

컨테이너 항만운영에 대한 코로나19의 영향 분석 연구

김성기* · † 김찬호

*한국해양수산개발원 항만연구본부 전문연구원, † 한국해양수산개발원 항만운영연구실장

Analysis of the Impact of COVID-19 on Port Operation

Sung-Ki Kim* · † Chan-Ho Kim

*Senior Researcher, Port Research Division, KMI, Korea

† Director, Port Operation Department, KMI, Korea

요 약 : 항만운영을 위협하는 요인들이 다양화되고 있다. 최근에 전 세계적으로 문제를 야기한 코로나19도 그 중 하나이다. 2020년 부산 감천항에서 발생한 러시아 선원의 코로나 확진으로 인해 하역작업이 전면 중단되었는데, 이는 감염병으로 인해 항만이 폐쇄된 대표적인 사례이다. 항만은 우리나라 수출입물류의 대부분을 담당하는 국가 기반 시설물로서 감염병 등 위협 요인에 대한 레질리언스(resilience) 확보가 반드시 필요하나, 관련 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 시스템 다이내믹스를 활용하여 감염병이 컨테이너 항만운영에 미치는 영향에 대한 흐름도를 구축하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 감염병에 대한 항만의 레질리언스를 생산성과 물동량 측면에서 측정하였다. 시뮬레이션 분석을 통해 구축한 모형이 실제로 항만의 레질리언스 측정에 활용할 수 있음을 보였으며, 항만 내 감염병이 발생했을 시 격리 정책 시나리오를 설정하여 효과를 비교함으로써 레질리언스 향상을 위한 정책 수립의 기반으로 활용할 수 있음을 확인했다는 점에 본 연구의 의의가 있다.

핵심용어 : 항만운영, 레질리언스, 코로나19, 시스템 다이내믹스, 항만생산성

Abstract : The major factors that threaten port operation are diversie. Coronavirus disease-19, (COVID-19), which has recently disrupted operations worldwide, is one of them. Port operation was completely stopped due to a confirmed coronavirus involving a Russian sailor in Gamcheon Port, Busan, Korea in 2020, resulting port closure due to the infectious disease outbreak. The port is a national infrastructure facility that controls most of Korea's import and export logistics, and it is absolutely necessary to secure resilience against threats such as infectious diseases. However, due to insufficient data, this study was undertaken to determine a cause-effect relationship of infectious diseases during the container port operation using system dynamics. In addition, the port's resilience against infectious diseases was measured in terms of productivity and cargo volume through simulation. The model built via simulation analysis can actually be used to measure the resilience of a port. In the event of an infectious disease outbreak at a port, a quarantine policy scenario can be implemented and the effect compared, thereby improving the resilience.

Key words : port operation, resilience, COVID19, system dynamics, port productivity

1. 서 론

최근 항만운영에 위협을 주는 요인들이 증가하고 있는 상황이다. 과거에는 태풍, 지진, 해일 등의 재해나 선박 충돌, 파업 등과 같은 인적 요인이 주요한 위협이었다면, 이제는 사이버 테러나 감염병 등이 새로운 위협으로 대두하고 있다. 특히 최근에 전 세계적으로 발생한 코로나바이러스감염증-19(이하 코로나19)가 가장 대표적인 사례이다. 지난 2020년 6월 21일 부산 감천항에서 러시아 선원 16명이 코로나19 확진자로 발생하면서 해당 항만의 작업자 200여 명이 자가 격리조치를 받아 항만운영이 전체 중단되는 사례가 있었다. 이후로도 감천항에서는 코로나19 확진자가 계속해서 발생하여 수산물 하역에 많은 차질이 빚어졌다. 그동안 코로나19와 같은 감염병은 항만

운영에 지장을 초래하는 주요한 위협으로 인식되고 있지 않았지만, 감천항의 경우는 감염병이 실제적인 위협이 될 수 있음을 알려준 사례이다.

항만은 우리나라 수출입물류의 99.7%를 담당하는 중요 기반 시설물로서(Kim and Kim, 2020), 운영의 안전성을 확보하여 기능을 유지하는 것이 매우 중요하다. 우리나라의 대형 항만이며 석유화학 제품을 주로 취급하는 울산항이 3개월 동안 기능을 정지할 경우 관련 제품의 매출액 감소와 함께 GDP가 약 1.1%, 울산지역 취업자 수가 약 10.6% 감소할 것으로 추정되는 등(Lee and Kim, 2015) 항만의 기능 정지는 국가 경제에 큰 악영향을 미친다. 즉, 항만의 기능을 위협하는 요인이 다양해지는 현 상황에서 레질리언스(resilience) 확보 방안이 반드시 마련될 필요가 있다.

† Corresponding author : 정희원, chkim@kmi.re.kr 051)797-4673

* 정희원, skkim@kmi.re.kr 051)797-4688

레질리언스는 라틴어 'Resilire'에서 기원하여 '되돌아간다(to leap back)'라는 의미를 가지고 있으며(Omer et al., 2012), '피할 수 없는 사건의 결과에 대응하여 원래의 운영 상태로 돌아가거나 더 바람직한 상태로 이행하기 위한 능력'을 의미한다(Shin and Park, 2019). 레질리언스에 대한 연구는 1973년 홀링(Holling)에 의해 시작되어(Chowdhury and Quaddus, 2017) 생태학, 심리학, 교육학, 경영학 등 여러 학문 분야에서 그 개념이 도입되기 시작하였으며, 특히 공급사슬 분야에서는 2011년 동일본 대지진으로 인한 공급사슬 붕괴에 따라 회복탄력성에 대한 연구가 많이 이루어졌다(Park, 2020). 최근에는 공항, 대중교통, 상수도, 발전소 등의 사회기반시설의 기능 유지 측면에서도 회복탄력성에 대한 연구가 많이 진행되고 있으나, 항만의 회복탄력성에 대한 연구는 부족한 실정이며 특히 코로나19와 같은 감염병에 대한 회복탄력성 연구는 거의 이루어지지 않았다.

본 연구의 목적은 시뮬레이션 분석을 통해 코로나19와 같은 감염병이 항만운영에 미치는 영향과 레질리언스를 수량적으로 측정해보고, 항만의 위기대응 계획의 효과를 비교해 볼 수 있는 모형을 구축하는 것이다. 심도 있는 연구를 위해 연구 대상의 범위는 컨테이너 항만으로 설정하였다. 이를 위해 감염병이 컨테이너 항만운영에 미치는 영향에 대하여 인과지도를 구축하고, 이를 바탕으로 시스템 다이내믹스(System Dynamics, SD)를 활용한 시뮬레이션을 실시하였다. SD는 시스템 사고에 기초하여 피드백 구조와 동태적 분석을 강조하는 방법론으로, 시스템의 구성 요소들이 시간에 따라 변화하는 모습을 연구하기에 적합한 방법론이다(Choi et al., 2006). 레질리언스는 위협에 반응하고 본래의 기능을 회복하는 데 걸리는 시간이라는 개념을 내포하고 있기 때문에 시간의 흐름에 따른 동태적인 변화를 강조하는 SD 분석을 활용하였다.

