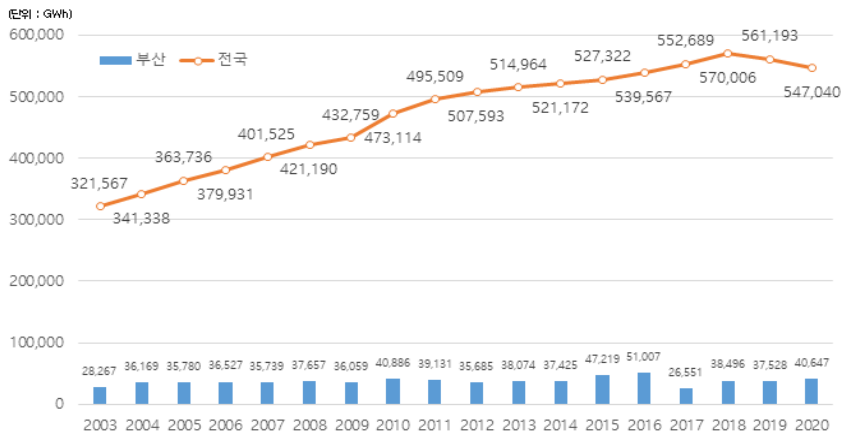
자료: 국가에너지통계종합정보시스템(검색일: 2021. 8. 30)

## (3) 발전량 및 발전설비 현황

부산 지역 2002~2020년의 발전량을 살펴보면, 전국 발전량의 5~8%의 전력을 생산하였다. 부산의 주요 발전원은 원자력발전으로 발전량의 변동 폭이 비교적 작은 편이다. 2019년 기준 부산시는 37,528GWh의 전기를

발전하였으며, 그중 약 43%(16,368GWh)의 전기를 역외 송전하고 있다.<sup>63)</sup> 부산의 고리 1~4호기 원자력발전소에서 부산시의 연간 소비전력과 맞먹는 수준의 전력을 생산하고, 원전 이외에 감천 복합화력발전소에서 연간 6,000GWh 이상 발전하고 있다.<sup>64)</sup>

〈그림 4-3〉 부산 지역과 전국 연간 발전량 추이



자료: 전력통계정보시스템(검색일: 2021. 8. 30)

## 2) 항만 분야 계획

부산시에서는 항만 분야의 전력 공급은 별도로 계획하고 있지 않다. 다만 관공선과 야드트랙터 LNG 전환 사업과 육상전원공급장치(AMP) 구축과 연계한 마이크로그리드 구축 사업 등 탄소중립, 미세먼지 저감 등 환경 대책과 관련한 사업을 추진하고 있다.

63) 전력통계정보시스템(검색일: 2021. 8. 30)

64) 부산광역시(2018), *앞의 책*, p. 74.



### (1) 항만 분야 LNG 도입 확대 사업

항만이 인접한 도시 특성상 비도로 이동원의 오염 원인 중 선박이 50%를 차지하는 것으로 나타나고 있어, 부산시가 보유한 관공선의 연료를 천연가스로 교체하는 사업을 추진 중이며, 2014년부터 부산항만 내 전체 야드트랙터를 지속적으로 LNG연료 기반 장비로 전환하고 있다.

### (2) 부산 신항만 마이크로그리드 구축(AMP 연계)

항만에 정박 중인 선박의 자가발전기를 이용한 전력 공급에 따른 미세 먼지 발생 등 환경오염 개선을 대책으로 육상전원공급장치(AMP)를 구축하고 항만의 전력 공급의 안정성 확보와 효율적인 에너지 사용을 위하여 신재생에너지원과 에너지 저장 시스템 등으로 구성된 항만 특화 마이크로그리드와 연계하는 사업을 계획 중이다. 다만 해당 마이크로그리드 구축을 통한 구체적인 운영 방안과 에너지 소비 감축량, 기대효과 등은 제시되어 있지 않다.

## 2. 항만기본계획의 전력 공급 계획

현행 해양수산부의 항만 관련 기본계획에서는 아직 부산항 신항의 구체적인 전력수급 계획이 마련되어 있지 않다. 「제4차 항만기본계획(2021~2030)」(해양수산부, 2020)에서도 일부 전력 공급 설비 현황과 육상전원공급장치(AMP) 설치 계획은 제시되어 있으나, 세부적인 전력 공급 계획은 부재하다. 「제2차 신항만 기본계획(2019~2040)」(해양수산부, 2019)에서도 항만시설의 전력 수급에 따라 유동적으로 전력 공급 시설을 설치할 계획이라고만 제시되어 있을 뿐, 전력 수급 계획이나 전력 소비량 측정과 수요 전망 등 관련 제반 사항의 현황과 계획은 부재하다.

---

다만 「제3차 항만 배후단지 기본계획(2017~2030)」(해양수산부, 2017)에서는 부산항 신항, 인천항, 평택·당진항, 울산항 등 일부 항만의 항만배후단지 전력 공급 수요량을 예측, 제시하고 있다. 이 계획에서는 복합물류, 제조시설, 업무편의시설 및 2종 항만배후단지<sup>65)</sup>의 총면적에 전력 원단위를 곱한 값으로 전력량을 산출했으며, 인근 변전소 현황과 설치 계획도 제시되어 있지만 해당 내용은 전체 항만구역이 아닌 항만배후단지에 국한되어 있다.<sup>66)</sup>

### 3. 종합

상술한 부산시의 에너지 계획과 항만 관련 기본계획을 종합해 보면, 부산항 신항 전체를 대상으로 한 중장기적인 전력 소비 수요 전망과 공급 계획 관련 세부 내용은 다루지 않고 있다. 부산시의 계획에서는 육상전공급장치(AMP) 구축과 연계한 마이크로그리드 시스템을 도입한 에너지 관리 계획은 제시되고 있으나, 이는 항만의 전력 수급 여건과 연동하여 수립된 계획은 아니다. 「제4차 항만기본계획(2021~2030)」(해양수산부, 2020)에서도 항만의 육상전원공급장치(AMP)·전력설비 설치 계획은 수립되어 있지만, 실질적인 항만 운영에 필요한 전력 관련 구체적인 계획은 부재한 실정으로 지속적으로 증가할 전력 수요 대응이 어려울 것으로 판단된다. 또한 「제3차 항만 배후단지 기본계획(2017~2030)」(해양수산부, 2017)에서는 부산항 신항 항만배후단지의 전력 소비 전망과 공급계획은 다루고 있으나, 그 범위는 항만배후단지에 국한된다.

---

65) 2종 항만배후단지는 항만구역 또는 항만시설 설치 예정지역에 일반업무시설·판매시설·주거시설 등을 설치함으로써 항만 및 1종 항만배후단지의 기능을 제고하고 항만을 이용하는 사람의 편의를 꾀하기 위한 항만배후단지, 「항만법」 제 45조 제2항

66) 해양수산부(2017), pp. 105~115.

부산항 신항은 자동화터미널 운영 등 첨단 항만으로서 개발될 계획이며, 다양한 자동화 설비와 디지털시스템의 운영에 따라 증가할 전력 수요를 고려한다면, 부산항 신항의 종합적인 항만 전력 수급 대책 마련이 시급하지만 향후 소요 전력 전망과 이에 따른 공급계획조차도 없는 실정이다. 이에 본 연구에서 수행한 부산항 신항의 전력 수급 분석을 기반으로 하여 해양수산부와 부산시 등이 향후 항만 관련 계획을 수정, 재수립할 때 구체적인 전력 수급계획 수립이 필요할 것으로 판단된다.

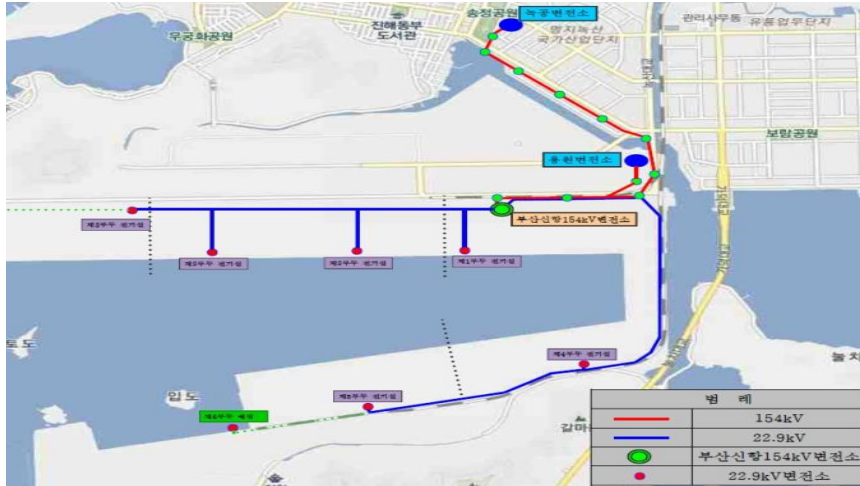
## 제2절 부산항 신항 전력 소요 분석

### 1. 부산항 신항 전력 공급 현황

한국전력공사(이하 ‘한전’)는 전기사업법 제16조(전기의 공급약관)에 따라 부산항만공사 간 전력사용 계약을 통해 부산항 신항에 필요한 계약전력<sup>67)</sup>을 공급하고 있다. 부산항 신항에 공급되는 전력은 신항 배후 용원변전소(154kV변전소)에서 신항 5개 터미널별 변전소로 22.9kV 2회선으로 공급되고 있다. 현재 부산항 신항 전체에 공급되고 있는 계약전력은 11만 kW이다. 기존 계약전력은 8만 kW 수준이었으나, 신항 터미널에 AMP 설치에 따른 전력 사용량 증가가 예상됨에 따라 2020년부터 11만 kW로 계약전력을 증설하여 공급 중이다.

67) 계약전력이란 변압기, 사용설비 또는 최대수요전력을 기준으로 고객과 한국전력이 협의하여 산정된 용량을 기준으로 계약한 최대전력을 말하며 사용설비의 전력 합계량에 환산율을 적용하여 산정함(한국전력공사, 기본공급약관(2021년))

〈그림 4-4〉 부산항 신항 전력 공급 흐름도



자료: 해양수산부(2019), p. 218

## 2. 부산항 신항 계약전력 소요

전기를 사용하고자 하는 자는 한전에 ‘전기사용기본공급약관’에 따라 전기 사용 신청을 해야 한다. 이때 사용하려는 전기 사용량을 계약전력으로 환산하여 신청해야 하며, 한전은 신청된 계약전력을 토대로 공급 가능량을 검토한 후 전기를 공급한다. 따라서 향후 부산항 신항의 안정적인 전력 공급을 위해서는 앞선 장에서 추정된 전력 수요량을 기반으로 한 계약전력의 산정이 필요하다.

계약전력은 사용설비의 전력 사용량에 계약전력 환산율을 곱하여 산정한다. 사용설비의 전력 사용량 산정을 위해서는 설비의 운영 여건, 사용 목적, 지역, 건축물 토지의 용도와 면적, 업종, 산업특성 등 매우 다양한 요인이 고려된다. 부산항 신항과 같은 컨테이너부두의 경우에는 정확한 계약전력 산정을 위해서는 하역장비의 수량과 투입계획, 냉동컨테이너, 시설별 면

적과 단위부하, 수용률 등이 고려되어야 한다. 그러나 본 연구에서 개별 터미널의 모든 요인을 고려하기에는 자료 확보 등의 문제가 있어 장래 전력 소비량, 터미널 규모, 터미널 규모별 수용부하와 수용률만을 고려하였다. 또한 부산항 신항(진해신항 포함), AMP는 산정 기준이 다르기 때문에 구분하여 산정하였다. 아울러 부산항 신항은 터미널 개발뿐만 아니라 항만배후단지도 개발하여 운영하고 있고 향후에도 계획되어 있기 때문에 본 연구에서는 항만배후단지도 고려하였다.

## 1) 부산항 신항 계약전력 소요 산정

우선 현재 운영 중인 부산항 신항의 터미널별 계약전력을 파악하였다. 한전은 터미널의 선석 규모별로 계약전력을 달리하고 있는데 일반적으로 4,000TEU급 선석에는 5,000kW, 2,000TEU급 선석에는 2,500kW를 공급하고 있다. 현재 개발을 진행하고 있는 부산항 신항 서편을 포함하면 총 33선석에 130,000kW의 계약전력을 공급할 예정이다. 이상의 계약전력은 공급 가능한 최대 기준을 의미한다.

〈표 4-1〉 부산항 신항의 부두별 최대 계약전력(kW) 공급 계획

구분	1부두	2부두	3부두	4부두	5부두	6부두	기타	서편	총계
4,000TEU 선석 수(개)	3	6	2	2	4	3		5	25
kW/선석	5,000	2,500	5,000	5,000	5,000	5,000		5,000	
2,000TEU 선석 수(개)			2	2			4		8
kW/선석			2,500	2,500			2,500		
계약전력 (kW)	15,000	15,000	15,000	15,000	20,000	15,000	10,000	25,000	130,000

자료: 해양수산부(2019), p. 54~60을 바탕으로 저자 작성

주: 기타에는 다목적부두, 신항 남편(피더부두)의 계약전력량 2,500kW가 각각 포함

그러나 터미널 운영에 필요한 계약전력 소요 산출을 위해서는 공급 가능한 최대 계약전력에 개별 터미널의 수용률을 적용해야 한다. 한전 담당자에게 자문한 결과 현재 신항 각 터미널은 최대 계약전력의 평균 60% 수준으로 사용 중인 것을 확인하였다. 이에 본 연구에서도 60%를 수용률로 적용하였다.

그다음으로 장래 계획 중인 진해신항은 제4차 항만기본계획에 계획된 21개 선석의 선석별 접안 능력에 현재 운영 중인 터미널의 최대 계약전력을 적용하였다. 8,000TEU급 선석에는 5,000kW, 2,000TEU급 선석에는 2,500kW를 각각 적용하였다.

마지막으로 장래 연도별 계약전력의 추정은 본 연구에서 전망된 전력 소비량의 연도별 증가율을 적용하였다.

〈표 4-2〉 부산항 신항 전기에너지 소비량 연도별 증가율(%)

구분	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년
전년 대비 증가율	-	1.117	1.196	1.057	1.055	1.054	1.048
구분	2027년	2028년	2029년	2030년	2031년	2032년	2033년
전년 대비 증가율	1.046	1.045	1.044	1.042	1.033	1.031	1.031
구분	2034년	2035년	2036년	2037년	2038년	2039년	2040년
전년 대비 증가율	1.030	1.030	1.028	1.027	1.027	1.027	1.026

자료: 저자 작성

이상의 과정을 통해 진해신항까지 포함한 부산항 신항의 2040년 계약 전력은 약 264천 kW가 필요할 것으로 산정되었다.

〈표 4-3〉 부산항 신항 장기 소요 계약전력 전망 결과

구 분		최대 계약전력 (kW)	수용률 (%)	소요 계약전력(kW)			
				2020년	2030년	2035년	2040년
부산항 신 항	1부두	15,000	60	9,000	17,610	20,506	23,417
	2부두	15,000	60	9,000	17,610	20,506	23,417
	3부두	15,000	60	9,000	17,610	20,506	23,417
	4부두	15,000	60	9,000	17,610	20,506	23,417
	5부두	20,000	60	12,000	23,480	27,341	31,222
	6부두	15,000	60	9,000	17,610	20,506	23,417
	다목적부두	5,000	60	3,000	5,870	6,835	7,806
	남컨부두	5,000	60	3,000	5,870	6,835	7,806
	서컨2-5부두	15,000	60		12,471	14,522	16,584
	서컨2-6부두	10,000	60		7,136	8,310	9,490
	소계	130,000		63,000	142,877	166,373	189,993
진해신항		95,000	60		27,000	47,940	74,246
합 계		225,000		63,000	169,877	214,313	264,239

자료: 저자 작성<sup>68)</sup>

## 2) AMP 계약전력 소요 산정

AMP의 계약전력 소요량은 정박 중인 선박의 선종별, 톤급별 시간당 연료 소비량(톤/h)을 연료소비율(g/kWh)로 나누어 추정하였다. 항만기본계획에서 부산항 신항의 컨테이너 터미널 규모는 2,000TEU급, 4,000TEU급, 8,000TEU급 등으로 구분하기 때문에 본 연구에서도 이를 고려하였다. 따라서 AMP 소요전력은 〈표 4-4〉와 같이 2,000TEU급 선척에는 대당 2,000kW, 4,000TEU급은 대당 4,000kW, 8,000TEU급은 대당 7,500kW를 적용하였다.

68) 웅동배후단지는 단지 내의 154kV 변전소에서 별도로 전력을 공급하고 있어 계산에서 제외함

〈표 4-4〉 선종별, 톤급별 AMP 소요 전력

단위: kW

선종 톤	컨테이너선		일반화물선		크루즈	
	연료 소비량 (톤/h)	소요 전력 (kW)	연료 소비량 (톤/h)	소요 전력 (kW)	연료 소비량 (톤/h)	소요 전력 (kW)
10,000	0.263	1,212	0.201	926	0.306	1,410
<b>20,000</b>	<b>0.459</b>	<b>2,114</b>	0.320	1,475	0.471	2,170
30,000	0.655	3,017	0.439	2,025	0.636	2,930
<b>40,000</b>	<b>0.850</b>	<b>3,919</b>	0.558	2,574	0.801	3,691
50,000	1.046	4,822	0.678	3,123	0.966	4,451
60,000	1.242	5,724	0.797	3,672	1.131	5,211
70,000	1.438	6,627	0.916	4,221	1.296	5,972
<b>80,000</b>	<b>1.634</b>	<b>7,529</b>	1.035	4,770	1.461	6,732
90,000	1.830	8,431	1.154	5,319	1.626	7,492
100,000	2.025	9,334	1.273	5,869	1.791	8,253

자료: 해양수산부(2019), p. 124

AMP도 터미널의 계약전력과 동일하게 수용률을 적용하였다. AMP의 경우도 한전에 자문한 결과를 통해 70%를 적용하였다. 진해신항도 동일한 방식을 적용하여 소요 계약전력을 산정하였다.

