

장강 내수로 항만의 물류 수요 예측에 관한 연구*

A Study on Predicting the Logistics Demand of Inland Ports on the Yangtze River

오 진** Zhen Wu

김 현 중*** Hyun-Chung Kim

| I 목 차 I | |
|-------------------------|------------|
| I. 서 론 | V. 논의 및 결론 |
| II. 항만물류수요 예측 기법에 관한 고찰 | 참고문헌 |
| III. 연구 방법 | Abstract |
| IV. 연구 결과 | |

국문초록

본 연구는 장강 내수로 항만의 물류 수요에 영향을 미치는 요인을 분석하고, 이를 바탕으로 미래의 항만 물류 수요를 예측하는 것을 목적으로 한다. 장강 상류의 충칭항, 이빈항, 중류의 징저우항, 우후항, 하류의 난징항, 쑤저우항 등 총 6개 항만을 대상으로, 시스템 다이내믹스 기법을 활용한 물류 수요 예측을 수행하였다. 모든 항만의 물류 수요는 2026년까지 중단기 예측에서 증가세를 보였다. 충칭항의 물류 수요는 배후지 경제 규모의 영향을 주로 받았으며, 이빈항은 항만의 자동화 수준에 크게 의존하는 것으로 파악되었다. 상류 및 중류 항만의 경우, 배후지의 에너지 소비량 증가와 대기 오염 상황이 심각화될수록 물류 수요가 증가하였다. 중류 항만의 물류 수요는 배후지 인프라의 영향을 주로 받았으며, 하류 항만은 도시 건설 면적의 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 민감도 분석 결과, 대도시에 의존하는 항만의 물류 수요는 영향 요인들의 변동에 민감하게 반응하는 경향을 보였다. 따라서 충칭항을 장강 상류의 핵심 항만으로 정책적 지원을 강화하고, 주변 항만들이 충칭항의 보조 역할을 수행하도록 하는 전략을 마련해야 한다. 상류 항만은 충칭항의 보조 역할을 수행하는 동시에, 중하류 항만과의 연결성을 강화하고 입항 산업의 발전을 도모하는 방안도 고려해야 할 것이다. 장강 내수로 항만의 개발 전략은 한국의 항만 및 이해관계자들에게 직항로의 개설과 교통 네트워크의 확장을 시사한다. 배후지 네트워크를 확장하고 물류허브와 연계된 효율적인 교통 체계의 구축을 제시할 수 있다. 협력을 통해 두 지역 모두에서 물류 효율성이 향상될 수 있으며, 이는 각 항만의 국제적인 위치와 경쟁력을 강화하는 데 기여할 것이다.

<주제어> 장강, 내수로 항만, 항만 물류 수요, 시스템 다이내믹스

* 본 연구는 교육부와 한국연구재단의 BK21 사업의 지원을 받아 수행되었습니다. (4299990214398)

** 호남대학교 경영학부 조교수(주저자), E-mail: 2022096@honam.ac.kr

*** 경북대학교 무역학과 박사후연구원(교신저자), E-mail: anter195@knu.ac.kr

I. 서론

중국의 급격한 경제 발전과 국제교역 능력의 상승이 수반하면서, 동남부 지역의 주요 항만 간의 경쟁은 물동량 획득을 위해 점점 더 치열해지고 있다. 이러한 상황 속에서 중국의 중앙 및 지방 정부는 수출입 물류를 위한 해상 및 육상 운송 수단의 효율적인 연결을 강화하고 국제물류의 활성화를 촉진하기 위한 목표로 내수로 항만의 개발을 적극적으로 추진하고 있다. 내수로 항만은 강, 호수, 운하 등의 내륙 수역을 따라 구축되며, 중국 중서부 내륙 지역은 동남부 연해지역과 달리 수출입 물류 프로세스를 수행할 수 있는 근해 항만이 없기 때문에 내수로 항만을 통해 항만의 기능을 수행한다. 장강 일대의 내수로 항만은 근해 항만과의 연결이 구축되어 있으며, 내륙 교통 허브로서의 인프라를 제공하고, 국제무역 및 상업 유통과 연결되어 있다. 이는 내륙 지역의 무역, 상업, 산업, 금융 등의 산업 기반을 강화하는 데 중요한 역할을 하며, 경제 활동의 집중과 인구 조밀도 증가를 촉진하고, 근해 항만의 물동량 증가에 기여할 수 있다.

일대일로 전략을 구현하는 중국에서는 장강 내수로 항만이 중요한 실행 수단으로 작용하고 있다. 일대일로 정책에 의한 장강 경제 지역의 급격한 발전은 장강 수역의 각 내수로 항만에 발전의 기회를 제공하고 있다. 현재 중국의 수출입 무역의 80% 이상이 해상 운송을 통해 이루어지고 있으며, 내수로 항만은 내륙 운송의 핵심 노드로서, 내륙 화물이 연안 항만으로 원활하게 운송될 수 있도록 보장하며, 상하이항 등 중국 근해 항만의 발전을 촉진하는 데 중요한 역할을 수행한다. 상하이시의 산업구조가 점차 고도화됨에 따라 제조업체들이 외곽으로 공장을 이전하는 경향이 증가하고 있으며 이는 상하이항의 내륙지역, 특히 제조업에 집중하는 장강 지역의 물동량에 대한 의존도를 높이고 있다. 장강 내수로 항만들은 상하이항에 충분한 환적 화물을 제공할 수 있으며, 거대한 내륙 배후지에 의해 상하이항에 대량의 물동량을 공급하고 있다. 이는 상하이항이 중국 내수 시장에 대해 지니는 전략적 중요성을 더욱 높여주고 있다.

장강 연안의 각 도시 간의 연계성이 강화되면서 충칭항, 우한항, 난징항을 중심으로 하는 장강 상류, 중류, 하류 지역의 운송 클러스터가 형성되고 있다. 이러한 클러스터는 장강 지역의 3대 주요 도시를 점차 통합하는 형태로 발전하고 있다. 현재 장강 지역의 주요 내수로 항만에서는 통관 일체화가 진행되고 있으며, 상하이항의 수출 화물은 충칭항에서 모든 통관 업무를 사전에 완료할 수 있다. 이와 별도로, 장강 경제벨트라는 이름으로 장강 유역을 경제적으로 통합하려는 노력이 진행되고 있으며, 이 지역은 풍부한 자원, 밀집된 도시 집단, 견고한 산업 기반 등을 보유하고 있다. 중국의 경제 성장이 가속화되면서 국제 물류 수요가 급증함에 따라, 장강 내수로 항만의 물동량은 매년 큰 폭으로 증가하고 있다. 이러한 항만 물동량의 지속적 증가 배경에 대한 깊은 분석이 요구된다.

본 연구의 주요 목적은 장강 내수로 항만의 물류 수요에 영향을 끼치는 요인들을 도출하

고, 이를 바탕으로 항만 물류 수요를 예측하는 모형을 설정하는 것이다. 이를 통해, 장강 내수로 항만 배후지의 지역적 경제 특성과 항만 물류 수요 간의 상관성을 규명하고, 지역별 발전 전략 및 정책에 대한 새로운 통찰력을 제공하고자 한다. 이 목표를 달성하기 위해, 우선 선행 연구를 기반으로 장강 내수로 항만 물류 수요에 영향을 미치는 요인들을 선정하였다. 연구 대상으로 선정된 장강 내수로 항만은 상류의 충칭항과 이빈항, 중류의 징저우항과 우후항, 그리고 하류의 난징항과 쑤저우항 등 6개의 항만이다. 해당 항만들의 물류 수요에 영향을 미치는 요인을 도출하기 위해, 항만 자체의 측면, 배후지의 영향, 그리고 외부 요인 등 3가지 측면을 고려했다. 선정된 요인들을 바탕으로, 장강 내수로 항만 물류 수요 예측을 위한 시스템 다이내믹스(System Dynamics) 모형을 설정하고, 실증분석을 실시하였다. 분석을 위해 Vensim DSS를 사용하여 중단기 물류 수요 예측, 시나리오 분석, 그리고 민감도 분석을 수행하였으며, 필요한 데이터는 장강 내수로 항만 관련 기관 및 배후지 통계기관에서 수집하였다. 시간적 범위로는 2001년부터 2016년까지의 시계열 데이터를 활용하여, 2026년까지의 중기 예측을 진행했다. 정확한 분석을 위해선 2022년까지의 22개 장강 내수로 항만 데이터를 사용하는 것이 이상적이지만, 데이터 수집의 어려움으로 인해 2016년까지의 데이터를 바탕으로 예측을 진행했다. 장강 내수로는 광대한 지역을 아우르며, 이곳에는 다양한 항만이 존재한다. 그러나 각각의 항만 및 지역마다 데이터 수집과 보고 방식이 다르고, 데이터를 업데이트하는 데 상당한 시간이 소요된다. 또한 중국이 보안과 정보 공개에 대해 상대적으로 보수적인 정책을 취하고 있어, 필요한 데이터와 정보의 접근에 어려움이 있다.

본 연구를 통해, 항만 당국은 장강 내수로 항만 물류 수요에 영향을 미치는 요인들을 파악하고, 이를 통해 항만 물류의 발전 규모와 추세를 전체적으로 예측할 수 있게 될 것이다. 본 연구는 이러한 현상에 대한 철저한 분석을 통해, 장강 내수로 항만의 활용 및 개발에 대한 깊이 있는 이해를 제공하려고 한다. 중국 내수로 항만의 미래 전략적 중요성과 이들이 중국의 경제 성장 및 국제 물류 네트워크에 미치는 영향을 평가하는데 중요한 기여를 할 것이다. 또한 장강 내수로 항만의 개발 및 성장 전략은 한국의 항만 및 이해관계자들에게 여러 가지 중요한 시사점을 제공할 것이다. 이러한 시사점에 근거하여, 한국 항만의 발전을 위한 몇 가지 전략 및 정책적 제언을 제시하고자 한다.