본 논문에서는 컨테이너 항만의 운영 시스템에 관한 흐름도를 구축하고 이를 감염병 전파 모형과 결합하여 감염병이 항만 운영에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 또한 시범적인 시뮬레이션 결과 분석을 통해 항만의 생산성과 물동량 처리에 관한 레질리언스 측정 모형으로서의 적용 가능성을 확인하였다. 분석 결과, 감염병 발생 초기에 빠른 격리 조치를 시행하는 것이 가장 효과적인 대응이 될 수 있음을 보였으며, 평상시에 여분의 물동량 처리 능력 확보가 감염병에 대한 레질리언스 향상 방안의 하나임을 보였다. 현재 항만운영 측면의 감염병에 대한 대응 계획이 제대로 수립되지 않은 상황에서, 항만의 회복탄력성과 대응 계획의 효과를 수량적으로 측정할 수 있음을 보이고 관련 정책 수립의 기반을 마련했다는 것에 본 논문의 의의가 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 연구와 관련된 문헌 연구를 시행하였고 3장에서는 감염병이 항만운영에 영향을 미치는 경로에 대한 인과지도를 제시한 후 이를 바탕으로 항만운영 시스템 흐름도를 만들고 감염병 확산 모형과 결합하여 연구 모형을 구축하였다. 4장에서는 시범적인 시뮬

레이션을 실시하고 결과를 분석하였으며 마지막으로 5장에서는 결론과 정책적 시사점, 연구의 한계점과 향후 연구방향을 제시하였다.

2. 문헌연구

본 연구는 크게 i) 항만운영 시스템에 관한 모형, ii) 레질리언스 측정, 두 가지 분야 연구에 기반하고 있다. 항만의 레질리언스를 측정하기 위해서는 항만운영 시스템의 모형화가 선행되어야 한다. 항만운영 시스템은 항만 연구에서 가장 중요하게 다루어진 분야 중 하나이다. 본 연구에서는 운영 시스템에 관한 연구 중 SD를 활용하여 모형을 시행한 연구를 중점적으로 살펴보았다. Choi et al.(2006)은 컨테이너 터미널의 경쟁력 향상에 관한 연구를 시행하면서 게이트에서의 작업, 장치장에서의 작업, 선석에서의 양·적하 작업들과 터미널 신뢰성 간의 인과관계를 분석하여 모형을 구축하였다. 안벽 크레인, 야드 크레인, 이송장비, 게이트의 작업에 따라 처리량과 처리율이 결정되고, 각각의 처리율이 컨테이너 터미널의 신뢰성에 영향을 주고, 신뢰성에 물동량이 영향을 받는 것으로 파악하였다. 본 연구는 컨테이너 터미널의 신뢰성이라는 추상적인 개념을 수량적으로 파악하고 선박의 재항 시간과 연결하여 결과를 도출하였다는 의의가 있지만 신뢰성 외의 다양한 요인들에 대한 고려가 다소 부족하다는 한계를 가지고 있다. Jung and Yeo(2011)는 물동량에 영향을 미치는 요인과 터미널 운영 간의 관계를 연구하면서 터미널 운영 시스템을 모형화하였다. 선석 크레인과 컨테이너 야드 각각의 가동률을 주요 측정 변수로 하여 세계와 동북 3국의 교역량 증감률, 대미 환율 증감률 세 가지의 물동량 변동 요인에 따른 터미널의 가동률 및 매출액, 누적 적재량을 비교하였다. 해당 연구는 세 가지의 물동량 변동 요인이 항만운영에 미치는 영향을 수치적으로 표현했다는 점에서 큰 의의가 있다. Caballini et al.(2012)은 내륙 철도 시스템과 항만운영 시스템을 연결한 개념적인 모형을 구축하여 연구를 시행하였다. 다만 항만운영에 있어서 중요한 부분인 선석의 운영을 배제하고 야드 시스템에 집중하여 컨테이너가 야드에 들어오고 나가는 과정에 대한 모형을 구축하여 기술과 자원에 따른 항행 시간의 변화, 열차 발착 횟수 등을 시뮬레이션을 통해 측정하였다. 해당 연구는 항만에서 가장 중요하게 취급되는 부분인 선박의 양·적하 과정을 제외하여 해당 부분의 시스템 구성 요인에 대해 파악할 수 없다는 한계가 있다. Ridwan and Noche(2018)는 항만운영 최적화 및 서비스 품질 개선을 위해 6시그마 개념을 활용하여 SD 모형을 구축하였다. 항만운영 시스템, 품질 비용, 실패에 따른 손실 비용과 관련된 세 가지의 흐름도를 작성하였으며, 예선 수와 입항 선박 수, 크레인 수를 주요 변수로 선정하여 연구를 시행하였다. 예선의 숫자가 선박의 선석 접근 시간에 영향을 주고, 선석 크레인 숫자와 생산성이 화물 양·적하 시간에 영향을 주는 것으로 인과관계를 파악하여 시나리오에 따른

비용을 추정하였다. 다만 항만의 성과를 품질 저하에 따라 발생하는 비용(cost of poor quality)으로 측정하고 물동량이나 생산성과 같이 일반적으로 활용하는 성과 지표는 고려하지 않았다. 지금까지 살펴본 연구들은 항만운영 시스템의 모형화와 성과 지표 측정에 중점을 두었으며, 항만 위기 상황과 레질리언스에 대해서는 고려하지 않았다.

다음으로 항만의 리질리언스를 측정하는 연구에 대해 살펴보도록 한다. Omer et al.(2012)은 항행 시간 및 대기 시간을 항만 성과로 설정하고, 위기 상황에서의 레질리언스를 측정하였다. 이를 위해 SD를 활용하여 상해항과 미국 LA/LB 항만 네트워크 시스템 내에서 선박의 이동 시간을 나타내는 흐름도를 구성한 후 위기 강도에 따라 시나리오를 설정하고 레질리언스를 측정하였다. 다만 해당 연구 모형은 항만 간의 네트워크 시스템에 관한 모형으로 본 연구에서 분석하고자 하는 항만운영 시스템의 레질리언스와는 차이가 있다. Pant et al.(2014)은 레질리언스를 복구성(recoverability)과 취약성(vulnerability), 두 변수의 함수로 정의하고 확률 모형을 기반으로 한 측정 도구를 통해 미국 오클라호마에 위치한 카투스 내륙항만(inland port)의 레질리언스를 측정하였다. Buor(2015)는 항만의 재난 대비 수준(disaster preparedness)이 레질리언스와 깊은 관계가 있다고 주장하면서 이를 측정할 수 있는 SD 모형을 제시하였다. 해당 연구는 레질리언스를 직접적으로 측정하는 것이 아니라 재난 대비 수준을 대리 변수로 가정하고 간접적으로만 측정하였다. Chen et al.(2017)은 항만과 연결된 내륙 운송의 네트워크 시스템 레질리언스 측정에 대해 연구하였다. 정수 계획법을 활용한 모형을 제시하고 스웨덴 예테보리항에 사례를 연구하여 수치 분석을 통해 결과를 제시하였다. 이 연구는 항만 자체의 레질리언스 보다는 항만-내륙 운송 네트워크에 초점을 맞추고 있다. Cho and Park(2017)은 신속성과 강건성이 항만의 레질리언스에 어떠한 영향을 주는지를 측정하기 위한 SD 모형을 구축하였다. 물동량 처리 능력(capacity)을 주요 성과 지표로 선정하여 장기간에 걸친 항만의 손실과 회복 과정을 시뮬레이션으로 측정할 수 있음을 보였다. 해당 연구는 SD를 활용하여 레질리언스를 측정할 수 있는 가능성을 보여주었다는 점에서 의의를 가지나 항만운영 시스템을 선박, 야드 등으로 구분하지 않고 단순하게 모형화하였다. Touzinsky et al.(2018)은 실제 데이터를 활용하여 미국 해상 운송 시스템의 레질리언스에 대해 연구하였다. 선박 자동 식별장치(automatic identification system)의 데이터를 통해 미국 남동부 3개 항만에서 허리케인이 선박 체류 시간과 입항 선박 수에 미치는 영향을 분석하고 허리케인의 강도에 따른 성능 변화를 측정하였다.