이상의 기준과 과정을 통해 부산항 신항의 AMP 소요 계약전력 산정 결과 약 7만 8,000kW가 발생할 것으로 산정되었다(〈표 4-5〉 참조). 진해신항의 경우에도 동일한 방식을 통해 2040년에 약 9만 5,000kW의 계약전력 소요가 발생할 것으로 전망되었다(〈표 4-6〉 참조).



〈표 4-5〉 부산항 신항 AMP 소요 계약전력 산정 결과

구 분	접안능력	최대 계약전력 (kW)	수용률 (%)	소요 계약전력 (kW)
북컨부두 1-1단계(PNIT)	4,000TEU × 3선석	12,000	70	8,400
북컨부두 1-2단계(PNC)	4,000TEU × 6선석	24,000	70	16,800
북컨부두 2-1단계(HJNC)	4,000TEU × 2선석 2,000TEU × 2선석	12,000	70	8,400
남컨부두 2-2단계(HPNT)	4,000TEU × 2선석 2,000TEU × 2선석	12,000	70	8,400
남컨부두 2-3단계(BNCT)	4,000TEU × 4선석	16,000	70	11,200
남컨부두 2-4단계(BCT)	4,000TEU × 3선석	12,000	70	8,400
남컨부두 (피더부두)	2,000TEU × 2선석	4,000	70	2,800
서컨부두 2-5단계	4,000TEU × 3선석	12,000	70	8,400
서컨부두 2-6단계	4,000TEU × 2선석	8,000	70	5,600
합 계		112,000		78,400

자료: 저자 작성

〈표 4-6〉 진해신항 AMP 소요 계약전력 전망 결과

구 분	접안능력	(공급)계약전력 (kW)	수용률 (%)	(운영)계약전력(kW)		
				2030년	2035년	2040년
진해 신항	8,000TEU × 9선석	67,500	70	47,250	47,250	47,250
	2,000TEU × 1선석 8,000TEU × 5선석	39,500	70		27,650	27,650
	2,000TEU × 3선석 8,000TEU × 3선석	28,500	70			19,950
	합계	135,500		47,250	74,900	94,850

자료: 저자 작성

### 3) 부산항 신항 항만배후단지 계약전력 소요 산정

본 연구에서는 항만배후단지의 소요 계약전력도 산정하였다. 앞선 장에서 전력 소비량 추정에는 항만배후단지를 포함하지 않았지만 향후 전력 공급 여건 판단을 위해 계약전력 소요량 산정에는 포함하였다.

항만배후단지 내 소요되는 계약전력 산정을 위해서는 배후단지 내 토지 이용계획상 용도별, 유치업종별 물동량 처리 현황을 고려하여 전력원단위 등을 설정하고 이에 따른 전력 수요를 예측해야 한다. 그러나 현 단계에서는 물동량 처리계획 등을 구체적으로 알 수 없기 때문에 「제3차 항만배후단지 개발 종합계획(해양수산부, 2017)」에서 제시된 부산항 신항 항만배후단지의 부지 면적과 원단위를 활용하여 복합적인 평균 산업용지 부하밀도를 설정하고 그 산정기준에 따라 전력 수요를 예측하였다.

또한 항만배후단지의 전력 수요량 산출 기준에 따라 복합물류, 제조시설, 업무·편의시설, 공공시설로 구분하여 시설별 총면적에 단위부하와 수용률 등 전력원단위를 곱하여 계약전력을 산출하였다.

〈표 4-7〉 항만배후단지 시설별 단위부하 및 수용률

구 분	단위부하 (VA/m <sup>2</sup> )	수용률 (%)	구 분	단위부하 (VA/m <sup>2</sup> )	수용률 (%)
복합물류	80	40	상업시설	160	50
업무편의	130	50	도로, 주차장	1.25	100
공원, 녹지	0.25	100			

자료: 해양수산부(2017), p. 105

이상의 과정을 통해 부산항 신항 항만배후단지의 장래 소요 계약전력량 산정 결과 향후 약 11만 3,000kW 수준의 계약전력 수요가 발생할 것으로 예측되었다.

〈표 4-8〉 부산항 신항 항만배후단지 소요 계약 전력 전망 결과

구 분	부 지 용 도		면적(㎡)	계약전력(kW)
북[컨] 1단계 항만배후단지	소 계		1,703,927	34,381
	상 업 시 설	복합물류제조	1,044,084	29,698
		업무편의시설	67,315	3,889
	공 공 시 설	도 로	461,896	513
		공공녹지	118,599	26
		기타공공시설	12,033	253
북[컨] 2단계 항만배후단지	소 계		522,103	14,288
	상 업 시 설	복합물류제조	396,962	11,291
		업무편의시설	48,471	2,801
	공 공 시 설	도 로	61,010	68
		공공녹지	9,669	2
		기타공공시설	5,991	126
남[컨] 항만배후단지	소 계		1,444,162	33,559
	상 업 시 설	복합물류제조	1,009,668	28,719
		업무편의시설	75,565	4,366
	공 공 시 설	도 로	241,745	269
		공공녹지	108,611	24
		기타공공시설	8,573	180
서[컨] 1단계 항만배후단지	소 계		506,469	15,299
	상 업 시 설	복합물류제조	312,553	8,890
		업무편의시설	109,417	6,322
	공 공 시 설	도 로	76,934	85
		공공녹지	7,565	2
서[컨] 2단계 항만배후단지	소 계		296,052	7,632
	상업시설	복합물류제조	267,185	7,600
	공공시설	도 로	28,867	32
서[컨] 3단계 항만배후단지	소 계		378,231	8,293
	상업시설	복합물류제조	288,679	8,211
	공 공 시 설	도 로	69,698	77
		공공녹지	19,854	4
합 계				113,452

자료: 저자 작성

### 3. 종합

이상 본 장에서 추정한 부산항 신항(진해신항 포함)의 소요 계약 전력을 종합하면 다음의 <표 4-9>와 같다. 2040년 기준 약 55만 kW 수준의 계약 전력 소요가 발생될 것으로 전망되었다. 항만배후단지를 제외하더라도 약 44만 kW의 전력 공급이 필요하다.

<표 4-9> 부산항 신항 소요 계약전력 전망 결과 종합

단위: kW

구 분			연도별 소요 계약전력(kW)			
			2020년	2030년	2035년	2040년
부산항 신 항	배후 단지	북컨1단계	34,381	34,381	34,381	34,381
		북컨2단계		14,288	14,288	14,288
		남 컨		33,559	33,559	33,559
		서컨1단계		15,299	15,299	15,299
		서컨2단계		7,632	7,632	7,632
		서컨3단계		8,293	8,293	8,293
		누 계	34,381	113,452	113,452	113,452
	컨부두	33선석	63,000	142,877	166,373	189,993
	AMP	31선석	5,600	78.400	78.400	78.400
	소 계		102,981	334,729	358,225	381,845
진 해 신 항	컨부두	21선석		27,000	47,940	74,246
	AMP	21선석		47,250	74,900	94,850
	소 계			74,250	122,840	169,096
합 계			102,981	408,979	481,065	550,941

자료: 저자 작성

현재 부산항 신항은 154kV변전소를 통해 전체 운영에 필요한 계약전력 11만 kW를 공급받고 있다. 한전 인터뷰 결과 154kV변전소에서 공급 가

능한 계약전력 최대량은 약 18만 kW로, 안정적 계약전력 공급을 위해서는 70~80%의 공급이 가능한 것으로 파악되었다. 이를 통해 현 154kV변전소에서 부산항 신항에 공급 가능한 계약전력량은 약 14만 4,000kW 수준으로 추정할 수 있다. 현 시점에서는 부산항 신항의 전력수급에 문제가 없을 것으로 판단되나, 2030년 이후부터는 전력 수요에 비해 공급이 크게 부족할 것으로 예상된다. 2030년 기준 26만 kW의 계약전력 공급이 부족할 것으로 예상되고 있는데 이는 현재 154kV변전소 1기 전체에서 공급 가능한 수준을 넘어서는 전력량이다. 2040년 기준으로 보면 154kV변전소 공급 능력의 약 3.5배에 달하는 공급이 부족할 것으로 전망된다. 부산항 신항에는 향후 진해신항을 포함한 신규 시설이 늘어남에 따라 신규 변전소도 설치될 것으로 예상된다. 그러나 부산항 신항에 공급 가능한 전력량은 무한하게 증가시키기는 어렵다. 이러한 관점에서 본다면 장기적으로 부산항 신항의 전력 수급에 문제 발생 가능성이 높다고 볼 수 있다. 본 연구 결과에서 제시된 장래 계약전력 소요를 기반으로 실제 공급 가능성을 평가하는 것이 바람직하나 이는 실제 시설 설치 시 한전과 협의가 필요한 사안이기 때문에 본 연구에서는 다루지 않았다.

〈표 4-10〉 부산항 신항 전력 수급 분석 결과

단위: kW

구 분	2020년	2030년	2035년	2040년
부산항 신항 계약전력 수요량	102,981	408,979	481,065	550,941
부산항 신항 계약전력 공급량	144,000	144,000	144,000	144,000
<b>수급 분석 결과</b>	<b>(+) 41,019</b>	<b>(-) 264,979</b>	<b>(-) 337,065</b>	<b>(-) 406,941</b>

자료: 저자 작성

주: 부산항 신항의 현재 계약전력 공급량은 154kV변전소의 최대 공급량 18만 kW의 80%를 적용



## 05

# 부산항 신항 전력 관리 방안과 로드맵 수립

제3장과 제4장에서는 장래 부산항 신항의 전력 소비량과 추가 공급 소요를 분석하였다. 그 결과 향후 부산항 신항에는 현재 전력 공급 설비의 약 3.5 배에 달하는 추가 공급이 필요한 것으로 나타났다. 현 단계에서 장래 전력 소비량 대비 공급 가능성 여부를 판단하기는 어렵지만 향후 부산항 신항의 전력 소비가 지속적으로 증가하고 이에 대응하기 위해 대규모 전력시설의 추가 공급이 필요한 것은 명확해 보인다. 따라서 본 장에서는 향후 부산항 신항의 전력 소비를 효과적으로 관리하고 최적화할 수 있는 방안을 해외 사례를 중심으로 검토하고 국내 항만 전반의 에너지 관리를 위한 정책 로드맵을 제시하였다.

## 제1절 부산항 신항 전력 관리 방안

---

### 1. 방안 설정

본 연구에서 제시하는 세부 관리 방안은 해외 사례 검토 내용과 도입 가

---

능성, 실행 가능성을 종합적으로 고려하여 도출하였다. 검토 결과 크게 4가지 방안의 도입이 가능할 것으로 판단되었다. 첫째, 마이크로그리드 도입을 통한 전력 관리 효율화이다. 전력 소비 자체를 줄이고 소비를 최적화하는 것이다. 둘째, 신재생에너지 확대이다. 도입 가능한 자체 생산 전력을 최대화하는 것이다. 셋째, 에너지 고효율 장비 사용이다. 하역장비는 컨테이너 터미널에서 가장 많은 전력을 소비하기 때문이다. 넷째, 수소 등 새로운 에너지로 전환이다. 수소 기반 연료전지 등 새로운 에너지로 전환하면 전력 비용 절감뿐 아니라 대기오염 감소 효과도 기대할 수 있다.

## 2. 전력 관리 방안

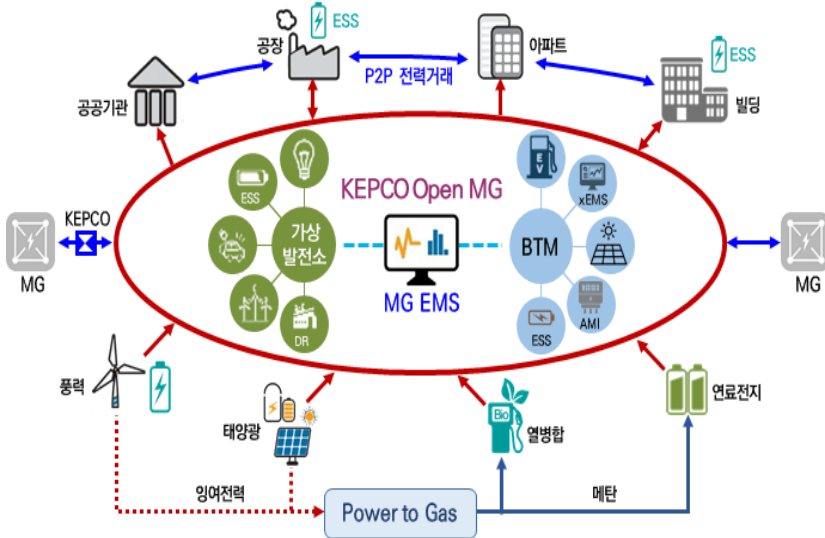
### 1) 부산항 신항 마이크로그리드 구축

#### 가. 마이크로그리드의 정의

마이크로그리드는 중앙집중형(Centralized) 전력 공급 방식이 아닌 전력의 자급자족을 목표로 독립된 분산형(Decentralized) 전원 중심으로 구성되어 지역화된 전력망을 의미한다. 마이크로그리드는 대상 지역의 규모, 전원 구성 등을 제외하고 스마트그리드와 거의 유사한 개념이다. 원자력, 화력 등 대규모 발전시설과 연계하여 국가 또는 도 단위를 대상으로 하는 것이 스마트그리드이며, 마이크로그리드는 주로 섬, 건물 등 소규모 지역을 대상으로 하며 신재생에너지 중심의 분산전원으로 구성한다.

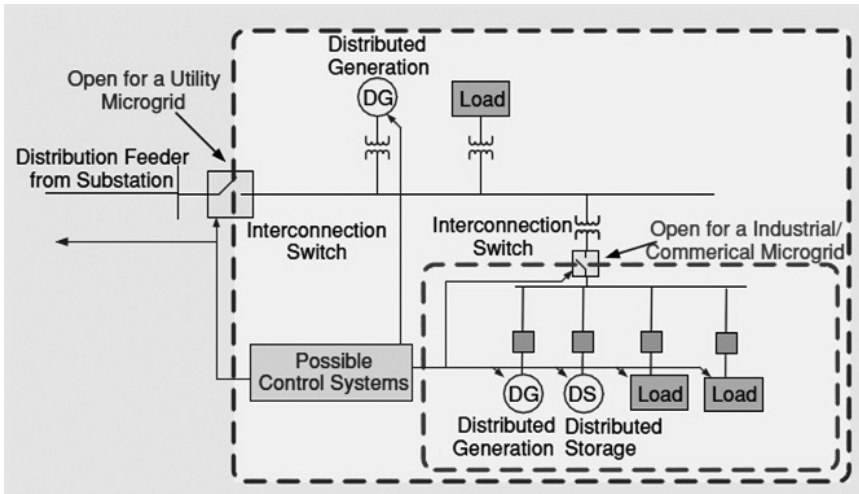


&lt;그림 5-1&gt; 마이크로그리드 개념도



자료: 한국전력공사(2018. 11. 18.), p. 3

&lt;그림 5-2&gt; 마이크로그리드 구성과 요소기기 예시



자료: 김성만(2014), p. 39

---

## 나. 마이크로그리드 유형

마이크로그리드의 유형은 크게 계통연계형 마이크로그리드와 독립형 마이크로그리드로 구분한다. 계통연계형 마이크로그리드는 평상시에는 전력 계통으로부터 전력을 공급받거나 또는 필요시 전력계통으로 전력을 공급할 수 있다. 특히 비상시에는 독자적으로 구축된 전원(화력발전, 신재생에너지 등)을 활용하여 전력계통과 분리되어 자체적으로 운영할 수 있는 시스템을 의미한다. 독립형 마이크로그리드의 경우는 지리적 요인에 따라 전력계통과 분리된 지역에 구축되는 시스템이며, 독자적으로 구축된 전원에서 생산된 전력으로 운영된다. 항만의 마이크로그리드 구축 사례를 살펴보면 선도적으로 시작한 LA항과 샌디에이고항 모두 계통연계형 마이크로그리드를 도입할 예정이다. 그 이유는 화물을 안정적으로 처리해야 하는 항만의 특성이 고려되었기 때문이다.

부산항 신항의 경우에도 24시간 안정적인 화물 처리가 가장 중요하다. 특히 부산항 신항은 글로벌 환적허브 역할도 안정적으로 수행해야 한다. 이를 위해서는 주요 부하에 따른 무정전 전력 공급이 필수적으로 요구된다 할 수 있다. 또한 향후 진해신항 개발과 더불어 완전자동화 터미널 도입 시 전력 공급은 더욱 중요해질 것이다. 따라서 독립형보다는 계통연계형 마이크로그리드를 구축하는 것이 보다 안정적인 항만 운영에 적절할 것으로 판단된다.

## 다. 부산항 신항 마이크로그리드 도입을 위한 전략

부산항 신항에 계통연계형 마이크로그리드를 도입하고 안정적 전력 공급과 전력 사용 효율을 극대화하기 위해서는 요소별 전략 수립이 필요하다. 즉, 부하(load), 분산자원(DR: Distributed Resources), 제어 기능 등 주요 요소별로 부산항 신항 맞춤형 전략 수립이 필요하다.

