

항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구

A Study on the Measurement Model for the Port Resilience

김성기 • 김찬호 • 김가현 • 김성아

2020. 12.



한국해양수산개발원
KOREA MARITIME INSTITUTE

저자

김성기, 김찬호, 김가현, 김성아

연구진

연구책임자 김성기 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
공동연구원 김찬호 한국해양수산개발원 항만연구본부 부연구위원
공동연구원 김가현 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원
공동연구원 김성아 한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원

연구기간

2020. 1. 1. ~ 2020. 10. 31.

보고서 집필내역

연구책임자

김성기 연구총괄, 제1장, 제2장 제1절~제2절, 제3절 일부, 제3장 제3절
일부, 제4절, 제4장 제1절~제3절, 제4절 일부, 제5장, 제6장 제1절,
제2절 일부

내부연구진

김찬호 제1장 제1절, 제2장 제3절 일부, 제4장 제4절 일부, 제6장 제2절
일부
김가현 제3장 제1절, 제3절 일부
김성아 제3장 제2절

산·학·연·정 연구자문위원

정문원 Cleveland State University 교수
여기태 인천대학교 교수
우종균 동명대학교 교수
이만영 해양수산부 사무관

※ 순서는 산·학·연·정 순임

발간사

최근 들어 항만을 위협하는 요인들이 증가하고 있다. 태풍, 지진 등과 같은 자연재해, 선박 충돌, 노조 파업 등과 같은 인적 재해가 전통적인 위협 요인이었다면 최근에는 항만의 운영 시스템이 고도화되면서 이에 대한 사이버 테러가 대두되고 있는 상황이며, 2020년에 가장 큰 이슈가 된 코로나19와 같은 감염병도 새로운 위협 요인으로 등장하였다. 코로나19가 확산되면서 세계 경제의 불확실성도 높아져 저성장 고착화, 기업 도산 및 금융 불안, 부채, 외환 등 신흥·개발도상국의 취약성, 세계 교역 위축 등으로 이어져 종합적으로는 세계 경제가 위기에 처한 상황이다. 코로나19로 인한 불확실성의 확산은 항만 분야도 피해가지 못하였다. 일례로 지난 6월 21일 부산 감천항에서 발생한 러시아 선원의 코로나19 확진은 해당 항만에서 작업을 하고 있던 작업자 200여 명의 자가 격리로 이어져 항만 운영이 중단되기도 하였다.

이는 항만의 기능을 위협하는 요인이 예측할 수 없을 정도로 다양화되고 있다는 것을 의미한다. 따라서 지금은 항만의 기능 마비를 초래하는 각종 충격에 빠르게 적응하고 원래의 기능을 신속히 회복하기 위한 능력인 항만의 회복탄력성 제고 방안 마련이 필요한 시점이라 할 수 있다. 특히 항만을 통해 수출입 화물의 99.7%가 처리되는 우리나라의 특성을 감안한다면, 예상하지 못한 충격을 흡수하여 항만의 기능이 중단

되지 않도록 각종 변화에 적응하여 원래의 기능을 신속하게 회복하는 능력을 확보하는 것은 국가 경제 발전에 매우 중요하다.

항만의 회복탄력성을 높이기 위해서는 우선적으로 항만의 회복탄력성을 측정하기 위한 모형에 대한 연구가 필요하다. 이러한 점에서 본 연구는 항만의 회복탄력성을 측정하고 이를 정책적으로 활용하기 위한 기초연구로, 회복탄력성 측정을 위한 요인과 측정 변수들을 도출하여 설문조사를 활용한 항만의 회복탄력성 측정 모형을 구축함으로써 항만의 회복탄력성이라는 추상적인 개념에 대한 실제적인 접근 방법과 구체적인 회복탄력성 강화 방안 마련을 연계할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 시뮬레이션을 활용하여 코로나19 사례에 대한 항만의 회복탄력성을 수량적으로 측정할 수 있는 개념 모형 개발을 시도하여, 향후 모형의 고도화를 통한 실제 회복탄력성 측정과 항만 위기 대응 계획 수립이 회복탄력성에 미치는 영향을 수치화할 수 있는 가능성을 보여 주었다는 점에서 의미 있는 성과로 평가할 수 있을 것이다. 본 연구가 향후 항만 회복탄력성 관련 연구의 발전과 회복탄력성 향상을 위한 정책 마련의 밑거름이 되기를 기대한다.

본 연구는 항만연구본부 김성기 전문연구원이 책임을 맡았고, 동 본부의 김찬호 부연구위원, 김가현 전문연구원, 김성아 전문연구원이 공동으로 집필하였다. 연구진의 깊은 노고에 감사를 표한다. 아울러 본 연구에 활용한 설문조사에 대한 자문과 조언을 아끼지 않은 미국 클리블랜드 주립대학의 정문원 교수에게 특별히 감사를 표하며, 연구의 발전에 도움을 주신 해양수산부 이만영 사무관, 인천대학교 여기태 교수,

동명대학교 우종균 교수님께 깊은 감사를 드린다. 또한, 이 보고서의 감리를 맡아 적절한 조언을 주신 김형근 명예연구위원과 최상희 본부장에게 감사를 표하며, 이 보고서가 출판되기까지 도움을 주신 모든 분들께 깊은 사의를 표한다.

2020년 12월
한국해양수산개발원
원장 **장 영 태**

목차

요 약	i
-----	---

Executive Summary	vii
-------------------	-----

제 1장 서론	1
---------	---

제1절 연구 배경 및 필요성	1
-----------------	---

제2절 연구 목적 및 내용	3
----------------	---

1. 연구 목적	3
----------	---

2. 연구 내용	5
----------	---

제3절 선행연구 및 연구의 차별성	7
--------------------	---

1. 선행연구	7
---------	---

2. 연구의 차별성	10
------------	----

제4절 연구 방법론	11
------------	----

제 2장 회복탄력성의 정의 및 관련 법·제도	15
--------------------------	----

제1절 개요	15
--------	----

제2절 회복탄력성의 정의	16
---------------	----

1. 일반적인 정의	16
------------	----

2. 공급사슬 분야의 정의	18
----------------	----

3. 인프라 시스템 분야의 정의	21
-------------------	----

4. 항만의 회복탄력성 정의	24
-----------------	----

제3절 회복탄력성 관련 법·제도 현황	25
----------------------	----

1. 현행 법률·제도 분석	25
----------------	----

2. 시사점	33
--------	----

제 3장 모형 구축을 위한 항만 위기 사례 분석 37

제1절 개요	37
제2절 자연재해	38
1. 국내 사례	38
2. 해외 사례	42
제3절 사이버 테러	47
1. 개요	47
2. 국내 항만 사이버 테러 사례	49
3. 해외 항만 사이버 테러 사례	51
제4절 사고 및 감염병	56
1. 부산항 신항 2부두 크레인 선박 충돌	56
2. 부산 감천항 코로나19 감염	57
제5절 시사점	59

제 4장 설문조사를 활용한 회복탄력성 측정 모형 61

제1절 개요	61
제2절 회복탄력성 요인	62
1. 공급사슬 분야	62
2. 인프라 시스템 분야	65
제3절 연구 모형 및 결과 분석	69
1. 연구 모형	69
2. 연구 설계	72
3. 결과 분석	76
제4절 시사점	84

제 5장 시뮬레이션을 활용한 회복탄력성 측정 89

제1절 개요	89
제2절 항만 운영 시스템 회복탄력성 측정 사례	90
제3절 연구 모형 및 결과 분석	98

1. 항만 위기 요인의 인과지도	98
2. 항만 운영 시스템 모형과 감염병 확산 흐름도	105
3. 시뮬레이션 결과 분석	109
제4절 시사점	118

제 6장 결론 및 제언

제1절 요약 및 결론	121
제2절 정책 제언	124
1. 법·제도 개선	124
2. 항만 회복탄력성 평가 시스템	127
3. 후속 연구 추진	130

참고문헌

부 록

표목차

〈표 1-1〉 주요 선행연구 정리 및 비교	9
〈표 2-1〉 공급사슬 회복탄력성의 정의와 키워드	19
〈표 2-2〉 인프라 시스템 회복탄력성의 정의와 키워드	22
〈표 2-3〉 지진·풍수해 대비 주요 성과 지표	29
〈표 2-4〉 재난 및 사고 수습 관리 주요 업무	32
〈표 2-5〉 운영사 위기 관리 양식	35
〈표 3-1〉 태풍 매미로 인한 부산항 신항 피해 내용	40
〈표 3-2〉 포항 지진으로 인한 포항항 피해 내용	41
〈표 3-3〉 한신·아와지 대지진에 따른 피해 규모	43
〈표 3-4〉 동일본 대지진으로 인한 주요 항만의 피해 내용	45
〈표 3-5〉 사이버 위협과 사이버 리스크	48
〈표 3-6〉 밀라노브릿지 크레인 접촉 사고 피해 내용	56
〈표 4-1〉 회복탄력성 요인의 정의 및 관련 문헌	63
〈표 4-2〉 9가지 회복탄력성 요인의 정의 및 문헌 근거	70
〈표 4-3〉 설문 문항 정리	72
〈표 4-4〉 설문 응답자 정보	74
〈표 4-5〉 1차 탐색적 요인분석 결과	77
〈표 4-6〉 2차 탐색적 요인분석 결과	78
〈표 4-7〉 요인 간 상관계수와 AVE 비교	81
〈표 4-8〉 적합도 지수	81
〈표 4-9〉 확인적 요인분석 결과와 수렴타당성	82
〈표 4-10〉 측정 점수	84
〈표 5-1〉 자연재해 영향 요인 인과관계 흐름	99
〈표 5-2〉 사이버 테러 영향 요인 인과관계 흐름	101
〈표 5-3〉 감염병 영향 요인 인과관계 흐름	103
〈표 5-4〉 모형의 주요 변수	109
〈표 5-5〉 시뮬레이션 시나리오 정리	112
〈표 5-6〉 시나리오별 선석 크레인 생산성 회복탄력성 비교	114
〈표 5-7〉 시나리오별 선석 물동량 회복탄력성 비교	115
〈표 6-1〉 항만 회복탄력성 평가 규정(안)	126
〈표 6-2〉 항만 회복탄력성 평가 항목	128

그림 목차

〈그림 1-1〉 연구 흐름도	6
〈그림 2-1〉 취약성, 회복탄력성, 적응력 간의 관계도	17
〈그림 2-2〉 해양수산부 중앙사고수습본부 체계도	27
〈그림 2-3〉 해양수산부 안전관리 정책 추진 방향	28
〈그림 3-1〉 태풍 강도별 분류	38
〈그림 3-2〉 태풍의 파괴력 비교	39
〈그림 3-3〉 태풍 매미에 따른 부산항 북항 터미널 피해 모습	40
〈그림 3-4〉 한신·아와지 대지진으로 인한 고베항 피해 모습	44
〈그림 3-5〉 한신·아와지 대지진 및 동일본 대지진의 피해 항만 비교	45
〈그림 3-6〉 동일본 대지진으로 인한 주요 항만의 피해 모습	46
〈그림 3-7〉 부산항 신항 1부두 크레인과 선박 간 충돌 모습	57
〈그림 4-1〉 공급사슬 회복탄력성 측정 프레임워크	64
〈그림 4-2〉 회복탄력성 측정 지표와 수량적 측정법	66
〈그림 4-3〉 회복탄력성 삼각형	67
〈그림 4-4〉 회복탄력성 삼각형과 수량적 측정법	68
〈그림 4-5〉 항만의 회복탄력성 측정 모형	71
〈그림 5-1〉 터미널 작업의 인과지도	91
〈그림 5-2〉 컨테이너 터미널 작업 흐름도	92
〈그림 5-3〉 컨테이너 터미널 운영 흐름도	93
〈그림 5-4〉 항만-철도 운영 흐름도	94
〈그림 5-5〉 항만 운영 흐름도	95
〈그림 5-6〉 항만 네트워크 이동시간 측정 흐름도	96
〈그림 5-7〉 회복탄력성 요인과 항만 성과 SD 모형	96
〈그림 5-8〉 요인에 따른 회복탄력성 측정 결과	97
〈그림 5-9〉 재난 대비 정도와 회복탄력성의 인과 지도	97
〈그림 5-10〉 자연재해의 인과지도	100
〈그림 5-11〉 사이버 테러의 인과지도	102
〈그림 5-12〉 감염병의 인과지도	104
〈그림 5-13〉 회복탄력성의 측정	105
〈그림 5-14〉 선석 물동량의 처리 흐름도	107

〈그림 5-15〉 트럭 물동량의 처리 흐름도	108
〈그림 5-16〉 감염병 확산의 흐름도	109
〈그림 5-17〉 시나리오별 인당 접촉 횟수	112
〈그림 5-18〉 선석 크레인 생산성	113
〈그림 5-19〉 선석-이송장비 누적 처리 물동량	114
〈그림 5-20〉 대기 트럭 수	116
〈그림 5-21〉 트럭 누적 처리 물동량	116

약어 목록

※ 알파벳 순

AVE(평균분산추출): Average Variance Extracted

CR(합성신뢰도): Composite Reliability

DDoS (서비스 거부 공격): Distributed Denial of Service

OECD (경제협력개발기구): Organization for Economic Cooperation and Development

SD (시스템 다이내믹스): System Dynamics

TOS (항만 운영 시스템): Terminal Operation System

VTS (해상교통관제센터): Vessel Traffic Management System

요약

항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구

1. 연구의 목적

- ▶ 본 연구는 항만 운영을 위협하는 요소들이 증가하고 있는 상황에서 항만의 기능 마비를 초래하는 각종 충격에 빠르게 적응하고 원래의 기능을 신속히 회복하기 위한 능력인 항만의 회복탄력성 제고 방안 마련을 위해 회복탄력성 측정 모형을 구축하고자 함.
- 첫째, 선행연구 분석 및 요인분석을 통해 설문조사를 활용한 항만의 회복탄력성을 측정하는 모형을 개발하고, 그 타당성을 검증하고자 함.
- 둘째, 시스템 다이내믹스 시뮬레이션을 활용한 회복탄력성 측정 모형을 제시하고 향후 고도화의 기반을 마련함으로써 설문 모형의 단점을 보완하고자 함.
- 셋째, 회복탄력성 모형을 활용하여 항만의 회복탄력성을 향상시키기 위한 정책 수립의 기반을 마련하고자 함.

- 넷째, 항만의 회복탄력성 향상을 위한 법·제도적 정책 방향을 제시하고자 함.

2. 연구의 방법 및 특징

1) 연구의 방법

- ▶ 회복탄력성 측정 모형 구축에서는 설문조사를 활용한 데이터 수집과 요인분석, 시스템 다이내믹스 시뮬레이션을 활용한 개념적 측정모형을 구축의 두 가지 방법론으로 활용함.
- 설문조사를 활용한 모형의 경우 항만당국, 운영사, 선사 등 항만관계자들을 대상으로 데이터를 수집한 후, 탐색적 요인분석을 통해 측정 지표가 요인을 제대로 설명하고 있는지 검증하고 확인적 요인분석을 통해 회복탄력성 측정 모형의 타당성을 검증함.
- 시뮬레이션을 활용한 모형의 경우 항만 운영 시스템 흐름도를 구축하여 코로나바이러스감염증-19와 같은 감염병이 항만 운영에 미치는 영향을 분석하고 물동량 및 생산성을 성과 지표로 하여 회복탄력성을 측정해 본 후, 감염병 대비 격리 정책의 효과 분석을 통해 회복탄력성 향상을 위한 지원 정책의 방향을 알아보는 데 목적을 둠.

2) 연구의 특징

- ▶ 본 연구는 기초연구로서 관련 문헌들을 참고하여 항만의 회복탄력성에 대한 정의를 내리고 회복탄력성 구성 요인들을 선정하여 측정을 위한 모형을 수립한 후 그 타당성을 검증함.

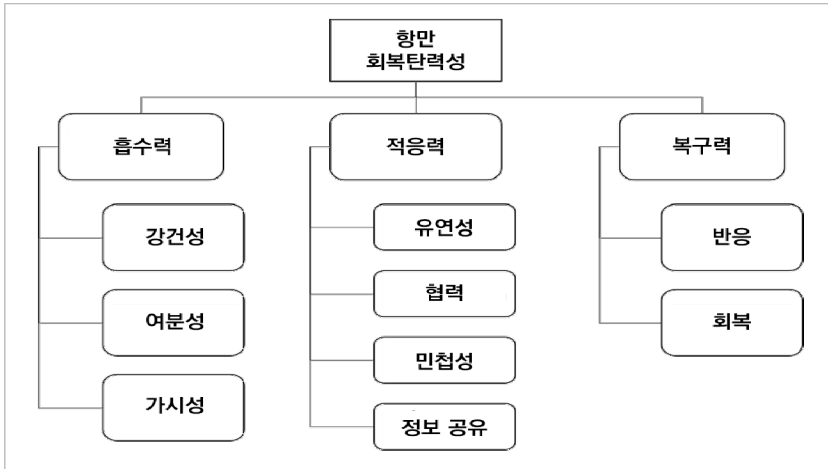
- 구축한 모형은 향후 항만의 회복탄력성 관련 역량 측정과 강화 계획 수립에 활용할 수 있을 것임.
- ▶ 또한 항만 운영 시스템을 시스템 다이내믹스로 표현하여 회복탄력성을 측정할 수 있는 개념적 모형을 구축함.
- 이를 통해 항만 위기 대응 계획 수립이 회복탄력성에 미치는 영향을 수치화할 수 있는 가능성을 보여주고, 향후 고도화를 통한 실제 회복탄력성 측정에 활용할 수 있는 기초 모형을 마련함.

3. 연구 결과

1) 연구 결과 요약

- ▶ 문헌 연구 결과 회복탄력성을 흡수력, 적응력, 복구력의 세 가지 요인으로 구성하고 흡수력의 측정 지표로 강건성·여분성·가시성을 선정하고, 적응력의 측정 지표로 유연성·협력·민첩성·정보 공유를 선정하였으며 복구력의 측정 지표로 반응·회복을 선정함.
- 항만 운영사 및 하역사, 선사, 항만당국 및 항만물류협회 관계자 등을 대상으로 설문조사를 실시하여 최종 199개의 응답을 확보함.
- 탐색적 요인분석과 확인적 요인분석을 통해 모형의 구조적 타당성을 검증하여 항만의 회복탄력성 측정에 활용하기에 적합하다는 것을 확인함.
- 응답 결과를 분석해 보면 우리나라 항만은 회복탄력성의 요인 중 적응력과 흡수력은 어느 정도 갖추고 있으나 복구력에서 취약점을 보이고 있음을 알 수 있었음.

〈그림〉 항만의 회복탄력성 구성 요인



▶ 다음으로 시스템 다이내믹스를 활용, 컨테이너 터미널의 운영 시스템 흐름도를 사용하여 감염병 사례에 대한 항만의 회복탄력성 측정 모형을 구축하였으며, 시범적인 시뮬레이션 결과 분석을 통해 모형의 적용이 가능함을 확인함.

- 감염병 발생 초기에 강력한 격리 조치 등을 통해 사람 간 접촉을 막는 것이 가장 효과적인 대응 조치가 될 수 있음을 보였으며, 접촉 횟수를 줄이는 방법이나 뒤늦은 격리 조치는 회복탄력성 향상에 큰 도움이 되지 않음을 보임.

- 또한 여분의 물동량 처리 능력 확보를 통한 흡수력 향상으로 감염병의 피해를 줄일 수 있음을 보였음.

2) 정책 대안 제시 내용 및 정책화 활용

▶ 다양한 분야의 문헌 연구와 요인분석을 통해 항만의 회복탄력성이 아홉 가지 요인을 바탕으로 한 다계층 구조임을 확인한 것이 본 연

구의 이론적 공헌이며, 항만의 회복탄력성이라는 추상적인 개념에 대한 실제적인 측정 모형을 구축하여 구체적인 회복탄력성 강화 방안 마련과 연계할 수 있도록 함.

- 향후, 회복탄력성을 구성하는 아홉 가지 요인에 대한 항만의 실제적인 활동을 정의하고, 관련 성과 지표와 연계하는 연구가 필요할 것으로 보임.

▶ 또한, 감염병과 같은 위협 요인에 대한 회복탄력성을 측정할 수 있는 모형의 개념을 제시함으로써 시뮬레이션을 활용한 회복탄력성 향상 계획 수립과 평가 체계 구축의 기반을 마련함.

- 실제 터미널을 대상으로 한 사례 연구와 모형의 교정(calibration) 과정을 거쳐 모형 고도화가 반드시 필요함.

3) 정책적 기여 등 기대효과

▶ 「비상사태등에 대비하기 위한 해운 및 항만 기능 유지에 관한 법률」에 항만의 회복탄력성 평가에 관한 내용을 신설하는 개정안을 제시함으로써 회복탄력성 측정에 대한 법·제도적 근거 마련을 기대.

▶ 후속 연구로 항만별 회복탄력성을 평가하여 부족한 요인이 무엇인지 파악하고, 항만별 회복탄력성 강화 활동을 도출하는 연구 및 시뮬레이션 모형 고도화와 실제 데이터를 활용한 교정과 사례 연구를 제시하여 향후 항만의 회복탄력성 관련 연구 활성화에 기여할 수 있음.

A Study on the Measurement Model for the Port Resilience

Sung-Ki Kim · Chan-Ho Kim · Ga-Hyun Kim · Sung-Ah Kim

1. Purpose

- ▶ This study aims to develop a model for measuring port resilience, which can be defined as a port's ability to swiftly adapt to a variety of shocks as well as restore, once lost, the original functions of the port itself. Such capabilities are important under the current environment with a number of threats against port operations rapidly increasing.
 - First, having conducted a review of preceding studies as well as factor analysis, the study intends to develop a model for estimating port resilience and verify its feasibility.
 - Second, a system dynamics simulation model was utilized to present a measurement model for port resilience. Utilizing such a methodology was undergone with the intention of addressing weaknesses of a survey model while laying the groundwork for future advancement.

- Third, by utilizing a survey-based resilience model, this study aims to build a solid foundation for policy-making processes to boost the resilience of ports.
- Fourth, this study presents policy directions for laws and systems to improve port resilience.

2. Methodology and Feature

1) Methodology

- ▶ Two methods were utilized to develop a measurement model for port resilience; one with a survey for data collection as well as factor analysis and the other utilizing system dynamics simulation for the construction of a conceptual model.
- As for a survey-based model, the study conducted exploratory factor analysis to verify whether measuring indicators are able to properly explain factors. Following this process, confirmatory factor analysis was carried out to verify the feasibility of a port resilience measurement model.
- In the case of a model utilizing simulations, this study constructed a system flow of port operations, analyzing the impact of an infectious disease such as COVID-19 on port operations. After estimating port resilience with port traffic volume and productivity as performance indicators, this study aims to seek a direction for support measures to enhance port resilience based on the impact analysis of quarantine policy in the event of infectious disease outbreaks.

2) Feature

- ▶ Conducted as a basic research, this study first defined the meaning of port resilience based on relevant literature. After selecting components constituting port resilience, the study developed a measurement model and then verified its feasibility.
 - The constructed model can be utilized in measuring capabilities relevant to port resilience and establishing plans to strengthen these capabilities.
- ▶ Furthermore, by representing port operational systems into system dynamics model, this study built a conceptual model for estimating port resilience.
 - These efforts show the possibility of quantifying the impact of a port's risk response planning to port resilience while providing a basic model to utilize in measuring port resilience in the field through calibration.

3. Results

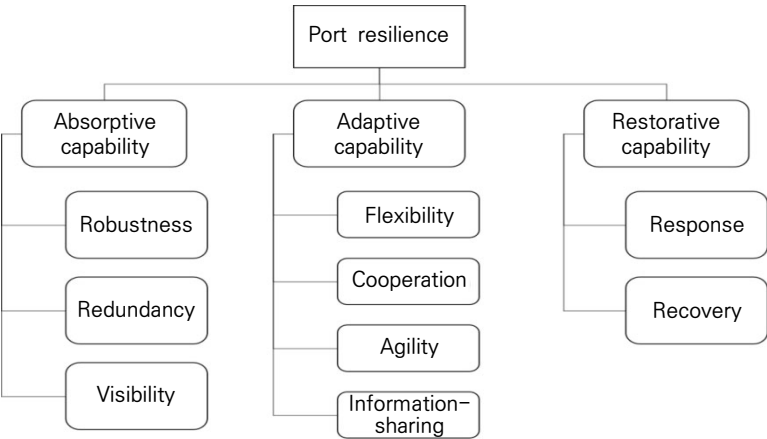
1) Summary

- ▶ According to the results of literature review, port resilience consists of three factors including absorptive capability, adaptive capability and restorative capability. This study selected robustness, redundancy and visibility as measuring indicators of absorptive capability while choosing flexibility, cooperation, agility, and information-sharing for indicators of

adaptive capability. Moreover, factors used for measuring restorative capability included response and recovery.

- Targeting relevant officials in port operators, stevedoring companies, shipping companies, port authorities as well as port and logistics associations, this study used a survey and obtained a total of 199 responses.
- After verifying structural feasibility through exploratory factor analysis and confirmatory factor analysis, the results of this study confirmed that the model was appropriate for measuring port resilience.
- The analysis of responses shows that Korean ports possess a certain level of absorptive capability and adaptive capability but shows vulnerability in restorative capability.

〈Picture〉 Estimation Model of Port Resilience



- ▶ Next, this study included construction of a model for measuring port resilience in the event of an infectious disease outbreak by utilizing an operational system flow of container terminals

based on system dynamics models. The analysis results of demonstrative simulations confirmed the applicability of the model.

- According to the results of the analysis, the most effective countermeasure in the event of an infectious disease outbreak is to prevent human to human contact at the initial stage by implementing stringent quarantine measures. It has been shown that simply reducing the number of contacts or a belated quarantine is ineffective in boosting port resilience.
- This study bears its significance through empirical evidence that damage resulting from the spread of an infectious disease can be reduced by increasing the absorptive capability of ports, which can be obtained by securing the capacity for handling additional traffic volumes.

2) Policy suggestions and relevant activities

- ▶ Through a review of literature from a variety of fields as well as factor analysis, this study confirmed that port resilience possesses a multi-level structure consisting of nine factors which is the theoretical contribution of this study. In addition, a practical model for measuring an abstract concept of port resilience was constructed, with the capability to connect specific measures for strengthening port resilience with the model.
- Henceforward, it is necessary to conduct research for defining actual port activities for nine factors which consist of port resilience, subsequently connecting them with relevant

performance indicators

- ▶ This study presented the concept of a model capable of quantifying port resilience against threats such as infectious disease. In doing so, it laid a solid foundation for establishing a system for simulation-based planning to enhance port resilience as well as an assessment system.
- For future progress of this research, it is necessary to conduct a case study on the subject of actual port terminals as well as to advance the model through a calibration process.

3) Expected benefits including policy contribution

- ▶ With the suggestion of establishing a new provision concerning the assessment of port resilience to the 'Act on Maintaining Marine Transportation and Port Functions to Prepare for Emergencies', legal and institutional grounds can be provided for estimating port resilience.
- ▶ Follow-up studies suggested by this study include as follows; assessing the resilience of individual ports in Korea to identify shortcomings, drawing activities to strengthen the resilience by ports, advancing the simulation model as well as calibrating the model based on actual data with specific case studies. Through such efforts, this study will further contribute to the invigoration of research relevant to port resilience.

제 1 장

서론

제1절 연구 배경 및 필요성

최근 들어 항만 운영을 위협하는 요소들이 증가하고 있다. 특히 최근에 전 세계적으로 확산되고 있는 감염병인 코로나바이러스감염증-19(이하 코로나19)가 대표적인 사례이다. 코로나19가 확산되면서 세계 경제의 불확실성도 높아지고 있는 상황이다. OECD의 경제 전망¹⁾에서는 코로나19의 확산이 저성장 고착화, 기업 도산 및 금융 불안, 부채, 외환 등 신흥·개발도상국의 취약성, 세계 교역 위축 등으로 이어져 종합적으로는 세계 경제가 하향할 수 있다고 예측하고 있다. 코로나19로 인한 불확실성의 확산은 항만 분야도 피해 갈 수 없는 현상이다. 일례로 지난 6월 21일 부산 감천항에서 발생한 러시아 선원 16명의 코로나19 확진은 해당 항만에서 작업을 하고 있던 작업자 200여 명의 자가 격리로 이어져 항만 운영이 중단되기도 하

1) OECD(June 2020).

였다. 즉 코로나19와 같은 감염병은 그동안 항만 운영에 지장을 초래하는 위협으로 인식되지 않았지만, 전 세계적으로 확산되면서 항만 분야로도 그 영향력이 확산될 수 있는 위협으로 작용한 것이다.

항만의 기능을 마비시키는 위협으로는 태풍, 지진 등과 같은 자연재해, 선박 충돌, 노조 파업 등과 같은 인적 재해, 그리고 최근에는 항만의 운영 시스템이 고도화되면서 이에 대한 사이버 테러가 대두되고 있는 상황이다. 여기서 중요한 것은 항만의 기능을 마비시킬 수 있는 요인이 과거에는 태풍, 지진 등과 같은 자연재해나 선박 충돌, 노조 파업 등과 같은 인적 재해가 주를 이루었다면, 이제는 사이버 테러나 코로나19와 같은 감염병 등이 보이지 않으면서도 항만의 기능을 위협하는 요인으로 대두되고 있다는 것이다. 즉 항만의 기능을 위협하는 요인이 예측할 수 없는 요인으로 다양화되고 있는 것이다. 따라서 지금은 항만의 기능 마비를 초래하는 각종 충격에 빠르게 적응하고 원래의 기능을 신속히 회복하기 위한 능력인 항만의 회복탄력성 제고 방안 마련이 필요한 시점이라 할 수 있다.

회복탄력성에 대한 연구는 1973년 홀링(Holling)에 의해 시작됐으며 이후 생태학, 심리학, 교육학, 건축학, 경영학, 경제학 등 여러 분야에서 그 개념이 도입되기 시작하였다. 특히 공급사슬 분야에서는 2004년부터 연구가 시작되어 2011년 동일본 대지진으로 인한 공급사슬 붕괴에 따라 회복탄력성에 대한 연구가 급속하게 진행되어 왔다. 더욱이 공항, 항만, 대중교통, 상수도, 발전소 등 사회기반시설은 그 기능이 마비될 경우 사회 전반에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 회복탄력성에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다.

항만을 통해 수출입 화물의 99.7%가 처리되는 우리나라의 특성을 감안한다면, 예상하지 못한 충격을 흡수하여 항만의 기능이 중단되

지 않도록 각종 변화에 적응하여 원래의 기능을 신속하게 회복하는 능력(회복탄력성)을 확보하는 것은 국가 경제 발전에 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 우리나라에서는 항만의 회복탄력성에 대한 연구가 아직까지 이루어지지 않고 있다.

항만의 회복탄력성에 대한 체계적인 정책 수립을 위해서는 우선적으로 항만의 회복탄력성을 측정하기 위한 실증 연구와 모형개발이 필요하다. 특히 모형 개발을 위해서는 항만의 회복탄력성을 구성하는 요인을 설정하고, 요인분석을 통해 모형의 타당성을 검증할 필요가 있다. 이러한 항만의 회복탄력성을 수량적으로 측정할 수 있는 모형을 설정하여 제시함으로써 항만의 회복탄력성을 높이는 데 필요한 정책 방향을 설정하기 위한 기반을 마련할 필요가 있다.

제2절 연구 목적 및 내용

1. 연구 목적

전술한 연구의 배경을 토대로 본 연구의 목적을 크게 네 가지로 정리할 수 있다.

첫째, 항만의 회복탄력성을 측정하는 모형을 개발하는 것이다. 그동안 회복탄력성은 분야에 따라 다양한 요인이 적용되어 왔기 때문에 이를 일반화하여 항만의 회복탄력성 측정에 적용하는 것은 항만의 특성을 반영하는 데 한계가 있다. 이에 선행연구와 전문가의 요인 검증 등을 통해 항만의 특성을 반영한 회복탄력성 측정 요인을 선정하고 이에 따른 측정 모형을 개발하는 데 연구의 목적을 두고

있다. 이를 위해 회복탄력성 측정 모형 개발과 관련하여 항만 관계자들을 대상으로 한 설문조사를 통해 측정 모형의 타당성을 검증하고자 한다.

둘째, 시뮬레이션을 활용한 회복탄력성 측정 모형을 제시하는 데 연구의 목적을 두고 있다. 일반적으로 설문 모형은 이론적 기반이 단단하고 바로 활용할 수 있다는 장점이 있으나, 매년 결과가 달라질 수 있어 연속성이 부족할 수 있기 때문에 본 연구에서는 시스템 다이내믹스라는 시뮬레이션 기법을 활용하여 항만의 회복탄력성을 수량적으로 측정할 수 있는 모형을 제시하고 향후 고도화의 기반을 마련함으로써 설문 모형의 단점을 보완하고자 한다.

셋째, 이렇게 구축한 회복탄력성 모형을 활용하여 항만의 회복탄력성을 향상시키기 위한 정책 수립의 기반을 마련하고자 한다. 이를 위해서는 항만 회복탄력성 관련 설문을 정례화하고, 그 결과를 회복탄력성 향상을 위한 활용 지표로 활용함은 물론 장기적으로는 데이터를 활용한 수치 모형으로 발전시켜 회복탄력성 향상을 위한 정책 효과 측정의 기반을 마련하는 데 연구의 목적을 두고 있다.

넷째, 항만의 회복탄력성 향상을 위한 법·제도적 정책 방향을 제시하고자 한다. 항만 관련 법률에는 아직까지 위기 상황에 대한 국가 단위의 기본계획이나 시설 단위의 대응계획이 수립되어 있지 않다. 그렇기 때문에 예측하지 못한 사건이 발생할 경우 이에 대한 대응 체계 구축에 많은 시간이 소요될 수 있다. 이에 따라 이 연구에서는 항만의 회복탄력성을 체계적으로 증대시키기 위한 법률적 방안을 제시하는 데 목적을 두고 있다.

2. 연구 내용

본 연구는 총 6개의 장으로 구성되어 있다. 제1장인 서론에서는 연구의 배경 및 목적, 내용 등에 대해 서술하고 있으며, 제2장에서는 문헌 연구를 통해 과거 관련 분야에서 사용되었던 회복탄력성의 정의를 분석하고 본 연구에서 사용할 수 있는 항만의 회복탄력성에 대한 정의를 내리고 있다. 또한 항만의 회복탄력성과 관련 있는 법·제도·규정을 알아보았다. 현행 법 및 제도의 체계와 다루는 범위를 분석한 후, 항만의 회복탄력성과 관련하여 보강되어야 할 부분에 대한 시사점을 도출하였다. 제3장에서는 자연재해, 파업, 사이버 테러 등과 같은 항만 위기와 이로 인한 항만의 기능 정지 사례를 분석하여 항만의 회복탄력성 구축에 대한 필요성과 시사점을 도출하였다.

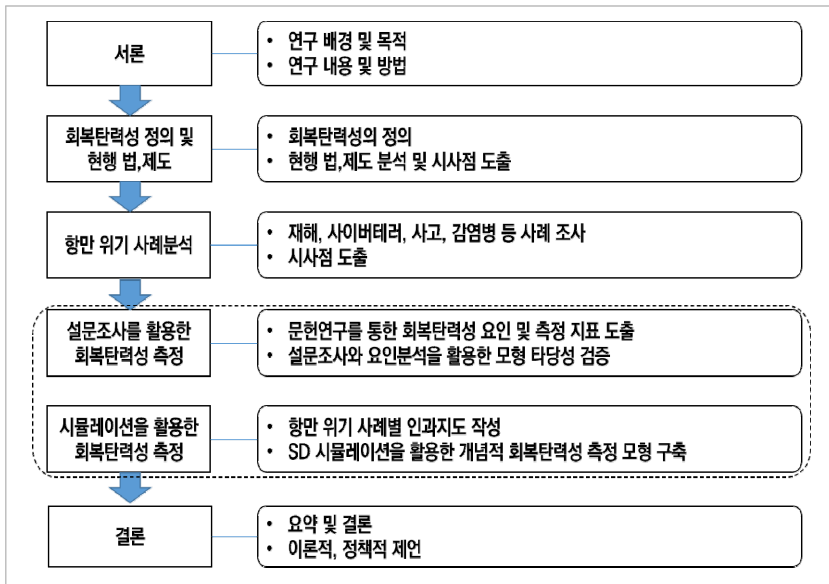
제4장에서는 설문조사를 활용한 회복탄력성 측정 모형에 관해 서술하였다. 먼저 측정 모형의 이론적 기반을 구축하기 위해 문헌 연구를 실시하여 과거 연구에서 다룬 회복탄력성 요인 및 측정 지표들을 분석하였다. 이를 통해 항만의 회복탄력성 측정을 위한 지표들을 선정하고 모형을 구축하였으며, 이를 바탕으로 한 설문조사를 통해 데이터를 수집하고 모형의 타당성을 검증하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 항만의 회복탄력성 구축을 위한 시사점과 향후 모형의 발전 방향을 제시하였다.