본 연구에서는 기존 문헌을 기반으로 항만운영 시스템에 관한 구체적인 흐름도를 구축한 후 이를 감염병 확산 모형과 연결하여 항만의 레질리언스 측정 모형을 구축하였다. 항만의 주요 위협 요인으로 인식되지 않았던 감염병이 항만운영 시스템, 특히 생산성과 물동량 처리 수준에 미치는 영향에 대한 시

뮬레이션 모형을 구축하였다는 점에서 다른 연구들과 차별성을 가지며, 레질리언스 측정을 통해 향후 관련 정책 수립 시에 활용할 수 있는 가능성을 제시하였다는 점에 본 연구의 의의가 있다.

3. 연구 모형

본 장에서는 SD를 활용하여 항만의 레질리언스를 측정하고 위기 대응 계획의 효과를 분석해볼 수 있는 모형을 구축하고자 한다. 먼저 감염병이 항만운영에 영향을 미치는 경로에 대해 분석하여 인과지도로 나타낸다. 여기에 더해 Jung and Yeo(2011), Caballini et al.(2012)의 논문에서 나타난 항만운영 시스템 모형을 바탕으로 레질리언스를 측정하기 위한 시뮬레이션 모형을 구축한다.

3.1 감염병이 항만 운영에 미치는 영향

본 절에서는 먼저 컨테이너 항만에서 일하는 인적 구성원을 크게 크레인 운용 인력, 이송장비 운용 인력, 보안요원, 시스템엔지니어, 일반 노무 인력으로 분류하여 인과지도를 구축하였다. 먼저 크레인 운용 인력이 병에 감염되면 크레인의 생산성이 하락하게 되며, 이는 선박 및 트럭의 대기시간 증가를 유발하여 물동량 감소로 연결된다. 다음으로 이송장비 운용 인력 사이에 감염이 발생하면 야드 생산성이 하락하여 물동량 감소와 직접적으로 연결되고, 또한 트럭 대기시간 증가를 유발하여 간접적으로 물동량 하락에 영향을 미친다. 게이트 출입을 관리하는 보안 요원의 감염은 트럭 출입 업무 생산성의 하락을 유발하여 트럭 대기시간 증가로 이어지고, 결국은 물동량에 부정적인 영향을 주게 되며, 이러한 물동량 감소는 경제적인 손실을 불러온다. 시스템 엔지니어의 감염은 항만 컨트롤 시스템의 전체적인 생산성 하락을 유발하며, 이는 결국 선석 크레인의 생산성 감소 및 선박 대기시간 증가와 연결되어 물동량에 부정적인 영향을 미치게 된다. 일반 노무 인력(dock worker)은 위 직종 외에 신호수 등 하역 작업을 보조하는 인력을 의미하며, 이 인원들이 병에 감염되면 작업 효율 저하로 인해 크레인과 야드 생산성의 하락을 유발하며, 이는 다른 경로와 마찬가지로 물동량 감소를 불러오게 된다. 마지막으로 감염병의 예방 및 치료를 위해서는 그에 상응하는 비용이 소요되며 이러한 비용 투입을 통해 먼저 병의 전염 확률을 낮출 수 있으며, 다음으로 환자들이 치료를 통해 병에서 회복되고 업무에 복귀하게 되면 물동량과 생산성이 점차적으로 정상 상태로 돌아오게 된다. Table 1은 감염병이 항만운영에 미치는 영향에 대한 인과관계의 흐름을 정리한 것이며, Fig. 1은 그 과정을 인과지도로 표현한 것이다.

Table 1 Casual-loop of epidemic on port operation

Number	Casual Loop
1	infected crane operator→(-)crane productivity→(+) ship wating time→(-)port throughput→(+) economic loss
2	infected transport equipment operator→(-) yard productivity→(+) truck wating time→(-)port throughput→(+) econmic loss
3	infected security agent→(-)security work productivity→(+) truck wating time→(-)port throughput→(+) economic loss
4	infected system engineer→(-)control work productivity→(-) crane productivity→(+) ship wating time→(-)port througput→(+) econmic loss
5	infected dock worker→(-)crane and yard productivity→(+) ship and truck wating time→(-)port throughput→(+) econmic loss
6	recovery cost→(+) economic loss and (+)prevention and care level in port→(-) infection probability of port workers

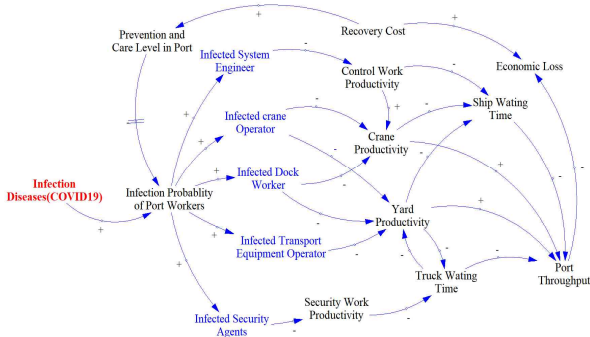


Fig. 1 Casual-loop diagram of epidemic on port operation

3.2 감염병이 항만운영에 미치는 영향

본 절에서는 앞에서 구축한 인과지도와 항만운영 시스템에 대한 문헌연구 결과를 바탕으로 감염병에 대한 항만의 레질리언스를 측정할 수 있는 SD 모형을 구축하고자 한다. 먼저 컨테이너 터미널을 대상으로 항만운영에 대한 흐름도(stock-flow diagram)를 구축한 후, 감염병 확산을 표현한 흐름도와 결합하여 감염병에 대한 레질리언스를 측정하도록 한다.