첫째, 부하에서는 부하별로 공급 중요도를 고려한 우선순위를 설정해 운영의 안정성을 확보해야 할 것이다. 마이크로그리드 내의 전력부하는 무정전 공급이 필요한 중요부하(Critical load), 전압과 전력 품질 유지에 중요한 민감부하(Sensitive load), 전력공급 조절이 가능한 조정부하(Adjustable load), 유사시 일시적 전력 차단이 가능한 부하(interruptible load) 등으로 구분한다.<sup>69)</sup> 항만에서 무정전 공급이 필요한 중요부하는 대상 항만의 특성에 따라서 결정된다. 부산항 신항과 같은 컨테이너항만은 터미널 운영 시스템(TOS: Terminal Operation System)을 운용하는 운영본부(Control tower), 신선화물 보관을 위한 냉동컨테이너 장치장 등이 중요부하가 될 수 있다. 민감부하는 자동화 수준에 따라서 ARMGC(Automated Rail Mounted Gantry Crane), AGV(Automated Guided Vehicle) 등 안정적 전력 공급이 필요한 하역장비가 운용되는 컨테이너야드(CY: Container Yard)가 된다. 또한 선박에 기인한 대기오염물질 저감을 위해 확대가 예상되는 AMP(Alternative Maritime Power, 육상전원공급장치), 대형화와 자동화되는 STS(Ship-To-Shore) 크레인 등이 운용되는 에이프런(Apron)도 민감부하로 구분될 수 있다. 기타 CFS(Container Freight Station), 공컨테이너 장치장, 검사장, 세척장, 주차장 등은 조정부하로 판단된다.

둘째, 마이크로그리드 구축에서 매우 중요한 부분이 분산전원을 적절하게 마련하는 것이다. 적용 가능한 신재생에너지를 면밀하게 검토하고 생산 가능한 전력량을 추정하여 그에 맞는 ESS(Energy Storage System, 전력저장장치)<sup>70)</sup> 구축이 필요하다. ESS 시스템은 기존 단방향 공급 시스템에서 탈피하여 전력의 저장과 공급을 통한 양방향 전력흐름 시스템을 구성할 수 있어 에너지 효율을 높일 수 있다. 특히 전력 생산량의 변동성이 심한 신재생에너지 발전의 약점을 개선하여 전력 계통의 안정성과 신뢰성을 향

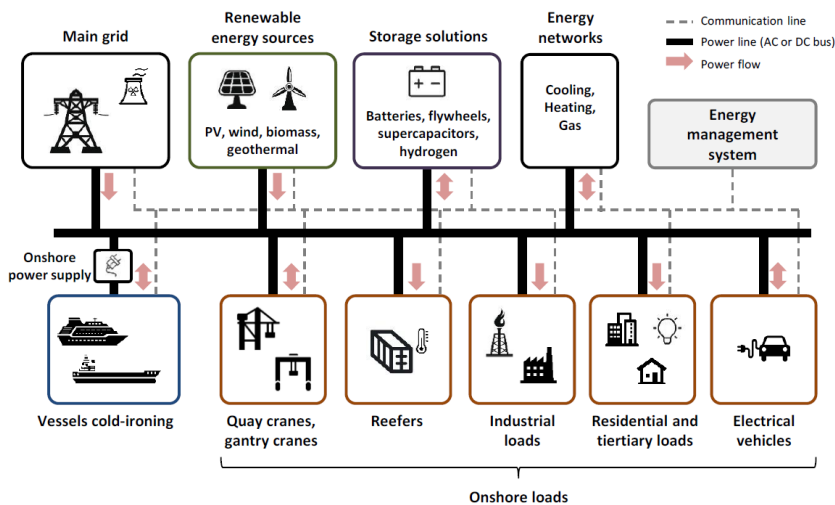
69) HelloT(2014. 4. 25)

70) 에너지저장장치는 신재생에너지를 통해 생산된 잉여 전력을 저장하고 필요한 시점에 공급하여 전력 효율을 극대화하는 장치를 말함

상시킬 수 있다.

셋째, 항만 대상 마이크로그리드 제어시스템은 다양한 분산전원 제어, 전력 품질과 계통 신뢰도 보장, 손실저감, 수요관리 등이 요구된다. 이러한 요구에 대응하기 위해서는 계통연계제어, 독립운전 모드, 스마트미터 등을 활용한 실시간 전력 모니터링 시스템 등이 필요하다. 부산항 신항의 마이크로그리드 제어시스템 설계를 위해서는 전력계획, 분산전원계획 등이 선행되어야 하며, 향후 면밀한 검토를 통한 설계가 필요할 것으로 판단된다.

〈그림 5-3〉 항만 마이크로그리드 구성 예시



자료: Roy *et al.*(2020), p. 10

## 2) 신재생에너지 확대

해외 사례에서 살펴본 것처럼 로테르담항, 함부르크항 등 해외 주요 항만에서는 크게 2가지 목표 실현을 위해 신재생에너지를 적극적으로 확대하고 있다. 첫째, 기후변화 대응과 탄소중립 항만 구축을 위해서 저탄소 전력

생산체계를 구축하는 것이다. 둘째, 향후 자동화 항만을 넘어 스마트항만 도입을 통한 전력 소비량 급증에 선제적으로 대응하여 경쟁력을 확보하려는 차원이다.

항만 부문의 신재생에너지는 태양광, 풍력, 파력발전 등으로 대표된다. 그러나 신재생에너지 발전 확대를 위해서는 우수한 자연조건이 뒷받침되어야 한다. 이러한 관점에서 본다면 부산항 신항은 풍력이나 파력보다는 태양광발전에 집중하는 것이 타당해 보인다. 이에 부산항만공사에서는 2022년까지 한국남부발전과 협력하여 부산항 신항 배후단지에 세계 최대 규모인 100MW 태양광발전 시설을 구축할 예정이다. 2021년 10MW 규모의 태양광발전 시설을 옹동배후단지에 설치하고 90MW의 시설은 남컨테이너와 북컨테이너 배후단지를 활용할 계획이다.

그러나 최근 2년간 국내 평균 태양광발전 가능 시간 3.705<sup>71)</sup>을 고려하면 100MW 태양광발전 시설을 통해 연간 평균 약 135,233MWh ( $100\text{MW} \times 3.705 \times 365 = 135,233\text{MWh}$ )의 발전만 가능할 것으로 예상된다. 이는 제4장에서 전망한 2040년 부산항 신항에 추가 공급이 필요한 소비 전력량 4,826천 MWh의 약 2.8% 수준에 불과하다.

〈표 5-1〉 전체 소비 전력 대비 태양광발전 전력 생산량

구분	2020년	2030년	2035년	2040년
계약전력(KW, a)	102,981	408,979	481,065	550,941
소비전력량(MWh, $b=a \times 24 \times 365/1000$ )	902,114	3,582,656	4,214,129	4,826,243
태양광 발전량(MWh, c)	135,233	135,233	135,233	135,233
비율(% , c/b)	15.0	3.8	3.2	2.8

자료: 저자 작성

주: 2020년의 경우 실제 태양광발전으로 생산되는 전력은 없으나, 가정하여 계산한 수치임

71) 솔라컨텍스트(검색일: 2021. 8. 20)

---

따라서 부산항 신항은 적은 전력을 발생시키더라도 가용한 모든 대안을 활용하는 것이 더욱 타당하다고 판단된다. 이러한 관점에서 최근 부산항만 공사에서 추진하고 있는 게이트를 통과하는 컨테이너 트럭을 활용한 압전은 좋은 사례가 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 3) 에너지 고효율 장비 사용

항만의 특성에 따라서 에너지 소비 패턴이 다양하겠지만, 유럽 항만의 경우 주로 냉동컨테이너 처리에 43%, 안벽크레인(QC, Quay Crane)에서 37%, 야드장비와 건물에서 20% 정도를 소비한다.<sup>72)</sup> 부산항 신항의 경우에도 하역장비 부문에서 평균 60% 이상의 전력을 소비하는 것으로 본 연구에서 조사되었다. 따라서 에너지 고효율 항만 구축을 위해서는 냉동컨테이너와 QC 등 하역 장비를 고효율 장비로 교체 또는 개선하는 것이 가장 중요하고 직접적인 대안이다.

현재 해외 주요 항만에서는 대형 하역장비부터 소규모 조광장비까지 고효율 장비를 도입하고 있다. 예를 들면 E-RTGC(Electric Rubber Tyred Gantry Crane) 도입, 에너지 회수 크레인, 부하차단(Peak shaving) 방식 크레인과 냉동컨테이너 소비 에너지 고효율화, 고효율 LED 교체, 동적조광(Dynamic dimming) 장비 도입 등이다.

에너지 회수 방식은 컨테이너 크레인의 스프레더를 하강시킬 때 발생하는 운동에너지를 이용하여 전력을 자가 생산하여 저장하고 스프레더를 상승시킬 때 사용한다. 또한 플라이휠(Flywheel)<sup>73)</sup>과 울트라 커패시터(Ultra Capacitor)<sup>74)</sup> 등으로 구성된 하이브리드 안벽크레인(QC: Quay Crane)

---

72) European Commission(2014), p. 10.

73) 입력되는 전기에너지를 회전운동에너지로 변환하여 저장하고 필요할 경우 전기에너지로 변환하여 사용하는 장치

은 피크 전력을 72.7%까지 절약할 수 있다(Zhao *et al.*, 2014). 동일한 시스템을 RTGC에 적용할 경우 전력 소비가 35% 정도 감소된다(Kim and Sul, 2006).

부하차단 방식은 주로 피크 수요를 발생시키는 안벽크레인과 냉동컨테이너 등의 부하원에 적용한다. QC를 동기화하여 동시에 작동하는 QC의 대수를 제한하면 최대 전력 수요가 크게 감소하여 전력 효율을 높일 수 있다. 6기의 QC를 동기화하고 최대 5기만을 동시에 작동하도록 하면 전력 소비가 11.1% 감소하는 것으로 나타났다(Geerlings *et al.*, 2018). 냉동컨테이너는 물동량이 꾸준히 증가하고 있고, 항만의 전체 전력 소비 중 20~45%<sup>75)</sup>를 차지하고 있어 전력 관리가 매우 중요하다. 이러한 냉동컨테이너에 부하차단 방식을 이용하면 전력 소비량을 최대 7.2%를 절약할 수 있다(Iris and Lam, 2019).

조명시설은 전체 전력 소비 중 3~5%로 비중을 낮으나, 가장 수월하게 개선할 수 있다. 이에 우리나라 항만을 포함하여 전 세계 많은 항만에서 고효율 LED 조명, 동적조광 장비 등을 통해서 소비 전력을 20~60%로 효율화하고 있다. 해외 사례를 검토해 보면 조광장비 효율화를 통해 부산항 신항의 전력 소비량을 최대 3%<sup>76)</sup> 절약할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 내륙운송과 타 부두 환적(ITT: Internal Terminal Transportation)을 위한 야간 트럭 운행을 위해 설치된 터미널 내부의 조광설비를 모션센서를 이용하여 차량 운행 시에만 켜지도록 하면 전력 소비 효율화에 도움이 될 것이다.

그 외에도 에너지 효율화를 위해 적용 가능한 다양한 대안이 있다. 부산

74) 긴 수명과 높은 에너지 밀도를 지닌 전기를 저장하는 장치

75) Duin *et al.*(2018)

76) 조광장비 사용 전력을 전체 소비량의 5% 수준으로 가정하고, 최대 60% 효율화를 적용하면 부산항 신항 전체 전력 소비량 중 최대 3% 절약 가능함

---

항 신항의 운영 여건에 맞는 대안을 선택하여 적용해야 할 것이다. 하역장비와 냉동컨테이너 장치장 등은 일시적 변경이 어렵기 때문에 중장기적 관점으로 대응하되 신속하게 추진되어야 할 것이다. 현재 부산항 신항은 고효율 조명시설, 하역장비 전환 등을 추진 중이기 때문에 이를 더욱 신속하고 넓게 추진해야 할 것이다.

#### 4) 에너지 전환

에너지 전환은 전기화, 수소화 등으로 대표될 수 있다. 우선 하역장비는 앞서 에너지 고효율 장비 도입과 같이 전기에너지로 전환이 필요하다. 국내 주요 항만에서 일부 도입되어 활용하고 있는 E-RTGC는 디젤을 사용하는 기존 RTGC 대비 에너지 비용을 86.6% 감소하고, 온실가스 배출량은 67% 저감한다(Iris and Lam, 2019). 또한 하이브리드 방식 QC는 피크 전력을 72.7% 감소할 수 있어 디젤 기반 QC 대비 상당한 에너지 소비 효율화가 가능하고 비용 절감 효과가 나타날 것으로 판단된다. 국내 항만에서 현재 활용하고 있는 디젤 기반 장비를 내구연한을 고려하여 고효율 하이브리드 장비로 전환하게 되면 에너지 비용을 절감할 수 있으며, 대기오염원 배출 또한 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

최근 해외 항만에서는 수소 등 새로운 에너지원을 활용하는 방안이 활발하게 검토되고 있다. 일례로 최근 LA항에서 수소 연료전지 기반 트럭을 도입했으며, 앤티워프항에서는 수소 예인선을 2019년부터 활용하고 있다. 또한 최근 수소 YT는 상용화 단계이며, AGV 등에 수소를 적용하려는 시도가 이루어지고 있다. 그러나 전기를 이용해서 생산한 수소를 하역장비에 주입하여 연료전지를 통해 전기를 생산하는 방식은 비효율적이라는 시각이 상존한다. 그럼에도 불구하고 수소 생산 단가는 지속적으로 감소할 것으로 예상되며 그에 따라 에너지 캐리어로서 경제성은 높아질 것으로 판단된다.



그와 함께 탄소국경제도 등에서 전력 생산 비용에 탄소배출량을 고려하여 세금을 부과하면, 재생에너지와 연계한 수소 기반 전력 생산이 경쟁력을 갖출 시기가 올 것으로 판단된다. 따라서 장기적인 관점에서 항만에서 수소 활용을 적극적으로 고려할 필요가 있다. 해외 주요 항만의 수소 활용 계획을 살펴보면 단기적으로는 하역장비에서 발생하는 오염원 저감을 위해 그레이수소와 블루수소를 하역장비 등의 연료로 활용할 계획이다. 장기적으로는 재생에너지를 활용한 수전해 방식으로 그린수소를 생산해 하역장비 연료원으로 사용하고, 연료전지발전소에서 전력을 생산하여 항만에 공급하는 친환경 에너지 자급형 항만을 구축하는 것이다.

부산항 신항은 국내에서 가장 많은 컨테이너 화물을 처리하는 항만이며 그만큼 많은 하역 장비를 운영하고 있어 디젤과 전력 등 소비되는 에너지도 막대하다. 따라서 장기적 관점에서 수소 등 친환경 에너지원으로 전환하면 대기오염원 저감 효과뿐만 아니라 에너지 비용 절감 효과도 기대된다. 특히 수소를 활용한 에너지 자립형 항만 구축을 통해 국내 전체 에너지 비용 절감, 화석연료 발전으로 발생하는 간접 발생 대기오염원 저감 등 다양한 효과도 예상된다. 이를 위해 항만배후단지를 활용한 수전해와 연료전지 시설의 설치도 고려해 볼 수 있을 것이다.

## 제2절 기대효과 분석

### 1. 마이크로그리드 도입 효과

부산항 신항에 마이크로그리드를 구축함으로써 기대되는 주요 효과는 다음과 같다.

---

첫째, 향후 증가하는 항만의 전력 수요 대응을 위해 필수적인 신재생에너지 확대를 위해서는 신재생에너지의 변동성 제어가 매우 중요하다. 출력 특성이 불규칙하면 외부 전력계통과 연계 시 전력 품질 유지가 매우 어렵기 때문이다. 마이크로그리드 구축을 통해 신재생에너지의 변동성을 효과적으로 제어할 수 있어 안정적인 신재생에너지 확대가 가능하다.

둘째, 마이크로그리드 내의 부하별 중요도에 따라 전력 품질 개선과 무정전 공급체계 마련이 가능하다는 점이다. 적절한 분산전원을 활용하여 외부 전력계통의 문제에 유연하게 대응할 수 있다. 예를 들면 항만 내의 냉동 컨테이너에 순간적 전력 공급 중단에 따른 화물 품질 훼손, 자동화 하역 장비 또는 TOS에 전력 공급 중단에 따른 운영 중단 등으로 발생 가능한 막대한 경제적 손실과 외부 신뢰도 하락 등을 선제적으로 방지할 수 있다.

셋째, 전력 소비의 효율화를 통한 전력비용 절감이 가능하고 국가 전체의 전력 소비 효율화에도 기여할 수 있다. 항만 분야에서는 캠퍼스, 건물 등 타 분야 대비 마이크로그리드 도입이 비교적 늦어 실제 도입 효과와 관련한 실증분석 사례는 거의 없다. 그러나 Iris and Lam(2021)의 연구에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 싱가포르항에 마이크로그리드 도입 효과를 분석하였다. 주요 결과를 살펴보면 동일한 하역 장비로 동일한 규모의 선박 30척과 40척을 처리했을 때 마이크로그리드 시스템에서 상당한 에너지 비용 절감 효과가 나타났다. 태양광과 ESS로 구성된 마이크로그리드 시스템에서 배터리 용량이 3.2MWh일 경우는 18%, 9.6MWh일 경우는 21%까지 에너지 비용이 절감되었다. 분석한 표본이 30척과 40척으로 비교적 제한적이거나 상당한 비용 절감 효과가 나타났다. 재생에너지 발전 능력, 선박의 규모, 비규격 컨테이너와 냉동컨테이너 비율 등 화물의 구성 등에 따라 마이크로그리드 효과가 달라져 부산항 신항에 도입 효과를 정량적으로 추정하기는 어렵다. Iris and Lam(2021)의 시뮬레이션 결과를 단순하게 대입하여 부산항 신항에 마이크로그리드 도입에 따라 최대 21%의 비용 절감

효과가 나타난다고 가정하면, 2020년 기준 최대 5,240백만 원 정도의 전력비용이 감소할 것으로 예상된다.<sup>77)</sup> 다만 이는 산술적인 대입으로 정교한 효과 추정을 위해서는 후속 연구가 필요하다. 이를 위해 부산항 신항 장비 부하 산출, 마이크로그리드 시나리오 설정, 생산 가능한 신재생에너지 발전량 추정 등이 필요할 것으로 판단된다.