II. 이론적 배경 및 선행연구

1. 물류 수요 예측 기법

교통 및 운송 분야에서 물류 수요 예측은 중요한 연구 분야로 인식되고 있다(De, 2005). 이 분야에서는 다양한 예측 기법이 사용되며, 일반적으로 정성적 기법, 정량적 기법, 시스템

예측 기법, 교통 수요 예측 4단계 기법 등 유형으로 분류할 수 있다.

1) 정성적 기법

정성적 기법은 경험적 판단 예측법으로 알려져 있다. 이 방법은 연구자 개인의 풍부한 경험이나 전문가의 지식을 기반으로, 과거 자료의 정리와 분석, 현실 관찰 및 운영 분석을 통해 미래 추이와 상태를 판단하는 방법이다. 일반적으로 사용되는 정성적 예측법에는 Delphi법, 전문가 의견법, 대조 추론법, 브레인스토밍법, 개인 판단법, 비례 추론법, 전문가 회의법, 관련 추론법 등이 있다.

2) 정량적 기법

정량적 기법은 과거 데이터의 수집과 정리를 기반으로 통계적 기법을 사용하여 데이터를 분석하는 방법이다. 이 방법은 과거 데이터의 특성에 적합한 수리적 모형을 구축하고, 수식을 사용하여 예측 대상과 영향 요인 간의 수리적 관계를 파악하며, 이에 따라 적합한 수리적 예측 모형을 개발한다. 정량적 분석 예측법은 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫째, 시계열 분석 예측법은 연속된 과거 수치 데이터를 사용하여 동적 의존 관계를 정확하게 반영하는 수리적 모형을 구축하여 목표하는 미래 상태와 추세를 예측한다. 둘째, 회귀분석 예측법은 예측 대상과 관련된 다른 사건 및 현상 사이의 상호 연관성을 분석하여 예측 대상의 미래 상태와 발전 추세를 예측하는 정량적 분석 방법이다. 셋째, 융합 예측법은 실제 예측 요구에 따라 예측 결과가 다른 경우가 많기 때문에, 다양한 예측 방법을 결합하여 예측 결과의 정확성을 보장하는 방법이다.

3) 교통 수요 예측 4단계 기법

교통 수요 예측 4단계 기법은 주민 외출 조사(person trip survey)를 기반으로 교통 수요를 예측하는 방법으로, 통행 발생(trip generation/attraction), 통행 분포(trip distribution), 교통수단 선택(mode split), 통행 배분(traffic assignment)의 네 가지 단계로 구성된다(노진호, 2016). 이 기법은 교통존(traffic zone)을 기반으로 교통 수요를 추정하며, 각 단계에 적용되는 기법들이 다양하게 개발되어 있다.

4단계 모형이 대도시권은 물론 지역 간 교통수요 추정에 가장 많이 활용되고 있는데, 이는 4단계 모형이 모든 경우에 적합한 모형이기 때문보다는 모형이 내포하고 있는 교통수요 추정 과정의 단계적 일관성이 비전문가라도 이해하기에 용이하기 때문이라고 판단된다. 교통 수요 4단계 기법은 컴퓨터 기술과 결합하여 다양한 분석 예측 소프트웨어가 나타난다. 대표적인 소프트웨어는 TransCAD(Transportation Planning software)이다. Yue(2018)은 TransCAD

을 이용하여 중국 화주시(霍州市)의 미래 도시권 평균 교통량을 예측하고, Guan(2017)은 TransCAD을 통해 중국 도시 여객운송량 예측모형을 설정하여 예측 수치와 실제 수치 간 차이를 분석했다. 교통 수요 예측 4단계 기법은 도시 도로 입지 등 분야도 많이 활용해왔다(Chen, 2016).

4) 시스템 예측 기법

시스템 예측기법은 추상적이고 객관적인 특성을 가지며, 서로 연계된 복수의 대상을 전체 시스템의 시각에서 종합적으로 분석하고, 동적인 환경에서 대상들 사이의 내적 관계와 시스템 외부와의 외적 관계를 연구하는 기법이다. 이 기법은 시스템의 존재와 동적 특성을 전체로 하며, 각 대상이 시스템 내부의 다른 대상뿐만 아니라 시스템 외부에도 영향을 미치는 동력에 의해 어떻게 변화하는지를 고려해야 한다. 주로 시스템 예측기법은 다음과 같이 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 인공신경망 예측법(Neural Network)은 생물학적 신경망을 모방한 예측기법이다. 생물학적 신경망은 뉴런(neuron) 집합과 이들을 연결하는 시냅스(synapse)로 이루어져 있다. 뉴런은 학습 기능을 가지며, 시냅스는 학습된 내용에 따라 변화하는 특성을 갖는다. 인공신경망은 이러한 구조를 모방하여 뉴런을 노드(node), 시냅스를 아크(arc), 시냅스의 연결 강도를 아크 가중치로 표현하고, 뉴런의 학습 기능을 수리적인 모델로 구성한다(박성배 외 6인, 2012). 인공신경망 예측기법은 데이터의 입출력 관계에 대해 보편적인 근사를 제공하는 수학적 증명에 의존하여, 비선형성이 자주 나타나는 단기 예측에 다른 기법보다 우수하다. 그러나 예측 결과만 제공하며 어떤 변수가 중요한지, 변수들이 상호 작용하여 결과가 나오는 방식에 대한 설명력이 부족하다(박성배 외 6인, 2012). 인공신경망 분석기법은 복잡한 인과 관계를 분석하는데 탁월하지만, 상당한 양의 데이터가 필요하며 예측 결과의 해석이 어려운 단점이 있다. 둘째, 시스템 다이내믹스 예측법(System Dynamics)은 1958년에 미국 매사추세츠 공과대학의 Forrester 교수에 의해 처음으로 개발된 예측기법이다. 시스템 다이내믹스는 기업 관리, 도시 경제 발전, 기업 경영, 지역 경제, 에너지 계획 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 시스템 다이내믹스의 연구 대상은 시스템 자체이며, 이를 이해하기 위해서는 시스템이 무엇인지 명확히 이해해야 한다. 시스템은 추상적이고 객관적이며 상호 연결된 대상으로 이루어진 운영 가능한 집합을 의미한다(Sun, 2016). 시스템 다이내믹스는 이론과 모델링 두 가지 부분으로 구성되며 이론은 기초적인 개념을 제공하며, 모델링은 해당 이론을 적용하고 구체화하는 과정이다. 시스템 다이내믹스 모델은 주로 인과 관계 모델과 유량 모델을 포함하며, 인과 관계 모델은 시스템의 중요한 요인과 내재적인 인과 관계를 파악하고, 유량 모델은 인과 관계 모델을 기반으로 동적인 변화 요소를 모델에 반영하여 더 완벽한 시스템을 구축한다(곽상만, 2016).

2. 항만물류수요 예측에 관한 선행연구

항만물류수요 예측에 대한 선행 연구는 물류 수요 분석을 기반으로 하며, 과거와 현재의 물류 수요 상황 및 수요 변화에 영향을 미치는 요인들 간의 관계에 기반한 과학적인 기법이다. 이 연구는 주로 예측 지표와 예측 방법 두 가지로 나눌 수 있다. 예측 지표와 관련한 연구로는 Cullinan(1992)이 Box-Jenkins 모형을 활용하여 시스템 다이내믹스 모형을 구축하고 단기적인 화물 운송량을 예측하는 방법을 제시했다. Donald와 David(1999)은 시계열 데이터 분석, 정성 분석, 인과관계 분석 세 가지 기법을 정리하여 물류 수요 예측에 적용함으로써 정확한 예측을 수행할 수 있음을 보였다. Guo(2001)는 거시경제 예측과 교통 수요 예측에 관한 방법을 활용하여 지역 물류 수요 분석 모델을 개발했다. Liu(2001)은 수로 물류 수요 예측을 위해 신경 네트워크 예측모델을 구축하고 계량경제학 모델과 시계열 모델의 예측 결과를 비교하였다. Notteboom(2005)은 항만물류시스템의 구축을 동태적으로 분석하여 항만물류 수요와 배후지 경제 발전의 관계를 분석했다. Li(2006)는 라오닝성 항만물류의 현황을 분석하고 계량경제학 모형을 활용하여 항만 물동량을 예측했다. Choi(2011)는 SARIMA와 SW를 결합한 방법을 사용하여 전통적인 시계열 분석에 기반한 판매 데이터의 예측 정밀도를 최적화했다. Guo(2011)는 AHP 모형을 활용하여 항만 응급물류시스템에 대한 성과평가를 수행하고 개선 조치를 제시했다. Yavuz & Everette(2012)는 글로벌 연료 첨가제와 윤활제 수요를 예측하고 공급체인 모형을 구축하여 총 원가 절감에 관한 제안을 수행했다. Sun(2013)은 ACO-LSSVM 모델을 제시하여 물류 수요 예측의 정확도를 향상시켰다. Avinash(2013)는 지수평활 기법, 가중 이동평균법, 이동평균법, 그레이 예측방법을 비교하여 공급체인 관리에서 예측에 대한 적용 가능성을 평가했다. Laii(2013)은 MDL 방법을 사용하여 최적의 인공 신경 네트워크 예측 모델을 제시하고 모델의 정확도를 검증했다. Jaipuria(2014)는 인공신경망과 이산 소파 변화법(DWT)을 결합하여 지역 물류 수요 예측을 분석하였다. Agostino(2014)는 0-D 매트릭스를 사용하여 모형을 제시하고 물류 수요에 대한 영향을 시뮬레이션하여 예측 효과를 검증했다. Xiao(2014)는 항공 운송 수요 예측에 대한 혼합 방법을 제시하였으며 이를 통해 높은 예측 정확도를 유지할 수 있음을 보였다.