먼저 컨테이너 터미널의 운영 시스템은 Jung and Yeo(2011), Caballini et al.(2012)의 모형을 바탕으로 하여 게이트 보안 인력과 이송장비 운용 인력 등의 요인을 추가하여 구축하였다. 작업 과정을 선박의 입항과 선석에서의 물동량 처리, 트럭의 입항과 야드에서의 물동량 처리로 구분하여 두 가지로 구성하였으며, 앞 절에서 제시한 인과지도에서 분석한 바와 같이 인력이 병에 감염되어 생기는 생산성 하락을 모형화하였다. 다만 실제 시뮬레이션을 시행할 때 결과를 표현하기 어려운 시

스템 엔지니어의 감염 영향은 모형에서 제외하였으며, 일반 노무 인력은 직접적인 영향보다는 하역 작업을 지원하는 역할을 수행하므로 마찬가지로 모형에서 제외하고 크레인 운용 및 이송장비 운용 인력, 게이트 보안 인력을 중심으로 하여 흐름도를 구축하였다.

먼저 선석에서의 물동량 처리에 관한 흐름도를 보면, 선박이 항만에 입항하게 되면 여유 선석이 존재할 경우 바로 선석에 접안하고, 여유 선석이 없다면 항만 내에서 대기하다가 작업이 완료된 선박이 이안하면 해당 선석에 접안하게 된다. 선박이 접안하면 선석 크레인(Gantry Crane, GC)을 활용하여 양하 및 적하 작업이 시행되며 작업에 걸리는 시간은 선석 당 크레인 생산성(선석 생산성)의 영향을 받게 된다. 선석 생산성은 단위 시간(1시간)당 선석에서 처리할 수 있는 총 TEU(Twenty foot Equivalent Units)로 정의되며, 이는 선석 크레인의 회전 당 TEU와 시간당 회전 수 및 선석의 총 크레인 대수와 운용 인력의 수에 의해 결정된다. 선석 물동량은 야드 트랙터 등의 이송장비(Transportation Equipment, TE)와 연계하여 처리되는데 이송장비의 총 생산성 또한 크레인 및 마찬가지로 전체 이송장비의 수, 장비의 시간당 처리 TEU 및 운용 인력의 수에 영향을 받아 결정된다. Fig. 2는 선석 물동량의 처리 흐름도 전체를 나타낸 것이다.

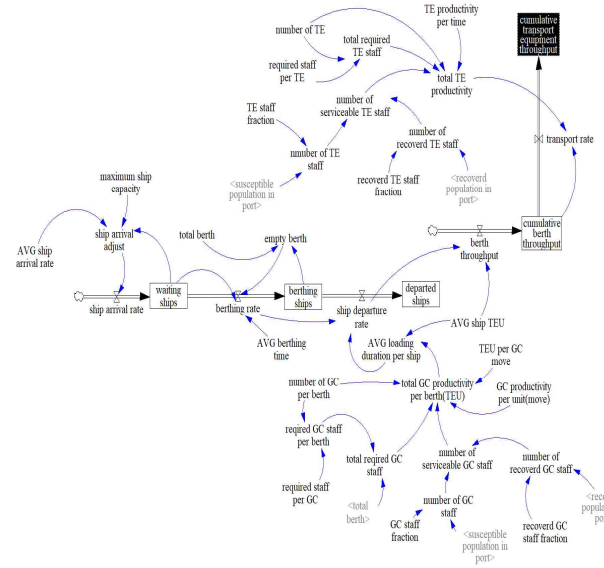


Fig. 2 Stock-Flow diagram of berth throughput

트럭은 게이트를 통해 항만에 출입하게 되는데 출입 가능한 트럭의 대수는 운용 가능한 게이트 숫자와 보안 검사에 걸리는 시간의 영향을 받아 결정되며, 운용 가능한 게이트 수는 보안 인력의 숫자에 영향을 받게 된다. 입항한 트럭은 야드에 위치한 트랜스퍼 크레인(Transfer Crane, TC)에 의해 작업이 시행된다. 이때 전체 작업에 걸리는 시간은 트랜스퍼 크레인의 생산성에 의해 영향을 받는다. 트랜스퍼 크레인의 생산성은 시간당 처리할 수 있는 TEU로 정의되며, 선석의 경우와

유사하게 크레인의 시간 당 회전 수, 회전 당 TEU, 운용 인력 숫자의 영향을 받아 결정된다. Fig. 3은 트럭 물동량의 처리 흐름도 전체를 표현한 것이다.

4. 결과 분석

본 장에서는 시범적인 시물레이션을 시행하여 감염병에 대한 항만의 레질리언스를 측정하였다. 레질리언스는 감염병이 없는 정상시의 성과와 감염병에 발생했을 시 성과의 차이로 정의하며, 레질리언스가 높을수록 둘 간의 차이는 줄어든다. 본 연구에서는 선석 크레인의 생산성과 선석의 누적 처리 물동량을 항만의 성과 지표로 하여 감염병에 대한 레질리언스를 측정해 보았다. 시물레이션에서 사용한 주요 변수와 계산을 위한 수식은 Table 2와 같다.

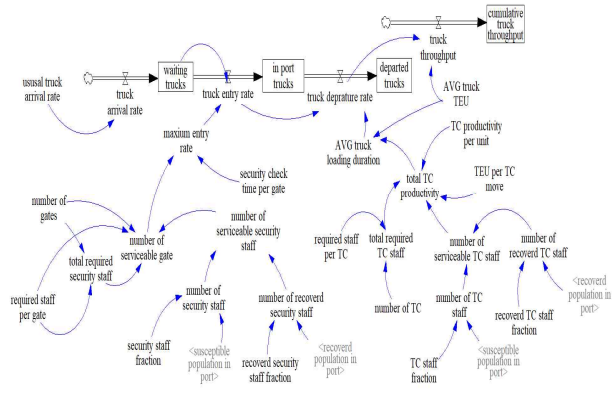


Fig. 3 Stock-Flow diagram of truck throughput

마지막으로 감염병의 확산과 관련한 모형은 기존에 병의 확산에 대해 분석할 때 많이 사용하던 흐름도를 바탕으로 설계하였다. 감염률은 감염자와 접촉 시 병에 감염될 확률과 감염된 사람과 건강한 사람의 접촉 횟수에 영향을 받아 결정된다. 여기서 접촉 횟수는 항만의 특성을 반영하여 항만 인력 간 접촉, 선원과 항만 인력 간의 접촉, 트럭 운전수와 항만 인력 간의 접촉 횟수로 구분할 수 있다고 가정하였다. 항만 내의 총 인구는 선박 당 평균 선원 수, 트럭 운전수 숫자 전체 항만 운영 인력의 합으로 계산되며, 항만 내의 총 인구 중 감염된 사람의 비율은 감염된 사람과 건강한 사람의 접촉 횟수에 영향을 주게 된다. 항만 인력이 코로나에 감염되게 되면 크레인과 이송장비 운용 인력 및 보안 인력 중 실제로 활동이 가능한 인력 수가 감소하여 항만의 생산성에 영향을 준다. 감염된 사람은 일정 기간의 치료 기간을 통해 회복되어 작업에 복귀하며, 병으로 인해 사망하는 인력은 없는 것으로 가정하였다. Fig. 4는 감염병 확산의 전체적인 흐름도를 표현한 것이다.