제5장에서는 시스템 다이내믹스 시뮬레이션을 활용한 회복탄력성의 측정 모형에 대해 연구하였다. 먼저 3장에서 알아본 항만 위기 사례인 자연재해, 사이버 테러, 감염병이 항만 운영에 영향을 미치는 과정에 대한 인과지도를 구축하였다. 이 인과지도와 문헌 연구, 항만 관련 전문가 자문 내용을 바탕으로 항만 운영 시스템 모형을 제시하

였다. 여기에 최근 세계적인 이슈가 된 코로나19와 같은 감염병이 항만 운영에 미치는 영향을 분석하여 이에 대한 회복탄력성을 측정하였다. 이와 더불어, 감염병 확산에 대비한 접촉 횟수 줄이기 및 격리 정책의 효과를 시범적으로 측정해 보았다. 마지막으로, 항만의 회복탄력성 구축 모형의 발전 방향에 대한 시사점을 제시하였다.

마지막 제6장에서는 주요 결과를 요약하고 항만의 회복탄력성 확보를 위한 정책적 시사점을 도출하였다. 이를 통해 회복탄력성에 관한 정책 방향을 제안하고 향후의 연구 방향을 제시하였다. <그림 1-1>은 연구의 전체적인 흐름을 나타낸 것이다.

〈그림 1-1〉 연구 흐름도



자료: 저자 작성

제3절 선행연구 및 연구의 차별성

1. 선행연구

항만의 회복탄력성과 관련된 주요 선행연구를 i) 위험 분석, ii) 회복탄력성 향상을 위한 프레임워크, iii) 수량적 회복탄력성 측정이 라는 세 가지 분류로 나누어 살펴보았다.

먼저 위험 분석 관련 연구를 보면, 이민규 등(2014)은 X 이벤트²⁾로 인한 항만 공급 지장(shutdown) 사례 조사를 시행하고 산업 연관 분석을 통해 그 파급효과를 측정한 후 대응 방안에 대한 정책을 제언하였다. 최석우 등(2019)은 마찬가지로 X 이벤트에 대한 연구를 수행하여 위험 요소를 탐색하고 파급효과 추정 및 대응 방안 수립을 통해 예견적 위험 분석 체계를 구축하였다. Lam과 Su(2015)는 아시아 항만들을 대상으로 기능 붕괴 사례를 조사하여 발생 가능성과 심각성을 기준으로 분류한 후 대응 방안을 제시하였다. Gou와 Lam(2019)은 항만 터미널 운영 프로세스를 분석하여 재난 위험 분석을 위한 프레임워크를 제시한 후, 태국의 램차방항을 대상으로 위험이 항만 운영에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션을 시행하여 위험 발생으로 인한 손실을 측정하였다. 이 외에도 위험 분석 분야의 논문은 다수 존재하지만, 위험 분석과 회복탄력성 개념을 연결한 논문은 거의 없다.

다음은 회복탄력성 향상을 위한 프레임워크 수립에 관한 연구이다. Nair 등(2010)은 항만 네트워크의 회복탄력성 측정을 위해 시스템 구성 요소 수준에 적용할 수 있는 프레임워크를 제시하고, 폴란드의 시비노우이시치에항을 대상으로 위험 경감과 회복탄력성 향상을

2) 일반적인 예상 범위를 뛰어넘는 위험 사건

위한 계획을 제시하였다. Rice와 Trepte(2012)는 항만 관계자들을 대상으로 설문조사를 하여 항만 기능 장애 사례와 회복탄력성 향상 방안에 대한 의견을 수집하고 정리하였다. 그 결과 의사소통을 위한 정보 시스템 구축과 노동 유연성 향상이 가장 중요한 요인으로 파악되었다. Lam과 Bai(2016)는 품질 기능 전개(QFD: Quality Function Deployment)를 활용하여 해상 공급망의 회복탄력성 향상을 위한 방안을 제시하였다. 위험 요인과 회복탄력성 요인 간의 관계를 품질의 집(house of quality)으로 나타낸 결과 비상 계획, 모니터링 시스템, 공급사슬 관계 관리가 가장 중요한 요인이라고 주장하였다. Justice 등(2016)은 미국 컨테이너 터미널이 해결하기 힘든 복잡한 문제에 대처하기 위한 방안으로 회복탄력성을 제시하고, 향후의 발전 방안을 언급하였다. Shaw 등(2017)은 영국 항만의 회복탄력성 향상을 위한 방안을 수립하며 운영사, 선사, 물류회사 등 관계자 모두의 참여와 정보 공유 시스템 구축이 중요하다고 강조하였다. 해당 논문들은 항만의 회복탄력성 향상을 위한 프레임워크를 제시하고 있지만 회복탄력성을 하나의 추상적인 개념으로 인식하고 측정 방안에 대해서는 구체적으로 연구하지 않았다.

마지막으로 회복탄력성 측정에 대한 연구이다. Omer 등(2012)은 항만을 포함한 해상 운송의 회복탄력성 측정에 대해 연구하였다. 톤수(tonnage), 시간, 비용의 세 가지 측면에서 회복탄력성 측정 공식을 수립하고 시스템 다이내믹스를 활용하여 이를 측정하였다. Pant 등(2014)은 회복탄력성을 취약성과 복구성의 함수로 정의하고, 불확실성을 설명하기 위해 확률론에 기반한 측정 공식을 수립하여 미국 오클라호마의 카투스 내륙 항만에 적용하였다. Chen 등(2017)은 항만과 내륙 운송의 네트워크 회복탄력성 측정에 대해 연구하였다. 측정을 위한 정수 계획법 모형을 제시하고 이를 스웨덴 예테보리항에

적용하여 수치 분석을 통해 측정 결과를 제시하였다. Cho와 Park(2017)은 강건성과 신속성 관점에서 항만의 회복탄력성을 측정하기 위해 간단한 개념적인 모델을 제시하여 시스템 다이내믹스 시뮬레이션을 통해 측정함으로써 시스템 다이내믹스의 적용 가능성을 보였다. Touzinsky 등(2018)은 미국 해상 운송 시스템의 회복탄력성에 대해 연구하였다. 허리케인이 미국 남동부 3개 항구에 미친 영향에 대한 데이터를 수집하여 선박의 누적 체류 시간과 순 입항 선박수의 관점에서 폭풍의 영향 단계에 따른 성능 변화를 측정함으로써 회복탄력성을 나타내었다. <표 1-1>은 주요 선행연구의 방법론과 내용을 정리하고 본 연구와 비교한 것이다.

〈표 1-1〉 주요 선행연구 정리 및 비교

연구	연구 방법	주요 연구 내용
Nair 등(2010)	• 시나리오 분석 • 사례 분석	• 위험 경감 및 회복탄력성 향상을 위한 방안 • 재해 시나리오별 복구 예산과 회복탄력성 간의 관계
Rice와 Trepte(2012)	• 문헌 연구 • 설문조사	• 항만 위기 경험 사례 • 항만 관계자들이 인식하는 회복탄력성 향상을 위한 주요 요인
Lam과 Bai(2016)	• QFD • 심층 인터뷰	• 항만 위협 요인과 회복탄력성 요인 간의 관계 분석 • 중요 요인별 역량 향상 방안 제시
Justice 등 (2016)	• 문헌 연구	• 미국 컨테이너 항만 위험 요소 조사 • 회복탄력성 활용 및 향상 방안 제시
Shaw 등(2017)	• 문헌 연구 • 사례 분석	• 영국 항만의 회복탄력성 현황 조사 • 이해관계자 간 정보 공유를 통한 회복탄력성 향상 방안 제시
Omer 등(2012)	• 시스템 다이내믹스 • 사례 분석	• 해운 네트워크 관점에서 회복탄력성 지표 제시 • 상하이 - LA/LB 네트워크 회복탄력성 측정
Pant 등(2014)	• 수리 모형 • 사례 연구	• 회복탄력성 측정을 위한 확률적 수리 모형 개발

연구	연구 방법	주요 연구 내용
Chen 등(2017)	• 수리 모형 • 사례 연구	• 회복탄력성 측정을 위한 정수 계획 모형 개발
Cho와 Park(2017)	• 시스템 다이내믹스	• 회복탄력성 측정을 위한 개념 모형 제시 • 시스템 다이내믹스의 적용 가능성 확인
Touzinsky 등 (2018)	• 수리 모형 • 사례 연구	• 회복탄력성 측정을 위한 데이터 활용 모형 개발
본 연구	• 문헌 연구 • 요인 분석 • 시스템 다이내믹스	• 회복탄력성 구성 요인 제시 및 측정 지표 개발 • 시스템 다이내믹스를 활용한 개념적 회복탄력성 측정 모형 개발 및 시나리오별 비교

자료: 저자 작성

본 연구에서는 위의 선행연구 외에도 항만의 회복탄력성을 정의하고 및 측정 모형을 구축하기 위해 다수의 선행 연구들을 살펴보았다. 해당 내용은 연구의 내용을 이해하기 쉽도록 제2장부터 4장까지 각 장의 내용에 맞추어 정리하였다.

2. 연구의 차별성

앞에서 살펴본 항만의 회복탄력성 관련 선행연구들은 회복탄력성이라는 추상적인 개념을 이해하고 이를 향상시키기 위한 프레임워크에 대해 연구한 경우가 많다. 수량적 측정에 대해 다룬 연구들도 있지만 단순히 측정을 위한 수리적 모형을 개발하고 이를 항만 사례에 적용하는 것에 그친다. 항만의 회복탄력성을 측정하고 이를 정책적으로 활용하기 위해서는 먼저 회복탄력성을 구성하는 요인과 측정 지표를 확정하는 연구를 통해 이론적 기반을 단단히 세우는 작업이 필요하나 이와 관련한 연구는 많지 않았다. 또한 수량적 측정 모형을 정책적인 회복탄력성 향상 방안의 효과를 측정하는 데 활용하는 연구도 매우 적다.

본 연구는 기초연구로서 항만의 회복탄력성에 대해 다룬 선행연구들 외에도 공급사슬이나 인프라 시스템과 같은 관련 분야의 문헌들을 참고하여 항만의 회복탄력성에 대한 정의를 내리고 회복탄력성 구성 요인들을 선정하여 측정을 위한 모형을 수립한 후 그 타당성을 검증한다. 이러한 작업을 통하여 확정된 측정 모형은 향후 항만의 회복탄력성 관련 역량을 측정하고 상대적으로 약한 부분을 찾아내어 회복탄력성 강화 계획을 수립하는 데 활용할 수 있을 것이다.

또한 항만 운영 시스템을 시스템 다이내믹스로 표현하여 감염병과 같은 항만 위협 요인에 대응하는 회복탄력성을 측정할 수 있는 개념적 모형을 구축한다. 이를 통해 항만 위기 대응 계획 수립이 회복탄력성에 미치는 영향을 수치화할 수 있는 가능성을 보여주고, 향후 고도화를 통해 실제 회복탄력성 측정에 활용할 수 있는 기초 모형을 마련한다는 점에 본 연구의 차별성이 있다.

제4절 연구 방법론

본 연구에서는 문헌 연구, 사례 분석, 설문조사, 요인분석, 시스템 다이내믹스 시뮬레이션 등 다양한 방법을 사용하였다. 문헌 연구에서는 연구 전체에 걸쳐 기반 이론을 구축하기 위해 항만의 회복탄력성 관련 문헌뿐만 아니라 공급사슬 분야와 인프라 시스템 분야에서 적용된 회복탄력성에 대한 정의, 요인 및 측정 지표, 수량적 측정 모형 등에 대해서도 검토하였다. 사례 분석에서는 재난 및 사이버 테러 등 항만 기능 장애 및 위기를 유발한 사례를 선정하여 현황, 대응 방안, 시사점 등을 살펴보았다.

회복탄력성 측정 모형 구축에는 크게 두 가지의 방법론을 적용하였다. 먼저 설문조사를 활용한 데이터 수집과 요인분석을 적용하여 모형을 구축하였으며, 다음으로 시뮬레이션을 활용한 개념적 측정 모형을 구축하였다.

설문조사와 요인분석은 문헌 연구를 통해 선정한 회복탄력성 요인과 측정 지표의 타당성 검증에 사용하였다. 설문조사 기반의 측정은 연속성을 확보하기 힘들다는 단점이 있지만, 항만의 회복탄력성에 관한 기반 이론이 충분히 연구되지 않은 상황에서 항만 관계자들에 대한 조사를 통해 요인을 확정할 수 있으며, 타당성이 검증되면 회복탄력성 측정에 가장 쉽게 접근할 수 있는 방법이기도 하다. 요인별 측정 지표를 구성하기 위한 설문 문항은 문헌 연구를 통해 선정하였으며, 탐색적 요인분석(exploratory factor analysis)을 통해 측정 지표가 요인을 제대로 설명하고 있는지 검증한 후 확인적 요인분석(confirmatory factor analysis)을 통해 회복탄력성 측정 모형의 타당성을 검증하였다. 또한 구축한 모형을 활용하여 회복탄력성 향상을 위한 정책 제언을 실시하고자 한다.

SD 방법은 회복탄력성의 정량적 측정을 위한 개념적 모형 개발에 활용하였다. SD를 활용한 정량적 측정은 데이터 수집이 필요하며 데이터를 활용한 다년간에 걸친 모형 검증이 필요하여 실제로 활용하기까지 오랜 시간이 걸리지만, 객관적인 측정이 가능하며 다양한 정책의 영향까지 측정해 볼 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 항만 운영 시스템 흐름도를 구축하여 코로나19와 같은 감염병이 항만 운영에 미치는 영향을 분석하고 물동량 및 생산성을 성과 지표로 하여 회복탄력성을 측정한 후, 감염병 대비 격리 정책의 효과 분석을 통해 회복탄력성 향상을 위한 지원 정책의 방향을 알아보는 데 목적

을 두었다. 이러한 시범적인 모형 구축과 시뮬레이션을 통해 모형 구축 및 활용 가능성을 알아보고, 후속 연구를 통한 모형 고도화의 기반을 마련하고자 하였다.

본 연구는 두 가지의 연구 방법론을 활용하여 항만의 회복탄력성 측정 모형 구축을 위한 이론적 기반을 마련하고 모형을 개발함으로써 향후 항만의 회복탄력성 연구 활성화에 기여하고자 한다.

제 2 장

회복탄력성의 정의 및 관련 법·제도

제1절 개요

회복탄력성에 대한 정의는 문헌마다 매우 다양하게 나타나, 아직까지 하나의 통일된 정의로 정립되어 있지 않다고 할 수 있다. 그렇기 때문에 이 장에서는 기존 문헌에서 사용된 회복탄력성의 정의를 비교하여 공통적으로 나타나는 속성을 분석한 후 이를 바탕으로 본 연구에서 사용할 항만의 회복탄력성 개념을 정의하고자 하였다. 이를 위해 먼저 회복탄력성의 일반적인 정의를 살펴보고, 공급사슬 분야와 항만을 포함한 인프라 시스템 관련 분야에 대해 심화된 문헌 연구를 통해 항만의 회복탄력성을 정의하였다.

제2절 회복탄력성의 정의

1. 일반적인 정의

회복탄력성, 즉 리질리언스(resilience)는 라틴어 ‘Resilire’에서 기원한 것으로 ‘되돌아간다(to leap back)’라는 의미이다³⁾. 리질리언스는 탄력성, 복원성, 적응 유연성, 방재력, 회복탄력성 등으로 다양하게 번역되고 있으며, 단어가 내포하는 광범위한 의미를 고려하여 번역하지 않고 그대로 사용하는 경우도 많다. 본 연구에서는 최근 많이 사용하고 있는 ‘회복탄력성’이라는 용어를 사용하였다. 회복탄력성의 개념을 연구에 적용한 것은 사회 생태학 분야의 Holling(1973)이 최초인 것으로 알려져 있다⁴⁾. Holling(1973)은 회복탄력성을 ‘시스템이 변화를 흡수하여 현 상태를 유지하는 능력’으로 정의하였다. 이후 생태학, 심리학, 사회학, 교육학, 건축학, 경영학, 경제학 등 여러 학문 분야에서 회복탄력성 개념이 도입되어 많은 연구가 이루어지고 있으나 완벽하게 정립된 정의는 없으며, 각 분야별로 맞춤형으로 정의하여 사용하고 있다.

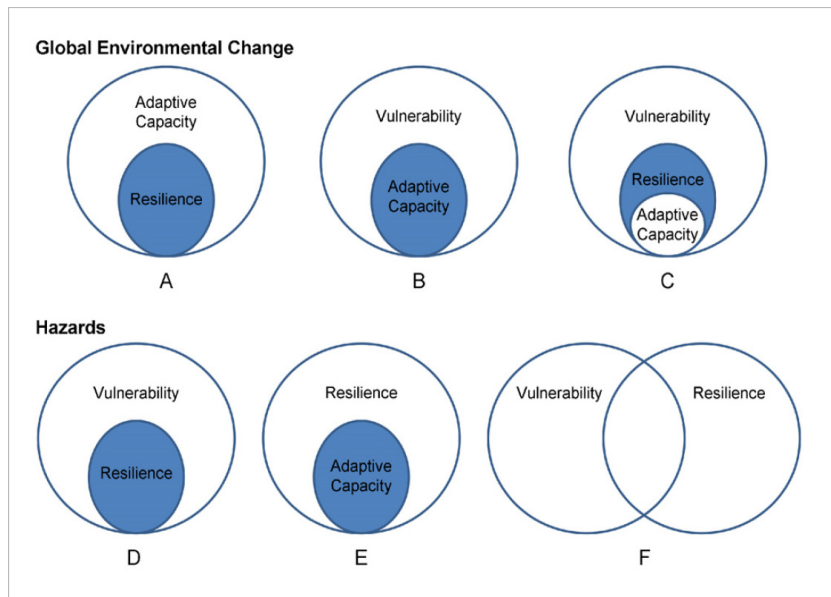
Cutter 등(2008)은 지구환경 분야와 재난 분야의 연구에서 사용하는 취약성(vulnerability)과 회복탄력성, 적응력(adaptive capacity) 간의 관계를 <그림 2-1>과 같이 나타내었다. <그림 2-1>의 A와 C를 살펴보면, 지구환경 분야에서 회복탄력성을 적응력의 하위 개념으로 보는 관점과 적응력을 회복탄력성의 하위 개념으로 보는 관점이 동시에 존재함을 알 수 있다. 또한 D와 F를 살펴보면, 재난 분야에서

3) Omer 등(2012)

4) Chowdhury와 Quaddus(2017)

회복탄력성을 취약성의 하위 개념으로 보는 연구와, 회복탄력성과 취약성이 교집합을 그리는 연구가 동시에 존재하고 있다는 것을 알 수 있다. 마지막으로 A와 E를 비교해 보면, 서로 다른 두 분야에서 회복탄력성과 적응력의 관계가 뒤바뀌어 나타나는 모습을 볼 수 있다. 이는 회복탄력성의 개념이 연구 분야, 연구자마다 다르게 정의될 뿐만 아니라 다른 용어들과 혼동되어 사용됨을 보여 주는 단적인 사례라 할 수 있다⁵⁾.

〈그림 2-1〉 취약성, 회복탄력성, 적응력 간의 관계도



자료: Cutter 등, *A place-based model for understanding community resilience to natural disasters*, 2008, p. 600

5) 유순영, 김성욱, 김진만(2014)

2. 공급사슬 분야의 정의

공급사슬 분야는 최근 회복탄력성 연구가 매우 활발하게 이루어지고 있는 분야 중 하나이다. 이는 2011년 동일본 대지진 후 공급사슬 붕괴 현상이 일어나면서 회복탄력성의 개념이 중요하게 떠올랐기 때문이다. 즉 현대의 공급사슬은 한 나라, 한 지역에만 국한되어 있는 것이 아니라 전 세계에 걸쳐 있는 경우가 대부분이다. 넓게 퍼진 만큼 위험 요소 관리도 힘들어지고, 동일본 대지진에서 나타났듯이 어느 한 부분에 타격이 오면 전체 공급사슬의 기능이 정지될 수 있기 때문에 기능 붕괴를 견디고 빠르게 회복할 수 있는 능력이 중요해졌다.

공급사슬 회복탄력성 개념은 그 복잡성으로 인해 많은 연구마다 그 성격에 맞추어 각각 다르게 정의되고 있다. 대표적인 회복탄력성 정의를 몇 가지 살펴보면 다음과 같다. Rice와 Caniato(2003)는 '예상하지 못한 붕괴(disruption)에 반응하는 능력과 정상적인 공급 네트워크 운영 상태로 회복할 수 있는 능력'으로 정의하였다. Christopher와 Peck(2004)은 '제한된 기능 저하 여부가 있든 없든 장애(disturbance) 및 붕괴 발생 시에도 공급 사슬을 운영할 수 있는 역량'으로 정의하였으며, Gaonkar와 Viswanadham(2007)은 '심각한 붕괴에 따른 여파 후에도 기능을 유지하고 회복하는 공급사슬의 능력'으로 표현하였다. Ponomarov와 Holcomb(2009)은 '계획한 수준의 연결성과 구조 및 기능에 대한 제어를 통해 운영의 연속성을 유지함으로써 예상치 못한 이벤트에 대비하고, 붕괴에 대응하며, 기능을 복구하는 공급사슬의 능력'으로 정의하였다. Pettit 등(2010)은 '공급사슬이 심각한 변화를 견디고 적응하고 성장하는 능력'으로 정의하였으며, Ponis와 Koronis(2012)는 회복탄력성을 '공급사슬이 예상하기 힘든 붕괴 사건을 예측하고 이에

적응하며, 구조와 기능에 대한 제어를 잃지 않아 강건한 운영 상태를 유지할 수 있도록 공급사슬 네트워크를 계획하고 설계하는 능력'으로 표현하였다. Ivanov와 Sokolov(2013)는 '사전에 설정한 성과(또는 허용 가능한 수준으로 조정한 성과)를 달성하면서 동시에 계획된 정책을 유지, 실행 및 복구할 수 있는 능력'으로 정의하며 사전 계획을 그대로 실행하는 것을 강조하였다. Kim 등(2015)은 '노드(node)와 아크(arc) 수준에서 촉발될 수 있는 붕괴를 견디는 네트워크 수준의 속성'으로 정의하였다. 다른 정의들과 약간 이질적인 성격을 갖지만 '붕괴에 견디는 능력'이라는 면에선 동일한 정의이다. Kamalahmadi와 Parast(2016)은 '갑작스러운 기능 장애에 직면할 확률을 낮추고 구조와 기능에 대한 통제력을 유지하여 기능 장애의 확산에 저항하며, 기능 장애를 극복할 수 있는 즉각적이고 효과적인 반응 계획을 통한 복구 및 대응, 그리고 공급사슬 운영을 강건하게 복원할 수 있는 적응 능력'으로 표현하였다. Shin과 Park(2019)은 '피할 수 없는 사건의 결과에 대응하여 기업이 원래의 운영 상태로 돌아가거나 더 바람직한 상태로 이행하기 위한 기업의 능력'으로 정의하였다. <표 2-1>은 각 정의의 원문과 중요한 키워드들을 정리한 것이다.

〈표 2-1〉 공급사슬 회복탄력성의 정의와 키워드

문헌	정의	키워드
Rice와 Caniato(2003)	The ability of SC to react to unexpected disruption and restore normal supply network operations.	react disruption
Christopher와 Peck(2004)	The capability of SCs to operate in the face of disturbances and disruptions with or without a limited decrease in their performance.	disruption decrease

문헌	정의	키워드
Gaonkar와 Viswanadham(2007)	The ability of a SC to maintain, resume and recover operations aftermath of a severe disruptive event.	maintain recover disruptive
Ivanov와 Sokolov(2013)	The ability to maintain, execute and recover (adapt) the planned policies along with achievement of the planned (or adapted, but yet still acceptable) performance.	maintain recover planned
Ponomarov와 Holcomb(2009)	Ability of SC to prepare for unexpected events, respond to disruptions, and restore from them by maintaining continuity of operations at the desired level of connectedness and control over structure and function.	prepare disruption continuity
Pettit 등(2010)	The ability of chain to withstand, adapt and grow in the face of turbulent changes.	adapt change
Ponis와 Koronis(2012)	The ability of SC to proactively plan and design the SC network for anticipating unexpected disruptive events, respond adaptively to disruptions while maintaining control over structure and function and transcending to a robust state of operations.	anticipating disruptive maintain
Kim 등(2015)	A network-level attribute to withstand disruptions that may be triggered at the node or arc level.	withstand disruption
Kamalahmadi와 Parast(2016)	The adaptive capability of a SC to reduce the probability of facing sudden disturbances, resist the spread of disturbances by maintaining control over structures and functions, and recover and respond by immediate and effective reactive plans to transcend the disturbance and restore the SC to a robust state of operations.	adaptive disturbance robust
Shin과 Park(2019)	The ability of a firm to cope with the consequences of unavoidable events in order to return to its original operations or move to a new, more desirable state after being disturbed.	unavoidable return disturbed

자료: 저자 작성

문헌마다 회복탄력성에 대한 정의를 다르게 서술하고 있지만 공통적으로 나타나는 키워드들이 있다. ‘붕괴 또는 방해(disturbance)’와 ‘유지(maintain) 또는 회복(recover)’이다. 완전히 같은 단어는 아니더라도 대부분의 정의에 유사한 키워드들이 등장한다. 즉 공급사슬 관련 문헌에서는 일반적으로 예상하지 못한 공급사슬 기능 붕괴에 대비하고, 붕괴 발생 시 기능을 정상적으로 유지하거나 회복할 수 있는 능력을 회복탄력성으로 보고 있다. 또한 기능이 중단되지 않고 연속성을 유지할 수 있도록 하는 능력도 강조되고 있다.

3. 인프라 시스템 분야의 정의

방재(防災) 개념으로 회복탄력성이 주목받기 시작하면서 대중교통, 상수도, 발전소 등의 사회기반시설이나 공항, 도시 등 사회적으로 중요한 인프라 시스템에 대한 회복탄력성 연구 또한 많이 이루어졌다. 이러한 인프라 시스템은 기능이 정지되면 사회 전반적으로 큰 파장을 불러올 수 있기 때문에 회복탄력성 개념의 도입이 반드시 필요하며, 인프라 시스템의 회복탄력성에 대한 연구 또한 이러한 관점에서 진행되어 왔다.

인프라 시스템 분야에서의 회복탄력성 정의를 살펴보면, 먼저 Fiksel(2003)은 ‘구조와 기능을 유지하면서 기능 저하를 견딜 수 있는 시스템의 능력’으로 정의하였다. Bruneau 등(2003)은 ‘지역 사회 단위에서 위험을 완화하고, 재해가 발생했을 때 그 영향을 억제하며, 혼란을 최소화하고 추가 사건의 영향을 완화하는 방법으로 복구 활동을 수행할 수 있는 능력’으로 표현하였으며, Rose와 Liao(2005)는 ‘잠재적 손실을 방지하기 위해 시스템 중단 시

맞춤형 대응을 시행할 수 있는 능력'으로 나타내었다. Hollnagel 등(2006)은 '기능 변경 및 장애 발생 전후에 시스템의 기능을 조정하여 중대한 사고 발생 후 또는 지속적인 중단이나 스트레스에도 운영 상태를 유지할 수 있는 시스템의 고유 능력'으로 정의하며 중단 없이 운영 상태를 연속적으로 이어 가는 능력을 강조하였다. Rose(2007)는 회복탄력성을 정적인 관점과 동적인 관점으로 나누어 정리하였는데, 정적인 관점에서는 '기능을 유지하는 개체 또는 시스템의 능력'으로, 동적인 관점에서는 '개체 또는 시스템이 심각한 충격으로부터 신속하게 회복하여 목표한 상태로 도달할 수 있는 능력'으로 정의하여 동적인 관점에서의 신속성을 강조하였다. UNISDR(2009)에서는 '위험을 방지하고 흡수, 수용 및 복구하는 시스템의 능력'으로 간단하게 정의하였으며, Jackson (2009)은 '조직이 하드웨어 및 소프트웨어 시스템의 실패 또는 손실의 심각성과 발생 가능성을 완화하고, 변화하는 환경에 적응하여 적절하게 대응할 수 있는 능력'으로 나타내었다. 항만의 회복탄력성에 대해 다른 Omer 등(2012)에서는 '시스템이 원래의 서비스 제공 수준으로 돌아가거나 그에 근접할 수 있도록 충격을 흡수하거나 시스템 붕괴로부터 회복하는 능력'으로 정의하여 회복 측면을 강조하였다. Hossain 등(2019)는 '시스템이 파괴적인 사건의 충격을 흡수하고 미리 정의된 수준의 성능으로 회복할 수 있는 능력을 기술하는 시스템의 본질적 속성'으로 정의하였다. <표 2-2>는 각 정의의 원문과 중요한 키워드들을 정리한 것이다.

〈표 2-2〉 인프라 시스템 회복탄력성의 정의와 키워드

문헌	정의	키워드
Fiksel(2003)	The capacity of a system to tolerate disturbances while retaining its structure and function.	tolerate retain

문헌	정의	키워드
Bruneau 등 (2003)	The ability of community units to mitigate hazards, contain the effects of disasters when they occur, and carry out recovery activities in ways to minimize disruption and mitigate the effectors of further events.	mitigate recovery disruption
Rose와 Liao(2005)	the ability of the system to apply adaptive responses in the face of disruptions in order to avoid potential losses	adaptive disruption avoid
Hollnagel 등 (2006)	The inherent capacity of a system to adjust its functioning prior to or following changes and disturbances so that it can sustain operations even after a major mishap or in the face of continuous disruption or stress.	adjust disturbance sustain
Rose(2007)	Static: The capability of an entity or system to maintain function. Dynamic: The capability of an entity or system to recover rapidly from a severe shock to achieve a desired state.	maintain recover rapidly
UNISDR(2009)	Ability of system to resist, absorb, accommodate and recover from hazard.	resist absorb recover
Jackson(2009)	The ability of organizational, hardware and software systems to mitigate the severity and likelihood of failures or losses, to adapt to changing conditions and to respond appropriately after the fact.	mitigate failure adapt
Omer 등(2012)	Ability of the system to absorb shock as well as to recover from a disruption so that it can return back to its original service delivery levels or close to it.	absorb recover disruption
Hossain 등 (2019)	An intrinsic property of a system that describes the system's ability to absorb the shock of a disruptive event and recover to a pre-defined level of performance.	absorb disruptive recover

자료: 저자 작성

세부적으로는 차이가 있지만 주요 키워드는 공급사슬 분야와 거의 동일하게 나타나며, 붕괴나 기능 장애에 대처한다는 관점에서 원래의 능력을 유지하거나 빠르게 회복하는 능력을 강조하고 있다. 다만 공급사슬 분야에서 나타났던 연속성이나 네트워크 속성의 관점은 보이지 않으며, 흡수(absorb)라는 키워드가 공급사슬 분야보다 많이 등장한다. 또한 동적인 관점에서 신속한 회복을 강조하는 정의가 있는 것도 특징적이다.

4. 항만의 회복탄력성 정의

항만의 회복탄력성을 연구한 문헌은 다수 존재하지만 회복탄력성에 대해 명확히 정의한 것은 Omer 등(2012)이다. Omer 등(2012)은 인프라 시스템 관점에서 회복탄력성을 정의하였으며 충격을 흡수하는 능력, 위협별로 맞춤형으로 대응하는 능력, 빠르게 회복하는 능력을 강조하였다. 본 연구에서는 Omer 등(2012)의 정의를 바탕으로 공급사슬 분야의 관점을 더하여 항만의 회복탄력성을 정의한다. 항만은 사회 인프라 시스템이지만 물류 운송 기능을 담당함으로써 공급사슬상에서 중요한 역할을 하고 있기 때문에 공급사슬의 기능을 유지하기 위한 회복탄력성 관점을 접목하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 두 분야의 정의를 바탕으로 항만의 회복탄력성을 ‘예상치 못한 충격을 흡수하여 기능이 중단되지 않도록 하고, 변화에 적응하여 원래의 기능을 신속하게 회복하는 능력’으로 정의하고자 한다. 여기서 중요한 키워드는 ‘흡수’, ‘적응’, ‘회복’이다. 충격으로 인해 항만의 기능이 정지되어 공급 지장이 발생하면 공급사슬 전체가 중단되며 물류 기능 마비로 인해 국가 경제적으로 큰 파장

을 불러일으킬 수 있기 때문에 충격을 흡수하여 기능을 연속적으로 이어 나갈 수 있는 능력을 강조하였다. 그다음으로 거의 모든 회복탄력성 정의에 등장하는 ‘충격에 빠르게 적응하고 원래의 기능을 회복하는 능력’을 포함하였다. 본 연구에서는 이 정의를 바탕으로 항만의 회복탄력성을 측정할 수 있는 두 종류의 모형을 설계하고자 한다.

제3절 회복탄력성 관련 법·제도 현황

1. 현행 법률·제도 분석

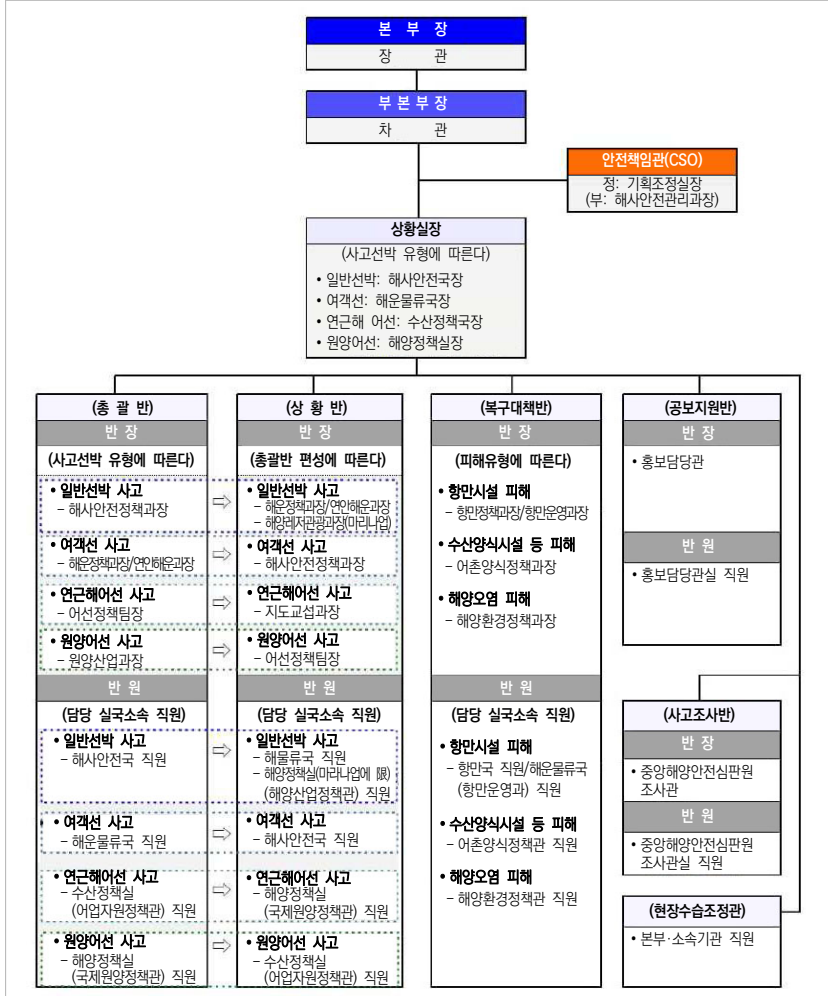
1) 해양수산부 국가 안전관리 집행계획

「해양수산부 국가 안전관리 집행계획」(이하 안전관리 집행계획)은 「재난 및 안전관리 기본법」 제22조에 따라 수립되는 「국가안전기본계획」의 해양수산부 소관 업무에 관한 연도별 실제 집행계획이다. 해당 계획에서는 해양 선박 사고나 지진, 풍수해와 같은 해양수산 분야 주요 재난에 대한 관리 주체, 관리 체계, 관리 대책 등에 관한 구체적인 계획을 수립하고 있다.

「안전관리 집행계획」에서는 해양수산 분야 주요 재난으로 해양 선박 사고, 해양 오염 사고, 적조, 조수, 지진(지진해일 포함), 풍수해(태풍 등)를 들고 있으며, 유형별로 관리 주체를 지정하고 있다. 또한 재난 시의 중앙사고수습본부 구성과 운영에 관한 계획도 마련하고 있다. 지진이나 풍수해의 경우 행정안전부 소관이므로 따로 총괄반이나 상황반이 편성되어 있지 않으나 항만시설 피해는 항만정책과장/항만운영과장이 복구대책반에 편성되어 담당하게 되어 있다.

「안전관리 집행계획」에 관한 정책 추진은 바다에서 국민의 생명·재산을 보호하는 것을 최우선으로 하여 예방-대비-대응-복구의 네 단계에 관한 정책 방향을 설정하였다. 이 중 회복탄력성과 관련이 깊은 것은 대응-복구 단계이다. 대응 단계는 신속한 사고 수습을 위한 해양재난 현장 대응력 강화를 목표로 초기 상황 대응 역량 제고, 신속한 현장 대응 기반 조성 등을 우선적인 정책 추진 방향으로 설정하고 있다. 복구 단계에서는 체계적인 복구 추진으로 안정적 해양수산 재난 관리 체계를 지속적으로 유지하는 것을 목표로 체계적 복구 지원, 유사 사고 발생에 대비한 모니터링, 신속한 피해 집계 및 복구 지원 추진을 주요 정책 방향으로 설정하고 있다.