넷째, 전력 손실 비용 절감과 사용료 절감이 가능하다. 우리나라는 전력을 생산하는 발전원이 동해와 서해에 집중되어 전력 수송 손실이 발생하고 있으며, 최근 5년간 평균 손실률은 3.56%, 손실금액은 1,721억 원에 달한다(〈표 5-2〉 참조). 부산항 신항에 마이크로그리드를 구축하면 외부계통망을 통한 전력 공급량이 줄어들게 되고 그에 따른 손실 비용도 절감된다. 다만 현재 신재생에너지 공급 계획이 구체적이지 않은 상황에서 정량적인 추정은 쉽지 않으나 부산항 신항에서 사용하는 전력량 규모 기준으로 볼 때 상당한 수준의 비용 절감 효과가 있을 것으로 예상된다. 부산항만공사에서 추진하는 태양광 100MW 설치와 Iris and Lam(2021)의 연구에서 제시된 에너지 비용 절감 효과 21%를 단순하게 대입하여 계산하면 2040년 기준으로 약 403백만 원의 전력수송 손실금액 절감 효과가 발생한다(〈표 5-3〉 참조). 연간 403백만 원의 전력수송 손실금액 절감 효과는 큰 효과라고 할 수는 없으나, 전국 항만으로 확대하면 상당한 절감 효과가 발생할 것으로 판단된다.

77) 2020년 기준 1부두 전력비용을 이용하여 선석당 전력비용을 산출하고 이를 부산항 신항 전체 17개 선석에 적용하면 약 24,952백만 원이며, 21% 비용 절감 효과를 고려하면 최대 5,240백만 원가량 전력비용이 감소됨

〈표 5-2〉 전력수송 중 전력 손실량과 손실금액 추이(최근 5년)

(단위: GWh, %, 억 원)

연도	송변전손실		배전손실		합계		손실금액
	손실량	손실률	손실량	손실률	손실량	손실률	
2017	8,353	1.59	10,437	2.02	18,790	3.57	16,408
2018	8,619	1.59	10,740	2.01	19,359	3.56	18,521
2019	8,446	1.58	10,555	2.00	19,000	3.54	18,100
2020	8,279	1.57	10,331	2.00	18,610	3.54	15,826
평균	8,424	1.58	10,516	2.01	18,940	3.56	17,214

자료: 한국전력공사(2021), pp.120~121.

주: 손실금액은 당해 연도 전력구입 단가를 적용하여 산정함

〈표 5-3〉 전력 손실금액 저감 효과 산정

구분	2019년	2020년	2025년	2030년	2035년	2040년
소비전력(MWh, a)	251,811	259,638	411,906	513,465	597,908	682,778
손실률(% , b)	1.58	1.57	1.58	1.58	1.58	1.58
공급전력(MWh, $c=a/(1-b)*b$ )	255,853	263,779	418,519	521,708	607,507	693,739
마이크로그리드 활용 저감 (MWh, $d=c \times 21\%$ )	53,729	55,394	87,889	109,559	127,576	145,685
태양광 발전(MWh, e)			135,233	135,233	135,233	135,233
총소비전력절감(MWh, $f=d+e$ )	53,729	55,394	223,121	244,791	262,809	280,918
손실절감효과(MWh, $g=f \times b$ )	849	870	3,525	3,868	4,152	4,438
전력구입단가(원, h)	95	85	91	91	91	91
비용절감효과(백만 원, $l=g \times h$ )	81	74	320	351	377	403

자료: 한국전력, 한국전력통계 각 연도

주: 1) 2020년까지 소비전력을 실적이며, 공급 전력은 손실률을 적용하여 추정함

2) 마이크로그리드 활용에 따른 전력 효율화 비율은 Iris and Lam(2021) 연구에서 제시된 21%를 준용함

3) 2025년부터 손실률과 전력 구입 단가는 최근 5년 평균값을 사용함

## 2. 신재생에너지 확대

부산항 신항에 신재생에너지를 확대함으로써 기대 가능한 직접적인 효과는 크게 간접 발생 탄소 저감 효과와 에너지 자급률 향상에 따른 전력비용 절감 효과이다.

한전에서 제공하는 탄소배출 계산 산식에 따르면 화석발전을 통해서 생산되는 전력 1kWh당 탄소배출량은 약 0.424kg이다. 따라서 100MW의 태양광 설치로 연간 평균 약 135,233MWh의 전력 생산에 따라 기대되는 간접 탄소배출량 저감은 57,339톤이다. 전력비용 절감 효과는 5년간 태양광 발전 전력의 평균 정산단가 84.6/kWh를 고려하면 11,440백만 원의 비용 절감 효과가 예상된다. 간접 탄소배출량 저감량을 최근 6개월 KAU2178) 거래금액 톤당 23,851원을 반영하면 약 1,368백만 원의 경제적 효과가 발생한다.

〈표 5-4〉 태양광 발전 전력 정산단가 추이(최근 5년)

(단위: 원/kWh)

구분	2016년	2017년	2018년	2019년	2020년	평균
정산단가	77	84	98	94	70	84.6

자료: 전력통계정보시스템(검색일: 2021. 9. 2)

## 3. 장비 전력 사용 효율화

항만 장비의 전력 사용 효율화를 통해서 전력비용 절감이 예상되나 개선, 도입되는 장비의 종류와 전력 사용량에 따라서 절감 효과가 달라지게 된다. 그러나 항만 전체 전력 소비량 중 60%가량을 하역장비에서 사용하는 만큼 장비 전력 사용 효율화에 따른 비용 절감 효과는 상당할 것으로

78) 2021년월 탄소배출권 거래금액을 의미함

---

추정된다. 2020년 기준 부산항 신항 1부두 전기요금을 이용하여 추정한 부산항 신항 전체 전기요금의 60%는 약 14,971백만 원이며, 장비 사용 전기를 10% 정도만 효율화한다고 가정하면 연간 15억 원가량의 전기요금을 절감할 수 있는 것이다.

#### 4. 에너지 전환

화석에너지에서 전기에너지나 신재생에너지로 전환하게 되면 기대되는 효과는 크게 탄소배출량 저감 효과와 에너지 효율화에 따른 비용 절감 효과이다.

부산항은 국내 최대의 무역항으로 2020년 기준 컨테이너 물동량은 2,182만 TEU, 비컨테이너 물동량은 2,065만 톤, 총 물동량은 4억 1,095 톤에 달한다. 이러한 막대한 물동량 처리를 위해 투입한 하역장비의 에너지 소비를 통해 2020년 기준 166천 톤의 이산화탄소가 발생한 것으로 추정된다(〈표 5-5〉 참조). 그러나 하역장비의 에너지원을 전기, 수소 등 친환경 장비로 전환하여 탄소배출 전체를 저감한다고 가정하여 최근 6개월간 KAU21 탄소배출권거래 톤당 23,851원을 기준으로 금액을 환산하면 3,962백만 원의 효과가 발생할 것으로 예상된다(〈표 5-6〉 참조). 이상의 추정은 기대효과의 규모를 파악해 보기 위한 단순한 추정으로 정확성은 낮다. 그렇지만 에너지 전환을 통해 기대되는 효과가 그만큼 크다는 것을 잘 설명해 주고 있다고 할 수 있다.

〈표 5-5〉 탄소배출량 추정(총 물동량 기준)

(단위: 천 톤, KgCO<sub>2</sub>/천 톤, 천 TEU, KgCO<sub>2</sub>/천 TEU, 천 톤)

구분	비컨테이너			컨테이너			합계
	물동량	배출계수	탄소 배출량	물동량	배출계수	탄소 배출량	
2020년							
부산	20,647	0.0029	60	21,824	0.0049	106	166
광양	239,177		694	2,159		11	704
울산	181,315		526	536		3	528
인천	101,564		295	3,272		16	310
평택 · 당진	94,853		275	793		4	279
2019년							
부산	21,419	0.0029	62	21,992	0.0049	107	169
광양	261,709		759	2,378		12	771
울산	194,973		565	517		3	568
인천	103,044		299	3,092		15	314
평택 · 당진	102,148		296	725		4	300

자료: 해운항만물류정보시스템(검색일: 2021. 9. 2)

주: 1) 비 '컨' 탄소배출계수는 국토해양부, 「저탄소 항만 구축 방안에 관한 연구」, 2008 참조

2) '컨' 탄소배출계수는 현황 조사 결과임

〈표 5-6〉 탄소배출권 거래금액 추정

(단위: 톤, 원/톤, 백만 원)

구분	2019년			2020년			비고
	탄소저감량	KAU21	거래금액	탄소저감량	KAU21	거래금액	
부산	169,164	23,851	4,035	166,106	23,851	3,962	
광양	770,534		18,378	704,122		16,794	
울산	567,938		13,546	528,421		12,603	
인천	313,877		7,486	310,462		7,405	
평택 · 당진	299,759		7,149	278,933		6,653	

자료: 배출권시장 정보플랫폼(검색일: 2021. 9. 2)

현재 항만에서 사용되는 디젤 기반 RTGC와 YT는 컨테이너 1개를 처리할 때 소요되는 비용이 전기 기반 RTGC와 YT 대비 비싼 편이다. 운영사 내부 자료를 분석한 결과 디젤 기반 YT는 TEU당 1,136원이 필요한 반면 전기 YT는 TEU 당 273원만 필요하다. 디젤 기반 YT의 시간당 연료비는 9,421원인 반면에 전기 기반 YT는 2,262원에 불과하다. 디젤 기반 RTGC는 TEU당 1,523원, 시간당 37.936원이 소요되는 반면에 전기 기반 RTGC는 TEU당 195원, 시간당 5,067원에 불과하다(〈표 5-7〉 참조).

〈표 5-7〉 디젤 vs 전기 장비의 에너지 비용 비교

구분		디젤		전기		비용 차이
		소모량(l)	소요비용(원)	소모량(kWh)	소요비용(원)	
YT	TEU당 에너지	0.71	1,136	2.10	273	899
	시간당 에너지	5.87	9,421	17.4	2,262	7,159
RTGC	TEU당 에너지	0.96	1,532	1.50	195	1,337
	시간당 에너지	23.65	37,936	39.0	5,067	32,869

자료: 터미널운영사와 장비제작사 내부자료를 활용하여 저자 작성

주: 유류비는 한국석유공사 평균 유가, 전력비는 한국전력공사 요금표를 준용함

디젤 장비를 전기로 전환했을 때 발생하는 경제적인 효과를 추정하기 위해 부산항 신항에서 처리하는 물동량에 디젤과 전기 장비별 에너지 비용 원단위를 적용하면 2020년 기준으로 약 32,509백만 원의 에너지 비용 절감 효과가 발생한다(〈표 5-8 참조〉.<sup>79)</sup> 이런 효과에도 불구하고 전기 YT로 교체 시 대당 약 13억 원, 전기 RTGC는 대당 약 17억 원이 소요되어 장비 교체 비용도 고려할 필요가 있다. 그러나 장비의 내구연한에 도달하면 장비를 교체할 수밖에 없으며, 전기 기반의 장비로 교체 시 얻을 수 있는 에

79) 부산항 신항은 YT를 기존 디젤에서 LNG로 교체하고 있으며, E-RTGC도 일부 도입되었으나 개략 추정을 위한 편의상 고려하지 않음



너지 비용 절감 효과는 뚜렷할 것으로 판단된다. 부산항 신항 외에 국내 다른 항만에도 디젤 기반으로 운용되는 장비가 상당히 많아 국내 전체 항만의 에너지 전환 효과는 더욱 커질 것으로 생각된다.

〈표 5-8〉 부산항 물동량 대비 디젤 vs 전기 장비의 에너지 비용 비교

구분	물동량 (천 TEU)	에너지비용차이 (원/TEU)		에너지비용 절감(백만 원)	합계 (백만 원)
2016년	12,835	YT	863	11,077	28,237
		RTGC	1,337	17,160	
2017년	13,449	YT	863	11,606	29,588
		RTGC	1,337	17,981	
2018년	14,518	YT	863	12,529	31,940
		RTGC	1,337	19,411	
2019년	14,867	YT	863	12,830	32,707
		RTGC	1,337	19,877	
2020년	14,777	YT	863	12,753	32,509
		RTGC	1,337	19,757	

자료: 저자 작성

주: 에너지 비용 차이는 편의상 2021년을 기준으로 추정함

---

## 제3절 항만 전력 관리 로드맵 수립

### 1. 기본 방향 설정

앞서 살펴본 것처럼 부산항 신항의 전력 소비는 상당 수준으로 증가할 것으로 예상되며, 2030년 이후 추가 전력이 공급되지 못하면 전력 수급에 문제가 예상된다. 이에 따라 본 장 제1절에서는 부산항 신항 전력 관리 방안을 제시하였으며 제2절에서는 기대효과를 분석하였다. 그 결과 상당한 경제적 효과가 예상되며, 계량화하기는 어려운 운영 안정성 확보 부분도 기대된다.

전력 부족 문제는 부산항 신항의 문제만은 아니다. 따라서 국내 항만의 전력 관리를 위해서 시급한 문제를 선별하고 해결하기 위한 체계적인 로드맵을 수립하고 추진하는 것은 매우 중요한 문제이다. 이에 본 연구에서는 연구 수행 과정에서 도출된 문제점, 해외 사례 시사점, 부산항 신항 전력 관리 방안과 기대효과 등을 종합적으로 고려하여 ‘항만 전력 관리 로드맵’을 제시하였다.

로드맵은 크게 ①항만 전력 빅데이터 시스템 구축 ②항만 기본계획 반영 ③에너지 효율화와 신재생에너지 기술 개발 등으로 구분하여 제시하였다. 시기는 단기(~2023년), 중기(~2026년), 장기(~2029년)로 구분하였다. 특히 앞서 강조한 장래 자동화, 스마트항만 도입에 대응하기 위한 에너지 효율화 시스템의 중요성을 고려하여, 에너지 효율화 시스템은 2026년 개장하는 부산항 신항 2-6단계에서 실증 후에 2029년 개장하는 부산항 진해신항 1단계에 실용화하는 절차로 설정하였다.

## 1) 항만 전력 빅데이터 시스템 구축

### (1) 전력 통계 구축

본 연구에서는 부산항 신항의 터미널별 운영사아 부산항만공사의 내부자료 등을 수집하여 부산항 신항의 과거 전력 소비량 실적 자료를 구축하고 딥러닝 모형을 개발하여 부산항 신항의 장래 전력 소비량을 전망하였다. 향후 본 연구에서 개발된 모델 등을 활용하여 국내 전체 항만의 장래 전력 소비량 전망과 공급 대책 마련이 필요하다. 하지만 현재 항만 전력 통계 시스템이 전혀 구축되지 못한 상황에서는 매우 어려운 일이다. 따라서 국내 항만의 체계적인 전력 관리를 위해서는 무엇보다 항만 전력 빅데이터 시스템 구축이 시급하며, 이를 위한 제도적 정비가 중요하다.

항만에서 소비되는 대부분의 전력은 터미널에서 사용되고 있어 소비량 자료는 터미널 운영사에서 관리되고 있다. 물론 전력을 공급하고 있는 한전과 변전소 등에서도 사용량 실적 자료를 관리하고 있으나 이는 총량의 개념으로 하역장비, 컨테이너야드, 운영동 등 세부적인 소비 구조 정보는 터미널 운영사만 보유하고 있다. 따라서 항만 전력 빅데이터 시스템 구축을 위해서는 운영사의 자료 협조가 필수적이거나 현재 제도상으로는 쉽지 않다. 이러한 문제를 해소하기 위해서는 영업상의 기밀에 해당하지 않는 전력 소비 자료 제공을 터미널 계약사항에 포함하거나 「항만법」 등 관련 법·제도 개선을 통해 확보하는 방안을 마련해야 한다.

### (2) 전력 통계 표준화와 시스템 구축

항만에서 소비되는 전력은 항만별, 터미널별 특성에 따라 소비 패턴이 다르다. 또한 전력 소비 통계를 수집하는 주체별(운영사, PA 등)로 수집의 기준이 다를 수 있다. 따라서 전력 통계의 신뢰성 확보를 위해서는 표준화

---

작업이 필수적이다. 전력 통계 표준화를 위해서는 우리나라 전국 향만의 전력 소비량 원시자료를 수집하여 하역장비, 보관시설, 운영동, AMP 등 소비 주체별로 분류하고 월별, 연도별 소비량 등을 집계하고 관리할 수 있도록 해야 한다. 이를 위해서는 운영사 또는 관리기관(PA 등)에서 입력하는 자료가 표준화되어 저장되고 집계된 자료를 월별, 연도별, 지역별로 구분하여 검토할 수 있는 시스템 구축이 요구된다.

## 2. 향만 기본계획 반영

앞서 제4장에서 살펴본 바와 같이 현재 국내 향만 분야 최상위 법정 기본계획인 「향만기본계획」에서조차도 장래 전력 수급이 검토되지 못하고 있다. 하지만 본 연구에서 지속적으로 강조한 것처럼 자동화, 스마트화, 친환경화 등으로 장래 향만의 에너지 소비량은 급격하게 증가할 가능성이 매우 큰 상황인 점을 고려하면 향만의 에너지 공급계획 검토가 필요하다.