Table 2 Major equation in simulation model

Variable		Equation
Stock-Flow Diagram of epidemic	infected population in port	recovered population in port - susceptible population in port
	infection rate	contact between infected and uninfected population*infectivity of epidemic(COVID19)
	number of contact per person	number of contact between port and crew + number of contact between port and port + number of contact between port and truck driver
Stock-Flow Diagram of berth throughput	total GC productivity per berth	GC productivity per unit*number of GC per berth*TEU per GC move*(number of serviceable GC staff/total required GC staff)
	berth throughput	ship departure rate*average(AVG) ship TEU
	total TE productivity	TE productivity per time*number of TE*(number of serviceable TE staff/total required TE staff)
	cumulative TE throughput	transport rate
Stock-Flow Diagram of truck throughput	maximum entry rate	number of serviceable data/security check time per gate
	number of serviceable gate	IF THEN ELSE(total required security staff<=number of serviceable security staff, number of gate, MIN[number of gate,, INTERGER(number of serviceable security staff/required staff per gate)])
	total TC productivity	TEU per TC move*TC productivity per unit*(number of serviceable TC staff/total required TC staff)
	truck throughput	truck departure rate*AVG truck TEU

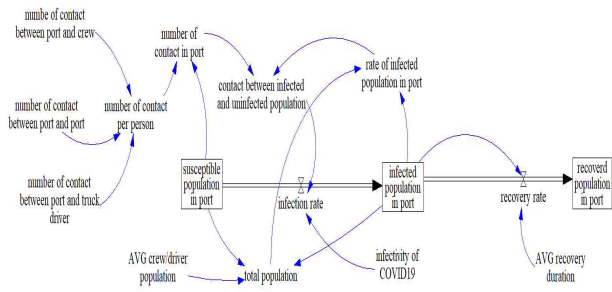


Fig. 4 Stock-Flow diagram of epidemic

본 연구에서는 크레인과 이송장비의 생산성이 활동 가능한 인력의 수에 비례하여 감소하는 것으로 가정하였다. 항만 내에서 감염자가 발생하면 필요한 총 인력보다 활동 가능한 인력의 수가 줄어들게 되고, 이에 비례하여 생산성이 감소하는 것이다. 장비 운용을 위한 최소한의 인력이 충족되지 않으면 장비가 완전히 정지하게 되는 계단식의 생산성 하락도 고려할 수 있지만, 실제로 항만운영에 있어서 활동 가능한 인원의 근무 시간 연장, 휴휴 인력의 투입 등으로 장비를 완전히 운용하지 못하는 사태는 막는 것이 더 현실적이라는 판단에 의해 계단식 하락이 아닌 운용 인력에 비례하여 하락하는 상황을 가정하였다. 게이트의 경우는 보안과 관련되어 있어 좀 더 엄격한 기준의 적용이 필요하다. 보안 인력은 전문성을 가지며 인력의 대체가 상대적으로 어렵기 때문에 활동 가능한 보안 인력이 줄어들어 게이트 당 필요한 인력 수를 충족하지 못하면 게이트의 운용이 불가능한 것으로 가정하였다.

위와 같은 가정을 적용하여 감염병에 대한 항만의 레질리언스를 측정하기 위한 시뮬레이션을 시행하였다. 선석의 개수, 선박의 도착 빈도, 전체 게이트의 수, 크레인 및 이송장비 대수 등과 같이 시뮬레이션에 필요한 상수들의 값은 부산항 신항의 A 컨테이너 터미널 내부 자료 및 해운항만물류정보시스템(Port-Mis)의 자료를 활용하였으나, 장비 당 필요 운용 인력 수, 트럭의 도착 빈도와 같이 활용할 만한 데이터를 확보할 수 없었던 일부 변수들은 레질리언스 측정 및 시나리오별 비교라는 연구 목적에 맞도록 조정된 값을 적용하였다. 시뮬레이션은 장비 생산성이 시간당으로 표현되기 때문에 시간을 시행 단위로 하여 1,368시간(총 57일)을 시행하였다.

본 연구는 감염병이 항만 운영에 주는 영향과 레질리언스를 측정하는 데 목적을 두고 있기 때문에 감염병의 확산에 가장 큰 영향을 주는 변수인 인당 항만 내 접촉 횟수를 변경하면서, 총 다섯 가지의 시나리오에 대한 시뮬레이션을 시행하였다. 첫 번째 시나리오(기본, original)는 감염병이 발생하지 않은 정상시의 상황을 나타낸 것이며, 두 번째 시나리오(접촉 9, contact9)는 선원과 항만 인력, 트럭 운전수와 항만 인력, 항만 인력 간의 시간당 접촉 횟수를 각각 3회로 가정하여 총 아홉 번의 접촉을 가정하였다. 세 번째 시나리오(접촉 3, contact3)는 두 번째 보다 접촉 횟수를 줄여 각각 한 번씩, 총 세 번의 접촉이 있는 상황을 가정하였다. 여기에 더해 격리 정책의 효과를 알아보기 위해 시간이 흐름에 따라 접촉 횟수를 줄여나가는 정책 시나리오를 두 가지 설정하였다. 첫 번째 정책 시나리오(정책1, policy)와 두 번째 정책 시나리오(정책2, policy-late)는 기본적으로 접촉 횟수를 줄여 나간다는 점은 동일하지만 두 번째 시나리오의 경우 첫 번째보다 좀 더 늦은 시기에 격리를 시행한다는 점에서 차이를 보인다. Table 3은 총 다섯 가지 시나리오의 내용을 정리한 것이다.

Table 3 Scenarios of simulation

Scenario	Details
original	Normal conditions without epidemic
contact3	with epidemic(3 contact per person)
contact9	with epidemic(9 contact per person)
policy	with epidemic, quarantine policy
policy (late)	with epidemic, quarantine is in place later than policy scenario

Fig. 5는 각 시나리오의 인당 접촉 횟수 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 감염병의 전염률은 0.03(3%)을 적용하였다. 코로나19의 접촉자 전염율에 대한 정확한 수치는 아직 연구된 것이 없으나, Hu et al.(2021)은 중국 고속철 내의 밀접접촉자 감염 결과를 조사한 결과 약 3.5%의 전염율을 보였다는 결과를 제시하였다. 우리는 마스크 착용 등의 감염율을 낮출 수 있는 변수들을 고려하여 전염율을 3%로 가정하였다.