〈그림 2-2〉 해양수산부 중앙사고수습본부 체계도



자료: 해양수산부, 해양수산부 2020년 국가안전관리 집행계획(안), 2019, p.6

〈그림 2-3〉 해양수산부 안전관리 정책 추진 방향

정책방향		바다에서의 국민 생명·재산 보호 최우선
예 방	형식적인 교육·점검을 탈피한 국민참여 해양사고 예방활동 추진	
	■ 해양재난 예방을 위한 종사자 및 대국민 교육 시행 ■ 재난 위험시설 및 지역에 대한 실효성 사전점검 실시 ■ 해양재난 대비 기반시설 보강 및 정비 추진	
대 비	현장중심 훈련과 매뉴얼 개선으로 철저한 재난 대비체계 유지	
	■ 해양재난 현장훈련을 통해 대응능력 향상·개선 ■ 실제 재난상황에서 작동하도록 위기관리 매뉴얼 점검·개선 ■ 빅데이터 활용 해양안전 기술 및 예·경보 시스템 구축	
대 응	신속한 사고수습을 위한 해양재난 현장 대응력 강화	
	■ 초기상황 대응역량 제고 및 신속한 상황전파체계 구축 ■ 신속한 현장대응 기반조성 및 관계기관 협업 강화 ■ 재난발생 시 신속한 비상기구 가동을 통한 총력대응	
복 구	체계적인 복구 추진으로 안정적 해양수산 재난관리체계 지속유지	
	■ 체계적 복구지원으로 철저한 사후관리 ■ 유사사고 발생에 대비한 사고대응 모니터링 추진 ■ 신속하고 정확한 피해 집계 및 복구지원 추진	

자료: 해양수산부, *해양수산부 2020년 국가안전관리 집행계획(안)*, 2019, p.10

「안전관리 집행계획」에서 규정하고 있는 재난 분야 중 항만 기능 위협 요인과 관련이 깊은 것은 지진과 풍수해이다. 이에 대한 주요 대책으로 지진의 경우 비상대책반 가동 등의 위기 대응 체계 유지, 실무 매뉴얼 관리, 위약시설물 점검·정비 등 지진 대응 역량 강화를 들고 있으며, 국가 어항 관리·지진 대응 역량 강화를 주요 사업으로 하여 성과 목표를 설정하였다. 풍수해에 대해서는 항만·어항시설 확충 및 보강, 연안 정비 등 재해 예방 사업 및 재난 대응 개선을 위한 위기 관리 매뉴얼 관리를 주요 대책으로 설정하였으며, 연안 정비 사업·국가 해양관측망 구축 및 운영·항만시설 유지·보수를 주요 사업으로 하여 정량적 성과 목표를 설정하고 있다.

〈표 2-3〉 지진·풍수해 대비 주요 성과 지표

유형	주요 사업명	성과 목표	2020년 목표
풍수해·조수	총괄 목표	풍수해 인적·물적 피해 최소화	
	연안 정비 사업	34개 사업지구 정비율	49%
	국가 해양관측망 구축 및 운영	실시간 고조정보 수집률	97.8%
	항만시설 유지·보수 등	이용자 만족도	79%
지진 및 지진해일	총괄 목표	지진 계측 시스템 오류 제로화	100%
	국가 어항 관리	유지·보수 및 안전시설 신규 설치, 보수	12,807개소
	지진 대응 역량 강화	모의 훈련 실적	1회

자료: 해양수산부, *해양수산부 2020년 국가안전관리 집행계획(안)*, 2019, p.12 참고 저자 재작성

또한 「안전관리 집행계획」에서는 재난 분야 위기 관리 매뉴얼 작성 및 관리 현황을 보여주고 있는데, 지진의 경우 해양수산부 유관 기관은 지방청 11개, 항만공사 4개, 어업관리단 3개, 해사고 2개, 국립수산물과학원 등 22개가 작성되어 있으며 풍수해의 경우 지방청 11개, 항만공사 4개, 어업관리단 3개, 국립수산물과학원 등 19개가 작성되어 있다.

「안전관리 집행계획」에서 주로 다루는 내용은 지진·풍수해 등에 자연재해에 관한 내용이며, 새로운 위협 요인으로 떠오르고 있는 사이버 테러나 감염병 등에 대해서는 규정되어 있지 않다. 또한 예방-대비-대응-복구의 네 단계를 규정하고 있으나 대비에 대한 성과 지표만을 규정할 뿐 시설의 대응 및 복구 능력을 나타내는 회복탄력성의 평가 체계 및 성과 지표에 대한 내용은 포함되어 있지 않다.

2) 비상사태등에 대비하기 위한 해운 및 항만 기능 유지에 관한 법률

「비상사태등에 대비하기 위한 해운 및 항만 기능 유지에 관한 법률」(이하 해운항만기능유지법)은 해운·항만 기능에 큰 장애가 발생하였을 때 기능을 유지하기 위한 목적으로 2019년 1월 제정되어 2020년 1월 시행한 법률이다. 항만 기능에 위기가 오는 상황을 상정하였다는 점에서 항만의 회복탄력성과 관련이 있다고 볼 수 있다.

「해운항만기능유지법」에서는 ‘비상사태등’을 “전시·사변 또는 이에 준하는 비상사태 및 해운업체의 파산 등 해운 및 항만 기능에 중대한 장애가 발생하여 수출입 화물의 수송이 정지되거나, 항만에서의 선박 입항 및 출항이 불가능하여 국민 경제에 심각한 피해가 예상되는 경우”로 정의하고 「비상대비자원 관리법」에 따른 비상사태, 「항만법」에 따라 항만정책심의위원회가 정한 경우, 그 밖에 대통령령으로 정하는 중대한 장애가 발생한 경우를 지정하고 있다.

「해운항만기능유지법」에 따르면 해양수산부 장관은 10년 단위의 비상사태 등 대비 해운·항만 기능 유지에 관한 기본계획(이하 기본계획)을 5년마다 수립하도록 정해져 있다. 기본계획에는 해운·항만 기능 유지를 위한 중장기 정책 방향, 장래 물동량 수급 및 해운·항만 환경에 관한 전망, 국가필수선박 지정 및 항만운영협약 체결 등 기능 유지에 필요한 제도 및 지원 방안 등이 포함되어야 한다.

또한 「해운항만기능유지법」에서는 비상사태 시 기능 유지를 위해 국가필수선박 제도와 항만운영협약 제도를 규정하고 있다. 국가필수선박 제도는 비상사태 등이 발생하는 경우 국민 경제에 긴요한 물자와 군수물자를 수송하기 위하여 국제 선박 및 공공기관의 선박을 필수선박으로 지정하는 제도이며, 항만운영협약은 비상사태 등이 발생

하는 경우 선박의 입항·출항 및 화물의 하역 등 항만 기능을 유지하기 위하여 예선업 등록자, 항만 하역 사업 등록자, 항만운송 관련 사업 등록자와 협약을 체결하도록 한 제도이다.

「해운항만기능유지법」은 비상사태가 일어나 항만 운영에 위기가 발생할 경우 완전히 정지되지 않고 최소한의 수준으로라도 기능을 이어 나갈 수 있게 사업자를 지정하도록 한 법이긴 하나, 회복탄력성의 본질 중 하나인 위기 후의 기능 회복에 대한 내용은 포함되어 있지 않다. 더군다나 회복탄력성의 중요한 요인인 강건성을 확보하기 위해 항만시설물이 초기 안정적인 구성의 변경 없이 급한 변화에 저항할 수 있는 기능을 갖추고 있는지에 대한 평가 체계도 갖추어져 있지 않다.

3) 해양수산부 중앙사고수습본부 구성 및 운영에 관한 규정

「해양수산부 중앙사고수습본부 구성 및 운영 등에 관한 규정」(이하 수습본부 운영 규정)은 「재난 및 안전관리 기본법」 제15조의2에 따라 재난 발생 시 중앙사고수습본부 운영에 관해 필요한 사항을 규정하고 있으며, 재난의 수습 및 대응, 복구를 위한 활동을 규정하고 있다는 점에서 회복탄력성과 관련이 있다.

「수습본부 운영 규정」에서는 재난을 「재난 및 안전관리 기본법」 제3조 제1호 가목의 자연재난과 나목의 사회재난으로 규정하고 수습 및 대응, 복구 활동에 대한 정의를 내리고 있다. 중앙사고수습본부는 해양수산부 소관의 재난 및 사고가 발생하여 체계적인 수습이 필요한 경우 설치되며, 재난 및 사고 피해 상황 관리·복구 계획 수립을 위한 피해 조사 및 복구안 마련 등의 역할을 수행하나 항만시설에 위기를 줄 수 있는 지진이나 풍수해의 경우 행정안전부 소관이므로 수

습본부나 상황실의 구성에 포함되어 있지 않다. <표 2-4>는 재난 및 사고의 수습 관리 주요 업무를 서술한 것이다.

〈표 2-4〉 재난 및 사고 수습 관리 주요 업무

순서	조치 목록	성과 목표
1	평시 재난 및 사고 모니터링	- 119 등 재난 및 사고 상황 모니터링 ※ 행정안전부 중앙재난안전상황실(해양경찰청, 소방청) 등과 협조 체계 구축 - 재난상황실 설치·운영(법 제18조제3항)
2	재난 및 사고 발생 중앙사고수습본부 설치	- 재난 및 사고 상황 접수, 초동 보고 - 재난 및 사고의 위험 수준을 고려하여 수습본부 설치 여부 판단 - 수습본부 상황실 설치 - 수습본부 상황실 근무 요원 근무 명령 (필요시 관계 부처 등 파견 요청) - 응급 구조·구급 등 사고 수습 초동 대응
3	상황실 가동	- 상황근무자 편성 및 배치, 근무 요령 교육 - 상황전파기관과 비상연락 체계 확인·점검: 수시 상황 전파 - 재난 응급 복구에 필요한 장비·물자 확인
4	재난(사고) 발생 상황 보고·전파	- 재난(사고) 발생 시 대통령실, 행정안전부, 관계 행정기관, 지자체, 특별행정기관에 신속한 상황 보고 및 전파(서면, 전화)
5	상황 판단 회의 (자체 위기 평가 회의) 개최	- 상황의 심각성, 시급성, 확대 가능성, 전개 속도, 파급효과 파악 - 국내외 여론 등 고려 위기경보 발령 및 대응·대책 마련 - 범정부 차원의 조치가 요구되는 수준의 심각경보 발령 시 행정안전부와 사전 협의(매뉴얼에 따라)
6	응급 조치 대응	- 주민 대피·구호 계획 - 주민 생활 필수 기능(전기·수도·가스 등) 응급 조치 - 통행 제한, 위험구역 설정 등 대응
7	현장 사고수습본부 가동	- 특별행정기관을 통한 지역사고수습본부 가동 - 유관 기관, 지자체, 특별행정기관 담당자 파견 요청 - 사고 수습, 응급 복구, 구조·구급 지휘(지역간급구조통제단 협조) - 현장 상황 수습본부·지자체·관련 기관 보고·전파 - 관련 공무원, 전문가 파견
8	재난 상황 언론 홍보·대응팀 가동 및 취재 지원	- 재난(위기) 상황 전파 및 지원 요청(부처 대변인실) - 재난 상황 언론 브리핑 실시 - 현장 대변인 지정·운영 - 언론사 취재 활동 지원

순서	조치 목록	성과 목표
9	중앙재난안전 대책본부 운영 협조 요청	- 범정부적 대응이 필요한 재난인 경우, 위기 관리 매뉴얼에 따라 중앙재난안전대책본부 설치 요청(행정안전부) - 재난사태 선포 및 특별재난지역 선포 필요성 검토 - 범정부적 재난 및 사고 수습·대응

자료: 국가법령정보센터(검색일 2020.9.5)

「수습본부 운영 규정」은 재난 상황 시 긴급 대응 조직을 빠르게 구성할 수 있게 해 주는 규정이라는 점에서 회복탄력성 향상에 큰 의의를 가지나, 복구 활동을 구체적으로 규정하고 있지 않으며 「안전관리 집행계획」과 유사하게 회복탄력성에 대한 평가 체계 및 성과 지표에 대한 내용은 포함되어 있지 않다.

2. 시사점

이상과 같이 해운·항만 분야에서 위급 상황에 대처하는 법적 조치 사항들에 대해 살펴보았다. 특히 2020년 1월부터 시행한 「해운항만 기능유지법」은 그동안 사고 발생에 따른 수습에 중점을 둔 계획과 달리 해운 및 항만의 기능을 유지하기 위한 최소한의 제도를 준비하고 있다는 점에서 항만의 회복탄력성과 유사한 성격을 가진다고 할 수 있다.

하지만 「해운항만기능유지법」에서 정하고 있는 비상사태 등 대비 해운·항만 기능 유지에 관한 기본계획, 국가필수선박 제도와 항만운영협약 제도 등에서도 본 연구의 핵심 주제인 회복탄력성에 대한 내용은 부족하다. 회복탄력성은 예측 불가능한 사건·사고의 발생에 대비하여 신속하게 회복하는 것만을 의미하기보다는 신속하게 회복하기 위해 준비해야 하는 것에 대한 내용으로, 회복탄력성 평가 체계

및 성과 지표 내용을 포함함으로써 예측 불가능한 사건·사고에 대한 항만시설물의 강건성을 확보할 때 보다 실효성 있는 회복력을 가질 것이다.

앞 절의 항만 회복탄력성 정의를 다시 살펴보면, 크게 충격 흡수, 변화 적응, 신속한 기능 회복의 세 가지로 구성되어 있음을 알 수 있다. 기존의 법·제도 중 「안전관리 집행계획」은 예방-대비-대응-복구의 네 단계 정책 추진 방향을 설정하여 회복탄력성의 정의와 일치하는 면이 있으나, 성과 지표의 내용은 예방과 대비 단계에 집중되어 대응과 복구 단계에 대한 성과 지표 설정이나 평가 체계와 관련한 내용은 없다. 또한 지진이나 풍수해와 같은 자연재해에 대한 대비에 내용이 집중되어 있어, 서론에서 예를 든 코로나19와 같은 다른 위협 요인에 대한 내용이 부족하다. 「해운항만기능유지법」은 비상사태가 발생했을 때 해운과 항만의 기능이 중단되지 않도록 규정한 법이라는 점에서 의의가 있으나 최소한의 기능을 유지할 수 있도록 하는 제도만 규정하였을 뿐 기능 회복 내용이 포함되어 있지 않다는 점에서 한계가 있다. 「수습본부 운영 규정」은 위기 발생 시 신속한 기능 회복을 위한 수습본부 설치에 대해 규정하고 있으나 관리를 위한 수습본부 설치 외에 실제적인 복구 활동 내용은 구체적으로 정해져 있지 않다.

위 내용을 종합해 볼 때, 현재의 법·제도는 항만 회복탄력성의 일부 내용과 연관되어 있을 뿐 전체적인 내용을 아우르는 제도는 아직 마련되어 있지 않다. 따라서 예방-대비-대응-복구를 종합적으로 다루는 제도를 마련할 필요가 있으며, 이를 위해서는 먼저 자연재해 외의 중요한 위협 요인에 대해서도 세부적으로 규정해야 할 것이다. 위협 요인별로 매뉴얼을 작성하는 등 세부 활동 계획을 마련하는 것이

필요하다. 현재는 국가 전체적인 활동 계획은 없으며, 일부 항만 운영사들이 자체적으로 위기 요인을 규정하고 이를 완화하기 위한 활동을 관리하고 있다. <표 2-5>는 항만 운영사에서 사용하는 위기 관리 양식을 나타낸 것이다. 운영사 자체적으로 위협 요인(리스크)에 대해 정의하고 위기 관리를 위한 계획 수립, 위기 관리 전후의 위험도 비교, 향후 수행해야 할 위기 관리 활동 등을 관리하고 있다.

<표 2-5> 운영사 위기 관리 양식

Risk Category	Risk Title	Risk Description	Risk Owner	Situation before Mitigation			
				Inherent Risk Impact (1-5)	Inherent Risk Likelihood (1-5)	Inherent Risk Rating	
Existing Situation				Further Action Required			
Existing Key Mitigation Activities	Managed Risk Impact (1-5)	Managed Risk Likelihood (1-5)	Managed Risk Rating	Mitigation Plan	Mitigation Plan Owner	Targeted Completion Date	Progress of Mitigation Plan
Change in Risks (from Last Submission)				Reason of change in Risk Rating			

자료: 부산항 A 컨테이너 터미널 운영사 내부자료 참고하여 저자 작성

운영사의 위기 관리는 사업상의 리스크 관리 측면에서 시행하는 것이며 자연재해, 감염병 같은 거대한 위협 요인에 대한 관리와는 거리가 있다. 따라서 위와 같은 위기 관리 양식을 발전시켜 정부 차원에서 항만에 대한 위협 요인과 예방 및 복구 계획을 수립하는 등 관리 체계를 마련하여 항만의 회복탄력성을 향상시킬 필요가 있다.

또한 예방 및 대비 체계만을 평가하는 것이 아니라, 항만의 회복탄력성에 대한 평가 체계를 구축하여 회복탄력성 향상 활동을 독려하는 것이 필요하다. 회복탄력성 향상을 위해서는 먼저 현재의 회복탄

력성을 측정하는 것이 필요하기 때문이다. 측정을 통하여 현재 취약한 부분을 찾아내야 향후 회복탄력성 향상 및 위기 시 행동 매뉴얼 작성 등이 가능할 것이다. 따라서 본 연구에서는 향후 정책적으로 활용할 수 있는 회복탄력성 측정 모형을 구축하는 것을 목표로 한다.

제3장

모형 구축을 위한 항만 위기 사례 분석

제1절 개요

본 장에서는 항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 대해 논의하기 전에 다양한 항만 위기 사례를 분석하여 항만의 기능을 위협하는 요인에는 어떠한 것들이 있으며, 각 요인들이 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알아보려고 한다. 먼저 가장 대표적인 위협 요인인 태풍, 지진과 같은 자연재해 사례에 대해 알아보고, 최근 큰 문제가 되고 있는 사이버 테러와 코로나19와 같은 감염병 사례를 분석하였다. 분석한 내용은 추후 회복탄력성 측전 모형 구축 단계에서 각 위협 요인들이 항만 운영에 미치는 영향에 대한 인과지도를 구축하기 위한 기반으로 활용할 것이다.

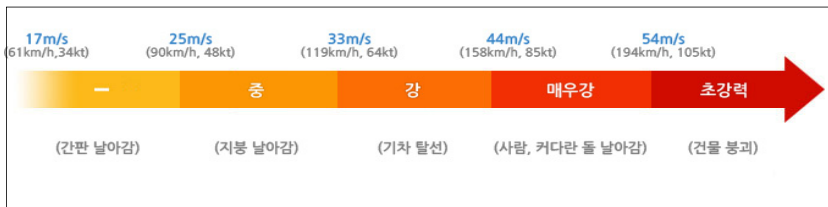
제2절 자연재해

1. 국내 사례

1) 태풍 매미⁶⁾

2003년 9월 12일 한반도에 상륙한 태풍 매미는 최대 풍속 51.1 m/s로, 기상 관측 이래 가장 강력한 바람을 동반하여 영남권을 강타해 부산항 및 경남 동부 지역 해안에 막대한 피해를 입힌 대형 재난이었다. 태풍의 강도는 중심 부근의 최대 풍속에 따라 단계별로 분류되는데 태풍 매미의 경우 매우 강력한 수준인 44m/s에 가까운 강도였다.

〈그림 3-1〉 태풍 강도별 분류

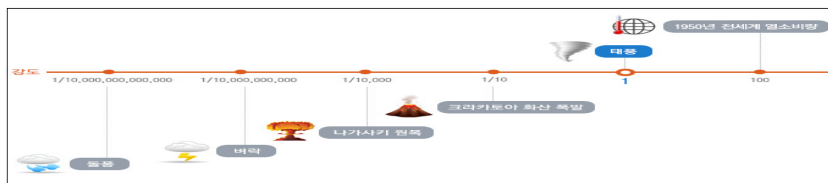


자료: 기상청(검색일: 2020. 6. 22)

태풍의 위력과 일본 나가사키에 투하된 원자폭탄의 강도를 비교하자면, 태풍이 원자폭탄보다 만 배 정도 큰 파괴력을 가지고 있다.

6) 태풍 매미는 우리나라에 상륙하기 전 일본 오키나와현 미야코섬을 통과하며 1,300여 동의 주택을 파손하고 160억 엔의 재산 피해를 입혔음. 그러나 본 연구에서는 자연재해를 항만 및 인프라 기능 정지 측면에서 살펴보고자 태풍 매미를 항만 부문에 막대한 손실을 초래한 국내 사례로 분류함.

〈그림 3-2〉 태풍의 파괴력 비교



자료: 기상청(검색일: 2020. 6. 22)

부산항 신감만부두에서는 태풍 매미로 인해 총 7기의 안벽 크레인 중 6기가 파손됐는데, 그중 106호기가 220m를 이동해 105기와 충돌, 104기 또한 이동하면서 103, 102, 101호기까지 연쇄 충돌하여 전도 파손되었다. 자성대부두 또한 크레인 2기가 전복되는 피해가 발생하였다.⁷⁾

한 기당 약 908톤이나 되는 크레인이 태풍으로 인해 전도된 것은 매우 큰 항력(drag)과 피칭 모멘트(pitching movement)가 발생한 것으로 볼 수 있는데, 이는 크레인을 고정하고 있는 핀 컵과 컵 주변의 콘크리트 파손을 야기했고 전도 방지를 위해 크레인을 지지하고 있던 육상 측 앵커 두 개와 해안 측 앵커 네 개가 뚫혀 결과적으로 크레인 전도로까지 이어진 것으로 조사되었다.⁸⁾

7) 한국해양수산개발원(2012), p. 17.

8) 한국해양수산개발원, 앞의 책, p. 19.

〈그림 3-3〉 태풍 매미에 따른 부산항 북항 터미널 피해 모습



자료: 1. 동아일보(검색일 2020.6.22.)
2. 부산일보(검색일 2020.6.22.)

또한 당시 건설 중이었던 부산항 신항도 준설토 투기장 호안, 부두, 잔교, 동방파제 일부 유실 등의 피해를 입었으며, 피해액은 약 238억 원에 달했다.

〈표 3-1〉 태풍 매미로 인한 부산항 신항 피해 내용

피해 지역	피해 내용	피해 규모	피해액
1, 2공구 호안	사석 유실	57만 m ²	159억 원
	오탁방지막 및 기타 유실	-	
민자 부두	매립토 및 재하성토 유실	35m ²	37억 원
	장비 파손	PBD 6대 등	
연결 잔교	오탁방지막 유실	40SPAN	5억 원
서방파제 및 작업 부두	진입 도로 포장 파손	20m	-
	작업 부두 B 구간 파손	50m ²	2억 원
동방파제	두부 상치 콘크리트 파손	20m	-
	두부 T.T.P(32톤) 유실	200개	40억 원
용원수로	수로 매몰	5만 m ²	4억 원

자료: 한국해양수산개발원(2012) 자료를 바탕으로 재구성

당시 부산지방해양수산청이 집계한 항만시설 피해 사례는 총 86건으로 피해 금액은 1,063억 3,400만 원이었다. 항만별로는 부산 북항이 크레인 전복 및 궤도 이탈로 576억 4천만 원, 신선대부두와 감만부두 운영 건물 파손 등 26건에 618억 9,100만 원의 피해가 발생하여 전체 피해액의 58.2%를 차지하였다. 또한, 부산항 신항의 준설토 투기장 호안과 동방파제 일부 유실 등 5건에 대한 피해 금액은 237억 6,700만 원, 감천항은 중앙부두와 서방파제가 파손되는 등 4건에 30억 1,400만 원의 피해를 입었다. 한편, 피해 복구 비용은 북항의 신감만부두 및 자성대부두의 크레인 대체 576억 4천만 원을 비롯해 총 1,251억 4천만 원으로 전체 피해 금액의 1.18배에 달했다.⁹⁾

2) 포항 지진

2017년 11월 15일 경북 포항시 북구 흥해읍 남송리에서 발생한 포항 지진은 규모 5.4로 1978년 대한민국 지진 관측 이래 2016년 경주 지진(규모 5.8)에 이어 두 번째로 강력한 지진이었다.

포항지방해양수산청의 조사 결과에 따르면 포항 영일만항, 포항구항 및 신항 등 12곳에 피해가 발생했다.¹⁰⁾

〈표 3-2〉 포항 지진으로 인한 포항항 피해 내용

피해 시설	피해 내용	규모
포항 영일만항 일반부두	에이프런 콘크리트 포장 이격 및 단차	-
	야적장 아스콘 포장 균열	-
포항 영일만항 역무선부두	에이프런 콘크리트 포장 이격 및 단차	-

9) 한겨레(2003. 9.18).

10) 한국해양수산개발원(2017), p. 14.

피해 시설	피해 내용	규모
포항 영일만항	상치 콘크리트 이격(시점부 및 제두부 등)	-
어항방파제 및 파제제	파제제 접속부 침하 및 이격	-
포항 영일만항 어선물양장	상치 콘크리트와 콘크리트 포장 이격	-
포항구항 화물부두	상치 콘크리트와 아스콘 포장 이격 및 균열	-
포항구항 여객부두	에이프런 구간 및 측구 접속부 이격	-
포항구항 해경부두	상치 콘크리트와 콘크리트 포장 이격	-
포항신항 10번 및 11-1번 선석	상치 콘크리트 돌출 및 이격	-
	레일 침하 및 이격	20m
포항구항 여객선 터미널 (건축물 연면적 2,916.06m ²)	내벽 균열	500m ²
	내벽 대리석 타일	40m ²
	바닥재 균열	300m ²
	외벽 유리(양면) 파손	8m ²
	천장 내장재(철재) 파손	60m ²
	주차장 바닥 균열	100m
포항신항해운센터 (건축물 연면적 6,482m ²)	내벽 균열	-
	천장 및 벽체 내장재 파손	200m ²
포항항 서방파제 등대	내외벽 벽체 균열	-
포항지방해양수산청 청사	1~5층 내벽 및 계단 균열	-
	1~5층 타일, 몰딩, 천장재 및 유리	-
	아스콘 균열	50m ²

자료: 한국해양수산개발원(2017) 자료를 바탕으로 재구성

2. 해외 사례

1) 한신(阪神)·아와지(淡路) 대지진

1995년 1월 17일, 규모 7.2 강도로 발생한 한신·아와지 대지진은 고베시를 비롯해 효고현 남동부의 인구 과밀 지역과 아와지섬에 최대 진도 7, 오사카에서 진도 6.4를 기록했다. 이는 2011년 동일본 대지진 이전까지 일본에서 발생한 지진 중 시설에 가장 큰 피해를 준

지진이다. 이로 인해 항만에서는 안벽 침하, 방파제 액상화, 하역 기기 전도, 안벽 이동에 따른 선석 크레인 손상 등의 피해가 발생했으며 배후 단지 또한 지반 침하, 도로 액상화로 인한 교통 기능 마비, 전기설비 피해로 인한 항행 지원 시설 마비, 원유 저장 탱크의 본체 균열에 따른 유독가스 유출 사고 등이 발생했다.¹¹⁾

이때 중단된 컨테이너 하역 작업은 긴급 공사를 통해 2개월 후 재개되었지만 고베항의 완전 복구까지는 약 2년이 소요되었다.¹²⁾ 효고 현 추계 결과에 따르면, 한신·아와지 지진에 따른 전체 피해액은 9조 9,268억 엔이며, 이 중 항만과 관련된 손실 규모는 간접적인 피해를 제외한 직접 피해 규모만 해도 약 1조~1조 400억 엔에 달하는 것으로 추산되었다.

〈표 3-3〉 한신·아와지 대지진에 따른 피해 규모

구분	주요 내용
날짜	1995년 1월 17일
규모	리히터 규모 7.2
깊이	15km
진앙	아와지섬
피해 지역	일본 고베시, 오사카시, 니시노미야시, 아시야시 등
인명 피해	6,434명 사망, 3명 실종, 43,792명 부상
총피해액	약 10조 엔(당시 가치)

자료: 이민규 등, *항만 shutdown(공급지장)의 파급효과 분석*, 2014, p. 26

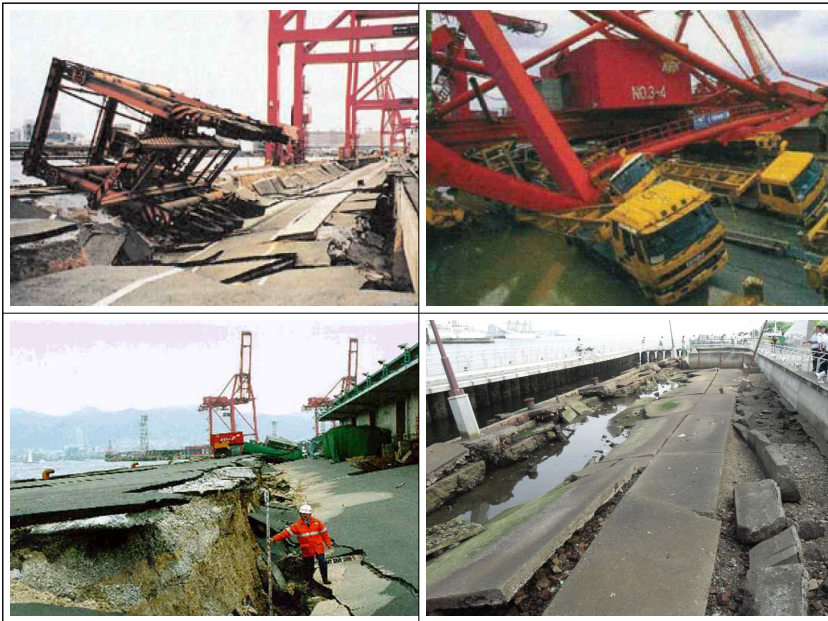
한신·아와지 대지진은 당시 서일본 관문항으로서 일본 수출입의 10%를 처리하던 고베항의 물류 기능을 마비시켜 수출입 화물은 오사카, 후쿠오카, 이세, 동경 등으로 유출됐으며 항만 폐쇄에 따른 원자

11) 한국해양수산개발원, 앞의 책, p. 41.

12) 현지 관계자에 따르면, 당시 이탈한 컨테이너 물동량을 회복하는 데 20여 년이 소요되었다고 함.

재 수입 중단 및 제품 출하 정지 등 직간접적 경제 피해 또한 상당했다. 고베항 피해 구간은 약 116km에 달했으며 대형 정박시설 239개를 포함한 23개의 화물 인양 도크 파손, 배후 창고설비, 야적장, 하역 장비 및 민간 창고 등이 복구가 불가할 정도로 피해를 입었고 이는 일본의 국내외 물류산업에도 영향을 미쳐 고용 불안과 같은 사회적 문제를 초래하기도 했다.¹³⁾

〈그림 3-4〉 한신·아와지 대지진으로 인한 고베항 피해 모습



자료: 한국해양수산개발원, *지진에 대비한 항만기능 유지의 필요성과 추진방안*, 2017, p. 41

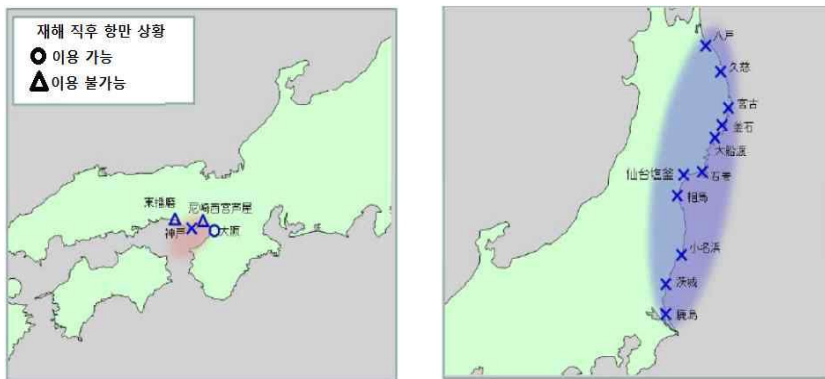
2) 동일본 대지진

2011년 3월 11일 발생한 동일본 대지진은 일본 기상청 관측 사상 최대 규모(진도 9.0)의 지진으로 기록되고 있다. 당시 미야기현 구리

13) 이민규 등(2014), p. 27.

하라시(栗原市)에서 진도 7.0, 미야기현(宮城県), 후쿠시마현(福島県), 이바라키현(茨城県) 및 도치기현(栃木県) 등 4개 현에서 진도 6.0 이상이 관측되었으며, 이로 인해 아오모리현 하치노헤항에서부터 이바라키현의 가시마항까지 이르는 일본 동부 지역의 항만 기능이 일시적으로 전면 중단되었다. 피해액은 약 4,138억 엔으로 추산되었다. 또한 한신·아와지 대지진 때 고베항 대신 오사카항 등 대체 항만을 이용했던 사례와 비교하면 동일본 대지진 때는 태평양 측의 중요 항만 14개, 지방 항만 17개의 기능이 전면 마비된 바 있으며, 이로 인해 일본 내 공급사슬 체계가 무너지는 결과가 초래되었다.¹⁴⁾

〈그림 3-5〉 한신·아와지 대지진 및 동일본 대지진의 피해 항만 비교



자료: 한국해양수산개발원, *지진에 대비한 항만기능 유지의 필요성과 추진방안*, 2017, p. 38

〈표 3-4〉 동일본 대지진으로 인한 주요 항만의 피해 내용

구분	항만	주요 피해 상황	침수고(m)
아오모리현 (靑森県)	하치노헤항 (八戸港)	- 북방파제(총길이 3,500m) 일부 이동(1,875m) 및 수몰 - 해일로 인한 방파제 개구부 및 인공섬(포트 아일랜드) 지구 침식 - 지진 진동에 따른 경미한 피해	5.4~8.4

14) 한국해양수산개발원(2017), p. 38.

구분	항만	주요 피해 상황	침수고(m)
이와테현 (岩手県)	구지항 (久慈港)	• 해일에 따른 구조물의 경미한 피해 • 지진 진동으로 인한 잔교 일부 변형	8.2~8.7
	가마이시항 (釜石港)	• 남측 방파제 50% 및 북측 방파제 케이스 80%의 수몰과 이동 • 지진 진동으로 인한 스카(須賀)지구 제방 및 하역 야드 경계 부분의 단차(10~20cm) • 단층운동으로 인한 항만 전체의 약 50cm 지반 침하	6.6~9.1
	오후나토항 (大船渡港)	• 수몰(방파제 일부 제외) • 잔교식 안벽 및 하역지 일부 변형 • 단층운동에 따른 항만 전체적 지반 침하	9.5
미야기현 (宮城県)	이시노마키항 (石巻港)	• 부두 액상화로 인한 하역 야드 포장 균열 • 해일에 따른 야드 침하	3.3~5.0
	센다이 시오가마항 (仙臺塩釜港)	• 대부분의 안벽 상태 양호 • 가가마쓰(高松)부두의 경우, 재해 발생 직후부터 긴급 화물 수송 개시 • 다카사고(高砂) 일부 안벽 에이프런 및 하역 지대의 침하	5.7~14.5

자료: 한국해양수산개발원, *지진에 대비한 항만기능 유지의 필요성과 추진방안*, 2017, p. 37~38

〈그림 3-6〉 동일본 대지진으로 인한 주요 항만의 피해 모습



크레인 붕괴(가시마항)	컨테이너 화물 붕괴(센다이항)
	
에이프런 배후 피해(이바라키항)	안벽 구조 변형(오나하마항)
	

자료: 한국해양수산개발원, *지진에 대비한 항만기능 유지의 필요성과 추진방안*, 2017, p. 39

제3절 사이버 테러

1. 개요

항만 운영에 관련된 기술은 실시간 데이터에 대한 원격 및 현장 액세스를 통해 선박, 크레인, 차량, 철도역, 보관 창고, 적재장 등을 운영하는 것으로, 과거에는 외부 위협으로부터 독립된 시스템이었으나 최근에는 다양한 정보기술(IT) 솔루션 기술이 적용되었다. 이에 따라 시스템 간 연결성 및 원격 조정 기능은 향상되었으나 그로 인해 웹 바이러스, 랜섬웨어, DDoS 등의 외부 위협(사이버 테러)에 노출되어 있다.

항만 운영 시 고려할 수 있는 사이버 위협 및 사이버 리스크는 크게 항만 보안 및 출입 통제 시스템, 항만 운영 시스템, 항만 운영 관제센터, 항만 IT 시스템 등이 있다. 이 시스템들을 위협하는 요인으로는 불법적인 침입, 비인가자의 시스템 접근, 악성코드 감염, 내부자 공격, 지능형 지속 공격 등이 있으며, 이로 인해 항만 통제권 탈취, 운영 시스템 장애, 운영 시스템 마비, 데이터 삭제 및 변조 등의 리스크가 발생할 수 있다.

〈표 3-5〉 사이버 위협과 사이버 리스크

구분	대상 시스템	사이버 위협	사이버 리스크
항만 /시설	• 항만 보안 및 출입 통제 시스템 - CCTV, 게이트웨이, ID 카드	• 불법적인 침입 • 비인가자의 시스템 접근 • 악성코드 감염 • 내부자 공격 • 지능형 지속 공격	• 항만 통제권 탈취 • 운영 시스템 장애 • 운영 시스템 마비 • 데이터 삭제 및 변조
	• 항만 운영 시스템 - 컨테이너 자동 하역 시스템 - 전력 분배 시스템 - 항만 터미널 시스템		
	• 항만 운영 관제 센터		
	• 항만 IT 시스템		
선박	• 선박 IT 시스템 - 선원 컴퓨터 시스템	• 악성코드 감염 • 비인가자의 시스템 접근 • 내부자 공격 • USB 사용 • 무선장비 사용	• 선박정보 유출 • 이메일 업무 장애
	• 선박 OT 시스템 - 항해·통신 시스템 - 추진 제어 시스템 - 화물 운영 시스템		• 선박 통제권 탈취 • 운영 시스템 장애 • 운영 시스템 마비
선주사/ 운송사/ 화주사	• 직원 관리 시스템 - 개인정보, 급여 관리 등	• 악성코드 감염 • 피싱 • 스캠 • 내부자 공격 • USB 사용 • 무선장비 사용	• 개인정보 유출 • 화물정보 유출 • 거래정보 유출
	• 회사 비즈니스 시스템		
정부	• 출입국 관리, 세관, 검역 • 선박교통관제(VTS)	• 지능형 지속 공격	• 시스템 장애 • 시스템 마비

자료: 한국해양수산개발원, *해상 사이버 보안체계 강화방안 연구*, 2019, p.24

항만 운영 과정의 복잡성 및 다양한 이해관계자와의 상호 연관성으로 인해 항만, 항만 운영 인프라, 선박 등의 해상 도메인이 사이버 위협에 노출되면 해양산업 전반에 영향을 줄 수 있는 사이버 사고로 이어질 수 있다. 특히 항만 운영 시스템에 대한 사이버 공격은 해상, 철도 및 트럭 운송과 관련된 컨테이너 운송 서비스 전체에 영향을 미칠 수 있다.