별도의 향만 에너지 공급 기본계획을 검토하는 것보다는 5년 단위로 수립하는 「향만기본계획」에서 본 연구에서 제시하는 딥러닝 기반 수요 전망 모델 등을 이용하여 향만별 장래 에너지 수급 상태를 점검하고 탄력적으로 공급계획을 수립하는 것이 적절할 것으로 생각된다. 이를 위해서는 「향만법」을 일부 개정하여 「향만기본계획」 수립 시 장래 에너지 수급을 검토하도록 규정할 필요가 있다.

## 3. 에너지 효율화와 신재생에너지 기술 개발

앞서 해외 사례에서 살펴본 바와 같이 해외 주요 향만에서는 전력뿐 아니라 수소, 태양광, 풍력 등 신재생에너지 분야에서 다양한 연구개발을 수

행하고 있다. 단순히 구분하면 장래 항만에서 소비되는 에너지를 효율화하고 항만의 에너지 생산 능력을 확대하는 것이다. 이를 통해 항만의 에너지 자립을 실현하고 자연스럽게 친환경화까지 달성하는 것이다. 이러한 방향성을 참고하되 우리나라 항만의 특성을 고려하여 추진해야 하며, 관련 연구개발(R&D)을 대폭 확대해야 한다.

현재의 우리나라 항만 현황을 고려하면 에너지 효율화 부문에서 연구개발이 시급하다. 광양항 항만자동화 테스트베드를 시작으로 우리나라 항만도 완전 자동화 터미널로 개발될 예정이며, 더 나아가 스마트항만으로 육성할 계획이다. 즉, 앞으로 전력 소비가 급격하게 증가할 것이다. 따라서 마이크로그리드 기술, 고효율 항만 장비 기술 등 전력 효율화 기술을 개발하고 도입하여 전력 최적화 시스템을 구축하는 것이 필요하다.

우리나라의 경우 지리적 여건상 풍력, 파력, 태양광 등 재생에너지 생산 효율이 높지 않은 상황이다. 재생에너지원 중에서 태양광의 효율이 가장 높기 때문에 2021년 국내 전력 총생산량 중 약 11%가 태양광 발전이다.<sup>80)</sup> 그러나 태양광은 전력 생산을 위해 대규모 설치 공간이 요구되어, 국토가 비교적 협소한 우리나라에서는 무한정 확대는 어려운 실정이다.

따라서 파력, 해상풍력, 조력 등 해양 기반 재생에너지 생산 기술 개발에 꾸준한 노력이 요구된다. 현재까지는 해양재생에너지 생산 효율이 상대적으로 낮고 전력 케이블 매설 등에 따른 부담 등으로 적극적인 확대가 어려웠다. 그러나 최근 기술개발을 통해 효율이 개선되고 있고 전력 케이블이 아닌 ESS 등을 활용한 운반도 가능한 점을 고려하면 기술개발을 통한 항만 주변에서 해양재생에너지 생산거점 마련이 필요하다.

항만 중심 재생에너지 확대는 에너지 자립 항만 실현에 그 무엇보다 중요한 부분이며 수소 경제로 전환하는 것과도 밀접한 연관이 있다. 수소 경

80) 산업통상자원부(2021. 8. 4)

제 초기에는 수입 수소에 절대적으로 의존할 수밖에 없으나 에너지 안보 측면에서도 적정 수준의 자립이 필요하다. 국토가 협소한 우리나라에서는 내륙 기반 재생에너지 생산보다 해양 기반 재생에너지 생산 능력 확보가 매우 중요하다.

#### 4. 항만 에너지 관리 로드맵(안) 설정

본 연구 과정에서 얻어진 주요 결과를 바탕으로 항만 전력 관리 로드맵(안)을 <표 5-9>와 같이 제시하고자 한다.

<표 5-9> 항만 전력 관리 개략 로드맵(안)

구분	목표	세부 방안
단기 (2022~2023년)	전력 빅데이터 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 전력 통계 수집을 위한 법·제도 개선</li> <li>• ‘컨’ 터미널 대상 전력 통계 수집</li> <li>• 전력 통계 표준화 방안 마련</li> <li>• 전력 통계 시스템 구축 및 관리 조직 정비</li> </ul>
	에너지 효율화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만 마이크로그리드 기술 확보</li> <li>• 항만 장비 및 시설 에너지 효율화 기술 확보</li> <li>• 항만 에너지 효율화 실용화(인센티브 등) 방안 마련</li> </ul>
	신재생에너지 확대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 신재생에너지 확대를 위한 법·제도 개선</li> <li>• 재생에너지 발전 효율 개선 기술개발</li> <li>• 해양재생에너지 기반 수소발전 원천기술(수전해, 연료전지 등) 확보</li> </ul>
	항만기본계획 반영	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2024년 고시 예정인 「신항만건설기본계획」에서 일부 항만에 대한 에너지 수급 계획 반영 추진</li> </ul>
중기 (2024~2026년)	전력 빅데이터 시스템 운영	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 일반부두까지 전력 수집 대상 확대</li> <li>• 전력 빅데이터 시스템 상용화</li> </ul>

구분	목표	세부 방안
	에너지 효율화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 마이크로그리드 시스템 실증(부산항 신항 2-6단계)</li> <li>• 항만 장비 및 시설 효율화 기술 실증(부산항 신항 2-6단계)</li> </ul>
	신재생에너지 확대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항만별 특성을 고려한 신재생에너지 확대를 통한 에너지 자립항만 추진</li> <li>• 해양재생에너지 기반 수소발전 기술 실증(항만배후단지 등 활용)</li> </ul>
	항만기본계획 반영	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2025년 고시 예정인 「항만기본계획」에 에너지 공급 계획 전면 반영 추진</li> </ul>
장기 (2027~2029년)	에너지 효율화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 마이크로그리드 실용화(진해신항 1단계)</li> <li>• 항만 장비 및 시설 효율화 기술 실증(진해신항 1단계)</li> </ul>
	신재생에너지 확대	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 해양재생에너지 기반 수소 발전 기술 실용화</li> <li>• 수소 발전소 실용화</li> <li>• 에너지자립 항만 실현</li> </ul>

자료: 저자 작성

## 제4절 소결

본 장에서는 앞서 살펴본 해외 주요 항만 사례, 부산항 신항의 장래 전력 소비량과 계약 전력 소요 전망, 부산항 신항의 운영 여건 등을 고려하여 전력 관리 방안을 제시하였다. 해외 사례와 실현 가능성 등을 종합적으로 고려하여 ①마이크로그리드 도입을 통한 부산항 신항의 전력 효율화 ②장비 사용 전력 효율화 ③신재생에너지 도입을 통한 전력 생산 능력 확보 ④

---

신재생에너지 전환 등 크게 4가지의 관리 전략 수립이 가능할 것으로 제안하였다.

이 장에서 강조하고자 하는 것은 단순한 대안을 제시하고 그 효과만을 제시하는 데 그치는 것이 아니라 전력 관리를 위해 많은 노력이 이루어지고 있고 그 노력을 통해 많은 효과가 기대된다는 점을 강조하고자 하는 것이다. 전력 관리는 단기간에 실현되기 어렵다. 적용할 수 있는 대안을 찾고, 대안별 실현 가능성 등을 검토하고 실제 적용을 통해 작동 여부도 파악해야 한다. 또한 작동 과정에서 발생하는 오류 등도 오랜 기간 수정이 필요하다. 즉, 전력 소비 관리를 위해서는 향후 과제가 아닌 현재 시급한 과제로 다루어야 함을 강조하고자 한다.

또한 본 장에서는 국내 항만의 전력 관리를 위한 로드맵 설정을 위해서 전력 빅데이터 시스템 구축과 에너지 효율화, 신재생에너지 관련 기술개발, 「항만기본계획」에 전력 공급 계획 추가 등 3가지 목표별로 단기, 중기, 장기 등 시기별 추진 방향을 수립하였다. 다만 본 연구는 부산항 신항을 중심으로 이루어지다 보니 세부적인 부문에 대한 고려가 부족한 실정이다. 이에 후속 연구에서는 기술·정책 수요 조사를 기반으로 한 면밀한 검토를 통해 세부적인 로드맵 마련이 필요할 것으로 사료된다.



## 06

### 결론 및 정책제언

본 연구는 해외 항만 대비 상대적으로 미흡한 항만의 에너지 관리 중요성을 강조하고 그 대책을 살펴보기 위해 부산항 신항의 전기에너지를 중심으로 수행되었다. 그러나 부족한 에너지 사용 실적 자료와 자료의 통일성 부족, 항만 분야에서 처음으로 시도하는 연구라는 기본적인 어려움으로 연구 수행에서 많은 한계점도 있었다. 그럼에도 불구하고 해외 주요 항만의 에너지 관리 전략, 부산항 신항의 전력 이용 실태, 중장기 전기에너지 소비량 추정, 장래 전력 공급 소요 분석, 전기에너지의 효율적 관리 방안과 로드맵 제시 등 가시적인 연구 성과가 있었다. 본 장의 결론에서는 본 연구 내용의 전체적인 요약과 핵심 결론을 제시하고 연구의 한계점과 향후 연구에 관해서도 제시하였다. 마지막으로 정책제언에서는 본 연구의 종합적 결과에 기반하여 향후 추진이 필요한 정부와 관련 기관의 정책을 제안하고자 한다.

---

## 제1절 결론

---

### 1. 에너지 관리는 항만의 핵심 과제

본 연구의 배경에서 제시한 바와 같이 국내 항만의 에너지 관리 정책은 미흡한 수준이라 판단된다. 반면에 해외 선진 항만은 에너지 관리 정책을 우선 정책 중 하나로 두고 있다. 이는 항만 물동량 증가와 자동화 운영 방식 도입 등에 따른 에너지 소비량 증가, 에너지 전환과 신재생에너지 사용 확대에 에너지 단가 증가에 기인한 비용 상승, 친환경 항만 실현을 위한 에너지 소비 감소 노력 등의 결과인 것으로 조사되었다. 특히 기존 화석에너지 소비는 감소하고 있으나, 전기에너지 소비가 공통적으로 증가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 해외 주요 항만은 향후 전기에너지 이용 효율화를 위해 항만 마이크로그리드 등 에너지 관리시스템 도입과 구축, 에너지 고효율 장비 도입과 신재생에너지 도입 등 다각적인 노력을 기울이고 있다.

### 2. 항만의 에너지 관리 연구는 시작 단계

이러한 항만의 에너지 관리 중요성에도 불구하고 에너지 소비량을 전망하고 이에 대응하기 위한 방안을 제시하는 연구는 거의 수행되지 않은 것으로 검토되었다. 항만에너지 관련 연구 자체는 일부 수행되었으나 대부분의 연구는 에너지 소비량 추정보다는 주요 항만의 전략과 도입 기술을 조사하여 정리하는 연구가 대부분이었다. 일부 에너지 소비량을 추정한 연구도 있으나 이들 연구는 장래 소비량 추정보다 현재 상태의 에너지 소비 구조를 다양한 형태로 조사한 수준에 그치고 있다. 그 이유는 에너지 소비량

추정을 위해서는 신뢰성 있는 자료 확보가 가능해야 하고 자료의 양적 수준도 충분해야 하는데 항만의 경우 공통적으로 자료 수집에 많은 어려움이 있기 때문인 것으로 파악되었다. 최근 항만 분야에 비해 활발하게 연구가 수행되고 있는 선박과 건물은 에너지 소비 통계 확보가 용이해졌다. 선박의 경우 EU, IMO 등 국제적 규정에 따라 선박별 연비자료를 공개하고 있고, 건물은 스마트미터 설치를 통해 실시간 자료 수집이 가능해졌기 때문이다. 이 같은 여건하에서 본 연구는 충분하지는 않으나 부산항 신항의 터미널별 전력 사용량을 수집하여 부산항 신항의 장기 전력 소비량 추정을 시도하였다.

### 3. 부산항 신항의 전력 소비는 지속적 증가

전력 소비량 추정에 앞서 부산항 신항의 전력 사용량을 분석한 결과 본 연구의 배경에서 언급한 바와 같이 사용량이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 종합적으로 보면 물동량 증가율보다 전력 소비량 증가율이 더 높은 것으로 나타났다. 특히 주목할 점은 부산항 신항 5부두(BNCT)와 같이 자동화 수준이 높은 터미널일수록 전기에너지 소비량은 더 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 본 연구의 배경에서 향후 부산항 신항에 신규로 공급될 부두는 완전자동화 부두로 개발하는 것으로 계획되어 있고, 친환경 항만 구축을 위해 AMP 등의 설치로 전기 소비가 크게 증가할 것으로 예상하였다. 이러한 문제 제기가 향후 실제 발생할 가능성이 높다는 것을 전력 사용 실적을 통해 증명된 것으로 판단된다. 아울러 부산항 신항은 컨테이너터미널 뿐만 아니라 항만배후단지도 개발, 운영하고 있다. 향후 항만배후단지 확대에 따라 더 많은 물류기업과 제조기업이 입주할 것으로 예상되기 때문에 전력 소비 증가는 더욱 중요한 문제가 될 것으로 판단된다.

---

#### 4. 부산항 신항의 전략 수요 증가에 대비 필요

이러한 실적을 기반으로 부산항 신항의 중장기 전력 소비량을 추정하였다. 향후 신규로 공급될 진해신항도 에너지 수요 추정의 범위에 포함시켰으나 단순화를 위해 부산항 신항으로 통칭하여 수행하였다. 본 연구에서는 최근 에너지 소비량 추정에 그 활용도가 높아지고 있는 딥러닝 방법을 이용하였다. 딥러닝 방법은 분석의 용이성, 예측의 정확성 등으로 타 산업의 에너지 수요 추정에 활발하게 사용되고 있으나 항만에 적용한 사례는 없는 것으로 검토되었다. 다만 앞서 지속적으로 언급한 바와 같이 터미널별 자료 미흡에 따라 장기 추정에 사용할 정도로 충분하게 확보하지 못한 한계점은 있다. 따라서 본 연구는 이러한 한계점 극복을 위해 항만 물동량을 입력변수로 사용한 다변량 시계열 분석을 적용하였다. 본 연구에서 추정된 장기 전력 소비량은 최소 소비량의 관점으로 이해가 필요하다. 그 이유는 수요 추정 방법에서 제시한 바와 같이 완전자동화터미널의 소비 패턴을 기반으로 추정이 타당하나 그 자료 확보 기간이 짧아 반자동화 방식으로 운영되는 부두를 포함한 총 전기 사용량을 기준으로 하였기 때문이다. 전기 에너지 수요 추정에 기반한 공급 여건 분석 결과 향후 대규모 전력공급시설의 추가 확보가 필요할 것으로 검토되었다. 또한 공급 가능한 수준을 넘어설 가능성도 높을 것으로 검토되었다. 본 연구의 장기 전력 소비량이 최소 수준의 소비량임을 감안한다면 향후 전기에너지 부족이 하나의 중요한 과제가 될 것으로 판단한다.

#### 5. 전기에너지 소비 최적화 위한 다양한 전략 활용 가능

부산항 신항의 전기에너지 소비를 줄이고 효과적으로 사용하기 위해 적용 가능한 방안을 제안하였다. 첫째, 에너지 소비를 최적화하기 위한 마이

크로그리드 설치이다. 마이크로그리드는 에너지 소비 자체를 합리적으로 할 수 있게 할 뿐만 아니라 위급상황 발생 시 대처 가능한 무정전 시스템 구축, 전력 저장장치를 활용한 분산전원 구축이 가능하기 때문에 안정적인 항만 운영을 지원할 수 있다. 둘째, 신재생에너지 확대이다. 항만 마이크로그리드와 연계하여 부족한 전력 공급원을 보완하는 역할을 할 수 있다. 셋째, 에너지 고효율 장비의 사용이다. 항만의 전기에너지 소비량에서 하역장비가 차지하는 비중은 항만별로 차이가 있으나 공통적인 점은 가장 큰 비중을 차지한다는 것이다. 따라서 동일한 성능을 지닌 하역장비라도 에너지 효율이 다르기 때문에 도입 시 장비가격을 고려하기보다는 에너지 소비 효율을 고려하여 선택하는 것이 장기적 관점에서 더 합리적이며 타당한 선택이 될 수 있다. 마지막으로 에너지 전환이다. 이는 항만에서 사용되는 모든 에너지원을 대상으로 하는 것으로서 화석에너지를 전기에너지나 친환경 에너지로 전환하는 것을 의미한다. 화석연료를 사용하는 장비와 시설은 기본적으로 더 많은 에너지를 소비하기 때문에 더 적은 에너지를 소비하는 에너지원으로 전환하는 것이 에너지 소비량을 줄이는 방안이다.

## 6. 항만의 에너지 관리 정책 마련이 시급

이상과 같이 본 연구에서는 부산항 신항의 전기에너지를 중심으로 항만의 에너지 관리를 다양하게 검토하였다. 연구 결과의 종합적인 결론은 항만의 에너지 관리의 중요성을 하루빨리 인식하고 관련 정책 마련을 서둘러야 한다는 것이다. 특히 앞으로 수요가 지속적으로 증가할 수밖에 없는 전기에너지 중심의 대책이 필요하다. 항만의 에너지 관리 정책은 에너지 자체의 소비 효율화와 더불어 그 결과로 따라오는 친환경 항만도 동시에 달성할 수 있는 것이다. 전 지구적인 화두이며 중요 과제인 대기오염물질 저감을 위해서도 중요한 정책과제이다. 그러나 항만 분야에서 에너지 관리

---

중요성의 인식 수준은 높지 않다. 예상은 되지만 당장 눈앞의 문제는 아니기 때문이다. 그러나 에너지 부족은 당장의 문제로 다가오게 되면 해결할 수 있는 방안이 많지 않다. 사전에 준비하지 않으면 큰 위협으로 다가올 수 있는 것이다. 이러한 관점에서 항만의 에너지 관리 대책을 시급하게 마련해야 할 것이다.