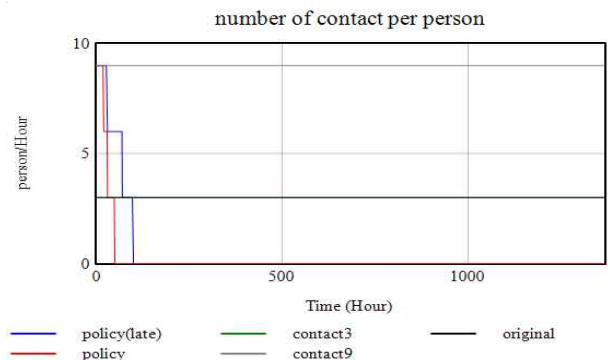


Fig. 5 Number of contact per person

선석 크레인의 생산성 시뮬레이션 결과는 Fig. 6과 같이 나타난다. 가장 위쪽에 일자로 그려진 그래프가 기본 시나리오의 생산성이다. 변동 요인이 존재하지 않기 때문에 시간에 따른 변화가 없이 일정한 생산성을 보이고 있다. 이 그래프와 다른 시나리오 생산성의 결과를 나타내는 그래프와의 면적 차이가 항만의 레질리언스를 의미하며, 기본 시나리오 생산성과의 면적 차이가 작을수록 레질리언스가 큰 것이다. 먼저 접촉3과 접촉9 시나리오의 경우를 살펴보면 병이 확산됨에 따라 생산성이 크게 감소했다가 서서히 회복하는 모습을 보이고 있다. 접촉3 시나리오에서 인당 접촉 횟수가 적기 때문에 감염병의 피크 타임이 더 늦은 것으로 나타나지만 그만큼 회복 시간도 느려져 전체적인 레질리언스에는 큰 차이가 없다. 이는 단순히 인당 접촉 횟수를 줄이는 방법은 감염병 확산에 대한 대책이 되기 어려우며, 격리 조치 같은 더 강한 정책이 필요함을 의미한다. 이는 격리를 통해 접촉을 차단한 정책1 시나리오의 경우에서 가장 좋은 레질리언스 수치가 나타나는 것에서도 알 수 있다. 즉, 격리 조치를 활용하여 감염병에 대한 항만의 레

질리언스 향상이 가능한 것이다. 다만 정책2 시나리오에서는 접촉9 시나리오와 거의 유사한 형태의 그래프가 나타나는데, 이는 감염병이 일정 수준 이상 확산된 후에는 격리 조치가 더 이상 효과를 낼 수 없다는 의미이며, 감염병 발생 초기에 대응하는 것이 가장 중요함을 보여주는 결과이다. 직종 간의 감염병 발생 비율을 동일한 것으로 가정했기 때문에 트랜스퍼 크레인과 이송장비 생산성 변화도 선석 크레인의 경우와 거의 유사하게 나타난다.

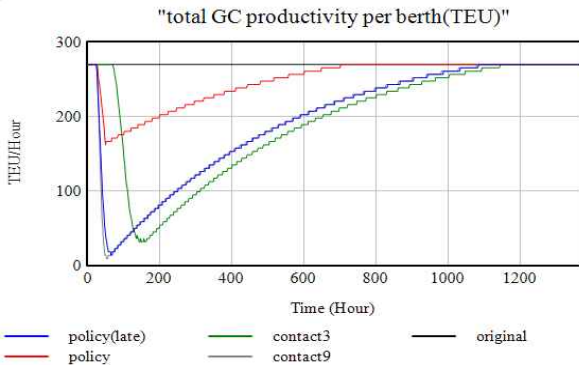


Fig. 6 Total GC productivity per berth

Table 4는 시나리오별로 기본 시나리오 대비 선석 크레인 생산성의 레질리언스를 비교하여 나타낸 것이다. 정책1 시나리오는 기본 대비 8.1%가 하락하여 91.9%로 나타났으며, 접촉9 시나리오와 정책2 시나리오는 27.1%가 하락하여 72.9%로 나타났다. 이는 접촉 차단 및 격리 정책을 통해 가장 좋지 않은 결과와 비교하여 19% 정도의 레질리언스 향상을 기대할 수 있음을 보여준다.

Table 4 Comparison of resilience of GC productivity

Scenario	Resilience Comparison
original	100%
contact3	▽16.8%
contact9	▽27.1%
policy	▽8.1%
policy(late)	▽27.1%

다음으로 누적 처리 물동량에 관한 시뮬레이션을 시행하였다. 선석과 이송장비를 거친 최종 물동량은 Fig. 7과 같다. 거의 사선형을 보이는 검은색 선이 감염병이 없는 평시 누적 처리 물동량이며 분석의 기준이 된다. 접촉9와 정책2 시나리오에서 가장 먼저 처리 물동량의 하락이 나타나고 있으며 두 시나리오 간에는 거의 차이가 나타나지 않는다. 접촉3 시나리오의 경우 처리 물동량이 하락하는 시기가 접촉9 및 정책2 시나리오 보다 조금 늦게 나타나 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 정책1 시나리오의 경우 기본 시나리오가 거의 유사한 형태로 나타나 유의미한 성과를 보여주고 있다. 이는 앞에서 생산성에 대해 분석한 것과 일치하는 결과이다.

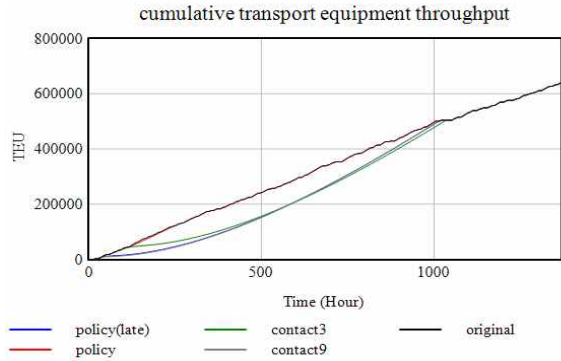


Fig. 7 Cumulative transport equipment throughput

Table 5는 시나리오별로 기본 시나리오와 대비하여 처리 물동량의 레질리언스를 비교하여 분석한 것이다. 정책1의 경우 기본 대비 99.9%로 나타나 단 0.1%만이 감소한 결과를 보였으며, 접촉9의 경우 기본 대비 15.3%가 감소한 86.7%로 분석되었다. 이는 접촉 차단 및 격리 정책을 활용하여 선석 물동량 처리 측면에서 가장 좋지 않은 결과와 비교할 때 14.2% 정도의 레질리언스 향상을 보일 수 있음을 나타내는 결과이다.

Table 5 Comparison of resilience of TE productivity

Scenario	Resilience Comparison
original	100%
contact3	▽12.2%
contact9	▽15.3%
policy	▽0.1%
policy(late)	▽13.0%

Fig. 8은 게이트의 생산성 감소로 인해 대기하는 트럭 수의 변화를 보여준다. 평소에는 게이트에서 대기하는 트럭이 발생하지 않지만, 다른 시나리오에서는 대기하는 트럭이 발생하며, 시나리오에서 가장 많은 대기 트럭이 발생한다. 접촉3 시나리오에서는 대기하는 트럭이 접촉9와 정책2 보다 좀 더 늦게 나타나기 시작하여 피크도 두 시나리오보다 더 낮게 나타난다. 반면 정책1 시나리오에서는 평상시와 동일하게 게이트에서 대기하는 트럭이 발생하지 않는다.