2. 국내 항만 사이버 테러 사례

1) 진도 VTS 해킹

2011년 3월, 전남 진도 연안 VTS가 해킹을 당해 서남해 연안을 감시하는 국가 기간 레이더망이 무력화되어 20일간 이 해역을 통항하는 선박의 추적·감시·관제 업무가 이뤄지지 않은 사태가 발생했다. 사건 초기에는 안테나와 송수신기를 연결하는 연결 케이블인 도파관 손상 등 레이더 고장이 원인으로 추정되었으나, 사건 전날 밤 외부와의 접촉이 없었으며 손상된 부분 또한 일반 절연테이프를 연결해도 임시 사용이 가능한 점 등에 비춰 물리적 사고가 아닌 해킹에 무개가 실렸다. 해양경찰청이 외부 접속 흔적을 발견하여 사고일 전후로 완도센터 컴퓨터 로그파일, 출입 기록, CCTV, 방문자 명단 기록부를 면밀히 조사한 결과, 레이더의 실질적 기능인 목표물 추적과 정보 생성 등의 역할을 하는 ‘VET 기능’이 해킹으로 마비된 것으로 밝혀졌다.¹⁵⁾

15) 아주뉴스(검색일: 2020. 6. 22)

2) GPS 전파교란(Jamming)

북한의 소행으로 추정되는 GPS 전파교란은 2011년부터 지속되어 왔으며 주로 국내 대규모 군사훈련인 독수리훈련, 을지연습 등이 시행되는 기간 동안 발생하였다.

GPS 전파교란은 항법 위성에서 출발하는 GPS 신호가 지상의 수신 단말기에 도달할 때 전자파 간섭이 다른 신호 발생원으로부터 발생하여 GPS의 원신호를 복조하는 것이 매우 힘들거나 불가능하도록 만드는 것이다. GPS 전파교란은 노이즈 방출 그리고 GPS 신호 기만으로 구분할 수 있다. 노이즈 방출은 기존 GPS 신호보다 약 40dB 이상의 강한 노이즈 신호를 방출하여 수신기가 GPS 신호를 수신하지 못하도록 방해하는 기법이며, 재밍(Jamming)이라고도 불린다.

3) 잠수함 설계도 유출

2017년 4월, 북한이 국내 조선소를 해킹하여 잠수함과 이지스함 등 군함의 설계도를 탈취해 간 것으로 확인되었다. 유출된 자료는 군사기밀 60여 건, 일반 문건 4만여 건이다.

4) 현대상선 랜섬웨어 감염

2019년 3월, 현대상선 소속 일부 선박이 랜섬웨어에 감염되어 선박 내의 메인 컴퓨터가 잠기는 사건이 발생했다. 감염 경로는 경찰청을 사칭한 메일에 첨부된 파일을 다운받아 실행시킨 후 감염이 진행된 것으로 알려졌다. 감염된 메인 컴퓨터에는 선박 입·출항에 필요한 수속 서류를 포함해 운항에 필요한 자료가 포함되

어 있었고, 선박의 감염된 컴퓨터는 정상 상태로 복원이 불가능하여 포맷한 후 업무에 사용되는 서류들을 새로 작성해야 했다.¹⁶⁾

3. 해외 항만 사이버 테러 사례

1) 사이버 해적의 테러

2011년 8월, 해커에 의해 침입당한 이란의 Iranian Shipping Line 서버가 적재 화물, 요금, 운송 날짜 및 장소, 화물번호 등의 정보와 자료를 열람하고 손상시켜 운송 화물의 상당량이 분실되거나 오배송 되는 사고가 발생했다.

범죄 조직에 고용된 해커는 2012년 호주의 국경보호청 및 세관의 카고 시스템(Cargo System)에 침입해 의심 대상 컨테이너에 대한 세관 정보를 파악하여 범죄 조직의 밀수 화물이 의심 대상으로 분류됐을 경우 인수를 포기하고 의심 대상이 아닌 경우에만 밀수 화물을 인수하는 등 밀수를 위해 세관의 정보를 이용하였다.

벨기에의 마약 밀매업자들은 2013년 정상적인 수입품을 실은 컨테이너에 마약 제품을 밀반입한 후, 항만 제어 시스템을 해킹하여 마약 제품이 실린 컨테이너가 항만에 도착한 것을 미리 확인하였다. 이후 화주가 정상적으로 수입품을 반출하기 전에 밀매품을 반출하였다.

2016년 3월, 글로벌 해운사의 선박이 해적에게 납치되어 특정 화물이 적재된 컨테이너만 탈취당하는 사건이 발생하였다. 이는 해적이 미리 해운사의 선하증권 및 선적 화물 관리 시스템을 해킹하여 화물과 선박 운항 스케줄에 대한 구체적인 정보를 수집한 뒤, 목적인

16) 한국해양수산개발원(2019).

컨테이너를 탈취한 것으로 나타났다.¹⁷⁾

2) 컨테이너 선박 항해 시스템 사이버 테러

2017년 2월 키프로스에서 지부터까지 운항하는 독일 소유의 8,250TEU 컨테이너 선박 항해 시스템이 해킹되는 일이 발생하였다. 10시간 동안 해킹을 한 사이버해적은 항해 시스템을 완전히 장악하여 선박을 조정하였다. 그 사이 선박에서는 항해 시스템의 제어 권한을 되찾으려 노력하였지만 IT 전문가가 승선하여 시스템을 복구한 이후에야 다시 조종 권한을 찾아올 수 있었다. 해커가 시스템에 침입한 방법이 불분명했지만 선박 시스템이 사이버 테러에 취약하고 이로 인해 선박이 쉽게 탈취될 수 있음이 확인된 사건이었다.

3) 머스크 랜섬웨어 공격

2017년 6월 28일, 대형 해운사 A.P.몰러 머스크의 운영 시스템이 랜섬웨어의 일종인 ‘페티아(Petia)’의 공격을 받았다. 페티아는 파일을 암호화할 뿐만 아니라 부팅을 막아 PC가 실행되지 않도록 하는 컴퓨터 바이러스라 할 수 있다. 랜섬웨어 감염 여파로 머스크의 자회사인 APM터미널은 세계 전 지역에서 운영 중인 63개 터미널 대부분이 피해를 입었다. 특히 네덜란드 로테르담의 마스플락테II 터미널과 미국 LA터미널이 가장 큰 피해를 입었다. 또한 포트엘리자베스(Port Elizabeth), 모빌(Mobile), LA, 사우스플로리다(South Florida) 등 APM터미널이 운영하는 미주의 4개 터미널도 운영에 어려움을 겪었으며, 유럽에 위치한 17개 APM터미널 중 마스플락테II, APMT 로

17)보안뉴스(검색일: 2020. 6. 22)

테르담, 알헤시라스(Algeciras), 이즈미르(Izmir), 포티(Poti), 고센버그(Gothenburg), 제브뤼헤(Zeebrugge), 오르후스(Aarhus) 등 8개 터미널은 일부 기능이 중단되거나 운영이 제한되었다. 인도에서도 동일한 상황이 전개되었는데, 인도의 상업 중심지인 뭄바이 인근에 위치한 인도 최대 컨테이너 항구 JNPT는 페티아의 영향으로 생산 능력이 30% 이상 감소했다. 이렇듯 머스크의 운영 시스템이 전반적으로 랜섬웨어의 공격으로 마비되었다. 이후 머스크는 IT 시스템의 가동을 중단하고 피해 복구에 나섰다. 전 세계 112개국에 317개의 사무소를 두고 선박 600척을 운영 중인 머스크는 컨테이너 선적 작업을 일부 수동으로 전환하여 운영하게 됨으로써 약 3,000억 원의 피해가 발생했으며 이후 서버 4,000대, PC 4만 5,000대, 애플리케이션 2,500개가 재설치되었다.¹⁸⁾

4) 클락슨 내부자 사이버 범죄

2017년 12월, 영국의 해운 관련 통계 분석 서비스 회사인 클락슨은 회사 시스템을 해킹하여 데이터를 복사하고, 데이터 반환 조건으로 금전을 요구하는 사이버 보안 사건이 발생하였음을 언론에 공개하였다. 2017년 11월 7일, 해킹 사실을 인식한 클락슨은 즉시 사건에 대응하고 조치를 취했다. 디지털 포렌식 수사 과정에서 밝혀진 내용은 허가받지 않은 제3자가 2017년 5월 31일부터 2017년 11월 4일까지 영국의 특정 클락슨 컴퓨터 시스템에 액세스하여 데이터를 복사했다는 것인데, 문제는 회사가 금전 요구 이전에 해킹 사실조차 인식하지 못하고 있었다는 점이다.

18) 조선일보(검색일: 2020. 6. 22)

5) 나이지리아 해킹 그룹

2018년 4월, 주로 선사, 항만운영사 등을 대상으로 사이버 공격을 시도하는 해커로서 나이지리아의 Gold Galleon Hacking 그룹의 존재가 확인된 바 있다. 이들은 2017년 6월에서 2018년 1월 사이에 390만 달러를 탈취하고 연간 670만 달러의 인터넷 사기를 시도한 것으로 추정된다.¹⁹⁾

Gold Galleon Hacking 그룹의 공격 전략과 기술은 굉장히 새롭거나 고급 기술은 아니지만 공격 표적을 잘 선정하고 취약점을 이용했다는 특징이 있다. 실제로 그들은 공격 전에 공격 대상 회사 내 시스템에 침투해 내부 및 거래처 연락처, 선박 일정, 대금 지불 등과 같은 관련 정보를 빼낸 후, 대상 회사의 웹사이트를 통해 사전에 확보된 정보와 결합해 인터넷 사기에 이용했다. 즉 신뢰가 가는 이메일로 스피어피싱 공격을 하는 것이다.

6) 코스코 사이버 테러

2018년 7월, 중국 선사 코스코는 미주법인 전산망이 사이버 테러의 공격을 받아 중단됐다고 밝혔다. 이로 인해 인터넷, 전자메일, 전화 등 전산 시스템의 셧다운(shutdown)으로 선적 예약 기능이 불가능해져 화주들이 타 선사로 예약을 변경하면서 일부 경제적 손실과 더불어 화주 입장에서는 선박 확보에 어려움을 겪은 바 있다.

이에 코스코는 피해가 있었던 미주와의 접속을 차단하고 전 세계적인 네트워크 검증을 실시한 결과, 이 외 지역에선 피해가 확인되지 않았다고 밝혔다.²⁰⁾

19) ZDnet(검색일: 2020. 6. 23)

20) 코리아슈핑가제트(검색일: 2020. 6. 22)

7) 샌디에이고·바르셀로나 항만 사이버 테러

2018년 9월에는 미국 샌디에이고 항만의 IT 시스템이 랜섬웨어 사이버 공격을 받는 일이 발생하였다. 공격에 의해서는 일부의 컴퓨터 시스템이 손상되었으나, 예방 차원에서 다른 시스템도 운영이 중단되었다. 아울러 샌디에이고항이 공격받기 일주일 전에는 스페인 바르셀로나항에서도 랜섬웨어 공격이 발생하여 항만이 사이버 테러의 대상으로 떠올랐다.²¹⁾

8) 이란 항만 전산 시스템 사이버 테러

2020년 5월, 이란 샤히드 라자이 항만의 TOS가 일순간에 마비되는 사건이 발생하였다. 이로 인해 심각한 항만 정체 현상이 발생하였는데, 이와 관련해 이란 정부는 정체불명의 해커로부터 TOS에 대한 사이버 공격이 있었다고 발표하였다. 하지만 미국의 워싱턴포스트지는 이번 공격에 대해 이란 정부와 다른 해석을 하였는데, 그것은 이란이 먼저 이스라엘의 지방 용수 공급 시스템을 해킹한 것에 대한 보복이라는 것이다. 워싱턴포스트가 당시 위성사진을 확인한 결과 사이버 테러가 있던 당일에 항만에 진입하지 못한 선박들이 길게 늘어섰고, 사흘 후에도 연안에 컨테이너를 실은 배 10여 척이 목격되었다고 보도해 항만의 전산 시스템 마비는 이란 정부가 발표²²⁾한 것보다 더 심각한 손해를 끼친 것으로 파악됐다.²³⁾

21) 한국해양수산개발원(2019).

22) 항만 시스템 내부에 침투하는데 실패했으며, 항만 내 몇 개의 민간 운영 시스템에만 피해를 입힘.

23) 연합뉴스(검색일: 2020. 6. 22)

제4절 사고 및 감염병

1. 부산항 신항 2부두 크레인 선박 충돌

2020년 4월 6일, 부산항 신항 2부두에서 오션네트워크익스프레스(ONE) 소속 15만 톤급 컨테이너 운반선(선박명: 밀라노브릿지)과 육상크레인 간 충돌 사고가 발생했다. 해양수산부에 따르면 사고 선박은 프로펠러가 수면에 노출되어 조종 성능이 제한된 상태에서 부산항 신항 2부두에 접안하기 위해 통상 6노트 내외보다 빠른 약 8노트의 속력으로 토도를 끼고 우선회를 하는 과정에서 선박이 부두 쪽으로 밀리게 되면서 2부두 8번 선석의 육상 크레인과 충돌하게 되었다.²⁴⁾

이로 인해 부산항 신항 2부두 8번 선석에 위치한 육상 크레인 1기가 완파되고 3기가 부분 파손되었으며, 사고 선박이 크레인 및 접안선박과 접촉하면서 선미부와 좌현 외판 일부가 손상되었다.

〈표 3-6〉 밀라노브릿지 크레인 접촉 사고 피해 내용

구분	피해 내용	인명 피해
하역 장비	• 최초 충돌한 85호기는 완파 • 84·83·81호기 부분 손상	7번 부두 크레인 기사 1명 경미한(3주) 부상
사고 선박	• 좌현 선체 외판 일부 손상(파공·굴곡 등) • 선미 후단부 일부 소실·손상(셀 가이드 등) • 프로펠러 날개 경미 손상 • 사고 인근(7부두)에 접안 중인 시스판캔지스 외판 굽힘(스크래치) 등	-

자료: 해양수산부 보도자료(2020. 5. 4)

24) 해양수산부 보도자료(2020. 5. 4).

〈그림 3-7〉 부산항 신항 1부두 크레인과 선박 간 충돌 모습



자료: 조선비즈(검색일: 2020. 6. 23)

크레인 제작사인 중국 ZPMC사로부터 사용 불가 판정을 받은 크레인 2기를 새로 제작하는 데 소요되는 비용은 250억 원 이상으로 추산되며, 파손된 2기의 수리 비용까지 고려하면 선박 충돌로 인한 크레인 피해액만 300억 원대에 이를 것으로 예상된다. 또한 1개 선석을 사용하지 못해 발생하는 영업 손실까지 따지면 피해액은 훨씬 늘어날 것으로 보이며 영업 손실 피해 산정에는 상당히 오랜 시간이 걸릴 것으로 판단된다.²⁵⁾ 장비 수리 및 제작에 소요되는 기간은 1년 6개월가량으로 추정된다.²⁶⁾ 더군다나 ZPMC 측 전문가가 코로나19로 인해 입국에 지장이 생겨 복구 기간이 늘어날 것으로 예상되었다.

2. 부산 감천항 코로나19 감염

2020년 6월 21일, 부산 감천항에 입항한 러시아 국적 냉동화물선의 선원 21명 중 16명이 입항 다음 날인 22일에 코로나19 확진 판정

25) 연합뉴스(검색일 2020. 6. 22)

26) 데일리로그(검색일 2020. 6. 22)

을 받았다. 이로 인해 하역 작업을 하였던 우리나라 항만 근로자와 세관 공무원, 도선사 등 총 55명이 자가 격리 조치되었으며 하역 작업이 중단되었다.²⁷⁾ 다음날인 23일에는 인근에 정박한 러시아 선박에서도 확진자가 발생하였으며 이로 인해 감천항의 7개 부두 중 1~3 부두를 폐쇄하고 밀접 접촉자 150명을 자가 격리 조치하였다.²⁸⁾

코로나19 발생 후 우리나라 항만에 입항하려는 선박은 전자검역 과정을 거치나 유증상자가 없다는 신고에 따라 정박과 하역 작업이 이루어졌으며, 냉동 하역 작업의 특성상 마스크 착용과 거리두기가 불가하여 향후 추가 확진자 발생 등 확산이 우려되고 있다.²⁹⁾ 1~3부두의 폐쇄는 23일부터 26일까지 3일간으로 예정되었으나 확산 추세 및 항운노조의 반발로 인해 폐쇄 기간이 연장되었다. 방역 작업은 23일에 바로 마무리되었으나 항운노조는 작업에 대한 불안감 때문에 입항된 러시아 선적 선박의 출항 등 코로나19 감염에 대한 불안이 해소되기 전까지는 하역 작업을 중지할 것을 요청하여 7월 3일해야 하역 작업을 재개하였으며, 자가 격리된 하역 인원들은 7월 8일에 다시 투입되었다.

코로나19 감염으로 인해 많은 문제가 발생하고 있으나 해당 상황에 대한 대응 계획과 매뉴얼의 부재로 인해 조치가 적시에 이루어지지 못하고 있는 점이 한계로 지적되었다. 특히 밀접 접촉자에 대한 적당한 격리 장소를 찾지 못해 이동형 컨테이너 대기실에 격리하는 등 초기 대응에도 어려움을 겪었다. 코로나19 감염에 대한 불안감 등으로 인해 부두 폐쇄 기간이 길어졌는데 이에 따른 다른 선박의 하역 작업 차질과 도급제 부두 항만 노동자들의 임금 문제 등에 대

27) 뉴시스(검색일 2020. 6. 24)

28) 세계일보(검색일 2020. 6. 24)

29) 조선일보(검색일 2020. 6. 22)

한 대응책이 마련되어 있지 않아 해결책 마련을 위한 긴급 논의가 진행되었다.

제5절 시사점

본 연구에서는 다양한 항만 위협 요인이 항만 운영에 미치는 영향에 대한 인과지도 구축에 활용하기 위해 재해, 사고, 사이버 테러, 감염병 등의 다양한 사례를 분석하였다. 분석한 항만 위기 사례들을 종합해 보면 세 가지의 시사점을 얻을 수 있다.

먼저, 기존과는 다른 새로운 위협 요인이 등장하고 있다는 점이다. 특히 사이버 테러와 같은 위협 요인은 4차 산업혁명 시대에 항만의 디지털화가 급속도로 진행되면서 등장한 새로운 위협 요인이며, 재해와 같은 기존 위협 요인보다 더 많은 빈도로 일어나고 있다. 그로 인한 피해 규모도 재해나 사고 같은 요인 못지않게 크게 나타나고 있다. 따라서 항만은 이미 알려진 위협에만 대비할 것이 아니라 기술 발전에 따라 새롭게 등장할 위협 요인을 지속적으로 탐색하고 미리 대비해야만 한다.

다음은 위협 요인마다 항만에 미치는 영향이 다르다는 점이다. 재해, 사고와 같은 요인은 항만의 물리적 기능에 피해를 주어 성과를 저하시키고, 사이버 테러는 물리적인 피해는 주지 않지만 디지털 시스템을 마비시켜 성과에 영향을 미친다. 감염병은 시설에 대한 영향은 거의 없지만 인력 운영 쪽에 큰 영향을 미친다. 즉, 각 위협 요인이 어떠한 방식으로 항만 운영에 지장을 주는지 파악하고 그에 맞는 대비책을 수립하여 회복탄력성을 향상시킬 필요가 있다.

마지막은 위기 대응 계획이 반드시 필요하다는 것이다. 감천항 코로나19 감염의 경우, 대응 계획이나 매뉴얼이 사전에 준비되어 있지 않아 초동 대처가 늦어졌으며 이로 인해 피해가 확산되었다. 다양한 요소가 결합되어 있는 항만 운영 시스템에 대한 위협 요인을 사전에 전부 차단하는 것은 불가능하다. 따라서 각 위협 요인별로 어떤 방식으로 대응해야 하는지에 대한 계획을 미리 수립하는 것은 항만의 회복탄력성 강화 관점에서 매우 중요한 일이다.

제 4 장

설문조사를 활용한 회복탄력성 측정 모형

제1절 개요

본 장은 서비스 품질을 측정하는 대표적인 모형인 SERVQUAL과 유사하게 설문조사를 활용한 회복탄력성 측정 모형을 구축하는 것을 목표로 한다. SERVQUAL은 Parasuraman 등(1985)에 의해 개발된 경영학 분야의 고객 서비스 품질 측정 모형이다. 서비스 품질을 기대와 성과 간의 차이로 규정하고, 이를 측정할 수 있는 다섯 가지 차원의 요인을 제시하였다. 요인은 유형성(tangible), 신뢰성(reliability), 반응성(responsiveness), 확신성(assurance), 공감성(empathy) 등으로 구성되며, 이를 측정하기 위한 지표로 22가지 설문 문항을 개발하여 모형의 타당성을 검증하였다. SERVQUAL 모형은 구축 이후 학계의 지속적인 연구를 통해 타당성이 검증되었으며, SERVPERF 등 후속 모델의 기반이 되어 현재까지도 가장 널리 사용되는 서비스 품질 측정 모형이다.

본 연구에서는 문헌 연구를 통해 항만의 회복탄력성을 측정할 수 있는 요인과 측정 지표들을 제시하고, 설문을 통해 모형의 타당성을 검증한 뒤 측정 결과를 제시하였다. 세부적으로는 회복탄력성의 정의와 마찬가지로 공급사슬 분야와 인프라 시스템 분야의 문헌 연구를 통해 요인을 제시하고 모형을 구축하여 부산항 관계자 대상 설문 조사를 통해 데이터를 수집한 후 탐색적 요인분석과 확인적 요인분석을 통해 모형의 타당성을 검증하고자 한다.

제2절 회복탄력성 요인

1. 공급사슬 분야

공급사슬 회복탄력성을 구성하는 요인과, 회복탄력성과 관련된 공급사슬의 능력(capability)에 관한 연구는 꾸준히 이루어져 왔다. 대표적인 연구를 몇 가지 살펴보면, 먼저 Pettit 등(2010)은 공급사슬의 취약성을 유발하는 요인과, 회복탄력성과 관련한 공급사슬 요인에 관해 연구하였다. 취약성 요인으로는 격변(turbulence), 고의적 위협(deliberate threats), 외부 압력(external pressure), 제한된 자원(limited resource), 민감도(sensitivity), 연결성(connectivity), 공급자/고객 붕괴(supplier/customer disruption) 등 7가지를 제시하였으며, 회복탄력성 요인으로는 구매 유연성(flexibility in sourcing), 주문 충족 유연성(flexibility in order fulfillment), 용량(capacity), 효율성(efficiency), 가시성(visibility), 적응성(adaptability), 예측성(anticipation), 회복(recovery), 확산성(dispersion), 협력(collaboration), 조직(organization), 시장 위치(market position), 보

안(security), 재무 건전성(financial strength) 등 14가지를 제시하였다. Pettit 등(2013)은 Pettit 등(2010)을 기반으로 하여 ‘(공급사슬 회복 탄력성 측정 및 관리(Supply Chain Resilience Assessment and Management)’라는 회복탄력성 관리 도구를 개발하였다. Jüttner와 Maklan(2011)은 공급사슬 회복탄력성과 공급사슬 관리, 취약성 간의 관계를 연구하면서 회복탄력성 구성 요인으로 유연성, 속도(velocity), 가시성, 협력을 제시하였다. Hohenstein 등(2015)은 2003년부터 2013년까지 출간된 공급사슬 회복탄력성 분야 논문 67편에 대한 연구를 통하여 총 36개의 회복탄력성 요인을 찾았으며, 문헌 연구 결과 가장 중요하게 다뤄지는 여섯 가지 요인을 제시하였다. 그것은 유연성, 가시성, 용량, 협력, 여분성(redundancy), 민첩성(agility)이다. <표 4-1>은 Hohenstein 등(2015)이 제시한 여섯 가지 요인의 정의를 정리한 것이다.

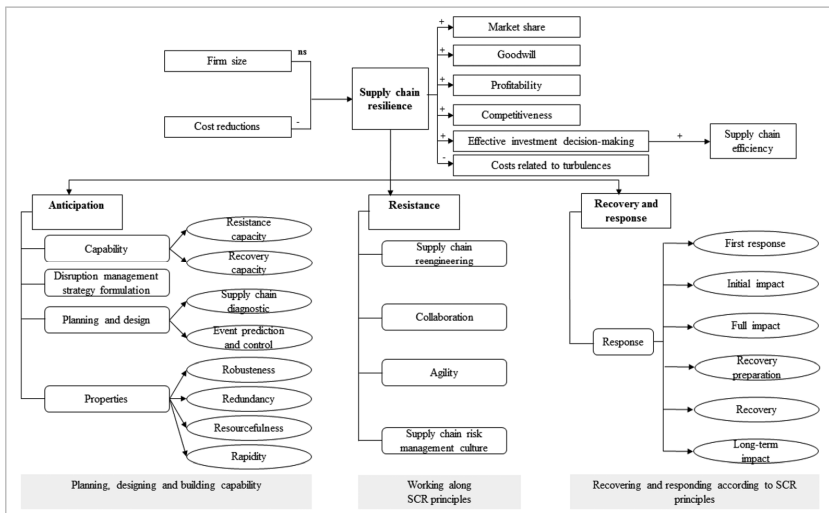
〈표 4-1〉 회복탄력성 요인의 정의 및 관련 문헌

요인	정의	관련 문헌
유연성 (Flexibility)	기업이 최소한의 노력과 시간으로 변화하는 환경과 이해 관계자의 요구에 적응할 수 있는 능력	Erol 등(2010)
가시성 (Visibility)	공급사슬 행위자가 자신의 운영에 핵심적이거나 유용한 것으로 간주하는 공급사슬 운영, 타 구성원 및 경영진에 대한 정보를 적시에 공유하거나 접근하는 정도	Jüttner와 Maklan(2011)
용량 (Capacity)	지속적인 생산 수준을 유지할 수 있게 하는 자산의 가용성	Pettit 등(2013)
협력 (Collaboration)	둘 이상의 공급사슬 구성원 간의 전술적, 운영적 또는 전략적 수준에서 공동 의사 결정을 내리고 협력하는 수준	Scholten과 Schilder(2015)
여분성 (Redundancy)	여러 공급 업체를 통해 급한 변화에 대응할 수 있는 능력 및 생산 또는 운송 능력의 여유분 확보	Hohenstein 등(2015)
민첩성 (Agility)	예상치 못한 시장 변화에 신속하게 대응하고 이러한 변화를 비즈니스 기회로 전환하는 능력	Jain 등(2008)

자료: 문헌 연구 결과를 바탕으로 저자 작성

Chowdhury와 Quaddus(2017)는 운영 취약성과 공급사슬 성과, 공급사슬 회복탄력성 간의 관계를 연구하면서 회복탄력성의 구성 요소로 크게 능동적 역량(proactive capability), 수동적 역량(reactive capability), 공급사슬 디자인(supply chain design)의 세 가지를 제시하였다. 능동적 역량의 하위 요인으로는 유연성, 여분성, 통합(integration), 효율성, 시장에서의 강점(market strength), 재무 건전성, 준비도(readiness) 등을, 수동적 역량의 하위 요인으로는 반응성(response)과 회복성(recovery), 그리고 공급사슬 디자인의 하위 요인으로는 밀도(density), 복잡도(complexity), 임계도(criticality) 등을 제시하여 총 12가지의 요인으로 모형을 구성하였다. Shashi 등(2020)은 2003년부터 2018년까지 공급사슬 회복탄력성을 주제로 한 논문들을 검토하여 회복탄력성 측정에 관한 프레임워크를 구성하였다. <그림 4-1>은 Shashi 등(2020)이 구성한 프레임워크를 나타낸다.

〈그림 4-1〉 공급사슬 회복탄력성 측정 프레임워크



자료: Shashi 등, *Managing supply chain resilience to pursue business and environmental strategies*, 2020, p. 1224

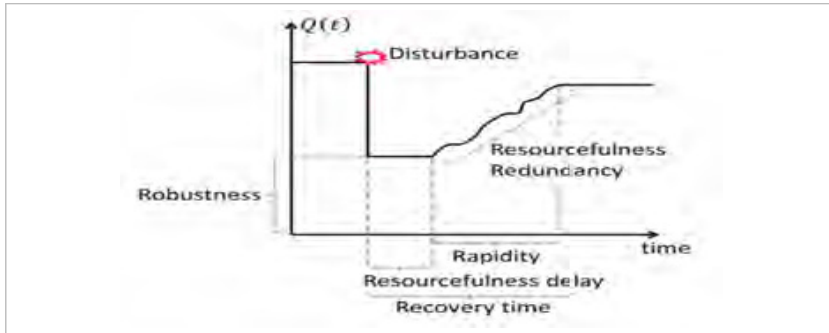
프레임워크를 살펴보면 공급사슬 회복탄력성을 예측성, 저항성(resistance), 회복과 반응의 세 가지 차원으로 정의하고 각각의 측정 지표들을 정리하였다. 강건성(robustness)·여분성·디자인 등은 예측성의 측정 지표로, 협력·민첩성 등은 저항성의 측정 지표로, 다양한 반응 능력은 회복과 반응의 측정 지표로 정리하였다.

이상의 논문들을 살펴볼 때 공급사슬 회복탄력성 요인에 관한 연구에서 핵심 요인으로 제시된 것들은 거의 공통적이나, 하나의 계층에서 요인들을 나열하던 형태에서 다계층으로 모형을 구성하는 식으로 발전해 왔음을 알 수 있다.

2. 인프라 시스템 분야

인프라 시스템 분야는 회복탄력성의 수량적(quantitative) 측정에 초점이 맞춰져 있는 경우가 많아 요인들을 제시한 연구는 수가 많지 않다. Bruneau 등(2003)은 지진에 대한 회복탄력성 연구를 통해 개념적인 프레임워크를 제시하였는데, 회복탄력성에 대한 네 가지 차원으로 강건성, 여분성, 자원 동원력(resourcefulness), 신속성(rapidity)을 제시하였다. Adjetey-Bahun 등(2014)은 이 네 가지 차원을 수량적 측정에 접목하여 <그림 4-2>와 같은 측정 시스템을 제시하였다.

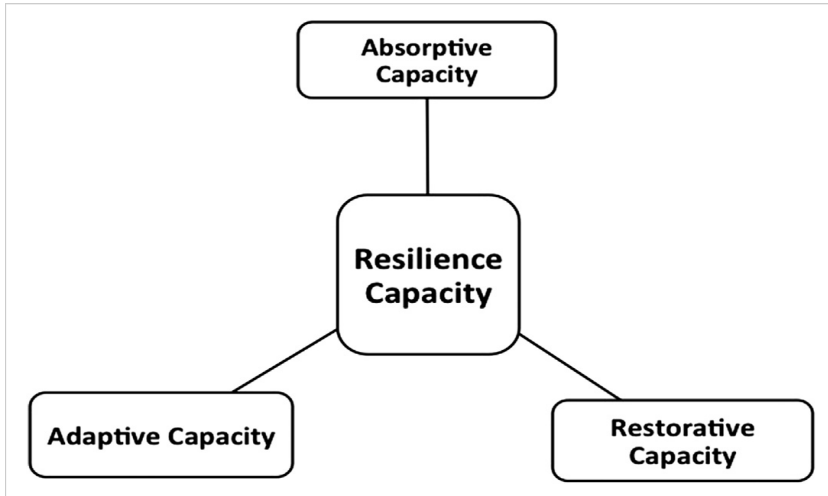
〈그림 4-2〉 회복탄력성 측정 지표와 수량적 측정법



자료: Adjetey-Bahun 등, *A simulation-based approach to quantifying resilience indicators in a mass transportation system*, ISCRAM 2014 Conference Proceedings, 2014, p. 76

Shirali 등(2013)은 엔지니어링 회복탄력성에 관한 연구를 통해 회복탄력성을 나타낼 수 있는 지표로 경영진의 참여(top management commitment), 올바른 문화(just culture), 학습 문화(learning culture), 인지도와 불투명도(awareness and opacity), 준비도(preparedness), 유연성의 여섯 가지를 제시하여 설문조사를 통해 점수를 측정하였다. Vugrin 등(2010), Francis와 Bekera(2014), Yu 등(2015)은 회복탄력성을 흡수력(absorptive capability), 적응력(adaptive capability), 복구력(restorative capability)의 합으로 정의하였다. 〈그림 4-3〉은 Francis와 Bekera(2014)가 주장한 회복탄력성 삼각형을 나타낸 그림이다.

〈그림 4-3〉 회복탄력성 삼각형

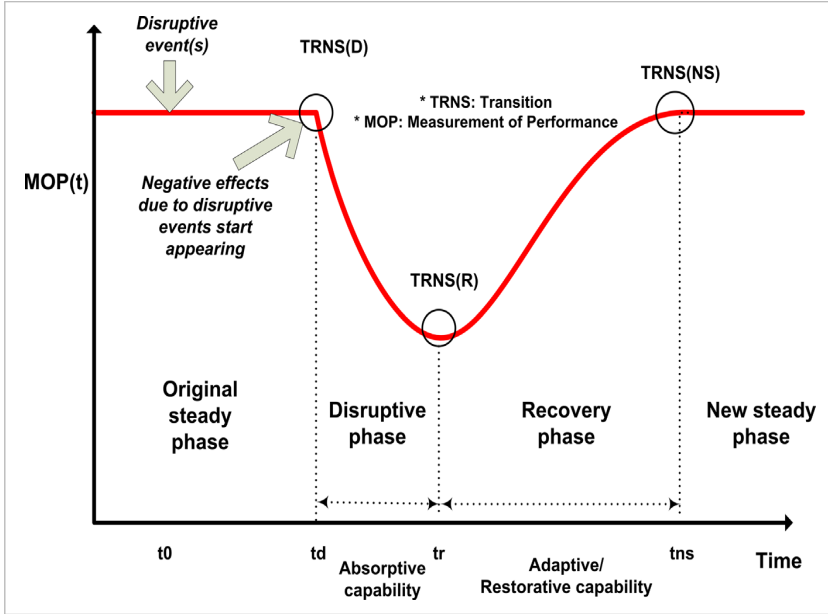


자료: Francis and Bekera, *A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems*, 2014, p. 95

Vugrin 등(2010)은 강건성과 여분성을 흡수력의 측정 지표로, 비상 대책과 대체 능력(substitutability)을 적응력의 측정 지표로 제시하였으며 복구 자원의 양과 신속한 조달력을 복구력의 측정 지표로 제시하였다³⁰⁾. Nan과 Sansavini(2017)는 회복탄력성 삼각형을 수량적 측정에 접목하여 〈그림 4-4〉와 같은 모형을 제시하였다.

30) 유순영 등(2014)

〈그림 4-4〉 회복탄력성 삼각형과 수량적 측정법



자료: Nan and Sansavini, *A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures*, 2017, p. 37

위의 논문들을 살펴볼 때 인프라 시스템 분야에서는 최근 회복탄력성 삼각형을 적용한 모형이 일반적으로 사용되고 있으며, 이를 수량적 측정에 접목하려는 시도가 많이 이루어지고 있다. 다만 회복탄력성 삼각형에서 제시한 세 가지 차원은 매우 넓은 개념으로 사용되고 있기 때문에, 모형을 개선하기 위해서는 측정 지표들을 세부적으로 분류하고 해당 역할을 정의하는 것이 필요할 것으로 보인다.

제3절 연구 모형 및 결과 분석

1. 연구 모형

이 절에서는 문헌 연구 결과를 토대로 회복탄력성 모형을 제시한다. 회복탄력성 모형을 구체화한 연구는 공급사슬 분야에서는 Shashi 등(2020), 인프라 시스템 분야에서는 Vugrin 등(2010)이 있는데, 이 두 가지 모형은 유사성이 있다. Shashi 등(2020)에서 주장한 예측성, 저항성(resistance), 회복과 반응은 각각 회복탄력성 삼각형의 흡수력, 적응력, 복구력과 대응하는 개념으로 볼 수 있으며, 각각의 하위 요소로 제시한 개념들도 유사성이 높다. 강건성, 여분성이 예측성과 흡수력의 하위 요인으로 동일하게 제시되었으며, 적응력의 하위 요인인 비상 대책과 대체 능력은 공급사슬 재구성(reengineering) 및 민첩성과 유사한 개념으로 볼 수 있다. 마지막으로 회복과 반응은 복구력과 거의 동일한 개념이다. 따라서 본 연구에서는 두 모형을 유사한 것으로 파악, 통합하는 작업을 통해 항만의 회복탄력성 측정 모형에 적용하고자 한다.