현재까지 국내에서는 시스템 다이내믹스를 활용해 중국 내수로 항만의 물동량을 예측하는 연구는 이루어지지 않았다. 중국 정부가 내수로 항만 운영에 관한 경제, 정책, 환경 등의 다양한 차원에서의 자료를 제한적으로만 공개하고 있어, 이런 제한 사항이 한국 학계나 산업계의 직접적인 연구 진행을 어렵게 만들 수 있다. 중국 장강 내수로 항만은 다양한 경제적, 환경적, 정치적 영향을 받는 복잡한 시스템이다. 이로 인해 물류 수요에 영향을 미치는 다양한 변수와 상호 연결된 요소들이 많아 데이터 수집과 인과관계의 파악을 어렵게 만들 수 있다. 이러한 이유로 시스템 다이내믹스를 활용한다면 인과관계 그래프를 사용하여 내수로 항만 물동량에 영향을 미치는 요소들 간의 관계를 구체적으로 나타낼 수 있으며, 이를 통해 내수로 항만이 직면한 복잡한 지리적 및 경제적 환경을 더 잘 반영할 수 있다.

Ⅲ. 장강 내수로 향만 물류수요 예측모형의 구축

1. 시스템 다이내믹스의 분석 절차

시스템 다이내믹스 모델은 인과지도 (Causal Loop Diagram)와 저장 유량도 (Stock Flow Diagram)로 구분되며, 다음과 같은 구체적인 모델링 절차를 따른다. 첫째, 시스템 다이내믹스 시뮬레이션을 진행하기 전에 연구 문제에 대한 전면적인 분석을 수행한다. 연구 문제의 내부 구조와 인과관계 등을 파악하여 연구의 전반적인 이해를 돕는다. 둘째, 변수의 선정을 수행한다. 변수는 모델의 중요한 구성 요소로, 주로 저장 변수, 유량 변수, 보조 변수로 분류된다. 모델링 초기에는 정치적, 경제적, 문화적인 요인을 고려하여 연구 문제와 관련성이 높은 저장 변수를 선정한 후, 유량 변수와 적절한 보조 변수를 추가한다. 셋째, 인과관계 모형을 구축한다. 저장 변수 간의 상호 관계를 분석하여 인과관계도를 구성하고, 해당 관계에 대응하는 정(부)의 관계를 추가하여 완전한 인과관계 모형을 형성한다. 이 단계에서 각 변수 간의 동적 관계와 시스템 전체와의 관계를 반영한다. 넷째, 저장 유량 모형을 구축한다. 인과관계 모형에 유량 변수와 보조 변수를 도입하고, 필요한 경우 지연 요소를 추가하여 동적인 저장 유량 모형을 완성한다. 다섯째, 모형을 검증한다. 실제 데이터를 모형에 도입하여 작동한 후, 얻은 결과를 실제 상황과 비교하여 모형의 검증을 수행한다. 동시에 모형을 활용하여 미래 상황을 예측하고 해당 예측에 기반한 의견과 전략을 제시할 수 있다.

2. 인과관계 모형의 구축

1) 영향요인의 선정

영향요인은 장강 내수로 향만물류수요 예측의 중요한 구성 부분이자 시스템 다이내믹스 모델링의 변수이다. 모든 경제적 현상은 다양한 요인들의 영향과 제약을 받는다. 장강 내수로 향만 물류 수요도 다양한 요인의 영향과 제약을 받고 있으며, 구체적으로는 다음과 같은 3가지 측면을 포함한다. 첫째, 장강 내수로 향만 자체의 측면으로 향만 규모효과와 교역 관습 등이 영향을 미칠 수 있다. 또한 향만 자체도 배후지 경제정책의 영향을 받는다. 둘째, 배후지의 영향으로 장강 내수로 향만 배후지의 경제 발전 수준은 물류 수요와 직접적인 관계를 가진다. 배후지의 GDP, 유형 자산투자액, 외국자본투자 등의 요인이 장강 내수로 향만 물류 수요와 관련이 있다. 셋째, 외부 영향요인으로 정부의 정책, 특히 환경정책, 향만용지 면적 등 외부 요인들이 장강 내수로 향만 물류 수요에 영향을 미칠 수 있다. 장강 내수로 향만물류수요 예측에 영향을 미치는 영향 요인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

〈표 3-1〉 장강 내수로 항만 물류수요 주요 영향요인

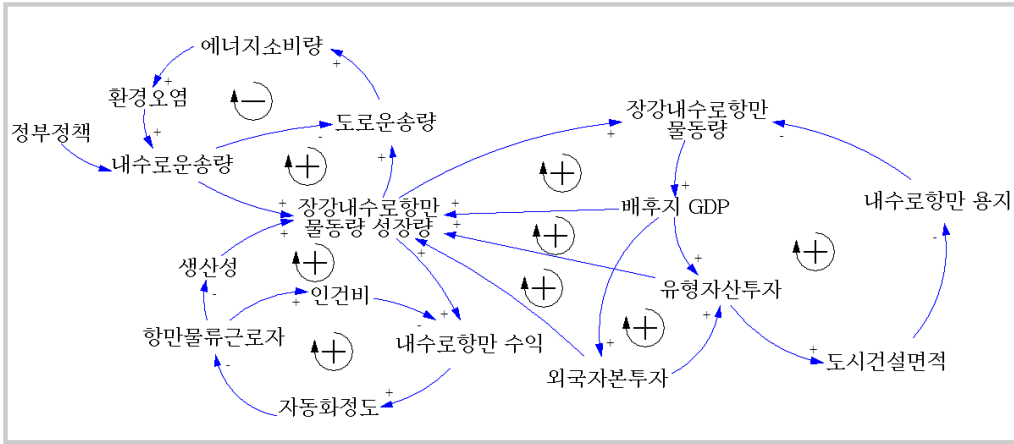
| 배후지 영향요인 | 항만 자체 영향요인 | 외부 영향요인 |
|------------|------------|-------------|
| 배후지 GDP | 자동화 정도 | 배후지 항만용지 면적 |
| 유형자산 투자액 | | 에너지소비량 |
| 외국자본 실제 이용 | | |

〈표 3-1〉에서 제시한 영향요인들은 최종적으로 장강 내수로 항만 물류 수요에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있다. 요인들을 실제 모델링 과정 중에 모형의 실제상황에 맞게 적절하게 조정함으로써 시뮬레이션의 정확도를 충족시킬 수 있다.

2) 물류 수요 예측 인과관계 모형의 구축

인과관계 모형은 연구 문제에 대한 충분한 사고를 거친 후 결정적인 영향요인을 정하여 화살표 및 극성을 통해 각 영향 요소가 연구 문제에 미치는 영향을 그리는 정성적인 논리 모형이다. 이 모형은 정확한 인과관계를 표현하는 것이 아니라 사람의 멘탈 모델을 나타내는 도구로 사용되며, 주요 변수 간의 인과관계를 기술하고 후속적인 모델링 작업에 근거를 제공할 수 있다. 인과관계 모형에서는 변수와 변수 간의 관계를 파악하여 루프의 성격을 규명해야 한다. 두 변수의 증감 방향이 같다면 (즉, 변수 1이 증가하면 변수 2도 증가하고, 변수 1이 감소하면 변수 2도 감소한다면) 양의 관계라고 할 수 있다. 반대로 증감 방향이 상호 반대로 나타난다면 음의 관계라고 할 수 있다. 변수 간의 양(음)의 관계를 통해 균형 루프와 강화 루프를 구별할 수 있다. 변수 간 관계에서 음의 개수가 짝수인 경우 강화 루프이고, 음의 개수가 홀수인 경우 균형 루프에 해당한다. 장강 내수로 항만물류수요 예측을 위해 관련 영향요인을 확정된 후 VENSIM DSS 소프트웨어를 사용하여 인과관계 모형을 구축할 수 있다. 장강 내수로 항만 물류 수요 예측 인과관계 모형은 〈그림 3-1〉과 같이 구성된다.

〈그림 3-1〉 장강 내수로 항만 물류수요 예측 인과관계모형



모형에 따르면 장강 내수로 항만물류수요는 주로 9개의 루프에 의해 현저하게 영향을 받는다. 운송방식 영향 루프, 환경 영향 루프, 자동화 영향 루프, 인건비 영향 루프, 배후지 GDP 영향 루프, 유형 자산투자 영향 루프, 외국자본투자 영향 루프, 도시건설면적 영향 루프 1, 도시건설면적 영향 루프 2가 포함된다.

장강 내수로 항만물류수요는 지량변수로서 모델에서 직접적으로 결정해야 하는 변수이다. 주요 변수 간의 인과관계는 〈표 3-2〉와 같이 나타낼 수 있다. 장강 내수로 항만물류수요의 변화는 항만물류수요 성장량과 도시건설면적이라는 저해 요소 2가지 측면에서 영향을 받는다. 항만물류수요 성장량은 장강 내수로 운송량, 배후지 GDP, 장강 내수로 항만 생산성, 외국자본투자, 유형 자산투자 5가지 측면에서 영향을 받는다. 먼저 항만물류수요 성장량은 배후지 GDP와 관련이 있다. 항만 생산성의 향상은 물류 수요를 촉진하는 역할을 하며, 배후지 외국자본투자 및 유형 자산투자의 증가는 항만물류수요의 성장에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 항만배후지 도로운송량의 증가는 배후지 대기오염을 증가시킬 수 있다. 이에 따라 배후지가 위치한 정부는 대기오염 완화를 위해 친환경적인 운송 정책과 시스템을 구축하여 항만물류수요의 성장에 긍정적인 영향을 미칠 수 있다. 마지막으로 배후지 도시 시가지 면적의 확장은 항만 건설 용지를 감소시키며 항만물류수요의 증가에 불리한 영향을 미친다.