## 7. 연구의 한계점과 향후 연구 과제

본 연구는 다양한 검토를 수행하고자 하였으나 수행 과정에서 몇 가지 한계점도 도출되었다. 가장 중요한 한계점은 에너지 관련 통계의 절대적 미흡이었다. 에너지 통계가 체계적으로 축적되지 않고 통일적이지도 않으며 수집 기간 단위도 월단위 중심으로 이루어지고 있었다. 그다음으로는 자동화터미널이 확대될 것으로 예상되는 부산항 신항의 전력 소비량 추정에 반자동화 방식의 터미널 자료를 기준으로 분석한 것이다. 이 점 또한 자료 부족에서 기인한 문제이다. 이러한 자료 부족 문제는 한동안 지속될 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 향후 수행해야 할 연구 방향도 다양하게 도출되었다. 첫째, 본 연구에서는 월별 총량 기준으로 접근하였다. 그러나 더욱 실효성 있는 연구를 위해서는 하역장비, 운영건물, 조명, 냉동장치장 등 부문별로 접근되어야 할 것이다. 하나의 터미널을 대상으로 하더라도 부문별로 원단위의 상세 자료를 바탕으로 연구를 수행하면 더욱 합리적인 결론을 도출할 수 있을 것이다. 둘째, 에너지 효율화의 전략별 효과에 관한 실질적 검증이다. 에너지 효율화를 위해 다양한 방식의 적용이 가능하나 이에 따른 효과 검증 연구는 거의 없는 실정이다. 적용 방식별 에너지 절감 효과 분석이 폭넓게 수행되면 어떤 방식이 어떤 항만에 더 나은 적용 방식인지에 관한 정책적 시사점을 확보할 수 있을 것이다. 셋째, 본 연구의 한계를 극복하기 위해 완전자동화 터미널의 에너지 소비 패턴을 기

준으로 분석할 필요가 있다. 이를 통해 장래 부산항 신항의 운영 특성을 정확하게 반영할 필요가 있다.

## 제2절 정책제언

본 연구의 종합적 검토 및 결론에 기반하여 향후 정부와 항만공사 등에서 추진이 필요할 것으로 판단되는 과제와 관련해 제언을 하고자 한다.

### 1. 항만 에너지 관리 계획 수립

항만의 에너지 사용은 중장기적으로 항만을 운영하는 주체 전반에 큰 부담으로 작용할 가능성이 크다. 특히 항만자동화, 디지털화의 가속에 따라 전기에너지 사용에서 부담이 급증할 것으로 예상된다. 이에 해외의 주요 선진 항만에서는 에너지 관리를 정책의 우선순위에 두는 것이다. 또한 항만에서 증가하는 에너지 소비는 단지 항만의 운영 문제일 뿐만 아니라 항만에서 배출되는 대기오염물질을 저감해야 한다는 부분에서 배후지역, 넓게는 국가의 환경정책과도 직결되기 때문이다. 그러나 현재 항만 분야는 중장기 에너지 관리 계획이 없다. 항만기본계획에도 중장기 개발과 운영계획만 있을 뿐 이들 시설을 이용하기 위한 에너지 공급 관련 검토는 없는 상황이다. 다만 항만배후단지 개발을 위한 종합계획 수립에서는 업종별 단위 부하 산출을 통한 장래 수요량과 공급계획을 제시하고 있다. 항만시설이 제 역할을 다하기 위해 가장 기본이 되는 것이 작동을 위한 에너지이며, 국가의 핵심 보호시설인 항만을 안정적으로 운영하기 위한 차원에서도 매

---

우 중요하다. 전 국민의 전력 소비가 해마다 증가하고 있다. 항만의 전력 소비가 증가한다고 다른 부문의 공급을 줄이고 항만에 공급을 늘릴 수 있는 여건이 되지 않는다는 점을 인식할 필요가 있다.

이러한 관점에서 항만의 에너지 관리 계획 수립 제도의 도입이 필요하다. 그러나 우리나라의 경우 항만 부문 최상위 계획인 국가 항만기본계획이 있기 때문에 별도의 관리계획을 수립하는 방식은 적절하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 로드맵 수립에서 제시한 바와 같이 항만 기본계획 수립 시 항만별 중장기 에너지 수요를 추정하고 공급 여건을 분석하는 관리 계획을 포함하는 것을 제안한다. 특히 에너지 소비 규모가 큰 항만은 에너지 관리 체계와 도입 필요 기술을 기본계획에 포함시켜 추진 기반을 확보하는 것도 필요하다. 부산항, 광양항, 인천항 등 주요 컨테이너 항만은 향후 신규 개발 부두를 완전자동화 터미널로 계획하고 있고, 항만 전반에 디지털화 기술을 도입하기 위한 정책을 추진하고 있어 전기에너지의 안정적 공급은 그 무엇보다 우선하여 계획되어야 할 것으로 판단된다. 이를 실현하기 위해서는 「항만법」 개정을 통해 항만기본계획수립 시 필수 사항으로 포함시키는 것이 필요하다. 그러나 현행 「항만법」에서 규정하고 있는 기본계획에 포함하는 사항은 그 범위가 넓기 때문에 별도의 항목으로 규정하는 것은 법률 위계상 타당하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 최적 대안은 「항만법」 제6조 제1항 제9호에서 규정하고 있는 ‘기타 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항’에 에너지 수급계획을 포함하여 규정하는 것이라 판단된다. 이를 통해 중장기 에너지 수급계획이 항만계획의 중요한 정책으로 발전 가능할 것이다.



〈표 6-1〉 「항만법」 제6조(항만기본계획의 내용) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
	① 항만기본계획에는 다음 각 호의 사항이 포함되어야 한다.	(현행과 같음)
내용	1.~8. (생략)	(현행과 같음)
	9. 그 밖에 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항	9. 그 밖에 <b>에너지 수급 계획 등</b> 해양수산부장관이 필요하다고 인정하는 사항

자료: 국가법령정보센터(검색일: 2021. 9. 4)

## 2. 항만 에너지 통계 구축

본 연구 수행에서 가장 어려운 부분은 항만에서 사용하는 에너지 관련 자료의 확보였다. 터미널별 실적 자료의 통일성을 떠나 자료 수집 자체에도 많은 어려움이 있었다. 또한 터미널의 운영 부문별(장비별, 운영건물, 조명, 냉동장치장 등) 실적을 구분하여 집계하는 것도 한계가 있다. 그아 함께 월별 통계만 관리하고 있어 일별, 피크시기 등 분석과 추정이 가능한 의미 있는 자료를 확보하는 것은 불가능하였다. 따라서 항만의 에너지 관리를 위해서 가장 시급히 해야 할 일은 항만 에너지 통계 구축이다.

그러나 에너지 실적 자료는 터미널 운영사에서 제공되어야 한다. 그리고 표준화되어야 한다. 그러나 이 같은 일은 규정화하지 않으면 체계적으로 수집하기가 어렵다. 그와 함께 운영사가 자발적으로 참여하는 것도 기대하기 어려운 현실이다. 따라서 본 연구에서는 〈표 6-2〉와 같이 「항만법」에 ‘항만에너지통합정보체계 구축과 운영’의 신설을 제안한다. 항만을 관리하는 다양한 주체를 포함하여 체계적으로 관련 통계를 구축해야 한다.

〈표 6-2〉 「항만법」 제00조(항만에너지통합정보체계의 구축·운영) 개정(안)

구분	현행	개선(안)
내용	신설	<p>① 해양수산부 장관은 항만 에너지의 효율적 관리·운영 등을 위하여 필요한 경우에는 항만에너지통합정보체계를 구축·운영할 수 있다</p> <p>② 해양수산부 장관은 제1항에 따라 항만에너지통합정보체계를 구축·운영하기 위하여 다른 중앙행정기관, 지방자치단체 및 「공공기관의 운영에 관한 법률」에 따른 공공기관(이하 “공공기관”이라 한다)의 장 및 항만시설운영자에게 필요한 자료 또는 정보의 제공을 요청할 수 있다.</p> <p>③ 해양수산부 장관은 항만에너지통합정보체계를 적절하게 관리할 수 있는 인력 및 조직과 시설·장비를 갖춘 자를 전담기관으로 지정하여 항만건설통합정보체계를 관리·운영하게 할 수 있다.</p>

자료: 저자 작성

또한 이러한 일련의 과정이 자료를 공급하는 주체에게도 이익이 되어야 할 것이다. 즉, 운영사에게 인센티브가 제공되어야 할 것이다. 그러나 금전적 인센티브를 제공하는 것은 타당하지 않을 것이다. 따라서 본 연구에서는 분석 인센티브를 제안하고자 한다. 그간 터미널 운영사가 다양한 자료 요구에 소극적인 이유 중 하나는 제공 이후 피드백이 없다는 점이다. 제공 자료의 분석 결과와 시사점 등이 피드백되어야 자료를 제공한 운영사가 자사 터미널 운영에 활용하여 운영 효율성을 더욱 높일 수 있기 때문에 적극적인 참여가 가능할 것이다. 또한 단순한 자료의 축적만으로 항만 운영의 효율성에 크게 기여하기도 어렵다. 따라서 항만공사 또는 지방청에서는 수집된 자료의 분석과 시사점 도출을 통해 자료를 제공한 운영사에 피드백할 수 있는 체계를 구축해야 한다. 그러나 이는 규정으로 강제하기는 어렵기 때문에 운영 방식의 개선을 통해 이루어져야 할 것이다. 부산항만공사를 예로 보면 매년 발간하는 ‘컨테이너화물 처리 및 수송통계’에 에너지 소비동향을 신설하고 이를 위해 자료를 표준화하고 일단위의 자료를 확보하여

분석 결과를 제공하는 방식이 가능할 것으로 판단된다. 항만공사가 없는 지방청 또는 지자체의 경우에는 항만협회 등을 활용하여 연간 ‘항만 에너지 통계 연감(가칭)’ 등을 작성하는 것도 하나의 대안이 될 수 있을 것이다. 자료를 수집하고 수집한 자료의 분석을 피드백하는 방식은 항만별로 달리 적용 가능할 것이나 에너지 사용 자료 관련 통계를 구축하고 표준화하는 작업은 필수적이며 가장 시급하게 이루어져야 할 것이다.

### 3. 항만 에너지 관리 기술 연구 추진

항만 에너지 관리의 가장 우선적이며 효과적인 수단은 에너지 소비 자체를 효과적으로 줄이는 것이다. 이는 개인이 불필요한 소비를 참고 줄이는 것과는 다르다. 에너지 소비를 최적화하는 관점이다. 이에 해외 항만에서도 마이크로그리드(Micro grid)와 스마트그리드(Smart grid)를 적극적으로 도입하고 있는 것이다. 특히 주요 항만은 24시간 운영체제를 갖추고 있고 국가 경제를 지탱하는 중요한 축을 담당하고 있기 때문에 중단되는 사태가 발생하면 안 된다. 이를 위해 무정전 시스템도 구축하는 것이다.

그러나 우리나라 항만에는 이와 같은 기술 도입과 관련한 검토 또는 연구사업은 추진하고 있지 않다. 마이크로그리드는 앞서 본문에서 제시한 바와 같이 20% 이상의 에너지 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 따라서 부산항 등 운영이 중단되면 국가경제에 큰 영향을 미치는 국내 주요 항만을 대상으로 한 마이크로그리드 연구개발 사업이 추진되어야 한다. 특히 부산항 신항의 경우 부산광역시 제5차 지역 에너지 계획에서도 핵심 추진 과제로 설정하고 있다. 국가 에너지 절감, 친환경 항만 구축, 지역사회의 대기오염물질 저감 등의 정책 목표 실현을 위해서도 필수적으로 추진되어야 할 연구로 판단된다. 따라서 해양수산부 항만국을 중심으로 ‘항만 마이크로그리드 구축 연구개발 사업(가칭)’을 기획연구로 조속하게 추진하고 이

---

후 본 과제로 확대 추진해야 할 것이다. 본 연구개발 사업의 대상항만은 부산항 신항을 시범적으로 추진하고 향후 전국 항만으로 확대하면 사업의 실용성도 확보될 것이다.

#### 4. 신재생에너지 검토 다각화

항만의 에너지 관리를 위한 3대 요소는 관련 자료 확보, 소비 최적화 계획, 신재생에너지 도입으로 판단된다. 그중 신재생에너지는 많은 언급과 도입 중요성이 강조되어 왔으나 실제 다양한 연구 수행은 되지 않고 있다고 할 수 있다. 그 이유는 우리나라의 경우 바람, 태양열 등에서 유럽 등 신재생 에너지 선진국 대비 신재생에너지 발전을 위한 좋은 자연조건을 갖추지 못하고 있기 때문으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 부족한 항만 에너지를 보완하거나 환경을 고려하여 신재생에너지 사용 요구는 지속적으로 확대될 것이다.

항만은 신재생에너지 발전을 위해 부족하지만 육지에 비해 다양한 자원을 보유한 입지적 장점이 있다. 따라서 해상풍력, 해상태양광패널 등의 사업은 현재 추진되고 있다. 그러나 문제점 중 하나는 풍력발전과 태양광발전에 너무 많은 비중을 두고 있다는 것이다. 물론 상대적으로 기술력이 높고 검증된 풍력과 태양광을 활용하는 것은 타당하지만 이러한 종류의 발전만으로는 항만에 충분한 에너지를 공급하기는 어려울 것으로 판단된다. 본 연구에서 개략적으로 추정한 결과에서도 부산항 신항에 계획 중인 태양광 시설을 통해 전체 소비 전력의 약 3% 수준만 충당 가능한 것으로 나타났다. 항만 입지는 풍력과 태양광 외에 파력, 블루수소, 해수열 등 다양한 신재생에너지 발전을 개발하고 실증사업을 추진할 수 있다는 장점이 있다. 방파제 개발 시 파력발전 여건을 검토하여 여건 허용 시 파력발전이 동시에 이루어질 수 있도록 하는 것도 하나의 대안이 될 수 있을 것이다. 또한

선박 이동이 많은 항로 인근에 항주파를 활용한 파력발전도 연구개발 수준을 넘어 실증사업을 추진하여 실용화될 수 있도록 해야 할 것이다. 즉, 항만을 중심으로 적용 가능한 다양한 신재생에너지 발전을 위한 연구개발을 확대해야 한다. 기술개발은 도전이 중요하다. 최근 도전적 연구개발 사업을 추진하는 것도 같은 이유이다. 항만의 장점을 활용할 수 있는 기술이 사장되지 않도록 적극적인 지원이 중요한 부분이다.

## 5. 항만 에너지 관리 중요성 인식

이들 제언이 반영되고 정책화되기 위해서는 타당성보다 항만의 에너지 관리가 매우 중요하다는 인식의 전환이 우선되어야 할 것이다. 그러나 현재 발생하지 않는 문제, 미래에 닥칠 위험에 선제적으로 대응하는 것은 관심은 높지만 실행은 더딘 것이 현실이다. 또한 현재의 여건에서 추진되는 것도 많다. 예를 들면 「항만대기질법」에서 친환경 항만 구축을 위해 AMP 설치를 의무화하고 있으나 그 시기에 관한 내용은 없으며 에너지 공급 여건이 원활하지 않은 경우에는 설치하지 않을 수 있도록 예외 규정을 두고 있다. 일견 합리적인 규정으로 볼 수 있다. 그러나 이는 에너지 공급 여건을 고려하여 AMP를 설치할 것이 아니라 AMP를 설치할 수 있는 에너지 공급 여건을 만드는 것이 더 타당하고 중요할 것으로 판단된다. 이는 친환경 항만으로 가는 바람직한 방향이 아니며 주어진 여건 내에서만 정책화하겠다는 것과 동일하다.

선진 항만에서 에너지 관리를 가장 중요한 정책으로 삼고 추진하는 데는 그 이유가 있다. 우리 항만의 에너지 관리 정책은 아직 늦은 상황은 아니라고 판단한다. 따라서 항만의 에너지 관리 정책의 중요성에 관한 인식의 폭을 넓히고 정책화하기 위한 정부와 항만공사의 노력이 매우 절실한 상황이라 판단된다.



## 참고문헌

### 국내 문헌

- 국토해양부(2008), 『저탄소 항만 구축방안에 관한 연구』.
- 관계부처 합동(2020), 「2050 탄소중립」 추진전략.
- 권혁권·이동규·신민수(2017), 「RNN(Recurrent Neural Network)을 이용한 기업부도 예측모형에서 회계정보의 동적 변화 연구」, 『지능정보연구』, 23(3), pp. 139~153.
- 김근섭·이기열·김보경(2018), 「스마트항만(Smart Port), 전체 물류망을 고려한 로드 맵 수립 필요」, 『KMI 동향분석』, 제74호, p. 7.
- 김도현 외(2019), 「딥러닝 모델 기반 단기 전력수요 예측」, 『전기학회논문지』, 68(9), pp. 1,094~1,099.
- 김미경·홍철의(2016), 「계절 및 날씨 정보를 이용한 인공신경망 기반 전력수요 예측 알고리즘 개발」, 『전자공학학회논문지』, 53(1), pp. 71~78.
- 김민경·박권숙·김세용(2017), 「그린캠퍼스 조성을 위한 건물에너지 효율화에 관한 연구」, 『서울도시연구』, 8,(1), pp. 17~26.
- 김성만(2014), 「마이크로그리드 기술의 적용과 운영사례」, 대한전기협회, 『전기저널』11월호 Special Issues\_4, pp. 37~44.
- 김영수·박호정(2021), 「DNN과 LSTM 활용한 일일 전력수요모델 개발 및 예측」, 『한국 기후변화학회지』, 12(3) , pp. 241~253.