본 연구에서는 먼저 항만을 하나의 인프라 시스템으로 파악하고 Vugrin 등(2010), Francis와 Bekera(2014)가 주장한 회복탄력성 삼각형을 기본으로 모형을 구축한다. 회복탄력성을 흡수력, 적응력, 복구력의 세 가지 요인으로 구성하는 것은 제2장에서 제시한 회복탄력성의 정의와도 일치한다. 여기에 공급사슬 분야와 인프라 시스템에서 제시한 다양한 회복탄력성 요인들을 흡수력, 적응력, 복구력의 측정 지표로 분류하는 작업을 통해 모형을 만들어 타당성을 검증하고자 한다. 모형 구축을 위해 먼저 다양한 회복탄력성 요인 중 사용 빈도

수가 높고 중요성이 인정되는 아홉 가지 요인을 선정하였다. 선정된 요인은 강건성, 여분성, 가시성, 유연성, 협력, 민첩성, 정보 공유, 반응, 회복이며, 과거 문헌을 근거로 각 요인을 항만의 회복탄력성 연구에 맞게 재정의하였다. <표 4-2>는 각 요인의 정의와 관련 문헌 근거를 정리한 내용이다.

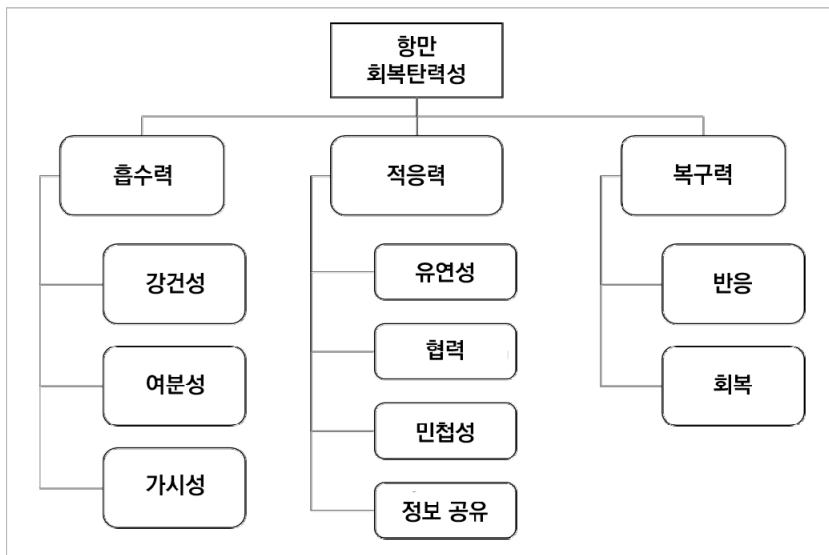
〈표 4-2〉 9가지 회복탄력성 요인의 정의 및 문헌 근거

요인	정의	근거
강건성 (Robustness)	초기 안정적인 구성의 변경 없이 급한 변화에 저항할 수 있는 기능	Purvis 등 (2016)
여분성 (Redundancy)	예상치 못한 기능 붕괴에 대응할 수 있는 작업 능력의 여유분	Hohenstein 등 (2015)
가시성 (Visibility)	핵심 작업 프로세스에 대한 정보를 적시에 접근할 수 있는 능력	Jüttner와 Maklan(2011)
유연성 (Flexibility)	최소한의 노력으로 변화하는 환경과 기능 장애에 적응할 수 있는 능력	Erol 등(2010)
협력 (Collaboration)	사업상 파트너와의 전문적, 운영적 또는 전략적 수준에서 공동 의사 결정을 내리고 협력하는 수준	Scholten과 Schilder(2015)
민첩성 (Agility)	예상치 못한 환경 변화와 기능 장애에 신속하게 대응하고 이러한 변화를 기회로 전환하는 능력	Jain 등(2008)
정보 공유 (Information Sharing)	파트너와의 공동 작업을 위한 내·외부 커뮤니케이션, 신뢰 및 상호 의존성 수준	Wu 등(2014)
반응 (Response)	방지 수준을 평가하고 활동을 통제하기 위한 사고 또는 비상사태에 대해 요구되는 행동	Norrman과 Jansson(2004)
회복 (Recovery)	정상 운영 상태로 신속하게 복귀할 수 있는 기능	Pettit 등 (2010)

자료: 문헌 연구 결과를 바탕으로 저자 작성

선정한 아홉 가지의 세부 요인 중 강건성, 여분성, 가시성은 흡수력의 측정 지표로 분류한다. 유연성, 협력, 민첩성, 정보 공유는 적응력의 측정 지표로 분류하며, 반응과 회복은 복구력의 측정 지표로 분류한다. 본 연구에서 제시하는 회복탄력성 측정 모형은 <그림 4-5>와 같다.

<그림 4-5> 항만의 회복탄력성 측정 모형



자료: 저자 작성

흡수력의 경우 강건성과 여분성은 Vugrin 등(2010)에서 제시한 흡수력의 측정 지표이며, 가시성은 예상치 못한 충격이 항만 운영 프로세스 기능에 미치는 영향을 파악하기 쉽게 하여 충격을 흡수할 수 있게 해 주는 요인으로 판단하여 흡수력의 측정 지표로 분류하였다. 적응력의 경우 협력과 민첩성은 Shashi 등(2020)에서 제시한 적응력의 측정 지표이며, 유연성은 요인의 정의에 따라 적응력의 측정 지표로

분류하였다. 정보 공유는 내부에서의 투명한 정보 공유를 통해 구성원이 위기에 적응할 수 있는 능력을 부여하고 외부 협력을 통한 변화 적응에 반드시 필요한 요인이기 때문에 적응력의 측정 지표로 분류하였다. 마지막으로 반응, 회복은 Shashi 등(2020), Chowdhury와 Quaddus(2017)에서 제시한 복구력의 측정 지표이다.

2. 연구 설계

1) 데이터 수집

본 연구에서는 데이터 수집을 위해 설문조사를 실시하였다. 공급사슬 분야, 인프라 시스템 분야 등의 문헌 연구를 통해 아홉 가지 세부 요인을 측정하기 위해 사용하였던 설문 문항을 정리하고 내부 전문가들의 논의를 통해 연구에 활용하기에 적합한 문항을 선정한 후 한글로 번역하였다. 문항은 각 측정 지표마다 3~4개를 선정하여 총 28개로 구성하였다. 또한 번역 후에 항만의 회복탄력성 측정에 맞게 문항을 일부 수정하였다. 번역과 수정 과정에서 문항의 의미가 변하는 일이 없도록 클리블랜드 주립대학 정문원 교수에게 서면 자문을 통한 검증을 실시하여 설문의 내용적 타당성(content validity)을 확보하였다. <표 4-3>은 선정한 설문 문항과 근거가 되는 문헌을 정리한 것이다.

<표 4-3> 설문 문항 정리

요인	정의	근거
강건성 (Robustness)	(rob1)항만의 성과는 항상 목표에서 크게 벗어나지 않는다.	Brandon-Jones 등(2014)
	(rob2)항만은 어떤 상황에서든 원래의 업무를 수행할 수 있다.	

요인	정의	근거
	(rob3)항만은 어떠한 외부 변화에도 안정된 상황을 유지한다.	Wieland와 Wallenberg (2012)
	(rob4)항만은 특별한 조정이 필요 없이 다양한 상황에서 잘 작동한다.	
여분성 (Redundancy)	(red1)항만은 장비, 인력 등 물리적 작업 지원을 위한 예비 자원을 유지한다.	Chowdhury 등 (2019)
	(red2)항만은 비상시를 위한 백업 에너지 시스템과 다용도 자원을 보유하고 있다.	
	(red3)항만은 예상치 못한 수요 변동을 처리하기 위한 여유 능력을 가지고 있다.	Zsidisin과 Wagner(2010)
가시성 (Visibility)	(vis1)항만에는 모든 작업을 정확하게 추적하는 정보 시스템이 있다.	Pettit 등 (2013)
	(vis2)항만은 장비, 인력 등에 대한 실시간 데이터를 관리하고 있다.	
	(vis3)항만에는 데이터 분석을 위한 효과적인 비즈니스 인텔리전스 프로그램이 있다.	
유연성 (Flexibility)	(fle1)항만은 기능 중단에 대처하기 위해 작업 일정을 조정할 수 있다.	Mandal 등 (2016)
	(fle2)항만은 기능 중단에 대처하여 작업 처리 능력을 조정할 수 있다.	
	(fle3)항만의 협력 파트너들은 공급 능력을 유연하게 조정할 수 있다.	
협력 (Collaboration)	(col1)항만은 주요 경영 목표를 달성하기 위해 많은 업체와 협력한다.	Mandal 등 (2016)
	(col2)항만은 파트너와 공동으로 전략적 목표를 설정한다.	
	(col3)항만은 주요 파트너와 공동으로 상호 이익을 위해 노력한다.	
민첩성 (Agility)	(agi1)항만은 고객들에게 맞춤형 서비스를 제공하며, 갑작스러운 요구에도 대응할 수 있다.	Altay 등 (2018)
	(agi2)항만의 운영 모형은 급격한 환경 변화에도 빠르게 대응할 수 있다.	
	(agi3)항만의 직원은 여러 종류의 작업을 수행하며 작업을 빠르게 전환할 능력을 가지고 있다.	Liu 등 (2018)

요인	정의	근거
정보 공유 (Information Sharing)	(ims1)항만은 파트너들과 상황에 맞는 적절한 정보를 교환한다.	Brandon-Jones 등(2014)
	(ims2)항만은 파트너들과 주기적으로 정보를 교환한다.	
	(ims3)항만은 파트너들과 정확한 정보를 교환한다.	
반응 (Response)	(res1)항만은 운영 중단에 신속하게 대응할 수 있다	Chowdhury 등 (2019)
	(res2)항만은 위기에 대한 적절한 대응을 할 수 있다.	
	(res3)항만에는 위기 상황을 대비한 비상대응조직이 구성되어 있다.	
회복 (Recovery)	(rec1)항만은 큰 손실을 흡수할 수 있는 능력이 있다.	Chowdhury 등 (2019)
	(rec2)항만은 적은 비용으로 위기에서 회복할 수 있다.	
	(rec3)항만은 위기 대처 능력에 의해 손실의 영향을 줄일 수 있다.	

자료: 문헌 연구 결과를 바탕으로 저자 작성

설문은 항만 분야 설문 경험이 많은 전문 업체와 함께 실시하였다. 먼저 항만과 관계된 운영사 및 하역사, 선사, 항만당국 및 항만물류협회 관계자들을 포함한 2,000명 이상의 리스트를 작성한 뒤 이메일과 전화 조사를 실시하였다. 설문지는 응답자의 소속, 근무 경험, 주요 이용 항만 등의 기본 정보 항목과 28개로 구성된 회복탄력성 관련 질문으로 구성하였으며, 설문에 대한 응답은 리커트 5점 척도(1 = 매우 아니다, 5 = 매우 그렇다)로 측정하였다. 최종 응답자는 199명으로 응답자의 구성 정보는 <표 4-4>와 같다.

<표 4-4> 설문 응답자 정보

구분		응답 수	비율
소속	선사	94	47.2%
	하역사	85	42.7%
	항만당국 및 항만물류협회	20	10.1%
주요 이용 항만	고현항	1	0.5%
	광양항	16	8.0%

구분		응답 수	비율
	군산항	6	3.0%
	대산항	2	1.0%
	동해묵호항	3	1.5%
	마산항	7	3.5%
	목포항	4	2.0%
	보령항	3	1.5%
	부산항	60	30.2%
	옥계항	1	0.5%
	울산항	21	10.6%
	인천항	34	17.1%
	통영항	2	1.0%
	평택·당진항	31	15.6%
	포항항	7	3.5%
	호산항	1	0.5%
근무 경험	5년 이하	34	17.1%
	5~10년	38	19.1%
	10~15년	36	18.1%
	15~20년	33	16.6%
	20년 초과	58	29.1%

자료: 설문조사 결과를 바탕으로 저자 작성

2) 데이터 분석 방법

앞에서 구축한 항만의 회복탄력성 측정 모형의 타당성을 알아보기 위해 탐색적 요인분석과 확인적 요인분석을 시행한다. 탐색적 요인 분석은 심리학, 경영학 등 다양한 분야에서 공통 요인을 찾기 위해 활용하는 방법으로, 척도 개발에 적합하다³¹⁾. 탐색적 요인분석이 데이터에 의존하여 이론 구조를 만들어 내는 방법이라면, 확인적 요인 분석은 측정 변수와 잠재 변수 간의 관계를 검정하여 모형의 적합도

31) 김청택(2016)

를 확인하는 방법으로, 이론 검증 과정에 가깝다³²⁾. 본 연구에서는 선행연구의 이론을 바탕으로 항만의 회복탄력성 측정 모형을 미리 구축하였기 때문에 확인적 요인분석이 더 적합한 방법론이나, 다양한 문헌을 바탕으로 설문 문항을 구성하였고 이를 우리말로 번역하여 설문을 하였기 때문에 이에 대한 검증 차원에서 탐색적 요인분석을 같이 실시하였다. 먼저 선정한 아홉 가지 측정 지표에 대한 설문 결과를 바탕으로 탐색적 요인분석을 통해 본 연구에서 개발한 설문 조사가 각 요인들을 측정하는 데 적합한지 검증하고 결과에 따라 모형을 조정한 후, 확인적 요인분석을 통해 최종적으로 항만의 회복탄력성 측정 모형의 타당성을 검증하였다. 분석에는 대표적인 통계 분석 프로그램인 R 4.0.0의 psych와 lavaan 패키지를 활용하였다.

3. 결과 분석

1) 탐색적 요인분석 결과

요인분석에 앞서 데이터의 적합성을 판단하기 위해 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO) 검정과 Bartlett의 구형성 검정을 실시하였다. Kaiser(1974)는 KMO 검정의 값이 0.7 이상이면 양호한 결과라고 제시하였는데, KMO 검정의 값은 0.9로 나타나 변수들 간의 상관관계가 양호한 것으로 나타났다. 구형성 검정은 유의확률 0.01하에서 유의한 것으로 나타나 요인분석의 사용에 문제가 없음을 보여준다.

28개의 요인으로 탐색적 요인분석을 실시한 결과는 <표 4-5>와 같다.

32) 최창호와 유연우(2017)

요인분석의 방법으로는 최대우도법(maximum likelihood estimation), 요인의 회전에는 직각회전(varimax)을 적용하였으며 요인의 개수는 문헌 연구에서 결정한 대로 9개를 적용하였다.

〈표 4-5〉 1차 탐색적 요인분석 결과

구분	요인1	요인2	요인3	요인4	요인5	요인6	요인7	요인8	요인9	공통성
rob1	0.27	0.03	0.26	0.08	0.25	0.04	0.24	0.09	0.04	0.28
rob2	0.57	0.06	0.11	0.17	0.17	0.13	0.08	0.04	0.07	0.43
rob3	0.93	0.22	0.11	0.02	0.04	0.06	0.06	0.16	0.19	1
rob4	0.52	0.28	0.24	0.03	0.03	0.14	0.13	0.19	0.25	0.55
red1	0.19	0.51	0.21	0.09	0.02	0.13	0.23	0.16	0.12	0.45
red2	0.24	0.74	0.23	0.15	0.06	0.12	0.21	0.12	0.2	0.8
red3	0.11	0.45	0.22	0.19	0.17	0.32	0.16	0.17	0.11	0.49
vis1	0.13	0.26	0.62	0.09	0.14	0.12	0.17	0.14	0.12	0.58
vis2	0.11	0.07	0.9	0.12	0.09	0.15	0.23	0.05	0.04	0.93
vis3	0.16	0.21	0.58	0.05	0.11	0.08	0.11	0.08	0.22	0.5
fle1	0.13	0.18	0.13	0.66	0.2	0.16	0.12	0.13	0.04	0.6
fle2	0.1	0.08	0.11	0.93	0.16	0.15	0.15	0.17	0.09	1
fle3	0.07	0.19	0.06	0.03	0.15	0.09	0.37	0.14	-0.03	0.23
col1	0.07	0.05	0.14	0.15	0.54	0.27	0.36	0.15	-0.02	0.57
col2	0.13	0.08	0.13	0.13	0.79	0.17	0.26	0.18	0.1	0.83
col3	0.09	0.06	0.12	0.21	0.71	0.13	0.32	0.08	0.14	0.72
agi1	0.12	0.2	0.18	0.24	0.26	0.78	0.18	0.16	0.08	0.87
agi2	0.25	0.14	0.16	0.16	0.17	0.56	0.21	0.19	0.23	0.61
agi3	0.14	0.17	0.13	0.08	0.2	0.4	0.41	0.2	0.15	0.51
ims1	0.09	0.07	0.13	0.11	0.19	0.12	0.86	0.06	0.11	0.85
ims2	0.01	0.1	0.21	0.11	0.2	0.08	0.82	0.12	0.13	0.82
ims3	0.13	0.18	0.2	0.1	0.24	0.12	0.79	0.23	0.07	0.85
res1	0.16	0.12	0.15	0.22	0.14	0.26	0.32	0.63	0.17	0.73
res2	0.17	0.22	0.15	0.21	0.18	0.25	0.32	0.66	0.22	0.83

구분	요인1	요인2	요인3	요인4	요인5	요인6	요인7	요인8	요인9	공통성
res3	0.18	0.24	0.09	0.16	0.34	0.06	0.35	0.52	0	0.63
rec1	0.26	0.37	0.2	0.1	0.13	0.13	0.03	0.36	0.52	0.69
rec2	0.18	0.12	0.2	0.06	0.02	0.15	0.16	0.03	0.92	1
rec3	0.22	0.16	0.05	0.09	0.24	0.06	0.06	0.32	0.42	0.42

자료: 저자 작성

전체적으로 예상했던 결과를 보여주나 rob1과 fle3 두 가지 문항의 요인부하량이 확실히 구분되지 않으며, 공통성도 각각 0.28과 0.23으로 낮게 나왔다. 공통성은 추출된 요인에 의해 설명되는 비율을 의미하는데, 0.4 이하이면 같은 요인으로 보기 어렵다³³⁾. 따라서 두 문항을 제외하고 동일한 방법으로 탐색적 요인분석을 실시하였다. 결과는 <표 4-6>과 같다.

<표 4-6> 2차 탐색적 요인분석 결과

구분	요인1	요인2	요인3	요인4	요인5	요인6	요인7	요인8	요인9	공통성
rob2	0.57	0.06	0.12	0.17	0.16	0.13	0.07	0.04	0.07	0.43
rob3	0.93	0.21	0.11	0.02	0.05	0.06	0.05	0.17	0.19	1
rob4	0.52	0.28	0.23	0.04	0.03	0.15	0.12	0.2	0.25	0.54
red1	0.19	0.51	0.21	0.09	0.02	0.14	0.2	0.17	0.12	0.45
red2	0.25	0.74	0.24	0.14	0.08	0.12	0.18	0.13	0.2	0.8
red3	0.11	0.46	0.23	0.19	0.18	0.32	0.13	0.17	0.11	0.5
vis1	0.13	0.24	0.66	0.1	0.15	0.11	0.15	0.15	0.11	0.61
vis2	0.11	0.08	0.85	0.12	0.09	0.15	0.24	0.05	0.04	0.85
vis3	0.16	0.2	0.61	0.06	0.11	0.08	0.11	0.08	0.22	0.53
fle1	0.12	0.17	0.14	0.66	0.21	0.16	0.11	0.14	0.04	0.6
fle2	0.09	0.09	0.1	0.93	0.17	0.15	0.15	0.17	0.09	1
col1	0.07	0.06	0.14	0.15	0.55	0.27	0.34	0.16	-0.02	0.56

33) Hair 등(1995)

구분	요인1	요인2	요인3	요인4	요인5	요인6	요인7	요인8	요인9	공통성
col2	0.13	0.07	0.14	0.13	0.82	0.16	0.22	0.19	0.1	0.85
col3	0.09	0.06	0.12	0.21	0.71	0.13	0.3	0.09	0.13	0.71
agi1	0.12	0.2	0.19	0.24	0.27	0.77	0.15	0.16	0.08	0.86
agi2	0.25	0.14	0.16	0.16	0.18	0.57	0.19	0.19	0.23	0.62
agi3	0.14	0.17	0.13	0.08	0.21	0.41	0.39	0.22	0.14	0.5
ims1	0.09	0.1	0.13	0.11	0.21	0.14	0.84	0.09	0.09	0.84
ims2	0.01	0.12	0.22	0.11	0.22	0.09	0.81	0.15	0.11	0.82
ims3	0.12	0.2	0.19	0.1	0.27	0.13	0.77	0.26	0.05	0.86
res1	0.16	0.12	0.16	0.22	0.15	0.26	0.29	0.65	0.17	0.73
res2	0.17	0.22	0.15	0.21	0.19	0.26	0.28	0.67	0.21	0.83
res3	0.17	0.24	0.09	0.16	0.36	0.06	0.31	0.53	-0.01	0.63
rec1	0.26	0.36	0.21	0.1	0.14	0.13	0.01	0.36	0.52	0.69
rec2	0.19	0.12	0.21	0.06	0.02	0.15	0.18	0.03	0.92	1
rec3	0.22	0.16	0.05	0.09	0.24	0.06	0.05	0.32	0.42	0.42

자료: 저자 작성

요인부하량이 모두 0.4 이상으로 나타나 요인추출 기준을 만족하며, 공통성도 모두 0.4 이상으로 나타나 설문에 사용한 측정 문항이 적절하게 각 요인을 설명하고 있음을 보여준다. 모형의 적합성을 나타내는 RMSEA(root mean square error of approximation) 값 또한 0.04로 좋은 적합도(good fit)의 기준인 0.05 이하로 나타났다. 따라서 두 문항을 제외한 26개의 측정 변수와 9개의 요인을 확정하고 확인적 요인분석을 진행하였다. 삭제한 두 가지의 문항은 강건성의 ‘항만의 성과는 항상 목표에서 크게 벗어나지 않는다’와 유연성의 ‘항만의 협력 파트너들은 공급 능력을 유연하게 조정할 수 있다’이다. 항만의 강건성은 성과 달성보다 기능 유지의 측면이 더 중요하며, 항만의 성과 목표 달성에는 경기 상황 등의 외부적인 요소가 큰 영향을

미치기 때문에 해당 문항을 통해 강건성을 측정하기 어려운 것으로 보인다. 유연성의 경우 핵심 파트너들의 역할이 중요한 공급사슬과 달리 파트너들의 역량이 항만에 미치는 영향이 상대적으로 적기 때문에 적절하지 않은 문항인 것으로 판단된다.

2) 확인적 요인분석 결과

항만의 회복탄력성 측정 모형의 구조적 타당성을 검증하기 위한 확인적 요인분석을 시행하기에 앞서 하위 요인 간 판별타당성 (discriminant validity) 분석이 선행되어야 한다는 전문가의 의견에 따라 강건성, 여분성, 가시성, 유연성, 협력, 민첩성, 정보 공유, 반응, 회복의 아홉 가지 요인에 대한 판별타당성 분석을 실시하였다. 판별 타당성이란 서로 다른 요인들 간에는 확실한 차이가 있어야 한다는 의미이다. 판별타당성의 검증은 보통 AVE와 요인 간 상관계수의 자승치를 비교하여 시행하며, AVE가 상관계수의 자승치보다 클 경우 판별타당성이 있는 것으로 본다. <표 4-7>은 9개의 요인 간 상관계수의 자승치와 AVE를 비교한 결과이다. 표의 대각은 AVE를 나타내며, 나머지는 상관계수의 자승치를 나타낸 것이다. AVE가 모두 큰 값을 나타내어 판별타당성이 확보되었음을 알 수 있다.

〈표 4-7〉 요인 간 상관계수와 AVE 비교

구분	강건성	여분성	가시성	유연성	협력	민첩성	정보 공유	회복	반응
강건성	0.635								
여분성	0.430	0.547							
가시성	0.208	0.428	0.630						
유연성	0.104	0.252	0.166	0.753					
협력	0.118	0.206	0.211	0.285	0.683				
민첩성	0.265	0.473	0.319	0.346	0.453	0.558			
정보 공유	0.113	0.312	0.284	0.179	0.437	0.368	0.819		
회복	0.295	0.460	0.266	0.352	0.393	0.557	0.450	0.662	
반응	0.442	0.526	0.288	0.170	0.187	0.378	0.154	0.472	0.559

자료: 저자 작성

〈그림 4-5〉의 모형으로 고차원 확인적 요인분석(Higher-Order Confirmatory Factor Analysis)을 시행하였다. 분석 중 오차분산이 음수로 계산되는 헤이우드(Heywood) 문제가 발생하여 최상위 요인인 회복탄력성이 하위 요인에 주는 부하량을 1로 고정한 후 분석을 시행하였다. 이는 헤이우드 문제를 해결하기 위한 일반적인 방법 중 하나이다³⁴⁾. 분석 결과 모형의 적합도 지수는 〈표 4-8〉과 같다.

〈표 4-8〉 적합도 지수

구분	χ^2	df	p값	CFI	TLI	RMSEA
값	578.095	288	0.000	0.911	0.900	0.071

자료: 저자 작성

일반적으로 좋은 적합도의 기준은 ' χ^2/df 가 3보다 작을 것, CFI가 0.7보다 클 것, TLI가 0.9보다 클 것, RMSEA가 0.1보다 작을 것'이다³⁵⁾. 이 연구 모형의 경우 $\chi^2/df=2.01$, CFI는 0.911, TLI가 0.9,

34) 우종필(2016)

RMSEA가 0.071로 좋은 적합도의 기준을 모두 만족하고 있다.

다음으로 수렴타당성(convergent validity)을 검증해 보았다. 수렴 타당성은 동일한 요인을 측정하는 변수들 사이에 높은 상관관계가 있어야 한다는 것으로, 일반적으로 CR과 AVE를 활용하여 판단한다. <표 4-9>는 각 요인의 CR과 AVE를 계산한 것이다.

<표 4-9> 확인적 요인분석 결과와 수렴타당성

요인	측정 변수	표준화 적재량	CR	AVE
강건성	rob2	0.719	0.838	0.635
	rob3	0.884		
	rob4	0.779		
여분성	red1	0.688	0.782	0.547
	red2	0.834		
	red3	0.688		
가시성	vis1	0.812	0.836	0.630
	vis2	0.832		
	vis3	0.733		
유연성	fle1	0.836	0.859	0.753
	fle2	0.898		
협력	col1	0.737	0.865	0.683
	col2	0.885		
	col3	0.850		
민첩성	agi1	0.837	0.860	0.558
	agi2	0.788		
	agi3	0.703		
정보 공유	ims1	0.894	0.750	0.819
	ims2	0.894		
	ims3	0.927		
회복	res1	0.795	0.853	0.662
	res2	0.938		
	res3	0.689		

35) Shin과 Park(2019)

요인	측정 변수	표준화 적재량	CR	AVE
반응	rec1	0.868	0.789	0.559
	rec2	0.746		
	rec3	0.607		
흡수력	강건성	0.783	0.844	0.645
	여분성	0.903		
	가시성	0.712		
적응력	유연성	0.657	0.849	0.587
	협력	0.764		
	민첩성	0.893		
	정보 공유	0.731		
복구력	회복	0.823	0.798	0.664
	반응	0.807		
회복탄력성	흡수력	0.946	0.962	0.893
	적응력	0.891		
	복구력	0.996		

자료: 저자 작성

수렴타당성은 일반적으로 표준화 적재량이 0.5 이상, CR이 0.7 이상, AVE가 0.5 이상일 경우 충족되었다고 판단한다.³⁶⁾ 표준화 적재량 값은 0.607~0.996 사이의 값을 보이고 있어 최소 0.5 이상을 충족하고 있으며 CR과 AVE가 모두 기준을 충족하고 있어 수렴타당성은 확보되었다고 할 수 있다.

연구 결과를 종합하여 볼 때 본 연구에서 정립한 항만의 회복탄력성 측정 모형은 수렴타당성과 판별타당성을 모두 만족하여 구조적 타당성이 있음을 증명하였으며, 좋은 적합도 지수를 보여 항만의 회복탄력성 측정에 활용하기에 타당하다는 결론을 내릴 수 있다.

36) Shin과 Park(2019)

제4절 시사점

항만 관계자 설문조사를 통해 수집한 데이터를 활용하여 탐색적 요인분석과 확인적 요인분석을 시행한 결과 강건성, 여분성, 가시성, 유연성, 협력, 민첩성, 정보 공유, 반응, 회복의 아홉 가지 요인, 26개 문항을 활용한 항만의 회복탄력성 측정 모형의 타당성이 검증되었다. <표 4-10>은 각 측정 문항과 요인의 점수를 나타낸 것이다.

〈표 4-10〉 측정 점수

구분		문항별 평균	요인별 평균
강건성	rob2	3.42	3.27
	rob3	3.2	
	rob4	3.2	
여분성	red1	3.48	3.27
	red2	3.2	
	red3	3.12	
가시성	vis1	3.26	3.25
	vis2	3.42	
	vis3	3.06	
유연성	fle1	3.36	3.36
	fle2	3.35	
협력	col1	3.59	3.42
	col2	3.25	
	col3	3.41	
민첩성	agi1	3.07	3.11
	agi2	3.1	
	agi3	3.16	
정보 공유	ims1	3.48	3.47
	ims2	3.48	
	ims3	3.45	

구분		문항별 평균	요인별 평균
반응	res1	3.26	3.36
	res2	3.32	
	res3	3.51	
회복	rec1	2.85	2.92
	rec2	2.7	
	rec3	3.2	

자료: 저자 작성

문항별 평균 점수는 대부분 3점을 넘겨 우리나라 항만은 보통 이상의 회복탄력성 관련 역량을 갖추고 있는 것으로 볼 수 있다. 적응력의 세 가지 요인은 모두 비슷한 점수를 보이고 있으며, 흡수력 요인에서는 협력과 정보 공유 점수가 비교적 높은 것으로 측정되었고 민첩성 점수가 가장 낮았다. 이는 항만의 주요 파트너들과의 협력 활동이 비교적 원활하게 이루어지고 있음을 보여주나 예상치 못한 환경 변화에 신속하게 대응하는 능력은 약간 부족하다고 할 수 있다. 복구력 요인에서는 회복의 점수가 2.92점으로 모든 요인 중 가장 낮은 것을 볼 수 있다. 이는 우리나라 항만이 실제로 충격을 받았을 때 정상 운영 상태로 신속하게 복귀하는 능력이 부족함을 보여준다. 종합하면, 우리나라 항만은 회복탄력성의 요인 중 적응력과 흡수력은 어느 정도 갖추고 있으나 복구력에서 취약점을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 충격에 대한 사전 대비는 되어 있지만 실제로 충격을 받았을 때 복구할 수 있는 능력이 미비함을 의미한다. 이 결과는 제2장에서 현행 법·제도를 살펴보았을 때, 제도가 예방과 대비 위주로 구성되어 있으며 복구 관련 계획이나 매뉴얼이 부족하고 관련한 성과 지표가 마련되어 있지 않은 것과 일치한다. 따라서 복구력과 관계가 있는 항만의 역량을 중점적으로 강화하고 관련 법 및 제도를 마련할 필요가 있다.

회복탄력성 역량, 특히 복구 역량을 강화하기 위해서는 해당 요인 강화에 필요한 활동이 무엇인지 정의할 필요가 있다. 따라서 본 연구 모형에서 정의한 아홉 가지 요인에 맞추어 요인별 역량 강화를 위한 방안을 마련할 필요가 있으며, 향후 추가적인 정책 연구를 통해 아홉 가지 요인을 강화할 수 있는 방안을 제시하여야 한다.

본 연구는 공급사슬 분야와 인프라 시스템 분야의 문헌 연구를 통해 회복탄력성 측정을 위한 요인과 측정 변수들을 도출하여 항만 회복탄력성 측정 모형을 구축한 후, 항만 관계자 설문조사를 통하여 그 타당성을 검증하였다. 다양한 분야의 문헌 연구를 통해 항만의 회복탄력성이 아홉 가지 요인을 바탕으로 한 다계층 구조임을 확인한 것이 본 연구의 가장 큰 이론적 공헌이다. 본 연구 결과는 향후 항만 회복탄력성과 지속가능성 등에 관한 연구의 이론적 발판이 될 수 있을 것이다. 또한 항만의 회복탄력성이라는 추상적인 개념에 대한 실제적인 측정 모형을 구축하여 구체적인 회복탄력성 강화 방안 마련과 연계할 수 있도록 한 것이 본 연구의 정책적 공헌이다.

본 연구 모형과 관련한 후속 과제는 다음과 같다. 먼저 이론적인 측면에서 보면, 유연성의 경우 요인분석 과정에서 하나의 문항이 삭제되어 2개의 문항만으로 구성되었는데 문항 수를 늘려 최소 3개의 문항으로 구성하여 새로이 검증해 본다면 측정 모형의 타당성을 높이는 데 도움이 될 것이다. 또한 본 연구의 모형을 활용하여 항만의 회복탄력성과 운영 성과 및 지속가능성 성과와의 인과관계를 검증함으로써 항만의 회복탄력성이 항만의 지속가능한 운영 성과와 어떠한 상관관계를 가지는지 검토하여 성과를 향상시킬 수 있는 방안을 모색해 보는 것도 좋은 후속 과제가 될 것이다.

정책적인 측면에서는 회복탄력성을 구성하는 아홉 가지 요인에 대

한 항만의 실제적인 활동을 정의하고, 관련 성과 지표와 연계하는 연구가 필요하다. 각 요인과 관련된 구체적인 활동을 정의하고 활동과 연관된 성과 지표를 구축한 뒤 실제적인 회복탄력성 측정 체계를 만든다면 우리나라 항만의 실제적인 회복탄력성 강화로 이어질 수 있을 것이다. 또한 항만 전체가 아닌 각 항만별로 회복탄력성을 평가하여 항만별 회복탄력성 강화 활동을 도출하는 연구가 필요할 것이다. 마지막으로 설문조사 기반의 연구는 연속성을 확보하기 힘들다는 단점이 있기 때문에 향후에는 각 요인을 측정할 수 있는 데이터를 마련하여 그를 기반으로 한 평가 모형의 수립이 필요하며, 본 연구에서 구축한 모형이 해당 연구의 이론적 기초가 될 수 있을 것이다.

제 5 장

시뮬레이션을 활용한 회복탄력성 측정

제1절 개요

이 장에서는 SD 시뮬레이션을 활용하여 항만의 회복탄력성을 수량적으로 측정하고 위기 대응 계획의 효과를 알아볼 수 있는 개념적인 모형을 구축하는 것을 목표로 한다. SD는 시스템 사고에 기초하여 피드백 구조와 동태적 행태 유형을 강조하는 시뮬레이션 방법론으로,³⁷⁾ 시스템의 구성 요소들이 시간의 흐름에 따라 변화하는 행태를 연구하기에 적합한 방법론이다. 제2장에서 언급한 회복탄력성의 정의를 보면 ‘빠르게’라는 단어에 시간 흐름이 포함되어 있음을 알 수 있다. 즉, 회복탄력성에는 위기에 적응하고 기능을 회복하는 데 걸리는 시간이 중요한 요인이기 때문에 시간의 흐름에 따른 변화를 강조하는 SD를 적용하기에 적합하다. 또한 제3장의 항만 위기 사례에서 살펴보았듯이 자연재해, 사이버 테러, 감염병 등은 모두 항만

37) 최강화 등(2006)

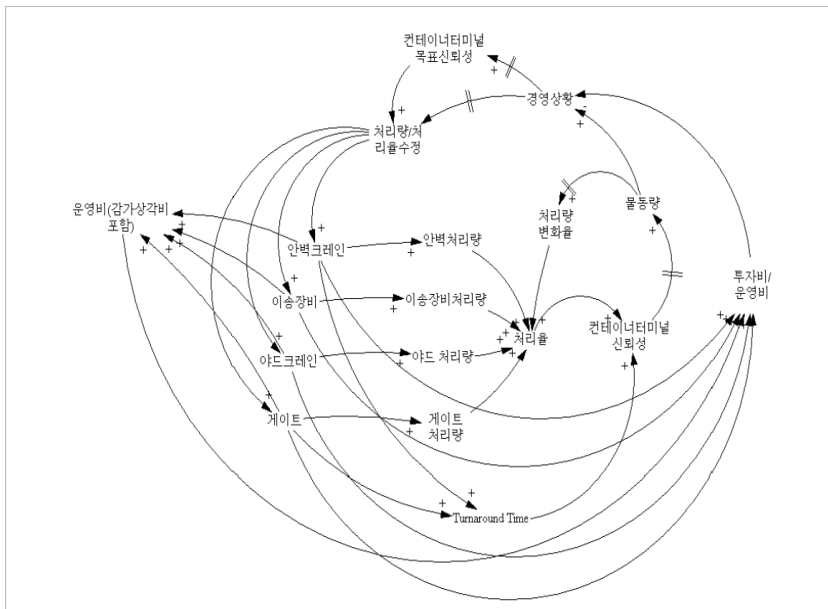
운영에 지장을 주지만 영향을 미치는 요소들은 전부 상이하다. 따라서 시스템 구성 요소들의 영향 관계를 살펴볼 수 있는 SD를 통해 연구를 시행하였다. SD모형 구축을 위해 먼저 관련 문헌 연구를 통해 항만 운영 시스템과 회복탄력성 측정에 대한 이론적 기반을 살펴보았다. 다음으로 제3장에서 살펴본 항만에 위기를 초래하는 요인들이 항만 운영에 어떠한 영향을 주는지 인과관계를 살펴보고 인과지도를 작성한다. 마지막으로 최근 가장 큰 문제가 되고 있는 코로나19와 같은 감염병 사례에 대한 SD 모형을 구축한 후 항만의 회복탄력성을 측정하고, 감염병에 대한 대응 정책의 효과를 살펴본다.