인과 피드백에 관한 이론을 기반으로 장강 내수로 항만 물류 수요 예측에 기초한 인과관계 모형을 수립하였다. 중요한 영향요인과 그들 간의 상호관계를 찾아내었으며, 모형의 인과 피드백 관계를 검증하였다. 이를 통해 항만 물류 수요 예측을 위한 시뮬레이션 모델링 작업을 준비할 수 있었다.

〈표 3-2〉 인과관계도 주요 변수의 흐름 관계

| 변수 | 흐름 관계 |
|-------------|--|
| 장강내수로항만 물동량 | 정부정책 환경오염 장강내수로항만 물동량 — 배후지 GDP 물류종업인원 — 생산성 (배후지 GDP) — 외국인투자 (배후지 GDP) — 유형자산투자 (외국자본투자) |
| 배후지 GDP | 내수로항만 용지 장강내수로항만 물동량 성장량 |
| 에너지소비량 | 내수로문송량 장강내수로항만 물동량 성장량 |
| 항만물류근로자 | 내수로항만 수익 — 자동화정도 — 항만물류근로자 |
| 외국자본투자 | 장강내수로항만 물동량 — 배후지 GDP — 외국인투자 |
| 유형자산투자 | 장강내수로항만 물동량 — 배후지 GDP (배후지 GDP) — 외국인투자 |
| 도시건설면적 | 배후지 GDP 외국인투자 |

3. 저량 유량 모형의 구축

1) 물류 수요 예측 서브모형의 구축

장강 내수로 항만 물류 수요 서브모형은 경제 규모(배후지 GDP) 서브모형, 자동화 정도(항만물류근로자) 서브모형, 인프라(유형 자산투자) 서브모형, 외국인투자(외국자본투자) 서브모형, 환경요소(에너지소비량) 서브모형, 도시건설면적(도시건설면적) 서브모형으로 구성되며, 각 서브모형의 구체적인 설명은 다음과 같다.

장강 내수로 항만배후지 GDP의 성장은 배후지 내수로 항만물류수요를 증대시킬 수 있다. 경제 규모(배후지 GDP) 서브모형은 〈표 3-3〉과 같이 구축된다. 배후지의 경제 발전과 교통 운송 수요를 충분히 충족시키기 위해 장강 내수로 항만의 물동량도 그에 따라 증가하게 된

다. 해당 서브모형의 시스템 다이내믹스 방정식은 <표 3-3>과 같이 표현된다. 시스템 다이내믹스 모델링에서 변수 간의 연결은 무차원 수 접근 방식을 많이 활용한다. 특히 무차원 수와 곱의 법칙을 이용하면 시스템의 정상 상태를 쉽게 구축할 수 있다. 무차원 수(Dimensionless Number)는 단위가 없는 수를 의미하며, 가장 간단한 방법은 기준값으로 나누는 것이다(곽상만, 2016). 본 연구에서는 무차원 수 변수를 dmnl로 표시하였다.

<표 3-3> 장강 내수로 항만 경제 규모(배후지 GDP) 서브모형

| 서브모형 명칭 | 장강 내수로 항만 경제규모 (배후지 GDP) |
|---------|--|
| 저량유량도 | |
| 주요 방정식 | <p>L: $GDP.K = GDP.J + DT.GDP\text{성장}$, KL R: $GDP\text{성장}$, $KL = GDP.K * GDP\text{증가율}$</p> |

주: 각 방정식에서 L은 저량변수, R은 유량변수, A는 보조변수의 기호이다. K는 현재 시점, J는 이전 시점이다. KL은 현재 시간대이고 JK는 이전 시간대이다. DT는 시간대의 표시이다.

2) 물류 수요 예측 모형 변수의 연결

나머지 5개 서브모형의 구축 방식은 경제 규모(배후지 GDP) 서브모형과 동일하다. 이러한 방식에 따라 완전한 장강 내수로 항만 물류 수요 예측 저량 유량 모형을 <그림 3-2>와 같이 구축할 수 있다.

IV. 실증분석

1. 사례선정

본 장에서는 <그림 3-2>에 기반한 시스템 다이내믹스 모델을 중심으로 실증 분석을 수행하였다. 실증 분석을 위해 충청항, 이빈항, 징저우항, 우후항, 난징항, 쑤저우항을 선택하여 총 6개의 장강 내수로 항만 사례를 분석하였다. 본 사례들은 세 가지 그룹으로 구분된다. 첫째 그룹은 장강 내수로 상류에 위치한 충청항과 이빈항이며, 둘째 그룹은 장강 내수로 중류에 위치한 징저우항과 우후항, 마지막으로 세 번째 그룹은 장강 내수로 하류에 위치한 난징항과 쑤저우항이다. <그림 3-2>의 시스템 다이내믹스 모델을 기반으로 각 항만의 특성을 고려하여 모델링 작업을 수행하였다.

장강 내수로 항만물류수요를 정확하게 예측하기 위해서는 각 변수 간의 예측 모델을 구축하는 것이 중요하다. 예측 모델에서는 배후지 경제 규모, 내수로 항만 자동화 정도, 인프라, 환경요소, 외국자본, 도시 건설면적과 같은 변수들이 항만물류수요에 영향을 미치도록 설정하였다.

배후지 경제 규모의 경우 배후지 GDP의 성장과 배후지의 경제 발전 수준이 높아질수록 제품 생산량과 운송에 대한 수요가 증가하며, 이는 항만물류수요에 중요한 영향을 미치게 된다. 배후지 인프라 및 외국자본 투자는 또한 현지 내수로 항만물류수요에 적극적으로 영향을 미칠 수 있다. 환경요소의 경우 배후지 도로 운송 비율이 높을수록 에너지 소비 수요가 증가하여 현지 대기오염 정도가 심해질 수 있다. 이에 대비하여 현지 정부는 대기오염을 개선하기 위해 수로 운송을 촉진하면서 내수로 항만물류수요를 유발하게 된다. 항만물류수요가 지속적으로 성장하는 경우 항만의 자동화 정도는 항만 근로자 수에 따라 결정되며, 항만물류수요의 지속적인 성장에는 부적합한 영향을 미치게 된다. 또한, 항만 근로자 수가 증가하고 인건비가 상승하는 경우에도 항만물류수요의 증가에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 항만의 근로자 수가 감소하는 경우 내수로 항만의 자동화 정도는 향상으로 간주되며, 반대로 항만의 근로자 수가 증가하는 경우 내수로 항만의 자동화 정도는 감소로 간주된다. 이러한 상관 관계는 Vensim의 IF THEN ELSE 함수를 사용하여 정의되었다. 도시 건설면적은 배후지 도시 면적에 따라 결정되며, 배후지 도시 인구가 증가하여 도시 건설면적이 확장되면 내수로 항만을 확장하기 위한 용지가 부족해지므로 내수로 항만물류수요의 지속적인 성장에 불리한 영향을 미치게 된다. 이러한 도시 건설면적과 배후지 내수로 항만물류수요 간의 반대 효과를 반영하기 위해 음의 결정계수를 도입하였다.

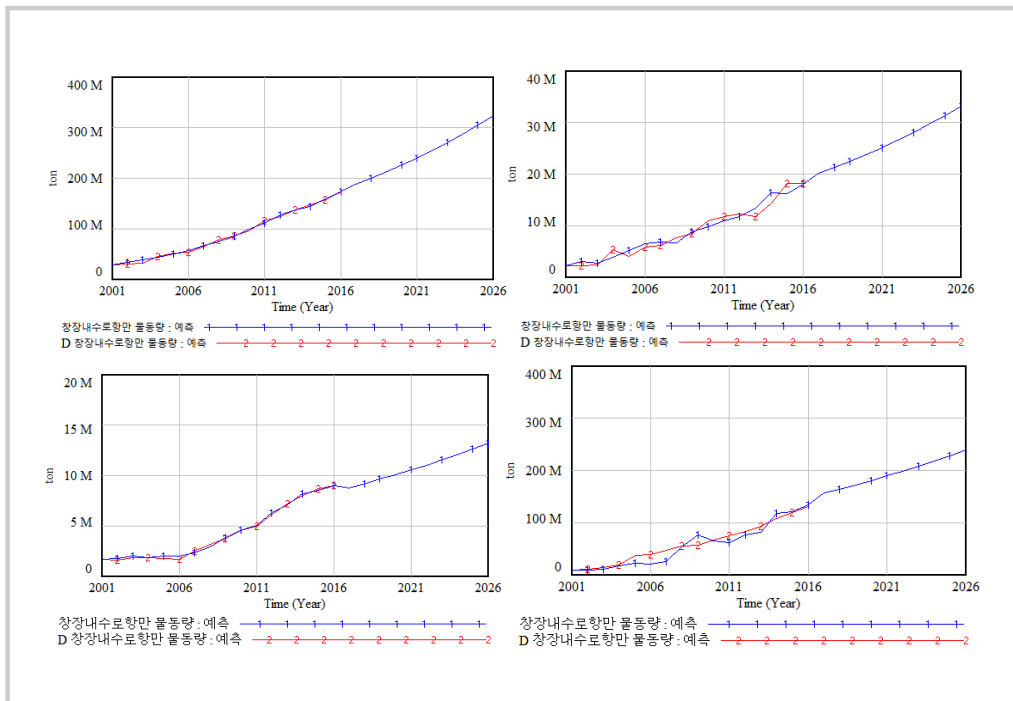
실증 분석에서 물류 수요 예측을 위한 변수들을 목적 변수인 장강 내수로 항만물동량을 기반으로 의미와 용도에 따라 분류하였다. 목적 변수를 결정하는 변수인 배후지 경제 규모, 내수로 항만 자동화 정도, 인프라, 환경요소, 외국자본, 도시 건설면적과 관련된 모델을 구축하였다. 이를 위해 각 변수에 대한 모델과 수식을 정립하였다. 시간적 개념은 2001년부터