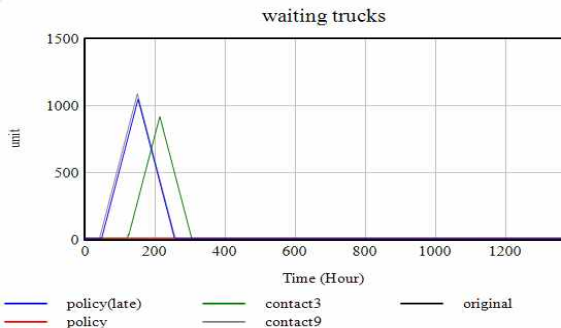


Fig. 8 Waiting trucks

Fig. 9는 야드에서 트럭의 누적 처리 물동량을 보여준다. 트랜스퍼 크레인의 생산성은 선석의 경우와 거의 유사하게 하락하였다가 회복하는 형태로 나타남에도 불구하고, 트럭의 누적 처리 물동량은 선석 물동량에 비해 덜 감소하며, 보다 더 빠르게 회복하는 형태의 그래프를 보여주고 있다. 이는 시뮬레이션에서 트럭 물동량 처리 능력의 여분성(redundancy)이 선석 물동량 처리 능력보다 더 큰 것으로 가정했기 때문이다. 여분성은 레질리언스의 중요한 구성 요인 중 하나로 많은 문헌에서 연구된 것이다(Hohenstein et al., 2015). 평상 시 항만에 출입하는 트럭의 물동량을 처리할 수 있을 정도의 능력보다 더 큰 능력(여분)을 평상시에 확보하여 빠르게 회복이 가능한 것이다. 시뮬레이션에서 평상시에 트럭은 1시간에 10대가 출입하는 것으로, 게이트는 평상시에 시간당 80대를 처리할 수 있도록 가정하였는데, 게이트 처리 능력의 감소로 트럭이 게이트 앞에서 대기하다가 정상화 후 한꺼번에 많이 출입하게 되어도 해당 물동량을 거의 정상적으로 처리가 가능한 능력을 확보한 것이다. 이는 여분성 확보를 통해 항만의 레질리언스를 강화함에 따라 감염병이라는 위기가 발생했을 경우에도 물동량 측면에서 비교적 정상적인 운영이 가능함을 보여주는 결과이다. 본 연구에서 설정한 트럭 물동량 처리의 경우는 실제적인 트럭 입항에 대한 데이터를 확보하지 못해 여분성 강화를 통한 레질리언스 확보의 효과를 보여주기 위해 설정한 사례이지만 실제 데이터를 확보하여 연구에 활용한다면 피해를 최소화하기 위한 여분성의 기준 등에 대한 연구가 가능할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 SD 모형을 통해 항만 컨테이너 터미널의 운영 시스템과 감염병 확산에 대한 흐름도를 구축하고, 감염병에 대한 항만의 레질리언스 측정에 활용할 수 있는 모형을 제시하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 분석하여 실제적으로 레질리언스 측정에 모형의 적용이 가능함을 보였다. 분석 결과, 감염병이 발생한 초기에 빠른 격리 정책 등을 사용하여 인력 간 접촉을 방지하는 것이 가장 효과적인 대응 정책임을 보였으며, 단순하게 인력 간 접촉 횟수를 감소시키는 방안이나, 감염병 발생 초기가 아닌 뒤늦은 격리 정책은 항만의 레질리언스 향상에 큰 도움이 되지 않음을 알 수 있었다. 또한 물동량 처리 능력에 있어서 평상시에 여분성을 확보하여 감염병이 발생한 상황에서도 어느 정도 정상적인 운영이 가능함을 보였다.

처음 항만 내의 감염자 수를 1명, 전염률은 3%로 낮게 설정하고 시뮬레이션을 시행하였음에도 불구하고, 일정 시간이 지난 후에는 감염자가 폭발적으로 증가하여 그에 따라 항만의 생산성이 급격히 하락하는 결과가 나타났다. 이는 최대한 빠른 감염자 발견과 격리라는 단순한 방법이 항만 내의 감염병 대처에 가장 중요한 요인임을 보여주는 것이다. 즉, 감염병에 대한 항만의 레질리언스 향상을 위해서는 항만 내에 선원이나 트럭 운전자 등에서 외부 감염자가 유입되는 것을 방지하고, 항만 운영 인력 간의 접촉을 최소화하는 등의 대책 마련이 필요하며, 이를 위해서는 자체적인 방역 체계와 작업 인력의 동선 관리 방안, 직종 간 휴게 공간 분리 운영 등의 감염병 확산 방지 계획을 미리 수립하는 것이 필요하다. 또한 이러한 계획을 통해 확산을 최대한 억제하여도 많은 인력이 오가는 항만의 특성 상 완전한 차단은 불가능할 수 있기 때문에 실제로 항만 내에 감염자가 발생할 경우에 대응한 매뉴얼 등을 사전에 수립해야 한다. 서론에서 언급한 감천항의 경우에서도 러시아 선원 중에 코로나19 확진자가 있는 사실을 입항 시에 미리 알지 못해 항만 폐쇄 조치 후에야 운영을 정상화하는 것이 가능했으며, 감염병 대응 계획이 부재하여 대응 조치가 적시에 이루어지지 못한 것도 피해를 확산시키는 요인이 되었다.

우리나라 항만의 경우 태풍과 같은 전통적인 위협에 대한 대응 체계는 어느 정도 갖추고 있다. 하지만 감천항 코로나19 감염 사례와 같은 감염병이나, 사이버 테러와 같이 새로운 위협 요인에 대한 대응 체계는 아직 미미한 수준에 머무르고 있으며, 위기 발생 후의 복구 계획 또한 체계화가 부족한 상태이다. 이를 보완하기 위해서는 항만의 위협 요인을 세분화하고 각각의 요인과 관련한 항만운영 시스템의 구성 요인에 대해 분석한 뒤 그에 적합한 대비 계획을 수립하는 것이 필요하다. 또한 대비 계획의 효과를 평가하여 레질리언스를 강화하는 작업이 필요하다. 본 연구는 아직 많은 연구가 이루어지지 않은 항만에 있어서의 감염병 사례에 대해 모형을 구축하여 레질리언스 측정 연구를 진행하였으며, 향후 다양한

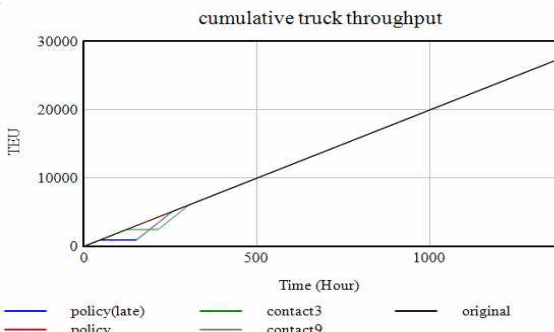


Fig. 9 Cumulative truck throughput

시뮬레이션 결과를 종합적으로 살펴보면 감염병이라는 항만 위기 요인에 대하여 장비의 생산성과 물동량 두 가지 측면에서 항만의 레질리언스를 측정 가능함을 알 수 있다. 또한 감염병이 발생할 경우 단순히 인력 간 접촉 횟수를 줄이는 것만으로는 선석이나 야드 생산성의 레질리언스를 향상시키는 것은 어려우며, 최대한 빠른 시기에 적절한 격리 정책을 통해 인력 간 접촉을 방지하는 것이 감염병에 대한 항만의 레질리언스를 확보하는 방법임을 알 수 있다. 물동량 측면에서는 처리 능력의 여분성 확보가 항만의 레질리언스 향상을 위한 방법임을 보여주었다.