제2절 항만 운영 시스템 회복탄력성 측정 사례

본 연구는 SD를 활용한 연구 중 i) 항만 운영 시스템 분야, ii) 회복탄력성 측정, 두 가지 분야에 기반하고 있다. 항만의 회복탄력성을 수량적으로 측정하기 위해서는 먼저 항만 운영 시스템을 모형화할 필요가 있기 때문이다. 항만 운영 시스템은 항만 관련 연구에서 매우 중요한 분야 중 하나로 지금까지 많은 연구가 이루어졌다. 이 중 SD를 활용한 연구를 살펴보면, 최형립 등(2006)은 컨테이너 터미널 경쟁력 강화 모델을 개발하면서 게이트 반출입 작업, 장치장 작업, 양·적하 작업들과 터미널 신뢰성 간의 인과관계를 <그림 5-1>과 같이 파악하였다. 안벽 크레인, 이송장비, 야드 크레인, 게이트가 각각의 작업을 처리하면 처리량이 처리율에 영향을 미치게 되고, 이 처리율이 컨테이너 터미널의 신뢰성에 영향을 미쳐 물동량과 연결되는 구조이다. 또한 이 인과지도를 바탕으로 흐름도를 <그림 5-2>와 같이

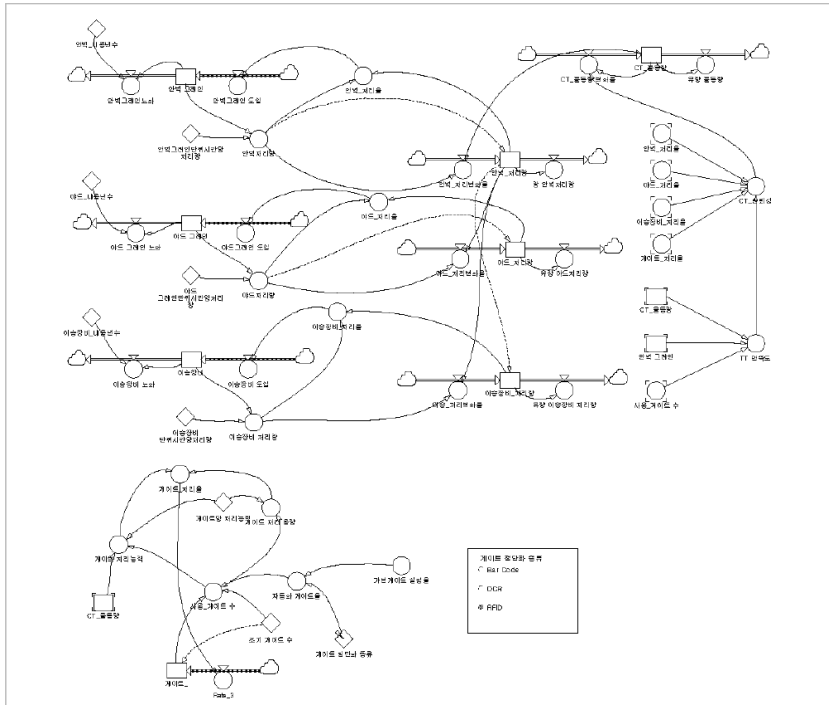
구성하였다. 본 연구는 선박 재항 시간과 컨테이너 터미널의 신뢰성이라는 추상적인 개념을 연결하여 모형으로 나타내었다는 데 의의가 있지만 컨테이너 터미널 내의 다양한 요소들에 대한 고려가 부족하다는 한계가 있다.

〈그림 5-1〉 터미널 작업의 인과지도



자료: 최형림 등, *SD기법을 활용한 컨테이너터미널 경쟁력 강화 모델 개발*, 2006, p. 128

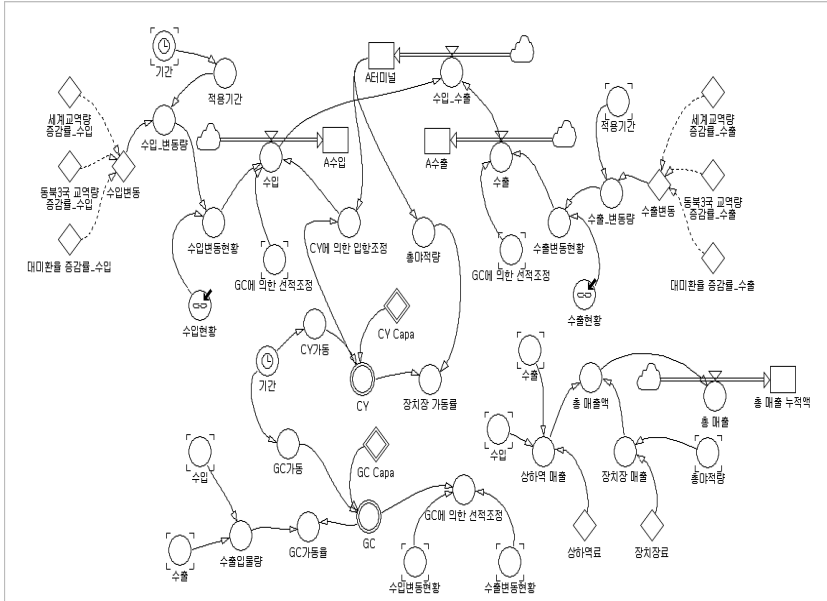
〈그림 5-2〉 컨테이너 터미널 작업 흐름도



자료: 최형림 등, *SD기법을 활용한 컨테이너터미널 경쟁력 강화 모델 개발*, 2006, p. 129

정현재·여기태(2011)는 물동량 변동 요인이 터미널 운영에 미치는 영향을 연구하면서 컨테이너 터미널 운영에 대한 흐름도를 〈그림 5-3〉과 같이 구축하였다. 컨테이너 야드(CY)와 선석 크레인(GC) 가동률을 주요 변수로 하여 물동량 변동 요인(세계 교역량 증감률, 동북 3국 교역량 증감률, 대미 환율 증감률)의 변화에 따른 매출액 및 가동률, 누적 적재량을 비교하였다. 해당 연구는 물동량 변동 요인이 실제로 항만 운영에 주는 영향을 수치적으로 표현했다는 점에서 의의가 있다.

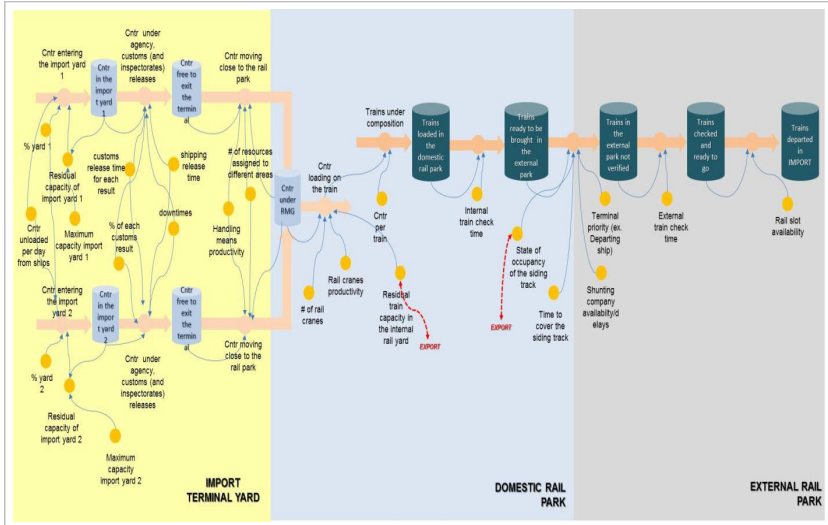
〈그림 5-3〉 컨테이너 터미널 운영 흐름도



자료: 정현재와 여기태, *물동량 변동요인이 터미널 운영에 미치는 영향력 분석에 관한 연구*, 2011, p. 100

Caballini 등(2012)은 항만 운영 시스템과 내륙 철도 시스템을 연결한 개념적 모델을 〈그림 5-4〉와 같이 구축하였다. 항만 운영 시스템 선석 등 해안 쪽 시스템은 배제하고 터미널 야드 쪽에 집중하여 컨테이너가 야드에 들어오고 나가는 과정만을 모형화하였다. 이를 통해 자원 및 기술의 변화에 따른 항행 시간, 열차 발착 횟수 등을 측정하였다. 해당 연구는 항만에서 가장 중요한 부분인 선박의 양·적 하 과정을 배제하여 해당 부분의 시스템 구성 요소를 파악할 수 없다는 단점이 있다.

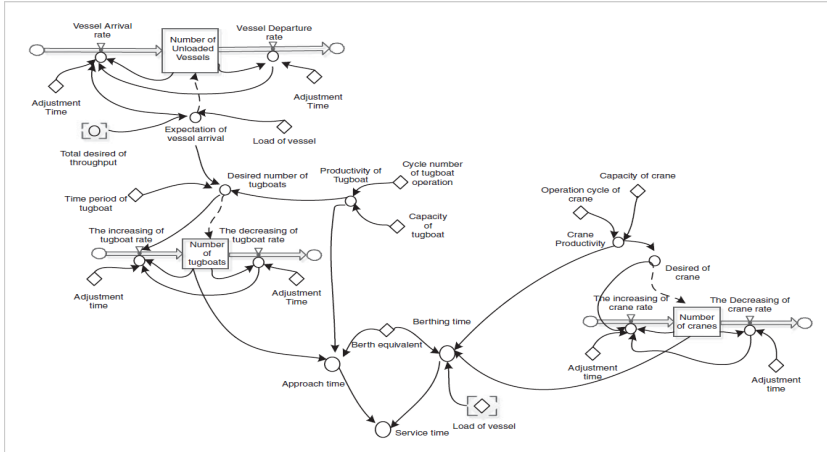
〈그림 5-4〉 항만-철도 운영 흐름도



자료: Caballini 등, *The port as a system of systems: a System Dynamics simulation approach*, 2012, p. 193

Ridwan과 Noche(2018)는 항만 운영 최적화와 서비스 품질 향상을 위해 6시그마와 SD를 결합한 연구를 시행하였다. 품질에 따른 비용, 손실 비용, 항만 운영과 관련된 세 가지의 흐름도를 구축하였으며 그 중 항만 운영에 관련한 흐름도는 〈그림 5-5〉와 같다. 입항 선박, 예선 수, 크레인 수를 저장 변수로 선정하여 흐름도를 구축하였으며 예선 수가 선석 접근 시간에 영향을 주고 크레인 수와 생산성이 화물 처리 시간에 영향을 주는 과정을 나타내었다. 다만 해당 연구는 낮은 품질에 따른 비용(cost of poor quality)을 항만 성과로 설정하고 이를 추정하는 데 중점을 두었기 때문에 물동량과 같은 일반적인 항만 성과는 고려하지 않았다.

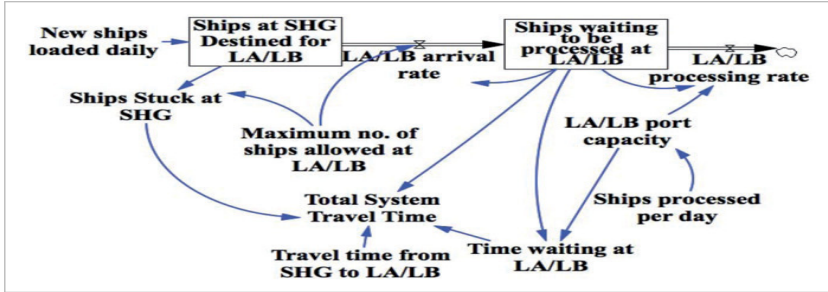
〈그림 5-5〉 항만 운영 흐름도



자료: Caballini 등, *The port as a system of systems: a System Dynamics simulation approach*, 2012, p. 193

지금까지 살펴본 연구들은 항만 운영 시스템을 SD로 모형화하여 항만의 성과를 측정하는 데 집중하였으며 회복탄력성은 고려하지 않았다. 다음으로 SD를 활용한 항만의 회복탄력성 측정 연구에 대해 살펴보면, Omer 등(2012)은 시간적 측면에서 회복탄력성을 측정하기 위해 항만 네트워크 시스템 내의 이동 시간을 나타내는 흐름도를 〈그림 5-6〉과 같이 구성하였다. 다만 이 흐름도는 상해항과 LA/LB항 간의 네트워크 시스템을 나타낸 것이므로 본 연구에서 구축하고자 하는 항만 운영 시스템 모형과는 거리가 있다.

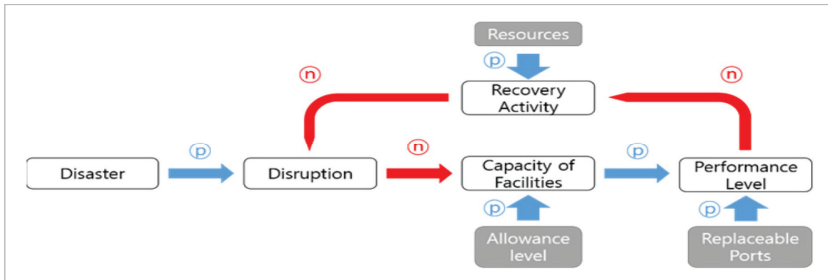
〈그림 5-6〉 항만 네트워크 이동시간 측정 흐름도



자료: Omer 등, *A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems*, 2012, p. 695

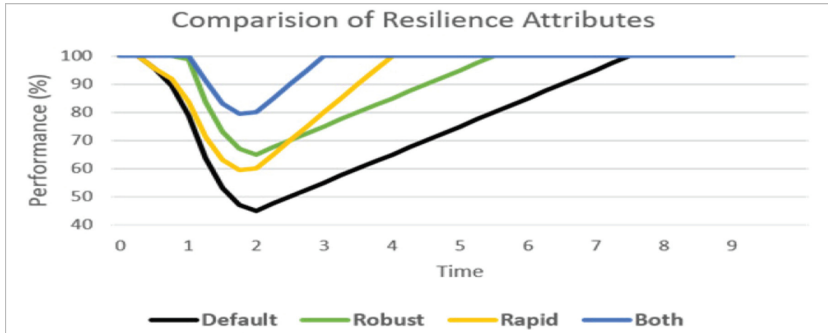
Cho와 Park(2017)은 강건성과 신속성이 항만의 회복탄력성에 미치는 영향을 측정하기 위한 개념적 모형을 구축하였다. 〈그림 5-7〉과 〈그림 5-8〉은 각각 회복탄력성 요인을 포함한 SD 모형과 그 측정 결과를 나타낸 것이다. 항만의 성과는 물동량 처리 능력으로 선정하였다. 해당 연구는 시스템 다이내믹스를 활용하여 회복탄력성을 측정할 수 있는 가능성을 확인하였다는 점에서 의의가 있으나 개념적으로 단순화한 모형만을 제시하였다는 단점이 있어 실제로 항만에 적용하려면 심화 연구가 필요하다.

〈그림 5-7〉 회복탄력성 요인과 항만 성과 SD 모형



자료: Cho와 Park, *Constructing resilience model of port infrastructure based on system dynamics*, 2017, p. 356

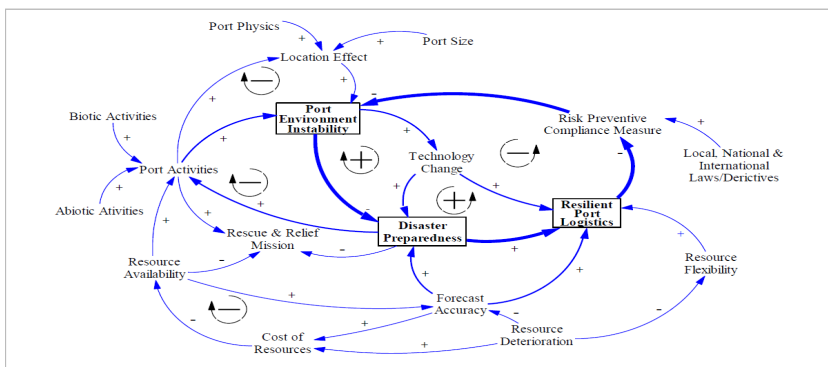
〈그림 5-8〉 요인에 따른 회복탄력성 측정 결과



자료: Cho와 Park, *Constructing resilience model of port infrastructure based on system dynamics*, 2017, p. 357

Buor(2015)는 항만의 재난 대비 정도(disaster preparedness)가 회복탄력성과 연결된다고 주장하면서 이를 측정하기 위한 모형을 제시하였다. 〈그림 5-9〉는 재난 대비 정도와 회복탄력성 간의 관계를 나타낸 인과지도이다. 해당 연구는 회복탄력성을 직접 측정하지는 않았으며 재난 대비 정도를 대리 변수로 하여 간접적으로만 측정하였다.

〈그림 5-9〉 재난 대비 정도와 회복탄력성의 인과 지도



자료: Buor, *Applying System Dynamics Modelling To Building Resilient Logistics: A Case of the Humber Ports Complex*, 2015, p. 227

본 연구에서는 Cho와 Park(2017)의 관점에서 항만의 회복탄력성 측정 모형을 구축하되, 이를 항만 운영 시스템과 연결하여 나타내고자 한다. 먼저 3장에서 알아본 항만 위기 유발 요인이 항만 운영에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지를 분석하여 인과지도로 나타낸다. 구축한 인과지도와 정현재와 여기태(2011), Caballini 등(2012)이 제시한 항만 운영 시스템 흐름도를 기반으로 회복탄력성을 측정하기 위한 SD 모형을 구축한다. 이 모형을 활용하여 코로나19의 유행으로 인해 큰 이슈가 되고 있는 감염병 사례에 대한 시뮬레이션을 실행하여 회복탄력성을 측정해 봄으로써 SD 모형을 활용한 항만의 회복탄력성과 위기 대응 계획의 효과 측정 가능성을 검증하고자 한다.

제3절 연구 모형 및 결과 분석

1. 항만 위기 요인의 인과지도

제3장에서 다룬 항만 위기 사례에서 찾을 수 있는 위협 요인들이 항만 운영에 미치는 영향을 구체적으로 알아보기 위해 인과지도를 구성하였다. 항만의 위기는 사회와 경제 전반적으로 큰 파급효과를 가져오지만, 본 연구는 항만의 회복탄력성 측정 모형을 구축하는 것이 목표이기 때문에 사회경제적 파급효과보다는 항만 운영에 미치는 영향에 초점을 두어 인과관계를 파악하였다. 본 연구에서는 가장 사례가 많은 자연재해와 최근 발생 빈도가 늘어나고 있는 사이버 테러, 코로나19의 발생으로 많은 주목을 받고 있는 감염병 등 세 가지 위협 요인에 대한 인과관계를 분석하여 인과지도를 구성하였다.

1) 자연재해

태풍 매미나 동일본 대지진 등의 사례에서 볼 수 있듯이 자연재해가 항만 운영에 영향을 미치는 일차적인 요인은 시설 파괴이다. 자연재해에 의한 항만 운영의 중단 사례는 아니나, 최근 부산항 신항에서 발생한 선박과 크레인 간 충돌로 인해 크레인의 가동이 중단된 사례는 자연재해의 결과로 인해 항만의 운영이 중단됨으로써 발생할 수 있는 물동량을 처리하지 못하게 되는 결과가 도출된다는 점에서 유사한 사례라 할 수 있다. <표 5-1>은 자연재해가 항만 운영에 영향을 미치는 인과관계의 흐름을 나타낸 것이다.

<표 5-1> 자연재해 영향 요인 인과관계 흐름

세부 요인 인과관계 흐름	
1	선석 파손→선박 수용 능력 하락→입출항 척수 감소→물동량 감소→경제적 손실
2	크레인 파손→처리 용량 하락→생산성 하락→선박 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
3	야드 파손→야드 면적 감소→야드 생산성 하락→트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
4	항만 출입 게이트 손상→트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
5	복구 비용→경제적 손실→시설 복구→물동량 증가(회복)→경제적 손실 회복

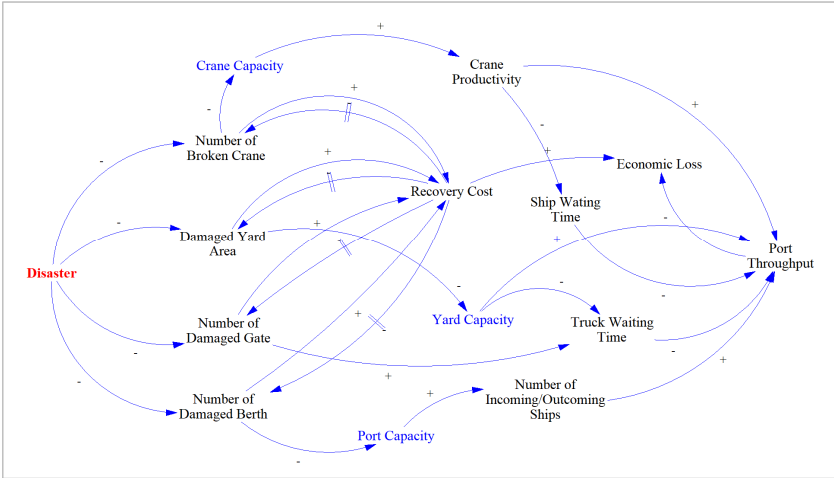
자료: 저자 작성

자연재해가 일어나면 항만시설 및 장비가 손상되어 항만의 화물 처리 용량이 감소하게 된다. 손상될 수 있는 장비와 시설은 크게 선석, 크레인, 야드 면적, 항만 출입 게이트의 네 가지로 나눌 수 있다. 선석의 손상은 항만에 출입 가능한 선박 수에 영향을 미치게 되며, 선박 수가 줄어들면 항만의 물동량 또한 줄어들게 된다. 크레인의 손상은 처리 가능 용량을 줄이게 되고,³⁸⁾ 이는 생산성의 저하로 이어진

38) 부산항 신항의 경우, 크레인 3기가 운영 중단됨으로써 완전한 복구가 이루어지기 전까지 크레인 3기가 처리하던 연간 총 118만TEU의 물동량 처리에 많은 어려움이 있을 것으로 판단되는 상황.

다. 생산성 저하는 직접적으로 물동량에 영향을 주며, 선박의 대기시간을 증가시켜 간접적으로 물동량에 영향을 미친다. 다음으로 야드면적의 손상은 야드의 생산성 저하를 유발하고, 이는 항만 물동량과 트럭의 대기시간에 부정적인 영향을 미치게 된다. 게이트의 손상은 트럭의 출입을 지연시켜 물동량에 부정적인 영향을 미치게 되며, 물동량 저하는 경제적 손실로 연결된다. 또한 각 시설 및 장비의 손상은 회복을 위한 비용 지출을 유발하며, 이 비용 또한 경제적 손실을 유발하게 된다. 투입된 복구 비용은 각 시설의 복구에 쓰이게 되며, 시간 지연을 거쳐 시설 및 장비들이 복구되면 항만의 처리 용량 및 생산성이 정상으로 돌아오게 되고, 이는 물동량 또한 다시 정상 상태로 회복됨을 의미한다. 다만, 물동량이 시설 파괴 이전의 상태로 회복하는 데는 일본 고베항의 사례에서 보듯 상당히 오랜 시간이 소요될 수 있다. <그림 5-10>은 자연재해가 항만 운영과 물동량에 영향을 미치는 과정과 그 회복에 대한 인과지도를 나타낸 것이다.

〈그림 5-10〉 자연재해의 인과지도



자료: 저자 작성

2) 사이버 테러

사이버 테러는 자연재해와는 다르게 물리적인 시설에 직접적으로 영향을 주지 않지만, 이란 항만 사례와 같이 IT 시스템의 효율성을 저하시켜 선박 입출항 지연, 화물 처리 지연 등을 유발한다. <표 5-2>는 사이버 테러의 영향 요인에 대한 인과관계의 흐름을 나타낸 것이다.

<표 5-2> 사이버 테러 영향 요인 인과관계 흐름

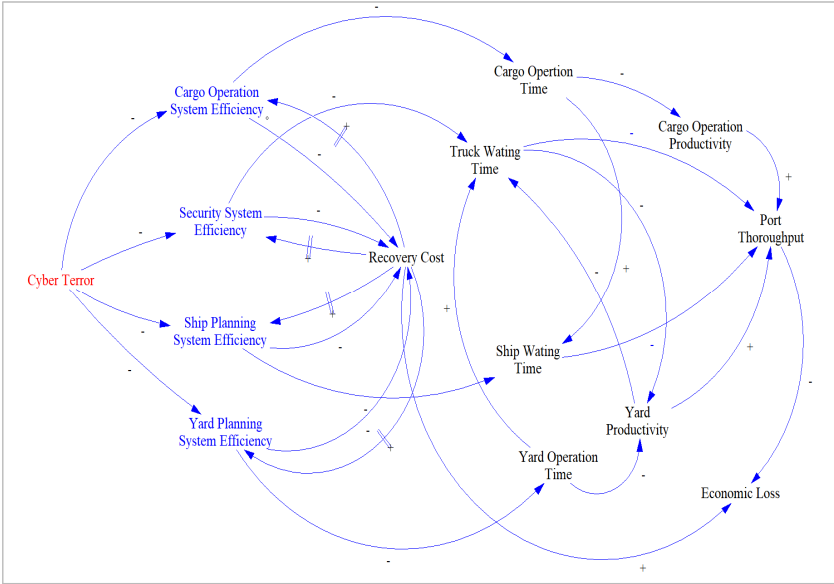
세부 요인 인과관계 흐름	
1	화물 운영 시스템 효율성 저하→작업 처리 지연→생산성 하락→선박 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
2	선박 계획 시스템 효율성 저하→선박 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
3	야드 계획 시스템 효율성 저하→야드 작업 지연→야드 생산성 하락→트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
4	보안 시스템 효율성 저하→트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
5	복구 비용→경제적 손실→시스템 복구→물동량 증가(회복)→경제적 손실 회복

자료: 저자 작성

사이버 테러로 인해 영향을 받을 수 있는 IT 시스템은 크게 화물 처리와 관련된 화물 운영 시스템(cargo operation system), 항만 입출항 스케줄과 선박 배정 등을 관리하는 선박 계획 시스템(ship planning system), 야드 운영을 관리하는 야드 계획 시스템(yard planning system), 게이트 운영과 관련한 항만 보안 시스템(security system)의 네 가지로 분류할 수 있다. 사이버 테러가 일어나면 이 네 가지 시스템의 효율성이 저하된다. 화물 운영 시스템의 효율성 저하는 화물 처리 작업 속도를 감소시켜 생산성 하락과 선박의 대기 시간 증가를 유발하며, 이는 항만 물동량의 감소로 이어진다. 선박 계획 시스템의 효율성 저하는 선박의 대기시간을 증가시켜 물동량에

영향을 준다. 야드 계획 시스템은 야드에서의 작업 시간을 증가시켜 트럭 대기시간 증가와 야드 생산성 하락을 가져오고, 이는 물동량의 하락과 연관된다. 항만 보안 시스템의 효율성 저하는 트럭 대기시간을 증가시켜 야드 생산성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 결국 네 가지 시스템의 효율성 저하는 물동량을 감소시켜 경제적 손실을 발생시킨다. 또한 시스템 효율성 하락에 따라 복구 비용이 발생하며 이 비용 또한 경제적 손실과 연결된다. 복구 비용을 지출함에 따라 각 시스템의 효율성은 시간이 흐르면서 점차 정상으로 돌아오게 되고, 이는 물동량 또한 다시 정상 상태로 회복됨을 의미한다. <그림 5-11>은 사이버 테러가 항만 운영에 영향을 주는 과정을 인과지도로 표현한 것이다.

〈그림 5-11〉 사이버 테러의 인과지도



자료: 저자 작성

3) 감염병

감염병은 시설이나 IT 시스템 등에는 영향을 주지 않지만, 감천항 사례에서 볼 수 있듯이 인력 운영에 영향을 주어 항만 위기를 유발한다. <표 5-3>은 감염병 영향 요인에 대한 인과관계의 흐름을 나타낸 것이다.

<표 5-3> 감염병 영향 요인 인과관계 흐름

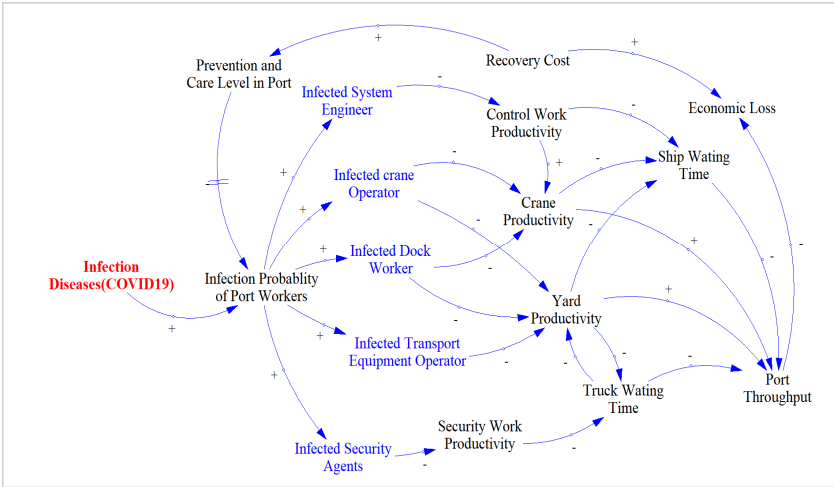
세부 요인 인과관계 흐름	
1	시스템 엔지니어 감염→컨트롤 시스템 생산성 하락→크레인 생산성 하락→선박 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
2	크레인 운용 인력 감염→크레인 생산성 하락→선박 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
3	이송장비 운용 인력 감염→야드 생산성 하락→트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
4	일반 노무 인력 감염→크레인 및 야드 생산성 하락→선박 및 트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
5	보안 인력 감염→보안 업무 생산성 하락→트럭 대기시간 증가→물동량 감소→경제적 손실
6	회복 비용→경제적 손실→감염 예방 및 치료→물동량 증가→경제적 손실 회복

자료: 저자 작성

감염병이 발생하면 항만 관련 인력이 확률적으로 감염되게 된다. 본 연구에서는 인력의 직종을 크게 IT 시스템 엔지니어, 크레인 운용 인력, 이송장비 운용 인력, 일반 노무 인력, 게이트 운용 인력을 포함한 항만 보안 요원의 5가지로 구분하였다. 시스템 엔지니어가 병에 감염되면 전체적인 항만 컨트롤 시스템의 생산성이 하락하며, 이는 크레인의 생산성 하락과 선박 대기시간 증가를 유발하여 물동량에 부정적인 영향을 미친다. 크레인 운용 인력의 감염은 크레인 생산성 하락과 직결되며, 이는 선박 대기시간 및 트럭 대기시간 증가와 물동

량 감소로 연결된다. 이송장비 운용 인력이 감염되면 야드 생산성이 하락하며, 이는 직접적으로 물동량 감소와 연결되고 트럭 대기시간을 증가시켜 간접적으로 물동량에 부정적인 영향을 미친다. 일반 노무 인력의 감염은 크레인 생산성과 야드 생산성에 모두 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 이는 마찬가지로 물동량에 부정적인 영향을 미친다. 보안 요원의 감염은 게이트에서의 보안 업무 생산성을 하락시켜 트럭 대기시간 증가로 이어지고 물동량에 부정적인 영향을 미치게 되며, 물동량의 감소는 경제적 손실을 유발한다. 감염병의 예방 및 치료에는 비용이 들어가며 이러한 복구 비용은 전염 확률을 낮추고, 환자들이 치료를 받고 일정 시간 후 업무에 복귀하게 되면 생산성과 물동량이 정상 상태로 회복되게 된다. <그림 5-12>는 감염병이 항만 운영에 영향을 주는 과정을 인과지도로 표현한 것이다.

〈그림 5-12〉 감염병의 인과지도

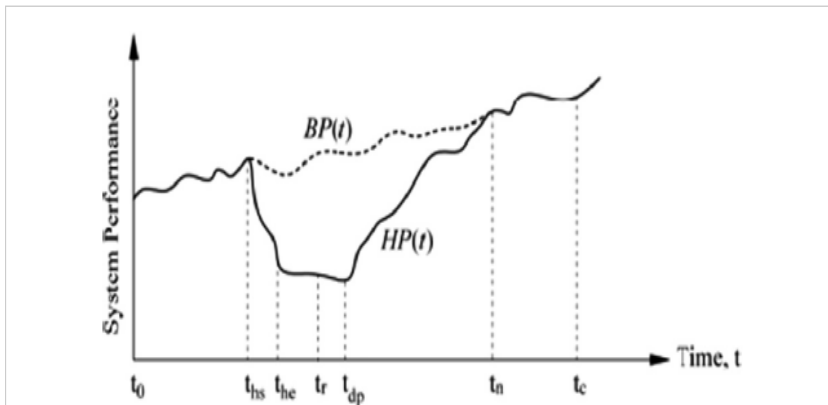


자료: 저자 작성

2. 항만 운영 시스템 모형과 감염병 확산 흐름도

이 절에서는 앞에서 구축한 인과지도 중 최근 가장 큰 사회적 문제인 코로나19와 같은 감염병에 대한 항만의 회복탄력성을 측정해 볼 수 있는 SD 모형을 구축하고자 한다. 앞에서 작성한 인과지도와 문헌 연구 결과를 바탕으로 물동량 측정을 위한 컨테이너 터미널의 항만 운영 시스템 흐름도(stock-flow diagram)를 구축한 후, 감염병 확산을 표현한 흐름도와 결합하여 감염병에 대한 회복탄력성을 측정하도록 한다. 회복탄력성은 <그림 5-13>과 같이 정상시의 시스템 성과를 나타내는 $BP(t)$ 와 위기 상황에서의 시스템 성과를 나타내는 $HP(t)$ 의 차이로 정의하며, 회복탄력성이 높을수록 둘 간의 차이는 줄어들게 된다.

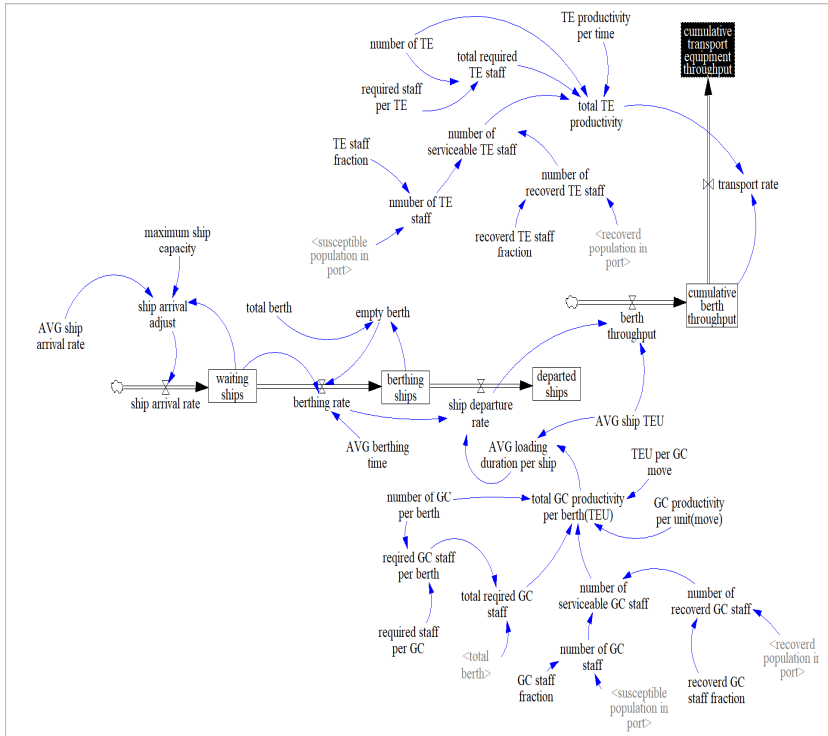
<그림 5-13> 회복탄력성의 측정



자료: Shafieezadeh와 Burden, *Scenario-based resilience assessment framework for critical infrastructure systems: Case study for seismic resilience of seaports*, 2014, p. 208

먼저 컨테이너 터미널의 운영 시스템에 관한 흐름도는 정현재와 여기태(2011), Caballini 등(2012)이 구축한 흐름도를 기반으로 게이트나 이송장비 운용 인력, 보안 인력 등의 요인을 추가하여 구성하였다. 배의 입항과 선석에서의 물동량 처리와 트럭의 입항과 야드에서의 물동량 처리, 크게 두 부분으로 구성하였으며, 감염병의 인과지도에서 살펴본 바와 같이 인력의 감염에 의한 생산성 저하를 표현할 수 있도록 하였다. 다만 시뮬레이션으로 표현하기 힘든 시스템 엔지니어의 영향은 흐름도에 포함하지 않았으며, 일반 노무 인력의 경우 하역 작업 지원 역할을 하기 때문에 직접적으로 표현하지 않고 크레인 운용 인력, 이송장비 운용 인력, 보안 인력을 중심으로 흐름도를 구성하였다. 먼저 선석에서의 물동량 처리 흐름도를 살펴보면 배가 항만에 들어오게 되면 여유 선석이 있을 경우 선석에 접안하고, 여유 선석이 없다면 대기하다가 먼저 온 배가 이안하게 되면 접안을 하게 된다. 배가 접안하게 되면 선석 크레인(gantry crane)을 사용하여 상·하역 작업이 이루어지며 여기에 걸리는 시간은 크레인 생산성의 영향을 받는다. 크레인의 생산성은 크레인의 시간당 회전 수 및 회전당 TEU, 선석당 크레인 대수와 크레인 운용 인력에 의해 결정된다. 선석 물동량은 야드 트랙터와 같은 이송장비와 연계하여 처리가 이루어지는데 이송장비의 생산성 또한 크레인과 유사하게 이송장비 대수, 이송장비의 시간당 처리 TEU, 장비 운용 인력의 영향을 받는다. <그림 5-14>는 선석 물동량의 처리 흐름도를 나타낸 것이다.