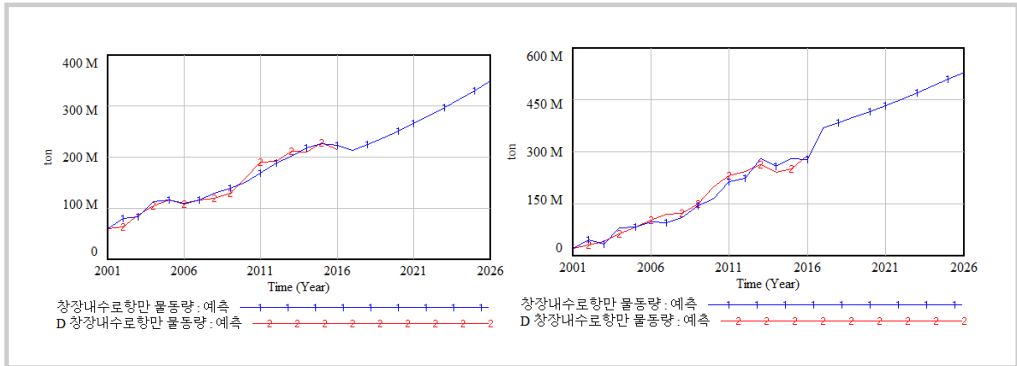
2016년까지의 시계열 데이터를 기반으로 2026년까지의 중기 예측을 수행하였다. 장기적인 물류 수요 예측은 시간이 지남에 따라 정확도가 감소하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 2001년부터 2026년까지의 시뮬레이션 기간을 설정하고, 각 세부 요인들은 실제 데이터를 기반으로 계산되었다. 2016년 이전에는 각 세부 요인의 실제 데이터를 가공하여 전년 대비 증감률을 사용하였고, 2016년 이후에는 각 증감률의 평균값을 사용하여 세부 요인들의 값을 계산하였다. 이를 통해 시간의 흐름에 따라 각 요인의 변화와 초깃값을 비교하여 연별 영향 정도를 계산할 수 있었다. 그리고 장강 내수로 항만물동량의 초깃값과 연별 물류 수요를 예측하였다. 캘리브레이션은 각 계수의 제약조건을 $-1 \leq \alpha < 1$ 로 설정하여 수행되었다. 캘리브레이션은 시스템 다이내믹스 모델의 최적화 구조를 활용하여 변수와 모수의 값을 찾는 기법으로, 실제 데이터와 모델에서 같은 의미로 사용하는 변수 값의 차이를 최소화하도록 계수 값을 조정하는 것이다.

2. 물동량 예측 결과

총 6개의 장강 내수로 항만의 물동량을 예측한 결과는 아래 <그림 4-1>과 같다.

<그림 4-1> 충칭항, 이빈항, 징저우항, 우후항, 난징항, 쑤저우항의 물동량 예측치





시뮬레이션 결과 <그림 4-1>과 같이 2001년부터 2016년까지의 6개 항만의 실제 물동량 값과 예측한 물동량 값은 거의 일치하는 추세를 보이고 있다. 전반적으로 6개 항만은 향후 6년간 물류 수요가 계속해서 증가할 것으로 예측된다.

물동량 예측을 위한 시뮬레이션 모델의 신뢰성을 확인하기 위해 신뢰도 검증을 실시하였다. 이를 위해 오차 분석에서 흔히 사용하는 절대 평균 오차 비율(MAPE: Mean Absolute Percentage Error)을 적용하였다(Lewis, 1982).

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{|A_t - F_t|}{A_t}}{n} \times 100\% \quad \langle \text{식 4-1} \rangle$$

0% ≤ MAPE < 10%, High Accuracy Forecasting

10% ≤ MAPE < 20%, Good Forecasting

20% ≤ MAPE < 50%, Reasonable Forecasting

50% ≤ MAPE, Inaccurate Forecasting

<식 4-1>에서 A_t 는 실측치이고 F_t 는 예측치이다. 관측값의 기간 수는 n 으로 표기한다. MAPE는 상대적인 측정 방법으로 관측치와 실측치 간의 오차를 백분율로 동일하게 가중하기 때문에 다른 관측 수를 가진 예측 모델과의 비교가 가능하다. MAPE 값이 20% 이하일 경우 해당 모델은 좋은 예측 정확도를 가지고 있다고 판단된다(Lewis, 1982).

<그림 4-1>에 따른 충청항, 징저우항, 난징항의 실제 물동량 값과 예측 물동량 값 간의 오차 분석 결과는 각각 4.25%, 4.47%, 5.31%로 매우 높은 예측 정확도를 보였다. 이빈항, 우후항, 쑤저우항의 실제 물동량 값과 예측 물동량 값 간의 오차 분석 결과는 각각 13.23%, 19.59%, 11.84%로 나타났으며, MAPE 값이 20% 이하이기 때문에 좋은 예측 정확도를 가진 시뮬레이션 모델로 평가할 수 있다. 오차 분석 결과를 통해 선정된 6개 장강 내수로 항만의 물동량 예측에 대한 신뢰성이 충분함을 확인할 수 있다.

3. 시나리오 분석

시스템 다이내믹스 시뮬레이션 모델을 활용하여 예측하기 어려운 미래에 대응하기 위해 시나리오 분석과 민감도 분석을 수행할 수 있다. 시나리오 분석은 모델의 사용자가 값을 변경하면서 모델의 결과를 비교하는 방법으로, 난수 발생보다는 난수 발생이 필요한 상황이고 민감한 변수의 분석이 더 중요하다. 시나리오 분석에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 활용하여 모수의 분포에 따른 난수 발생을 통해 주어진 시스템에서의 기대값을 추정한다(곽상만, 2016). 시나리오 분석은 모든 입력 변수의 분포를 알 수 없으므로 선정된 변수에 대한 축소된 시뮬레이션을 진행해야 한다.

장강 지역은 국가 정책 등으로 인해 지역 경제가 활성화되고 있으며, 각 내수로 항만의 물류 수요가 꾸준히 증가할 것으로 예상되었다. 항만의 물류 수요는 배후지 실제 수요와 경제, 문화, 정치 등의 요소에 많은 영향을 받는다. 특히 장강 내수로 항만은 내륙 하천이라는 지역적 특성으로 인해 지역별로 각 영향 요인의 영향 정도가 다를 수 있다. 경제 규모, 내수로 항만 자동화 정도, 인프라, 환경요소, 외국자본, 도시 건설면적 6개 요인에 대해 선정한 6개 장강 내수로 항만의 물류 수요 변화를 살펴보기 위해 항만물류수요 예측에 사용된 요인들의 수치를 조정하여 시나리오 분석을 진행하였다. 6개 요인에 의한 6개 평균 증감률을 $\pm 30\%$ 로 조정하여 Best 및 Worst 시나리오로 분석하였으며, 총 12개 시나리오가 생성되었다. 선정한 6개 항만의 물동량을 시나리오별로 예측하였고, 가장 긍정적인 시나리오와 부정적인 시나리오, 그리고 기타 중요한 시나리오 분석 결과를 <표 4-1>에 요약하였다. 상류 지역에 속하는 충칭항과 이빈항의 시나리오 분석 결과, 충칭항의 경우 배후지 GDP 영향의 시나리오가 가장 큰 변동 범위를 갖는 것으로 나타났다. 이는 충칭항의 물류 수요가 배후지 경제 규모의 영향을 가장 민감하게 받는 것을 의미한다. 충칭항은 중국 정부가 중점적으로 투자하여 성장시키는 내수로 항만으로서, 중국 서부 지역의 중요한 운송 허브 역할을 담당하고 있다. 충칭시라는 거대한 경제 배후지를 가지고 있는 충칭항은 중국 정부에 의해 장강 상류에서 가장 중요한 내수로 항만으로 선정되었다. 따라서 충칭시의 경제 규모가 충칭항의 물류 수요에 가장 큰 영향을 미치는 요소라고 결론 내릴 수 있다. 이빈항의 경우 항만의 자동화 정도(근로자 수)의 영향에 가장 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다. 충칭항을 제외한 상류의 다른 내수로 항만들은 인프라가 상당히 낙후되어 있고, 대부분은 전통적인 인력 하역 방식으로 작업하고 있기 때문에 항만의 자동화 수준이 낮다. 낮은 항만 작업 효율성과 인건비 부담은 이빈항의 물류 수요의 지속적인 성장에 불리한 영향을 미칠 수 있다. 중류 지역에 속하는 징저우항과 우후항은 물류 수요가 배후지 인프라 요인의 변화에 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 장강 중류 지역의 내수로 항만들은 배후지 도시의 교통 인프라 수준이 중국 정부의 중점적인 투자가 이루어지는 하류 지역과 충칭시에 비해 낮은 편이다. 따라서 배후지 교통 인프라 투자는 장강 중류 내수로 항만의 물류 수요 증가에 중요한 역할을 할 것으로 예상

된다. 장강 하류 지역에 속하는 난징항과 쑤저우항의 물류 수요는 도시 건설면적의 영향을 가장 민감하게 받는 것으로 분석되었다. 경제가 발달한 장강 하류 지역은 배후지 도시의 건설 규모가 크고 배후지 도시의 거주 지역이 강을 따라 건설되어 내수로 항만의 확장에 불리한 영향을 미친다. 하류 지역의 내수로 항만들은 항만 용지가 제한되어 있어 항만의 확장이 어렵고 배후지 도시에서 증가하는 물류 수요를 충족시키지 못한다는 점을 반영할 수 있다. 장강 중상류 지역의 항만들은 배후지 환경요소에 비교적 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 선정한 4개 내수로 항만 모두 배후지의 에너지 소비량이 증가하고 환경 오염이 제일 심한 시나리오에서 항만물류 수요가 긍정적인 수치로 나타났다. 장강 중상류 지역은 중국에서도 대기 오염 문제가 상당히 심한 지역으로, 배후지 정부는 시가지의 공기 품질 개선을 위해 차량 5부제 등의 조치를 통해 도로 운송을 제한하고 있다. 동시에 배후지의 교통 운송에 대한 수요를 충족시키기 위해 내수로 운송을 발전시킴으로써 내수로 항만 건설을 지원하고 물류 수요 증가를 촉진하고 있다.