- 
- 김우선·최상희·하태영(2007), 『컨테이너터미널 에너지비용 절감방안 연구』, 한국해양수산개발원 연구보고서 수시연구 2007-03.
- 김종화·최종후·강창완(2019), 「순환신경망 모형을 활용한 시계열 비교예측」, 『Journal of the Korean Data Analysis Society』, 21(4), pp. 1,771~1,779.
- 김태균·김환성(2014), 「우리나라 항만특성에 맞는 그린포트정책 수립에 관한 연구-AHP를 이용한 울산항 그린포트 정책 우선순위 개발」, 『한국항해항만학회지』, 38(5), pp. 549~559.
- 김한솔 외(2016), 「RNN-LSTM 기반 공휴일 정보를 고려한 단기 전력수요예측」, 『대한전자공학회 학술대회』, pp. 552~555.
- 노영훈·장영태(2015), 『인천항 육상하역 작업에 따른 온실가스 및 유해가스 발생 추정』, 『한국항만경제학회지』, 31(4), pp. 133~150.
- 문지훈·박성우·황인준(2019), 「효과적인 결측치 보완을 통한 다층 퍼셉트론 기반의 전력수요 예측 기법」, 한국정보처리학회, 『소프트웨어 및 데이터 공학』 8(2), pp. 67~78.
- 박경미·김재희(2019), 「주거용 건물의 전력 사용량에 대한 시계열 분석 및 예측」, 『응용통계연구』, 32(3), pp. 405~421.
- 박민용·김명진(1995), 「호텔용 건물의 에너지 평가방법에 의한 에너지 소비량 추정」, 『대한건축학회 논문집』, 11(7), pp. 161~168.
- 부산광역시(2018), 『제5차 지역에너지 계획』
- \_\_\_\_\_(2010)『항만물류시설, 선박, 컨테이너 수송차량 등에 대한 온실가스 감축방안 연구』
- 부산발전연구원(2017), 『부산지역 신재생 에너지 확대방안』
- 신동하·김창복(2018), 「RNN-LSTM을 이용한 태양광 발전량 단기 예측 모델」, 『한국항해학회 논문지』, 22(3), pp. 233~239.
- 신동하·최광호·김창복(2017), 「RNN과 LSTM을 이용한 주가 예측을 향상을 위한 딥러닝 모델」, 『한국정보기술학회 논문지』, 15(10), pp. 9~16.
- 안병훈·최희련·이흥철(2015), 「계절 ARIMA 모형을 이용한 국내 지역별 전력사용량 중장기수요예측」, 『한국산학기술학회 논문지』 16(12), pp. 8576~8584.



- 양의석·임지영(2019), 「일본 2018년 에너지수급 변화 및 2019년 정책 현안」, 에너지경제연구원, 『세계 에너지시장 인사이트』 19(7), pp. 3~17.
- 에너지경제연구원(2004), 『지역에너지 통계연보 2003』
- \_\_\_\_\_(2005), 『지역에너지 통계연보 2004』
- \_\_\_\_\_(2006), 『지역에너지 통계연보 2005』
- \_\_\_\_\_(2007), 『지역에너지 통계연보 2006』
- \_\_\_\_\_(2008), 『지역에너지 통계연보 2007』
- \_\_\_\_\_(2009), 『지역에너지 통계연보 2008』
- \_\_\_\_\_(2010), 『지역에너지 통계연보 2009』
- \_\_\_\_\_(2011), 『지역에너지 통계연보 2010』
- \_\_\_\_\_(2012), 『지역에너지 통계연보 2011』
- \_\_\_\_\_(2013), 『지역에너지 통계연보 2012』
- \_\_\_\_\_(2014), 『지역에너지 통계연보 2013』
- \_\_\_\_\_(2015), 『지역에너지 통계연보 2014』
- \_\_\_\_\_(2016), 『지역에너지 통계연보 2015』
- \_\_\_\_\_(2017), 『지역에너지 통계연보 2016』
- \_\_\_\_\_(2020), 「2020년 상반기 코로나19에 따른 에너지산업의 영향」, 『에너지 현안 브리프』
- 염찬욱·곽근창(2018), 「LSTM 순환신경망을 이용한 단기전력 가격 예측」, 『Proceedings of KIIT Conference』, pp. 16~18.
- 원두환(2012), 「고령화가 가정부문 에너지 소비량에 미치는 영향 분석: 전력수요를 중심으로」, 『자원환경경제연구』 21(2), pp. 341~369.
- 윤종상·한세현·정용원(2009), 「국내 항만하역장비에서의 대기오염물질 배출량 산정」, 『한국대기환경학회 학술대회논문집』, pp. 520~521.
- 이강희·류승훈·이은택(2009), 「공동주택의 건물외부조건과 에너지비용과의 관계 분석」, 『KIEAE Journal』, 9(1), pp. 107~113.

- 
- 이용준·선종완·이민재(2019), 「도로포장의 유지관리 계획 수립을 위한 딥러닝 기반 열화 예측 모델 개발」, 『한국건설관리학회 논문집』, 20(6), pp. 34~43.
- 이원규 외(2016), 「LSTM을 이용한 전력 데이터 예측」, 『한국정보과학회 학술발표논문집』, pp. 693~695.
- 이정재·김승희·김환용(2014), 「부산광역시 업무시설 규모별 전력원단위 작성에 관한 연구」, 『한국건축친환경설비학회 논문집』 8(4), pp. 167~173.
- 이정현 외(2019), 「V2G 환경의 전력 수급 의사결정 지원을 위한 SARIMA기법과 LSTM 기법의 전력사용량 1일 예측 연구」, 『한국데이터정보과학회지』, 30(4), pp. 779~795.
- 이종원(2018), 「딥 러닝 모델 최적화 기반 순차 데이터 예측 시스템」, 배재대학교 대학원 대학원 박사학위 논문.
- 이종필 외(2019), 「해상풍력클러스터 조성을 위한 항만 및 배후단지 활용방안 연구」, 한국해양수산개발원, 『KMI 현안연구』 제29호.
- 이해성·이병성·안현(2020), 「EV 충전소의 일별 최대전력부하 예측을 위한 LSTM 신경망 모델」, 『인터넷정보학회논문지』, 21(5), pp. 119~127.
- 정영선·정해권(2016), 「국내 건축물의 에너지 원단위 산출 및 장기변화 연구」, 『대한건축학회』, 32(6), pp. 97~104.
- 정혜린·임창원(2019), 「인공지능 기반 수요예측 기법의 리뷰」, 『응용통계연구』, 32(6), pp. 795~835.
- 정태원(2018), 「스마트항만의 선진사례 분석과 시사점」, 『해양물류연구』, 34(4)(통권 100호), pp. 489~540.
- 조성재 외(2020), 「DNN과 LSTM 기반의 대기질 예측 모델 성능 비교 연구」, 『한국정보처리학회 학술발표대회』, pp. 577~579.
- 조진행(2019), 「울산항의 녹색물류체계 구축 방안」, 『한국항만경제학회지』, 35(4), pp. 187~206.
- 차성재·강정석(2018), 「딥러닝 시계열 알고리즘 적용한 기업부도예측모형 유용성 검증」, 『지능정보연구』, 24(4), pp. 1~32.
- 최상진 외(2016), 「항만의 온실가스 배출량 산정 및 공간할당 방법에 관한 연구」, 『한국기후변화학회지』, 7(3), pp. 289~297.

- 탁해성 외(2016) 「지역 기상 정보를 활용한 단기 전력 수요 예측 모델」, 『한국콘텐츠학회논문지』, 16(11), pp. 488~498.
- 최용석·김우선·손호성(2008), 「컨테이너터미널의 하역시스템 분석을 통한 에너지 비용 절감 모델 수립」, 『한국항해항만학회 학술대회 논문집』, pp.135~136.
- 최훈(2021), 「빅데이터를 활용한 인공지능 주식 예측 분석」, 『한국정보통신학회논문지』, 25(10), pp. 1435~1440.
- 한국전력공사(2021a), 『기본공급약관』
- \_\_\_\_\_ (2021b), 『제90호(2020년) 한국전력통계』
- 한국해양수산개발원(2009), 『우리나라 항만 및 배후물류단지의 친환경 물류체계 구축에 관한 연구』
- \_\_\_\_\_ (2018), 「스마트항만(Smart Port), 전체 물류망을 고려한 로드맵 수립 필요」, 한국해양수산개발원, 『KMI 동향분석』, 74, pp. 1~17.
- \_\_\_\_\_ (2021) 『2020년 품목별 항만물동량 예측보고서』
- 해양수산부(2017), 『제3차 항만배후단지개발 종합계획』
- \_\_\_\_\_ (2019), 『항만 육상전원공급설비 구축 기본계획 수립 용역』
- \_\_\_\_\_ (2020), 『제4차(‘21~’30) 전국 항만기본계획(무역항)』
- \_\_\_\_\_ (2021), 『제4차(‘21~’30) 전국 무역항 기본계획 보고서(부산항)』

## 국외 문헌

- Acciaro M. *et al*(2014a), “Environmental sustainability in seaports: a framework for successful innovation”, *Maritime Policy & Management*, 41(5), pp. 480-500
- Acciaro M., H. Ghiara, & M. Cusano(2014b), Energy management in seaports: A new role for port authorities, *Energy Policy*, 71, pp. 4-12.
- Alamouh A. S. , F. Ballini, & A. I. Ölçer(2020), “Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review”, *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 160, 111508.

- 
- Bjerkkan, K. Y. & H. Seter(2019), "Reviewing tools and technologies for sustainable ports: Does research enable decision making in ports?", *Transportation Research Part D*, 72, pp. 243-260.
- Chae, Y.T. *et al*(2016), "Artificial neural network model for forecasting sub-hourly electricity usage in commercial buildings", *Energy and Buildings*, 111(1), pp. 184-194.
- Chang, Young-Tae(2013), "Environmental efficiency of ports: a Data Envelopment Analysis approach", *Maritime Policy & Management*, 40(5), pp. 467-478.
- Colarossi. D. & P. Principi(2020), "Technical analysis and economic evaluation of a complex shore-to-ship power supply system", *Applied Thermal Engineering*, 181, 115988, 재인용: Secretariat UNCTAD(2016), "Review of maritime transport. United nations conference on trade and development", pp.15.
- Darbra, R. M. *et al*(2004), "The Self Diagnosis Method A new methodology to assess environmental management in sea ports", *Marine Pollution Bulletin*, 48, pp.420-428.
- Deng, S. M. & J. Burnett(2000), "A study of energy performance of hotel buildings in Hong Kong", *Energy and Buildings*, 31(1), pp. 7-12.
- DP World(2021), "ANNUAL REPORT & ACCOUNTS 2020"
- Duin J. H. R. *et al*.(2018), "Cooling down: A simulation approach to reduce energy peaks of reefers at terminals", *Journal of Cleaner Production*, 193, pp.72-86.
- Eleftherios S. *et al*(2019), "Energy Eciency in European Ports: State-Of-Practice and Insights on the Way Forward", *Sustainability*, 11, 4952.
- ESPO(2020), "Environmental Report."
- European Commission(2014), "Green technologies and eco-efficient alternatives for cranes & operations at port container terminals"
- Geerlings, H. &R. Van Duin(2011), "A new method for assessing CO2-emissions from container terminals: a promising approach applied in Rotterdam", *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7), pp. 657-666.

- Geerlings, H., R. Heij & R. Van Duin(2018), "Opportunities for peak shaving the energy demand of ship-to-shore quay cranes at container terminals". *Journal of Shipping and Trade*, 3(1), pp. 1-20.
- Haibo, L., L. Wen & S. Xiaowei(2019), "Study on Port Energy Consumption Inventory and Monitoring Technology", 2019 5th International Conference on Transportation Information and Safety, pp. 298-302.
- He J., Y. Huang & W. Yan(2015), "Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption", *Advanced Engineering Informatics*, 29(1), pp. 59-75.
- Hu S.C., J.D. Chen & Y.K(2004). "Chuah, Energy Cost and Consumption in a Large Acute Hospital", *International Journal on Architectural Science*, 5(1), pp. 11-19.
- Iris, C. & J. S. L. Lam(2019), "A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, pp. 170-182.
- Iris, C. & J. S. L. Lam(2021), "Optimal energy management and operations planning in seaports with smart grid while harnessing renewable energy under uncertainty". *Omega*, 103, 102445.
- Isikli, E. *et al*(2020), "Estimating fuel consumption in maritime transport", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 275, 124142.
- JA A. H., S. Cho, & M. Pak(2012), "Fuel Consumption within Cargo Operations at the Port Industry-A simulation Analysis on the Case of S Port Company in the UK", *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 28(2), pp. 227-254.
- Kim, S. M. & S. K. Sul(2006), "Control of rubber tyred gantry crane with energy storage based on supercapacitor bank." *IEEE transactions on power electronics* 21.5, pp.1420-1427.
- Lam J.C. *et al*(2008), Principal component analysis of electricity use in office buildings, *Energy and Buildings*, 40(5), pp. 828-836.
- Lynham, J. *et al*(2016), "Why does real-time information reduce energy consumption?", *Energy Economics*, 54, pp. 173-181.

- 
- Martínez-Moya, J.,B. Vazquez-Paja & J. A. G. Maldonado(2019), “Energy efficiency and CO2 emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia”, *Energy Policy*, 131, pp. 312-319.
- Miswan, N. H., R. M. Said & S.H.H. Anuar(2016), “ARIMA with regression model in modelling electricity load demand”, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 8(12), pp. 113-116.
- Molavi A, G. J. Lim, & B. Race(2019) , “A framework for building a smart port and smart port index”, *International Journal of Sustainable Transportation*, 14, pp. 686-700.
- Molavi A. *et al*(2020), “Enabling smart ports through the integration of microgrids: A two-stage stochastic programming approach”, *Applied Energy*, Vol. 258, 114022.
- Neto, A.H. & F.A.S. Fiorelli(2008), “Comparison between detailed model simulation and artificial neural network for forecasting building energy consumption”. *Energy and Buildings*, 40(12), pp. 2169-2176.
- Paterakis, N. G. *et al*(2017), “Deep learning versus traditional machine learning methods for aggregated energy demand prediction”, 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe.
- Peng, Y. *et al*(2020), “Machine learning method for energy consumption prediction of ships in port considering green ports”, *Journal of Cleaner Production*, 264.
- Port of Long Beach(2018), “Port of Long Beach Microgrid — Resilience for Critical Facilities”.
- Puig M. *et al*(2020), “Performance trends of environmental management in European ports”, *Marine Pollution Bulletin*, 160, 111686.
- QINGDAO PORT INTERNATIONAL(2020), “2019 Sustainable Development Report”  
\_\_\_\_\_(2021), “2020 Sustainable Development Report”
- Robinson, C. *et al*(2017), “Machine learning approaches for estimating commercial building energy consumption”, *Applied Energy*, 208, pp. 889-904.
- Roy, A. *et al*(2020), “Design, Sizing, and Energy Management of Microgrids in Harbor

- Areas: A Review". *Energies*, 3(20).
- Sak, H., A. Senior & F. Beaufays,(2014). "Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling". *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH*. pp. 338-342.
- SIEMENS(2017), "*Smart Ports: Competitive Cities*"
- Sifakis N. & T. Tsoutsos(2021), "Planning zero-emissions ports through the nearly zero energy port concept", *Journal of Cleaner Production*, 286, 125448.
- SIPG(2010), "2009 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2012), "2011 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2014), "2013 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2015), "2014 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2017), "2016 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2018), "2017 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2019), "2018 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2020), "2019 Sustainable Development Report"
- \_\_\_\_\_(2021), "2020 Sustainable Development Report"
- Somu, N., M. R. G. Raman, & K. Ramamritham(2021), "A deep learning framework for building energy consumption forecast", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137.
- Song T. *et al*(2020), "Integrated port energy system considering integrated demand response and energy interconnection", *Electrical Power and Energy Systems*, 117, 105654.
- Tie, L. *et al*(2019), "Joint Optimization Dispatching for Hybrid Power System Based on Deep Reinforcement Learning", 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection.
- Uyanik, T., C. Karatug, & Y. Arslanoglu(2020), "Machine learning approach to ship fuel consumption: A case of container vessel", *Transportation Research*

---

*Part D: Transport and Environment*, 84.

Wang L. *et al*(2020), “Green efficiency evaluation and improvement of Chinese ports: A cross-efficiency model”, *Transportation Research Part D*, 88, 102590.

Wilmsmeier Gordon(2016), *Energy consumption and container terminal efficiency*, UNECLAC.

Wilmsmeier. G. *et al*(2014), “Energy Consumption and Efficiency: Emerging Challenges from Reefer Trade in South American Container Terminals”, UNECLAC.

World Bank(2020), “ACCELERATING DIGITALIZATION Critical Actions to Strengthen the Resilience of the Maritime Supply Chain”

Yang, Y. C. & C. L. Lin(2013), “Performance analysis of cargo-handling equipment from a green container terminal perspective”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, pp. 9-11.

Yuan, J. & V. Nian(2018), “Ship Energy Consumption Prediction with Gaussian Process Metamodel”, *Energy Procedia*, 152, pp. 655-660.

Zhao, N. *et al*(2014), “Hybrid power-train for port crane energy recovery”.*IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*.

李宗良(2016), 「节能减排技术在港口RTG中的应用」, 『中国水运』, 16(7), pp.97~98.

環境省(2020), 『エネルギー対策特別会計補助事業活用事例集(2019年度)』, pp.71~74.