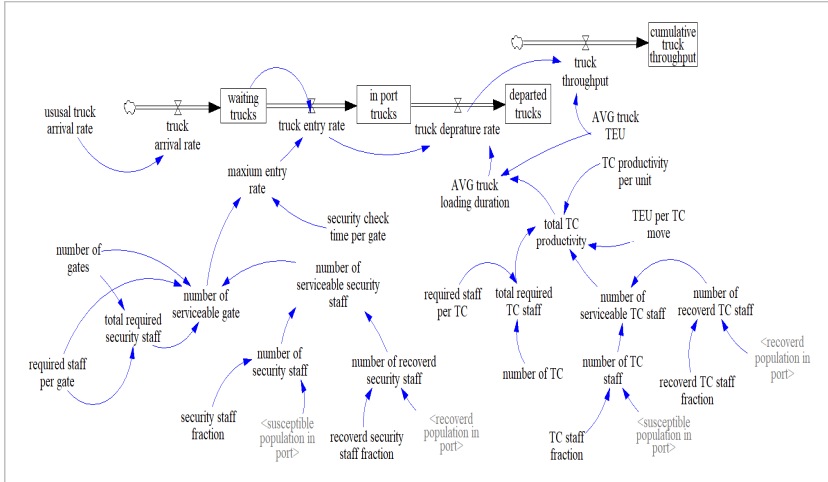
〈그림 5-14〉 선석 물동량의 처리 흐름도



자료: 저자 작성

트럭의 경우 게이트를 거쳐 입항하게 되는데 입항하는 트럭의 수는 운용 가능한 게이트 수와 보안 검사 시간의 영향을 받으며, 게이트 수는 보안 인력 수의 영향을 받는다. 입항한 트럭은 야드에서 트랜스퍼 크레인(transfer crane)을 활용하여 상·하역 작업을 하게 된다. 이때 처리에 걸리는 시간은 트랜스퍼 크레인의 생산성에 의해 결정되며, 생산성은 선석 크레인과 유사하게 회전 수, 회전당 TEU, 운용 인력 수의 영향을 받는다. 〈그림 5-15〉는 트럭 물동량의 처리 흐름도를 나타낸 것이다.

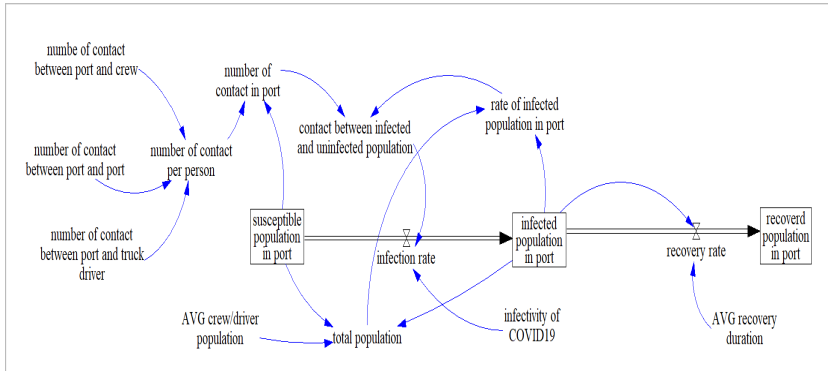
〈그림 5-15〉 트럭 물동량의 처리 흐름도



자료: 저자 작성

마지막으로 코로나19 감염병 관련 모형은 일반적으로 병의 확산을 표현할 때 가장 많이 사용하는 흐름도를 기반으로 구성하였다. 감염률은 코로나19의 감염 확률, 건강한 사람과 감염된 사람의 접촉 횟수에 의해 결정된다. 접촉 횟수는 항만 인력 간 접촉, 항만 인력과 선원 간의 접촉, 항만 인력과 트럭 운전자 간의 접촉 횟수로 결정된다. 항만의 총인구는 항만 인력과 평균적인 선원, 트럭 운전자 숫자의 합계로 결정되며, 항만의 총인구 대비 감염된 사람의 비율이 건강한 사람과 감염된 사람의 접촉 횟수에 영향을 미친다. 항만 인력이 코로나에 감염됨에 따라 활동이 가능한 크레인 및 이송장비 운용 인력과 보안 인력이 줄어 생산성에 영향을 미치게 된다. 감염된 사람은 일정한 치료 기간을 거쳐 회복되며, 사망하는 인구는 없는 것으로 가정하였다. 〈그림 5-16〉은 감염병 확산의 흐름도를 나타낸 것이다.

〈그림 5-16〉 감염병 확산의 흐름도



자료: 저자 작성

3. 시뮬레이션 결과 분석

본 시뮬레이션에서 사용한 주요 추정 변수와 수식은 〈표 5-4〉와 같다.

〈표 5-4〉 모형의 주요 변수

변수		추정 수식
감염병 흐름도	항만 내 감염자 수 (infected population in port)	감염되는 사람의 수 - 회복한 사람의 수 (초기치 1)
	감염되는 사람의 수 (infection rate)	감염자와 비감염자의 접촉 횟수*코로나19의 감염률
	항만 내 인당 접촉 횟수 (number of contact per person)	항만 인력과 선원의 접촉 횟수 + 항만 인력 간 접촉 횟수 + 항만 인력과 트럭 운전수의 접촉 횟수
선석 물동량 흐름도	선석 당 크레인 생산성 (total GC productivity per berth)	선석당 크레인 수*크레인 회전 수*회전당 TEU*(서비스 가능한 크레인 운용 인력/총 필요 크레인 운용 인력)
	선석 처리 물동량 (berth throughput)	선박당 평균 TEU*선박 출발률
	이송장비 생산성 (total TE productivity)	이송장비 수*시간당 이송장비 생산성*(서비스 가능한 장비 운용 인력/총 필요 장비 운용 인력)

변수		추정 수식
트럭 물동량 흐름도	누적 이송장비 처리 물동량 (cumulative TE throughput)	이송장비 처리율
	시간당 최대 트럭 진입률 (maximum entry rate)	운용 가능한 게이트 수/게이트당 보안 절차에 걸리는 시간
	운용 가능한 게이트 수 (number of serviceable gate)	IF THEN ELSE(총 필요 보안 인력<=서비스 가능 보안 인력, 게이트 수 , MIN[게이트 수, INTERGER(서비스 가능 보안 인력 수/게이트당 필요 보안 인력 수)])
	트랜스퍼 크레인 대당 생산성 (TC productivity)	시간당 회전 수*회전당 TEU*(서비스 가능한 크레인 운용 인력/총 필요 크레인 운용 인력)
	트럭 물동량 (truck throughput)	트럭당 평균 TEU*트럭 출발률

자료: 저자 작성

크레인이나 이송장비의 생산성은 서비스 가능한 인력의 수에 비례하여 줄어드는 것으로 가정하였다. 항만 내 감염자 발생으로 인해 총 필요 인력보다 서비스 가능한 인력의 수가 줄어들면 그만큼 장비의 생산성이 하락하는 것이다. 생산성의 경우 장비 운용을 위한 최소 인력이 충족되지 못하면 장비가 정지하는 계단식 하락도 고려할 수 있지만 운영사는 유휴 인력의 투입, 근무시간 연장 등으로 장비의 완전 정지는 막으려고 노력할 수 있기 때문에 운용 인력에 비례하여 하락하는 것으로 가정하였다. 게이트의 경우 서비스 가능한 인력이 게이트 하나당 필요한 보안 인력 수에 미치지 못하면 그 게이트는 운용이 불가능한 것으로 가정하였다.

위와 같은 가정하에 감염병에 대한 항만의 회복탄력성을 정량적으로 측정하기 위해 시범적으로 시뮬레이션을 해 보았다. 선박의 도착 빈도, 선석의 개수, 크레인 및 이송장비 대수, 게이트의 수 등과 같이 모형에 들어가야 할 상수 변수들의 값은 부산 신항의 특정 컨테이너

터미널 자료를 참고하여 입력하였으나 트럭의 도착 빈도, 필요 운용 인력 수와 같이 활용할 만한 자료가 확보되지 않은 일부 변수들은 회복탄력성 비교 목적에 맞도록 결과가 잘 나타날 수 있게 조정한 값을 사용하였다. 시뮬레이션은 시간 단위로 총 1,368시간(57일)을 시행하였다.

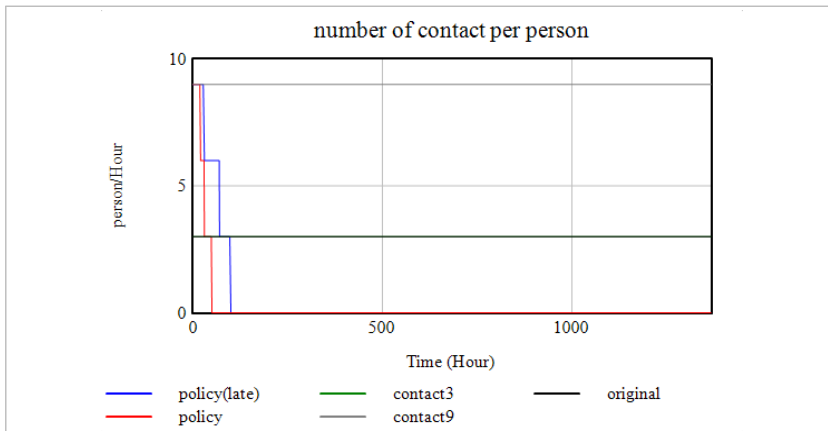
본 연구는 감염병이 항만 운영에 미치는 영향을 알아보는 데 목적이 있기 때문에 감염병 확산 속도에 영향을 주는 변수인 항만 내 인당 접촉 횟수(number of contact per person)를 조절하면서 총 다섯 가지의 시나리오를 설정하여 시뮬레이션을 시행하였다. 첫 번째 시나리오(기본, original)는 감염병이 없는 정상시를 나타낸 것이며, 두 번째 시나리오(접촉9, contact9)는 항만 인력과 선원, 항만 인력과 항만 인력, 항만 인력과 트럭 운전수의 시간당 접촉 횟수를 각각 세 번으로 설정하여 총 아홉 번의 접촉이 있는 경우를 가정한 것이다. 세 번째 시나리오(접촉3, contact3)는 접촉 횟수를 줄여 각각 한 번, 총 세 번의 접촉이 있는 경우를 상정한 것이다. 여기에 더해 시간이 지남에 따라 접촉 횟수를 줄여 완전히 격리되도록 하는 정책 시나리오 두 가지를 추가하였다. 첫 번째 정책 시나리오(정책1, policy)와 두 번째 정책 시나리오(정책2, policy-late)는 기본적으로 접촉을 막는다는 점에서는 동일하지만 두 번째 정책 시나리오가 좀 더 늦은 시기에 접촉을 완전히 막는다는 차이점이 있다. 이는 감염병의 대책으로 가장 일반적으로 활용되는 격리 조치의 효과를 알아보기 위함이다. <표 5-5>는 각 시나리오의 내용을 표로 정리한 것이며, <그림 5-17>은 항만 인력의 인당 접촉 횟수를 시나리오별로 나타낸 것이다. 감염병 전염률은 0.03(3%)으로 설정하였다.

〈표 5-5〉 시뮬레이션 시나리오 정리

시나리오	코드	내용
기본	original	감염병 발생이 없는 평상시 상황
접촉3	contact3	감염병이 발생하고, 인당 접촉 횟수가 3회
접촉9	contact9	감염병이 발생하고, 인당 접촉 횟수가 9회
정책1	policy	감염병이 발생하고, 시간에 따라 격리 정책 시행
정책2	policy(late)	감염병이 발생하고, 정책1보다 더 늦은 시기에 격리 시행

자료: 저자 작성

〈그림 5-17〉 시나리오별 인당 접촉 횟수

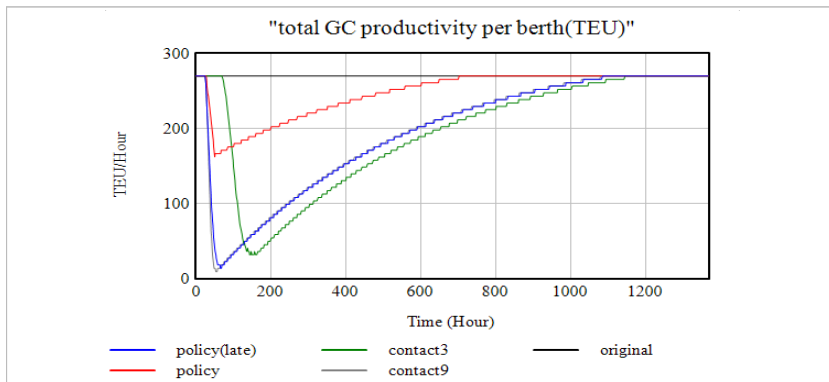


자료: 저자 작성

선석 크레인의 생산성에 대한 시뮬레이션 결과는 〈그림 5-18〉과 같다. 가장 위쪽에 일자로 나타나는 선이 감염병 발생이 없는 경우의 생산성이다. 변동 요인이 없기 때문에 일정한 생산성을 유지하고 있다. 이 선과 다른 시나리오를 나타내는 선과의 차이에 따라 나타나는 면적이 회복탄력성을 나타내며, 면적이 작을수록 회복탄력성이 큰 것이다. 먼저 접촉9와 접촉3 시나리오를 보면 감염병 확산에 따라 생산성이 큰 폭으로 하락했다가 서서히 회복하는 형태를 보이고 있다. 접촉3 시나리오에서 접촉이 적은 만큼 감염병의 피크 타임이 더 늦

게 오지만 그만큼 회복이 느려 전체적인 회복탄력성에는 큰 차이가 없다. 이는 단순히 접촉 횟수를 줄이는 것은 감염병에 대한 완전한 대책이 될 수 없으며 격리와 같은 더 강력한 조치가 필요함을 시사한다. 이는 격리를 통해 일정 기간 후 접촉을 차단한 정책1 시나리오가 가장 좋은 회복탄력성을 보여주는 것에서도 알 수 있다. 이전 장의 <그림 4-4>에서 볼 수 있듯이 생산성이 하락하는 수준이 다른 시나리오보다 낮은 것은 흡수력이 향상되었다는 의미이며, 회복이 빠른 것은 적응력 및 복구력이 향상되었다는 의미이다. 즉 격리 조치를 통해 감염병에 대한 항만의 회복탄력성을 향상시킬 수 있는 것이다. 다만 정책2 시나리오는 접촉9 시나리오와 거의 유사한 회복탄력성을 보여주는데, 이는 감염병이 일정 정도 이상 퍼진 후에는 격리 조치의 효과가 없어 발생 초기의 빠른 대응이 무엇보다 중요함을 나타내는 결과이다. 직종 간 감염병 발생 비율을 동일하게 설정했기 때문에 트랜스퍼 크레인과 이송장비, 게이트의 생산성 변화도 선석 크레인과의 유사한 형태로 나타난다.

〈그림 5-18〉 선석 크레인 생산성



자료: 저자 작성

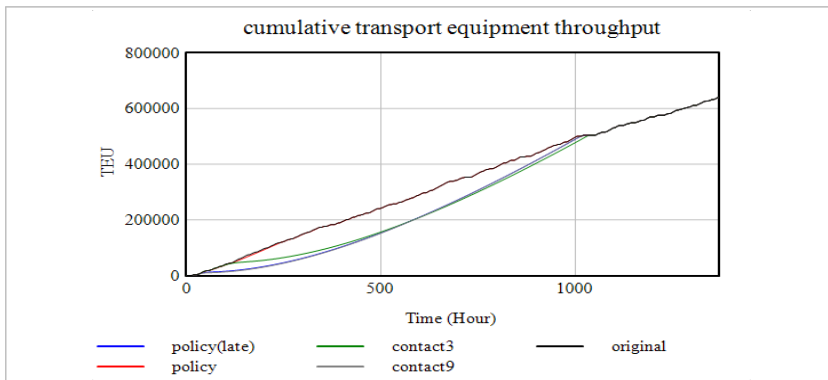
〈표 5-6〉 시나리오별 선석 크레인 생산성 회복탄력성 비교

시나리오	회복탄력성 비교
기본	100%
접촉3	▽16.8%
접촉9	▽27.1%
정책1	▽8.1%
정책2	▽27.1%

자료: 저자 작성

〈표 5-6〉은 기본 시나리오 대비 시나리오별 선석 크레인 생산성의 회복탄력성을 비교한 것이다. 정책1 시나리오의 경우 기본 시나리오 대비 91.9%로 나타나 8.1%만이 감소하였으며, 접촉9 시나리오의 경우 72.9%로 27.1%가 감소하였다. 이는 격리 및 접촉 차단 정책을 통해 생산성 측면에서 최악의 시나리오에 비해 19% 정도의 회복탄력성 향상을 기대할 수 있음을 나타내는 결과이다.

〈그림 5-19〉 선석-이송장비 누적 처리 물동량



자료: 저자 작성

다음으로 누적 처리 물동량에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴본다. 먼저 선석-이송장비를 거친 최종 처리 물동량은 〈그림 5-19〉와 같

다. 검은색 선이 기준이 되는 정상시의 누적 처리 물동량이다. 접촉9와 정책2 시나리오는 거의 차이가 없으며 접촉3의 경우 떨어지는 시기가 좀 늦을 뿐 다른 시나리오와 거의 동일한 모습을 보이고 있다. 정책1 시나리오만이 유의미한 성과를 보여주고 있다는 점에서 앞의 생산성 변화와 일치하는 결과라 할 수 있다.

〈표 5-7〉 시나리오별 선석 물동량 회복탄력성 비교

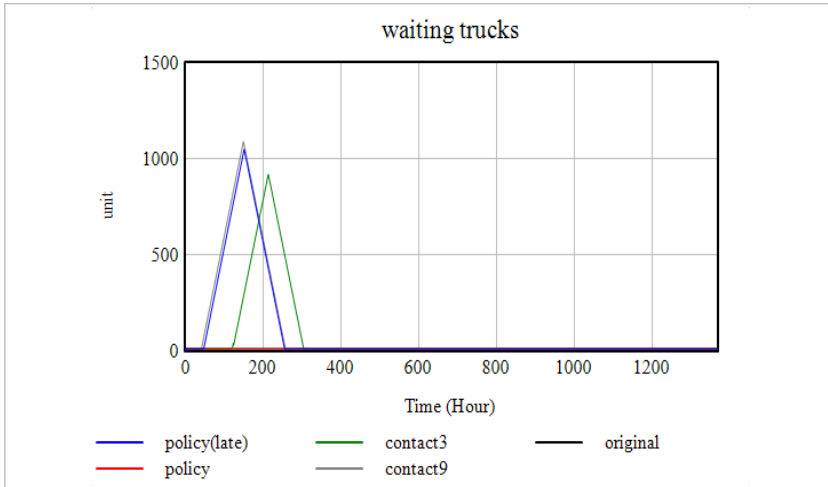
시나리오	회복탄력성 비교
기본	100%
접촉3	▽12.2%
접촉9	▽15.3%
정책1	▽0.1%
정책2	▽13.0%

자료: 저자 작성

〈표 5-7〉은 기본 시나리오 대비 시나리오별 선석 물동량의 회복탄력성을 비교한 것이다. 정책1 시나리오의 경우 기본 시나리오 대비 99.9%로 나타나 0.1%가 감소하였으며, 접촉9 시나리오의 경우 86.7로 15.3%가 감소하였다. 이는 격리 및 접촉 차단 정책을 통해 선석 물동량 측면에서 최악의 시나리오보다 14.2% 정도의 회복탄력성 향상을 기대할 수 있음을 나타내는 결과이다.

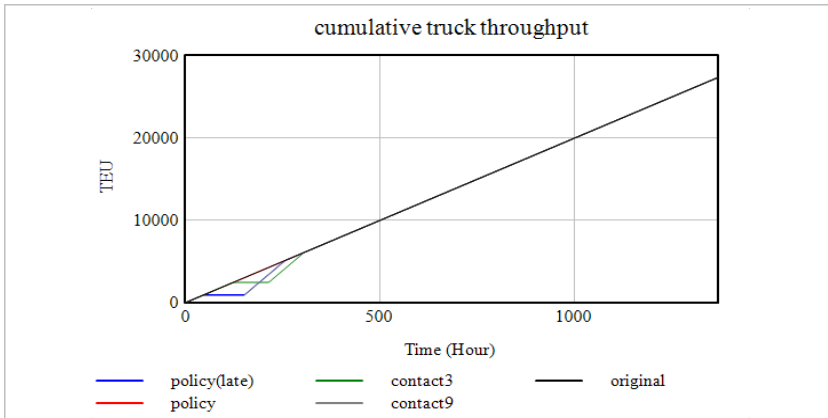
〈그림 5-20〉은 게이트의 생산성 하락으로 인한 대기 트럭 수의 증가를 나타낸 것이다. 평소에는 대기 트럭이 발생하지 않지만 접촉9와 정책2 시나리오에서는 거의 동일한 증가 추세를 보여 주고 있으며, 접촉3 시나리오의 경우 대기가 좀 더 늦은 시기에 발생하기 시작하여 피크도 약간 더 낮은 형태로 나타난다. 정책1 시나리오에서는 평소와 마찬가지로 대기가 나타나지 않는다.

〈그림 5-20〉 대기 트럭 수



자료: 저자 작성

〈그림 5-21〉 트럭 누적 처리 물동량



자료: 저자 작성

〈그림 5-21〉은 트럭의 누적 처리 물동량을 나타낸다. 트랜스퍼 크레인 생산성은 선석 생산성과 거의 동일한 패턴으로 하락하였다가 회복함에도 불구하고 누적 처리 물동량은 선석 누적 처리 물동량에

비해 더 빠르게 회복되는 것을 볼 수 있다. 이는 앞장에서 살펴본 회복탄력성의 구성 요인 중 흡수력의 하위 요인인 여분성과 관련이 있다. 들어오는 트럭 물동량을 처리할 수 있는 정도보다 더 큰 능력을 평상시에 확보해 둬으로써 트럭이 몰려도 처리가 가능한 것이다. 평상시 트럭은 1시간에 10대가 들어오는 것으로, 게이트는 정상 운영 시 시간당 80대를 통과시킬 수 있도록 가정하였는데 게이트 운영에 지장이 생겨 트럭이 대기하고 있다가 게이트 정상화 후 한꺼번에 많이 들어오게 되어도 거의 모두 정상적으로 처리가 가능한 것이다. 이는 여분성을 확보하여 회복탄력성을 강화함에 따라 감염병이라는 위기가 발생했음에도 불구하고 물동량 측면에서는 어느 정도 정상적인 운영이 가능함을 보여주는 시뮬레이션 결과이다. 현재 트럭 물동량의 사례는 여분성의 효과를 보여주기 위한 가상 사례이지만 향후 연구를 통해 실제 데이터를 활용한다면 어느 정도의 여분성을 갖추어야 피해를 최소화하고 회복탄력성을 향상시킬 수 있는지에 대한 연구도 가능할 것이다.

SD 모형을 활용한 시뮬레이션 결과를 종합적으로 볼 때 감염병 확산 사례에 대하여 장비의 생산성 측면과 물동량 측면에서 항만의 회복탄력성 측정이 가능함을 알 수 있다. 또한 감염병 발생 시 단순히 사람 간 접촉을 줄이는 것으로는 생산성의 회복탄력성 향상이 어려워 최대한 빠른 시기에 격리 조치를 통해 접촉을 막는 것이 감염병에 대한 항만의 회복탄력성 향상 방법임을 보였다. 물동량 측면에서는 여분성을 통한 적응력 확보가 회복탄력성 향상 방법이 될 수 있음을 알 수 있다.

제4절 시사점

본 연구에서는 SD를 활용, 컨테이너 터미널의 운영 시스템 흐름도를 사용하여 감염병 사례에 대한 항만의 회복탄력성 측정 모형을 구축하였으며, 시범적인 시뮬레이션 결과 분석을 통해 모형의 적용이 가능함을 확인하였다. SD 분석 결과, 감염병 발생 초기에 강력한 격리 조치 등을 통해 사람 간 접촉을 막는 것이 가장 효과적인 대응 조치가 될 수 있음을 보였으며, 단순히 접촉 횟수를 줄이는 방법이나 뒤늦은 격리 조치는 회복탄력성 향상에 큰 도움이 되지 않음을 알 수 있었다. 또한 여분의 물동량 처리 능력 확보를 통한 흡수력의 향상으로 감염병 피해를 줄일 수 있음을 보인 데 본 연구의 의의가 있다.

시뮬레이션에서 초기 항만 내 감염자 수는 1명, 전염률은 0.03으로 설정했음에도 일정 시간이 지난 후 감염 추세가 폭발적으로 늘어나 생산성이 급격히 하락하는 것을 볼 수 있다. 이는 초기 감염자 발견과 격리가 감염병 대처에 가장 중요하다는 것을 보여주는 결과이다. 즉, 감염병에 대한 항만의 회복탄력성 향상을 위해서는 항만 내 감염자 유입 방지, 항만 운영 인력 간 접촉 방지 등의 대책이 있어야 하며, 이를 위해서는 항만 자체적인 방역 체계와 인력의 동선 관리, 휴게 공간 분리 운영 등의 계획을 사전에 수립하는 것이 필요하다. 또한 이러한 계획을 세워 감염병 확산을 최대한 억제한다고 해도 완전한 차단은 어려울 수 있기 때문에 실제 감염자가 발생했을 때의 대응 매뉴얼 등을 수립할 필요가 있다. 감천항 사례의 경우에서도 선원 중에 코로나19 확진자가 있는 것을 입항 시 미리 발견하지 못해 수일 간의 항만 폐쇄 조치까지 취한 후에야 운영을 정상화할 수 있었으며,

대응 계획의 부재로 인해 조치가 적시에 이루어지지 못한 것도 피해를 키우는 요인이 되었다.

제2장의 「해양수산부 국가 안전관리 집행계획」과 제4장의 정성적 회복탄력성 측정 모형의 분석 결과에서 볼 수 있듯이 우리나라 항만은 자연재해와 같은 전통적인 위협 요인에 대한 대응 및 대비 체계는 어느 정도 구축하고 있다. 하지만 감천항 사례와 같은 감염병이나 사이버 테러 등과 같이 새롭게 등장한 위협 요인에 대한 대응 체계는 아직 미비한 상태이며, 사건 발생 후의 복구에 관한 계획 또한 부족하다. 이를 보완하기 위해서는 항만 위협 요소를 세분화하고 각각의 위협과 연관된 항만 운영 시스템의 구성 요인을 분석한 뒤 그에 맞는 대응 및 대비 계획을 수립해야 한다. 또한 그 효과를 평가하여 회복탄력성을 향상시키는 작업이 필요하다. 본 연구를 통해 수립한 SD 모형이 향후 회복탄력성 향상 계획 수립과 평가 체계 구축의 기반이 될 것이다.

본 연구에서 구축한 시뮬레이션 모형은 개념적인 것으로 후속 연구를 통한 모형 고도화가 반드시 필요하다. 본 연구 모형과 관련한 구체적인 후속 과제는 다음과 같다. 먼저 생산성 하락에 관한 가정에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 운용 가능한 인력의 수에 비례하여 장비의 생산성이 하락하는 것으로 가정하였지만 실제로는 비례가 아닌 다른 관계가 나타날 수 있으므로 인력과 생산성 변화에 관한 면밀한 검토와 분석이 필요하다. 또한 실제 터미널을 대상으로 SD 모형을 적용하여 사례 연구를 진행하는 것이 필요하다. 실제 데이터를 사용하여 모형의 교정(calibration) 과정을 거친다면 좀 더 정교한 모형 구축이 가능할 것이다. 다음으로 컨테이너 터미널 외 벌크 터미널의 운영 시스템 모형을 구축하는 연구가 필요하다. 컨테이너 터미

널보다 벌크 터미널이 하역 작업 과정에서 인력 간 접촉이 더 빈번히 일어날 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 항만 내 모든 직종의 감염률을 동일하게 설정하였는데 보안 인력 같은 경우 대인 접촉이 많아 감염 위험이 다른 직종보다 높을 수 있기 때문에 이를 반영한 모형을 구축해 보는 것도 좋은 연구가 될 것이다. 마지막으로 감염병 외에 사이버 테러와 같은 다른 위협 요인에 대해서도 회복탄력성 측정을 위한 모형을 구축해 보는 것이 필요하다. 정책적으로는 실제 항만 내 감염병 발생 시 인력 간 접촉을 최소화할 수 있는 동선 설계, 감염자 조기 발견을 위한 항만 내 방역 체계 구축 등의 구체적인 회복탄력성 향상 실행 방안을 연구하는 것이 필요하다.

제 6 장

결론 및 제언

제1절 요약 및 결론

본 연구는 항만의 회복탄력성 측정을 위한 모형을 구축하고 적용 가능성을 확인함으로써 회복탄력성 강화를 위한 이론적 기초와 정책 연구의 기반을 마련하는 데 목적이 있으며, 이를 위해 요인분석과 시스템 다이내믹스(SD)를 활용하여 연구를 수행하였다

제1장에서는 연구의 배경과 목적, 연구의 전체적인 내용과 방법, 선행연구와 본 연구의 차별성에 대해 서술하였다. 항만에 대한 위협 요인이 점차 늘어나는 상황에서 회복탄력성 개념의 중요성을 강조하고, 항만의 회복탄력성 측정 모형 구축을 위해 어떠한 방법론을 사용할지 설명한 후, 기존 연구의 흐름을 확인하였다.

제2장에서는 회복탄력성의 정의와 관련 법률 및 규정에 대해 분석하여 현재의 대응 체계 수준을 알아본 후, 회복탄력성 향상을 위해 보강이 필요한 부분에 대해 제언하였다. 회복탄력성은 광범위한 의

미를 내포하고 있는 단어이며, 통일된 정의 없이 문헌마다 연구 목적에 맞게 조금씩 다르게 정의를 내리고 있다. 본 연구에서는 공급사슬 분야와 인프라 시스템 분야의 문헌 연구를 통해 회복탄력성의 정의를 비교 분석하고 본 연구에서 사용할 항만의 회복탄력성에 대한 정의를 내렸다. 최종적으로 내린 회복탄력성의 정의는 ‘예상치 못한 충격을 흡수하여 기능이 중단되지 않도록 하고, 변화에 적응하여 원래의 기능을 신속하게 회복하는 능력’이며, 이 정의는 제4장의 모형 구축을 위한 기반으로 활용하였다. 또한 관련 법률 및 규정 분석을 통해 현재의 위기 대응 체계를 알아보고, 보강이 필요한 부분에 대한 시사점을 도출하였다.

제3장에서는 자연재해, 사이버 테러, 감염병 등과 같은 국내외의 항만 위기 사례를 분석하여 항만의 회복탄력성 구축 필요성과 모형 구축에 대한 시사점을 도출하고, 각 위협 요인이 항만 운영에 미치는 영향에 대한 인과지도 작성의 기반을 마련하였다.

제4장에서는 설문조사를 활용한 회복탄력성 측정 모형 구축에 대해 연구하였다. 먼저 설문조사와 요인분석을 활용한 정성적 모형의 이론적 기반을 구축하기 위해 문헌 연구를 실시하여 과거 연구에서 다룬 회복탄력성 요인 및 측정 지표들을 비교 분석하였다. 이러한 문헌 근거를 통해 항만의 회복탄력성을 구성하는 요인으로 크게 흡수력, 적응력, 복원력의 세 가지를 선정하였으며, 이를 측정하기 위한 세부 요인과 측정 지표들을 선택하였다. 모형의 타당성을 확인하기 위해 항만 관계자들을 대상으로 한 설문조사를 통해 데이터를 수집하였으며, 탐색적 요인분석과 확인적 요인분석을 활용하여 문헌 연구를 통해 구축한 모형의 타당성을 확인하였다. 또한 분석 결과를 바탕으로 각 요인들과 연관된 실제적인 항만의 역량 지표를 제시하고

향후 모형의 발전 방향을 제시하였다.

제5장에서는 SD를 활용한 회복탄력성의 측정 모형에 대해 연구하였다. 먼저 SD 방법론을 활용하는 것의 당위성을 설명하고, 모형을 구축하기 위해 항만 운영 시스템과 SD를 활용한 회복탄력성 측정 분야에 대한 문헌 연구를 실시하였다. 또한 제3장에서 파악한 위기 요인들이 항만 운영 시스템의 구성 요소에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 인과지도를 구축하였다. 이를 기반으로 최근 가장 큰 사회적인 문제로 떠오른 코로나19와 같은 감염병 사례에 대한 항만의 회복탄력성 측정을 위해 항만 운영 시스템과 감염병 확산의 흐름도를 구축하였다. 시뮬레이션 결과 분석을 통해 감염병 확산 초기에 격리 조치 등을 통해 접촉을 막고 여분의 물동량 처리 능력 확보를 통해 회복탄력성을 향상시킬 수 있음을 보여 SD를 활용한 정량적 회복탄력성 측정의 가능성을 확인하였다.

태풍 등의 자연재해, 항만을 대상으로 한 사이버 테러, 감천항 코로나19 감염 사건 등에서 볼 수 있듯이 항만에 대한 위협은 꾸준히 발생하고 있으며, 이를 사전에 전부 다 막는 것은 불가능하다. 따라서 사전 예방의 개념뿐만 아니라 사후의 회복력까지 고려하는 회복탄력성 개념은 앞으로 중요하게 떠오를 것이다. 하지만 우리나라에는 아직 회복탄력성 측정이나 평가와 관련한 제도가 부족한 실정이며, 항만의 회복탄력성에 관한 연구도 많지 않아 제도 마련의 기반이 부족한 상황이다. 본 연구는 공급사슬 분야와 인프라 시스템 분야의 회복탄력성에 관한 기존 문헌 연구를 기반으로 회복탄력성의 구성 요인을 정의하고 측정 지표를 마련하였으며, 최근 가장 큰 사회적 문제가 되고 있는 코로나19와 같은 감염병 사례에 대해 정량적 회복탄력성 측정 모형의 가능성을 확인하여 향후 회복탄력성 관련

정책 입안 및 제도 개선에 활용할 이론적 기반을 마련하였다는 데 의의가 있다.

제2절 정책 제언

1. 법·제도 개선

1) 필요성

본 연구의 2장 3절에서 살펴본 바와 같이 항만의 회복탄력성과 관련된 법·제도는 「재난 및 안전관리 기본법」 제22조에 따라 연도별로 수립되는 「해양수산부 국가 안전관리 집행계획」 및 동법 15조의2에 의한 「해양수산부 중앙사고수습본부 설치 및 운영 등에 관한 규정」과 2020년부터 시행된 「비상사태등에 대비하기 위한 해운 및 항만 기능 유지에 관한 법률」 등이 있다. 이들 법·제도는 해운 및 항만의 기능을 유지하기 위한 준비 차원에서 항만의 회복탄력성과 유사한 성격을 가진다고 할 수 있으나, 예측 불가능한 사건·사고의 발생에 대한 예방과 대비 단계에 집중되어 있을 뿐 대응과 복구에 대한 내용은 부족한 상황이다. 더군다나 예측 불가능한 사건·사고의 발생에 대한 항만의 예방-대비-대응-복구 체계, 즉 회복탄력성에 대한 성과 지표나 평가 체계에 대한 내용은 없다. 즉 회복탄력성 측정의 궁극적인 목표는 예측 불가능한 사건·사고의 발생에 대한 항만의 회복탄력성을 확보하기 위한 국가 차원의 정책적 또는 민간 항만운영사 차원의 항만 운영 방향을 설정하는 첫 단계로 이에 대한 법·제도적 근거 마련이 필요하다.

2) 항만 회복탄력성 평가의 필요성 및 구축 방안

항만의 회복탄력성 제고를 위한 법·제도 개선은 항만의 주무 부서인 해양수산부가 담당하고 있는 「해운항만기능유지법」의 개정을 통해 가능할 것으로 판단된다. 이는 「해양수산부 국가 안전관리 집행계획」과 「해양수산부 중앙사고수습본부 설치 및 운영 등에 관한 규정」 등이 행정안전부가 담당하고 있는 「재난 및 안전관리 기본법」에 근거하고 있기 때문이다. 더군다나 「해운항만기능유지법」이 “전시·사변 또는 이에 준하는 비상사태 및 해운·항만 기능에 중대한 장애가 발생한 경우에 해운·항만 기능을 유지하여 국민 경제에 긴요한 물자와 군수물자를 원활하게 수송하고 국민 생활의 안정 및 국가 안전 보장의 유지에 이바지함을 목적”으로 하고 있어 해운·항만 기능에 중대한 장애가 발생한 경우에 해운·항만 기능을 유지하기 위한 회복탄력성과 관련된 직접적인 법률이기 때문이다.