장강 상류, 중류, 하류의 6개 내수로 항만은 모두 배후지 인프라의 영향을 민감하게 받는 것으로 분석되었다. 이를 통해 장강 내수로 항만은 중국 근해 항만에 비해 항만 건설 기간이 짧고 인프라 수준이 낮다는 문제를 인식할 수 있다. 이는 내수로 항만의 발전에 있어 인프라 투자 및 개선의 필요성을 보여준다.

〈표 4-1〉 선정한 내수로 항만의 시나리오 분석 결과

| 구분 | 최대치 시나리오 | 최소치 시나리오 | 기타 중요 시나리오 | |
|----|----------------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | 긍정적 | 부정적 |
| 상류 | 충칭항 GDP 증가율 +30% | GDP 증가율 -30% | 에너지소비량 증감률 +30% 유형자산투자금액 증가율 +30% | 에너지소비량 증감률 -30% 유형자산투자금액 증가율 -30% |
| | 이빈항 물류근로자 증감률 -30% | 물류근로자 증감률 +30% | 에너지소비량 증감률 +30% 외국자본실제이용 증감률 +30% | 에너지소비량 증감률 -30% 외국자본실제이용 증감률 -30% |
| 중류 | 우후항 GDP 증가율 +30% | 유형자산투자 금액 증가율 -30% | 에너지소비량 증감률 +30% 유형자산투자금액 증가율 +30% | 에너지소비량 증감률 -30% GDP 증가율 -30% |
| | 징저우항 유형자산투자 금액 증가율 +30% | 유형자산투자 금액 증가율 -30% | 에너지소비량 증감률 +30% GDP 증가율 +30% | 에너지소비량 증감률 -30% GDP 증가율 -30% |

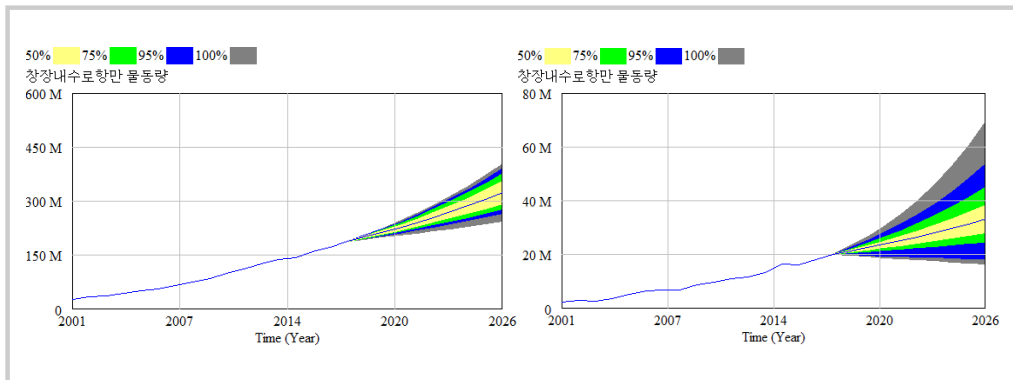
| | | | | | |
|----|------|--------------------|--------------------|--|--|
| 하류 | 난징항 | 도시건설면적 증감률 -30% | 도시건설면적 증감률 +30% | 외국자본실제이용 증감률 +30% 유형자산투자금액 증가율 +30% | 외국자본실제이용 증감률 -30% 유형자산투자금액 증가율 -30% |
| | 쑤저우항 | 도시건설면적 증감률 -30% | 도시건설면적 증감률 +30% | GDP 증가율 +30% 유형자산투자금액 증가율 +30% | GDP 증가율 -30% 유형자산투자금액 증가율 -30% |

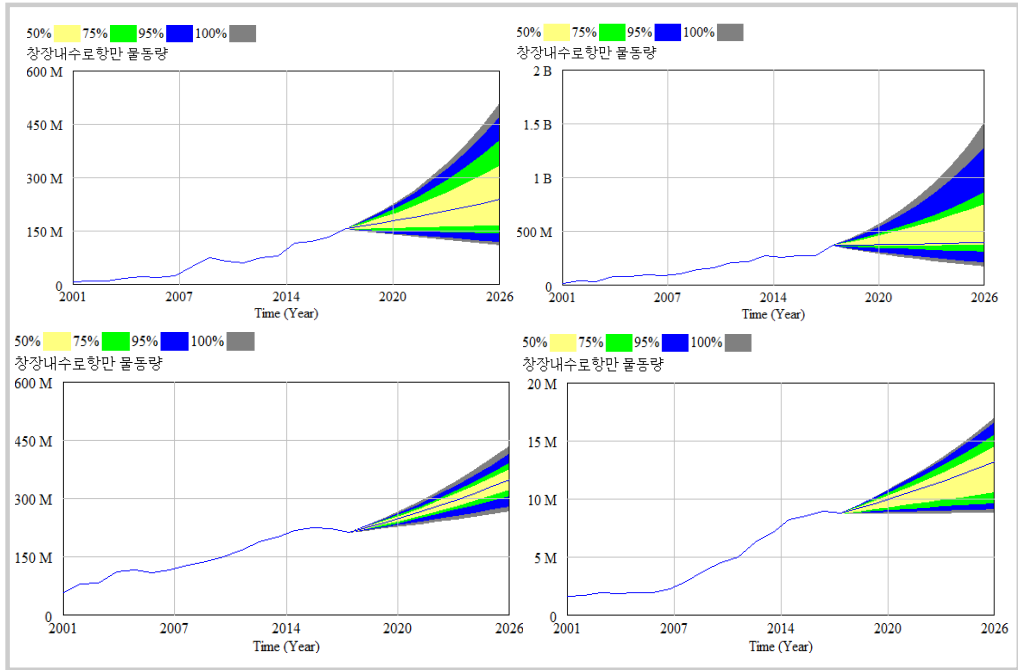
4. 민감도 분석

Vensim DSS에서는 민감도 분석(Sensitivity Test) 기능을 제공하여 주요 상수들에 대한 모델의 건전성을 검증할 수 있다. 민감도 분석은 불확실한 상수에 대해 난수를 이용하여 여러 번의 시뮬레이션을 수행하여 결과의 변동을 관찰하는 것으로 본 연구에서는 단일 변수 민감도 분석(Single value deterministic sensitivity analysis)을 사용했다. 이 방법은 단일 변수에 대해 여러 값을 입력하여 시스템 전체에 어떤 변화가 발생하는지를 확인하는 것이다(곽상만, 2016). Vensim DSS는 일반적으로 200회의 시뮬레이션을 수행할 수 있으며, 다양한 변수에 대한 민감도 분석을 진행할 수 있다.

본 연구에서는 시나리오 분석과 함께 선정한 6개의 장강 내수로 항만의 물류 수요가 6개의 요인에 얼마나 민감한지를 알아보기 위해 단일 변수 민감도 분석을 수행했다. 민감도 분석 결과는 <그림 4-2>와 같다.

<그림 4-2> 총칭항, 이빈항, 징저우항, 우후항, 난징항, 쑤저우항의 민감도 분석 결과





Vensim 민감도 분석에서는 상수 형태의 변수들의 포함 정도를 확률에 따라 4개의 색으로 50%에서 100%까지 4단계로 구분하여 나타낸다. <그림 4-2>에 표시된 그래프는 해당 확률에 해당하는 상수 변수가 200회의 시뮬레이션 중 어느 정도 포함되었는지를 나타낸다. 예를 들어, 200회의 시뮬레이션을 수행한 경우, 50%는 노란색 면의 중앙 100회에서 발생한다는 의미이다. 그래프의 폭이 넓을수록 목적 변수에 대한 상수의 민감도가 높다는 것을 의미한다.