위협 요인에 대한 레질리언스 측정 모형 구축의 기반이 될 수 있다는 점에서 의의를 가진다.

본 연구에서 구축한 SD 모형은 충분히 의의가 있지만, 실제적인 활용 측면에서 후속 연구를 통한 모형 고도화가 필요하다. 구체적인 미래 연구 방향은 다음과 같다. 먼저 감염병으로 인한 생산성 하락에 관한 가정에 대해 다양한 관점의 검토가 필요하다. 본 연구에서는 감염병으로 인한 활동 가능 인력의 감소에 비례하여 장비 생산성이 하락하는 것으로 가정하였는데, 비례가 아닌 다른 형태의 생산성 감소에 관한 분석이 필요하다. 또한 본 연구에서 수집하지 못한 데이터를 추가로 확보하여 이를 활용한 사례 연구를 시행하는 것이 연구 발전에 도움이 될 것이다. 실제 데이터를 활용하여 교정(calibration) 과정을 수행한다면 좀 더 현실적인 측정 모형의 구축이 가능할 것이다. 다음으로 본 연구의 대상인 컨테이너 터미널보다 일반화물 터미널에서 인력 간 접촉이 더 빈번하게 일어나기 때문에 일반화물 터미널의 감염병에 대한 레질리언스 측정 모형을 구축하는 것 또한 미래 연구 과제가 될 것이다. 마지막으로 본 연구에서는 장비 운용 인력, 보안 인력을 중심으로 연구를 진행하였는데 일반 노무 인력의 감염 위험성이 더 높을 가능성이 있으므로, 해당 인원의 감염에 따른 생산성 저하를 심도 있게 연구할 필요가 있다. 정책적인 관점에서는 향후 실제 항만을 대상으로 항만 내의 인력 간 접촉을 최소화하는 작업 동선 설계, 항만 내 방역 체계 구축 등 구체적인 레질리언스 향상 방안에 관한 연구가 필요할 것이다.

후 기

본 논문은 한국해양수산개발원 기본과제 “항만의 회복탄력성 측정 모형 구축에 관한 연구”와 해양수산부 재원으로 지원을 받아 수행한 “항만시설보안료 현실화 방안 연구용역”의 일부분을 학술지 목적에 맞도록 수정 및 보완하여 작성하였다.

References

- [1] Buor, J. K.(2015), “Applying System Dynamics Modelling To Building Resilient Logistics: A Case of the Humber Ports Complex”, University of Hull, Business School, PhD Dissertation.
- [2] Caballini, C., Sacone, S. and Siri, S.(2012), “The Port as a System of Systems: A System Dynamics Simulation Approach”, Proceedings - 2012 7th International Conference on System of Systems Engineering, SoSE 2012, pp. 191-196.
- [3] Chen, H., Cullinane, K. and Liu, N.(2017), “Developing a Model for Measuring the Resilience of a Port-Hinterland Container Transportation Network”, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, Vol. 97, pp. 282-301.
- [4] Cho, H. and Park, H.(2017), “Constructing Resilience Model of Port Infrastructure Based on System Dynamics”, International Journal of Safety and Security Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 352-360.
- [5] Choi, H. R., Park, B. J. and Yoo, D. H.(2006), “System Dynamics Modeling for Improving the Competitiveness of a Container Terminal”, Korean System Dynamics Review, Vol. 7, No. 2, pp. 121-132.
- [6] Choi, K. W., Kwak, S. I. and Kim, S. W.(2006), “A Dynamic Analysis of Technological Innovation Using System Dynamics”, Korean Management Science Review, Vol. 23, No. 1, pp. 87-113.
- [7] Chowdhury, M. M. H. and Quaddus, M.(2017), “Supply Chain Resilience: Conceptualization and Scale Development Using Dynamic Capability Theory”, International Journal of Production Economics, Vol. 188, pp. 185-204.
- [8] Hohenstein, N. O., Feise, E., Hartmann, E. and Giunipero, L.(2015), “Research on the Phenomenon of Supply Chain Resilience: A Systematic Review and Paths for Further Investigation”, International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, Vol. 45, pp. 90-117.
- [9] Hu, M., Lin, H., Wang, J., Xu, C., Tatem, A., Meng, B., Zhang, X., Liu, Y., Wang, P., Wu, G., Xie, H. and Lai, S.(2021), “Risk of Coronavirus Disease 2019 Transmission in Train Passengers: an Epidemiological and Modeling Study”, Clinical Infectious Diseases, Vol. 72, No. 4, pp. 604-610.
- [10] Jung, H. J. and Yeo, G. T.(2011), “An Analysis on the Container Terminal Operation by Considering the Key Factors for Fluctuating Container Traffic Volume”, Journal of Korea Port Economic Association, Vol. 27, No. 1, pp. 95-109.
- [11] Kim, S. K. and Kim, C. H.(2020), “Effect of the Port Security Cost-Sharing Contract on the Performance of Port Operators and Shipping Companies”, Journal of the Korean Production and Operations Management Society, Vol. 31, No. 2, pp. 229-248.
- [12] Lee, M. K. and Kim, E. J.(2015), “The Economic Impacts of a Port Shutdown -Application of Demand Driven Models-”, The Journal of shipping and logistics, Vol. 31, No. 4, pp. 839-861.
- [13] Omer, M., Mostashari, A., Nilchiani, R. and Mansouri, M.(2012), “A Framework for Assessing Resiliency of Maritime Transportation Systems”, Maritime Policy

and Management, Vol. 39, No. 7, pp. 685-703.

- [14] Pant, R., Barker, K., Ramirez-Marquez, J. E. and Rocco, C. M.(2014), “Stochastic Measures of Resilience and Their Application to Container Terminals”, Computers and Industrial Engineering, Vol. 70, No. 1, pp. 183-194.
- [15] Park, C. S.(2020), “Effectiveness of Resilience Strategies for the Supply Network”, Journal of the Korean Production and Operations Management Society, Vol. 31, No. 3, pp. 209-227.
- [16] Ridwan, A. and Noche, B.(2018), “Model of the Port Performance Metrics in Ports by Integration Six Sigma and System Dynamics”, International Journal of Quality and Reliability Management, Vol. 35, No. 1, pp. 82-108.
- [17] Shin, N. and Park, S.(2019), “Evidence-Based Resilience Management for Supply Chain Sustainability: an Interpretive Structural Modelling Approach”, Sustainability, Vol. 11, No. 2, p. 484.
- [18] Touzinsky, K. F., Scully, B. M., Mitchell, K. N. and Kress, M. M.(2018), “Using Empirical Data to Quantify Port Resilience: Hurricane Matthew and the Southeastern Seaboard”, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 144, No. 4, 05018003.

Received 24 May 2021

Revised 09 June 2021

Accepted 17 June 2021