「해운항만기능유지법」에서는 해운·항만 기능에 중대한 장애가 발생한 경우에 해운·항만 기능을 유지하기 위해 ‘해운·항만 기능 유지에 관한 기본계획’을 10년 단위로 수립하도록 하고 있다(제4조). 아울러 국가필수선박의 지정 및 운영(제5조) 및 항만운영협약의 체결 및 운영(제10) 등을 규정함으로써 국가필수선박 제도 및 항만운영협약 제도를 운영하는 법적 기반이 마련되어 있다.

여기서 항만의 회복탄력성을 측정 또는 평가하기 위해서는 항만 회복탄력성 평가에 대한 규정을 「해운항만기능유지법」에 신설해야 한다. 항만 회복탄력성 평가의 주체는 해양수산부 장관이며, 5년마다 재평가를 하는 것을 제안하고자 한다. 이는 해운·항만 기능에 중대한 장애가 발생한 경우에 해당할 수 있는 항만보안과 연관되어 있는 「국제항해선박 및 항만시설의 보안에 관한 법률」(이하 항만보안법)의

제24조에서 규정하고 있는 항만시설보안평가를 준용할 수 있기 때문이다.

〈표 6-1〉 항만 회복탄력성 평가 규정(안)

법률	시행령	시행규칙
제0조(항만회복탄력성평가) ① 해양수산부 장관은 항만의 회복탄력성에 대한 평가를 실시하여야 한다. ② 해양수산 부장관은 제1항에 따라 항만회복탄력성평가를 실시한 때에는 항만회복탄력성평가의 결과를 문서로 작성하여 해당 항만시설 소유자에게 통보하여야 한다. ③ 해양수산부 장관은 항만회복탄력성평가에 대하여 5년마다 재평가를 실시하여야 한다. 다만, 해당 항만에서 항만 기능에 중대한 장애가 발생하는 등 항만 기능 유지와 관련하여 중요한 변화가 있는 때에는 즉시 재평가를 실시하여야 한다. ④ 항만회복탄력성평가의 평가 항목 및 평가 방법 등에 관하여 필요한 사항은 해양수산부령으로 정한다.		제0조(항만회복탄력성평가) ① 법 제0조제4항에 따라 항만회복탄력성평가의 평가 항목에는 각 호의 항목이 포함되어야 한다. 1. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에 대비한 항만 운영에 대한 확인과 항만 기능 장애에 대한 분석(강건성) 2. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 시설의 보안 대책 및 보안 대책의 실효성(여분성) 3. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 시설의 정보 시스템 운영의 검증 및 실효성(가시성) 4. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 작업 처리 프로세스의 유연성 검증 및 실효성(유연성) 5. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 협력기관과의 협력 체계 검증 및 실효성(협력) 6. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 항만의 서비스 대체 능력 검증 및 실효성(민첩성) 7. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 항만과 서비스 주요 기관과의 상황 전파 시스템 검증 및 실효성(정보 공유)

법률	시행령	시행규칙
		8. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 항만의 대응 능력 검증 및 실효성 (반응) 9. 항만 기능에 중대한 장애 발생 시에도 항만 기능을 유지하기 위한 항만의 회복 능력 검증 및 실효성 (회복) ② 지방해양수산청장은 법 제0조제4항에 따라 해당 항만시설 운영자를 포함하여 평가반을 구성하거나 전문가에게 자문하는 등의 방법으로 항만 회복탄력성평가를 할 수 있다. ③ 지방해양수산청장은 항만회복탄력성평가를 마치면 다음 각 호의 사항이 포함된 항만회복탄력성평가 결과보고서를 작성하여 대외비로 관리하고, 해운·항만 기능 유지에 관한 기본계획에 반영하도록 하여야 한다. 1. 항만회복탄력성평가의 수행 방법 2. 항만회복탄력성평가 결과 발견된 항만기능 유지상 결함의 분석 3. 항만기능 유지상 결함 보완할 수 있는 조치

자료: 저자 작성

2. 항만 회복탄력성 평가 시스템

1) 필요성

항만 회복탄력성의 수량적 평가를 위한 지표 또는 평가 시스템의 구축이 필요하다. 이를 통해 규정된 기간 안에 항만의 회복탄력성을 측정하고 상대적으로 취약한 부분을 찾아 이를 강화하기 위한 방안을 ‘해운·항만 기능 유지에 관한 기본계획’에 포함시키는 피드백 구조를

구축해 나갈 필요가 있다. 항만 회복탄력성 평가 항목은 본 연구에서
구성한 회복탄력성 요인과 측정 지표들이 기반이 될 수 있을 것이다.

2) 구축 방안

(1) 평가 항목

본 연구에서는 항만의 회복탄력성을 평가하기 위한 평가 항목으로
본 연구의 제4장에서 제시하고 있는 강건성, 여분성, 가시성, 유연성,
협력, 민첩성, 정보 공유, 반응 및 회복 등 9개 요인과 26개의 세부
요인을 제안하나, 항만기능 및 계획과의 연계성을 고려한 세부 요인
은 항목별 현황과 항만 운영 전문가를 대상으로 한 구체적인 조사를
통한 추후 연구에 제시하고자 한다.

〈표 6-2〉 항만 회복탄력성 평가 항목

요인	평가 항목
강건성 (Robustness)	항만의 성과는 항상 목표에서 크게 벗어나지 않는다.
	항만은 어떤 상황에서도 원래의 업무를 수행할 수 있다.
	항만은 어떠한 외부 변화에도 안정된 상황을 유지한다.
	항만은 특별한 조정이 필요 없이 다양한 상황에서 잘 작동한다.
여분성 (Redundancy)	항만은 장비, 인력 등 물리적 작업 지원을 위한 예비 자원을 유지한다.
	항만은 비상시를 위한 백업 에너지 시스템과 다용도 자원을 보유하고 있다.
	항만은 예상치 못한 수요 변동을 처리하기 위한 여유 능력을 가지고 있다.
가시성 (Visibility)	항만에는 모든 작업을 정확하게 추적하는 정보 시스템이 있다.
	항만은 장비, 인력 등에 대한 실시간 데이터를 관리하고 있다.
	항만에는 데이터 분석을 위한 효과적인 비즈니스 인텔리전스 프로그램 이 있다.
유연성 (Flexibility)	항만은 기능 중단에 대처하기 위해 작업 일정을 조정할 수 있다.
	항만은 기능 중단에 대처하여 작업 처리 능력을 조정할 수 있다.
	항만의 협력 파트너들은 공급 능력을 유연하게 조정할 수 있다.

요인	평가 항목
협력 (Collaboration)	항만은 주요 경영 목표를 달성하기 위해 많은 업체와 협력한다.
	항만은 파트너와 공동으로 전략적 목표를 설정한다.
	항만은 주요 파트너와 공동으로 상호 이익을 위해 노력한다.
민첩성 (Agility)	항만은 고객들에게 맞춤형 서비스를 제공하며, 갑작스러운 요구에도 대응할 수 있다.
	항만의 운영 모형은 급격한 환경 변화에도 빠르게 대응할 수 있다.
정보 공유 (Information Sharing)	항만은 파트너들과 상황에 맞는 적절한 정보를 교환한다.
	항만은 파트너들과 주기적으로 정보를 교환한다.
	항만은 파트너들과 정확한 정보를 교환한다.
반응 (Response)	항만은 운영 중단에 신속하게 대응할 수 있다
	항만은 위기에 대한 적절한 대응을 할 수 있다.
	항만에는 위기 상황을 대비한 비상대응조직이 구성되어 있다.
회복 (Recovery)	항만은 큰 손실을 흡수할 수 있는 능력이 있다.
	항만은 적은 비용으로 위기에서 회복할 수 있다.
	항만은 위기 대처 능력에 의해 손실의 영향을 줄일 수 있다.

자료: 문헌 연구 결과를 바탕으로 저자 작성

(2) 평가 방법

평가 기간은 5년마다 하되, 평가 결과의 ‘해운·항만 기능 유지에 관한 기본계획’ 반영은 계획이 수립되는 10년마다 반영하는 것으로 제안한다. 평가 주체는 해양수산부 장관으로 각 지방 해양수산청에서 이를 진행하되, 평가 업무는 「국제항해선박 및 항만시설의 보안에 관한 법률」 제41조에 따라 2021년 2월부터 시행되는 항만보안감독관으로 하여금 시행하도록 하는 것을 제시하고자 한다. 항만보안 사건은 항만 기능에 중대한 장애를 발생시킬 수 있는 사건으로서 이를 감독하는 보안감독관이 항만시설 보안 평가와 연계하여 전문적으로 평가함으로써 항만의 기능을 저해하는 중대한 장애를 통합적으로 관리하기 위함이다.

3. 후속 연구 제안

본 연구는 항만의 회복탄력성에 관한 연구가 많이 이루어지지 않은 상황에서 공급사슬 및 인프라시스템의 회복탄력성 측정 및 향상 방안에 대한 문헌연구를 통하여 항만의 회복탄력성 측정 모형을 마련하여 평가시스템 구축의 기초 토대를 제공했다는 점에서 의의를 가진다. 하지만 회복탄력성 향상을 위한 정책 방향 설정 및 실효성 있는 평가시스템 구축을 위해서 이론적인 모형의 타당성 향상, 특히 SD모형의 타당성 향상을 위한 후속 연구 및 정책적인 활용 방안에 대한 연구가 반드시 필요하다.

먼저 설문조사를 활용한 회복탄력성 측정 모형과 관련하여, 본 연구에서 구축한 모형의 타당성이 확인되었으므로 회복탄력성 요인별로 항만의 역량 강화를 위한 구체적인 활동을 정의하는 연구를 수행할 필요가 있다. 또한 항만별로 회복탄력성을 평가하여 부족한 요인이 무엇인지 파악하고, 항만별 회복탄력성 강화 활동을 도출하는 연구가 필요할 것이다. 마지막으로 설문조사 방법 외에 각 요인을 나타낼 수 있는 정량적인 데이터를 정의하고 확보하는 연구도 항만의 회복탄력성 향상에 도움이 될 것이다.

다음으로 SD를 활용한 시뮬레이션 회복탄력성 측정 모형 연구는 현재 시범적인 시뮬레이션을 통해 측정 가능성을 확인한 수준으로 모형의 고도화 및 실제 데이터를 활용한 교정과 사례 연구 등을 통해 실제 항만 사례에 적용해 보는 연구가 필요할 것으로 판단된다. 이를 위하여 선박 도착, 장비 대수 및 인력 수, 트럭 도착 등의 입력 변수 도출을 위한 데이터 수집, 다양한 의견 청취를 통한 흐름도 및 세부 수식 개선을 통한 모형 고도화를 후속 연구에서 추진하여야 한다. 또한 감염병 사례 외의 다른 위협 요인에 대한 측정 모형 구축이 필요할 것이다.

참고문헌

〈국내 문헌〉

- 김청택, 「탐색적 요인분석의 오·남용 문제와 교정」, 『조사연구』, 17(1), 1-29, 2016.
- 송지원, 「스웨덴에서 사회적 파트너의 노동쟁의 권리를 제한하는 공동 합의문 발표」, 『국제노동브리프』, 2018. 7.
- 우종필, 『구조방정식 모델 개념과 이해』, 한나라아카데미, 2016..
- 유순영, 김성욱, 김진만, 「재난 리스크 관리를 위한 재해 리질리언스의 평가」, 『한국 방재학회지』, 14(3), 76-83, 2014.
- 이민규, 김찬호, 김우선, 안영균, 『항만 shutdown(공급지장)의 파급효과 분석』, 한국해양수산개발원, 2014.
- 정현재, 여기태, 「물동량 변동요인이 터미널 운영에 미치는 영향력 분석에 관한 연구」, 『한국항만경제학회지』, 27(1), 95-109, 2011.
- 최강화, 곽수일, 김수욱, 「시스템 다이내믹스를 이용한 기술혁신의 동태성 분석」, 『경영과학』, 23(1), 87-113, 2006.
- 최석우, 박광서, 장정인, 정수빈, 김성은, 「해양수산분야 예견적 위험분석 기반구축 연구」, 한국해양수산개발원, 2019.
- 최창호, 유연우, 「탐색적요인분석과 확인적요인분석의 비교에 관한 연구」, 『디지털융복합연구』, 15(10), 103-111, 2017.
- 최형림, 박병주, 유동호, 「SD기법을 활용한 컨테이너터미널 경쟁력 강화 모델 개발」, 『한국시스템다이내믹스연구』, 7(2), 121-132, 2006.
- 한국해양수산개발원, 『항만에서의 재난 및 재해 영향과 대응방안 연구』, 2012.
- 한국해양수산개발원, 『지진에 대비한 항만기능 유지의 필요성과 추진방안』, 2017.
- 한국해양수산개발원, 『해상 사이버 보안체계 강화방안 연구』, 2019.
- 해양수산부, 『2020년 국가안전관리 집행계획(안)』, 2019.

〈국외 문헌〉

- Adjetey-Bahun, K., B. Birregah, E. Châtelet, J. L. Planchet and E. Laurens-Fonseca, "A simulation-based approach to quantifying resilience indicators in a mass transportation system," ISCRAM 2014 Conference Proceedings - 11th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, April, 75-79., 2014
- Altay, N., A. Gunasekaran, R. Dubey, and S. J. Childe, "Agility and resilience as antecedents of supply chain performance under moderating effects of organizational culture within the humanitarian setting: a dynamic capability view," *Production Planning & Control*, 29(14), 1158-1174, 2018
- Brandon-Jones, E., B. Squire, C. W. Autry and K. J. Petersen, "A contingent resource-based perspective of supply chain resilience and robustness," *Journal of Supply Chain Management*, 50(3), 55-73, 2014
- Bruneau, M., S. E. Chang, R. T. Eguchi, G. D. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace and D. Von Winterfeldt, "A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities," *Earthquake Spectra*, 19(4), 733-752, 2003
- Buor, J. K., "Applying System Dynamics Modelling To Building Resilient Logistics: A Case of the Humber Ports Complex," Doctoral Thesis, 449, 2015
- Caballini, C., S. Saccone and S. Siri, "The port as a system of systems: A system dynamics simulation approach," Proceedings - 2012 7th International Conference on System of Systems Engineering, SoSE 2012, 191-196, 2012, <https://doi.org/10.1109/SYSoSE.2012.6384155>
- Chen, H., K. Cullinane and N. Liu, "Developing a model for measuring the resilience of a port-hinterland container transportation network," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 282-301, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.10.008>
- Cho, H. and H. Park, "Constructing resilience model of port infrastructure based on system dynamics," *International Journal of Safety and Security Engineering*,

7(3), 352–360, 2017, <https://doi.org/10.2495/SAFE-V7-N3-352-360>

Chowdhury, M. M. H. and M. Quaddus, “Supply chain resilience: Conceptualization and scale development using dynamic capability theory,” *International Journal of Production Economics*, 188(September 2015), 185–204, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.020>

Chowdhury, M.M.H., M. Quaddus and R. Agarwal, “Supply chain resilience for performance: role of relational practices and network complexities,” *Supply Chain Management*, 24(5), 659–676, 2019. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2018-0332>

Christopher, M. and H. Peck, “Building the resilient supply chain”, *International Journal of Logistics Management*, 15(2), pp1–14, 2004. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>

Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., & Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18(4), 598–606. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.07.013>

Erol, O., B. J. Sauser and M. Mansouri, “A framework for investigation into extended enterprise resilience,” *Enterprise Information Systems*, 4(2), 111–136, 2010. <https://doi.org/10.1080/17517570903474304>

Fiksel, J., “Designing resilient, sustainable systems,” *Environmental Science & Technology*, 37(23), 5330–5339, 2003.

Francis, R. and B. Bekera, B, “A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems,” *Reliability Engineering and System Safety*, 121, 90–103, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.07.004>

Gaonkar, R. S. and N. Viswanadham, “Analytical framework for the management of risk in supply chains,” *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(2), 265–273, 2007.

Gou, X. and J. S. L. Lam, “Risk analysis of marine cargoes and major port disruptions,” *Maritime Economics and Logistics*, 21(4), 497–523, 2019. <https://doi.org/10.1057/s41278-018-0110-3>

- Hair, J. E. Jr., R. E. Anderson, R. L. Tatham and W. C. Black, "Multivariate data analysis (4th edition)," Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995.
- Hohenstein, N. O., E. Feise, E. Hartmann and L. Giunipero, "Research on the phenomenon of supply chain resilience: A systematic review and paths for further investigation," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 45(2005), 90-117, 2015. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-05-2013-0128>
- Holling, C. S., "Resilience and stability of ecological systems," *Annual review of ecology and systematics*, 4(1), 1-23, 1973.
- Hollnagel, E., D. D. Woods and N. Leveson, N, "Resilience engineering: Concepts and precepts," Ashgate Publishing, Ltd, 2006
- Hossain, N. U. I., R. Jaradat, S. Hosseini, M. Marufuzzaman and R. K. Buchanan, "A framework for modeling and assessing system resilience using a Bayesian network: A case study of an interdependent electrical infrastructure system," *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 25, 62-83, 2019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2019.02.002>
- Ivanov, D. and B. Sokolov, "Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty," *European Journal of Operational Research*, 224(2), 313-323, 2013. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.021>
- Jackson, S., "Architecting resilient systems: Accident avoidance and survival and recovery from disruptions (Vol. 66)," John Wiley & Sons, 2009
- Jain, V., L. Benyoucef and S. G. Deshmukh, "A new approach for evaluating agility in supply chains using Fuzzy Association Rules Mining," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(3), 367-385, 2008. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engappai.2007.07.004>
- Justice, V., P. Bhaskar, H. Pateman, P. Cain and S. Cahoon, "US container port resilience in a complex and dynamic world," *Maritime Policy and Management*, 43(2), 179-191, 2016. <https://doi.org/10.1080/03088839.2015.1133937>

- Jüttner, U. and S. Maklan, "Supply chain resilience in the global financial crisis: An empirical study," *Supply Chain Management*, 16(4), 246–259, 2011. <https://doi.org/10.1108/13598541111139062>
- Kaiser, H. F., "An index of factorial simplicity," *Psychometrika*, 39(1), 31–36, 1974.
- Kamalahmadi, M. and M. M. Parast, "A review of the literature on the principles of enterprise and supply chain resilience: Major findings and directions for future research," *International Journal of Production Economics*, 171, 116–133, 2016. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.10.023>
- Kim, Y., Y. S. Chen and K. Linderman, "Supply network disruption and resilience: A network structural perspective," *Journal of Operations Management*, 33–34, 43–59, 2015. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.10.006>
- Lam, J. S. L. and X. Bai, "A quality function deployment approach to improve maritime supply chain resilience," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 92, 16–27, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.01.012>
- Lam, J. S. L. and S. Su, "Disruption risks and mitigation strategies: an analysis of Asian ports," *Maritime Policy and Management*, 42(5), 415–435, 2015. <https://doi.org/10.1080/03088839.2015.1016560>
- Liu, C., K. Shang, T. Lirn, K. Lai and Y. H. V. Lun, "Supply chain resilience, firm performance, and management policies in the liner shipping industry," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 110, 202–219, 2018.
- Mandal, S., R. Sarathy, V. R. Korasiga, S. Bhattacharya and S. G. Dastidar, "Achieving supply chain resilience," *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 2016.
- Martin, C. and P. Helen, "Building the Resilient Supply Chain," *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), 1–14, 2004. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>
- Nair, R., H. Avetisyan and E. Miller-Hooks, "Resilience framework for ports and other Intermodal components," *Transportation Research Record*, 2166, 54–65, 2010. <https://doi.org/10.3141/2166-07>

- Nan, C. and G. Sansavini, "A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures," *Reliability Engineering and System Safety*, 157, 35-53, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.08.013>
- Norrman, A. and U. Jansson, "Ericsson's proactive supply chain risk management approach after a serious sub-supplier accident," *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 34(5), 434-456, 2004.
- OECD, OECD Economic Outlook, June 2020
- Omer, M., A. Mostashari, R. Nilchiani and M. Mansouri, "A framework for assessing resiliency of maritime transportation systems," *Maritime Policy and Management*, 39(7), 685-703, 2012. <https://doi.org/10.1080/03088839.2012.689878>
- Pant, R., K. Barker, J. E. Ramirez-Marquez and C. M. Rocco, "Stochastic measures of resilience and their application to container terminals," *Computers and Industrial Engineering*, 70(1), 183-194, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.01.017>
- Parasuraman, A., V. A. Zeithaml and L. L. Berry, "A Conceptual Model of Service Quality and Its Implications for Future Research," *Journal of Marketing*, 49(4), 41-50, 1985. <https://doi.org/10.1177/002224298504900403>
- Pettit, T. J., K. L. Croxton and J. Fiksel, "Ensuring supply chain resilience: Development and implementation of an assessment tool," *Journal of Business Logistics*, 34(1), 46-76, 2013. <https://doi.org/10.1111/jbl.12009>
- Pettit, T. J., J. Fiksel and K. L. Croxton, "ENSURING SUPPLY CHAIN RESILIENCE: DEVELOPMENT OF A CONCEPTUAL FRAMEWORK," *Journal of Business Logistics*, 31(1), 1-21, 2010. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2010.tb00125.x>
- Ponis, S. T. and E. Koronis, "Supply Chain Resilience? Definition of concept and its formative elements," *The Journal of Applied Business Research*, 28(5), 921-935, 2012.
- Ponomarov, S. Y. and M.C. Holcomb, "Understanding the concept of supply chain resilience," *The International Journal of Logistics Management*, 20(1), 124

- 143, 2009. <https://doi.org/10.1108/09574090910954873>
- Purvis, L., S. Spall, M. Naim and V. Spiegler, "Developing a resilient supply chain strategy during 'boom' and 'bust' ," *Production Planning & Control*, 27(7-8), 579-590, 2016. <https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1165306>
- Rice, J. B. and F. Caniato, "Building a secure and resilient supply network," *SUPPLY CHAIN MANAGEMENT REVIEW*, 7(5) (SEPT./OCT. 2003), 22-30, 2003.
- Rice, J. and K. Trepte, "The MIT CTL port resilience survey report," MIT Center for Transportation & Logistics, Cambridge, MA, 2012. Retrieved from: <Http://Ctl.Mit.Edu/Sites/Default/Files/Port%20resilience%20survey%20report%20v27%20sans%20SEM.pDf>.
- Ridwan, A. and B. Noche, "Model of the port performance metrics in ports by integration six sigma and system dynamics," *International Journal of Quality and Reliability Management*, 35(1), 82-108, 2018. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-03-2016-0041>
- Rose, A., "Economic resilience to natural and man-made disasters: Multidisciplinary origins and contextual dimensions," *Environmental Hazards*, 7(4), 383-398, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.10.001>
- Rose, A. and S. Liao, "Modeling Regional Economic Resilience to Disasters: A Computable General Equilibrium Analysis of Water Service Disruptions," *Journal of Regional Science*, 45(1), 75-112, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.0022-4146.2005.00365.x>
- Scholten, K. and S. Schilder, "The role of collaboration in supply chain resilience," *Supply Chain Management: An International Journal*, 20(4), 471-484, 2015. <https://doi.org/10.1108/SCM-11-2014-0386>
- Shafieezadeh, A. and L. Ivey Burden, "Scenario-based resilience assessment framework for critical infrastructure systems: Case study for seismic resilience of seaports," *Reliability Engineering and System Safety*, 132, 207-219, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.res.2014.07.021>
- Shashi, P. Centobelli, R. Cerchione and M. Ertz, "Managing supply chain resilience to pursue business and environmental strategies," *Business Strategy and*

- the Environment*, 29(3), 1215–1246, 2020. <https://doi.org/10.1002/bse.2428>
- Shaw, D. R., A. Grainger and K. Achuthan, “Multi-level port resilience planning in the UK: How can information sharing be made easier?,” *Technological Forecasting and Social Change*, 121, 126–138, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.10.065>
- Shin, N. and S. Park, “Evidence-based resilience management for supply chain sustainability: an interpretive structural modelling approach,” *Sustainability*, 11(2), 484, 2019.
- Shirali, G. A., L. Mohammadfam and V. Ebrahimipour, “A new method for quantitative assessment of resilience engineering by PCA and NT approach: A case study in a process industry,” *Reliability Engineering and System Safety*, 119, 88–94, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.05.003>
- Touzinsky, K. F., B. M. Scully, K. N. Mitchell and M. M. Kress, “Using empirical data to quantify port resilience: Hurricane Matthew and the southeastern seaboard,” *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 144(4), 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000446](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000446)
- UNISDR, U., “Terminology on disaster risk reduction,” Geneva, Switzerland, 2009.
- US Department of Transportation, “ICS Security in Maritime Transportation”, 2013
- Vugrin, E. D., D. E. Warren, M. A. Ehlen and R. C. Camphouse, “A framework for assessing the resilience of infrastructure and economic systems,” *Sustainable and resilient critical infrastructure systems* (77–116). Springer, 2010.
- Wieland, A. and C. M. Wallenburg, “Dealing with supply chain risks,” *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 42(10), 887–905, 2012.
- Wu, I.-L., C.-H. Chuang and C.-H. Hsu, “Information sharing and collaborative behaviors in enabling supply chain performance: A social exchange perspective,” *International Journal of Production Economics*, 148, 122–132, 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.09.016>

- Yu, S., S. W. Kim, C. W. Oh, H. An and J. M. Kim, "Quantitative assessment of disaster resilience: An empirical study on the importance of post-disaster recovery costs," *Reliability Engineering and System Safety*, 137, 6-17., 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.12.007>
- Zsidisin, G. A. and S. M. Wagner, "Do perceptions become reality? The moderating role of supply chain resiliency on disruption occurrence," *Journal of Business Logistics*, 31(2), 1-20, 2010.

〈인터넷 자료〉

- Svt NYHETER, <https://www.svt.se/nyheter/granskning/ug/how-the-labour-conflict-in-the-port-of-gothenburg-became-of-critical-importance-for-the-entire-swedish-labour-market>(검색일: 2020. 6. 2)
- Svt NYHETER, <https://www.svt.se/nyheter/granskning/ug/how-the-labour-conflict-in-the-port-of-gothenburg-became-of-critical-importance-for-the-entire-swedish-labour-market>(검색일: 2020. 6. 2)
- 아주뉴스, <https://www.ajunews.com/view/20140419021915115>(검색일: 2020. 6. 22)
- 조선일보, https://news.chosun.com/site/data/html_dir/2017/06/28/2017062802191.html(검색일: 2020. 6. 22)
- 보안뉴스, <https://www.boannews.com/media/view.asp?idx=70179>(검색일: 2020. 6. 22)
- 연합뉴스, <https://www.yna.co.kr/view/AKR202005191322000009>(검색일: 2020. 6. 22)
- 기상청, https://www.weather.go.kr/weather/typhoon/knowledge_03.jsp(검색일: 2020. 6. 22)
- 한겨레, <http://legacy.www.hani.co.kr/section-004000000/2003/09/004000000200309181457811.html>(검색일: 2020. 6. 22)

- 조선비즈, https://biz.chosun.com/site/data/html_dir/2020/04/06/2020040603210.html(검색일: 2020. 6. 23)
- 뉴스시스, https://newsis.com/view/?id=NISX20200622_0001068927&cID=10899&pID=10800(검색일: 2020. 6. 24)
- 세계일보, <http://www.segye.com/newsView/20200623521758?OutUrl=naver>(검색일: 2020. 6. 24)
- 조선일보, https://news.chosun.com/site/data/html_dir/2020/06/23/2020062303300.html(검색일: 2020. 6. 24)
- 동아일보, <https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20030913/7981701/1>(검색일 : 2020. 6. 22)
- 부산일보, <http://www.busan.com/view/busan/view.php?code=20100827000195>(검색일 : 2020. 6. 22)
- 해양수산부 보도자료(2020. 5. 4), 『부산신항 크레인 충돌사고 선박, 프로펠러 수면 위 노출상태로 무리한 운항 - 해수부 중앙해양안전심판원, 사고 원인 조사 결과 중간발표』(검색일: 2020. 6. 23)
- 국가법령정보센터, 『해양수산부 중앙사고수습본부 구성 및 운영에 관한 규정』(검색일: 2020. 9. 5)
- 국가법령정보센터, 『비상사태등에 대비하기 위한 해운 및 항만 기능 유지에 관한 법률』(검색일: 2020. 9. 5)

부록

〈설문지 1〉

본 설문은 항만의 회복탄력성(resilience) 연구의 기초자료 수집을 목적으로 하고 있습니다. 이에 대한 귀하의 답변은 항만 회복탄력성 구성 요인 측정을 알아보기 위한 소중한 연구 자료로 활용될 것입니다.

본 설문에서 응답해주시는 정보는 법률 제11690호 개인정보 보호법 제15조(개인정보 수집/이용)에 의거 보호 받을 수 있으며, 동법 제21조(개인정보의 파기)에 의거 조사 종료 후 파기되오니 안심하시고 원활한 연구 진행이 될 수 있도록 모든 문항에 빠짐없이 응답해 주시기를 부탁드립니다. 또한 본 설문의 결과와 내용은 연구 목적 외에 다른 목적으로 사용되지 않음도 함께 알려드립니다. 다소 번거롭고 바쁘시더라도 적극 협조하여 주시기 바랍니다.

※ 조사표 작성과 관련한 문의사항은 아래로 연락해 주시기 바랍니다.

(한국해양수산개발원 김성기 전문연구원 051)797-4688, skkim@kmi.re.kr)

(한국해양수산개발원 김찬호 부연구위원 051)797-4673, chkim@kmi.re.kr)

2020. 8

한국해양수산개발원 항만연구본부 항만투자·운영실

[문항]

다음 질문은 항만의 회복탄력성 관련 질문입니다. 항만의 역량에 관한 아래의 질문에 대한 귀하의 생각을 1~5 사이의 값으로 답변 부탁드립니다. (1: 매우 아니다, 3: 보통이다 5: 매우 그렇다).

No	질문	응답				
		①	②	③	④	⑤
1	항만의 성과는 항상 목표에서 크게 벗어나지 않는다.	①	②	③	④	⑤
2	항만은 어떤 상황에서도 원래의 업무를 수행할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
3	항만은 어떠한 외부 변화에도 안정된 상황을 유지한다.	①	②	③	④	⑤
4	항만은 특별한 조정이 필요 없이 다양한 상황에서 잘 작동한다.	①	②	③	④	⑤
5	항만은 장비, 인력 등 물리적 작업 지원을 위한 예비 자원을 유지한다.	①	②	③	④	⑤
6	항만은 비상시를 위한 백업 에너지 시스템과 다용도 자원을 보유하고 있다.	①	②	③	④	⑤
7	항만은 예상치 못한 수요 변동을 처리하기 위한 여유 능력을 가지고 있다.	①	②	③	④	⑤
8	항만에는 모든 작업을 정확하게 추적하는 정보 시스템이 있다.	①	②	③	④	⑤
9	항만은 장비, 인력 등에 대한 실시간 데이터를 관리하고 있다.	①	②	③	④	⑤
10	항만은 데이터 분석을 위한 효과적인 비즈니스 인텔리전스 프로그램이 있다.	①	②	③	④	⑤
11	항만은 기능 중단에 대처하기 위해 작업 일정을 조정할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
12	항만은 기능 중단에 대처하여 작업 처리 능력을 조정할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
13	항만의 협력 파트너들은 공급 능력을 유연하게 조정할 수 있다.	①	②	③	④	⑤

No	질문	응답				
		①	②	③	④	⑤
14	항만은 주요 경영 목표를 달성하기 위해 많은 업체와 협력한다.	①	②	③	④	⑤
15	항만은 파트너와 공동으로 전략적 목표를 설정한다.	①	②	③	④	⑤
16	항만은 주요 파트너와 공동으로 상호 이익을 위해 노력한다.	①	②	③	④	⑤
17	항만은 고객들에게 맞춤형 서비스를 제공하며, 갑작스러운 요구에도 대응할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
18	항만의 운영 모형은 급격한 환경변화에도 빠르게 대응할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
19	항만의 직원은 여러 종류의 작업을 수행하며 작업을 빠르게 전환할 능력을 가지고 있다.	①	②	③	④	⑤
20	항만은 파트너들과 상황에 맞는 적절한 정보를 교환한다.	①	②	③	④	⑤
21	항만은 파트너들과 주기적으로 정보를 교환한다.	①	②	③	④	⑤
22	항만은 파트너들과 정확한 정보를 교환한다.	①	②	③	④	⑤
23	항만은 운영 중단에 신속하게 대응할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
24	항만은 위기에 대한 적절한 대응을 할 수 있다.	①	②	③	④	⑤
25	항만에는 위기 상황을 대비한 비상대응조직이 구성되어 있다.	①	②	③	④	⑤
26	항만은 큰 손실을 흡수할 수 있는 능력이 있다.	①	②	③	④	⑤
27	항만은 적은 비용으로 위기에서 회복할 수 있다.					
28	항만은 위기 대처 능력에 의해 손실의 영향을 줄일 수 있다.					

- 설문에 응하여 주셔서 감사합니다. -

기본연구보고서 발간목록

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 자원체계 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	수산물 품질·안전관리 제도 개선방안 연구	이현동
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 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 -新해사산업의경제적파급효과분석연구(4차년도)-	박한선
23	국내 항만연계 산업의 가치사슬 및 공급사슬 연계성 강화방안 - 자동차 산업을 중심으로	신수용

2019년

01	한반도 평화 체제 수립 대비 접경수역 연구	최지현
02	수산부문 전망모형 「KMI-FOSiM」 구축 연구(2차년도)	이현동
03	4차 산업혁명 시대의 스마트 어촌 구축방안 연구	박상우
04	해양수산분야 예견적 위험분석 기반구축 연구	최석우
05	재해대응 및 환경보전을 위한 연안토지 매수 이행방안 연구	윤성순
06	선박 대기오염물질 배출저감 기술의 평가·인증체계 구축 및 활용방안 연구	안용성
07	해양레저관광서비스 산업 육성방안 연구	최일선
08	주요국의 나고야의정서 이행체계 강화에 대응한 해양유전자원정책 개선 연구	박수진
09	하천·해양 수질의 연계·통합 관리 체계 연구	장원근
10	총허용어획량(TAC) 기반 수산자원관리 강화 방안 연구	이정삼
11	우리나라 수산업·어촌의 공익적 기능에 관한 연구	류정곤
12	우리나라 원양산업의 사회적 책임 실천 강화를 위한 정책연구	정명화
13	수산업 노동시장 구조 분석과 노동정책 변화에 따른 대응 연구	한광석
14	우리나라 정기선 해운정책 개선 방안 연구	김태일
15	국내외 해운금융 비교를 통한 국내 해운금융 역량강화 방안 연구	전형진
16	해상 사이버 보안체계 강화방안 연구	박한선
17	해운 기업 비즈니스 모델과 경쟁우위 분석 연구	윤희성
18	국내 항만산업이 지역경제에 미치는 영향 분석	하태영
19	동북아 공동배출규제해역 지정 필요성 및 추진방안 연구	이기열
20	수출기업의 글로벌 공급사슬협력 수준 분석과 물류정책 방안 연구 - 화주~물류기업 협력을 중심으로 -	김은수
21	신선식품 수출입 증대를 위한 우리나라 항만물류 개선 방안	신수용
22	환동해권 물류 및 지역개발 비즈니스 모델 제안과 협력방안	박한선
23	IMO 규제기반 해사산업의 글로벌 지속발전방안 연구 - 우리나라 新해사산업의 경쟁력 분석에 관한 연구 -	최나영환

수시연구보고서 발간목록

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

2019년

01	일본의 수산물 수입 구조 분석과 對일본 수출 전략 연구	임경희
02	선박부착생물에 대한 선제적 대응을 위한 정책방향 연구	박수진
03	수산물 위생안전을 위한 저온유통체계 구축방안 연구	장홍석
04	전국 사업체조사 마이크로데이터를 활용한 어촌지역 고용통계 (2016, 2017)	한광석

일반연구보고서 발간목록

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

2019년

01	양식수산물의 경영비 조사체계 구축에 관한 연구	백은영
02	딥러닝 기반의 건화물선 시황예측 연구	윤희성
03	해운-조선산업 관계분석 연구 - 컨테이너 신조발주량 예측 -	최건우
04	디지털 공급사슬 물류정보통합 구축전략 연구(Ⅰ) - 디지털 공급사슬 생태계 정보통합지도 구축 중심 -	최상희
05	시민 건강증진을 위한 해안관리 방향	정지호
06	우리나라 주요 국제여객항 운영체계 개선방안 연구 : 운영, 시설, 제도를 중심으로	이경한
07	북한 서해 해양관광 활성화 방안	윤인주
08	EU의 수산물 소비 특성 및 수출 전략(프랑스, 스페인을 중심으로)	김지연
09	해양수산 위성계정 기초연구(Ⅰ)	장정인
10	우리나라 해운·물류기업의 중국 자유무역시범구 활용방안 연구	김형근
11	지역 해양수산 혁신성장체계 구축 연구	최지연
12	도미니카공화국 뱀장어 양식사업 타당성 조사	마창모
13	강원도 어촌 신활력 제고방안(2차년도) - 어촌 활성화 거버넌스 구축과 신활력 사업구상 -	박상우

기본연구 2020-21

항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구

2020년 12월 29일 인쇄

2020년 12월 31일 발행

발 행 인 | 장 영 태

발 행 처 | 한국해양수산개발원

49111 부산시 영도구 해양로 301번길 26(동삼동)

연 락 처 | 051-797-4800 (FAX 051-797-4810)

등 록 | 1984년 8월 6일 제313-1984-1호

조판·인쇄 | 영진피앤피 (02-734-3713)

판매 및 보급: 정부간행물판매센터 Tel : 02-394-0337

정가 15,000원