민감도 분석 결과에 따르면, 충칭항과 난징항의 물동량은 6개의 요인의 영향을 어느 정도 받지만, 시나리오 증감률이 $\pm 30\%$ 일 때에도 꾸준히 증가하는 것으로 나타났다. 충칭과 난징은 장강 상류와 하류의 최대 도시로서 거대한 경제 규모를 갖추고 있으며, 각각 서부와 동부의 중심 도시로서 정부의 다양한 정책 지원을 받아 경제가 빠르게 성장하고 있다. 이러한 이유로 충칭시와 난징시는 경제 성장에 따라 지속적인 화물 유입 추세를 보이며, 6개의 영향 요인의 감소율에 크게 반응하지 않는 것으로 나타났다. 이빈항, 오후항, 징저우항, 쑤저우항의 분석 결과에 따르면, 물동량은 6개의 요인에 대해 큰 폭으로 민감하게 반응하는 것으로 분석되었다. 시나리오가 Best일 때의 물동량 증가 폭은 충칭항과 난징항과 차이가 없지만, 감소 폭은 6개의 요인의 영향을 매우 크게 받는 것으로 나타났다. 경제 규모가 비교적 작은 이빈항, 오후항, 징저우항, 쑤저우항은 영향 요인에 더욱 민감하게 반응한다. 이빈항, 오후항, 징저우항, 쑤저우항의 배후지 도시 규모가 작고 중국 정부의 특별한 정책적 지원을 받지 않아 일반적인 경제 요인들에 민감하게 반응한다는 사실을 알 수 있다. 이를 통해 중국 일대일

로 및 내륙지역 경제 활성화 전략의 정책 지원은 주요 항만 몇 개에 집중되어 있으며, 다른 규모가 작은 내수로 항만은 아직 충분한 정책 지원을 받지 못하고 있는 것으로 나타났다.

V. 결론 및 한계점

본 연구는 장강 내수로 항만의 물류 수요에 영향을 미치는 요인을 규명하고, 이를 바탕으로 시스템 다이내믹스 기반의 예측 모델을 개발함으로써, 항만 물류 수요의 정확한 예측을 목적으로 하였다. 충칭항, 이빈항, 징저우항, 우후항, 난징항 및 쑤저우항 등 장강 상류, 중류, 하류의 6개 주요 항만에 대한 물류 수요 예측을 수행하였고, 이를 통해 각 항만과 그 배후지역의 경제 특성과 물류 수요 사이의 연관성을 분석하였다. 본 연구의 분석 결과는 각 지역의 발전 전략과 정책 수립에 중요한 시사점을 제공한다.

본 연구의 핵심 결과는 다음과 같다. 첫째, 6개의 내수로 항만 모두 2026년까지의 중기 예측에서 물류 수요 증가세를 보였으며, 특히 장강 하류의 항만에서는 이 증가율이 더욱 두드러졌다. 둘째, 충칭항의 물류 수요는 배후지의 경제 규모에 가장 크게 영향을 받았으며, 이빈항은 항만 자동화 수준의 변화에 가장 민감하게 반응하였다. 셋째, 장강 중상류 항만의 물류 수요는 배후지의 환경적 요인에 대해 민감한 반응을 보였다. 에너지 소비량 증가와 대기 오염 심화가 물류 수요 증가와 밀접한 연관성을 보였다. 넷째, 장강 중류 항만의 물류 수요는 배후지 인프라 개발에 큰 영향을 받았으며, 장강 하류 항만은 도시 건설 면적의 변화에 가장 민감하게 반응하였다. 마지막으로, 민감도 분석 결과, 큰 도시를 중심으로 한 장강 내수로 항만의 물류 수요는 다양한 영향 요인의 변화에 대해 안정적인 반응을 보였다. 그러나 배후지 도시 규모가 작은 항만은 영향 요인의 변화에 대해 더욱 민감한 반응을 보였다.

본 연구 결과에 기반하여 다음과 같은 시사점을 제시할 수 있다. 첫째, 중국의 일대일로 전략을 통해 중국 정부가 충칭항을 중점적으로 지원한 결과를 볼 수 있다. 이는 중국 국가 정책이 장강 내수로 항만에 큰 영향을 미치는 것을 입증하였다. 따라서, 중국 정부는 충칭항의 중심 역할을 유지하면서 주변 항만의 발전을 정책적으로 지원하고, 이를 통해 충칭항이 보다 효과적으로 보조 역할을 수행할 수 있도록 방안을 마련해야 할 것이다. 둘째, 장강 상류 항만은 충칭항의 보조 역할을 하는 동시에 중하류 항만과의 연결성을 강화하고 입항 산업을 발전시키는 것이 필요하다. 이는 장강 상류 항만이 충칭항과 함께 중요한 항만 네트워크를 구성하는데 기여할 것이다. 셋째, 대다수의 장강 중류 내수로 항만은 입항 산업의 발전이 더디며 인프라 구축이 지연되고 있다. 이에 대한 해결책으로 배후지가 위치한 정부 기관이 인프라에 대한 대규모 투자를 가속화하는 것이 중요하다. 넷째, 내수로 운송은 에너지 소모가 적고 운송량이 많아 친환경적인 운송 방식으로 인식된다. 따라서 생태계가 취약하고 대기 오염이 심한 장강 중상류 지역에서는 장강 내수로 항만 건설을 적극적으로 추진하면, 이는

환경 보호와 도로 운송 부담 완화의 이중효과를 가져올 것이다. 다섯째, 장강 하류 내수로 항만은 저가 경쟁과 중복 건설을 피하고, 기존 용지를 최대한 활용하여 항만 시설을 개선하고 항만 역량을 강화해야 한다. 이를 통해 선박의 체류 시간을 단축하는 등의 전략을 구축할 수 있을 것이다. 여섯째, 중국의 일대일로 등의 지역 발전 전략은 주로 장강 지역의 소수의 주요 내수로 항만에 집중되어 있으며, 규모가 상대적으로 작은 내수로 항만은 이러한 정책 지원을 충분히 받지 못하고 있다. 중국 정부는 장강 내수로 항만에 관한 정책을 수립하며, 약소항만들을 고려하여 균형 있는 발전을 도모해야 할 것이다.

장강 내수로 항만에 대한 화물 처리량 예측과 영향 요인 분석은 한국의 항만 및 이해관계자들에게 중요한 시사점에 제공할 수 있다. 장강 내수로 항만은 강화된 기반 시설과 폭넓은 경제적 배후지를 보유하고 있으며, 특히 하류 지역의 내수로 항만들은 우수한 조건을 갖추고 있다. 한국의 항만들은 장강 내수로 항만과의 직항로 개설을 검토할 수 있다. 내수로 항만들은 상하이항과 경쟁적인 상황을 경험하고 있으며, 장강 하류에 위치한 쑤저우항은 부산항과의 직항로를 개설하였다(Veenstra, 2011; Wu, 2022). 이전 연구(Veenstra, 2011)는 장강 내수로 항만이 항만 지역화(Port Regionalization) 과정을 진행하고 있음을 보여준다. 항만 지역화의 맥락에서, 내수로 항만들은 항만 네트워크의 중요한 구성요소이며, 전체 공급망에서 지역적인 노드로 인식된다(Rodrigue, 2010). 이런 관점에서, 내수로 항만들은 지역 시스템의 핵심 혹은 리더로 인식되는 경향이 있다(Patrick, 2019). 장강 내수로 항만의 항만 지역화(Port Regionalization)가 깊어짐에 따라, 특히 하류 지역의 내수로 항만들은 국제 허브 항만과의 직항 협력을 적극적으로 추진할 것으로 예상된다. 이러한 전망을 고려하여 한국의 항만 및 해운 기업들은 장강 내수로 항만과의 협력을 검토하고, 추가적인 항로 개방을 고려해 볼 필요가 있다.

내수로 항만 개발 전략은 중국의 광범위한 내륙 지역과의 효율적인 연결을 통한 항만 활용도 향상을 추구하고 있다. 이와 유사하게 한국의 항만들도 자신의 항만 서비스를 향상시키기 위해 이러한 접근법을 참고할 수 있다. 당연히 이것은 한국과 중국이 서로 다른 환경과 영향 요인을 가지고 있다는 점을 고려해야 한다. 요지는 단순히 컨테이너 처리량을 늘리는 것이 아니라 교통 네트워크를 확장하고 향상시키는 것에 있다. 화물이 배후지로 효과적으로 이동할 수 있도록 교통로를 개선하고 확장하는데 중점을 뒀다 할 것이다. 철도와 고속도로 네트워크의 향상을 포함하며, 물류 허브와 연계된 효율적인 교통 체계를 구축하는 것을 포함할 수 있다. 장강 내수로 항만은 중국의 중요한 교통 및 물류 허브로서 중국 전체의 경제 활동에 결정적인 역할을 수행한다. 이를 통해 한국의 항만 및 이해관계자들은 중국의 내수로항만 네트워크가 어떻게 운영되고 있는지, 그리고 어떤 종류의 화물이 주로 운송되는지에 대한 이해를 얻을 수 있다. 이러한 이해를 바탕으로, 한국의 항만 및 이해관계자들은 한국의 물류 및 분배 네트워크를 보다 효율적으로 만들기 위한 전략을 개발할 수 있을 것이다. 예를 들어, 중국의 내수로 항만이 어떻게 지역의 기업들과 연결되어 있는지를 이해함으로써, 한국의 항

만과 물류기업들로 하여금 자신들의 물류 연결성을 향상시키는 방법에 대해 파악할 수 있는 것이다. 이를 통해 더 광범위한 배후지역에 서비스를 제공할 수 있게 되고, 이는 항만의 활용도를 향상시키며, 물류 비용을 감소시키는 데 도움이 될 수 있다. 또한 내수로 항만들은 컨테이너화된 화물을 처리하는 능력과 함께 다양한 형태의 화물을 처리할 수 있는 다목적 항만으로서의 역할을 수행하고 있다. 이는 한국의 항만들이 다양한 종류의 화물을 효과적으로 처리할 수 있도록 확장해야 함을 시사할 수 있다. 종합적으로 협력을 통해 두 지역의 모두에서 물류 효율성이 향상될 수 있으며, 이는 각 항만의 국제적인 위치와 경쟁력 강화에 기여할 수 있다.