横浜港・川崎港カーボンニュートラルレポート検討会(2021), 『横浜港・川崎港におけるカーボンニュートラルレポート形成に向けた方向性参考資料』

## 인터넷 자료

---

국가에너지통계종합정보시스템, [http://www.kesis.net/sub/subChart.jsp?report\\_id=33150&reportType=0](http://www.kesis.net/sub/subChart.jsp?report_id=33150&reportType=0)(검색일: 2021. 8. 30.)



- 물류신문(2018. 7. 18), 「Part 3. 해외의 주요 스마트항 개발 사례」, <http://www.klnews.co.kr/news/articleView.html?idxno=117885>(검색일: 2021. 6. 4.)
- 배출권시장 정보플랫폼, 시세조회, <https://ets.krx.co.kr/contents/ETS/03/03010000/ETS03010000.jsp>(검색일: 2021. 9. 2.)
- 산업통상자원부 보도자료(2021. 8. 4.), 「태양광발전의 여름철 전력수급 기여 현황」, <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156464821>(검색일: 2021. 8. 30.)
- 솔라컨넥트, 「2020년 태양광 발전시간 분석-(1) 월별·계절별 발전시간」, <https://www.solarconnect.kr/insight/biz-development/4931>(검색일: 2021. 8. 20.)
- 에너지경제연구원, [http://www.keei.re.kr/web\\_keei/pendingissue.nsf/0/61DA9137031A7B284925825300827C8A/\\$file/32\\_%EC%9D%BC%EB%B3%B8.pdf](http://www.keei.re.kr/web_keei/pendingissue.nsf/0/61DA9137031A7B284925825300827C8A/$file/32_%EC%9D%BC%EB%B3%B8.pdf)(검색일: 2021. 4. 28.)
- 전력통계정보시스템, <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkmaUpsBftChart.do?menuId=040701>(검색일: 2021. 9. 2.)
- \_\_\_\_\_, <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/selectEkgeGepGbaChart.do?menuId=060104>(검색일: 2021. 8. 30.)
- 한국전력공사 보도자료(2018. 11. 18), 「한전, 미래형 마이크로그리드로 에너지신사업 선도」(검색일: 2021. 9. 2.)
- 해운항만물류정보시스템, <https://new.portmis.go.kr/portmis/websquare/websquare.jsp?w2xPath=/portmis/w2/main/index.xml&page=/portmis/w2/cm/sys/UI-PM-MT-001-021.xml&menuId=0045&menuCd=M4735&menuNm=%BB%E7%C0%CC%C6%AE%B8%CA>(검색일: 2021. 9. 2.)
- ASE(2018. 4. 20.), 「Seaports Need A Lot Of Energy, But Electrification Can Reduce Pollution And Costs」, <https://www.ase.org/blog/seaports-need-lot-energy-electrification-can-reduce-pollution-and-costs>(검색일: 2021. 5. 10.)
- CATAPULT, 「Smart energy technologies to be piloted at Portsmouth International Port」, <https://es.catapult.org.uk/news/smart-energy-technologies-portsmouth/>(검색일: 2021. 5. 10.)
- City of Yokohama(a), 「Energy efficiency」, <https://www.city.yokohama.lg.jp/lang/overseas/port/kankyo/20180227153007.html>(검색일: 2021. 5. 27.)

- 
- City of Yokohama(b), 「横浜港におけるグリーン物流の推進」, <https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/yokohamashi/yokohamako/kkihon/kankyo/green2.html>(검색일: 2021. 5. 27.)
- City of Yokohama(c), 「水素エネルギーの利活用」, <https://www.city.yokohama.lg.jp/city-info/yokohamashi/yokohamako/kkihon/kankyo/suiso.html>  
(검색일: 2021. 5. 27.)
- EcoPorts, <https://www.ecoports.com/sdm> (검색일: 2021. 5. 10.)
- Energy Efficiency Programme Office, <https://www.e2singapore.gov.sg/home#>  
(검색일: 2021. 5. 28.)
- Energy Market Authority, 「EMA-PSA Partnership」, <https://www.ema.gov.sg/ema-psa-partnership.aspx>(검색일: 2021. 5. 28.)
- European Commission, [https://ec.europa.eu/info/index\\_en](https://ec.europa.eu/info/index_en)(검색일: 2021. 5. 10)
- GREENPORT, 「GETTING ENERGY SAVVY WITH MICROGRIDS」, [https://issuu.com/mercatormedia/docs/\\_greenport\\_32\\_pages\\_summer\\_2020\\_hi-res\\_digital](https://issuu.com/mercatormedia/docs/_greenport_32_pages_summer_2020_hi-res_digital)  
(검색일: 2021. 5. 17.)
- GTM(2020. 3. 10.), 「California Ports Turn to Microgrids for Energy Security, Demand Flexibility」<https://www.greentechmedia.com/articles/read/california-ports-turning-to-microgrids-for-energy-security-demand-flexibility>  
(검색일: 2021. 5. 10.)
- HelloT(2014. 4. 25.), 「독립형 마이크로그리드 설계 및 제어기술 개발」. <https://www.hellot.net/news/article.html?no=18438>(검색일: 2021. 8. 20.)
- Ledsmagazine(2017. 8. 23.), 「Dutch port taps smart street lighting, with IoT on the horizon」, <https://www.ledsmagazine.com/smart-lighting-iot/article/16700555/dutch-port-taps-smart-street-lighting-with-iot-on-the-horizon>  
(검색일: 2021. 5. 10.)
- Microgridknowledge(a), 「Port of Los Angeles Microgrid Project Nears Finish Line」, <https://microgridknowledge.com/microgrid-port-of-los-angeles/>  
(검색일: 2021. 5. 17.)
- Microgridknowledge(b), 「Solar Microgrid to ‘Green’ North America’s Largest Port」, <https://microgridknowledge.com/solar-microgrid/>(검색일: 2021. 5. 17.)

- Microgridknowledge(c), 「Port of San Diego to Demonstrate How Microgrids Benefit Ports Worldwide」, <https://microgridknowledge.com/microgrids-benefit-ports-san-diego/>(검색일: 2021. 5. 17.)
- MPA, 「Maritime Singapore Green Initiative」, <https://www.mpa.gov.sg/web/portal/home/maritime-singapore/green-efforts/maritime-singapore-green-initiative>(검색일: 2021. 5. 28.)
- Marine Insight(2017. 11. 1.), <https://www.marineinsight.com/shipping-news/aurecon-industry-collaboration-needed-carbon-mitigation-ports/>(검색일: 2021.4.28.)
- NTU(2018. 9. 8.), 「Jurong Port and SP Group to testbed AI-powered energy management system」, <https://www.ntu.edu.sg/news/detail/ntu-jurong-port-and-sp-group-to-testbed-ai-powered-energy-management-system>(검색일: 2021. 5. 28.)
- Noren C. and J. Pyrko, 「Using Multiple Regression Analysis to Develop Electricity Consumption Indicators for Public Schools」, <https://www.aceee.org/files/proceedings/1998/data/papers/0321.PDF>(검색일: 2021. 5. 17.)
- PIP(2021. 1. 8.), 「SOLAR AND BATTERY FIRST TO HELP POWER THE PORT」, <https://www.portsmouth-port.co.uk/news/solar-and-battery-first-to-help-power-the-port>(검색일: 2021. 5. 24.)
- Port of San Diego, <https://www.portofsandiego.org/environment/energy-sustainability/energy>(검색일: 2021. 5. 17.)
- SmartPort, <https://smartport.nl/en/roadmaps-projects/smart-energy-industry/>(검색일: 2021. 5. 10.)
- TensorFlow, 「시계열 예측」[https://www.tensorflow.org/tutorials/structured\\_data/time\\_series?hl=ko](https://www.tensorflow.org/tutorials/structured_data/time_series?hl=ko) (검색일: 2021. 8. 24.)
- The United Arab Emirates' Government portal, <https://u.ae/en/information-and-services/environment-and-energy/water-and-energy/energy-efficiency>(검색일: 2021. 5. 28.)
- 新华社, 「中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要」, [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)(검색일: 2021. 4. 28.)

---

上海市交通运输和港口管理局, 「关于印发《上海港“资源节约型、环境友好型”港口建设指导意见》的通知」, [https://www.chinaacc.com/new/63\\_73\\_201201/11ya611234856.shtml](https://www.chinaacc.com/new/63_73_201201/11ya611234856.shtml)(검색일: 2021. 4. 28.)

深圳市人民政府关于印发, 「深圳市人民政府关于印发《深圳市绿色低碳港口建设五年行动方案(2016—2020年)》的通知」, [http://www.sz.gov.cn/zwgk/zfxxgk/zfwj/szfh/content/post\\_6577473.html](http://www.sz.gov.cn/zwgk/zfxxgk/zfwj/szfh/content/post_6577473.html)(검색일: 2021. 4. 28.)

中国港口网(2019. 7. 8), 「深圳港绿色港口发展建设之路」, <http://www.chinaports.com/portlspnews/919>(검색일: 2021. 4. 28.)

盐田港, 「2019年度深圳市盐田港集团有限公司社会责任报告」, <http://www.ytport.com/jtgk/jtshzrbg/>(검색일: 2021. 4. 28.)

環境省(2012. 7. 12.), 「災害等非常時にも効果的な港湾地域低炭素化推進事業(実証事業)の公募開始について(お知らせ)」, <https://www.env.go.jp/press/15466.html>(검색일: 2021. 5. 27.)

国家能源局, 「国家发展改革委 国家能源局关于印发新能源微电网示范项目名单的通知」, [http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201705/t20170511\\_2789.htm](http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201705/t20170511_2789.htm)(검색일: 2021.4.28.)

## 법령 자료

---

「항만법」, (2020. 12. 8., 법률 제17620호).

# 기본연구보고서 발간목록

## Ⅰ 2021년

01	시민참여형 해안돌봄 정책 도입방안 연구	정치호
02	해양 플라스틱 쓰레기가 선박 운항에 미치는 영향분석 연구	김보람
03	여성어업인 노동정책 방향 연구	홍혜수
04	순환경제 시스템을 활용한 어업폐기물의 자원화 방안 연구	고동훈
05	1conomy 시대, HMR 시장 확대에 따른 수산부문 대응전략 수립 연구	마창모
06	AIS 데이터 기반 해상교통 안전 평가모델 개발 연구	황선일
07	항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구 - 부산항 신항 전기에너지 소비를 중심으로 -	김근섭
08	해양분야 리빙랩 활성화 방안 연구	좌미라
09	빅데이터의 연계·활용을 통한 선박의 배출량 산정체계 고도화 방안 연구	안용성
10	해양공간계획 집행체계 고도화 방안 연구	최희정
11	수산식품산업 푸드테크 환경분석 및 적용전략 연구	이상건
12	AIS데이터기반 해상물동량 추정 연구	황수진
13	항만부문 정책의사결정 지원 빅데이터 플랫폼 구축 방안 연구	이기열
14	항만 컨테이너 물류 프로세스 디지털화 모형 연구	서정용
15	해양수산 분야 국제산업연관표 구축기반 연구	정수빈
16	해양수산 과학기술 정책평가모형 연구 - 해양수산 R&D를 중심으로 -	전형모
17	글로벌 경제위기와 해운산업 대응체계 연구	박성화
18	항만산업 경기진단체계 구축 연구 - 경기동행지수 개발을 중심으로 -	김성아
19	전국 무역항 부두 분류 체계 개선방안 연구	이수영
20	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해사산업의 육성 및 지원을 위한 법제화 연구(5차년도) -	박한선
21	수소에너지 거점 구축을 위한 항만의 대응방안 연구	신수용

## 2020년

01	해양수산업의 지역 간 연관구조 분석	장정인
02	해양수산 분야 기술 대외의존도 분석연구 - 스마트항만을 중심으로 -	전형모
03	지역 해양수산 오픈 플랫폼 구축방안 연구	최지연
04	갯벌 거버넌스 개선방안에 관한 연구	육근형
05	해양환경정책의 능동적 추진을 위한 재원체계 개선 방안 연구	박수진
06	항만 대기환경 관리 표준 및 평가모형 연구	안용성
07	해양수산분야 사회문제해결형 R&D 기반 구축 연구	좌미라
08	해양 유입 하천쓰레기 관리체계 개선방안	이윤정
09	수산식품 품질·안전관리 제도 개선방안 연구	이헌동
10	국제법 변화에 대응한 어선원 안전 및 권리 제고방안 연구	한덕훈
11	스마트 양식 클러스터 추진 방안 수립 연구	이상철
12	해양포유류 보호에 관한 수산업 대응 방안 연구	정명화
13	수산물 수급통계 개선 방안 연구	김수현
14	IMO 온실가스 규제 대응 정책방향 연구	박한선
15	퇴직전문가 활용을 통한 해운업 경쟁력 강화방안 연구	안영균
16	글로벌 선사들의 물류통합화 전략에 대한 국적선사의 대응방안	전형진
17	내항여객운송항로 정책 발전방안 연구	김태일
18	블록체인 기술기반 식품콜드체인 체계 구축 연구	조지성
19	항만자동화 도입 관련 노무 갈등 해소 방안 연구	김찬호
20	스마트항만과 스마트도시 연계 발전 방안 연구	이연경
21	항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구	김성기
22	IMO 규제기반 해수산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 新해수산업의경제적파급효과분석연구(4차년도) -	박한선
23	국내 항만연계 산업의 가치사슬 및 공급사슬 연계성 강화방안 - 자동차 산업을 중심으로	신수용

# 수시연구보고서 발간목록

## Ⅰ 2021년

01	해양환경산업 육성 방안 연구	한기원
02	선원의 인권 및 근로조건 향상을 위한 선원근로감독관 제도 개선 방안 연구	허성례
03	포스트 코로나 시대를 대비하는 지역 해양축제 활성화 연구	최일선
04	회복탄력성 개념을 적용한 항만 위기관리 시스템 구축 연구	김성기
05	중대재해처벌법 시행에 따른 항만에서의 대응방안 연구	최상균
06	크루즈산업 COVID-19 방역체계 구축방안 연구	황진희
07	한국형 선주사의 최적 운영방안 연구	고병욱
08	어촌형 생활서비스 전달체계 개선 연구	이호림
09	원양산업의 ESG 도입 기초 연구	윤미경
10	수상레저활동 관리체계 개선방안 연구	홍장원
11	연안지역 자연성 회복을 위한 정책 방향_간척지·담수호 중심으로	정지호
12	스마트항만 구축에 따른 탄소저감 효과 연구 - 동력전환을 중심으로 -	김가현

## Ⅰ 2020년

01	포스트 코로나 19 해양수산 분야 정책방안	박광서
02	생분해성 어구 사용 활성화 방안 연구	심성현
03	해양법 전문인력 양성 방안 연구	박영길
04	무인도서 해양주권 강화와 이용 활성화를 위한 제도 개선방안	정지호
05	지역 해양수산 재정분권 대응방향	황재희
06	데이터 3법 개정에 따른 항만·물류 데이터 활용도 제고 방안	이기열
07	양식 활어 유통 효율화 방안 연구	마창모
08	해양레저관광사업 추진을 위한 제도정비 방안	홍장원
09	해양바이오기업의 규제 정비 방안 연구	최석문
10	비상체제 시 선원의 안전을 위한 선박-항만-항공 이동경로 구축방안	이혜진

# 일반연구보고서 발간목록

## Ⅰ 2021년

01	해양수산 정책영향평가를 위한 기초 연구	김주현
02	해양교육의 사회·경제적 가치 평가 연구	이슬기
03	해양수산업 경기진단체계 기초연구 - 해운업을 중심으로	권장한
04	선박 기술진보를 고려한 탄소 배출량 추정 연구	최건우
05	서포트벡터머신(SVM) 기법을 활용한 해운시황 예측 연구	김병주
06	크루즈 여객 수요 전망 모형 구축 연구	안승현
07	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅲ)	서정용
08	수출용 전복의 유통경로 분석 연구	이정필
09	인공지능기반 해상운임 예측 연구(3차년도)	황수진
10	인공신경망모형을 이용한 양식수산물 단수 전망에 관한 연구 - 김 양식을 중심으로 -	천성훈
11	해양수산분야 미래 리스크 발굴 및 파급효과 분석 연구	박광서

## Ⅰ 2020년

01	지역 해양관광 경쟁력 지수 체계화 연구	최일선
02	AIS 기반 글로벌 선박 배기가스 배출량 분석 연구	강무홍
03	김 중기 수급전망모형 「Gim-MFoS」 구축 연구	허수진
04	중앙 북극 공해 비규제어업방지협정 이행방안 연구	김민수
05	동해 평화관광구역 조성 방안 연구	윤인주
06	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅱ) - 일반 수출입 컨테이너 정보교환방식 중심 -	이연경
07	스트레스 테스트를 통한 우리나라 해운·조선 기업의 안정성 분석	박성화
08	인공지능기반 해상운임예측 연구	황수진
09	국제물류주산업 실태분석 및 경쟁력 제고 방향 연구	최나영환
10	디지털화에 따른 개별 직업의 대체 가능성 추정 연구	박희대
11	시계열 분석을 통한 해운시장 분석 및 예측 연구	고병욱
12	해양수산분야 글로벌 경제효과 분석모형(KMI-GEM) 시범 구축 연구	임병호
13	해운항만물류 인력양성사업 관리운영 제도 개선 방안 연구	이자연



기본연구 2021-07

## 항만 에너지 관리시스템 도입을 위한 로드맵 구축 연구

---

인쇄 2021년 12월 29일

발행 2021년 12월 31일

발행인 김 종 덕

발행처 한국해양수산개발원

주소 49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연락처 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등록 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 효민디앤피 (051-807-5100)

---

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel: 02-394-0337

정가 15,000원