본 연구는 데이터 수집과 모형 설정 과정에서 몇 가지 한계점을 가지고 있다. 첫째, 본 연구에서 가장 정확한 분석을 위해선 2022년까지의 22개 장강 내수로 항만 데이터를 사용하는 것이 이상적이지만, 데이터 수집에 어려움이 있어 2016년까지의 데이터를 기반으로 예측을 수행하였다. 추후에 최신 데이터를 획득할 때에는 보다 정확하고 객관적인 연구가 가능하리라 판단된다. 둘째, 데이터 제한으로 인해 저장유량도는 인과관계도의 전체를 완벽히 반영하지 못한 점이 한계점으로 지적된다. 후속 연구에서는 저장유량도를 더욱 상세히 반영할 수 있도록 데이터의 보완이 필요하며, 변수 간 인과관계를 보다 정확히 고려해야 할 것이다.

향후 연구 방향은 다음과 같다. 본 연구에서는 객관적인 데이터를 활용해 장강 내수로 항만의 물류 수요 예측 모형을 정량적으로 구축하였다. 그러나 향후 연구에서는 설문조사, 인터뷰 등의 정성적 분석 방법을 활용해 현지 항만 직원이나 전문가의 견해를 수집하고, 이를 통해 정량분석 결과를 보완해야 한다. 장강 내수로 항만들은 주로 자체 배후지의 물류 수요를 충족시키지만, 장강 지역 경제 통합이 가속화되면서 인근 항만과의 일정 수준의 경쟁 관계가 형성되고 있다. 이에 따라 후속 연구에서는 항만 간의 경쟁 관계를 고려하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 전통적인 4단계 교통수요모형의 통행 발생 단계에 초점을 맞추고 장강 내수로 항만 배후지의 사회경제적 지표를 사용하여 각 교통 구역에서 발생하는 통행량을 추정하였다. 그러나 후속 연구에서는 통행량을 각 내수로 항만 간에 분배하는 단계, 운송 수단 선택 단계 및 통행수단별 통행량 배정 단계를 더욱 철저히 고려하고, 이를 통해 물류 수요를 더욱 정확하게 반영해야 할 필요가 있다.

참고문헌

- 곽상만, 유재균(2016), 「시스템다이내믹스 모델링과 시뮬레이션」, 북코리아.
 노진호(2016), 「유라시아 동북지역 물류여건변화에 따른 나진항 수요예측에 관한 연구」, 중앙대학교 대학원 박사학위논문.
 박성배, 김정우, 전상인, 김창욱, 최은정, 이치호, 허용석(2012), 「효과적 수요 예측 방법과

- 사례], 서울: 삼성경제연구소.
- 박성일, 정현재, 전준우, 여기태(2012), “System Dynamics를 활용한 인천항 철재화물 물동량 예측에 관한 연구,” 한국항만경제학회지, 제28권 제2호, pp.75-93.
- 오진호, 우수환(2018), “시스템 다이내믹스를 활용한 제주항 물동량 예측,” 한국물류학회지, 제28권 제3호, pp.29-40.
- Acar, Y. G. and Ardner, E. S.(2012), “Forecasting method selection in a global supply chain,” *International Journal of Forecasting*, Vol.28, No.4, pp.842-848.
- Avinash, S. and Vipul, J.(2013), “A grey approach for forecasting in a supply during intermittent disruptions,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol.26, No.3, pp.1044-1058.
- Bass, F. M.(2004), “Comments on a new product growth for model consumer durables the bass model,” *Management science*, Vol.50, No.12, pp.1833-1840.
- Bowersox, D. J., Closs, D. J. and Cooper, B, M.(2002), “Supply Chain Logistics Management”, *Interfaces*, Vol.33, No.4, pp.79-81.
- Chen, G. F. and Chen, D. N.(2016), “Application of TransCAD in Road Traffic Demand Forecast : Taking Jinjiang Shuanglong Road Project as an Example,” *Heilongjiang Transportation Technology*, Vol.39, No.2, pp.138-140.
- Choi, T. M. and Yu, Y.(2011), “A hybrid SARIMA wavelet transform method for sale S forecasting,” *Decision Support Systems*, Vol.51, No.1, pp.130-140.
- Cullinan, V. I. and Thomas, J. M.(1992), “A comparison of quantitative methods for examining landscape pattern and scale,” *Landscape Ecology*, Vol.7, No.3, pp.211-227.
- De fontenay, C. C. and Gans, J. S.(2005), “Vertical integration and competition between networks,” *Review of Network Economics*, Vol.4, No.2, pp.4-18.
- Forrester, J. W.(1961), *Industrial Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Forrester, J.W.(1969), *Urban Dynamics*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Guan, X. Q., Xing, Y., Ji, L. H., Zhang, Y. F., Liu, Y., Liu, W. D. and Li, X. W.(2017), “Research on Forecast of Urban Bus Passenger Flow Based on Transcad,” *China Intelligent Transportation Association*, pp.812-820.
- Guo, X. C., Xie, S. H., Hu, B.(2001), “Regional logistics demand analysis model and its algorithm,” *Journal of Southeast University*, Vol.31, No.3, pp.24-28.
- Guo, Y. F.(2011), “Operation plan and evaluation of port emergency logistics system,” Master's degree thesis of Wuhan University of Technology.

- Jaipuria, S. and Mahapatra, S. S.(2014), "An improved demand forecasting method to reduce bullwhip effect in supply chains," *Expert Systems with Applications*, Vol.41, No.5, pp.2395-2408.
- Lai, C. L., Lee, W. B. and Ip, W. H.(2013), "A study of system dynamics in just-in-time logistics," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.138(1-3), pp.265-269.
- Lewis, C. D.(1982), *Industrial and business forecasting methods*, London: Butterworths
- Li, L. L.(2006), "*Liao Zhe's research on the development of modern port logistics*," The tenth master's degree thesis of Dalian Maritime University.
- Liu, Z. F., Xiao, S. L.(2001), "Application of Neural Network Method in Water Transport Flow Forecast," *Journal of Institute of Water Transport Science*, Vol.4, pp.18-23.
- Notteboom*, T. E. and Rodrigue, J. P.(2005), "Port regionalization: towards a new phase in port development," *Maritime Policy & Management*, Vol.32, No.3, pp.297-313.
- Nuzzolo, A. and Comi, A.(2014), "Urban freight demand forecasting: A mixed quantity/delivery/vehicle-based model," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol.65, pp.84-98.
- Rodrigue, J.P. and Notteboom, T.(2010). "Foreland-based regionalization: integrating intermediate hubs with port hinterlands", *Research in Transportation Economics*, Vol.27, No.1, pp.19-29.
- Sun, F. Y.(2016), "*Research on port logistics demand forecasting based on system dynamics*," Doctoral thesis of Qingdao University of Technology.
- Sun, Z. G.(2013), "Logistics Demand Forecasting Based on Ant Colony Optimization Support Vector Machine," *Software Technology Algorithms*, Vol.22, No.5, pp.107-110.
- Veenstra, A. and Notteboom, T.(2011), "The development of the Yangtze River container port system", *Journal of Transport Geography*, Vol.19, No.4, pp.772-781.
- Witte, P., Wiegmans, B. and Ng, A. K.(2019), "A critical review on the evolution and development of inland port research", *Journal of Transport Geography*, Vol.74, pp.53-61.
- Wu, Z. and Lee, J.(2022), "Measurement of inland port spatial relationship: a case

study of Yangtze River inland ports”, *Maritime Policy & Management*, pp.1-22.

Xiao, Y. and Liu, J.(2014), “A neuro-fuzzy combination model based on singular R spectrum analysis for air transport demand forecasting,” *Journal of Air Transport 71 Management*, Vol.39, pp.1-11.

Yue, L., He, J., Zhu, W. J. and Tao, L.(2018), “TRANSCAD in Volume of Traffic Assignment Application,” *Journal of Guizhou University of Technology*, Vol.47, No.3, pp.27-32.

A Study on Predicting the Logistics Demand of Inland Ports on the Yangtze River

Zhen Wu
Hyun-Chung Kim

Abstract

This study aims to analyze the factors influencing the logistics demand of inland ports along the Yangtze River and predict future port logistics demand based on these factors. The logistics demand prediction using system dynamics techniques was conducted for a total of six ports, including Chongqing and Yibin ports in the upper reaches, Jingzhou and Wuhan ports in the middle reaches, and Nanjing and Suzhou ports in the lower reaches of the Yangtze River. The logistics demand for all ports showed an increasing trend in the mid-term prediction until 2026. The logistics demand of Chongqing port was mainly influenced by the scale of the hinterland economy, while Yibin port appeared to heavily rely on the level of port automation. In the case of the upper and middle reach ports, logistics demand increased as the energy consumption of the hinterland increased and the air pollution situation worsened. The logistics demand of the middle reach ports was greatly influenced by the hinterland infrastructure, while the lower reach ports were sensitive to changes in the urban construction area. According to the sensitivity analysis, the logistics demand of ports relying on large cities was relatively stable against the increase and decrease of influential factors, while ports with smaller hinterland city scales reacted sensitively to changes in influential factors. Therefore, a strategy should be established to strengthen policy support for Chongqing port as the core port of the upper Yangtze River and have surrounding ports play a supporting role for Chongqing port. The upper reach ports need to play a supporting role for Chongqing port and consider measures to enhance connections with middle and lower reach ports and promote the port industry. The development strategy for inland ports along the Yangtze River suggests the establishment of direct routes and expansion of the transportation network for South Korean ports and stakeholders. It can suggest expanding the hinterland network and building an efficient transportation system linked with the logistics hub. Through cooperation, logistics efficiency can be enhanced in both regions, which will contribute to strengthening the international position and competitiveness of each port.

(Key Words) Yangtze River, Inland Port, Port Logistics Demand, System Dynamics